

# INVESTIGATION NON DESTRUCTIVE POUR LES STRUCTURES AUTOROUTIÈRES TOUCHÉES PAR LA RÉACTION ALCALIS-SILICE

Diem Bui <sup>1</sup>, Serge Kodjo<sup>1</sup>, Patrice Rivard<sup>1</sup>, Benoit Fournier <sup>2</sup>

(1) *Chaire CRSNG industrielle sur l'auscultation des structures en béton, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke*

(2) *Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec*

## RÉSUMÉ

Beaucoup de recherches ont été effectuées pour mieux comprendre les mécanismes de la réaction alcalis-silice (RAS) les facteurs d'influence et des techniques de mitigation. Cependant, il existe encore une quantité importante d'infrastructures soumises à la RAS partout dans le monde et dont le degré d'endommagement reste inconnu. Il devient donc important d'être en mesure d'évaluer ces structures et surtout d'en faire le suivi une fois le diagnostic effectué afin notamment de vérifier l'efficacité des interventions. Des méthodes basées sur l'acoustique linéaire existent depuis plus de 60 ans pour caractériser des matériaux de toutes sortes en évaluant soit la vitesse de la propagation ou la fréquence centroïde d'ondes de surface ou de volume, soit en mesurant la fréquence de résonance des éléments de la structure. Elles sont relativement faciles à utiliser et à interpréter. Les récents développements en physique mécanique et en instrumentation ont montré que le béton avait un comportement non linéaire vis-à-vis de la propagation des ondes élastiques et cette non-linéarité est d'autant plus marquée quand le béton est endommagé. Plusieurs techniques basées sur l'acoustique non linéaire ont vu le jour pour des essais en laboratoire, leurs sensibilités à quantifier des micro-défauts ont été démontrées. Le défi est d'être capable d'utiliser ces méthodes in situ. Pour relever ce défi une nouvelle technique basée sur l'élasticité non linéaire est proposée par l'équipe du Groupe de recherche en auscultation et instrumentation de l'Université de Sherbrooke. Différentes structures ont fait l'objet d'investigation pour comparer la pertinence de cette technique par rapport au technique classique de l'élasticité linéaire. Les résultats de ces travaux permettront d'élaborer un guide méthodologique sur les méthodes les plus pertinentes et qui pourra s'intégrer dans le protocole d'inspection des structures touchées par la RAS.

## 1. INTRODUCTION

La réaction alcalis-silice (RAS) est un processus de dégradation du béton causant le gonflement et la fissuration extensive de nombreuses structures dans le monde et au Québec notamment. Déterminer quelles les structures qui sont réellement affectées par la RAS avant que les symptômes ne deviennent trop importants demeure un défi.

Le Federal Highway Administration des États-Unis a mis en place un programme de recherche et développement pour attaquer le problème de la RAS sur ses structures autoroutières (ponts et chaussées). Le but du programme est de développer des protocoles d'évaluation, de suivi et de mitigation des structures affectées par la RAS. Un des mandats de ce programme concerne le développement des méthodes d'évaluation non destructive permettant :

- d'identifier la RAS;
- de quantifier l'endommagement;

- d'assurer un suivi approprié de la structure affectée.

Afin d'y parvenir, notre équipe avons défini 7 tâches majeures, l'une d'entre elles étant de valider et calibrer les méthodes non destructives (ND) sur des structures en service après leur développement en laboratoire et la validation sur des spécimens grandeur nature. Ces structures comprennent chaussées, murs de soutènement, piles, colonnes et barrières situées dans différents états. Les recherches devraient aboutir à un protocole ND qui se veut un outil supplémentaire pour les gestionnaires d'ouvrages.

Le présent article présentera quelques résultats de ces interventions in situ, plus précisément ceux obtenus sur cinq structures de l'autoroute I-395 dans les environs de Bangor, dans le Maine.

## **2. LA RÉACTION ALCALIS-SILICE**

Lorsque des granulats présentant des structures de silice microcristalline ou amorphe dans un environnement alcalin comme le béton, il se produit une réaction entre la silice et les hydroxydes alcalins (Fournier, 2000). De cette réaction résulte un gel dont la composition est variable (Poole, 1992). Le gel en question se dépose dans les vides et interstices de la matrice. L'expansion du béton se produit dans deux cas : soit par la présence d'une quantité de gel plus grande que le volume de vide, soit par le gonflement du gel lors d'un apport d'eau. Dans les deux cas, le gel produit une pression interne sur le béton qui fissure. Cette fissuration est fine et affecte l'ensemble du volume. Les fissures sont souvent remplies de gel. Ce gel, d'abord de consistance visqueuse, finit par se cristalliser après un certain temps.

D'après certains travaux effectués sur la RAS, on s'est aperçu que ce type de dégradation n'affecte généralement pas l'intégrité structurale dans la plupart des cas. La résistance à la compression ne diminue pas significativement, ni la résistance à la flexion en début de réaction. Par contre, on note un changement du module d'élasticité et de la résistance à la traction de façon plus précoce (Bérubé *et al.*, 2004).

Ces quelques caractéristiques de la RAS sont importantes afin de choisir parmi la panoplie de techniques non destructives existantes. Dans le cas de la fissuration affectant peu la résistance à la compression, les techniques acoustiques sont les plus intéressantes.

## **3. LES ESSAIS IN-SITU**

### **3.1 Les structures auscultées**

Les structures auscultées sont situées dans la ville de Bangor, au Maine et dans ses environs. Elles supportent toutes l'autoroute I-395 :

- 1) Viaduc sur Main Street : le mur de soutènement de la culée ouest;
- 2) Viaduc de Robertson : le mur de soutènement de la culée sud;

- 3) Viaduc de Greenpoint : le mur de soutènement de la culée nord;
- 4) Viaduc de South Parkway : les 6 colonnes centrales;
- 5) Pont de la rivière Penobscot : 2 piles de la rive ouest.



