

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Détection de formation/élimination de dépôt sur substrat solide par interférométrie de coda ultrasonore (CWI)

B. Chen^a, P. Debreyne^b, M. Abdallah^b, O. Khelissa^b, N.-E. Chihib^b, D. Callens^a, P. Campistron^a, G. Delaplace^b et E. Moulin^a

^aUniv. Valenciennes, CNRS, Univ. Lille, YNCREA, Centrale Lille, UMR 8520 - IEMN, DOAE, F-59313 Valenciennes, France

^bInstitut National de Recherche Agronomique, 369 Rue Jules Guesde, 59650 Villeneuve-D'Ascq, France
bowei.chen@univ-valenciennes.fr

Résumé

Dans les industries agroalimentaires, l'encrassement des parois d'équipement de transformation au contact de produits alimentaires induit des problèmes de sécurité de transformations. Des nettoyages fréquents sont nécessaires pour limiter ces contaminations de surface. Un contrôle précis de l'encrassement est nécessaire afin d'appliquer des protocoles de nettoyage éco-efficients. Actuellement, cette inspection ne peut se faire visuellement car les équipements sont fermés et peu de techniques de contrôle non-destructives sont adaptées au suivi de formation ou d'élimination d'un dépôt. Afin de résoudre cette problématique l'utilisation d'une technique de CWI ultrasonores a été tentée. La CWI est une technique largement utilisée pour détecter des fluctuations de propriétés d'un milieu. La coda est une onde qui résulte d'interférences complexes suite à de multiples réflexions/ diffusions. Une onde de coda est reproductible, si aucun changement ne se produit dans le milieu, les signaux de coda sont identiques, sinon certains trajets d'ondes sont modifiés, et les signaux de coda se révèlent différents. Jusqu'ici, malgré son intérêt, la coda n'a pas encore été testée et analysée pour détecter la formation ou l'élimination d'un dépôt sur une paroi solide. Dans cette étude, le système à sonder est un milieu liquide limité par des surfaces solides, sur l'une desquelles un encrassement est en cours de formation ou d'élimination. Le coefficient de décorrélation des CWI est utilisé comme indicateur de changement de propriétés du système. Ce coefficient représente le niveau de ressemblance entre le signal enregistré à instant t , et celui enregistré à instant initial. Expérimentalement, nous avons testé la méthode sur i) un processus de nettoyage d'un dépôt de cire, dans un canal de section rectangulaire parcouru par de l'eau chaude en écoulement. ii) une contamination d'acier inox par un biofilm bactérien. Les résultats obtenus montrent que la méthode CWI est performante pour effectuer le suivi des processus.

1 Introduction

Dans les industries agroalimentaires, l'encrassement des parois d'équipement de transformation au contact de produits alimentaires induit des problèmes de qualité des aliments et de sécurité de transformations [1]. Des nettoyages fréquents sont nécessaires pour limiter ces contaminations de surface par des souillures. Afin d'appliquer des protocoles de nettoyage éco-efficients, un contrôle précis de l'état d'encrassement de l'installation et de l'état de propreté de la surface est nécessaire.

Malheureusement, cette inspection ne peut se faire visuellement car les équipements sont fermés et peu de techniques de contrôle non-destructives sont adaptées au suivi de formation ou d'élimination d'un dépôt sur une surface [2]–[4]. La technique de détection exige une capacité de surveillance en ligne non invasive [5]. Afin de résoudre cette problématique l'utilisation d'une technique d'Interféromètre de l'Onde Coda (CWI pour Coda Wave Interferometry) par ondes ultrasonores a été tentée.

