

Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

SUIVI DE LA PRISE DU BÉTON PAR INTERFÉROMÉTRIE DE LA CODA ULTRASONORE

FOLLOWING OF THE CONCRETE PRISE BY ULTRASONIC INTERFEROMETRY CODA

**Rita-Maria GHANTOUS^(a,c*), Odile ABRAHAM^(a), Yuxiang ZHANG^(a,b),
Claude BOULAY^(a), Vincent TOURNAT^(b), Olivier DURAND^(a)**

a. LUNAM Université, IFSTTAR, MACS, CS4, F-44344 Bouguenais Cedex, France

b. LUNAM Université, LAUM, CNRS UMR 6613, Université du Maine, Av. O. Messiaen,
72085 Le Mans Cedex 9, France

c. CEA, DEN, DPC, SECR, Laboratoire d'Etude du Comportement des Bétons et des Argiles,
F-91191 Gif sur Yvette cedex, France.

* auteur correspondant : ritamaria.ghantous@cea.fr

RÉSUMÉ

Les propriétés du béton au jeune âge, son durcissement et les phases de sa prise, influent sur les propriétés de toute la structure durant toute sa vie. Des méthodes ultrasonores traditionnelles permettent le suivi de la prise en se basant sur des signaux basses fréquences afin de limiter l'atténuation due notamment à la diffusion des ondes par les granulats. À l'inverse des méthodes ultrasonores traditionnelles utilisant les ondes cohérentes [1], l'interférométrie de la CODA (CWI – Coda Wave Interferometry) repose sur les champs ultrasonores diffusés permettant une sensibilité accrue aux variations de la microstructure du béton. Dans cet article une caractéristique énergétique de la CODA [2] est utilisée pour suivre la prise du béton et éventuellement remonter en continu au coefficient de Poisson du matériau dès lors que la vitesse des ondes de compression est mesurée. Dans cet article des essais CWI ont été réalisés sur une formulation de béton déjà largement étudiée dans la littérature [1]. Le dispositif expérimental mis au point a permis l'enregistrement de mesures viables dès 8h après le coulage. Toutefois l'interprétation des mesures CWI ne coïncident avec les résultats classiques qu'environ 20h après le coulage. L'existence d'une variation spatiale de

l'évolution temporelle de la prise dans les éprouvettes testées est avancée pour expliquer les différences obtenues aux premières heures.

Dans cet article, l'appareillage et les conditions d'essais sont décrits, puis les résultats sont présentés et discutés.

ABSTRACT

The properties of concrete at early age, its hardening and setting phases, influence the properties of the whole structure throughout its life. Traditional ultrasonic methods make possible the following of the concrete setting based on low frequency signals, in order to limit the attenuation mainly due to the scattering of waves by the aggregates. In contrast to traditional methods using coherent ultrasonic waves [1], the Interferometry of Coda Wave (CWI), based on the diffused ultrasonic field, makes possible an increase in sensitivity to changes in the microstructure of the concrete. In this paper an energy characteristic of the CODA [2] is used to track the concrete and deduce continuously its Poisson's ratio based on additional measured compression wave velocity data. In this article, CWI tests were performed on a concrete formulation already widely studied in

the literature [1]. An experimental device is developed to register viable measures 8 hours after casting. However, the interpretation of CWI measurements does not coincide with the classical results until 20 hours after pouring. The existence of a spatial variation of the temporal evolution of the setting in the tested specimens is proposed to explain the differences obtained in the early hours.

In this article, the apparatus and the test conditions are described. Finally, the results are presented and followed by a discussion.

Mots-clés : Prise du béton, onde CODA, interférométrie de la CODA, atténuation, fréquence.

* * *

1. INTRODUCTION

On sait que le temps de prise du béton est un paramètre crucial pour le progrès de la construction et pour le contrôle de sa qualité. Lorsque le temps de prise est connu, les temps de mélange, de transport, du moulage peuvent être optimisés.

Des méthodes ultrasonores traditionnelles permettent le suivi de la prise en se basant sur des signaux basses fréquences afin de limiter l'atténuation due notamment à la diffusion des ondes suite à leur interaction avec les hétérogénéités du béton. Par opposition avec les méthodes traditionnelles utilisant seulement les ondes cohérentes (de quelques dizaines de kHz), l'interférométrie de la CODA utilisent des fréquences élevées (de quelques centaines de kHz) et sur le champ ultrasonore diffusé présentant une sensibilité plus grande à la variation de la microstructure du béton.

