

EFFETS DES BASSES TEMPÉRATURES SUR LA PERFORMANCE DE RENFORCEMENTS SISMIQUES DE PILES DE PONTS PAR MATÉRIAUX COMPOSITES EXTERNES

XiaoPei Li, Bruno Massicotte et Robert Tremblay

Groupe de recherche en génie des structures

École Polytechnique de Montréal

Montréal (Québec)

RÉSUMÉ : Les ponts en béton armé au Canada peuvent être soumis à des tremblements de terre de magnitude élevée en temps hivernal. Dans le cadre d'un projet de recherche supporté par le Centre d'excellence ISIS Canada, un programme de recherche a été élaboré afin d'étudier la combinaison des effets du taux de chargement élevé causé par des sollicitations sismique et des basses températures sur le renforcement avec des PRF de piles de ponts déficientes face aux séismes. Le programme expérimental portait sur des spécimens de taille importante présentant des déficiences à l'effort tranchant ou en flexion. Certains des spécimens étaient renforcés par des PRF. Seuls les effets de basse température sont considérés dans cet article. Les essais ont démontré que les PRF étaient efficaces pour renforcer les éléments déficients dans la plage de température comprise entre -20°C et $+20^{\circ}\text{C}$. Dans tous les essais, la capacité mesurée à basse température a surpassé celle obtenue à la température de la pièce.

INTRODUCTION

Deux régions du Canada ayant une densité de population élevée sont situées dans des zones sismiques actives: la côte Ouest de la Colombie Britannique et la vallée du St-Laurent au Québec. Les structures construites au Canada avant l'avènement des normes de conception parasismiques modernes au cours des années 1980 sont potentiellement déficientes dû principalement à des règles de conception et des exigences qui sont aujourd'hui reconnues comme étant inadéquates. Typiquement, les piles de ponts conçus avant l'application du Code CSA-S6-88 ont des étriers dont l'espacement est trop grand en comparaison de la capacité en flexion des piles, de sorte que des ruptures à l'effort tranchant peuvent survenir dans l'éventualité d'un séisme majeur. De plus, dans certains cas, les chevauchements des armatures de flexion à la base des piles sont insuffisamment confinés, ou ont été réalisés pour transmettre des efforts de compression, et s'avèrent ainsi insuffisants pour transmettre les efforts de traction induits par la flexion ou permettre la dissipation de l'énergie induite par les séismes, ce qui peut entraîner une rupture. Au Québec, les ponts situés dans les zones sismiques actives peuvent être soumis à un séisme important durant l'hiver, conditions dans lesquelles les éléments structuraux seraient soumis simultanément à des hauts taux de chargement et des basses températures. Cette combinaison d'effets peut affecter le comportement des matériaux et potentiellement affecter le comportement sismique des structures.

L'enrobage des poteaux à l'aide de tissus faits de polymères renforcés de fibres (PRF) constitue une technique avant-gardiste et efficace pour la réparation et le renforcement des piles de ponts. Les PRF les plus couramment utilisés sont les fibres de verre (PRFV), les fibres de carbone (PRFC) et les fibres d'aramide (PRFA). Ces matériaux sont disponibles sous différentes formes,

dont, en particulier, sous la forme de tissus de fibres qui sont par la suite imprégnés de polymère. L'application de ces matériaux autour des poteaux peut augmenter la résistance en flexion ainsi que la résistance en cisaillement, ceci par un apport direct à la résistance aux efforts, une contribution au confinement du béton ou par une modification du mode de rupture. Ces matériaux peuvent aussi agir comme barrière aux agents agressifs et protéger les armatures de la corrosion, réduire la carbonatation du béton et ainsi contribuer à augmenter la durabilité des ouvrages.

