

Partie 3 – Structures & Monitoring

CONTRÔLE D'UNE STRUCTURE DU BÉTON DE TAILLE RÉELLE PAR ANALYSES DE LA CODA ULTRASONORE AVEC COMPENSATION DES BIAIS THERMIQUES

MONITORING OF A REAL SIZE CONCRETE STRUCTURE BY CODA WAVE INTERFEROMETRY WITH THERMAL BIAIS COMPENSATION

**Yuxiang ZHANG^(a,b,e), Odile ABRAHAM^(a,*), Vincent TOURNAT^(b),
Alain LE DUFF^(b,c), Bertrand LASCOUP^(d), Olivier DURAND^(a)**

a. LUNAM Université, IFSTTAR, GERS-AI, CS4, 44344 Bouguenais Cedex, France

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

c. GSII-Groupe ESEO, 10 Boulevard Jean Jeanneteau, CS9071, 749107 Angers cedex 2, France

d. IRT Jules Verne Chemin du Chaffault, 44340 Bouguenais, France

e. ISTerre, Université J. Fourier, 1381 rue de la Piscine, 38400 Grenoble, France

* auteur correspondant : odile.abraham@ifsttar.fr

RÉSUMÉ

L'analyse de la coda ultrasonore (CWI) est considérée comme une méthode prometteuse de contrôle non destructif des matériaux complexes comme le béton. Elle permet d'évaluer les modifications des propriétés élastiques du matériau via une mesure très sensible des variations des vitesses de propagation. Pour améliorer la fiabilité des résultats CWI, nous présentons un protocole expérimental pour la compensation des biais thermiques résultant d'une fluctuation de la température ambiante qui affecte fréquemment les méthodes ultrasonores. Ce protocole peut

être appliqué sur la structure elle-même sans besoin d'une éprouvette de référence. Il permet de compenser les biais provenant d'une variation de la température ambiante (thermiques et thermo-mécaniques) sans connaître leur mécanisme de création. Un essai sur une structure du béton de taille pluri métrique est présenté pour suivre des contraintes en traction et des fissures créées localement, prélude à une mise en œuvre sur une structure in situ.

Mots-clés : CWI, Compensation des biais, température, endommagement, traction

ABSTRACT

The analysis of ultrasonic coda (CWI) is considered a promising method for non-destructive testing and evaluation of complex material such as concrete, for its ability to evaluate elastic properties of material with an extreme accuracy. In order to further improve the reliability of the method, we have designed an experimental protocol for compensating biases from variations of the ambient temperature which frequently affect ultrasonic measurements. This protocol allows compensating various biases (thermo or thermo mechanical) stemmed from variation in ambient temperature without extensive knowledge of their mechanism. Furthermore it can be applied without demanding a reference specimen. A test was carried out on a real-size concrete structure for monitoring locally tensile stresses and cracks, which indicates that in situ quantitative monitoring of real concrete structures is possible with CWI.

Keywords: CWI, Bias compensation, temperature, cracking, tensile stress

* * *

1. INTRODUCTION

Les méthodes d'Évaluation et Contrôle Non-Destructives (ECND) du béton ont été largement étudiées dans les dernières décennies, puisque le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine du génie civil et que les méthodes traditionnelles d'inspection y sont limitées. Les méthodes ultrasonores, parmi toutes les méthodes d'ECND, sont considérées prometteuses pour leur sensibilité aux propriétés mécaniques, leur capacité de pénétration et la possibilité de faire des mesures depuis une seule surface accessible. À l'inverse des méthodes ultrasonores classiques qui s'intéressent uniquement aux ondes cohérentes, la méthode dite Interférométrie de la coda (CWI pour Coda Wave Interferometry) [1-2] utilise des ondes incohérentes créées par des diffusions multiples issues des hétérogénéités du matériau et présentes une sensibilité encore plus avantageuse [3].

Avec la méthode CWI, l'accès aux variations des propriétés élastiques du béton est obtenu via la mesure de la variation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le temps. Les résultats peuvent donc être biaisés par la variation de la température ambiante. Un protocole expérimental a été proposé [4-6] pour supprimer les biais thermiques en utilisant une éprouvette de référence identique à l'éprouvette sous test. Cette solution, efficace en condition de laboratoire, peut être d'utilisation limitée, lorsqu'il est impossible d'avoir une éprouvette de référence car la structure à contrôler est de grande taille, par exemple.

