

# ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES PILES DE PONT CONFINÉES DE PRFC PAR L'ÉCOUTE ACOUSTIQUE

Audrey Rouleau Turcotte, Zabihallah Moradian, Patrice Rivard et Nathalie Roy  
*Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke*

*Lors de la conception des ouvrages routiers, les piles de pont sont considérées comme l'élément dissipateur d'énergie, ce qui mène à des dommages importants après des événements majeurs tel un séisme. Une technique de réhabilitation efficace largement utilisée aux États-Unis est le chemisage en polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) qui améliore la capacité structurale et la ductilité des poteaux. Afin de caractériser l'endommagement et les états limites de ces poteaux renforcés de PRFC, une campagne expérimentale a été menée sur des poteaux en béton armé (BA) confiné de PRFC d'une hauteur de 2 mètres et d'un diamètre de 300 millimètres soumis à un chargement cyclique incrémental. Un suivi visuel mais aussi en profondeur avec l'écoute acoustique a été réalisé avec le système d'acquisition de Physical Acoustic Corporation (PAC). L'écoute acoustique étant une méthode non destructive, elle permet de quantifier et qualifier en temps réel le processus d'endommagement. Chaque état limite constitue un événement acoustique ayant sa propre signature, caractérisée par des paramètres acoustiques (e.g. compte, force du signal, fréquence centrale, etc). Des analyses paramétriques cumulant trois paramètres acoustiques pour un demi-cycle de ductilité (poussée-charge) ont permis de cibler les états limites et d'évaluer l'endommagement des poteaux.*

## 1. Introduction

La gestion des risques des infrastructures du Québec nécessite l'évaluation de la vulnérabilité de ces derniers. À la direction des structures, la gestion des risques des infrastructures routières est axée principalement sur le maintien des structures dans un état fonctionnel et sécuritaire [Tremblay et Richard, 2010]. Les risques encourus par ces structures doivent alors être identifiés et caractérisés pour estimer leur probabilité et leur impact. L'évaluation des risques permet de réduire l'importance du risque et d'appuyer le processus décisionnel en lien avec les priorités de réparation des structures selon des critères de performance préétablis lors de la conception de l'ouvrage.

À cet effet, le dimensionnement basé sur la performance de la structure propose une approche basée sur des niveaux de performance qui sont reliés à des niveaux de sollicitation tels que la période de récurrence d'un tremblement de terre. Ces niveaux de performance sont ensuite rattachés à des critères de performance qui permettent de définir l'atteinte des états limites [Sheikh et Légeron, 2014]. À titre d'exemple, pour une pile de pont conventionnelle, Kowalsky [2000] définit le niveau de performance de *Services* par l'état limite de l'écrasement du béton et le niveau de performance de *Dommmages Contrôlés* par l'état limite où le béton est toujours réparable. Comme les piles du pont s'avèrent l'élément structural dissipateur d'énergie pour limiter les dommages de la partie supérieure du pont en cas de séisme, un suivi de l'endommagement est critique pour caractériser les états limites associés aux niveaux de performance. Suite à un événement sous charge extrême, le niveau d'endommagement de la pile de pont est chiffré selon les niveaux de performance et une décision peut être portée sur les réparations à mettre en œuvre.

Une technique, qui a largement été préconisée pour la réhabilitation des piles de pont en Californie après le tremblement de terre de Loma Prieta en 1989 [CALTRANS, 2004], est le chemisage avec des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Elle permet, entre autres, de confiner le noyau et les spirales d'acier afin de limiter les dommages reliés à l'intégrité de la

pile en améliorant la capacité structurale et la ductilité de l'élément. Combinée aux caractéristiques mécaniques et à la bonne résistance aux détériorations électrochimiques du PRFC [Saadatmanesh et al., 1994], cette technique s'avère une solution intéressante pour réhabiliter et améliorer la pérennité des infrastructures routières au Québec. Or, il a été démontré que la séquence d'endommagement des poteaux confinés PRFC diffère de celle pour les poteaux conventionnels. Il est donc primordial d'adapter les critères de performance pour les états limites (e.g. fissuration parallèle aux fibres, plastification des étriers, fissuration du béton et rupture du PRFC) proposés par les codes de calcul en vigueur [Binici, 2008].

## 2. Niveaux de performance et états limites

Les récentes recherches [Sheikh and Li, 2007] [Binici, 2008] [Gu et al., 2010] menées sur les poteaux confinés de PRFC ont permis de caractériser visuellement les états limites et d'y associer des niveaux de ductilité. Le Tableau 1 présente les trois niveaux de performance ciblés dans ce projet de recherche ainsi que les états limites s'y rattachant définis par des niveaux de ductilité atteints.