Figure 1 : Le viaduc de Main Street et de South Parkway, Bangor, Maine

Une première inspection visuelle a permis de constater que toutes les structures présentent une similitude : les éléments de béton sur les côtés sont visiblement plus dégradés que les éléments centraux, ce qui semble associé au fait que les éléments latéraux sont plus exposés aux intempéries.

Un nombre de points de mesure limité a été pris afin de pouvoir expérimenter plusieurs méthodes sur une variété de structure afin d'obtenir une image globale de chacune. Compte tenu de cette limitation, les résultats servent principalement à orienter le travail d'investigation en laboratoire afin d'optimiser les techniques et non pour tirer des conclusions sur l'état des structures.

### 3.2 Les méthodes d'investigation employées

#### 3.2.1 Impact-écho

La technique d'impact-écho utilise le phénomène de réflexion de l'onde acoustique générée à la surface du béton. Lorsque l'onde se propageant dans le béton rencontre une interface ou discontinuité, elle est réfléchiée. Pour générer ces ondes mécaniques, un impact est appliqué à la surface du matériau avec des billes d'acier. Plusieurs dimensions peuvent être utilisées en fonction de la profondeur de l'élément investigué. Pour des éléments minces, une plus haute fréquence est à favoriser, donc, des billes de plus petites tailles seront utilisées, alors que pour des éléments de grande profondeur une basse fréquence est à favoriser, donc des billes de grande taille (Cheng, 1993). L'onde réfléchiée est ensuite détectée par un accéléromètre puis enregistrée sur un ordinateur. Le spectre du signal obtenu à partir de la transformée de Fourier (FFT : *Fast Fourier Transform*) permet de déterminer la fréquence de résonance de l'élément investigué. La valeur de la fréquence de résonance dépend de la vitesse de l'onde de compression dans le milieu de propagation ainsi que l'épaisseur de l'élément (éq. 3.1).

$$f = \frac{BC_p}{2A} \quad (\text{éq. 3.1})$$

Avec  $f$  la fréquence de résonance,  $C_p$  est la vitesse de l'onde de compression dans le milieu,  $A$  est l'épaisseur de l'élément et  $\beta$  est un coefficient qui tient compte de la forme de l'élément ( $\beta = 0,96$  dans le cas des dalles).

Lorsque l'épaisseur de l'élément est inconnue, l'évaluation de la fréquence de résonance permet de déterminer non seulement l'épaisseur de l'élément, mais également des délaminations si la situation se présente. Lorsque l'épaisseur est connue, nous pouvons évaluer la vitesse de compression dite vitesse indirecte. Rappelons ici que la réaction alcalis-silice crée un réseau dense de fissuration qui, lorsque l'endommagement a atteint un état avancé, affaiblit fortement la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans le milieu. Ainsi l'évaluation de la vitesse permettra d'évaluer l'état d'endommagement.

### 3.2.2 La vitesse d'impulsions ultrasonores (UPV)

Les essais sont réalisés avec des appareils émetteurs-récepteurs d'onde ultrasonores. L'évaluation de la vitesse de propagation dans un milieu de façon directe se fait en déterminant le temps de parcours  $t$  de l'onde pour une distance  $d$  connue. Il suffit de déterminer de façon visuelle sur le signal capté, le début de l'arrivée de l'onde transmise. À partir du temps d'arrivée, il est possible de

calculer la vitesse directe par l'équation  $v = \frac{d}{t}$ . Cette vitesse permet d'évaluer l'état du béton (tableau 1).

Tableau 1: Classification du béton selon la vitesse d'une impulsion ultrasonique (Solis-Carcano, 2008)

Vitesse de propagation (m/s)	Résistance à la compression (MPa)	Classification du béton
$V > 4575$	$\sigma > 28$	Très bon
$4575 > V > 3660$	$28 > \sigma > 20$	Bon
$3660 > V > 3050$	$\sigma < 20$	Moyen
$3050 > V > 2135$		Mauvais
$V < 2135$		Très mauvais

### 3.2.2 La fréquence centroïde

L'analyse de la fréquence centroïde est une variation de l'analyse de la fréquence d'amplitude maximale du signal à la différence que dans ce cas, on considère la fréquence moyenne du signal après propagation dans le milieu (Peeters, 2004). Elle a été calculée à partir du module du spectre du signal ainsi qu'à partir de la densité spectrale de puissance (DSP).

Le matériau fissuré aura tendance à filtrer les hautes fréquences du signal par des phénomènes physiques tels que l'atténuation et la diffusion du signal induit par les fissures.

### 3.2.3 Acoustique non linéaire : le saut temporel

En acoustique non linéaire, nous provoquons par une onde de forte amplitude l'ouverture-fermeture des microfissures. Ces ouvertures-fermetures des microfissures contribuent à la modification des propriétés élastiques du milieu, entraînant ainsi son comportement non linéaire. Plus le béton est endommagé plus il est non linéaire. Pour évaluer cette non-linéarité, on utilise des rafales d'ondes ultrasonores pour sonder le milieu pendant qu'on applique un impact qui génère une onde basse fréquence et haute amplitude provoquant l'ouverture-fermeture des microfissures. À partir des outils de traitement du signal, on évalue le décalage de temps d'arrivée de l'onde avant l'impact et après l'impact. Plus le matériau est endommagé, plus grand est le décalage de temps (Kodjo, 2008).

Ce décalage peut être calculé pour trois types d'onde de volume, à savoir les ondes de compression, les ondes de cisaillement et les ondes coda. Les ondes coda résultent d'une superposition de plusieurs ondes secondaires provenant de l'incidence d'ondes primaires sur les hétérogénéités du béton (Herraiz et Espinosa, 1987). Elle permet d'obtenir de l'information sur l'état d'un plus grand volume de matériau et non seulement sur une trajectoire précise.

La configuration de test est présentée à la figure 2. Lorsque les dimensions de la structure à investiguer le permettent, les deux transducteurs émetteur-récepteur utilisés pour le sondage sont positionnés en mode transmission directe, dans le cas contraire les deux transducteurs seront posés sur la même face, configuration que nous appelons transmission indirecte.