Dans ce qui suit, la détection d'un faible endommagement local dans une structure de béton de taille réelle est réalisée en utilisant l'analyse CWI avec une compensation de la température réalisée à partir de la structure à contrôler elle-même.

2. INTERFÉROMÉTRIE DE LA CODA

Le principe de l'interférométrie de la coda est de comparer deux signaux temporels enregistrés avant et après une perturbation du milieu de propagation ($u_i(t)$ et $u_p(t)$ respectivement) pour déterminer la variation de la vitesse de propagation [1-2]. Pour une meilleure robustesse, la méthode dite *Stretching* est mise en œuvre pour l'analyse des signaux de coda [7-8]. Le signal de référence $u_i(t)$ est dilaté/compressé par le taux α_i puis comparé avec le signal perturbé $u_p(t)$ en évaluant le coefficient de corrélation $CC(\alpha_i)$:

$$CC(\alpha_i) = \frac{\int_{t-T}^{t+T} u_i(t'(1 + \alpha_i)) u_p(t') dt'}{\sqrt{\int_{t-T}^{t+T} u_i^2(t'(1 + \alpha_i)) dt' \int_{t-T}^{t+T} u_p^2(t') dt'}} \quad (1)$$

Parmi toutes les valeurs de α_i , celle qui permet de maximiser le coefficient CC est notée α et est considérée comme la variation relative de la vitesse de propagation effective vue par les ondes de coda $\alpha = \Delta v/v$.

3. CONFIGURATION D'ESSAI

La structure étudiée a une géométrie complexe comme illustrée dans la figure 1. Trois surfaces de la structure sont mises en évidence par trois couleurs. Sur la surface A, qui a une dimension de 50 x 160 cm, une entaille de largeur de 3 cm est pré-positionnée pour faciliter la création d'un endommagement local. En serrant une vis en haut de la structure qui la traverse perpendiculairement à la surface B, l'extrémité de l'entaille est mise en traction, et des fissures peuvent être créées localement.

Deux transducteurs ultrasonores, une source et un récepteur de coda, sont collés sur la surface B. Ils sont installés en vis-à-vis de l'extrémité de l'entaille c'est-à-dire près de la zone de fissuration (Figure 2). Deux autres transducteurs identiques sont installés sur la surface C dans le coin supérieur de la structure (Figure 1) c'est-à-dire loin de la zone de fissuration afin que leurs enregistrements de coda soient peu perturbés par la création des fissures. Avec le coefficient de diffusion évalué postérieurement, le libre parcours moyen de transport du béton est inférieur à 3 cm pour la bande de fréquence utilisée.

L'acquisition synchrone des signaux de coda est réalisée avec une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz. Pour améliorer le rapport signal sur bruit, chaque signal de coda enregistré est la moyenne de 1000 acquisitions consécutives. Un signal source et un signal de coda sont illustrés par les figures 3 et 4. Pendant l'essai, les mesures de coda sont réalisées simultanément sur les deux parties (surfaces B et C) de la structure.

Le niveau de chargement est contrôlé via la mesure de la force appliquée sur la vis. Pour la création des fissures, le chargement a été augmenté manuellement à environ 70 % du niveau de rupture estimé, puis rapidement annulé pour rester nul pendant la nuit (Figure 5). La température est

