

Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

APPLICATION DU PRINCIPE DE L'ACOUSTOÉLASTICITÉ DYNAMIQUE POUR LA SURVEILLANCE IN SITU DES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

APPLYING DYNAMIC ACOUSTOELASTICITY (D.A.E) PRINCIPLE FOR IN SITU MONITORING OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

Serge. A. KODJO^(*), Farid MORADI-MARANI, Patrice RIVARD

Département de Génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec Canada

* auteur correspondant : apedovi.kodjo@usherbrooke.ca

RÉSUMÉ

Parmi les techniques de l'acoustique non linéaire proposées pour la caractérisation des micros défauts dans le béton, la technique de saut temporel de l'onde ultrasonore basée sur le principe de l'acoustoélasticité dynamique semble plus adaptée pour une utilisation in situ. La technique consiste à sonder le matériau par une onde haute fréquence de faible amplitude pendant qu'une onde basse fréquence de forte amplitude perturbe le milieu, modifiant de façon locale et temporelle les propriétés élastiques du matériau. L'objectif de ce travail est d'évaluer son application sur site. L'idée est d'utiliser le trafic comme source de déformation haute amplitude du matériau. Pour faire cela, un vérin hydraulique a été utilisé en laboratoire pour simuler le passage d'un véhicule. Des essais ont été réalisés sur des grandes dalles de béton dont deux fabriquées avec des granulats réactifs provoquant des microfissures et une fabriquée avec des granulats non réactifs. Les résultats ont démontré la faisabilité de son implémentation sur site et des études sur l'influence de la température sur les

paramètres non linéaires mesurés ont permis de localiser l'intervalle de température ambiante où les résultats sont les plus fiables.

ABSTRACT

Among the nonlinear acoustics techniques proposed for the characterization of micro-defects in concrete, the ultrasonic travel time shift technique based on dynamic acoustoelasticity principle appears to be the most suitable for field work. The technique uses high frequency ultrasonic wave to probe the medium, while a low-frequency high-amplitude wave disturbs the medium, which locally and temporarily modifies its elastic properties. The objective of this work is to assess its feasibility for in situ tests. The idea is to use the traffic as a source of high strain in the material (pump wave source). To do so, a hydraulic actuator was used in the lab to simulate the passage of vehicles over large concrete slabs incorporating various alkali-reactive aggregates and non-reactive aggregates. The results

demonstrate the feasibility for in situ technical implementation and some studies on the effect of the temperature on the nonlinear parameters allowed evaluating the range of temperature in which the acoustic nonlinear technique may lead to more reliable results.

Mots-clés : Évaluation non destructive, application in situ, acoustique non linéaire, acoustoélasticité, microfissures, effet de la température.

* * *

1. INTRODUCTION

L'acoustoélasticité classique consiste à faire propager l'onde ultrasonore dans le matériau pendant que celui-ci est soumis à une contrainte statique. Pour un matériau isotrope dans son état initial, la vitesse de propagation de l'ultrason varie avec le niveau de la contrainte appliquée. La variation des vitesses mesurées dans les 3 dimensions permet d'extraire les paramètres de l'élasticité non linéaire de Murnaghan ou de Landau [1, 2]. Lorsque la contrainte statique est remplacée par la contrainte dynamique, on parlera d'acoustoélasticité dynamique. La technique du saut temporel ultrasonique consiste à utiliser une onde haute fréquence de faible amplitude pour sonder le milieu pendant qu'une onde basse fréquence de forte amplitude perturbe le milieu, modifiant localement et temporellement les propriétés élastiques du matériau. Cet article vise à montrer le potentiel d'implémentation de la technique du saut temporel sur site tout en utilisant le trafic routier comme source de déformation haute amplitude du matériau. Cette étude de faisabilité a d'abord été réalisée en utilisant un vérin hydraulique en laboratoire pour simuler le passage de véhicule. Des essais ont été réalisés sur des dalles de béton de grandes dimensions dont deux fabriquées avec des granulats réactifs pour provoquer des microfissures liées à la réaction alcalis-granulats et une dalle témoin fabriquée avec un granulat non réactif. Des études complémentaires portant sur l'influence de la température sur le comportement non linéaire ont été réalisées afin d'identifier les plages de température ambiante à l'intérieur desquelles les mesures seront plus fiables.