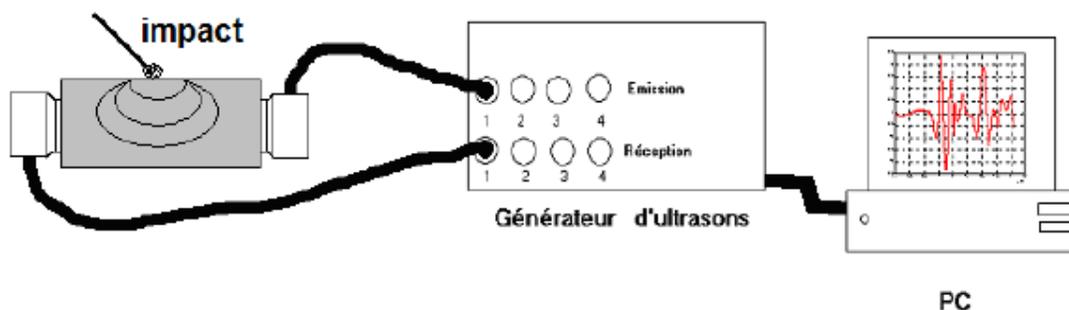


Figure 2: Configuration de test non linéaire : saut temporel (Kodjo, 2008)

### 3.2.4 Indice d'endommagement de surface

L'indice d'endommagement de surface est un outil que nous nous sommes donné pour pouvoir corréler les résultats des essais non destructifs avec l'endommagement observable en surface du béton. L'indice permet de qualifier les surfaces sur deux critères : la densité du patron de fissuration et la largeur des fissures. Les deux critères sont évalués sur une échelle de nulle à importante. Chaque gradation est liée à indice. Ceci nous permet d'attribuer une note de 0 à 100 à une surface, 100 étant la pire.

Cet indice est qualitatif et subjectif car nous nous basons uniquement sur une observation visuelle sans décompte ou cartographie. Toutefois, dans le cadre de nos activités, c'est un outil rapide à établir et facile à utiliser.

## 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 4.4 Fréquence de résonance et vitesse indirecte

Selon le tableau 1 les résultats des essais en impact-écho indiquent un béton dans un état mauvais à moyen, avec des vitesses allant de 2600 m/s à 3500 m/s. Seul le pont présente un très bon béton. Cela concorde bien avec les observations visuelles de surface (figure 3).

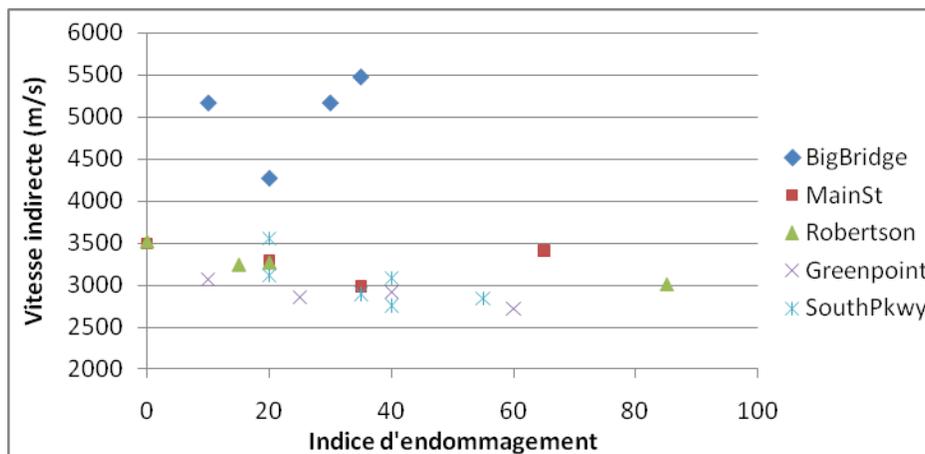


Figure 3: Vitesses indirectes en fonction de l'indice d'endommagement pour les 5 structures de Bangor

Il est intéressant d'observer le profil général de l'ouvrage en fonction de l'emplacement du point de mesure sur la structure. En effet, la tendance observée visuellement est que le centre de la structure est généralement moins dégradé que les côtés parce qu'il est moins exposé aux effets environnementaux qui intensifie la RAS. Nous nous attendions donc à une cloche sur toutes les structures sauf celle du grand pont et c'est ce qui est présenté à la figure 4.

