

Étude de l'endommagement en cours d'essais cycliques des piliers de ponts confinés de polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) par émission acoustique

Charles St-Martin, Zabihallah Moradian, Patrice Rivard et Nathalie Roy

Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB)

Département de génie civil, Université de Sherbrooke

RÉSUMÉ

Au cours de ces dernières années, plusieurs méthodes ont été utilisées pour la surveillance des ouvrages en béton au niveau des fissurations et de l'endommagement. En effet, les ingénieurs et les chercheurs étaient à la recherche de méthodes d'auscultation non-destructives qui sont précises, intelligentes et rapides. Deux méthodes de surveillance ont fréquemment été évaluées et appliquées, soit l'émission acoustique (EA) les vitesses ultrasonores (UPV).

L'émission acoustique est une méthode très intéressante afin de connaître en temps réel le comportement et le niveau d'endommagement des ouvrages. Les vitesses ultrasonores permettent de déterminer et localiser le niveau d'endommagement du béton. L'objectif principal de cette étude était d'identifier, en temps réel, avec le plus de précision possible, le comportement et l'endommagement d'un pilier de pont confiné avec des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) soumis à un essai cyclique en flexion composée, à l'aide de l'émission acoustique.

Le taux d'endommagement a été quantifié par la mesure des paramètres d'émission acoustique et l'aide des vitesses ultrasonores. Cet endommagement correspond à différents états limites, il était donc possible d'associer les différents événements à chaque état limite. Les deux méthodes ont montré que les états limites d'endommagement pour un poteau en béton armé confiné à l'aide de PRFC sont retardés et ne correspondent pas à ceux d'un poteau en béton armé non-confiné.

1. Introduction

Des séismes importants (Haiti – Chili 2010) causent fréquemment des dommages importants au niveau structural ce qui affecte la sécurité publique. Le dimensionnement à la capacité est certainement la méthode la plus appropriée pour la conception parasismique. Elle est basée sur le niveau d'endommagement en fonction des différents états limites (Priestley 2007). Pour les ponts, c'est au niveau de la base des piliers en simple courbure que la rotule plastique (zone d'endommagement) doit se former. C'est à cet endroit que le pilier va développer sa ductilité qui est un des paramètres les plus recherchés dans la conception sismique. Afin d'améliorer cette propriété, on utilise de plus en plus le polymère renforcés de fibres de carbone (PRFC) à des fins de confinement. Le PRFC affiche de très bonnes propriétés mécaniques et possède l'avantage d'être neutre face à la corrosion. Un aspect intéressant du confinement de PRF est qu'il peut servir pour des nouvelles constructions, mais peut également servir à la réhabilitation de structures existantes. Dans le contexte où les ponts et viaducs sont vieillissants, l'utilisation du PRF pourrait s'avérer une solution intéressante pour prolonger l'espérance de vie des structures existantes.

Le confinement de PRFC améliore le comportement sismique des poteaux en béton armé. En effet, il contribue à maintenir plus longtemps l'intégrité du noyau de béton et retarde l'endommagement. Les états limites en fonction de la ductilité pour un poteau standard

(fissuration, plastification de l'armature longitudinal, écaillage, plastification des étriers, écrasement du noyau, flambement et rupture des barres longitudinales) ne s'appliquent pas directement pour un poteau confiné (fissuration, plastification de l'armature longitudinal, rupture de la matrice, rupture des fibres, écrasement du noyau, flambement et rupture des barres longitudinales). On doit donc définir de façon quantitative les états limites propres aux poteaux confinés de PRFC. Le confinement empêche toute évaluation visuelle de l'endommagement. Il est donc impossible de connaître l'endommagement à l'intérieur sans faire appel à des méthodes d'auscultations. Une des méthodes non-destructives les plus intéressantes pour une telle application est l'émission acoustique (EA). L'EA permet de faire le suivi de l'endommagement dans le temps et l'espace sur une structure de béton. Dans le présent projet, l'EA sert à déterminer les nouveaux états limites se rattachant à un poteau de béton armé confiné de PRFC en fonction de la ductilité. De plus, on a fait appel à une autre méthode afin de déterminer le taux et l'endroit de l'endommagement, soit les vitesses ultrasonores (UPV).