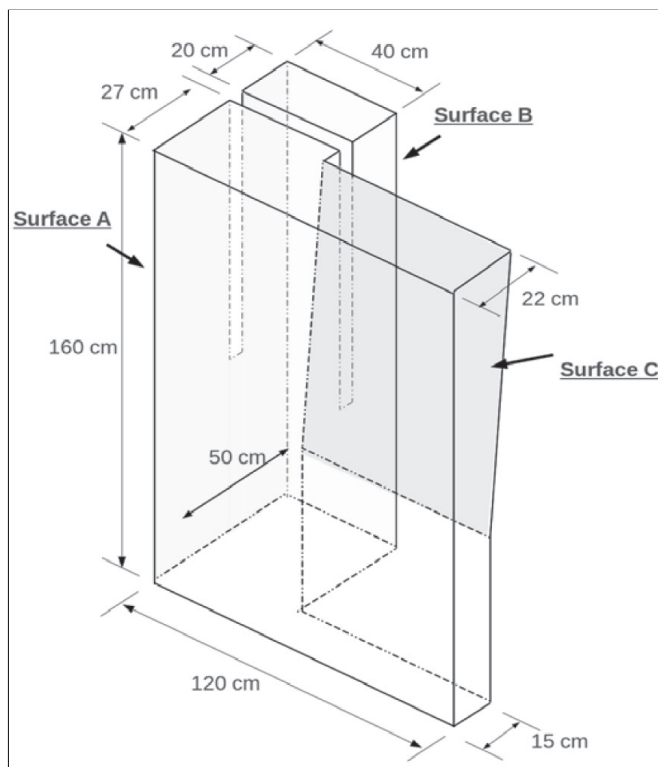


Figure 1 : Géométrie et dimensions de la structure du béton.

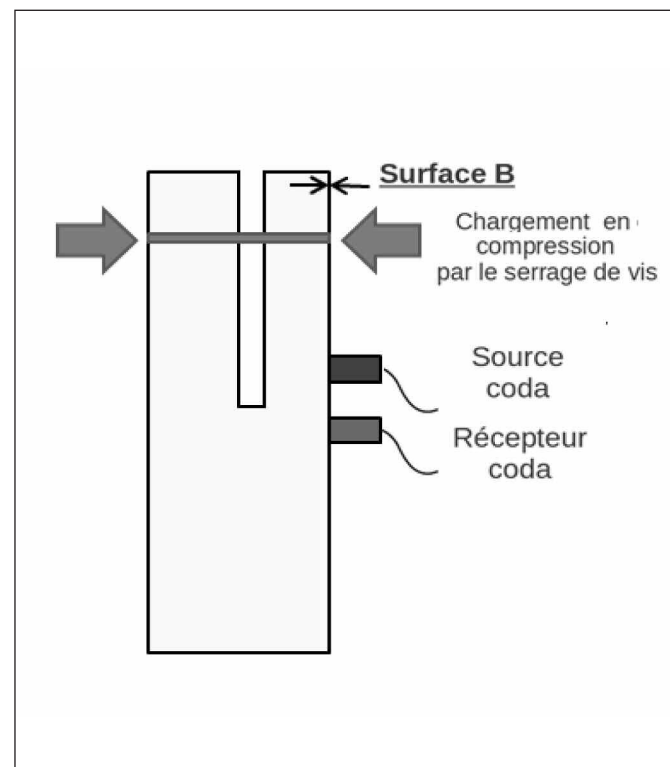


Figure 2 : Configuration du chargement et de la mesure de coda.

mesurée en continu à l'intérieur du béton par un thermocouple (température interne) et à l'extérieur du béton par une sonde (température de l'air). Ces mesures de température sont illustrées par la figure 6.

Comme la structure en béton est installée dans une salle fermée mais non climatisée, de part la chaleur émise par les appareils expérimentaux, la température de l'air augmente de 25 °C à 27,5 °C jusqu'à la fin du chargement et la tem-

pérature interne du béton augmente de 25,4 °C à 26 °C. À cause de l'ouverture de la porte après le déchargement (après que le niveau de chargement soit revenu à 0) la température de l'air décroît brutalement en quelques minutes de 27,5 °C à 26,5 °C. Cette chute de température n'apparaît pas dans la mesure de la température interne du béton (Figure 6 courbe bleue). A l'intérieur du béton, la température continue à augmenter jusqu'à la fin de la journée.