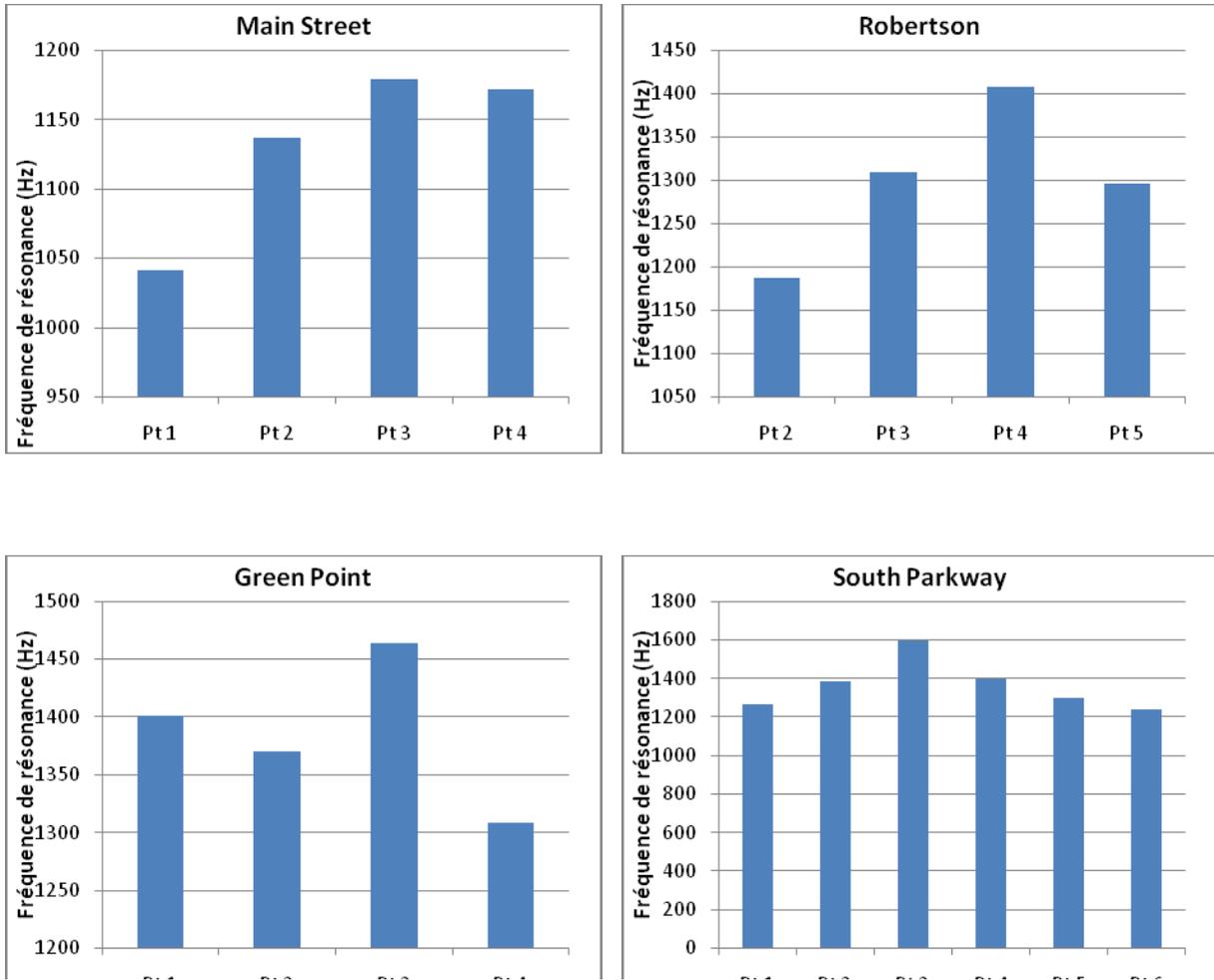


Figure 4: Fréquence de résonance selon l'emplacement sur la structure pour les 5 structures de Bangor

Toutefois, les résultats concordent moins bien avec l'observation visuelle localisée strictement au point de mesure (figure 3 et 5). Sur la figure 3, on observe que les vitesses enregistrés sur les piles de pont sont nettement plus élevés, peut-être car la qualité du béton est supérieure. Sur la figure 5, une fois les vitesses du pont retirées, on remarque une corrélation non linéaire entre la vitesse et l'indice d'endommagement. Cela indique que l'incohérence des résultats des piles de pont n'est pas liée à la prise de mesure, mais fort probablement à une évaluation trop sévère de l'indice d'endommagement par l'observateur.

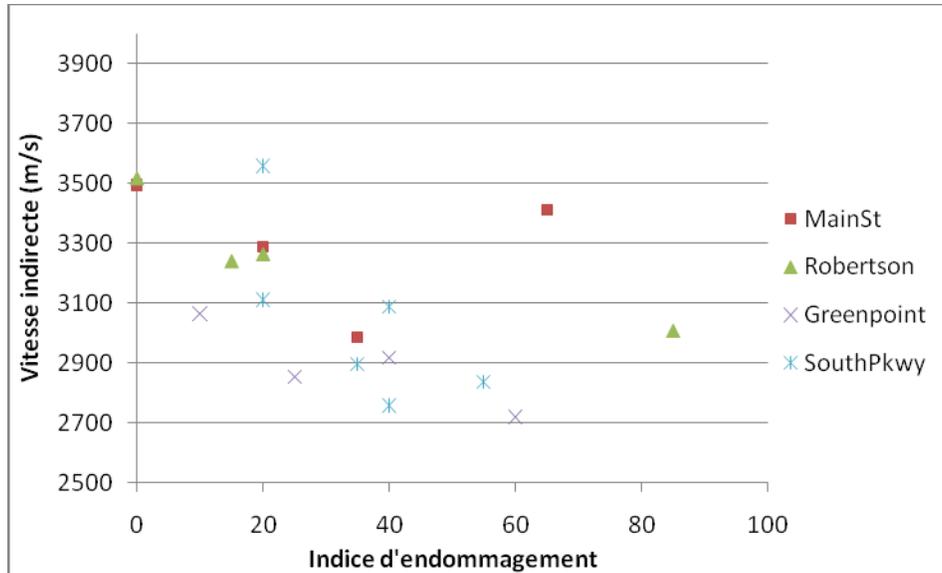


Figure 5: Vitesses indirectes en fonction de l'indice d'endommagement pour les 4 structures de Bangor à l'exception des piles de pont

#### 4.4 Vitesse d'impulsions ultrasonores

Les vitesses obtenues à partir des essais ultrasoniques (figure 6) indiquent un bon béton dans la plupart des cas et un mauvais béton pour le viaduc de Main St. et de Robertson. Toutefois, il est également vrai que Main St. et Robertson présentaient des signes d'endommagement plus sévères. On observait sur les ailes de grandes fissures accompagnées d'exsudation abondant.

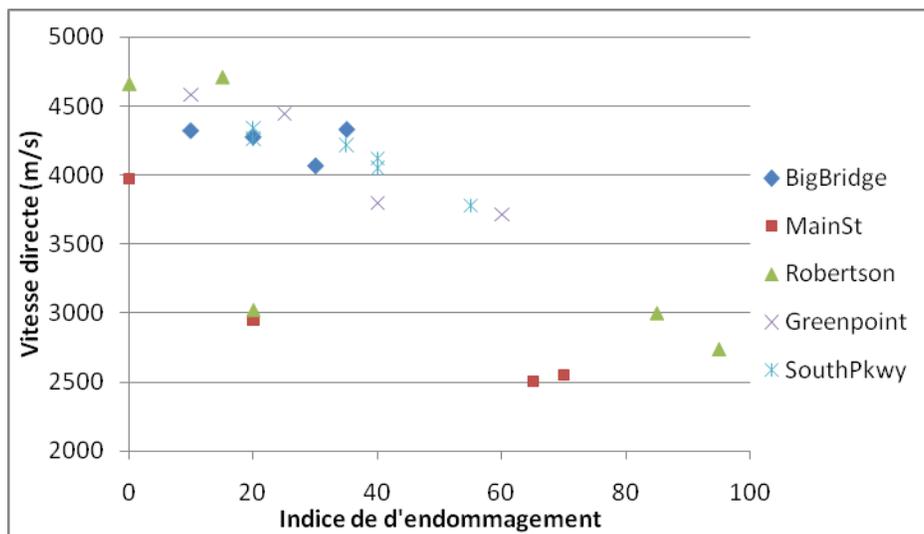


Figure 6: Vitesse directe en fonction de l'indice d'endommagement pour les 5 structures de Bangor

