

Nouvelle technique non destructive pour l'évaluation de l'endommagement précoce dans les ouvrages en béton

Farid Moradi-Marani, Patrice Rivard, Serge Apedovi Kodjo, Charles-Philippe Lamarche

Département de génie civil, Université de Sherbrooke
2500, boul. l'Université, Shebrooke (QC), Canada, J1K 2R1

Résumé

Au Québec, beaucoup d'infrastructures routières auront besoin d'une intervention majeure. Évaluer les matériaux et les structures ainsi que projeter leur évolution dans le futur est essentiel pour une gestion rationnelle et pour une amélioration de la sécurité. Un des mécanismes d'endommagement des ouvrages en béton est la fissuration liée à la réaction alcalis-silice (RAS). Ces fissures constituent un chemin direct pour diffuser des ions destructeurs (comme les ions de chlorure du sel de déglçage). Beaucoup de recherches ont été effectuées pour mieux comprendre la RAS; cependant, il existe encore partout au monde, une quantité importante d'ouvrages en béton soumis à la RAS et dont le degré d'endommagement reste encore inconnu. Il devient donc important d'être en mesure d'évaluer les structures endommagées pour un meilleur entretien ainsi que l'augmentation de leur durée de vie. Une nouvelle technique basée sur l'acoustique non linéaire, laquelle a été validée au laboratoire, a été développée pour caractériser les fissurations associées à la RAS. La technique consiste à quantifier l'influence d'une perturbation mécanique externe sur la propagation d'une rafale des ondes ultrasonore dans un milieu solide. L'article présente un montage en laboratoire impliquant trois grandes dalles en béton, qui sont fabriquées par les granulats réactifs et non réactifs, pour étudier le comportement non linéaire du béton par la méthode proposée récemment. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de la technique à détecter les endommagements au début de la RAS.

1 Introduction

La réaction alcalis-silice (RAS) est une réaction complexe entre les phases de silice de granulats et les hydroxydes alcalins dissous dans la solution interstitielle du béton. La réaction mène à la formation d'un gel expansif et gonflant qui génère un réseau de fissurations à travers les granulats et la pâte de ciment et un gonflement globale de la structure affectée. Les fissures diminuent grandement la rigidité du béton ainsi que la résistance à la traction.

Pour évaluer l'endommagement associé à la RAS, on dispose de plusieurs méthodes d'essais destructifs et d'essais non destructifs (END). Parmi les END qui ont été le plus souvent utilisés pour détecter les fissures, on compte les techniques acoustiques linéaires comme la technique de résonance linéaire (norme ASTM C 215-02 [1]) et la technique de vitesse d'ondes ultrasoniques (norme ASTM C 597-97 [2]). Cependant, ces méthodes sont relativement peu sensibles à l'endommagement précoce du béton [3] alors qu'une détection rapide améliore l'efficacité de l'entretien ainsi que la durée de vie de l'ouvrage. Récemment, les techniques acoustiques non linéaires ont montré une bonne efficacité à estimer les effets à jeune âge de la RAS [4-7]. Les

techniques acoustiques non linéaires tiennent compte de l'influence de la perturbation du milieu sur la propagation des ondes ultrasonores. Cette non linéarité vient du fait que les propriétés élastiques du matériau qui gouverne la propagation n'est plus constant mais dépend de l'amplitude de déformation produite par la propagation de l'onde. Au laboratoire cette technique est mis en œuvre sur des échantillons de petites tailles par :

- La technique de résonance non linéaire où on observe la fréquence de résonance de l'échantillon par rapport à l'amplitude de déformation [8]
- La technique de génération d'harmonique où la dépendamment de l'amplitude de déformation induit par la propagation de l'onde il se produit une déformation de la forme de l'onde qui se traduit par la génération d'harmoniques d'ordre supérieur dont l'amplitude est fonction de l'amplitude de déformation [9].

Bien que l'acoustique non linéaire semble très efficace, la plupart des techniques comme celles citées ci-dessus ne peuvent être utilisée de façon pratique sur le terrain.