Tableau 1 : Niveaux de performance et états limites [adapté de Jean 2012]

Niveaux de performance	Poteaux conventionnels		Poteaux confinés de PRFC	
	États limites	Ductilité	États limites	Ductilité
(1) Services	- Fissuration de l'enrobage	1-2	- Fissuration // aux fibres de PRFC	1-3
(2) Dommages contrôlés	- Plastification des barres longitudinales	2-3	- Plastification des barres longitudinales	3-6
	- Éclatement du béton		- Plastification des spirales	
(3) Dommage sévères	- Écrasement du noyau de béton	3-6	- Endommagement majeur du béton - Rupture du PRFC	8-11

## 3. L'écoute acoustique

Puisque la séquence d'endommagement des poteaux conventionnels et confinés de PRFC évolue dans le temps, le suivi qualitatif et quantitatif en temps réel de ces éléments structuraux est requis. L'écoute acoustique est une méthode d'auscultation non destructive qui permet de suivre en temps réel l'évolution de l'endommagement. À cet effet, la *Federal Highway Administration (FHWA)* rapporte plusieurs projets d'inspection réalisés avec cette méthode tels le *Kings Stormwater Bridge* et le *Schuylers Heim Lift Bridge* où l'écoute acoustique a aussi été utilisée pour localiser les dommages [FHWA, 2012]. De même, l'*Office of Inspection of General (OIG)* a utilisé l'écoute acoustique pour localiser la source des défauts de soudure des plaques de connexion aux piles dans le *San Francisco-Oakland Bay Bridge (SFOBB) Skyway contract* [FHWA, 2005].

Si les méthodes conventionnelles basées sur le suivi visuel permettent seulement d'entrevoir les dommages en surface et ce, même en l'absence du chemisage de PRFC, l'écoute acoustique basée sur le principe d'écoute de la réponse d'une structure à une sollicitation permet d'évaluer les dommages internes et externes de celle-ci. Lorsqu'une structure est sollicitée, cette dernière emmagasine de l'énergie jusqu'au point où une rupture ou un frottement entre deux interfaces

survient. À ce moment, une grande quantité d'énergie élastique emmagasinée est relâchée en ondes élastiques à l'intérieur de la structure ce qui qualifie un événement acoustique. Ces ondes élastiques sont alors détectées et enregistrées. Ces événements sont principalement associés aux mouvements de dislocation ou encore de fissuration dans la structure. Les états limites peuvent donc être caractérisés par un ou plusieurs événements acoustiques ayant leur propre signature acoustique qui est définie par des paramètres acoustiques (e.g. énergie, amplitude, fréquence, etc) comme présenté à la Figure 1.

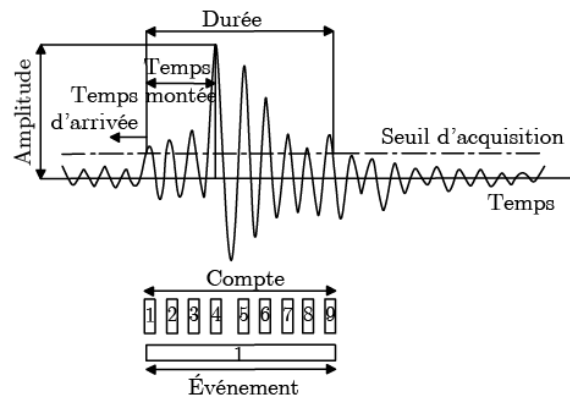


Figure 1 : Schématisation des paramètres acoustiques

La définition de chaque paramètre acoustique est relative à la position des capteurs utilisée, aux paramètres d'acquisition imposés au système et à la configuration même de chaque système d'acquisition. Une connaissance accrue de ces paramètres acoustiques permet une évaluation spécifique quantitative mais aussi qualitative des détections d'événements acoustiques enregistrés par les capteurs.

## 4. Programme expérimental

### 4.1 Description des spécimens

Lors de cette campagne expérimentale, cinq poteaux en béton armé (BA) d'une hauteur de 2 mètres ayant une section circulaire de 300 mm ont été testés sous un chargement cyclique incrémental. Les spécimens étaient d'une hauteur totale de 2610 mm avec une fondation en I de 500 mm de hauteur. Une section rectangulaire de 210 mm était présente en tête du poteau afin d'appliquer le vérin horizontal pour la force latérale et deux vérins verticaux pour l'application de la charge axiale constante. Le point d'application de cette force était situé à 2000 mm au-dessus de la fondation. Quatre des cinq poteaux ont été confinés de PRFC sur une hauteur de 1300 mm et le poteau témoin était sans confinement. L'acier d'armature longitudinal est de la 20M de grade 400R ( $f_y = 431\text{MPa}$ ) et les spirales sont des 10M de grade 400W ( $f_y = 503\text{MPa}$ ). Le chemisage de PRFC a été réalisé avec une couche ( $t_f = 1.016\text{mm}$ ) de tissu unidirectionnel SikaWrap C103 imprégné de résine de Sikadur 300 ( $\epsilon_{fu} = 0.0109$ ). Ce produit est préconisé pour les applications de renforcement vertical et horizontal. Les détails d'armature et la position des capteurs sont illustrés à la Figure 2.

