

RENFORCEMENT SISMIQUE DE PILES DE PONTS RECTANGULAIRES À L'AIDE DE BÉTON RENFORCÉ DE FIBRES

Dominic Vachon
Associé de recherche

Bruno Massicotte
Professeur titulaire

École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079 Succursale Centre-Ville
Montréal (Québec)
H3C 3A7

RÉSUMÉ : À travers le monde des ponts construits il y a plusieurs années ont été conçus avec des chevauchements d'armature inadéquats à la base des piles entre les barres de la fondation et celles de la pile. Cette pratique très répandue s'est montrée incapable de fournir la ductilité nécessaire lorsque les ponts sont soumis à des tremblements de terre importants. Elle a été progressivement éliminée des codes de conception nord-américain depuis les années 70 et plus récemment au Canada (1980). Plusieurs méthodes de renforcement ont été développées, parmi celles-ci la mise en place d'une chemise d'acier est la plus efficace pour les piles circulaires, carrés et pour les piles rectangulaires ayant un rapport largeur sur épaisseur inférieur à 2. Par contre, très peu de méthodes ont été développées pour le renforcement de piles de pont rectangulaires avec un rapport largeur sur épaisseur élevé. Un projet de recherche a été démarré à l'École Polytechnique de Montréal dans le but d'explorer l'utilisation d'une surépaisseur mince composée de BRF et d'évaluer l'augmentation et l'amélioration du comportement des chevauchements d'armatures des piles rectangulaires.

Cet article est séparé en trois parties. La première partie présente une description des déficiences qu'on retrouve sur les piles de ponts existantes et les raisons qui ont justifiées le développement de la méthode de renforcement proposée. La deuxième partie décrit les phases de développement du béton renforcé de fibres autonivellant pour différents types de fibres et le choix de la fibre démontrant le comportement structural le plus efficace. Finalement, l'article présente les résultats du programme expérimental où des piles de ponts de grande dimension présentant des détails d'armatures déficients tel que conçus avant l'apparition des recommandations de design pour les sollicitations sismiques ont été testées. Trois piles distinctes ont été étudiées, soient : référence, renforcée à l'aide d'une chemise de BRF et renforcée à l'aide d'une chemise de BRF avec un treillis d'acier ancré dans le noyau de la pile. Ces spécimens ont été soumis à des essais de chargement cyclique alterné avec accroissement des déplacements. Les résultats obtenus ont montrés une augmentation significative de la performance de la pile. Le mode de rupture observé est passé d'un comportement fragile pour le spécimen de référence à un comportement très ductile avec la formation d'une rotule plastique à l'extérieure de la zone de chevauchement pour les deux spécimens renforcés.

INTRODUCTION

Des observations faites sur le terrain à la suite de tremblements de terre qui se sont produits au cours des trente dernières années à travers le monde ont montré que les chevauchements d'armatures des piles de ponts n'étaient pas conçus adéquatement et contribuaient à la rupture des ouvrages. Jusqu'à récemment, il était commun de chevaucher les barres d'armatures de la fondation avec celle de la pile à la base de celle-ci. Les codes de conception modernes interdisent le chevauchement des barres d'armature à la base des piles car c'est à cet endroit que doivent se développer les rotules plastiques lors de séismes. Les nouveaux codes demandent aussi qu'une plus grande attention soit portée au dimensionnement des armatures pour assurer une ductilité suffisante à la structure. Toutefois, la préoccupation demeure entière pour les nombreux ponts existants qui doivent être renforcés. Plusieurs solutions ont été étudiées au cours des années pour le renforcement des piles de ponts mais ces solutions ont principalement été

développées pour les piles circulaires et carrées alors que peu de solutions efficaces ont été proposées pour les piles rectangulaires.