Une nouvelle approche de la technique acoustique non linéaire appelée « technique de Saut Temporel » a été récemment développée par Kodjo [4]. La technique a été validée en laboratoire et les travaux réalisés sur le sujet montrent le potentiel de la technique pour son application in situ. Pour évaluer le niveau de l'endommagement du béton, la méthode utilise une source d'onde ultrasonore haute fréquence de faible amplitude pour sonder le matériau pendant qu'une onde basse fréquence et d'amplitude élevée générée par un impact mécanique perturbe le milieu. L'implémentation de la technique pour ausculter les tabliers de pont nécessiterait une source de perturbation autre que l'impact si on veut éviter de bloquer le trafic. L'idée ici est d'utiliser le passage des véhicules comme source de perturbation de milieu. L'objectif de ce projet est d'étudier la faisabilité d'exploitation du trafic. Pour ce faire un vérin hydraulique est utilisé pour simuler le passage de véhicule sur de grandes dalles de béton conçu avec différents granulats réactifs (source d'endommagement) et des granulats non réactifs.

2 Technique du Saut temporel

Basé sur le comportement non linéaire des matériaux en béton, Kodjo a développé une technique non destructive dénommé technique de saut temporel [4], visant à la quantification du niveau de dommage causé par la réaction alcali-silice (RAS). La technique utilise une onde ultrasonore longitudinale haute fréquence et faible amplitude pour sonder le milieu, pendant qu'une onde basse fréquence forte amplitude perturbe le milieu. L'onde générée par un choc (typiquement un marteau) appliquée sur la surface du matériau perturbe localement matériau [figure 1], et modifie temporairement ses propriétés élastiques. Cette modification des propriétés élastiques attribuée aux cycles d'ouverture-fermeture des micros-défauts et microfissures dans le matériau provoque un décalage du temps d'arrivée de l'onde ultrasonore qui sonde le milieu. L'évaluation du décalage de temps d'arrivée de l'onde après impact par rapport au temps d'arrivé de l'onde avant

impact permet d'évaluer le niveau de microfissures dans le béton. En effet ce décalage de temps appelé « saut temporel » est un indicateur du niveau d'endommagement du matériau.

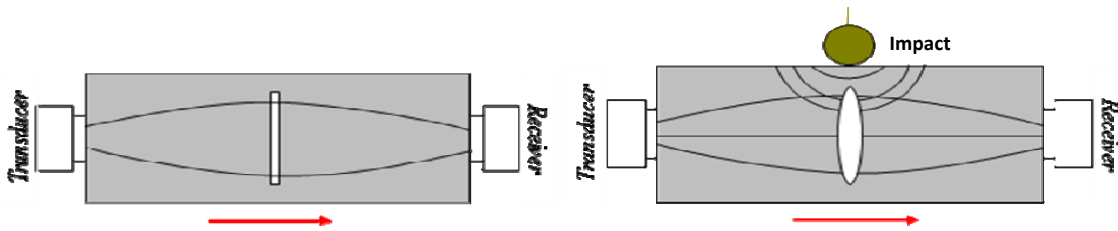


Figure 1. L'effet de l'impact sur l'échantillon endommagé pendant l'essai du saut temporel.

Snieder a montré que la queue de l'onde communément appelé l'onde coda est beaucoup plus sensible aux petits changements dans le matériau que l'onde longitudinale [10]. En effet, la fin de l'onde est une superposition de plusieurs ondes diffuses dans le matériau par multiples réflexions sur les granulats et autres inclusions présents dans le matériau ainsi que sur les bordures de la structure. Parce qu'ayant parcouru un grand volume du matériau, cette partie de l'onde rencontre plus de défauts et par conséquent est beaucoup plus sensible à l'endommagement. Tremblay et al. [11] a utilisé l'onde coda pour suivre le comportement en dynamique lente des matériaux multi composite. Comme Kodjo, l'auteur a utilisé un impact pour perturber le matériau. Il a suivi l'évolution logarithmique de la variation relative de la vitesse après l'impact pendant la période de relaxation du matériau. À partir des essais sur des bétons sains et endommagés, il a été montré que la variation relative de vitesse juste après l'impact et le temps de relaxation du matériau sont tous deux sensibles à l'endommagement.

3 Matériaux, méthodologie et traitement des données

Dans ce projet, l'endommagement des dalles en béton est suivi en utilisant la technique acoustique non linéaire du « Saut Temporel ». Pour corréliser avec le niveau d'endommagement, des mesures d'expansion sont réalisées à l'aide de plots Demec et d'extensomètres à corde vibrante.