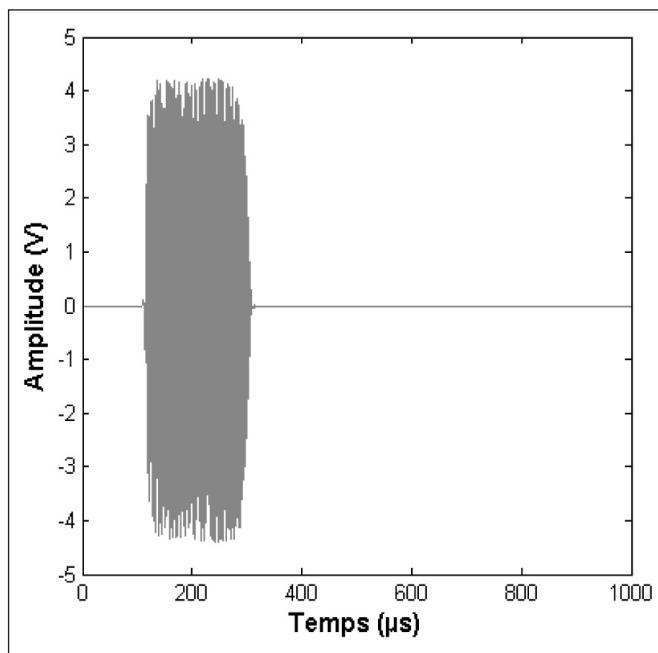


Figure 3 : Exemple de signal source, un chirp d'une durée de 200 μ s et de fréquence comprise entre 200 kHz à 800 kHz.

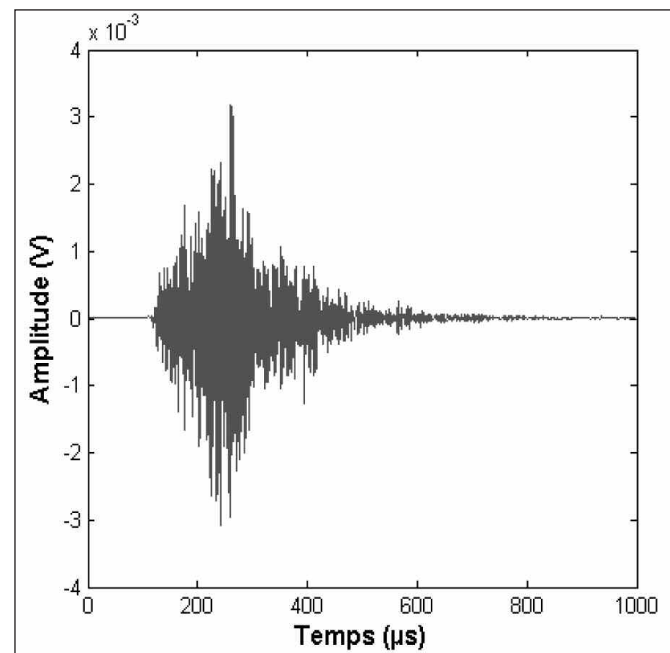


Figure 4 : Exemple de signal coda enregistré.

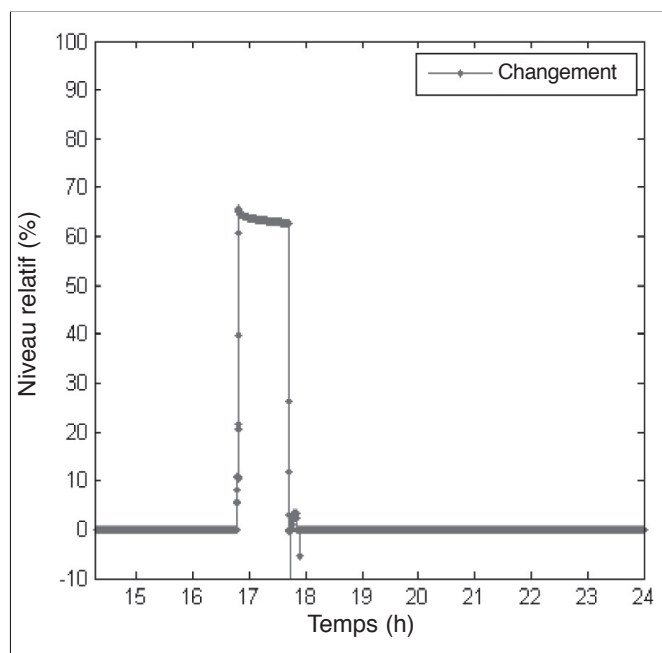


Figure 5 : Mesures expérimentales du niveau de chargement.