C'est dans ce cadre qu'un programme de recherche a été initié à l'École Polytechnique de Montréal avec comme objectif principal l'étude d'une méthode de renforcement pour la zone de chevauchement d'armature des piles de section rectangulaire. Comme illustré à la Figure 1, la solution proposée pour le renforcement des sections circulaires, carrées ou faiblement rectangulaires ($B/H \leq 2$) consiste à venir mettre en place une chemise en béton, une chemise en acier ou une chemise en matériaux composites. Ces chemises ont la capacité d'augmenter le confinement du noyau de béton et ainsi augmenter la résistance des chevauchements d'armature. Par contre, ces méthodes de renforcement ne sont pas facilement adaptables aux sections rectangulaires présentant un rapport largeur sur épaisseur supérieur à 2 car la largeur importante de la chemise réduit l'efficacité du matériaux de confinement. De plus les piles de ponts ne peuvent pas, dans plusieurs cas, être élargies dû à des contraintes d'espaces comme les voies de circulation ou pour ne pas réduire l'ouverture pour les piles en rivière.

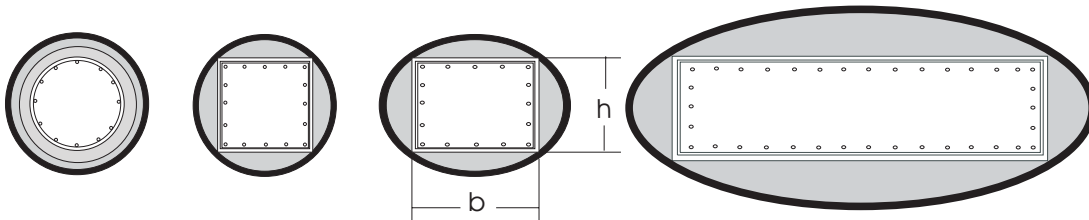


Figure 1 – Exemple de renforcement pour les sections circulaires, carrées et rectangulaires à l'aide de chemises d'acier ou de matériaux composites.

MODES DE RUPTURE DES PILES DE PONTS RECTANGULAIRES

Les piles de ponts peuvent montrer plusieurs modes de rupture lorsqu'elles sont soumises à des tremblements de terre. Dans leurs recherches, Chai et Priestly (1992) affirment que lors d'enquêtes effectuées à la suite de tremblements de terre d'importance, il a fréquemment été remarqué des ruptures de piles causées par une résistance insuffisante en flexion dans la direction longitudinale ou par une résistance inadéquate en cisaillement dans la direction transversale. Ils mentionnent aussi que plusieurs piles montraient des ruptures par fendage dans les zones de chevauchement. La Figure 2 illustre le mécanisme de rupture typique par fendage associé à des détails d'armatures inadéquats dans la zone de chevauchement des armatures. Les fissures de fendage peuvent se former sur la face en tension, comme montré à la Figure 2, mais elles peuvent aussi se développer dans le plan des barres d'armatures, parallèle à la face en tension.

L'objectif de ce projet de recherche est donc de développer une technique de renforcement visant à mitiger la propagation des fissures de fendage, permettant la plastification des aciers d'armatures dans la zone de chevauchement. Dans ce projet, seulement le mode de rupture en flexion sera considéré.