Trois dalles en béton armé ($1,40 \times 0,75 \times 0,30 \text{ m}^3$) ont été fabriquées au laboratoire. La première dalle noté NR a été conçue avec un granulat calcaire non réactif et les deux autres notés RQ et RT ont été préparées avec un granulat réactif (calcaire Spratt) et un sable non réactif. Pour accélérer la cinétique et l'ampleur de la réaction, des granules de NaOH ont été ajoutées à l'eau gâchage afin d'obtenir un contenu total en alcalis de 1,25% Na_2O_{eq} et les dalles ont été placées dans une chambre à $50 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. La teneur en ciment des mélanges est de $400 \pm 5 \text{ kg/m}^3$ avec un rapport E/C de 0,50. Aucun adjuvant chimique n'a été utilisé au mélange. Les dalles en béton ont

été renforcées avec des armatures en acier. Afin d'évaluer l'influence du renforcement sur les signaux réfléchis. La figure 2 décrit une des dalles.



Figure 2. Dalle en béton avec instruments de mesure de l'expansion. A gauche : dalles en béton fabriquée au laboratoire; au milieu : détail des armatures et extensomètre à corde vibrante et à fibre optique; à droite : plots Demec.

Afin de reproduire en laboratoire les conditions sur site, un vérin hydraulique de MTS a été utilisé pour appliquer des formes de chargements idéalisés simulant le passage de véhicule. La figure 3 illustre les courbes de chargement appliqué sur les dalles.

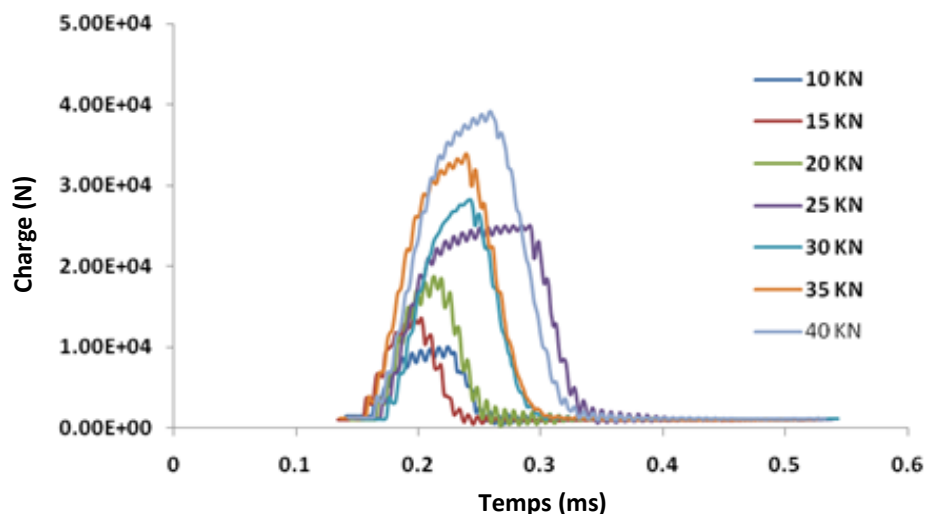


Figure 3. Les courbes de charge pour l'un des dalles en béton.

Avant de commencer l'essai le vérin est mis en appui sur la dalle avec un chargement statique de 1 kN. Ensuite, plusieurs niveaux de chargement dynamique de forme impulsionnelle ont été utilisées avec une vitesse de chargement-déchargement de 1000 kN/s partant d'une valeur initiale de 1kN et retournant à 1 kN. L'amplitude maximale atteinte par l'impulsion a été variée entre 10

kN et 40 kN avec un palier de 5 kN afin d'avoir plusieurs niveau de déformation de la dalle La figure 4 présente le montage utilisé.



Figure 4. Le montage de chargement des dalles pour simuler le passage de véhicule au laboratoire.

Pour sonder le milieu, pendant l'impact, une rafale d'impulsion excite un transducteur émetteur piézoélectrique de fréquence centrale 250 KHz un autre transducteur piézoélectrique de même fréquence centrale placé à 60 cm de l'émetteur est utilisé comme récepteur. Les deux transducteurs de marque Panametrics V1012 sont placés sur la même face.