2. PRINCIPE DE LA TECHNIQUE DE SAUT TEMPOREL

La technique du saut temporel consiste à évaluer la variation relative de la vitesse d'une onde ultrasonore sondeur du matériau étudié lorsque ce dernier est soumis à un chargement dynamique. Elle permet ainsi d'estimer le niveau de microfissuration dans le matériau en utilisant une onde ultrasonore haute fréquence qui sonde le milieu pendant qu'une onde basse fréquence de forte énergie perturbe le milieu en ouvrant temporellement les microfissures existantes [3]. L'ouverture des microfissures engendre un décalage de temps de parcours de l'onde sondeur. Le décalage de temps

mesuré au niveau de la queue du signal est généralement plus grand que le décalage obtenu au début du signal [4]. Cette portion du signal appelé CODA est constituée des ondes multi-diffusées par des inclusions contenues dans le matériau. Pour un matériau hétérogène comme le béton, le temps de parcours de l'onde sondeur ne change pas tant qu'aucune perturbation ne modifie les propriétés élastiques du matériau. En appliquant une perturbation mécanique externe, tel un impact, les microfissures sont excitées et se déforment. Cela entraîne une variation du temps de parcours de l'onde sondeur. Ce décalage est évalué en comparant le temps de parcours de l'onde sondeur avant la perturbation et après la perturbation. La variation relative du temps de parcours peut s'exprimer par la variation relative de la vitesse de propagation par la relation suivante [5]:

$$\frac{\Delta t}{t_0} = -\frac{\Delta V}{V_0} \quad (1)$$

Si on fait l'hypothèse que la perturbation ne modifie pas la géométrie du matériau, ni le chemin de parcours de l'onde sondeur, on peut expliquer ce décalage par la modification des propriétés élastiques du matériau par rapport à la déformation élastique subit sous l'effet de l'impact. On peut alors exprimer cette variation relative de la vitesse par rapport à la déformation induite sous l'impact par la relation [1]:

$$-\frac{\Delta V}{V_0} = \eta \Delta \varepsilon \quad (2)$$

où η est un paramètre représentant de façon empirique le comportement élastique non linéaire du matériau, $\Delta \varepsilon$ définit la variation de déformation causée par la perturbation externe. Dans le cas d'une propagation unidimensionnelle [6],

$$-\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta \varepsilon \quad (3)$$

où β est le paramètre non linéaire classique de troisième ordre défini par les paramètres de Landau ou de Murnaghan [7].

Le décalage de temps est évalué par la technique d'intercorrélation normalisée suivante :

$$C_{S_0 S_i}(\tau) = \frac{\int_{t-t_w}^{t+t_w} S_0(t') S_i(t'-\tau) dt'}{\sqrt{\int_{t-t_w}^{t+t_w} S_0^2(t') S_i^2(t') dt'}} \quad (4)$$

$S_0(t')$ et $S_i(t')$ représentent respectivement le signal de l'onde sondeur avant la perturbation et après la perturbation du matériau. Le calcul est effectué sur une portion du signal sélectionné par une fenêtre de largeur $2t_w$ centrée sur t . Le décalage de temps est la valeur de τ pour laquelle $C_{S_0 S_i}(\tau)=1$ et lorsque $S_0=S_i$, $C_{S_0 S_i}(0)=1$ et il n'y a pas de décalage de temps.

3. MATÉRIAUX ÉTUDIÉS

Trois dalles de bétons armés de dimension 1,4 m x 0,75 m x 0,30 m, ont été étudiées. Deux dalles (DR1 et DR2) ont