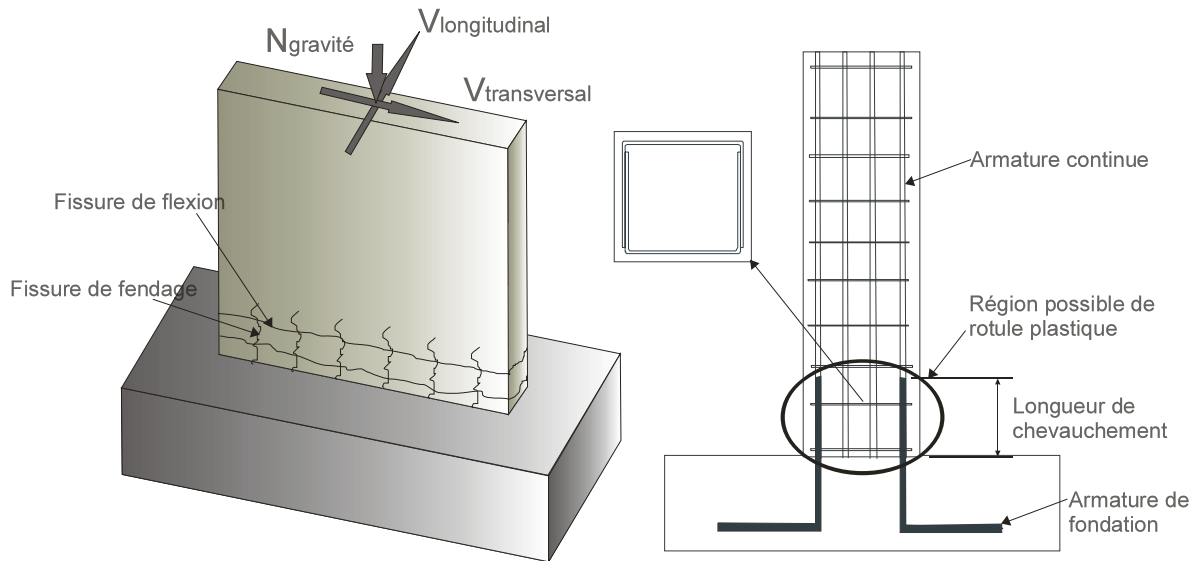


Figure 2 – Rupture typique des piles de ponts rectangulaires dans la direction longitudinale due à un chevauchement d’armatures inadéquat

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE RENFORCEMENT PROPOSÉE

Le concept de renforcement proposé repose sur la capacité de fibres d’acier à contrôler la propagation et l’ouverture des fissures de fendage dans le couvert de béton. Une récente étude effectuée par Harajli et Rteil (2004) sur des zones de chevauchement d’armatures entièrement faites de BRF a montré l’augmentation apportée par les fibres d’acier. Le concept qui est proposé dans cet article pour renforcer les piles de ponts est de mettre en place une chemise de BRF qui vient remplacer seulement le couvert de béton dans la zone de chevauchement.

La méthode de chemisage considérée dans le projet de recherche effectué par Vachon (2004) à l’École Polytechnique de Montréal consiste à remplacer le couvert de béton existant par une chemise en BRF tel que présenté à la Figure 3. Pour le chemisage, deux options ont été considérées: BRF seulement, BRF avec treillis d’acier ancré dans la matrice. Pour les options de renforcement considérées, le couvert de béton existant est enlevé et le chevauchement d’armatures est exposé pour permettre la mise en place du BRF derrière les 2 rangs d’armatures. Le but de ce renforcement est d’augmenter la résistance de l’ancrage des barres en éliminant le mode de rupture par fendage et permettre la plastification des barres d’armatures venant de la fondation hors de la zone de chevauchement afin de faire en sorte que les piles présentent une plus grande ductilité.