Les transducteurs sont placés en incidence normale sur la surface de la dalle. Dans cette configuration, le signal détecté sur une durée de 1,1 s est formé de l'onde directe qui représente le front d'onde longitudinale de volume et l'onde coda qui représentent les ondes diffusées par multiples réflexions sur les granulats et sur les bordures de la dalle. Les signaux détectés par le transducteur récepteur sont amplifiés avant d'être envoyés au système d'acquisition.

Pour analyser les données, tout le signal est scanné avec une fenêtre rectangulaire de durée 160 ms jugée suffisante pour la précision du calcul. Pour chaque portion k localisée par la fenêtre on calcule le décalage temporel, entre le signal s_0 (signal avant impact pris comme référence) et s_i (signal après impact) grâce à la fonction d'intercorrélation défini par :

$$C_{s_0 s_i}(\tau) = \int_{t'-2t_w}^{t'+2t_w} s_0(t) s_i(t - \tau) dt$$

Où $2t_w$ représente la durée de la fenêtre centrés sur t' . Le décalage temporel Δt est la valeur de τ qui maximise $C_{s_0 s_i}$. Enfin, pour prendre en compte dans l'évaluation de l'endommagement, la

contribution de toutes les parties du signal sélectionnée par les N fenêtres d'analyse on calcule le cumul des Δt_k égal à : $\sum_k^N \Delta t_k$ qui sera présenté dans la section résultats [Figure 5].

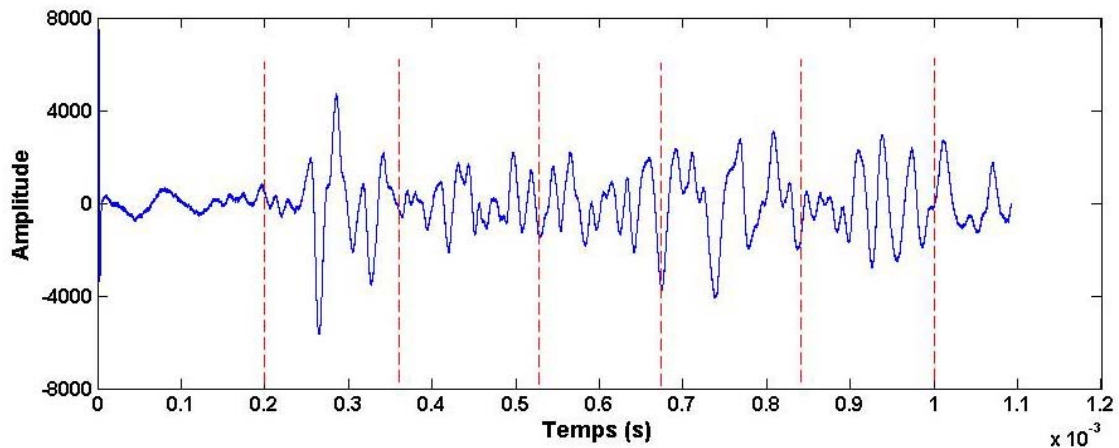


Figure 5. Le signal reçu pour la dalle non réactive et fenêtres considérées pour mesurer le saut temporel.

4 Résultats et discussion

Les expansions mesurées sont de l'ordre de trois mois après 28 jours de la fabrication pour les deux dalles réactives tandis qu'aucune expansion n'est mesurée pour la dalle réactive (figures 6 et 7). Pour les cordes vibrantes, les expansions entre l'âge de 100 jours et 200 jours ont été mesurées plusieurs fois pour être sûre de l'efficacité de la méthode.