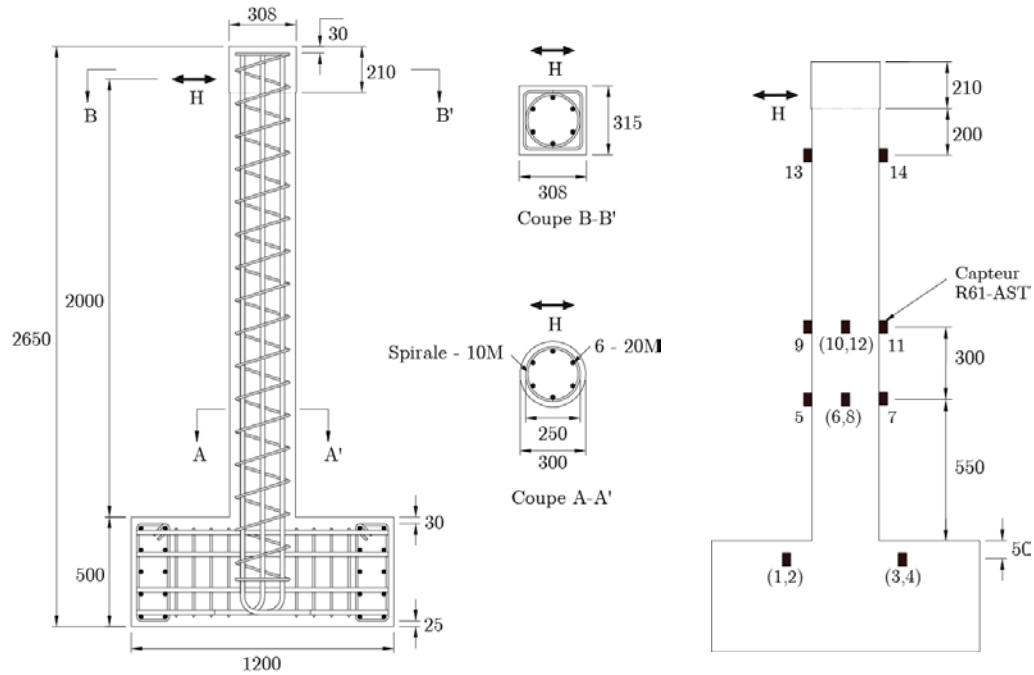


Figure 2 : Détails des poteaux et position des capteurs [adapté de St-Martin, 2014].

#### 4.2 Présentation du système d'acquisition écoute acoustique

Une série de 14 capteurs "résonants" R61-AST reliés au système d'acquisition à multicanaux de Physical Acoustic Corporation (PAC) a permis d'acquérir les données durant les essais. Les capteurs R61-AST sont d'une haute sensibilité ce qui leur permet de détecter des événements de faible amplitude. Ce modèle de capteur possède une pré amplification de 40 dB et il est isolé thermiquement. Avant chaque essai, la calibration des capteurs a été réalisée avec l'essai du bris de la mine de plomb d'un pousse-mine [ASTM E976, 2010] afin d'évaluer l'état des capteurs utilisés, le bruit ambiant dans le laboratoire et la vitesse de propagation des ondes dans les poteaux. L'enregistrement des paramètres acoustiques propres à chaque détection d'événement par les capteurs est fortement influencé par les paramètres d'acquisition. Le logiciel d'acquisition AEwin for SAMOS E5.23 permet de définir les seuils délimitant une détection pour un capteur [PAC, 2003].

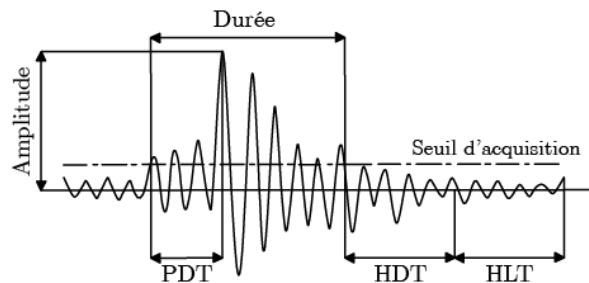


Figure 3: Schématisation des paramètres d'acquisition [adapté de Marec, 2008].

La Figure 3 présente les cinq paramètres d'acquisition qui sont définis comme suit ;

- Le *seuil d'acquisition* représente l'amplitude minimale qui qualifie le début d'une détection pour le capteur.

- Le ‘‘Peak Definition Time’’ (PDT) représente l’intervalle de temps alloué pour définir l’amplitude maximale d’une détection.
- Le ‘‘Hit Definition Time’’ (HDT) représente l’intervalle de temps où l’amplitude maximale et le seuil d’acquisition ne peuvent être dépassés à nouveau pour définir la fin d’une détection.
- Le ‘‘Hit Lockout Time’’ (HLT) représente le temps requis pour que le système enregistre les informations relatives à la détection et permet d’éviter la réflexion tardive dans les signaux.
- La durée maximale représente l’intervalle de temps maximal accordé pour une détection, advenant le cas où plusieurs amplitudes maximales sont détectées à l’intérieur de HDT.