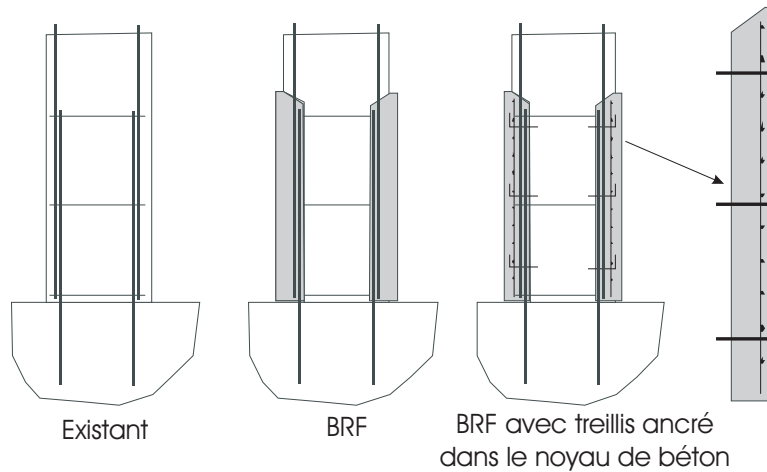


Figure 3 – Méthode de renforcement des piles à l'aide de BRF

DEVELOPPEMENT DU MELANGE DE BRF AUTONIVELANT

L'expérience acquise dans la fabrication de béton renforcé de fibres pour des applications structurales (Massicotte et al 2000) a permis de conclure qu'un mélange contenant 80 kg/m^3 de fibres d'acier (1% du volume) est compromis raisonnable entre la résistance et la maniabilité nécessaire. Des fibres de petite longueur (30 mm) ont été choisies pour faciliter la mise en place du BRF. Dans la phase préliminaire, trois types de fibres ont été étudiés: des fibres métalliques à bouts aplatis (type F), des fibres métalliques à crochets (type H) et des fibres synthétiques (type S). Un béton autonivellant ayant une résistance en compression de 50 MPa a été développé pour rencontrer la résistance et la maniabilité recherchées.

Le développement du BRF autonivellant a suivi trois étapes essentielles qui sont recommandées pour les BRF structuraux ayant une teneur en fibres élevée. Dans un premier temps, le mélange de béton est formulé sans prendre en compte la présence des fibres. Par la suite une certaine partie des gros granulats doit être remplacée par les fibres tel que prôné par la méthode Baron-Lesage (Rossi 1998) afin de déterminer la compacité maximale du squelette granulaire pour chaque type de fibres. Une façon efficace d'obtenir la compacité maximale est de relier le temps d'écoulement du béton dans un appareil appelé le maniabilimètre au rapport sable sur granulat du mélange (S/G). La compacité maximale du mélange correspond pour cette méthode au rapport SG qui procure le temps d'écoulement minimum. La Figure 4 montre les deux courbes d'optimisation obtenues pour les fibres d'acier. Cette méthode n'a pas pu être utilisée pour la fibres synthétique (type S) car il a été impossible d'obtenir une mélange de béton fluide au dosage utilisé de 6.8 kg/m^3 . Pour les deux fibres d'acier, la compacité maximale du squelette granulaire a été obtenue pour rapport S/G de 1.0. La dernière étape de cette méthode consiste à ajuster la quantité de superplastifiant pour obtenir la fluidité demandée.

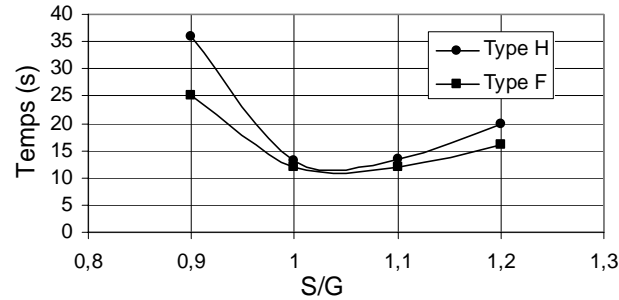


Figure 4 – Optimisation de la compacité du mélange

Une fois l'optimisation des mélanges pour les trois types de fibres terminée, l'évaluation des caractéristiques mécaniques des mélange durci a été mesuré sur des prismes entaillés de 150x150x600 mm selon les recommandations de la RILEM (2000). Pour minimiser les effets de parois causés par le coffrage et simuler l'effet de la ségrégation sur les spécimens, trois prismes ont été coulés verticalement dans un même moule puis ont été sciés par la suite tel que montré à la Figure 5. La direction de la coulée des spécimens a été dictée par l'importance de simuler le plus fidèlement possible le mode de mise en place du BRF lors des réparations en chantier et reproduire ainsi l'orientation préférentielle des fibres qui a un effet important sur la résistance mécanique des BRF.