été fabriquées avec des granulats réactifs (calcaire concassé Spratt) afin d'y provoquer l'endommagement associé à la réaction alcali-grulats (RAG). La dalle témoin DNR a été fabriquée avec des granulats non réactifs. Pour accélérer la réaction, du NaOH en granules a été ajouté à l'eau de gâchage du béton afin d'atteindre un taux d'alcalis de 1,25% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ par masse de ciment. Le mûrissement du béton s'est fait en chambre humide (100% H.R.) pendant 28 jours. Les dalles réactives présentent une résistance à la compression moyenne de 39,2 MPa à 28 jours et un module d'Young de 36,7 GPa. Pour la dalle témoin, la résistance à la compression est de 36,5 MPa et le module d'Young est de 35,9 GPa. Des jauges de déformation et des cordes vibrantes sont utilisées pour mesurer l'expansion due à la RAG. Trois thermocouples sont installés dans chaque dalle pour mesurer les températures internes des dalles. Afin d'accélérer la RAG, toutes les dalles sont placées dans une chambre dont la température est réglée à $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Afin de garder les dalles humides et favoriser la réaction, elles ont été enveloppées dans des tissus humides puis couvertes de plastique. A chaque test, les dalles sont déplacées dans la salle d'essai et laissées dans la salle pendant 24 h avant le test afin de stabiliser leur température à la température ambiante de la salle de l'essai. Avant chaque essai, le niveau d'expansion de la dalle est mesuré.

4. PROCÉDURES DES ESSAIS

Un vérin hydraulique de capacité maximale de 250 kN est utilisé pour appliquer des chargements impulsifs sur la dalle (figure 1).

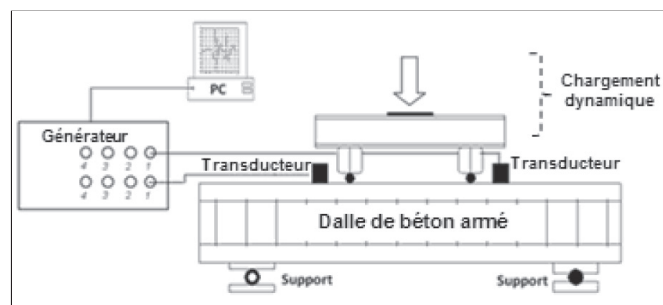


Figure 1 : Montage pour le chargement dynamique

Ces chargements simulent le chargement dynamique appliqué par le passage des véhicules sur la dalle d'un tablier de pont. Des jauges de déformations sont installées à la surface de la dalle et les LVDT sont installés sous la dalle afin de mesurer les déformations de la dalle sous l'impact. Différentes amplitudes de chargement dynamique ont été réalisées de 10 kN à 40 kN avec un pas de 5 kN. Pendant l'application de chaque niveau de chargement, un générateur d'impulsion envoie une série d'onde ultrasonore de haute fréquence centrée sur 250 kHz pour sonder le matériau.

L'évaluation de l'effet de la température sur le comportement non linéaire du matériau a été réalisée dans une chambre à température contrôlée. Les essais ont été réalisés pour des températures allant de -10°C à 40°C avec un pas de 10°C . Pour chaque température, les essais ont été réalisés une fois que la température des dalles se stabilise à la température de la chambre. Pour ces essais, la perturbation basse fréquence a été réalisée avec un marteau instrumenté de masse 3 kg et de diamètre 51 mm avec une capacité maximale de 22 kN. On applique alors différents niveaux d'énergie d'impact à la dalle. La figure 2 montre le montage utilisé pour ces essais avec la position des accéléromètres et des transducteurs pour l'onde sondeur.

5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. Mesure d'expansion

La dalle témoin ne présente pas d'expansion après 380 jours (figure 3). Par contre les dalles réactives montrent une augmentation de l'expansion dans le temps. À 380 jours, cette expansion est de 0,10% pour la dalle DR1 et de 0,14% pour la dalle DR2. Rappelons que la mesure de l'expansion est une estimation indirecte de microfissures dans le béton affecté par la RAG [8, 9].

5.2. Mesure de saut temporel

Les essais de saut temporel ont été effectués avec le vérin hydraulique en appliquant des chargements dynamiques impulsifs d'amplitude variant de 10 kN à 40 kN, avec