L'utilisation des PRF pour renforcer les structures déficientes face aux séismes a démontré son efficacité. Par contre, peu d'études ont abordé le renforcement des piles rectangulaires, les systèmes de gainage métallique (Figure 1) mis au point en particulier en Californie (Priestley et al, 1996) étant peu applicables dans une telle condition. Peu d'études ont aussi traité des effets combinés des hauts taux de déformation associés aux sollicitations sismiques et des basses températures sur les propriétés mécaniques de l'armature et le béton. De plus, selon les auteurs, aucune étude n'a considéré cette combinaison d'effets sur les PRF utilisés dans des applications civiles pour le renforcement des ouvrages.

OBJECTIFS DU PROGRAMME DE RECHERCHE

Dans le cadre d'un projet de recherche financé par le Centre d'excellence ISIS Canada, un programme expérimental a été élaboré afin d'étudier la combinaison des effets du taux de chargement élevé causé par des sollicitations sismique et des basses températures sur le renforcement avec des PRF de piles de ponts déficientes face aux séismes. Le projet vise d'abord à déterminer si la combinaison des effets est favorable ou défavorable à l'utilisation des PRF pour le renforcement sismique. Comme peu d'études ont porté sur le renforcement des piles rectangulaires, le projet a comme objectif additionnel d'évaluer le potentiel des PRF comme mode de renforcement de piles rectangulaires dont le rapport des côtés est égal à 2.0 et plus.

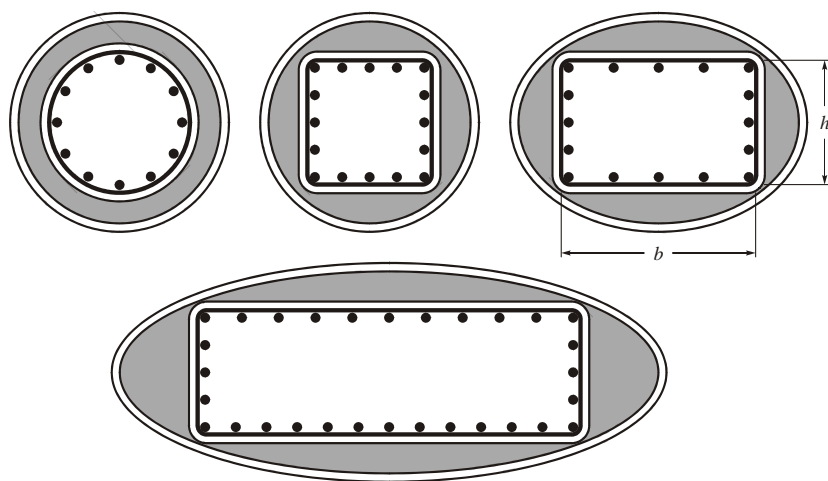


Figure 1 – Renforcement sismiques par gainage métallique

MODES DE RUPTURES ET ACTION DES PRF

Deux modes de rupture distincts ont été considérés: rupture en flexion et rupture en cisaillement. Les observations réalisées lors des tremblements de terre des 30 dernières années, supportées par la suite par des vérifications en laboratoire (Priestley et al, 1996; Holleran, 1998), ont montré des lacunes importantes au niveau des détails d'armature des structures existantes. En particulier, les chevauchements d'armatures à la base des piles de ponts peuvent ne pas offrir un niveau d'ancrage suffisant pour permettre la plastification des armatures. Le manque de confinement s'est aussi avéré souvent insuffisant pour permettre d'atteindre le niveau de ductilité requis pour permettre la formation des rotules plastiques. De telles déficiences au niveau des détails d'armatures, illustrées sur la figure 2, peuvent se retrouver dans les structures conçues avant 1980. À cette époque, les connaissances pour la conception parasismique des structures étaient peu avancées alors que le Québec était considéré comme un endroit aux aléas sismiques faibles.