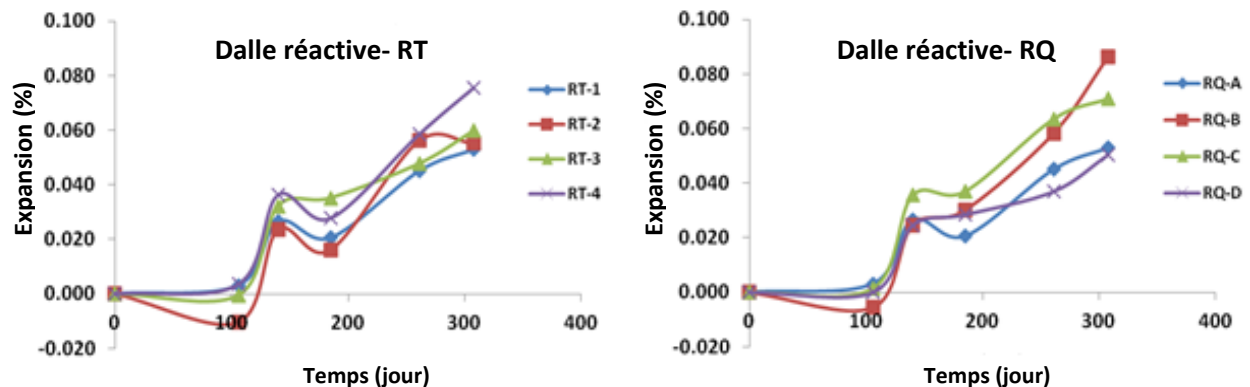


Figure 6. Expansions des dalles en béton réactives mesurées avec les plots de Demec.

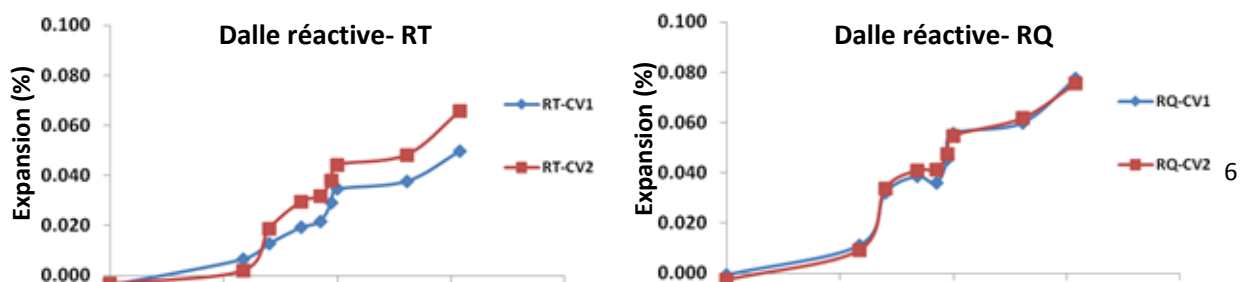


Figure 7. Les expansions des dalles en béton réactives et des dalles en béton non réactives avec les cordes vibrantes.

La figure 8 montre les courbes de déformation mesurées pour un chargement d'amplitude 40 kN pour la dalle RT pendant l'un des essais. Une déformation maximale de $23 \mu\epsilon$ mesurée ce qui est comparable aux valeurs typiques de déformations mesurées sur site lorsqu'un essieu d'un camion passe sur une route en béton [12].

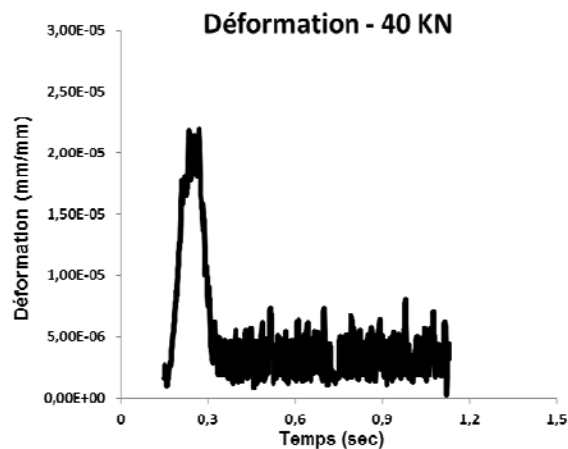


Figure 8. La déformation mesurée à la dalle RT au niveau de chargement de 40 kN.

La figure 9 montre les résultats obtenus des données du saut temporel pour les trois dalles RQ, RT et NR. On note ici que les valeurs de saut temporel augmentent avec le chargement, aussi les mesures d'expansion et de saut temporel montrent une bonne corrélation.