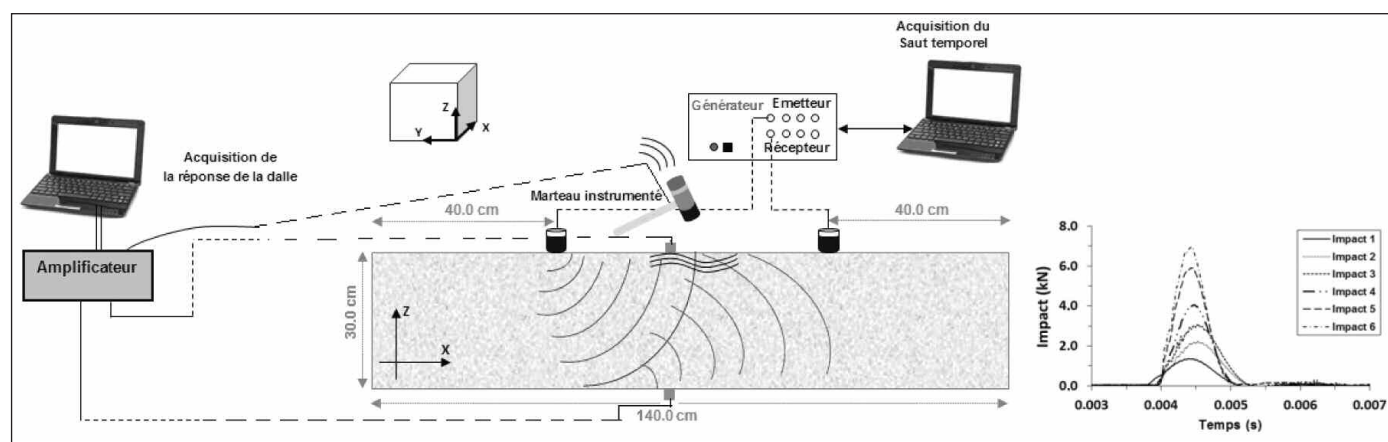


Figure 2 : Montage expérimental pour l'étude de l'effet de la température

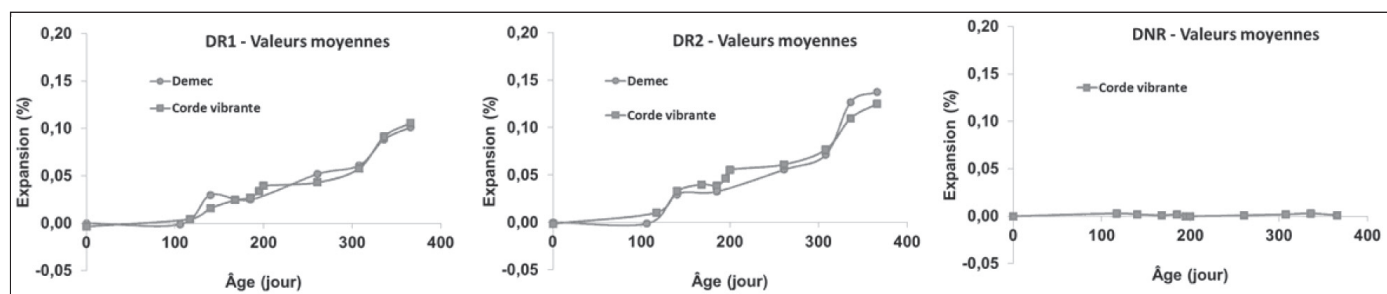


Figure 3 : Mesures de l'expansion des dalles

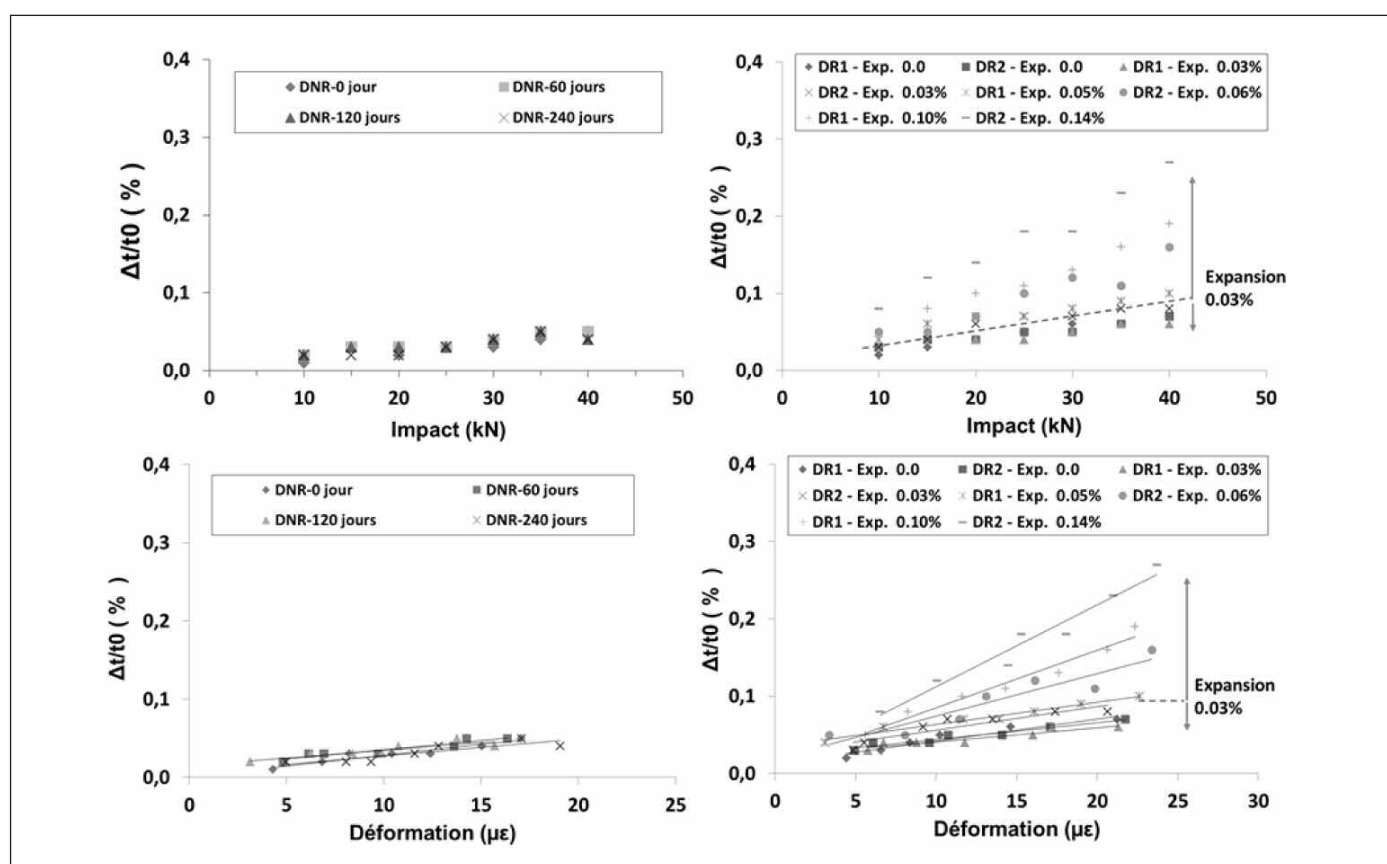


Figure 4 : Résultats du saut temporel pour la dalle témoin non réactive et les dalles réactives

un pas de 5 kN. Cette procédure a permis d'obtenir des déformations de $5 \mu\epsilon$ à $25 \mu\epsilon$ qui correspondent aux déformations typiques mesurées sur une dalle de pont lors de passages de véhicules. Pour la dalle témoin DNR, la valeur du saut temporel est faible et varie peu. Cela indique qu'elle n'est pas endommagée. Pour les dalles réactives DR1 et DR2, la valeur du saut temporel augmente linéairement avec l'amplitude de l'impact. Pour les dalles réactives, $\Delta t/t_0$ commence à croître pour des niveaux d'expansion supérieurs à 0,03% (figure 4). Ce niveau d'expansion est relativement faible, ce qui démontre la grande sensibilité de la technique pour détecter l'endommagement de façon précoce. Pour une expansion de 0,05%, $\Delta t/t_0$ montre clairement une différence entre les dalles réactives et la dalle non réactive. A 40 kN, la variation relative du saut montre une nette différence entre la dalle témoin et les dalles réactives. Le paramètre η , qui représente la pente que fait $\Delta t/t_0$ avec $\Delta\epsilon$, varie de 0,03 à 0,11 alors que l'expansion varie de 0,03% à 0,14 %. Pour la dalle témoin, η est pratiquement égale à 0.

5.3. Effet de la température sur le comportement non linéaire

Les essais ont été réalisés lorsque l'expansion mesurée sur les dalles DR1 et DR2 avaient atteint respectivement 0,14% et 0,19%. À ce niveau d'expansions, les deux dalles présentent des microfissures remplies de gel de réaction. La figure 5 montre un exemple de réponse de la dalle sous différentes températures : -10°C et 30°C .