En traçant ce graphe, on observe une pente descendante qui correspond bien à nos attentes. Cette corrélation entre les vitesses directes et l'indice de dégradation est très intéressant pour la suite des travaux. D'abord, elle indique que les indices utilisés ont un intérêt certain dans le cadre de ces travaux, que ces indices permettent réellement de vérifier rapidement la cohérence de certains

résultats. Deuxièmement, elle appuie la théorie de la relation linéaire entre la vitesse de propagation et l'état d'endommagement.

#### 4.4 Fréquences centroïdes et maximales

On s'attend à ce que les fréquences calculées à partir de la densité spectrale de puissance (DSP) et à partir du module du spectre décroissent avec l'endommagement. Une faible tendance était perceptible pour la plupart des structures correspondant à cette hypothèse. La corrélation était plus intéressante lorsque nous combinions l'ensemble des résultats. Ceci est observable sur les figures 6, 7, 8.

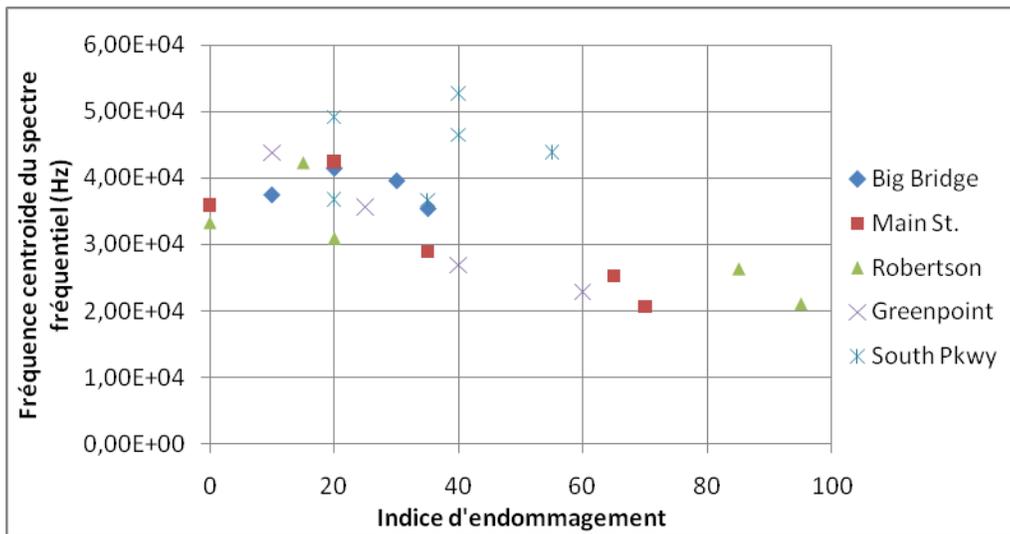


Figure 7: Fréquences centroïdes provenant du spectre fréquentiel en fonction de l'indice d'endommagement

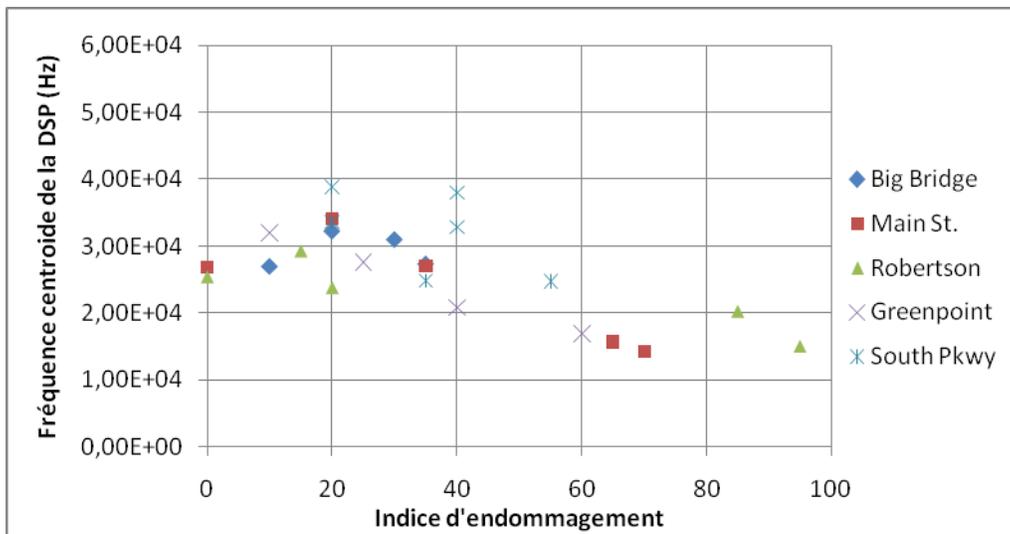


Figure 8: Fréquences centroïdes provenant de la DSP en fonction de l'indice d'endommagement