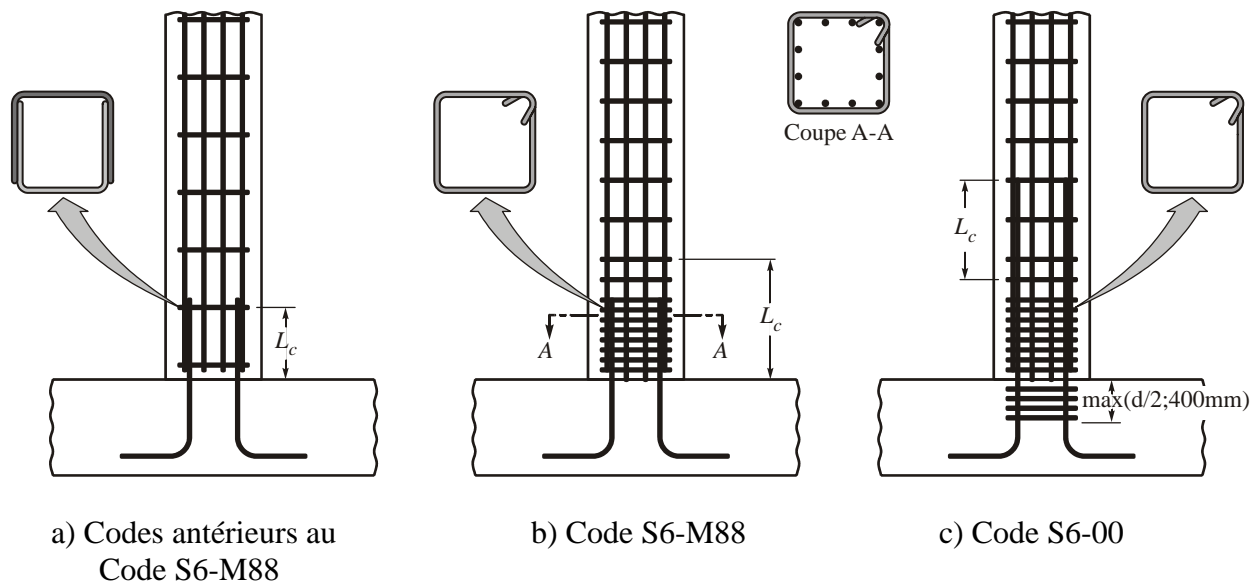


Figure 2 – Évolution des détails d'armature à la base des piles

Les ruptures en cisaillement ont été observées dans les situations où la capacité en flexion excède la résistance en cisaillement, particulièrement lorsque la résistance offerte par le béton décroît avec l'augmentation du nombre de cycles de grande amplitude dans les zones de formation des rotules plastiques, ce qui est le cas à la base des piles. Un tel comportement est causé par des étriers trop espacés qui confinent peu le béton et sont en nombre insuffisant pour assurer une résistance en cisaillement adéquate. De plus, les étriers sont souvent conçus inadéquatement quant à leur ancrage et les détails de pliage vers l'intérieur de la pièce.

Pour les deux modes de rupture étudiés, les PRF peuvent jouer un rôle important comme élément de renforcement. Pour les piles de forme circulaire ou carrée, l'action des PRF est identique à celle des gainages en acier illustrés sur la figure 1. Des PRF sous forme de tissus, avec fibres orientées perpendiculairement à l'axe de l'élément (parallèle au périmètre), enrobent la pile afin d'augmenter à la fois le confinement de l'élément et la résistance à l'effort tranchant. Ce mode de

renforcement a démontré sont efficacité (Priestley et al 1996). Pour les piles rectangulaires, la littérature ne fait mention d'aucune solution ayant fait l'objet d'études élaborées. Deux solutions sont en cours d'étude à l'École Polytechnique de Montréal dont l'une porte sur l'utilisation des PRF pour les sections fortement rectangulaires. Tout comme pour les piles de forme carrée ou circulaire, les tissus en PRF enrobent la pile dans les zones de chevauchement et les zones de résistance à l'effort tranchant inadéquates, comme l'illustre la figure 3. Dans ce cas, les PRF permettent d'empêcher l'ouverture des fissures de fendage produites par la rupture du chevauchement des armatures, comme illustré sur la figure 4. Ainsi, le mode de rupture dans la direction longitudinale change d'une condition fragile à ductile, tel qu'observé par Chagnon et Massicotte (2005). L'action des PRF dans la direction longitudinale est toutefois limitée pour accroître la résistance à l'effort tranchant. Par contre, dans la direction transversale, le PRF agira comme étriers externes pour permettre d'augmenter la résistance en cisaillement tout en éliminant le mode de rupture par fendage dû aux armatures chevauchées.