2. Programme expérimental

Un total de cinq poteaux a été testé dans le cadre de ce projet de recherche (Carvalho 2012), soit un poteau de béton armé standard et quatre poteaux de béton armé confinés de PRFC. L'influence des 2 paramètres suivants a été étudiée :

- Espacement des étriers de 75 (S75) et 150 mm (S150) ;
- Charge axiale constante appliquée de 10% (P10) et 35% (P35) de la capacité brute de la section

Le tableau 1.1 présente le programme expérimental qui couvre les 4 poteaux confinés et le poteau standard en fonction des paramètres.

Tableau 1.1 – Programme expérimental

Paramètres	Poteau				
	S75P10C0	S75P10C1	S75P35C1	S150P10C1	S150P35C1
Résistance du béton (f'_c)	32,5 MPa	31,9 MPa	26,3 MPa	30,8 MPa	33,9 MPa
Charge axiale (P)	234kN	230kN	663kN	222kN	636kN
Espacement des étriers (s)	75mm	75mm	75mm	150mm	150mm
Confinement avec PRFC	Aucun	1 couche	1 couche	1 couche	1 couche

Le renforcement longitudinal est composé de barres d'acier 20M ($f_y = 431\text{MPa}$) et les étriers circulaires sont de type 10M ($f_y = 503\text{MPa}$). Le confinement de PRFC est constitué de d'une couche (1.016 mm) de SikaWrap C103 et d'une résine Sikadur 300 ($\epsilon_{prf} = 0.09767$).

Les charges sont appliquées à l'aide de vérins hydrauliques d'une capacité de 500 kN chacun. Un vérin horizontal fixé à la tête du poteau et appuyé sur le mur de réaction applique la charge latérale. La fondation en I est attachée à la dalle d'essai du laboratoire et tient lieu d'encastrement pour le poteau. Deux vérins verticaux situés de part et d'autre du poteau permettent d'appliquer la charge axiale. Ces vérins sont libres de tourner autour d'une rotule située approximativement à la hauteur de la zone de rotule plastique

prévue lors des essais. Une poutre guide en acier située au-dessus du poteau permet d'empêcher les mouvements perpendiculaires à l'axe de chargement. Le montage des poteaux avec et sans confinement est présenté à la figure 2.1.