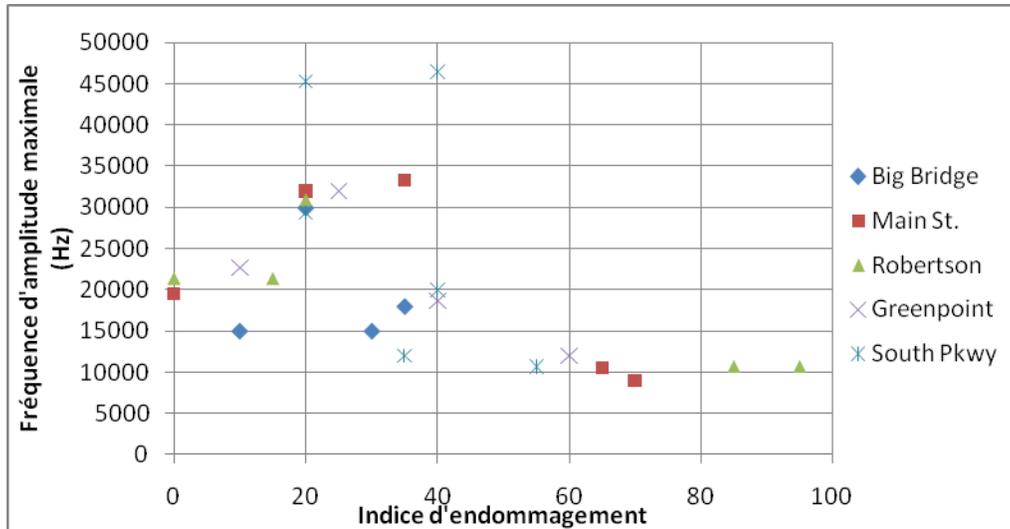


Figure 9: Fréquences d'amplitude maximale en fonction de l'indice d'endommagement

Globalement, la tendance observée sur les trois graphes correspond à notre prévision. Toutefois, elle est meilleure pour la fréquence centroïde sur la DSP. De plus, on observe un léger plateau pour les indices supérieurs sur tous les graphes, mais principalement sur celle des fréquences d'amplitude maximale. Il est possible que pour de plus faibles fréquences, il faut un plus grand étalement pour observer des différences significatives. Ainsi, pour des niveaux d'endommagement plus élevés, la variation de la fréquence d'amplitude maximale ou centroïde devient plus faible. En contrepartie, on peut penser que les fréquences sont plus sensibles à des niveaux d'endommagement plus faibles.

#### 4.4 Saut temporel

La figure 10 illustre le saut temporel pour chaque point de mesure, présenté suivant son indice d'endommagement. Nous avons omis un des résultats de Robertson qui était à l'écart et qui modifiait l'échelle de façon inintéressante.

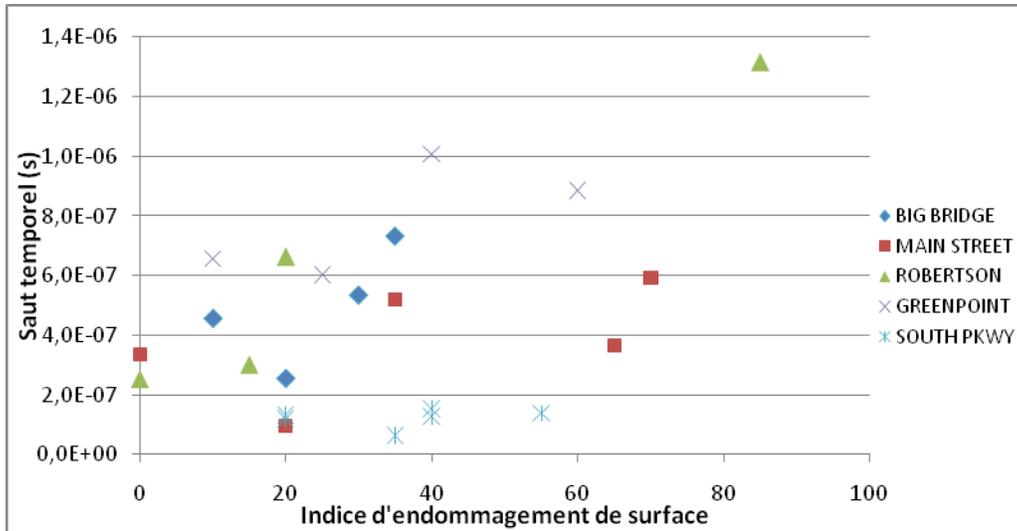


Figure 10: Saut temporel en fonction de l'indice d'endommagement de surface pour les 5 structures de Bangor

Ce graphe présente effectivement la tendance prévue, le saut temporel augmentant avec l'indice d'endommagement, mais les résultats sont trop éparés pour avoir une bonne corrélation. Toutefois, comme le saut temporel est sujet au comportement du béton ayant des microfissurations interne, l'indice de dégradation de surface n'est peut-être pas tout à fait approprié pour effectuer une corrélation. Afin d'évaluer la pertinence du saut temporel, nous avons tenté la corrélation avec les fréquences calculées dans la section précédente.