Une étude visant à l'utilisation de la CODA afin de suivre la prise du béton et son coefficient de Poisson est décrite ci-après.

2. OBJECTIFS

Cette étude possède deux objectifs. Le premier est l'évaluation du potentiel de la CODA dans le suivi de la prise du béton. Le deuxième objectif est de valider expérimentalement, en suivant la prise du béton, une formule théorique d'équirépartition de l'énergie de la CODA [3] avec V_p la vitesse de l'onde longitudinale et V_s la vitesse de l'onde transversale (équation 1).

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_s^3}{2V_p^3 + V_s^3} \frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{2V_p^3}{2V_p^3 + V_s^3} \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (1)$$

Une étude menée dans [4], sur le comportement du béton au jeune âge, constitue la référence à laquelle seront comparés les résultats obtenus par la CODA ultrasonore. Les fréquences utilisées pour la CODA sont de l'ordre de 500 kHz. Grâce à la diffusion des ondes sur les granulats les distances de propagation sont grandes et permettent de mesurer une variation faible, en relatif, de la vitesse de pro-

pagation des ondes dans le béton. Cette variation dépend de la variation de vitesse des ondes longitudinales en une certaine proportion X_1 et de celle des ondes transversales en une proportion X_2 , où X_2 est significativement supérieure à X_1 [5]. Dans la suite, on compare cette variation de vitesse relative mesurée par la CODA à celle obtenue par les essais ultrasonores, obtenus avec la méthode Freshcon [4], en se basant sur la valeur de la vitesse des ondes P et S. Cette comparaison permet de vérifier si les objectifs cités plus haut ont été atteints.

3. MATÉRIAUX UTILISÉS

La formulation du béton utilisée dans la suite (Tableau 1) correspond à celle utilisée dans [4].

| Composition | Masse (Kg/m ³) |
|-------------------------|----------------------------|
| CEMI 52.5 N PMES CP2 | 340 |
| Sand (Bernières 0/4) | 739 |
| Gravel (Bernières 8/22) | 1072 |
| Total water | 184 |

Tableau 1: Formulation du béton

4. PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Le mélange à étudier (béton ordinaire) est coulé dans un moule cylindrique de 11 cm de diamètre et de 22 cm de hauteur. Les mesures sont réalisées entre deux capteurs. Un capteur se comporte comme source et l'autre comme récepteur. Ces capteurs enregistrent les ondes P et les ondes S.

Le montage de la Figure 1 a été finalement retenu après l'échec d'une série de tentatives de montages expérimentaux. Dans cette expérience, les capteurs sont collés directement sur la surface supérieure du béton par l'intermédiaire d'une colle HBM. Le collage de ces capteurs n'est possible que 6 heures après le coulage. Un film alimentaire sur la surface du matériau permet d'éviter l'évaporation de l'eau de gâchage. Le dispositif d'acquisition de la Figure 2 comporte :

- Un générateur de signaux et un amplificateur pour l'excitation de l'émetteur (balayage de 200 à 800 KHz)
- Deux transducteurs piézo-électriques identiques
- Un préamplificateur pour le transducteur de réception
- Un PC muni d'une carte acquisition : il assure le pilotage de la mesure, le transfert des données vers un fichier de mesures.

5. EXPLOITATION DES MESURES

5.2. Suivi de la prise par la CODA ultrasonore

Les étapes permettant l'obtention de la variation relative de la vitesse dans le béton sont :