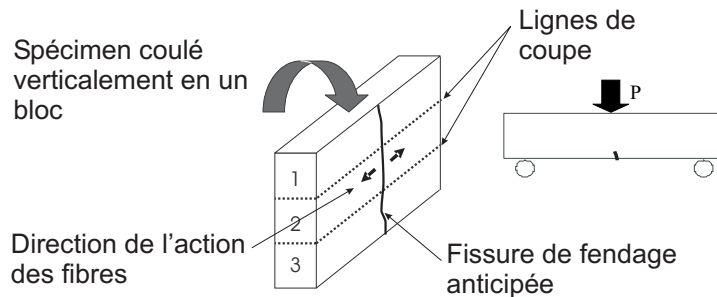


Figure 5 – Prismes RILEM et méthode de coulée des spécimens

Les résultats des essais RILEM sont présentés à la Figure 6. Pour empêcher l'apparition de fissures de fendage dans le couvert de béton, il est nécessaire d'avoir un BRF qui fournit une résistance post-fissuration élevée pour des ouvertures de fissures très faibles. Les deux BRF avec des fibres d'acier ont montré des comportements initiaux très similaires. Le BRF avec des fibres synthétiques a montré une résistance post-fissuration deux fois moins importante que les mélanges avec des fibres d'acier et a été ainsi rejeté pour la suite du projet. Les fibres d'acier à bouts aplatis, ayant montrés les meilleures caractéristiques à petite et grande ouvertures de fissures, seront celles utilisés pour le reste du projet

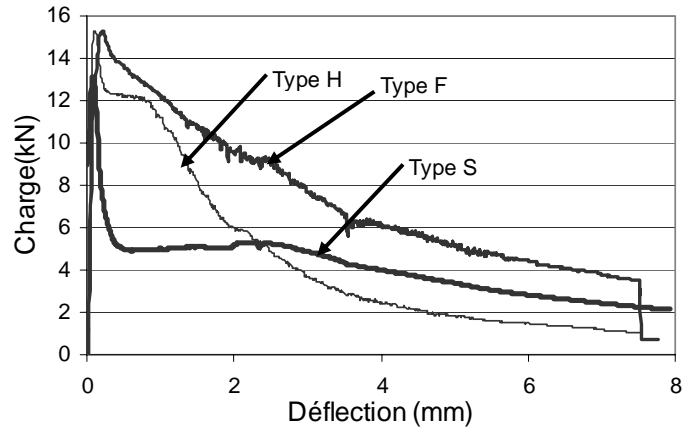


Figure 6 – Résultats des essais RILEM

ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DE LA METHODE DE RENFORCEMENT

Pour évaluer l'efficacité de la méthode de renforcement qui consiste à mettre en place une chemise de BRF, des spécimens de piles de ponts ont été fabriquées. À ce stade du projet de recherche, des spécimens de dimension 450×450×3000 mm ont été conçus pour simuler une tranche de la partie centrale d'une pile. Tel qu'illustré à la Figure 7, on a choisi un spécimen comportant trois barres No 25 chevauchées à la base de la pile sur une distance de 600 mm, soit 24 diamètres de barres, une valeur communément utilisée dans les années 60. Les armatures de en cisaillement étaient espacées de 300mm dans la zone de chevauchement et consistaient en deux barres en U chevauchées, une méthode communément utilisée dans les années 60. La résistance du béton utilisé pour la fabrication des spécimens était de 30 MPa pour être représentatif des piles existantes alors que l'acier avait une nuance nominale de 400 MPa. La chemise a été coulée verticalement pour simuler fidèlement la méthode de réparation en chantier en ce qui concerne la compaction et l'orientation des fibres.