4. RÉSULTAT D'ANALYSE CWI

Les signaux coda sont ensuite traités par la méthode de *Stretching* pour le suivi de la variation de la vitesse. Les résultats obtenus près et loin de la zone de fissuration sont notés respectivement α_{test} et α_{ref} . Ces variations de la vitesse effective de propagation sont présentées de façon relative en pourcentage et illustrées en fonction du temps (heure) dans la figure 7. L'essai entier peut être divisé chronologiquement en trois phases :

- Avant l'application du chargement, les vitesses diminuent en suivant l'augmentation de la température interne du béton. Les fluctuations faibles de α_{test} proviennent de l'application d'un chargement acoustique dont les résultats ne sont pas discutés dans ce manuscrit.
- En réponse à l'application du chargement, la variation de la vitesse de propagation mesurée sur la face B près de l'entaille (α_{test}) chute de 0,22 %, comme attendu en présence de contrainte en traction. Puis, sous la relaxation du béton, le niveau de chargement décroît (Figure 5) et la vitesse augmente faiblement (Figure 6). Cependant, α_{ref} n'est pas influencée par ce processus de chargement et continue à diminuer en suivant l'augmentation de la température interne (Figure 6).
- Dans la troisième phase, la fluctuation de α_{test} devient compliquée. Une re-augmentation rapide de -1,19 % à -0,13 % est observée après le déchargement et suivi par une re-diminution. En même temps α_{ref} diminue de -0,01 % à -0,08 % en une vingtaine de minutes. A partir de 18 heures, α_{test} et α_{ref} commencent à augmenter toutes les deux avec une même vitesse, et les augmentations continuent jusqu'à minuit.

La vitesse de référence, dont les variations sont quantifiées par α_{ref} , est supposée d'être influencée uniquement par la fluctuation de la température ambiante. Une soustraction entre α_{test} et α_{ref} est donc réalisée pour compenser les biais thermiques, c'est-à-dire les variations de la vitesse liées à l'effet de la température. Le résultat corrigé $\alpha_{\text{corr}} = \alpha_{\text{test}} - \alpha_{\text{ref}}$

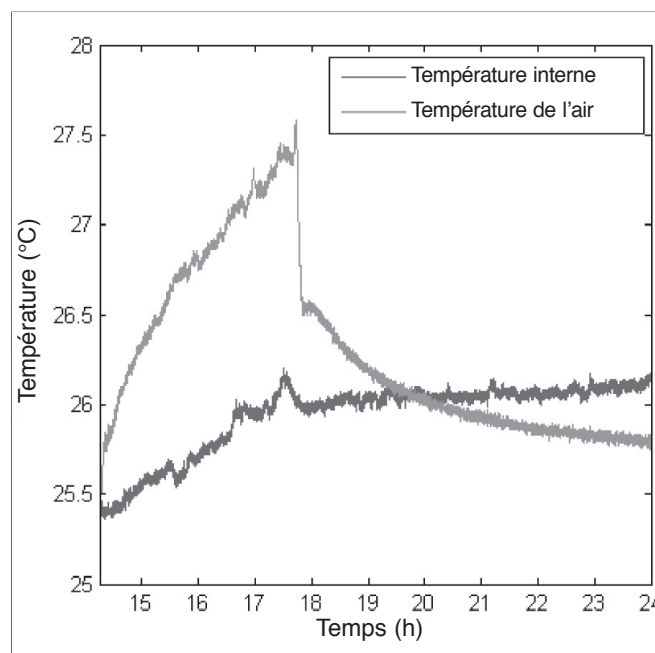


Figure 6 : Mesures de la température interne du béton et de la température de l'air en fonction du temps.

est tracé sur la figure 8. Avec α_{corr} l'influence du chargement sur la variation de vitesse effective de propagation peut être observée plus clairement. La diminution de la vitesse pendant le chargement est en bon accord avec l'effet acoustoélastique en présence des tractions [5, 9]. La reprise exponentielle de la vitesse une dizaine de minutes après le déchargement peut être expliquée par l'effet de dynamique lente [10]. Enfin, la vitesse s'est stabilisée et une diminution de 0,04 % peut être observée comparer avec son niveau initial avant chargement. Cette diminution permanente est interprétée comme étant le résultat de la fissuration locale.