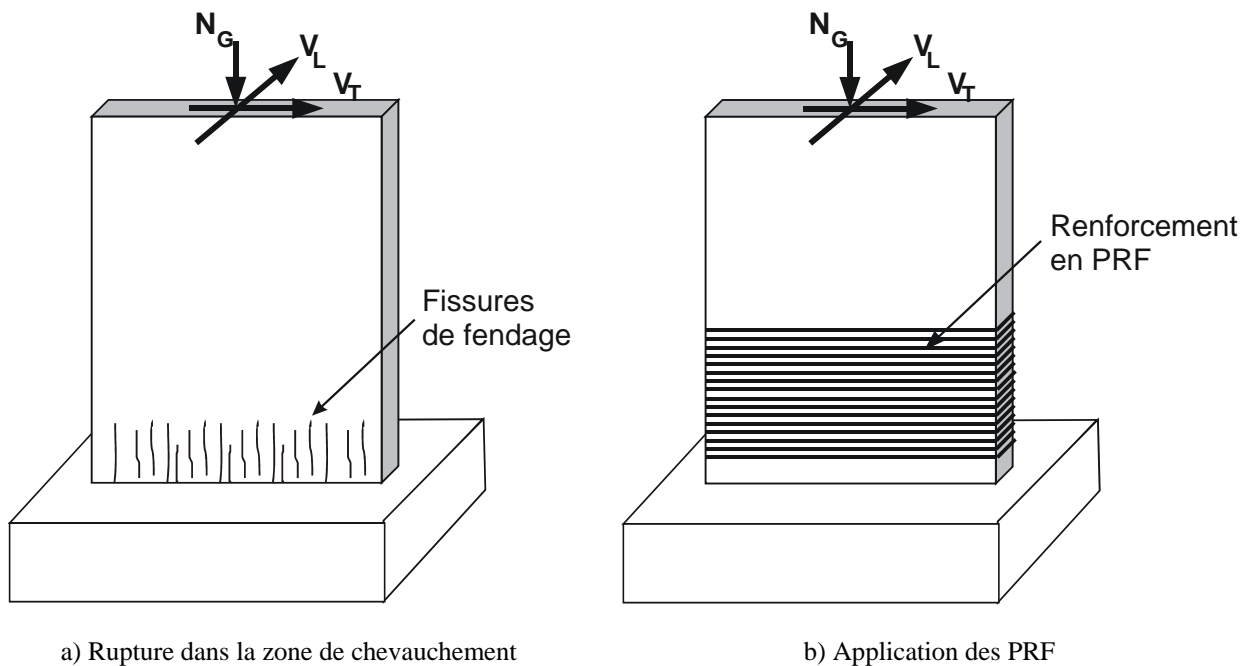


Figure 3 – Application des composites pour les piles rectangulaires

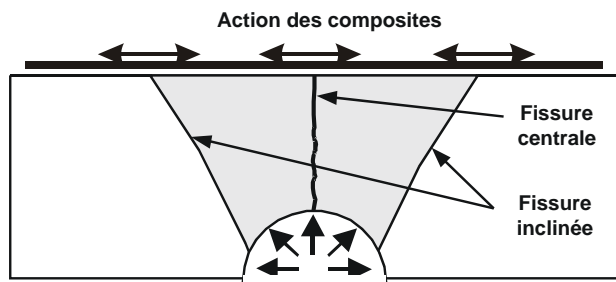


Figure 4 – Action des PRF

PROGRAMME DE RECHERCHE

Le programme d'études proposé visait, d'une part, à mesurer l'effet de la combinaison des effets de température et du taux de chargement et, d'autre part, à évaluer le potentiel des PRF pour résoudre le cas des piles rectangulaires avec rapport longueur/largeur élevé pour lesquelles il n'existe pas de solution. Par conséquent, les paramètres suivants ont été examinés dans le programme expérimental qui a été proposé :