La fréquence et l'énergie correspondantes au mode de compression décroît lorsque la température augmente. Cela s'explique par le fait qu'à basse température, le matériau devient rigide et au fur et à mesure que la température augmente, le matériau devient plus déformable. Ce comportement explique l'influence de la température sur les propriétés élastiques non linéaires du matériau.

Pour la dalle réactive, $\Delta t/t_0$ normalisé augmente lorsque la température augmente (figure 6), à -10°C , le comportement non linéaire est inhibé. En effet, à basse température le matériau est rigide ; les microfissures sont dans un état

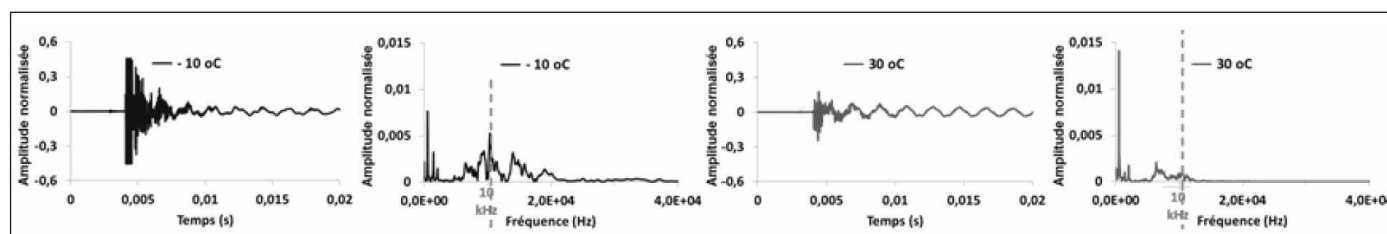


Figure 5 : Effet de la température sur la réponse élastique de la dalle réactive DR1

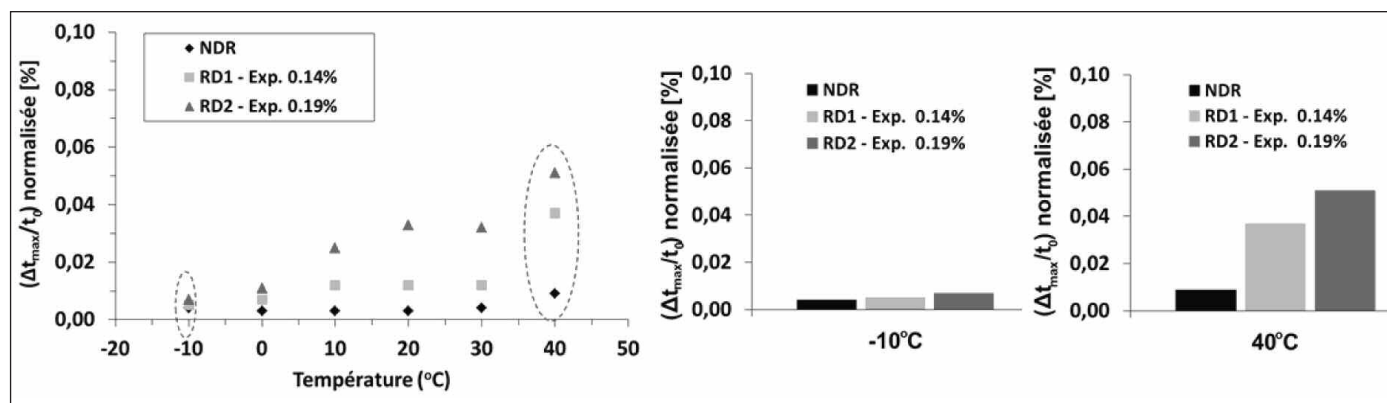


Figure 6 : Effet de la température sur le comportement non linéaire des trois dalles

rigide et ne bougent pas sous l'impact. Dès que la température augmente, le matériau devient moins rigide ce qui facilite l'ouverture des microfissures sous l'impact. Pour les températures comprises entre 10°C et 30°C le saut temporel semble peu varier (figure 6). À 40°C on voit un gradient important du saut temporel, même pour la dalle témoin. On explique ce comportement en faisant l'hypothèse qu'à cette température, les molécules d'eau libre dans le matériau commence à s'évaporer réduisant ainsi les forces de capillarité ce qui favorise le mouvement des microfissures et microdéfauts. Pour le béton sain, le mouvement inter-grain favorisé par la baisse de force de capillarité peut également expliquer l'augmentation du saut temporel. Payan et al. [10] ont montré que pour un béton dont la teneur en eau passe de 20% à 0%, le paramètre non linéaire peut quasiment doubler.