Le CWI fût d'abord utilisé dans le domaine sismique [6]–[8]. Plus récemment, cette technique d'ECND (Évaluation et Contrôle Non-Destructif) fût utilisée dans quelques autres domaines pour sonder et détecter des fluctuations de propriétés d'un système [9]–[16]. L'onde de coda est la partie de l'onde arrivant après l'onde directe (Figure 1) [8]. Elle est constituée d'ondes, qui, suite à de multiples réflexions/diffusions ont séjournées suffisamment longtemps dans un milieu pour que des phénomènes complexes d'interférences se soient mis en place [17]. En négligeant l'influence du bruit, une onde de coda est reproductible, quand aucun changement ne se produit dans le milieu. Par contre, quand un changement apparaît dans le milieu, certains trajets d'ondes sont modifiés, et les signaux de coda se révèlent différents. Jusqu'ici, malgré son intérêt, l'onde de coda n'a pas encore été testée et analysée pour détecter la formation ou l'élimination d'un dépôt sur une paroi solide.

Nous présentons, dans cette étude, une technique de suivi de l'état d'encrassement qui met à profit la grande

sensibilité des ondes de coda au milieu de propagation. Expérimentalement, nous avons testé la méthode sur i) un processus de nettoyage d'un dépôt de cire, dans un canal de section rectangulaire parcouru par de l'eau chaude. ii) un processus d'encrassement bactérien menant à la croissance d'un biofilm sur une paroi tubulaire.

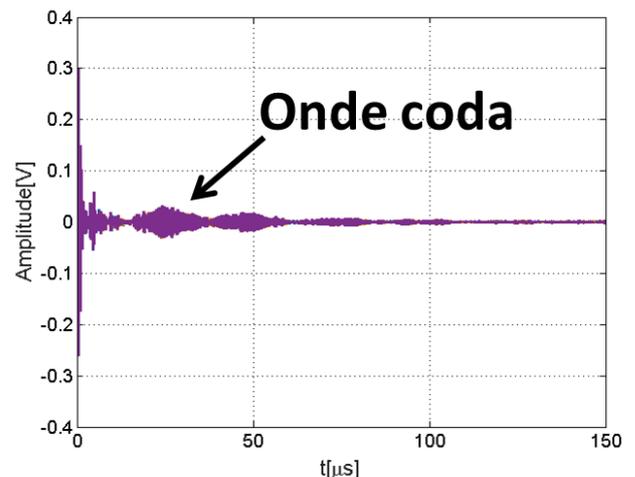


Figure 1: Onde coda localisée entre l'onde directe et le bruit.

2 Méthodologie et expériences

2.1 Principe de la méthodologie

L'onde coda est constituée de l'ensemble des ondes réfléchies et propagées par tous les trajets possibles entre un émetteur et un récepteur. Par conséquent, les paramètres usuels (coefficients de réflexion, temps de propagation, etc.) sont difficiles à définir ou à exploiter. Nous proposons d'utiliser le coefficient de décorrélation des ondes de coda ultrasonores comme indicateur de perturbation des propriétés d'un échantillon. Ce coefficient représente le

niveau de ressemblance entre le signal à un instant t , et celui enregistré à l'instant initial. L'expression du coefficient de décorrélation $D_{1,2}$ des signaux s_1 et s_2 est

$$D_{1,2} = 1 - \frac{r_{s_1,s_2}}{\sqrt{r_{s_1,s_1}r_{s_2,s_2}}} . \quad (1)$$

Où $r_{x,y}$ est l'intercorrélation entre x et y .

Concrètement, s_1 représente la coda du signal de référence mesuré à l'instant initial et s_2 celle du signal mesuré un instant plus tard. Ces deux signaux sont déduits des signaux mesurés par filtrage fréquentiel puis temporel. Ils sont donc filtrés dans la même bande fréquentielle et fenêtrés dans la même fenêtre temporelle. Comme l'intercorrélation r_{s_1,s_2} est normalisée par les autocorrélations des signaux, la valeur du coefficient de décorrélation est toujours comprise dans l'intervalle $[0 \ 2]$. Dans le cas où les milieux de propagation entre les deux mesures n'ont subi que peu de perturbations, les signaux s_1 et s_2 sont très proches et la valeur du coefficient de décorrélation est très faible. Des perturbations plus importantes entraînent des différences plus grandes entre les deux coda et une augmentation du coefficient de décorrélation qui peut atteindre sa valeur maximale de 2.