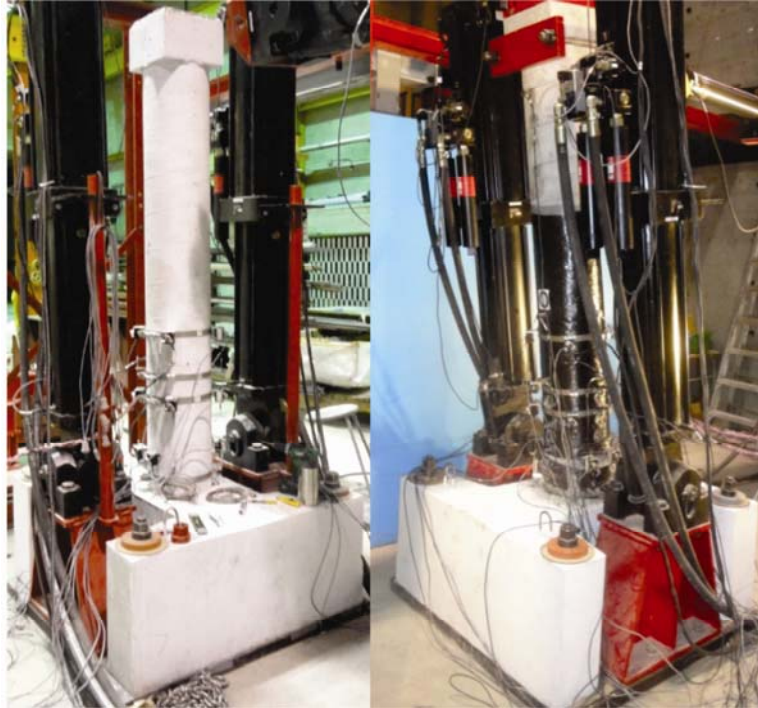


Figure 2.1 – Photos du poteau de béton armé et du poteau de béton armé confiné de PRF dans le montage

Après l'atteinte de la charge axiale prévue, le chargement latéral cyclique débute avec le premier cycle, appliqué en contrôle par force. Ce cycle consiste à l'atteinte de $0,75M_y$ d'un côté ($+0,75M_y$), puis de l'autre ($-0,75M_y$), où M_y est le moment théorique de première plastification des armatures longitudinales. Ce cycle permet de fissurer le poteau et est suivi d'un cycle en contrôle par déplacement arrêté de chaque côté dès la première plastification des armatures longitudinales. La détection en temps réel de la plastification est possible grâce à l'observation des valeurs mesurées par les jauges de déformation collées sur les aciers d'armature dans la zone de rotule plastique. Le déplacement à la première plastification est noté pour chaque côté et le déplacement élastique (Δ_y) correspond à la moyenne des deux valeurs obtenues. Un second cycle de $\pm 1,0\Delta_y$ est effectué, puis l'essai est poursuivi avec 2 cycles de $\pm 1,5\Delta_y$, $\pm 2,0\Delta_y$, $\pm 3,0\Delta_y$ et ainsi de suite. L'essai est arrêté lorsqu'un des événements suivants se produit :

- La charge axiale ne peut être maintenue à 90% de la valeur initiale;
- La charge latérale maximale lors d'un cycle n'atteint pas 50% de la valeur maximale atteinte au cours de l'essai;
- Une barre longitudinale flambe ou rupture en traction. À ce moment, le cycle cours était complété puis l'essai était terminé.

3. Instrumentation des méthodes d'auscultation non-destructives (EA et UPV)

Le système d'EA utilisé est le système à multicanaux PAC (Physical Acoustic Corporation). Ce système d'acquisition de données peut recevoir les données provenant de 16 capteurs. Des entrées supplémentaires sont également disponibles. En effet, deux de ces entrées ont été utilisées afin de synchroniser la force et le déplacement entre le système de chargement et le système PAC. Dans le but d'obtenir des résultats optimaux, un total de 14 capteurs a été utilisé. Les capteurs sont des accéléromètres de type R61-AST. Ils incorporent un préamplificateur de 40 dB et peuvent servir à des températures variant de -35°C à 75°C .

L'emplacement des capteurs pour le poteau standard était différent de celui des poteaux confinés. La raison vient du fait que la rupture du PRFC se fait de façon brutale de sorte qu'elle risquait d'endommager les capteurs situés trop près de celle-ci. Une première série de quatre capteurs a été placée sur la fondation, une deuxième à 200 mm (standard) ou 550 mm (confiné), une troisième à 650 mm (standard) ou 850 mm (confiné) et finalement 2 capteurs de garde ont été placés à 1800 mm de la fondation. La figure 3.1 représente certains capteurs collés sur le poteau confiné de PRFC.