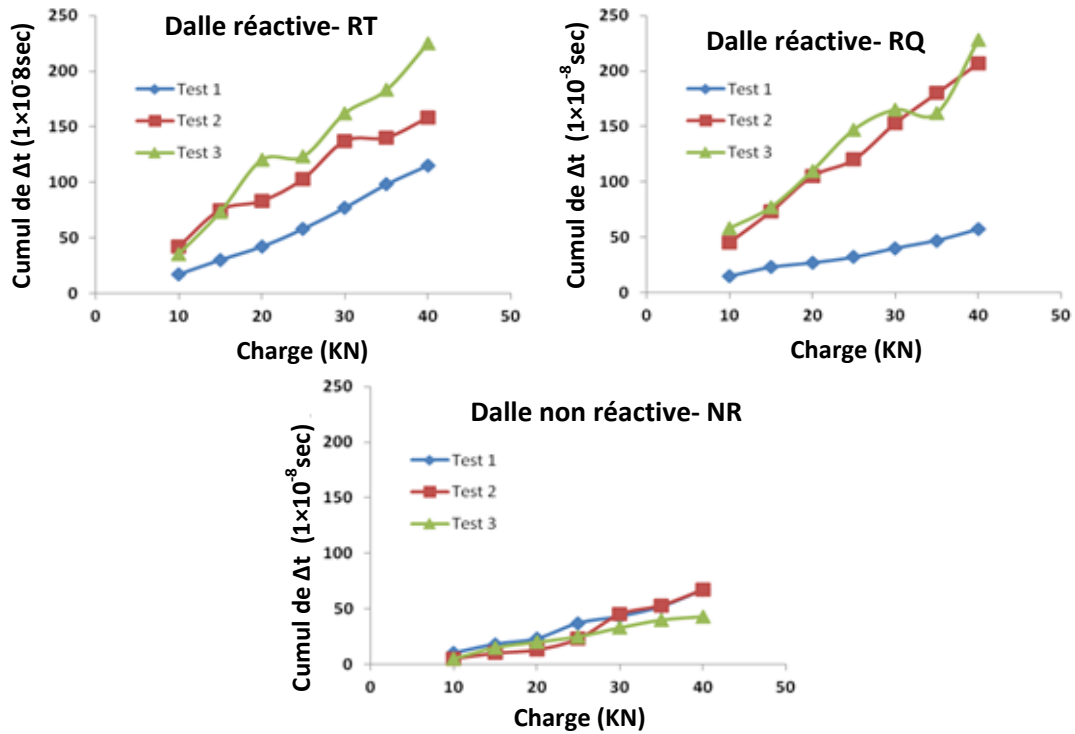


Figure 9. Valeurs de saut temporel aux dalles en béton.

En général, les méthodes acoustiques linéaires, comme la vitesse ultrasonore, ne permettent pas de détecter la fissuration précoce liée à la RAS. Les travaux de Sargolzahi *et al.* [3] ont montré qu'il n'y a pas de variation significative de la vitesse ultrasonore avant un niveau d'expansion de 0,09%, et au-delà la variation de vitesse est faible. En revanche, les résultats de l'essai du saut temporel ont montré une très grande variation à de faibles niveaux d'expansion.

La valeur du saut temporel augmente jusqu'à 200% pour la dalle RT du premier test et de 400% pour la dalle de RQ pour le même niveau de chargement. La figure 10 présente des sauts temporels par rapport à l'expansion pour les trois tests menés sur les dalles. On peut voir qu'aucune expansion claire n'est observée pour la dalle NR, avec les granulats non réactive pendant les trois tests.

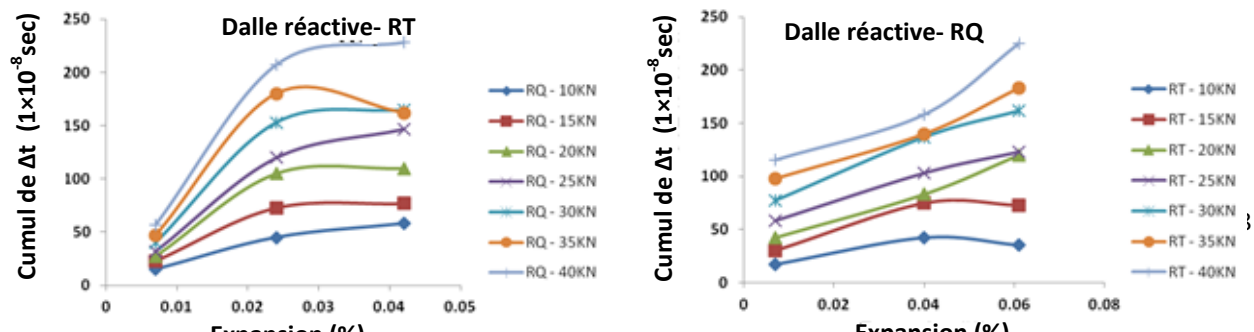


Figure 10. Les sauts temporels par rapport des expansions liées à la RAS.