2.2 Nettoyage de la cire sur un substrat en inox

Une procédure d'élimination d'un dépôt de cire par écoulement d'eau chaude est utilisée pour simuler un nettoyage. Un morceau de cire de dimensions contrôlées est déposé sur la surface interne d'une canalisation rectangulaire en inox. Un schéma du système de nettoyage et d'acquisition est présenté dans la figure 2.

Le nettoyage de la cire est effectué par une circulation d'eau chaude à débit constant. La température de l'eau circulant est stabilisée à 70 °C par un bain thermostatique. 2 thermomètres sont utilisés pour surveiller la température d'entrée et de sortie du canal afin de s'assurer que la température y est stable.

Les mesures des signaux de coda ultrasonores sont réalisées par transducteurs piézoélectriques. Ils sont composés d'un émetteur et d'un récepteur individuels (Figure 4). Un générateur d'onde (Keysight 33600A) envoie aux transducteurs un signal sinusoïdal d'une période de à 10MHz. Les signaux reçus par les récepteurs sont acquis par une carte d'acquisition (PicoScope 5000 Series). Le générateur est synchronisé avec la carte d'acquisition. Un des deux transducteurs est installé face à la cire afin de suivre son nettoyage, et l'autre transducteur est situé en amont en tant que témoin, afin de suivre une éventuelle dérive du système. Les acquisitions sont exécutées toutes les 15 secondes.

La mesure dure 3 heures à partir du début de la circulation de l'eau chaude. Ensuite, la canalisation est refroidie par une circulation d'eau froide. Finalement, le canal rectangulaire est ouvert pour vérifier le résultat du nettoyage. Il a été établi par vérification visuelle que cette procédure permettait de correctement nettoyer le canal, la totalité de la cire ayant été ôtée du substrat.

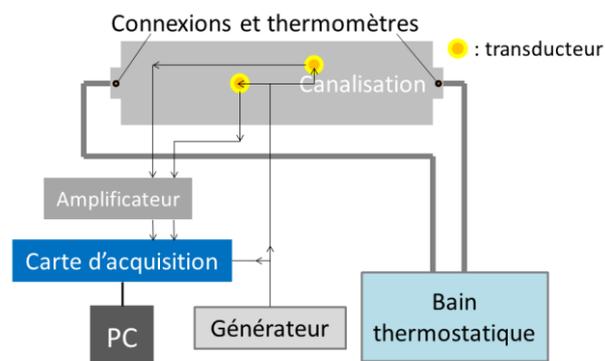


Figure 2: Schéma du système d'acquisition acoustique et de la circulation de l'eau chaude.

2.3 Formation du biofilm sur un substrat en inox

La présence de bactéries dans un milieu nutritif peut générer la croissance d'un biofilm sur un substrat. Un récipient cylindrique est utilisé pour contenir le milieu et les bactéries (Figure 3). Ce récipient est stérilisé et rendu étanche avant la manipulation. La solution de nutriments et de bactéries (*Staphylococcus aureus*) est injectée manuellement dans le récipient en environnement stérile. Ensuite, le récipient est placé dans une cuve thermostatique à la température de 30 °C. Comme la formation du biofilm est lente, la mesure dure environ 2 jours. En parallèle, un récipient identique contenant seulement la solution nutritive est également suivi. Comme il n'y a pas de bactéries dans ce deuxième récipient, la surface reste propre, et le milieu n'évolue pas pendant ces 2 jours. Cette mesure est considérée comme une mesure témoin. Les dispositifs d'acquisition et les transducteurs sont les mêmes que ceux utilisés pour le nettoyage de la cire (Figure 2). Les acquisitions sont exécutées toutes les 5 minutes. Afin de minimiser l'influence du bruit, le résultat d'acquisition est moyenné sur 100 signaux. Pendant l'acquisition des signaux ultrasonores, une surveillance de la température par un thermomètre à l'intérieur de la cuve est effectuée. Les acquisitions de température et des signaux sont synchronisées.