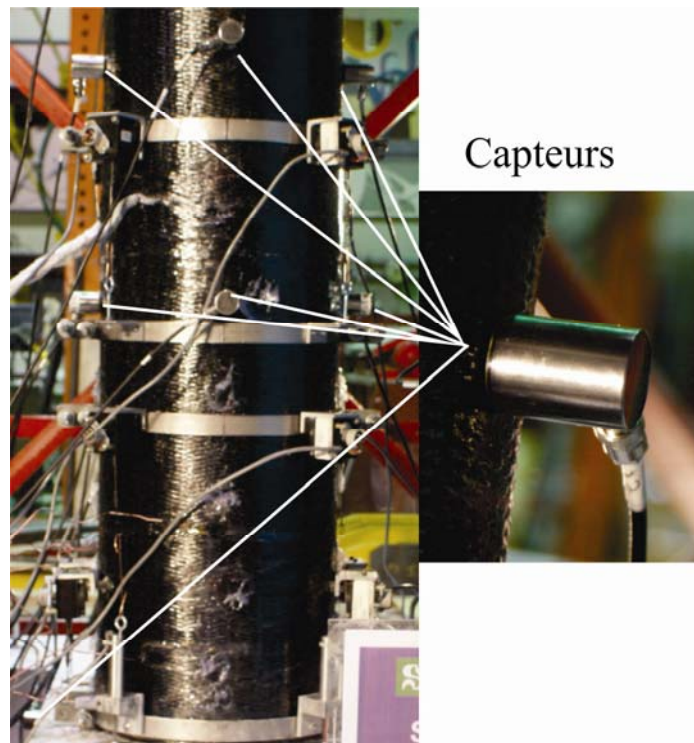


Figure 3.1 – Emplacement des capteurs sur le poteau confiné de PRF

De plus, le seuil minimum d'amplitude des ondes a été placé à 45 dB en raison du bruit ambiant du laboratoire et du bruit provenant des vérins. Finalement, un taux d'échantillonnage de 1 MHz a été choisi afin d'avoir un maximum de précision.

Concernant la méthode UPV, un appareil standard de mesure de vitesses ultrasonores a été utilisé.

4. Résultats (EA)

La fissuration du béton ou du PRFC cause un relâchement d'énergie sous forme d'onde. Ces ondes se déplaçant dans le poteau sont reçues par les différents capteurs. Chaque fois qu'un capteur enregistre un signal d'onde, ceci correspond à un évènement. Afin qu'une onde soit considérée comme un évènement, l'amplitude de celle-ci doit dépasser le seuil établi (45 dB) tel que présenté à la figure 4.1. Cette section présente les différents paramètres utilisés et les différentes méthodes d'analyse possibles à l'aide de l'EA.

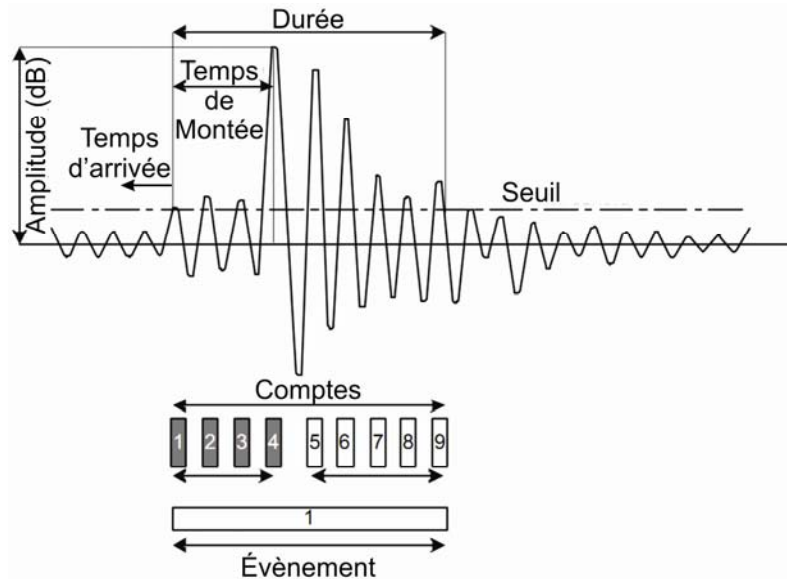


Figure 4.1 – Paramètres d'EA (Physical Acoustic Corporation 2005)