1. Corrélation signal-source.

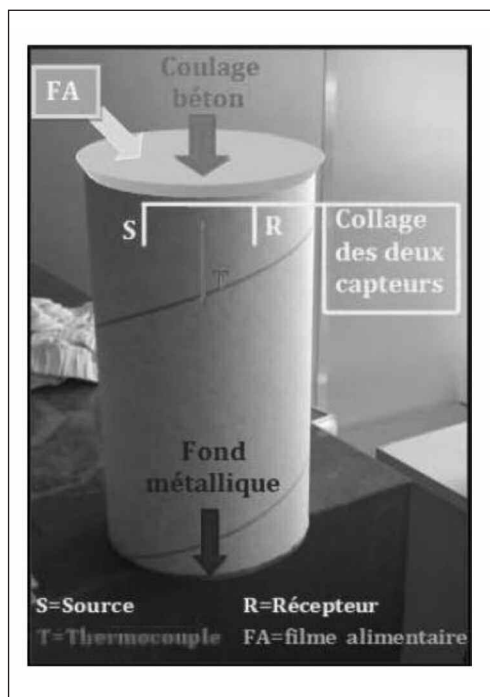


Figure 1 : Disposition des capteurs

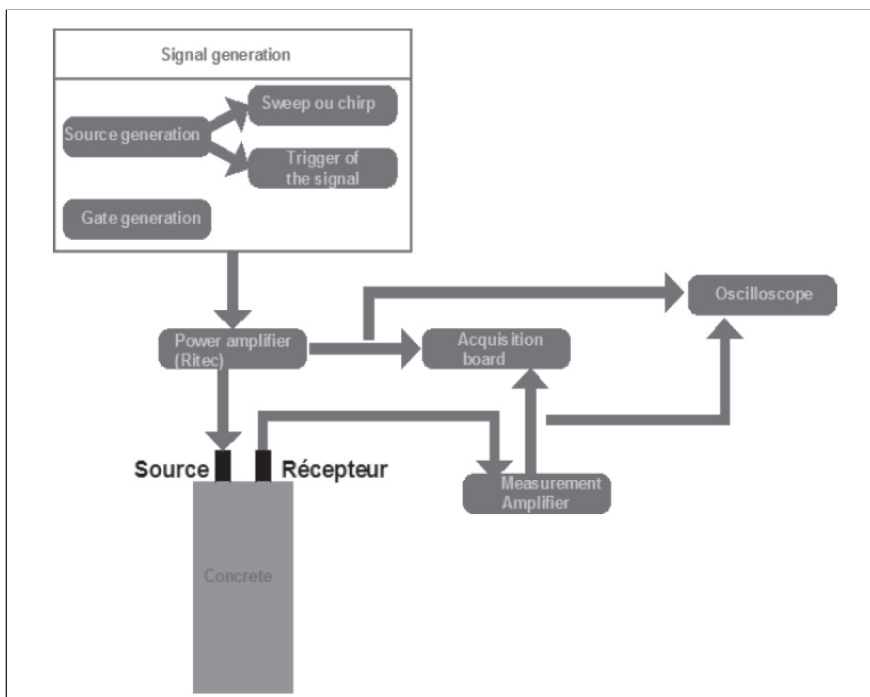


Figure 2 : Représentation schématique du système

- Filtrage passe-bande [200kHz, 800kHz] du signal corrélé dans le but d'améliorer le rapport signal sur bruit.
- Application de la méthode dite de «stretching» aux signaux successifs $h_1(t)$ et $h_2(t)$ enregistrés à deux instants successifs (t_1, t_2) pour la détermination de la variation de la vitesse « $(\Delta V)/V$ » entre ces deux signaux. D'après [3], $(\Delta t)/t = (-\Delta V)/V = \text{eps}$; où eps est la valeur qui donne le coefficient de corrélation $CC_{(\text{eps} \times t)}$ le plus grand calculé en utilisant l'équation 2.

$$CC_{h_1, h_2}^{t_1, t_2}(\Delta t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_1[t(1 + \Delta t)] \times h_2(t) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} h_1^2[t(1 + \Delta t)] dt \int_{t_1}^{t_2} h_2^2(t) dt}} \quad (2)$$