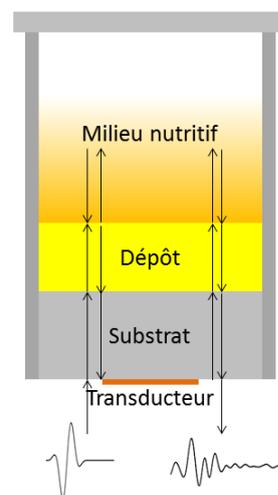


Figure 3: Schéma du récipient utilisé pour créer le biofilm.

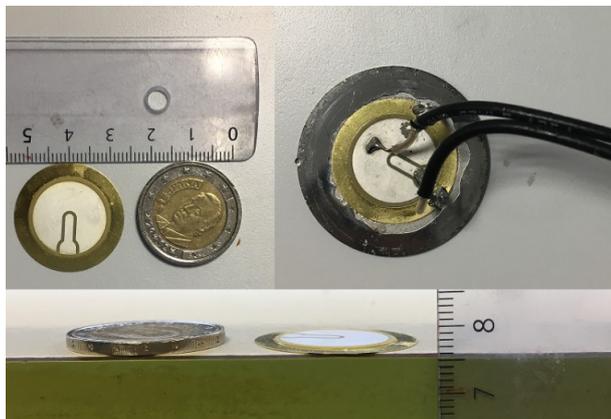


Figure 4: Photo d'un transducteur piézoélectrique identique à ceux utilisés pour les mesures.

3 Résultats et discussion

3.1 Nettoyage de la cire dans la canalisation

Pendant 3 heures de nettoyage, 720 signaux sont mesurés par capteur. En négligeant les premières 15 minutes nécessaires à la stabilisation du système, les données de 2,75 h (660 signaux par capteur) sont utilisées dans le traitement réalisé par la suite. Le premier signal, c'est-à-dire le signal acquis 15 minutes après le départ de la circulation d'eau, est choisi comme signal de référence, et la figure du coefficient de décorrélation en fonction de l'instant de mesure est obtenue par comparaison du signal de référence avec les autres signaux.

En raison de la faible durée temporelle du signal d'émission, les spectres des signaux reçus sont large bande. Afin de s'adapter à la géométrie du dispositif, la bande fréquentielle 2MHz - 5MHz est choisie. Quatre fenêtres temporelles permettent de choisir quatre parties de la coda pour lesquelles coefficient de décorrélation est calculé. La largeur des fenêtres est de 10 μ s afin de contenir plus de 10 périodes de la plus basse fréquence (2 MHz) de chaque signal. Le centre des fenêtres est positionné à 9 μ s, 12 μ s, 15 μ s et 18 μ s.

Les valeurs du coefficient de décorrélation obtenues pour le signal témoin sont toujours très petites (Figure 5). En revanche, le coefficient de décorrélation pour le signal de mesure augmente pendant le nettoyage (Figure 6) s'il est calculé assez tard dans la coda, pour des fenêtres centrées à plus de 15 μ s par exemple. Le fait que le coefficient de décorrélation du signal témoin reste très faible montre que le système ne subit pas de dérive et qu'il n'y a pas d'autre influence que le changement d'état de la cire sur le coefficient de décorrélation du signal de mesure. Celui-ci se stabilise en fin d'expérience (environ 2,2h), quand la cire est totalement éliminée.