5. CONCLUSION ET DISCUSSION

En comparant la figure 8 avec la figure 7, nous constatons que pour une structure en béton de grande taille (pluri métrique) il est possible de suivre, sans avoir besoin d'une seconde éprouvette, une perturbation locale de la structure par des mesures de coda avec compensation de la température. La compensation des fluctuations de la température ambiante est efficace. Ce protocole améliore la fiabilité des résultats CWI, car l'influence d'une variation de la température ambiante sur les mesures de la coda est complexe. Dans les deux premières phases de notre essai, les températures augmentent à l'intérieur et à l'extérieur du béton, et α_{ref} diminue en bon accord avec les résultats trouvés dans la littérature [5, 11-12]. Au début de la troisième phase, quand la température de l'air chute brutalement, la température interne diminue aussi mais très légèrement (Figure 6), mais α_{ref} diminue au lieu d'augmenter. Ensuite, α_{ref} augmente en suivant la diminution de la température de l'air, bien que la température interne continue à augmenter. Quantitativement, au début de l'essai (de 15h00 à 17h30), la température de l'air a augmenté de 26,3 °C à 27,3 °C et la vitesse de référence (α_{ref}) a diminué de 0,01 %. Mais pour un même niveau de variations de la température de

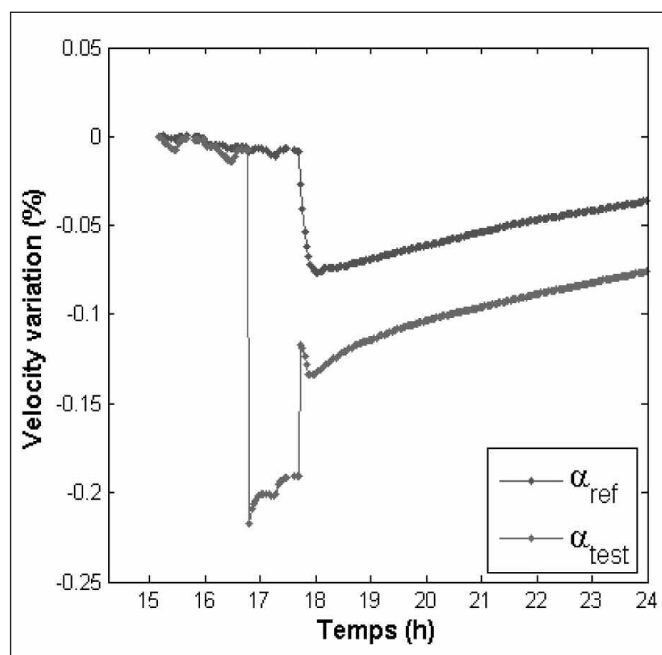


Figure 7 : Résultats d'analyse CWI - variation relative de la vitesse – obtenus près et loin de la zone de fissuration (α_{test} et α_{ref} respectivement).

l'air de la troisième phase (diminution de 26,5 °C à 25,5 °C entre 18 h et minuit) α_{ref} a augmentée de 0,04 %.

Ces résultats expérimentaux montrent que l'impact d'une variation de la température ambiante sur la vitesse de propagation dans un matériau comme le béton est complexe à prédire. Il ne provient pas uniquement des modifications des propriétés mécaniques en fonction de la température du milieu de propagation. Ainsi, quand la variation de la température ambiante est brutale, elle peut créer des champs thermiques forts à l'intérieur du béton et provoquer en conséquence des effets thermomécaniques et des contraintes internes complexes. Ces effets sont difficiles à estimer et les biais correspondants ne peuvent pas être éliminés simplement par une mesure de la température de l'air ou la température interne. En revanche, avec le protocole expérimental mise en œuvre ici, nous pouvons compenser ces biais sans avoir besoin de connaître leurs origines ou de savoir les modéliser. C'est donc une méthode simple et efficace à mettre en œuvre.

6. REMERCIEMENTS

Ces travaux sont financés par la Région Pays de la Loire dans le projet émergence collective Évaluation et Contrôle Non Destructif en Pays de la Loire.