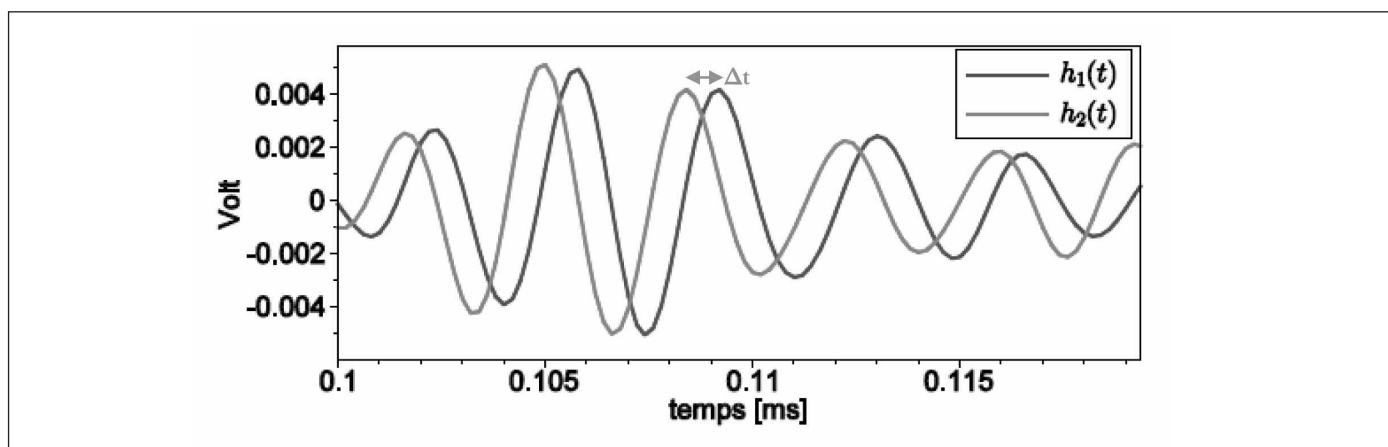
- Calcul du coefficient de dé-corrélation K_d associé, tel que $K_d = 1 - CC$ [6].

Les mesures ultrasonores sur le béton sont difficiles durant les premières heures après le coulage en raison de son caractère dissipatif. Les calculs de stretching vont remonter dans

le temps en conséquence de quoi la première référence est le dernier signal enregistré, c'est-à-dire, celui mesuré 21 heures après le coulage. En raison de la variation énorme des propriétés du béton au cours de la prise, pour les calculs de «stretching», une référence variable est retenue : chaque signal devient référence de celui qui le précède. Les calculs de «stretching» se font pour une fenêtre temporelle telle que son début est dans le champ incohérent et sa largeur $2T$ vérifie : $2T \cdot \Delta f \gg 1$ où Δf est la largeur de la bande de fréquences utile des signaux [7].

En pratique, on a tendance à choisir une fenêtre plus tardive pour améliorer la sensibilité de la CODA à la variation de la vitesse. On risque alors de tomber sur une zone où le rapport signal sur bruit est dégradé. Pour pouvoir choisir la fenêtre temporelle la plus représentative du milieu, une étude de la variation de $\Delta V/V$ est faite pour plusieurs fenêtres temporelles.

Une comparaison de deux signaux, entre deux états successifs, $h_1(t)$, $h_2(t)$ permet le suivi de la variation dans la microstructure du béton (Figure 3). La Figure 3 montre le

Figure 3 : Comparaison de deux signaux à deux instants $t_1 < t_2$ après le coulage

signal $h_2(t)$ enregistré à un instant t_2 après le début du coulage (signal rouge) qui est caractérisé par une vitesse de propagation plus grande que celle correspondante à un instant t_1 tel que $t_1 < t_2$ (signal bleu $h_1(t)$).

Ayant ϵ_{ps} , il est donc possible de calculer la vitesse dans l'état à t_2 en utilisant $V_2 = V_1(1 + \epsilon_{ps})$. En suivant cette variation de la vitesse au cours du temps, il sera ainsi possible de suivre la prise du béton.

L'analyse de l'interférométrie de l'onde Coda a été conçue pour détecter des perturbations du milieu de propagation en utilisant le milieu diffusif comme un interféromètre. Les calculs de CODA sont réalisés avec l'hypothèse que la variation relative de la vitesse de propagation de l'onde est constante temporellement et spatialement.

La Figure 4 présente la variation de la vitesse (%) et du coefficient de dé-corrélation (%) entre deux signaux mesurés dans deux états écartés d'une minute en fonction du début de la fenêtre temporelle.

Pour les courbes relatives à des signaux enregistrés de 20 à 23 heures après le coulage, on remarque que $\Delta V/V$ est presque constant quelle que soit la fenêtre temporelle choisie. Le coefficient de dé-corrélation $K_d = 1 - CC$ relatif à ces signaux est petit de l'ordre de 2%, donc les ondes ne se déforment pas trop. On peut dire que, à ces âges, pour l'étude de la variation de la vitesse, on peut choisir n'importe quelle fenêtre temporelle. Il est préférable de la choisir tardive pour augmenter la sensibilité de la CODA aux variations des vitesses.