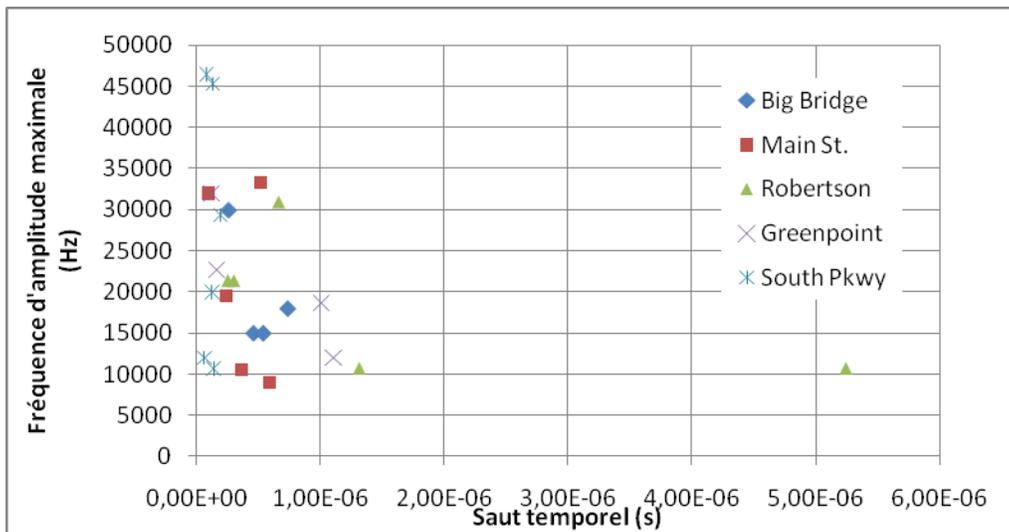


Figure 11 : Fréquence d'amplitude maximale en fonction du saut temporel

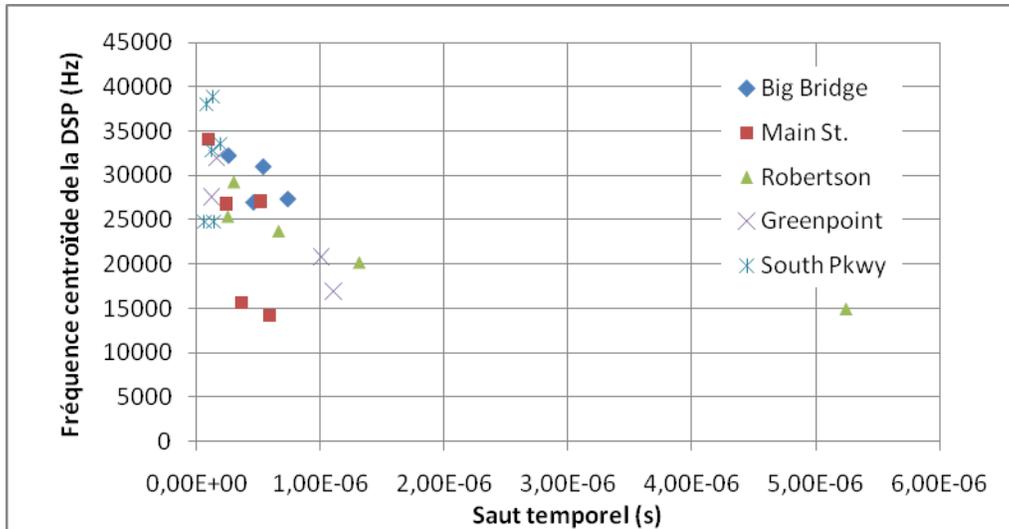


Figure 12 : Fréquence centroïde de la DSP en fonction du saut temporel

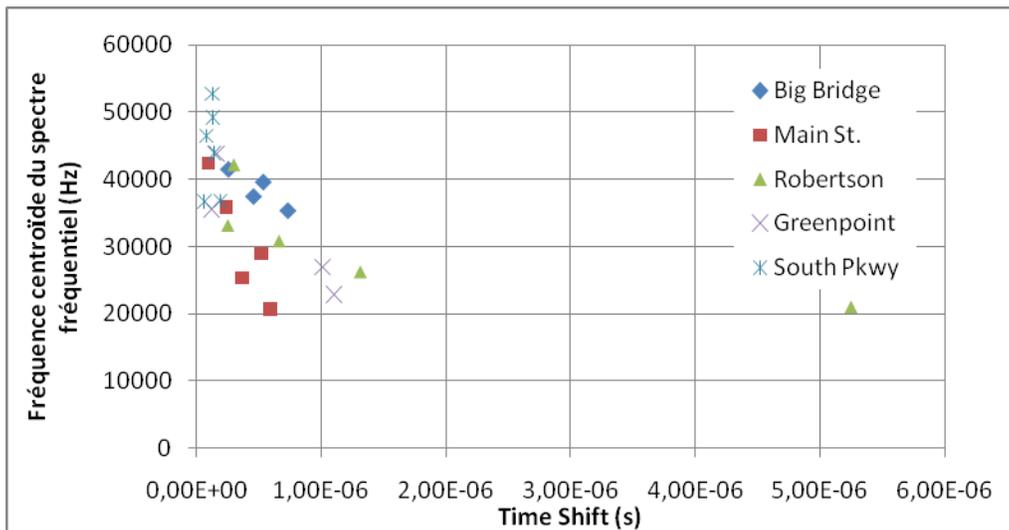


Figure 13 : Fréquence centroïde du spectre fréquentiel en fonction du saut temporel

Avec les figures de 11 à 13, nous pouvons, une fois de plus, évaluer les différentes fréquences calculées entre elles. Ainsi, il est possible de remarquer que la meilleure corrélation non linéaire est celle opposant la fréquence centroïde du spectre fréquentiel au saut temporel. Le graphe est vraiment intéressant car on peut voir que le saut varie très peu lorsque les fréquences sont élevées (meilleur béton) et qu'elle semble avoir une tendance asymptotique pour une fréquence se situant autour de 20 kHz.

Un zoom sur les points en bas de  $2,0 \times 10^{-6}$  s de saut permet de voir que le saut varie beaucoup plus pour les fréquences en bas de 40 kHz (figure 14). Pour l'instant, nous avons trop peu de données pour établir la zone d'influence pour le saut temporel, mais les résultats actuels semblent indiquer une bonne sensibilité à l'initiation du dommage interne.