Chaque évènement possède des paramètres qui lui sont propres. Parmi les plus intéressants outre le nombre d'évènements, il y a, pour chaque évènement, le compte (nombre d'ondulations qui dépassent le seuil), l'amplitude, l'énergie, la fréquence, le temps d'arrivée, le temps de montée et la durée. La figure 4.1 présente certains de ces paramètres. Dans le cadre de ce projet, quatre paramètres ont été retenus afin de faire l'analyse paramétrique, soit le nombre d'évènement, le compte, l'énergie et l'amplitude. Ces paramètres permettant de quantifier l'endommagement sont les plus fréquemment utilisés (Benavent 2010, Degala 2009, Mirmiran 1999).

À l'aide de ces paramètres, il est possible de quantifier l'endommagement et de déterminer le type de matériau (béton ou PRF) d'où proviennent les ondes (Qing-Qing et Jinen 1997). La figure 4.2 représente le nombre d'évènements et l'énergie en fonction de temps et du déplacement en tête du poteau.

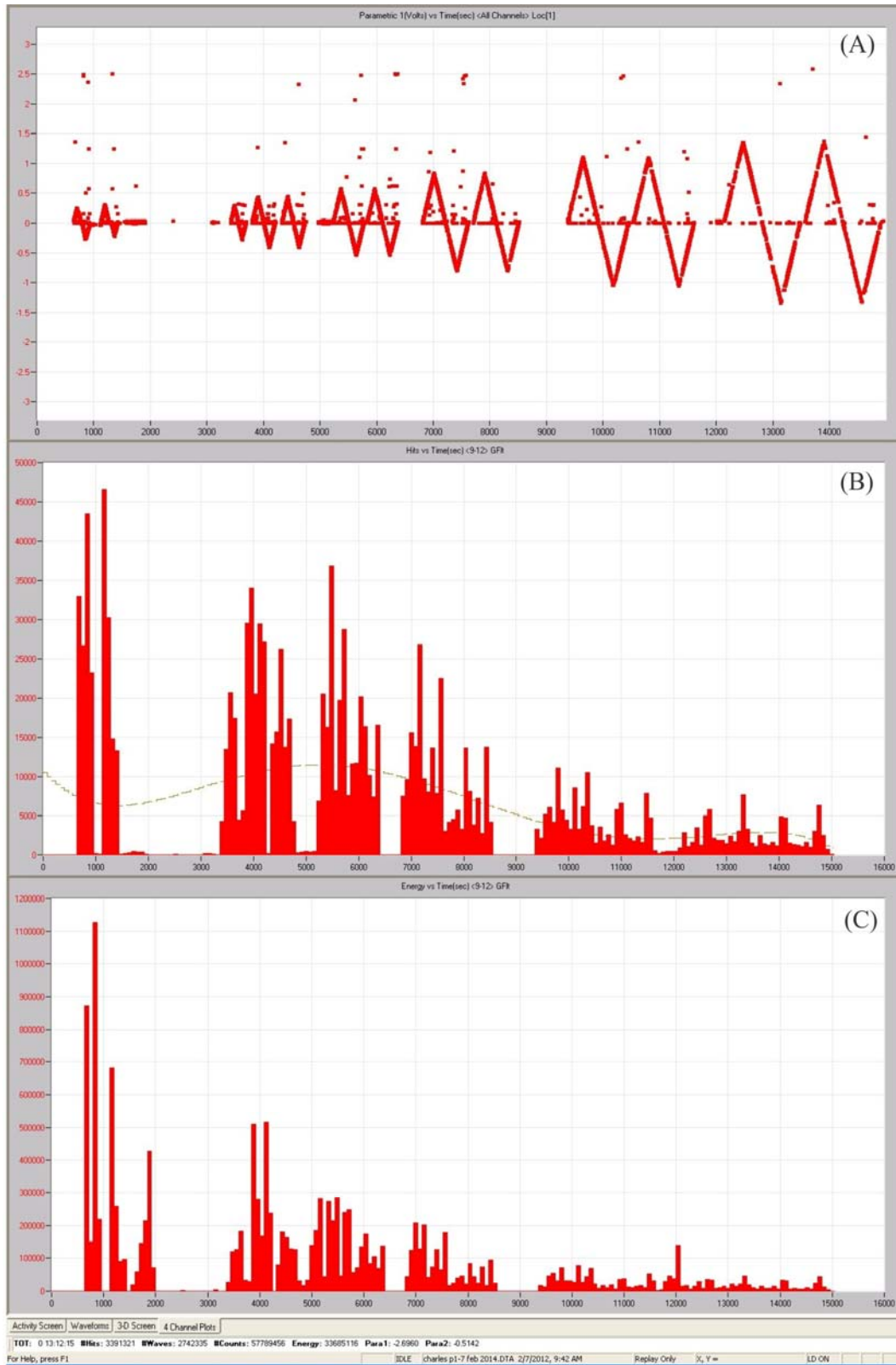


Figure 4.2 – (A) déplacement (10 Volts = 750 mm), (B) nombre d'évènements et (C) énergie cumulée pour 80 secondes en fonction du temps pour les 13 premiers cycles de chargement.

4.1 Analyse paramétrique

Il est également possible de cumuler les paramètres pour un cycle de chargement ou pour un segment de temps donné. Dans le cas présent, le nombre d'évènements et l'énergie cumulés sont représentés en fonction du cycle de chargement complet et des quatre segments (A, B, C et D) composant le cycle (voir figure 4.3 et 4.4). La figure 4.3 représente le poteau S75P10C0 pour les capteurs 9, 10, 11 et 12. En raison de l'écaillage du béton non confiné, plusieurs capteurs sont tombés en cours d'essai. Les capteurs 9 à 12 sont tous de la même série et sont demeurés en place tout au long de l'essai. La figure 4.4 représente le poteau S75P10C1 pour tous les capteurs. En raison du confinement, chacun des capteurs est demeurés en place. Le segment A est le déplacement du point 0 au point maximal positif. Le retour à 0 constitue le segment B. La partie C correspond au déplacement de 0 jusqu'au déplacement maximal négatif. Puis le segment D est le retour à 0. Ces deux figures permettent de constater que pour des conditions identiques, le PRFC permet de retarder l'endommagement. Cependant, la figure 4.4 présente un nombre d'évènements anormalement élevé pour les cycles 16 et 17. La grande majorité de ces évènements proviennent des capteurs 1, 2, 3 et 4 qui sont situés sur la fondation. Cela suggère qu'à partir de ce moment, on assiste à une importante dégradation de la fondation. Une analyse plus approfondie sera faite lors des étapes à venir.

Par contre, on remarque clairement que la majorité des évènements se produisent à des déformations beaucoup moins importantes pour un poteau non-confiné. En effet, on remarque que le PRF maintient l'intégrité du noyau de béton, retardant ainsi l'endommagement (figure 4.3 et 4.4).