Le Tableau 2 présente les valeurs utilisées pour l’acquisition lors des essais réalisés en 2012 sur les poteaux conventionnels et confinés de PRFC.

Tableau 2 : Paramètres d’acquisition du logiciel

Paramètres d’acquisition	Unité	Valeur utilisée
Seuil d’acquisition	dB	45
Durée maximale	$\mu$ s	300 000
Peak Definition Time (PDT)	$\mu$ s	200
Hit Definition Time (HDT)	$\mu$ s	800
Hit Lockout Time (HLT)	$\mu$ s	1 000

Le logiciel d’acquisition AEwin for SAMOS E5.23 a aussi enregistré le déplacement et la force appliqués avec le vérin horizontal aux poteaux lors des essais sous chargement cyclique incrémental.

### 4.3 Chargement

Les poteaux confinés de PRFC ont été mis sous chargement à l’aide de trois vérins MTS d’une capacité de 500 kN chacun. L’application de la charge latérale est réalisée avec un vérin fixé au mur de réaction du laboratoire. La Figure 4 illustre schématiquement le montage utilisé pour les poteaux. La procédure d’essai dynamique a été réalisée de manière cyclique où une force contrôlée est appliquée à la tête du poteau jusqu’à l’atteinte de la première plastification des armatures soit à 75% du moment de plastification des aciers longitudinaux ( $M_y$ ) ou encore  $0,75 \Delta_y$ . Ensuite, le contrôle est effectué selon le déplacement en tête de poteau par incrémentation du  $\Delta_y$  soit  $1\Delta_y$ ,  $1,5\Delta_y$ ,  $2\Delta_y$  et ce, jusqu’à l’atteinte du critère de rupture. La Figure 4 présente le plan de chargement utilisé pour les essais des poteaux confinés de PRFC.

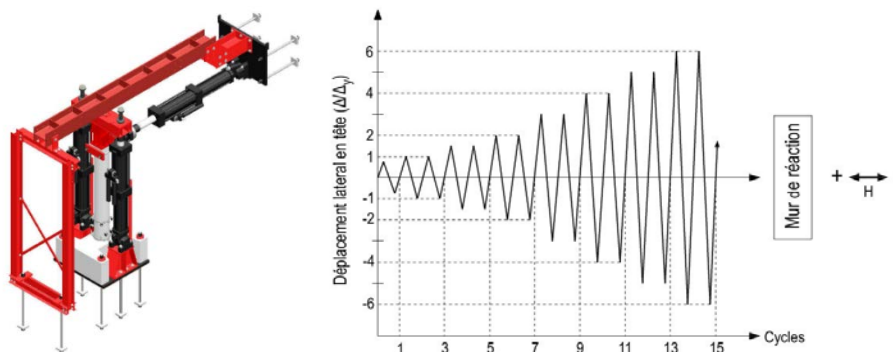


Figure 4 : Schéma du montage d’essai et procédure de chargement cyclique incrémental [Carvalho, 2012].

## 5. Analyses Paramétriques

Une série de cinq poteaux a été testée lors de la campagne expérimentale. De ces cinq poteaux, une comparaison entre le poteau témoin (S75P10C0) et le poteau 2 (S75P10C1) est présentée. Outre le chemisage de PRFC, ces deux poteaux présentent un espacement des spirales de 75 mm et une charge axiale de 10% de  $A_g f'_c$ . Trois paramètres acoustiques sont représentés graphiquement en cumulant les valeurs par demi-cycle de ductilité (poussée-déchargement) ;

- Les comptes représentent le nombre de fois que le signal a dépassé le seuil d'acquisition lors d'une détection (Figure 5) ;
- La force du signal correspond à la somme des magnitudes de dépassement du seuil d'acquisition lors d'une détection (Figure 6) ;
- La fréquence centrale représente la fréquence centrale du signal qui s'apparente au centre de gravité du signal (Figure 7).

Le cumul normalisé des détections par demi-cycle de ductilité (poussée-chargement) est aussi représenté afin d'illustrer la relation entre le nombre de détections et la magnitude des paramètres du signal enregistré.