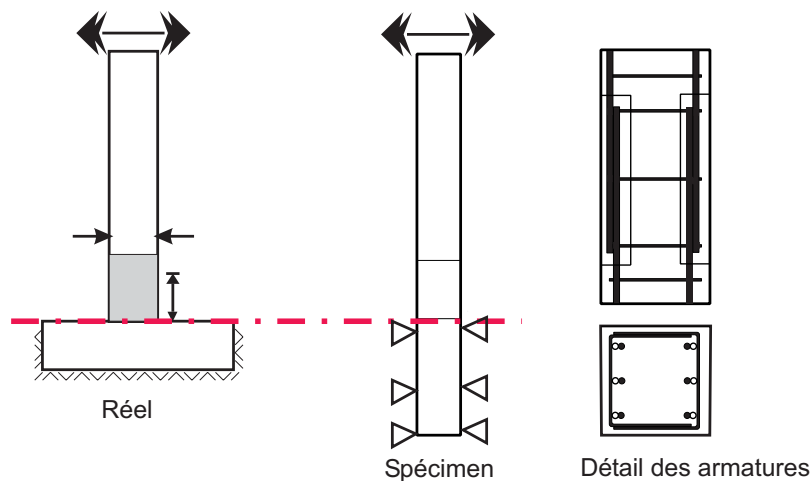


Figure 7 – Design des spécimens

COMPOTEMENT DES SPÉCIMENS

Les spécimens à l'étude ont été soumis à un essai cyclique alterné quasi-statique. Lors des essais deux comportements structuraux distincts ont été observés, comme illustré à la Figure 8 et à la

Figure 9. Pour le spécimen non-renforcé, la résistance théorique a été obtenue mais avec une courbe d'hystérésis où l'on peut observer une dégradation rapide la rigidité. Par contre, pour les spécimens renforcés, la courbe d'hystérésis montre que la rigidité est conservée lors du chargement cyclique.