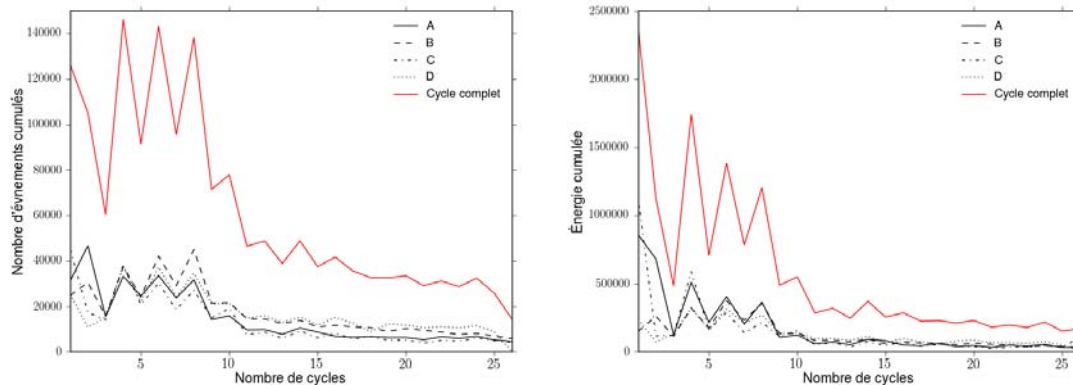


Figure 4.3 – Nombre d'évènement et énergie cumulée pour chaque segment pour toute la durée de l'essai sur le poteau S75P10C0 pour les capteurs 9-10-11-12

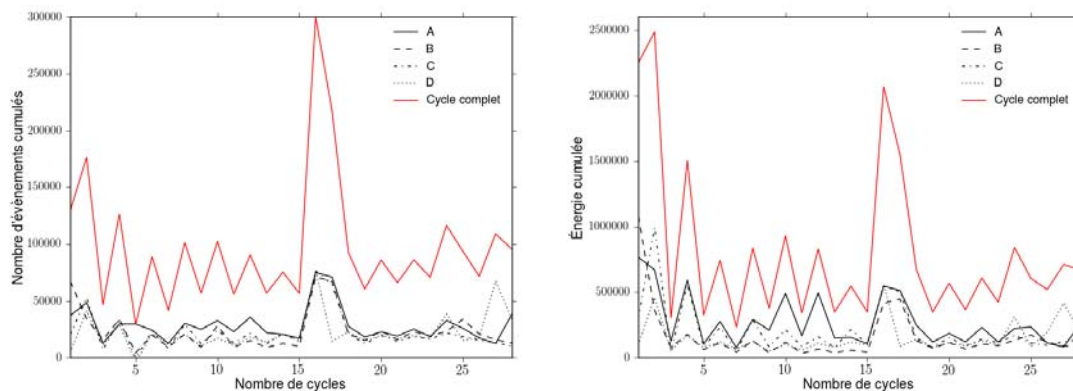


Figure 4.4 – Nombre d'évènement et énergie cumulée pour chaque segment pour toute la durée de l'essai sur le poteau S75P10C1 pour tous les capteurs

4.2 Localisation

Il est également possible de faire une localisation en trois dimensions des différents types d'évènements. Le traitement des données est présentement en cours.

5. Résultats (UPV)

L'utilisation des vitesses ultrasonores (UPV) est une méthode simple et rapide. Elle mesure le temps de propagation des ondes de compression (P) dans le béton. Ce temps converti en vitesse peut servir à exprimer le niveau d'endommagement dans le poteau. En effet, plus la vitesse diminue, plus le poteau est endommagé. Le tableau 5.1 présente le niveau d'endommagement en fonction de la variation de la vitesse.

Tableau 5.1 – Qualité du béton en fonction des vitesses ultrasonores (Bullock 1959)

Cote	Qualité du béton	V (m/s)
-1	Excellent	> 4500
-2	Bon	3500 - 4500
-3	Légèrement endommagé	3000 - 3500
-4	Endommagé	2000 - 3000
-5	Très endommagé	< 2000

La figure 5.1 présente la variation de la vitesse en fonction de l'élévation et de la ductilité atteinte par les poteaux S75P10C0 et S75P10C1. Les vitesses ont été mesurées dans le sens parallèle au chargement et l'élévation 0 correspond au niveau supérieur de la fondation. Lorsque la prise de mesure était impossible, on attribuait la vitesse à la valeur 0.