La Figure 6 met en évidence l'effet de la position de la fenêtre temporelle. Les courbes obtenues pour des fenêtres placées plus tôt dans les signaux, centrées sur 9 μ s et 12 μ s, sont relativement stable et les valeurs du coefficient de décorrélation sont faibles. Dans ces conditions, le suivi du nettoyage n'est pas facile car il y a peu de différence entre les courbes témoins et les courbes de surveillance. Ceci s'explique par le fait que plus la fenêtre est placée tôt, plus le signal analysé est proche de l'onde directe, qui est très

peu affectée par une si faible modification du milieu de propagation. Par contre, l'augmentation de la sensibilité de la mesure du coefficient de décorrélation avec les fenêtres centrées sur 15 μ s et 18 μ s est évidente, et permet un suivi du nettoyage. La séparation des courbes obtenues par les différentes fenêtres montre qu'il est possible de choisir la sensibilité de la mesure. De plus, aucune influence du choix de la fenêtre n'apparaît sur les courbes témoins.

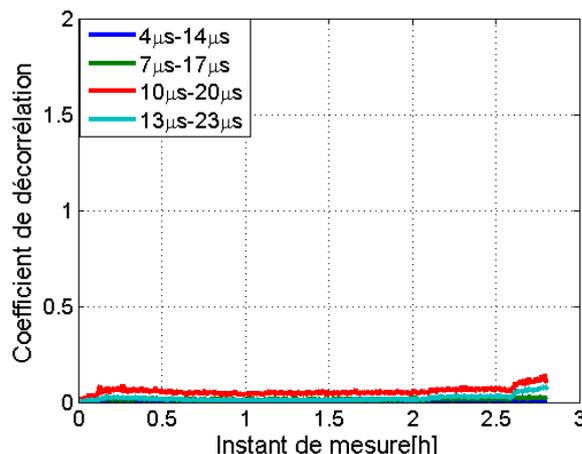


Figure 5: Coefficient de décorrélation de la mesure témoin (sans la cire) avec différentes fenêtres temporelles : 4 μ s-14 μ s (bleu), 7 μ s-17 μ s (vert), 10 μ s-20 μ s (rouge), 13 μ s-23 μ s (cyan) ; Bande fréquentielle : 2MHz – 5MHz.

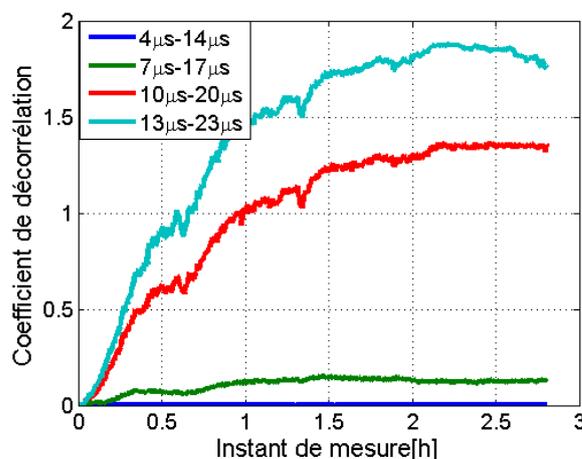


Figure 6: Coefficient de décorrélation de la mesure de la surveillance de nettoyage (avec la cire) avec différentes fenêtres temporelles : 4 μ s-14 μ s (bleu), 7 μ s-17 μ s (vert), 10 μ s-20 μ s (rouge), 13 μ s-23 μ s (cyan) ; Bande fréquentielle : 2MHz – 5MHz.

3.2 Formation du biofilm

La formation du biofilm est réalisée dans un environnement fermé et stérile pendant 2 jours au cours desquels 600 signaux sont mesurés sur chaque capteur. La bande fréquentielle et la fenêtre temporelle utilisée dans cette manipulation sont différentes de celles utilisées lors du nettoyage de la cire car les géométries des dispositifs sont totalement différentes. Nous avons obtenu une sensibilité maximale en se plaçant dans la bande fréquentielle de 7MHz – 13MHz et une fenêtre temporelle de 12 μ s - 17 μ s.