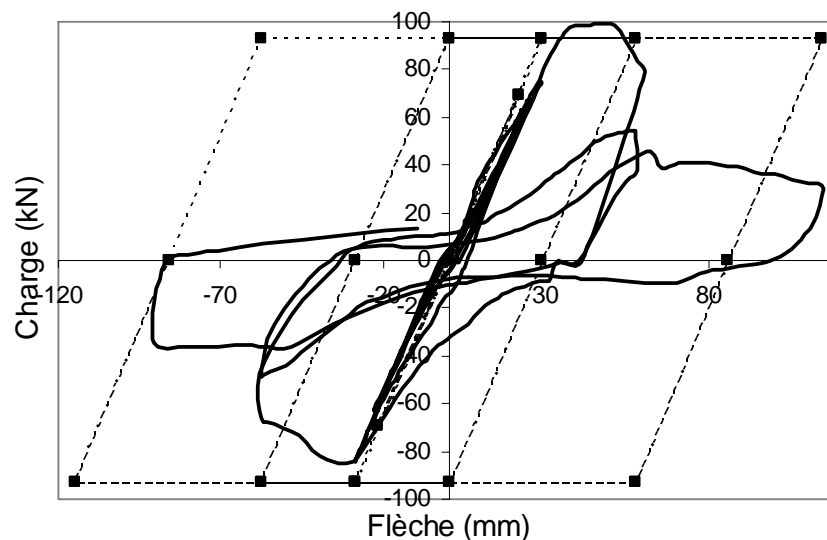


Figure 8 – Comportement hystérétique du spécimen de référence

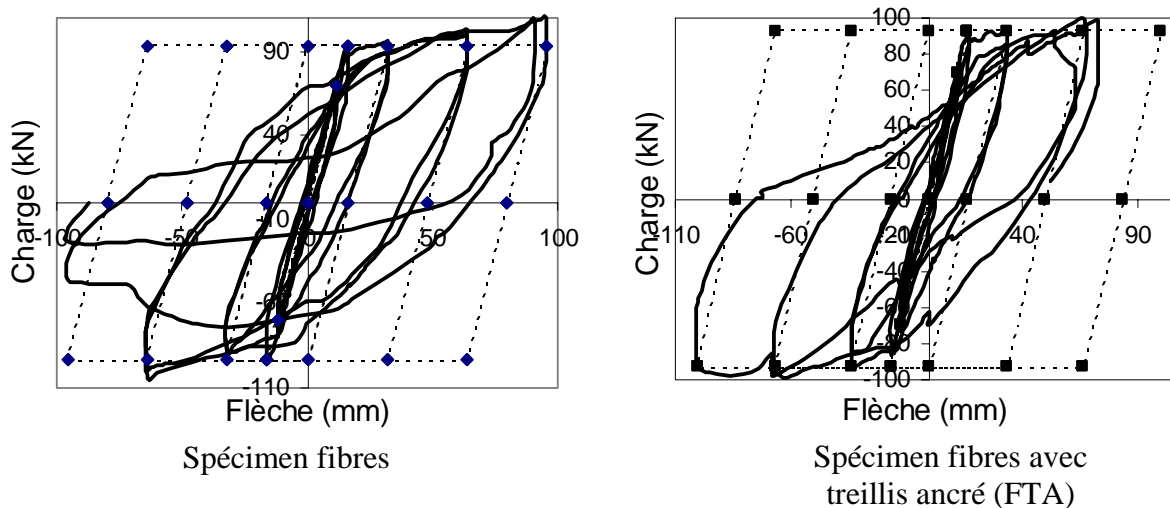


Figure 9 – Comportement hystérétique des spécimens renforcés

MODES DE RUPTURES OBSERVÉS

L'analyse des patrons de fissuration observés lors des essais sur les spécimens montre bien les modes de ruptures associés à chacun d'eux. Le spécimen de référence a montré des fissures le long du chevauchement d'armatures typique d'une rupture par fendage qui a menée au glissement des barres et conséquemment à la rupture fragile du spécimen. Les spécimens renforcés ont quant à eux montré un mode de rupture complètement différent. La mise en place de la chemise de BRF a inhibée, tel que prévue, la formation des fissures de fendage au niveau des chevauchements d'armatures, a permis un confinement suffisant à la section renforcée pour permettre le transfert des efforts entre les barres et a ainsi permis à la pile de développer suffisamment de force pour résister aux charges appliquées. De plus, le renforcement a permis la formation d'une rotule plastique à la base de la pile dans les barres de fondation sous la zone de chevauchement et au-dessus de la semelle. Une rupture ductile a pu être observée pour les deux spécimens renforcés où le spécimen FTA2 a obtenu le meilleur comportement hystérétique.

5.3 Accroissement de la ductilité et dissipation d'énergie

Les figures 8 et 9 montrent que la méthode de renforcement permet de passer d'un mode de rupture fragile pour le spécimen de référence à un mode de rupture ductile pour les spécimens renforcés et améliore significativement la réponse hystérétique. Pour les spécimens renforcés l'absence du phénomène du pincement de la courbe montre bien l'efficacité de la méthode proposée. Pour bien illustrer l'efficacité de la méthode l'énergie dissipée par chacun des spécimens peut-être comparés à l'énergie que dissiperait un système élasto-plastique (montré en pointillé sur les figures 8 et 9). La Figure 10 montre la comparaison des énergies dissipées par les divers spécimens et permet ainsi de comparer leurs comportements hystérétiques.

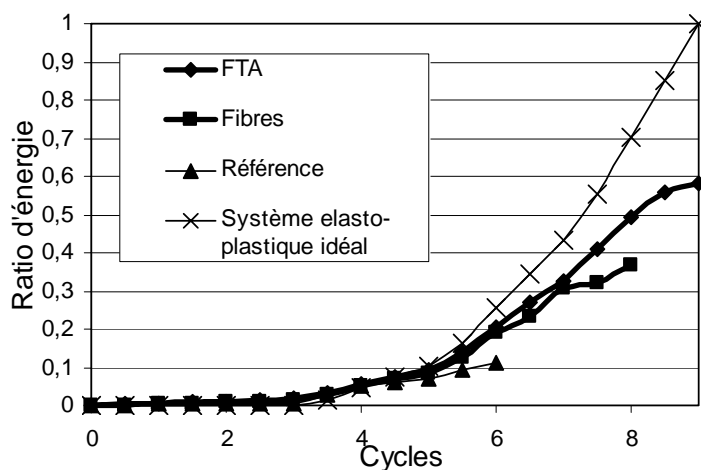


Figure 10 – Comparaison des énergies dissipées par chacun des spécimens

La Figure 10 montre que les spécimens renforcés ont dissipé une quantité d'énergie significativement plus grande que le spécimen référence. En effet, celui-ci ne dissipe que 11% de l'énergie qui serait dissipée par un système élasto-plastique équivalent alors que les spécimens