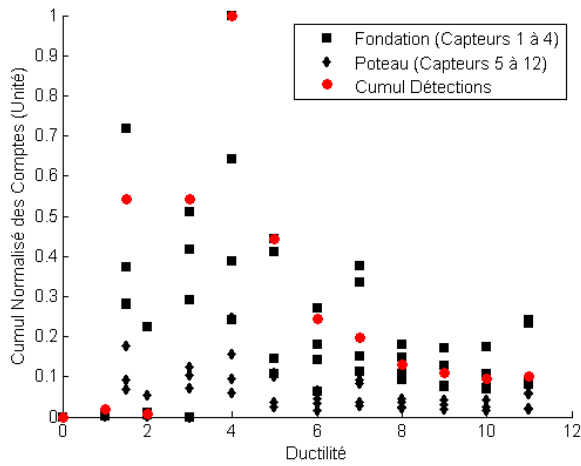
L'évolution de l'endommagement des poteaux est bien illustrée par le cumul de ces trois paramètres acoustiques. Les états limites présentés au Tableau 1, qui se produisent subitement, sont très bien définis. À titre d'exemple, la rupture du PRFC pour le poteau 2 (S75P10C1) est bien visible à une ductilité de 7 pour les trois paramètres acoustiques de même que la fissuration de l'enrobage pour le Poteau 1 (S75P10C0) qui est définie pour une ductilité de 1,5. Une corrélation est aussi possible entre les détections cumulées et les paramètres acoustiques cumulés. En effet, les états limites progressifs comme la plastification des barres et l'écrasement du béton, peuvent être reliés à un niveau de détection moyen, soit entre 0,2 et 0,5 et un niveau de paramètres acoustiques relativement bas, soit inférieur à 0,2. Si les capteurs perçoivent des détections, mais que le signal enregistré est faible, il y a lieu d'associer ces caractéristiques à un endommagement continu des poteaux. Suite à l'analyse des graphiques ci-dessous, le Tableau 3 présente les niveaux de ductilité qui sont associés aux états limites présentés au Tableau 1.

*Tableau 3 : Ductilité associés aux états limites selon les paramètres acoustiques*

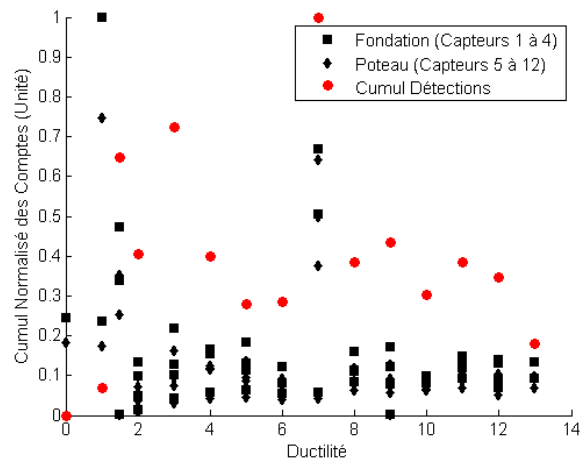
<b>Niveau de performance</b>	<b>Poteau témoin (S75P10C0) Ductilité</b>	<b>Poteau 2 (S75P10C1) Ductilité</b>
<b>(1) Services</b>	1,5	1,5
<b>(2) Dommages contrôlés</b>	3-4	3
<b>(3) Dommages sévères</b>	7	7-9
<b>Rupture du specimen</b>	11	13

Il est à noter que le gain en ductilité pour un poteau confiné de PRFC (Poteau 2) n'est pas significativement marqué dans la comparaison au poteau témoin tel qu'illustré dans le Tableau 3. En effet, un espacement des spirales de 75 mm et une charge axiale de 10% de  $A_g f'_c$  ne constituent pas le cas le plus critique pour ces poteaux, car les spirales développent un bon confinement de la section circulaire. Or, la campagne d'étude a aussi été réalisée sur des poteaux ayant un espacement des spirales de 150 mm et une charge axiale de 35% de  $A_g f'_c$ . Cette configuration sollicite davantage le confinement apporté par le chemisage de PRFC et le gain en ductilité est alors significatif.

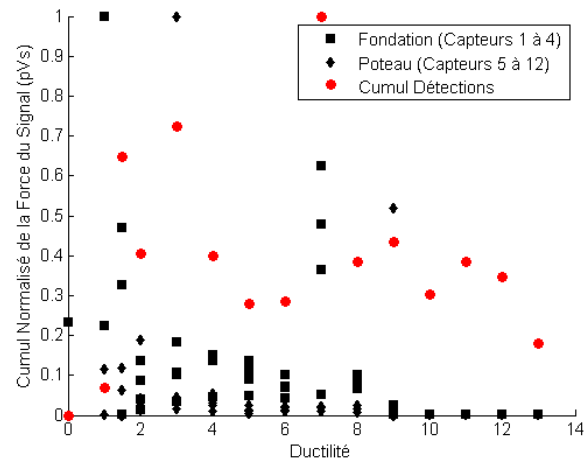
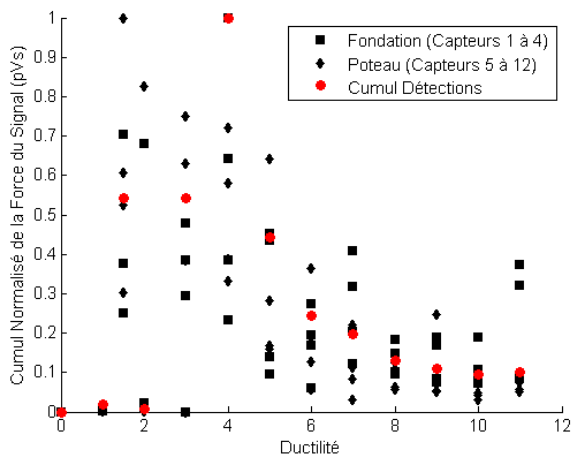
**Poteau 1 (S75P10C0)**