Dans les *Figure 7* et *Figure 8*, la courbe témoin reste toujours stable, le coefficient de décorrélation restant quasiment nul. Par contre, le coefficient de décorrélation du signal de mesure augmente avec la formation du biofilm. Il a été vérifié que pour notre protocole expérimental, des colonies de *Staphylococcus aureus* adhère au substrat dès l'instant initial, que le nombre de bactéries double toutes les 1,5h, et que l'épaisseur finale du biofilm est de l'ordre de 50 μ m. À cause d'une évolution d'épaisseur très faible au début de la mesure, la variation de la valeur du coefficient de décorrélation n'est pas très élevée lors des 15 premières heures (*Figure 7*). Néanmoins, la différence entre la courbe témoin et la courbe du biofilm est notable.

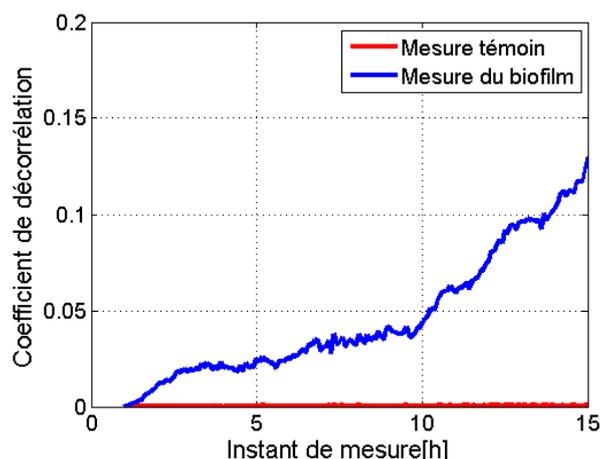


Figure 7: Coefficient de décorrélation de l'essai avec biofilm (courbe bleu) et de la mesure témoin (courbe rouge) dans les 15 premières heures ; Bande fréquentielle : 7MHz – 13MHz ; Fenêtre temporelle : 12 μ s - 17 μ s.

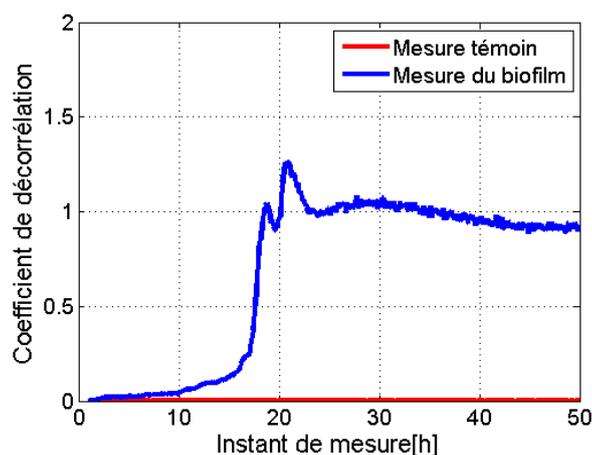


Figure 8: Coefficient de décorrélation de l'essai avec biofilm (courbe bleu) et de la mesure témoin (courbe rouge) pendant 50 heures ; Bande fréquentielle : 7MHz – 13MHz ; Fenêtre temporelle : 12 μ s - 17 μ s.

Ensuite, autour de 20 heures le coefficient de décorrélation sur le signal de mesure avec biofilm augmente rapidement et se stabilise autour de la valeur 1 (*Figure 8*). La capacité, par cette méthode, à suivre la formation d'un biofilm peut être vérifiée par la différence de comportement évidente entre la courbe issue de la mesure sur biofilm et la courbe témoin.

5 Conclusion

Dans ce papier, une nouvelle méthode de suivi d'encrassement est discutée. L'utilisation de l'onde de coda a permis d'obtenir une sensibilité de mesure suffisante et fût assez robuste pour en effectuer le suivi dans le cas d'un nettoyage et d'un dépôt. Une variation d'épaisseur de biofilm de *Staphylococcus aureus* de l'ordre de 50 μ m a été détectée après 2 jours de croissance. Dans un travail ultérieur il semble possible de faire évoluer la méthode afin d'obtenir des paramètres plus quantitatifs sur les perturbations détectées.