renforcés dissipent quant à eux 38% et 58% du spécimen idéal. Le Tableau 1 montre le nombre de cycles accomplis par chacun des spécimens lors du protocole de chargement imposé ainsi que la quantité d'énergie dissipée par chacun des spécimens. Pour ces essais, neuf cycles étaient imposés aux spécimens, conformément au protocole de chargement "New Zealand" (Vachon 2004).

Tableau 1 – Énergie dissipée par les spécimens

Spécimen	Référence	Fibre	FTA
Nombre de cycles accomplis	6	8	9
Énergie total dissipée lors du test (kJ)	19.75	38.36	57.78

De la Figure 10 et du Tableau 1, il est possible de conclure que l'utilisation d'une chemise de BRF est très efficace pour le renforcement des piles de ponts rectangulaires. Le renforcement permet aux spécimens de dissiper de grande quantité d'énergie, de montrer une plus grande ductilité ainsi qu'un comportement hystérétique supérieur et stable. L'option de renforcement consistant en une chemise de BRF avec un treillis ancré dans le noyau de béton semble être la plus efficace pour le renforcement de piles de ponts rectangulaires.

CONCLUSION

Les résultats expérimentaux des essais sur le spécimen de référence et les spécimens renforcés montrent que la mise en place d'une chemise de BRF permet d'augmenter significativement la ductilité des piles de ponts rectangulaires en modifiant la nature même du mode de rupture. Des recherches supplémentaires seront nécessaires pour permettre une évaluation plus approfondie de l'apport et de l'efficacité de cette méthode de renforcement dans un contexte sismique. Ces recherches permettront de développer une méthode de design basée sur les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés pour le renforcement. Dans les prochaines recherches plusieurs autres paramètres devront être étudiés pour bien comprendre cette méthode. Ces paramètres pourront être : l'épaisseur de la chemise, la profondeur de la démolition, la présence d'ancrages, l'utilisation d'un treillis d'acier, le type et le volume de fibres utilisé, le grosseur des barres d'armatures, la géométrie des chevauchements d'armatures et le rapport largeur sur épaisseur de la pile.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient, pour leur support financier, ACI section Est du Canada, le FQRNT (FCAR), le CRSNG et l'École Polytechnique de Montréal, et pour leur soutien technique, les employés du Laboratoire de Structures de l'École Polytechnique de Montréal.

RÉFÉRENCES

HARAJLI, H.M., RTEIL, A.A., 'Effect of Confinement Using Fiber-Reinforced Polymer or Fiber-Reinforced Concrete on Seismic Performance of Gravity Load-Designed Columns', ACI Structural Journal, January-February 2004, pp.47-56.

MASSICOTTE, B., DEGRANGE, G., DZELETOVIC, N., 'Mix design for SFRC bridge deck construction'. Proceeding of the Fifth RILEM Symposium of Fibre-Reinforced Concrete, Lyon, France, September 13-15 2000, pp.119-128.

PRIESTLEY, M.J.N., CHAI, Y.H., 'Design guidelines for assessment retrofit and repair of bridges for seismic performance', Report No. SSRP-92/01, University of California, San Diego (California), (1992) 266 pages.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX, SYSTÈMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES (RILEM)., 'Test and design methods for steel fibre reinforced concrete (RILEM TC 162-TDF)', Materials and Structures, January-February, (2000) p. 3-5.

ROSSI, P., 'Les bétons de fibres métalliques', Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, (1998) 309 pages.

VACHON, D., 'Renforcement sismique de piles de ponts rectangulaire avec béton renforcé de fibres', Mémoire de maîtrise, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, (2004)192 pages.