Les signaux relatifs de 10 à 13 heures montrent une diminution de la variation relative de la vitesse en fonction de la fenêtre temporelle choisie. La cause de la diminution de la variation relative de la vitesse en fonction du début de la fenêtre choisie peut s'expliquer par un gradient de développement de la réaction chimique de la prise dans le béton résultant d'un gradient de température. Une répartition hétérogène des constituants provenant d'un tassement, et donc une prise non homogène dans tout le cylindre, est une autre explication possible.

5.2. Déduction du coefficient de Poisson

Connaissant la valeur du coefficient de Poisson à la fin de la prise, la mesure de V_p et V_s une fois le béton durci est aisée, et connaissant les valeurs de la variation relative de la vitesse issue des mesures CODA et celles des vitesses longitudinales issues de la méthode de FreshCon, il est possible de remonter à la variation du coefficient du Poisson au cours du temps en appliquant l'équation 4 issue d'une combinaison de l'équation 1 avec l'équation 3. La mesure de la CODA permet donc de se passer de la mesure de V_s qui est souvent problématique.

$$v_{dyn} = \frac{1 - 2(V_s/V_p)^2}{2 - 2(V_s/V_p)^2} \quad (3)$$

$$F(v) = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta v}{(1-v)(1-2v)(2 + \left[\frac{1-2v}{2(1-v)}\right]^{3/2})} - \frac{\Delta V_p}{V_p} \times \left(\frac{1}{1 + 2\left[\frac{2(1-v)}{1-2v}\right]^{3/2}} + \frac{2}{2 + \left[\frac{1-2v}{2(1-v)}\right]^{3/2}} \right) \quad (4)$$