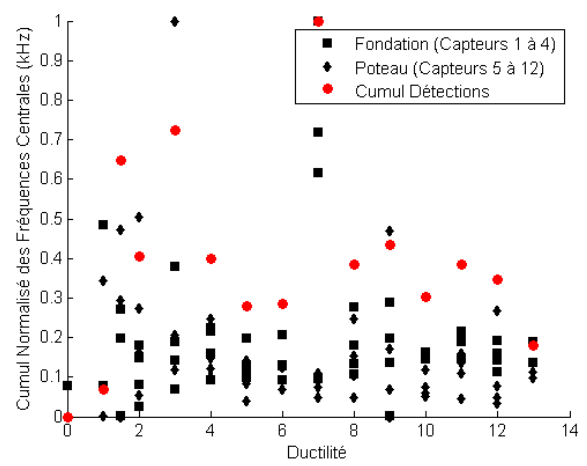
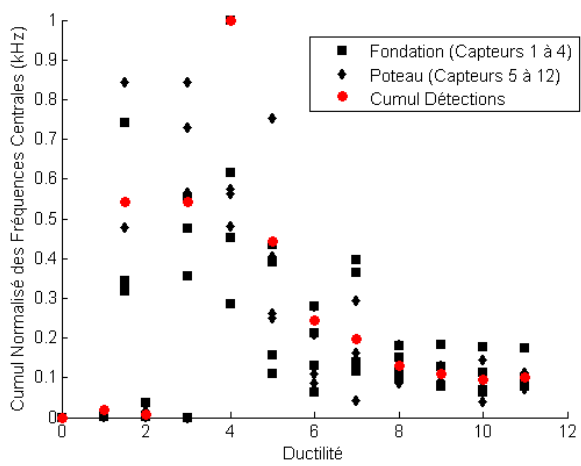
**Poteau 2 (S75P10C1)**



*Figure 5 : Cumul normalisé des comptes selon la ductilité*



*Figure 6 : Cumul normalisé de la force du signal selon la ductilité*



*Figure 7 : Cumul normalisé des fréquences centrales selon la ductilité*

## 6. Localisation des événements acoustiques

### 6.1 Théorie de localisation acoustique

Le principe de localisation d'un événement acoustique dans une structure consiste à calculer la différence du temps d'arrivée ( $\Delta t_i$ ) de l'onde élastique enregistrée par les capteurs [He et al., 2012]. Ainsi, le logiciel AEWin for SAMOS E5.23 préconise la *méthode de direct and the least squares travel-time difference* [PAC, 2003] pour localiser les événements. Au même titre que lors de l'acquisition, des paramètres de localisation doivent être définis afin de limiter le calcul mathématique ;

- L'Event Definition Value (EDV) représente la distance acceptée entre la première et la dernière détection utilisée pour localiser un événement;
- L'Event Lockout Value (ELV) représente la distance nécessaire pour isoler les détections relatives à chaque événement lors de la localisation;
- L'Overcal Value (OV) représente la distance limite pour inclure ou non une détection dans l'opération mathématique de localisation.

Le Tableau 4 présente les valeurs utilisées pour la localisation des événements des poteaux conventionnels et confinés de PRFC.

Tableau 4 : Paramètres de localisation du logiciel

Paramètres de localisation	Unité	Valeur utilisée
Vitesse de l'onde	mm/s	400 000
Event Definition Value (EDV)	mm	450
Event lockout Value (EDV)	mm	0
Overcal Value (OV)	mm	45
Facteur de corrélation	-	0.7
Nbr. capteurs minimales	Unité	4

Il est à noter que la vitesse de propagation de l'onde influence grandement les résultats de localisation. En se basant sur la littérature [Behnia et al., 2014], le béton a été considéré comme un matériau anisotrope et homogène de même que les ondes se sont propagées directement de la source aux capteurs.

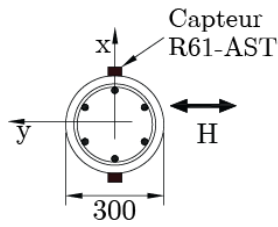
### 6.2 Analyse des événements acoustiques

La localisation des événements a été réalisée selon deux plans soit YZ et XZ (Figure 8 et Figure 10) où Z représente l'axe de la hauteur du spécimen. Les événements ont ensuite été cumulés normalisés pour chaque demi-cycle de ductilité comme présenté à la Figure 9 et à la Figure 11. Contrairement aux paramètres acoustiques, aucune corrélation entre le cumul normalisé des détections et des événements ne peut être observée. En effet, la disposition des capteurs lors de l'essai et le temps d'arrivée enregistré du signal influencent grandement l'efficacité de la localisation des événements. Un seuil d'acquisition élevé retarde le temps d'arrivée du signal ce qui mène à une mauvaise localisation des événements acoustiques. De même, la présence de plusieurs matériaux (béton, acier et PRFC) ainsi que le niveau d'endommagement des poteaux influencent la vitesse de propagation des ondes. L'hypothèse d'un matériau homogène et d'une vitesse de propagation moyenne ne semblent pas adéquate pour l'évaluation de l'endommagement de ces poteaux. Il est donc difficile de conclure sur l'identification d'états limites à partir de la distribution graphique des événements selon la ductilité.