La sensibilité de la méthode peut être ajustée par l'opérateur. Ainsi l'utilisation des ondes de coda a un réel potentiel dans des applications de détection de faibles perturbations d'un milieu de propagation

Comme le coefficient de décorrélation, qui est relié à l'état de l'échantillon, est un paramètre quantitatif. La quantification de variation de l'état est faisable dans un travail ultérieur.

Remerciements

Cette recherche est financée par la région Hauts-de-France et par l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC). Le travail est effectué à l'IEMN-DOEA (Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie - Département Opto-Acousto-Electronique) et en collaboration avec l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique).

Références

- [1] J. Taborék, T. Aoki, R. B. Ritter, J. W. Palen, et J. G. Knudsen, « Fouling: the major unresolved problem in heat transfer », 1972.
- [2] E. Wallhäußer, M. A. Hussein, et T. Becker, « Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry », *Food Control*, vol. 27, n° 1, p. 1-10, sept. 2012.
- [3] N. Collier, « Développement d'un outil ultrasonore de caractérisation des propriétés d'adhésion de milieux modèles avec application aux dépôts laitiers », Lille 1, 2014.
- [4] G. Mercere, H. Palsson, et T. Poinot, « Continuous-Time Linear Parameter-Varying Identification of a Cross Flow Heat Exchanger: A Local Approach », *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 19, n° 1, p. 64-76, janv. 2011.
- [5] N. Alvarez, G. Daufin, et G. Gésan-Guiziou, « Recommendations for rationalizing cleaning-in-place in the dairy industry: Case study of an ultra-high temperature heat exchanger », *J. Dairy Sci.*, vol. 93, n° 2, p. 808-821, févr. 2010.
- [6] K. Aki, « Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves », *J. Geophys. Res.*, vol. 74, n° 2, p. 615-631, janv. 1969.
- [7] R. Snieder, « Coda Wave Interferometry for Estimating Nonlinear Behavior in Seismic Velocity », *Science*, vol. 295, n° 5563, p. 2253-2255, mars 2002.

- [8] K. Aki et B. Chouet, « Origin of coda waves: Source, attenuation, and scattering effects », *J. Geophys. Res.*, vol. 80, n° 23, p. 3322–3342, août 1975.
- [9] A. A. Grêt, « Time-lapse monitoring with coda wave interferometry », Colorado School of Mines, 2004.
- [10] B. Hilloulin *et al.*, « Small crack detection in cementitious materials using nonlinear coda wave modulation », *NDT E Int.*, vol. 68, p. 98–104, déc. 2014.
- [11] Y. Zhang, « Contrôle de santé des matériaux et structures par analyse de la coda ultrasonore », Université du Maine, 2013.
- [12] E. BALAA, A. Le Duff, G. Plantier, et R. El Guerjouma, « Interférométrie par onde de coda: effet de la température sur la propagation d'ondes acoustiques dans une plaque d'aluminium », in *XXIIIe colloque GRETSI (traitement du signal et des images), Dijon (FRA), 8-11 septembre 2009*, 2009.
- [13] R. Snieder, « Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase », *Phys. Rev. E*, vol. 69, n° 4, p. 046610, avr. 2004.
- [14] T. Planès et E. Larose, « A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete », *Cem. Concr. Res.*, vol. 53, p. 248–255, nov. 2013.
- [15] S. C. Stähler, C. Sens-Schönfelder, et E. Niederleithinger, « Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 129, n° 4, p. 1945–1952, avr. 2011.
- [16] R. Zhou, L. Huang, J. T. Rutledge, M. Fehler, T. M. Daley, et E. L. Majer, « Coda-wave interferometry analysis of time-lapse VSP data for monitoring geological carbon sequestration », *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 4, n° 4, p. 679–686, juill. 2010.
- [17] R. Snieder, « The Theory of Coda Wave Interferometry », *Pure Appl. Geophys.*, vol. 163, n° 2–3, p. 455–473, mars 2006.