- renforcement contre les ruptures en cisaillement ou en flexion;
- température de 20°C et -20°C;
- PRF en fibres de carbone et en fibre de verre;
- chargement monotonique statique et chargement dynamique;

Seul le programme de recherche relié aux essais sur les éléments structuraux et les matériaux sous sollicitations statiques est présenté ici. Le programme expérimental comporte deux séries d'essais sur les spécimens de grande taille et une série d'essais sur les matériaux. Les deux séries d'essais sur spécimens de grande taille ont été imposées par la disponibilité des espaces et des équipements de chargement lors de la construction du nouveau laboratoire de structures de l'École Polytechnique. La première série, qui compte 6 spécimens (Tableau 1), a servi de base pour la conception des spécimens de la phase 2 qui compte 20 spécimens indiqués au tableau 2. Les essais dynamiques n'avaient pas été réalisés au moment d'écrire cet article. La nomenclature utilisée pour identifier les spécimens suit la règle suivante établie en anglais:

- Mode de rupture visé: cisaillement (V) ou flexion (B);
- Section: carrée (S), circulaire (C) ou rectangulaire (R);
- Renforcement: Aucun (N), fibres de carbone (C), fibres de verre (G);
- Numéro séquentiel pour des spécimens similaires: 1, 2, etc.;
- Chargement: statique (S), dynamique (D);
- Température: +20 ou -20°C.

La géométrie des spécimens est montrée sur la figure 5. La charge était appliquée par un vérin hydraulique de 1500 kN de capacité. Tous les spécimens comprenaient une base qui était fixée à des blocs de réaction ancrés dans la dalle d'essais. Dans tous les cas, la dimension de référence des spécimens était de 375 mm et les piles ont été construites avec un béton ayant une résistance nominale de 30 MPa. Des barres longitudinales 20M ont été utilisées dans les spécimens de flexion. Pour ces spécimens, la longueur de chevauchement a été fixée à 480 mm, soit $24d_b$, une pratique courante pour les ponts conçus avant la parution du code S6-88. Pour les spécimens de cisaillement, on a employé des barres de flexion 30M continues. Pour les spécimens de flexion et de cisaillement, on a utilisé des étriers 10M espacés à 300 mm. La figure 6 présente la section dans la zone de chevauchement des spécimens de flexion et de cisaillement de la série 2.

Pour les matériaux composites, une seule couche a été appliquée. Dans le cas des spécimens de flexion, toute la zone de chevauchement a été enrobée. Pour les spécimens de cisaillement, des bandes espacées à 150 mm ont été employées. Cet espacement correspond à la moitié de l'espacement des étriers, et il a été choisi afin de permettre l'observation d'une rupture à l'effort tranchant des composites afin de pouvoir établir l'effet des basses températures et du taux de

chargement. La largeur des bandes de FRF a été fixée à 40 mm et 50 mm pour les PRFC et PRFV, respectivement.