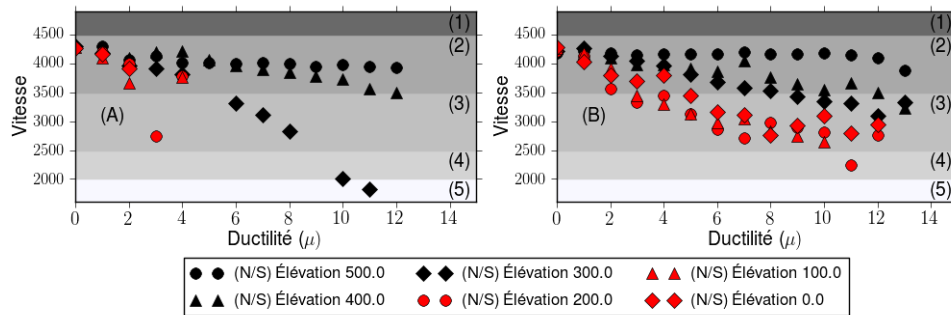


Figure 5.1 – Variation de la vitesse selon différentes élévations dans les poteaux (A) S75P10C0 et (B) S75P10C1. Les cotes de 1 à 5 représentent l’endommagement selon (Bullock 1959).

On peut remarquer que le début de l’endommagement du poteau non-confiné se produit lorsqu’il a atteint une ductilité de 3. À ce moment, le béton commençait déjà à s’écailler. Par contre, pour le poteau confiné, la qualité du béton demeure bonne ou légèrement endommagée jusqu’à une ductilité de 10. Dans les deux cas, on constate que la majorité de l’endommagement dans le poteau se produit de l’élévation 0 à 300.

6. Conclusion

L’émission acoustique peut s’avérer une méthode de surveillance très intéressante. En effet, il est possible de faire le suivi de l’endommagement sur une structure en temps réel. Cette méthode est efficace pour les structures de béton armé et même pour celles confinées de PRF. On peut donc analyser l’endommagement de façon qualitative à l’aide l’analyse paramétrique. Il est également possible de localiser dans le temps les évènements importants pour un cycle de chargement avec des graphiques de paramètres cumulés. Il est également possible de localiser en trois dimensions les zones d’endommagement. De plus, l’utilisation des vitesses ultrasonores permet d’évaluer de façon quantitative l’endommagement. Il est aussi possible de localiser celui-ci lorsque plusieurs mesures sont prises. Finalement, on remarque que les états limites d’endommagement pour un poteau de béton armé confiné sont retardés et ne correspondent pas à ceux d’un poteau standard. Les résultats de cette étude serviront à corroborer une étude numérique visant à quantifier de nouveaux états limites pour les poteaux en béton armé confinés à l’aide de PRFC (Jean 2012).

7. Références

Benavent, A., Castro, E. et Gallego, A. (2010). *Evaluation of low-cycle fatigue damage in rc exterior beam-column subassemblages by acoustic emission*. Construction and Building Materials, volume 24, numéro 10, p. 1830–1842.

Bullock, R. E., Whitehurst, E. A. (1959). *Effect of certain variables on Pulse Velocities through Concrete*. Highw, Res. Board Bull., 206, 37.

Carvalho, E. (2012). *Détermination de la longueur de la rotule plastique dans des poteaux confinés avec des PRFC*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke.

Degala, S. Rizzo, P. Ramanathan, K. et Harris, K. A. (2009). *Acoustic emission monitoring of CRFP reinforced concrete slabs*. Construction and Building Materials, volume 23, no 5. P.2016-2026.

Mirmiran, A., Shahawy, M. et Echary, H. E. (1999). *Damage assessment of frp-encased concrete using ultrasonic pulse velocity*. Journal of Engineering Mechanics, volume 127, no 2, p. 126–135.

Physical Acoustic Corporation. (2005). *Samos AE system - User's Manual, Rev2*. Mistras Holding Group, Princeton Junction, New Jersey, USA, 319 p.

Priestley, M., Calvi, G. et Kowaslyk, M. (2007). *Performance-Based seismic design of bridge columns*, volume 1. IUSS Press, Pavia Italy, 721 p.

Qing-Qing, N et Jinen E. (1997). *Fracture behavior and acoustic emission in bending tests on single-fiber composites*. Engineering Fracture Mechanics, volume 56, numéro 6, p. 779-796.