5 Conclusion

Cet article présente l'application de la nouvelle technique acoustique non linéaire nommée « technique de Saut temporel » qui a le potentiel d'être appliquée sur site. Ce projet tente de développer et adapter la technique pour l'application sur site. La technique emploie deux types d'ondes : 1) une rafale d'ondes de haute fréquence et de faible amplitude qui sonde le milieu; 2) un impact par lequel une onde basse fréquence et de forte amplitude perturbe le matériau. Dans le cas d'un tablier de pont, l'impact peut être remplacé par le passage d'un véhicule. Dans ce projet il a été étudié la faisabilité en simulant le passage du véhicule par le chargement dynamique d'un vérin hydraulique. Pour ce faire, deux dalles en béton ont été fabriquées avec des granulats réactifs et une troisième avec des granulats non réactifs.

Les résultats de la recherche montrent qu'il y a bon corrélation entre les résultats obtenus de l'essai du Saut temporel et les mesures conventionnelles de Demec et de cordes vibrantes. Les deux groupes de technique montrent qu'il n'y aucune évolution dans le béton de la dalle non réactive alors qu'on observe de l'expansion produit par la RAS pour les dalles réactives. La méthode de Saut temporel démontre l'augmentation de 200% et de 400% pour les dalles réactives alors que cette valeur est négligeable pour la dalle non réactive. Par ailleurs, les expansions mesurées par les deux techniques de plots Demec et de cordes vibrantes sont comparables,

Bibliographie

1. ASTM C 215-02 (2002): Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional frequencies of concrete specimens. American Society for Testing & Materials, West Conshohocken, Annual Book of ASTM Standards (04.02): Concrete and Aggregates.
2. ASTM C 597-97 (1998): Test method for pulse velocity through concrete. American Society for Testing & Materials, West Conshohocken, Annual Book of ASTM Standards (04.02): Concrete and Aggregates.
3. Sargolzahi, M., Kodjo, S. A., Rivard, P. & Rhazi, J.: Effectiveness of nondestructive testing for the evaluation of alkali-silica reaction in concrete. In: Construction and Building Materials 24 (2010) No. 8, pp. 1398-1403.
4. Kodjo, A. : Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par des méthodes de l'acoustique non linéaire, application à la réaction alcalis-silice, Ph.D. Thesis in French Université de Sherbrooke/Université Cergy-Pontoise (2008), 127p.
5. Payan, C., Garnier, V. & Moysan, J.: Effect of water saturation and porosity on the nonlinear elastic response of concrete. In: Cement and Concrete Research 40 (2010) No. 3, pp. 473-476.
6. Kodjo, A. S., Rivard, P., Cohen-Tenoudji, F. & Gallias, J. L.: Evaluation of damages due to alkali-silica reaction with nonlinear acoustics techniques. In: Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA), Acoustical Society of America Digital Library 7 (2009) No. 1: 045003-045003-10.
7. Moradi-Marani, F. & Rivard, P.: Nondestructive assessment of alkali-silica reaction in concrete: A review. In: International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, Istanbul, Turkey, (2011), 6p.
8. Van Den Abeele, K.E.A, Sutin,A., Carmeliet, J.&Johnson, P.A.: Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS). In: NDT & E International, 34(2010) No. 4, pp. 239-248.
9. Payan,C., Garnier,V.&Moysan, J.: Effect of water saturation and porosity on the nonlinear elastic response of concrete. In: Cement and Concrete Research, 40(2010), No. 3, pp. 473-476.
10. Snieder, R., Gret, A., Douma, H. & Scales, J. (2002). Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity. *Science*, 295(5563), 2253-5.
11. Tremblay, N., Larose, E.& Rossetto, V.: Probing slow dynamics of consolidated granular multicomposite materials by diffuse acoustic wave spectroscopy. In: Journal of Acoustical Society of America, 127(2010), No.3, pp.1239-1243.

12. Zhang, W., Wang, Q. & Suo, C.: A novel vehicle classification using embedded strain gage sensors. In: *Sensores*, 8(2008), pp. 6952-6971.