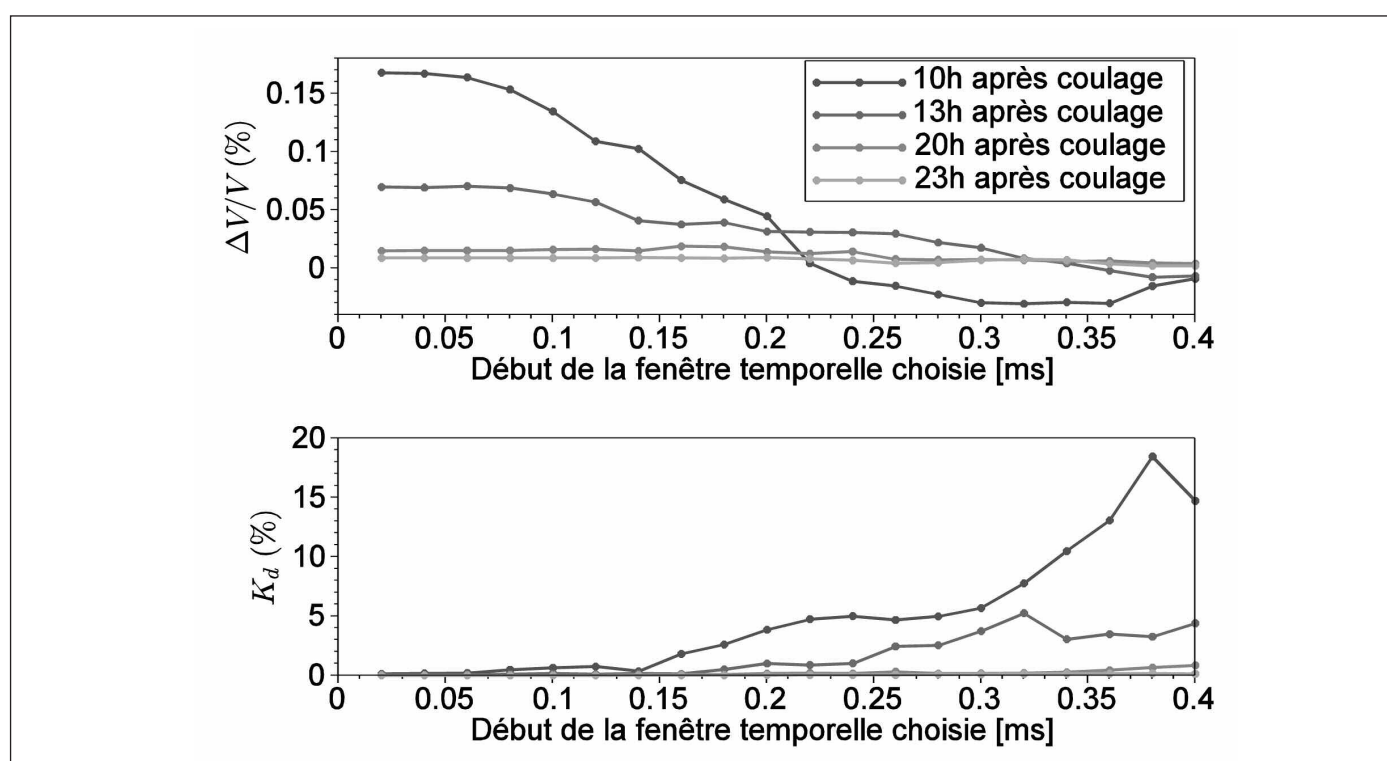


Figure 4 : Effet du début de la fenêtre temporelle sur le traitement des signaux

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus montrent que le suivi de la prise du béton avec la CODA, une onde ultrasonore haute fréquence multiple diffusée, est possible via la détection d'une variation de la vitesse de propagation dans le béton 10 heures après son coulage. Le début de la fenêtre temporelle retenue influe sur les résultats du calcul de la variation relative de la vitesse pendant les 13 premières heures après le coulage et cela sans doute à cause d'un gradient dans la réaction chimique. Le choix du début de la fenêtre en fonction de la prise du béton nécessite une analyse plus poussée pour la fiabilisation des calculs de la variation de la vitesse relative de l'onde CODA traversant le béton.

Dans le futur, il est proposé de chercher les courbes de variations cumulatives de la vitesse relative en fonction du temps pour des fenêtres glissantes choisies de sorte qu'elle assure une variation relative de la vitesse constante temporellement sur le signal étudié, sans nier la nécessité de rester dans une fenêtre se trouvant dans le champ incohérent. Une fois ces mesures faites et une courbe CODA fiable obtenue, une manipulation similaire à celle décrite dans [2] doit être montée en parallèle de la CODA pour pouvoir comparer de façon exacte et simultanée les résultats des deux manipulations. Dans ces futures manipulations, deux thermocouples devront être utilisés : un pour la mesure de la température au centre du moule cylindrique et un second pour la mesure de cette température au bord du moule cylindrique, pour pouvoir mieux détecter l'effet d'un gradient de la réaction chimique.

De plus, il reste à trouver un couplant permettant une manipulation avec les capteurs collés en dessous du moule cylindrique. Cette manipulation est très importante parce

qu'elle permettrait la réalisation de mesures directement après le coulage du béton dès les premières minutes. De plus, elle éviterait les interventions sur la surface du béton qui favorisent l'évaporation de l'eau de gâchage.

RÉFÉRENCES

- [1] Claude Boulay, Erick Merliot, Stephanie Staquet, and Oumaya Yazogli Marzouk. Monitoring of the concrete setting with an automatic method. In *Structural Faults & repair*, France, 2010.
- [2] Roel Snieder. Coda wave interferometry and the equilibration of energy in elastic media. *Physical review*, 66(4) : 046615, 2002.
- [3] Snieder Roel. The theory of coda wave interferometry. *Pure and Applied Geophysics*, 163(2-3):455–473, 2006.
- [4] Claude Boulay, Stephanie Staquet, Brice Delsaute, Jerome Carette, Michela Crespini, Oumaya Yazoghli-Marzouk, Erick Merliot, and Sandrine Ramanich. How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since the earliest age ? *Materials and Structures*, 2013.
- [5] Yuxiang Zhang, Odile Abraham, Vincent Tournat, Alain Le Duff, Bertrand Lascoup, Ahmed Loukili, Frederic Grondin, and Olivier Durand. Validation of a thermal bias control technique for coda wave interferometry (cwi). *Ultrasonics*, 53(3) :658 – 664, 2013.
- [6] Simon Stahler, Ernst Niederleithinger, and Christoph Sens-Schönfelder. Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry. *J. Acoust. Soc. Am.*, 129(4):1945–1952, apr 2011.
- [7] Snieder Roel. Extracting the greens function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review*, 69(4):046610, 2004.