6. CONCLUSIONS

Ces travaux ont permis d'évaluer la possibilité d'implémenter la technique de l'acoustique non linéaire sur site tout en exploitant le trafic comme source d'onde basse fréquence qui excite les microfissures. La technique de saut temporel ultrasonore a été expérimentée en simulant le passage des véhicules par un vérin hydraulique. Les résultats ont montré qu'on peut distinguer un béton endommagé d'un béton sain avec des déformations identiques aux déformations typiques mesurées lors de passage de véhicule. Cela emmène à conclure que le trafic peut être exploité comme source d'excitation basse fréquence. Aussi l'étude de l'influence de la température sur le comportement non linéaire a démontré que la basse température inhibe le comportement non linéaire du matériau et on ne peut distinguer un matériau endommagé d'un matériau

sain. Entre 10°C et 30°C, le paramètre non linéaire varie peu avec la température, ce qui emmène à conclure que les résultats sont plus fiables lorsqu'elles sont prises dans cette plage de température.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Fond Québécois de Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) ainsi que le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) pour leur soutien financier dans ce projet. Nous remercions également le groupe structure du département de génie civil pour leur aide dans ce projet, particulièrement le professeur Charles-Philippe Lamarche et le technicien Claude Aubé.

RÉFÉRENCES

- [1] Hughes, D.S., Kelly J. L., Second-order deformation of solids, *Physical Review*, vol. 92, N° 5, 1953, pages 1145-1149.
- [2] P. Rasolofosaon, B. Zinszner, P.A. Johnson. Propagation des ondes élastiques dans les matériaux non linéaires. *Revue de l'Institut Française du Pétrole* 52 (1997), pages 585-608.
- [3] Kodjo, S.A. (2008). Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par des méthodes de l'acoustique non linéaire. Application à la réaction alcalis-silice (Thèse de doctorat). Université de Sherbrooke.
- [4] Bui, D.; Kodjo, S. A.; Rivard, P.; and Fournier, B., "Evaluation of Concrete Distributed Cracks by Ultrasonic Travel Time Shift under an External Mechanical Perturbation: Study of Indirect and Semi-direct Transmission Configurations," *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2012 (in press), doi: 10.1007/s10921-012-0155-7.

- [5] Moradi-Marani F., Kodjo S.A., Rivard P., Lamarche C.P. Effect of the temperature on the Nonlinear Acoustic Behavior of Reinforced Concrete Using Dynamic Acoustoelastic Method of Time Shift, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, doi: 10.1007/s10921-013-0221-9.
- [6] Schurr Schurr, D. P.; Kim, J.-Y.; Sabra, K. G.; and Jacobs, L. J., "Damage Detection in Concrete Using Coda Wave Interferometry," *NDT & E International*, V. 44, No. 8, Dec. 2011, pages 728-735.
- [7] L.A. Ostrovsky, P.A. Johnson, Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials, Bologna, Società Italiana di Fisica, Collection La Rivista del Nuovo Cimento 24 (2001) 46 pages.

- [8] Rivard, P., and Ballivy, G., "Assessment of the Expansion Related to Alkali-Silica Reaction by the Damage Rating Index Method," *Construction and Building Materials*, V. 19, No. 2, Mar. 2005, pp. 83-90.
- [9] Shayan, A., and Grimstad, J., "Deterioration of Concrete in a Hydroelectric Concrete Gravity Dam and its Characterization," *Cement and Concrete Research*, V. 36, No. 2, Feb. 2006, pages 371-383.
- [10] Payan C, Garnier V, Moysan J. Effect of water saturation and porosity on the nonlinear elastic response of concrete. *Cem Concr Res* 2010; 40: pages 473-476.