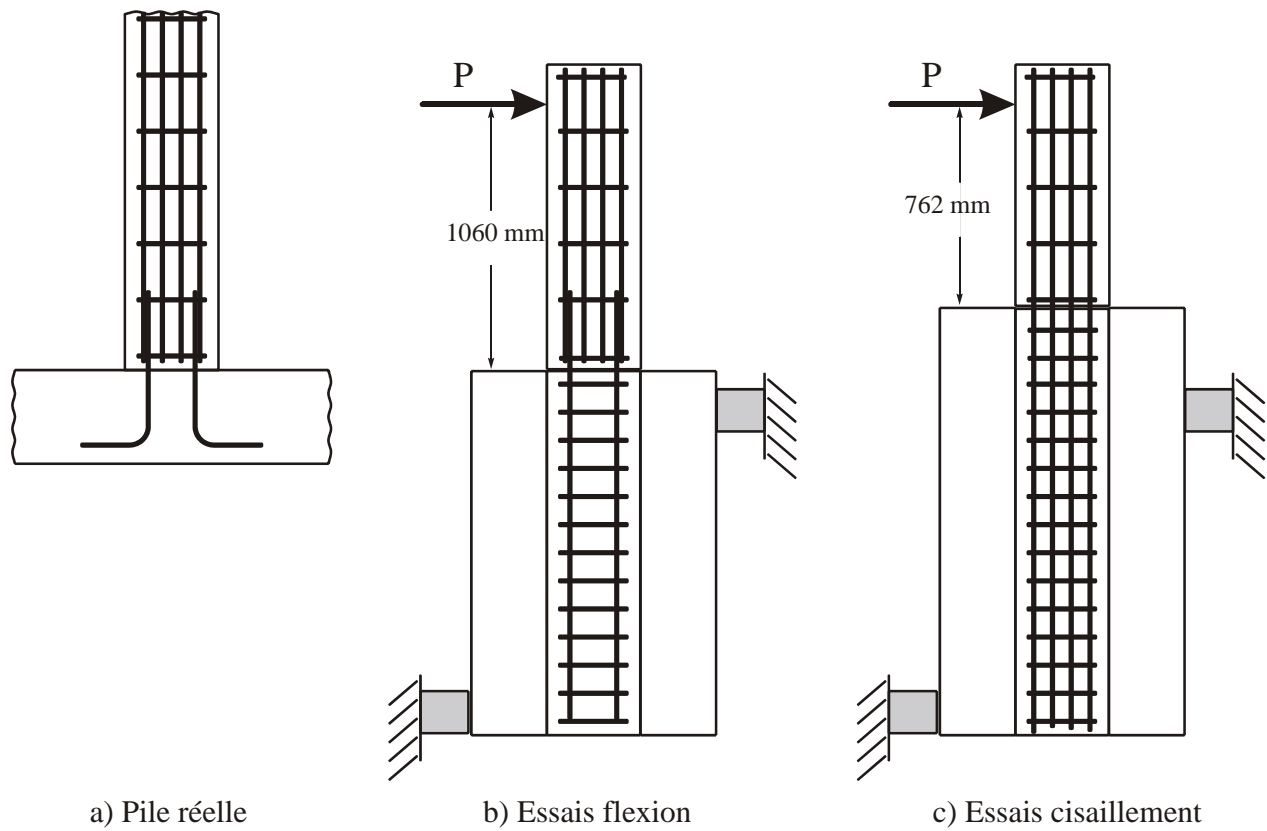


Figure 5 – Géométrie des spécimens et bancs d'essais

Tableau 1 – Première série d'essais

Identification	Mode de rupture	Section	Renforcement	Chargement	Température (°C)	Ch de rupture (kN)
VSN1/S20+	Cisaillement	Carrée	Non	Statique	+20	254.0
VSC1/S20+	Cisaillement	Carrée	PRFC	Statique	+20	325.6
VSC1/S20-	Cisaillement	Carrée	PRFC	Statique	-20	372.0
BSN1/S20+	Flexion	Carrée	Non	Statique	+20	110.7
BSC1/S20+	Flexion	Carrée	PRFC	Statique	+20	130.0
BSC1/S20-	Flexion	Carrée	PRFC	Statique	-20	149.3