RÉFÉRENCES

- [1] R. Snieder. "Coda wave interferometry and the equilibration of energy in elastic media". *Physical review*, 66(4) : 046615, 2002
- [2] R. Snieder. "The theory of coda wave interferometry". *Pure and Applied Geophysics*, 163(2-3) : 455–473, 2006.
- [3] E. Larose and S. Hall, "Monitoring stress related velocity variation in concrete with a 2×10^{-5} relative resolution using diffuse

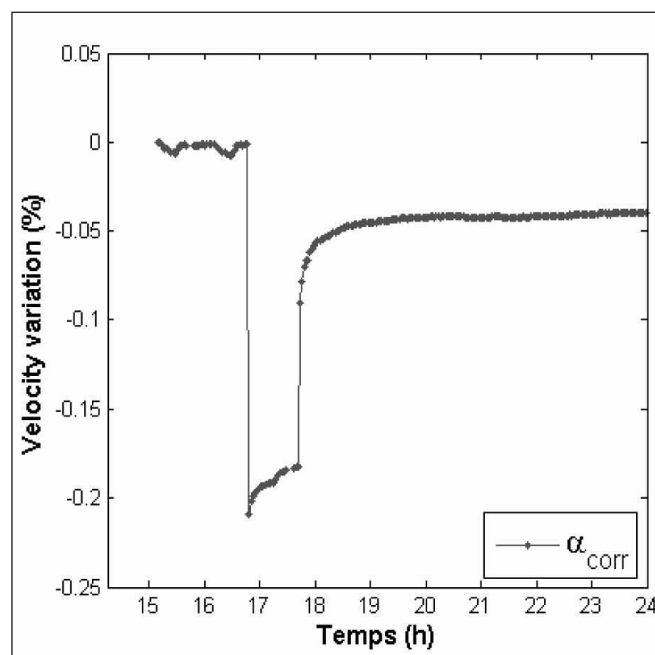


Figure 8 : Résultat CWI corrigé des effets de la température dans la zone fissurée.

ultrasound," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 125, no. 4, pp. 1853–1856, 2009.

[4] A. Mazzeranghi and D. Vangi, "Methodology for minimizing effects of temperature in monitoring with the acousto-ultrasonic technique," *Experimental Mechanics*, vol. 39, pp. 86–91, 1999.

[5] Y. Zhang, O. Abraham, V. Tournat, A. Le Duff, B. Lascoup, A. Loukili, F. Grondin, and O. Durand. Validation of a thermal bias control technique for coda wave interferometry (cwi). *Ultrasonics*, 53(3):658 – 664, 2013.

[6] Y. Lu and J. E. Michaels, "A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations," *Ultrasonics*, vol. 43, no. 9, pp. 717 – 731, 2005.

[7] C. Sens-Schönfelder and E. Larose, "Temporal changes in the lunar soil from correlation of diffuse vibrations," *Physical Review E*, vol. 78, p. 045601, Oct 2008.

[8] C. Hadzioannou, E. Larose, O. Coutant, P. Roux, and M. Campillo, "Stability of monitoring weak changes in multiply scattering media with ambient noise correlation : Laboratory experiments," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 125, no. 6, pp. 3688–3695, 2009.

[9] D. M. Egle and D. E. Bray, "Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 60, no. 3, pp. 741–744, 1976.

[10] J. A. TenCate, E. Smith, and R. A. Guyer, "Universal slow dynamics in granular solids," *Physical Review Letters*, vol. 85, pp. 1020–1023, Jul 2000.

[11] Y. Zhang, O. Abraham, E. Larose, T. Planes, A. Le Duff, B. Lascoup, V. Tournat, R. El Guerjouma, L.-M. Cottineau, and O. Durand, "Following stress level modification of real size concrete structure with coda wave interferometry (cwi)," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1335, no. 1, pp. 1291–1298, 2011.

[12] E. Larose, J. de Rosny, L. Margerin, D. Anache, P. Gouedard, M. Campillo, and B. van Tiggelen, "Observation of multiple scattering of khz vibrations in a concrete structure and application to monitoring weak changes," *Physical Review E*, vol. 73, p. 016609, 2006.