**Poteau 1 (S75P10C0)**

**Poteau 2 (S75P10C1)**



2D planaire XZ

Figure 8 : Schématisation du plan XZ de localisation

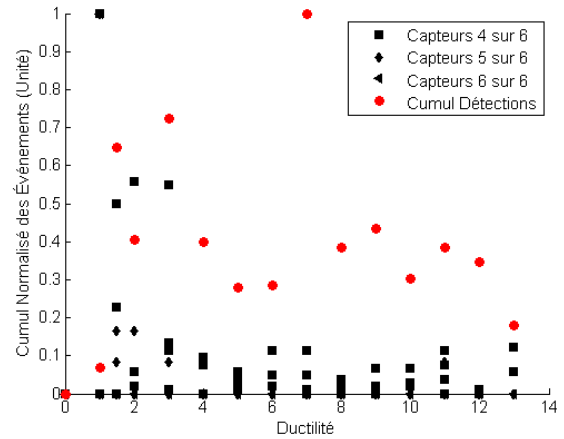
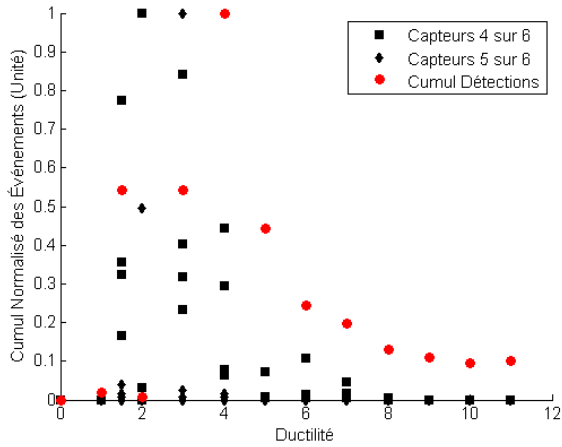
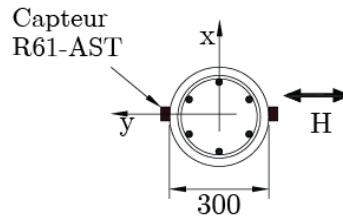


Figure 9 : Cumul normalisé des événements (Plan XZ) selon la ductilité



2D planaire YZ

Figure 10 : Schématisation du plan YZ de localisation

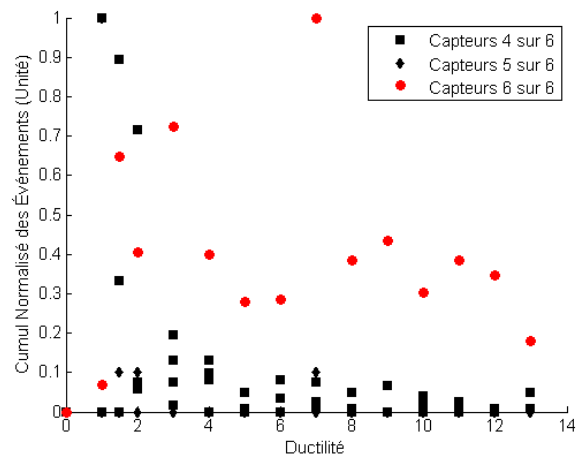
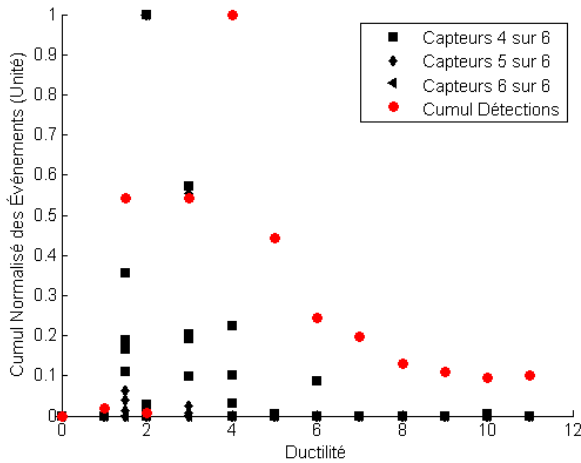


Figure 11 : Cumul normalisé des événements (Plan YZ) selon la ductilité

## 7. Améliorations proposées

Suite à des analyses plus approfondies des paramètres acoustiques et à une meilleure utilisation de la technique de l'écoute acoustique, des améliorations seront apportées lors de la prochaine campagne expérimentale à l'Université de Sherbrooke dont ;