Tableau 2 – Deuxième série d'essais

Identification	Mode de rupture	Section	Renforcement	Chargement	Température (°C)	Ch de rupture (kN)
BCN2/S20+	Flexion	Circulaire	Non	Statique	+20	127.6
BCC2/S20+	Flexion	Circulaire	PRFC	Statique	+20	171.8
BCC2/S20-	Flexion	Circulaire	PRFC	Statique	-20	222.3
BCC2/D20-	Flexion	Circulaire	PRFC	Dynamique	-20	En cours
BRN2/S20+	Flexion	Rectangulaire	Non	Statique	+20	276.7
BRC2/S20+	Flexion	Rectangulaire	PRFC	Statique	+20	313.1
BRC2/S20-	Flexion	Rectangulaire	PRFC	Statique	-20	363.8
BRC2/D20-	Flexion	Rectangulaire	PRFC	Dynamique	-20	En cours
BSN2/S20+	Flexion	Carrée	No	Statique	+20	138.5
BSC2/S20+	Flexion	Carrée	PRFC	Statique	+20	182.2
BSC2/S20-	Flexion	Carrée	PRFC	Statique	-20	213.7
BSC2/D20-	Flexion	Carrée	PRFC	Dynamique	-20	En cours
VSN2/S20+	Cisaillement	Carrée	Non	Statique	+20	326.1
VSN2/S20-	Cisaillement	Carrée	Non	Statique	-20	439.9
VSC2/S20+	Cisaillement	Carrée	PRFC	Statique	+20	429.5
VSC2/S20-	Cisaillement	Carrée	PRFC	Statique	-20	440.6
VSG2/S20+	Cisaillement	Carrée	PRFC	Statique	+20	542.0
VSG2/S20-	Cisaillement	Carrée	PRFV	Statique	-20	659.0**
VSC2/D20-	Cisaillement	Carrée	PRFC	Dynamique	-20	En cours
VSG2/D20-	Cisaillement	Carrée	PRFV	Dynamique	-20	En cours

** : rupture en flexion

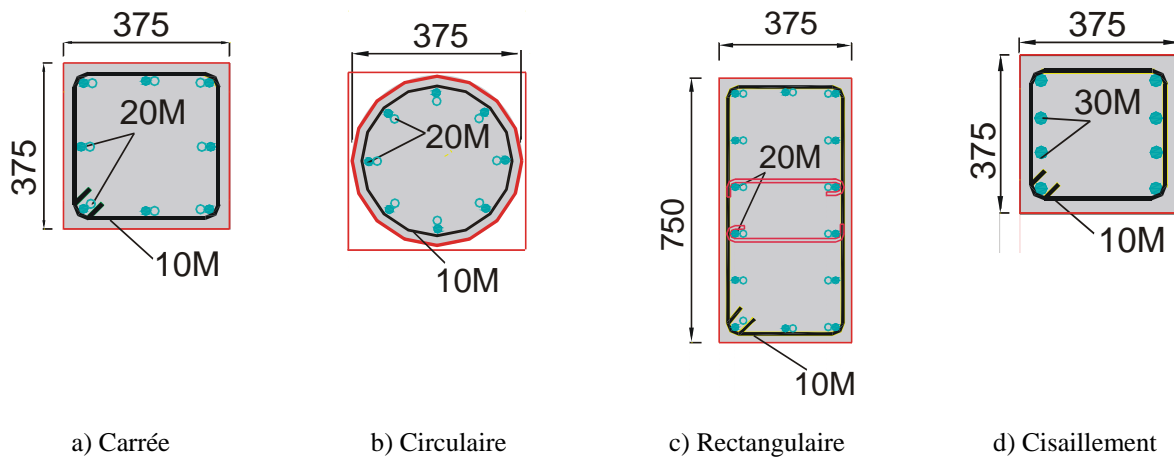


Figure 6 – Détail des spécimens de la série 2 dans la zone de chevauchement à la base de la pile

RÉSULTATS DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Les résultats des essais sur les matériaux sont présentés au tableau 3 alors que ceux des spécimens structuraux sont présentés aux tableaux 1 et 2. Dans tous les cas, on observe un gain de résistance important avec l'ajout des PRF alors que les essais à basse température en présence de PRF ont tous donné lieu à un gain de résistance par rapport au spécimen renforcé chargé à la température de la pièce. Les figures 7 à 9 présentent le comportement des spécimens de flexion de la série 2.