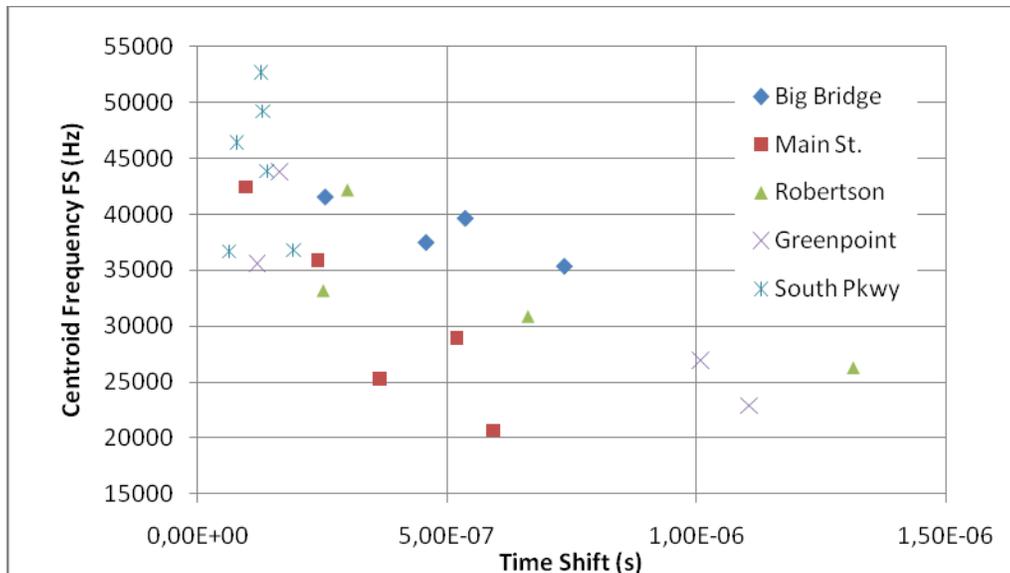


Figure 144 : Agrandissement du graphe de la figure 15

## 5. CONCLUSION

La littérature rapporte que l'impact-écho est un essai qui fonctionne bien pour la détection des défauts (souvent ponctuels) dans le béton et plusieurs démonstrations ont été réalisées en parallèle à des essais de scléromètre afin de valider la méthode. Dans notre cas, nous avons eu recours à l'indice d'endommagement de surface. Parce que cet indice ne considère que deux orientations de fissure qui sont parallèles à la direction de propagation des ondes d'impact de la technique, la corrélation s'en trouve faible, voire nulle. Il faudra donc étudier l'influence de l'orientation des fissures sur les réponses en impact-écho par des essais en laboratoire.

Il a également été remarqué qu'avec un élément de faible épaisseur, les réponses étaient plus uniformes à moins que les bétons aient une différence de composition ou d'exposition importante (béton neuf vs. béton endommagé). La prise d'un grand nombre de mesures sur des dalles dont les compositions et les états d'endommagement sont connues aidera à mieux évaluer les effets de bord, et de la forme de la structure sur les résultats.

Pour l'UPV, il a été remarqué qu'avec la configuration des capteurs que nous avons sur les sites de Bangor (indirecte), il était possible d'obtenir une relation intéressante entre la vitesse et l'indice de dégradation de surface car avec cette configuration, la direction de propagation de l'onde est perpendiculaire à l'orientation des fissures. Avec une configuration en transmission directe, nous aurions probablement eu la même confusion qu'en impact-écho car nos ondes se propageraient parallèlement aux fissures évaluées par l'indice d'endommagement. Plus de données nous permettrait de réaliser une courbe de tendance pour illustrer la relation et se servir de celle-ci pour évaluer l'état du béton. Toutefois, dans la suite de nos études, nos résultats seront corrélés avec les

mesures de fissurations de surface, d'humidité et de la pétrographie effectuées par les équipes de l'Université Laval et de l'Université du Texas avant de conclure.

Le saut temporel a démontré une bonne sensibilité à l'état d'endommagement du béton et s'accroît effectivement avec un béton plus endommagé. Cela a été remarqué lorsqu'on a comparé le saut temporel par rapport à l'indice d'endommagement et confirmé avec la fréquence centroïde du spectre fréquentiel ou la corrélation était meilleure. Nous avons vu que jusqu'à une certaine fréquence, le saut varie peu, qu'il existe une zone de plus grande sensibilité pour ensuite atteindre un plateau à une certaine fréquence plus basse. Il est d'intérêt de déterminer la zone de travail de la méthode afin de ne pas tenir compte de valeurs aberrantes, donc établir la plage de fréquences pour laquelle le saut ne varie pas, la plage pour laquelle le saut est un bon indicateur d'endommagement ainsi que le début du plateau pour lequel, la variation de saut n'a pas une grande signification.

La configuration de transmission indirecte utilisée pour le saut temporel permet la transmission du signal dans le béton, mais également en surface. Il serait donc intéressant de pouvoir distinguer, dans le signal capté, l'onde de surface de l'onde de corps et de les analyser séparément. De cette façon, non seulement on permet une meilleure utilisation de l'indice d'endommagement, mais également une meilleure compréhension de l'endommagement du matériau. Des essais sont donc en cours avec une configuration de transmission semi-directe (capteurs sont inclinés à 45 degrés) qui permet de distinguer les différents types d'onde.

À la lumière de ces nombreux résultats, on peut conclure que les techniques non destructives ont un grand potentiel in situ. Les mesures que nous avons prises sur site reflètent généralement les observations visuelles sans le biais inhérent à ces observations. Elles ont également le potentiel de voir au-delà du visible. Les travaux de recherche en cours permettront de mettre en lumière le potentiel et les limites de ces différentes techniques et, de contribuer à fournir aux ingénieurs sur le terrain qui évaluent l'état d'endommagement causé par la RAS un protocole d'investigation non destructif plus efficace.

## **REMERCIEMENTS**

L'aide financière a été assurée par le Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB) ainsi que le Federal Highway Administration (FHWA). Les auteurs tiennent également à remercier le Département des Transports de l'état du Maine ainsi que l'équipe de l'Université du Texas pour leur coopération durant les campagnes d'auscultation.

## **6. RÉFÉRENCES**

Cheng, C. et Sansalone, M. (1993). Impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies. *Matériaux et constructions*, volume 26, numéro 159, p. 274-285.

Fournier, B. et Berube, M. (2000). Alkali-aggregate reaction in concrete: A review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 27, numéro 2, p. 167-191.

Herraiz, E. et Espinosa, F. (1987). Coda Waves : A Review. *PAGEOPH*, volume 125, numéro 4, p.499-578.

Kodjo, S. (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.

Peeters, G. (2004). A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project. *IRCAM*.

Poole, A.B. (1992). Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. *Alkali-silica reaction in concrete/edited by R.N. Swamy*. Blackie and Son Ltd, Bishopbriggs, Glasgow, p. 16-20.

Solís-Carcaño, R. et Moreno, E. I. (2008). Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 6, p. 1225-1231.