- La caractérisation des états limites, soit la fissuration et l'écrasement du béton, la plastification des barres d'acier ainsi que la rupture du PRFC sur trois séries de trois poutres différentes. Cette caractérisation permettra d'isoler la signature acoustique de ses états limites des poteaux. Les trois séries de poutres de 150 x 150 x 550 mm auront pour spécificité; trois spécimens en béton, trois spécimens en béton armé (sous-armé) et trois spécimens renforcés de PRFC. Tous les spécimens seront soumis à des essais en flexion sur quatre points d'appuis.
- La caractérisation des paramètres d'acquisition acoustique et utilisation de capteurs à large bande de fréquences combiné aux capteurs avec une fréquence de résonance sur les poutres de 150 x 150 x 550 mm ce qui permettra d'assurer une meilleure détection et détermination des signaux acoustiques provenant d'événements dans le béton et dans le PRFC.
- Le positionnement en damier des capteurs afin de couvrir l'ensemble des surfaces des poteaux à l'étude permettra d'améliorer la localisation des événements et la détection des signaux reliés à l'endommagement des poteaux. Cette nouvelle configuration de capteurs sera réalisée lors de la prochaine campagne d'étude sur des poteaux de grande taille confinés dans un tube de PRFV.

## 8. Conclusion

L'écoute acoustique a donc permis de faire le suivi en temps réel de l'endommagement de poteaux en béton armé renforcé de PRFC. À partir d'analyses paramétriques où les magnitudes des paramètres acoustiques sont cumulées pour chaque niveau ductilité, il a été possible d'évaluer l'endommagement des poteaux mais aussi d'identifier les états limites des poteaux telle la fissuration du béton et la rupture du PRFC. À cette étape du projet, la localisation des événements est peu concluante en raison du positionnement des capteurs, du type de capteurs utilisé, de la variation de la vitesse de propagation et de la présence de différents matériaux (e.g. béton, acier et PRFC). La suite du programme de recherche a pour objectif de caractériser les états limites décelés avec les analyses paramétriques en définissant des groupes de détection basées sur la caractérisation des états limites avec les petits spécimens (e.g. fissuration du béton, plastification de l'acier et rupture du PRFC). Suite à ces analyses de regroupement des détections, l'application de l'écoute acoustique permettra une évaluation plus détaillée des états limites.

## 9. Remerciements

Les auteurs aimeraient remercier pour leur support financier du *Programme de formation orientée vers la nouveauté, la collaboration et l'expérience en recherche* (FONCER) du Canada et du *Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie* du Canada (CRSNG). De même que le professeur Andrew Boyd de l'Université McGill pour le prêt d'équipement acoustique et la compagnie Sika pour sa commandite en matériel. Les auteurs souhaitent aussi remercier les techniciens et les étudiants gradués qui ont participé au projet (Claude Aubé, Danick Charbonneau, Jason Desmarais, Georges Lalonde, Charles St-Martin, Eduardo Carvalho Jr, Michael Jean).

## 10. Références

- A. Behnia, H. K. Chai, and T. Shiotani. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. *Construction & Building Materials*, 2014.
- A. Marec. Contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique et acoustique non linéaire : discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante. Mémoire de maîtrise, Université du Maine, MA, 2008.
- ASTME976. Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2010.
- B. Binici. Design of FRP's in circular bridge column retrofits for ductility enhancement. *Engineering Structures*, 2008.
- CALTRANS. Non-destructive evaluation of fiber reinforced polymer (FRP) composite bridge decks, problem statement document, California, 2004.
- C. Hellier. *Handbook of Nondestructive Evaluation, Second Edition*. McGraw-Hill Education, 2012.
- C. St-Martin. Étude de l'endommagement en cours d'essais cycliques des piliers de ponts par des méthodes non-destructives. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, 2014.
- Dong-Sheng Gu, Gang Wu, Zhi-Shen Wu, and Yu-Fei Wu. Confinement effectiveness of frp in retrofitting circular concrete columns under simulated seismic load. *Journal of Composites for Construction*, 2010.
- E. Carvalho Jr. Détermination de la longueur de la rotule plastique dans des poteaux confinés avec des PRFC. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, 2012.
- FHWA. Feasibility of non-destructive crack detection and monitoring for steel bridge, technical brief nde, McLean, Va, 2012.
- FHWA. San Francisco – Oakland bay bridge : Summary of welding studies. Technical report, California, 2005.
- H. Saadatmanesh, M. R. Ehsani, and M. W. Li. Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps. *ACI Structural Journal*, 1994.
- L. Tremblay, G. Richard. La gestion des risques au ministère des transports. 17<sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages, 2010.
- PAC. SAMOS AE System - User's manual. Physical Acoustics Corporation, Princeton Junction, NJ, 2005.
- M. J. Kowalsky. Deformation limit states for circular reinforced concrete bridge columns. *Journal of Structural Engineering*, 2000.
- M. N. Sheikh and Frederic Legeron. Performance based seismic assessment of bridges designed according to Canadian highway bridge design code. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2014.
- S. A. Sheikh and Y. Li. Design of FRP confinement for square concrete columns. *Engineering Structures*, 2007.