Tableau 3 – Essais sur les matériaux

Matériau	Résistance (MPa)		
	+20°C	-20°C	Variation (%)
Béton	51.3	55.7	+8.8
PRFV	567	613	+8.1
PRFC	632 / 703 / 1326**	NA	NA
No 10 f_y	449	495	+10.2
No 10, f_u	587	617	+5.1

** : valeurs dispersées devant être reprises

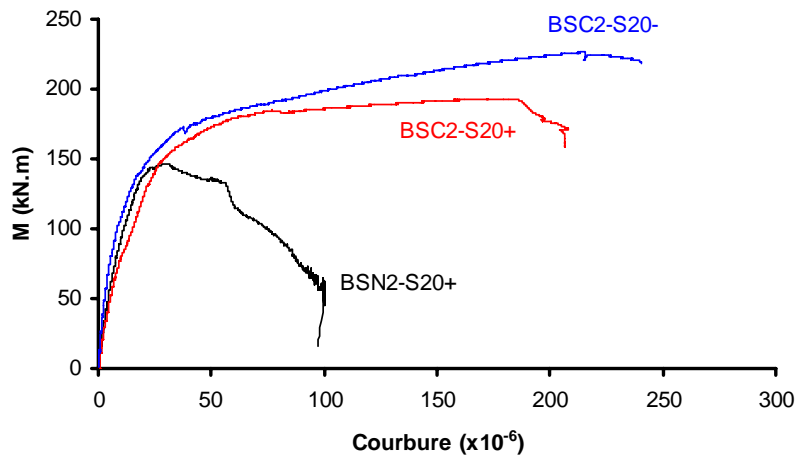


Figure 7 – Résultats des essais de la série 2 pour les spécimens carrés

L'examen de ces figures, combinée aux autres mesures effectuées lors de essais, permettent de conclure à l'efficacité des PRF pour renforcer les piles déficientes en cisaillement ou en flexion, et ce, même lorsque sollicitées à basse température. Dans le cas des spécimens carrés et circulaires, l'utilisation des PRF permet d'observer un accroissement de ductilité accompagné d'un gain de résistance. Pour les spécimens rectangulaires, le même phénomène est observé avec, toutefois, une perte de capacité pour des courbures très importantes. Comme une seule couche de PRFC a été utilisée dans cette étude, on pense que l'utilisation de plusieurs couches pourrait permettre de repousser davantage la courbure au-delà de laquelle la résistance est réduite, comme cela a été observé par Chagnon et Massicotte (2005).

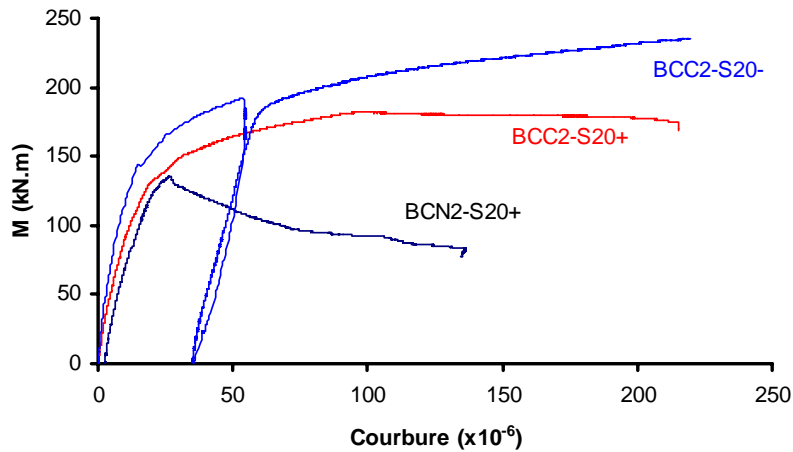


Figure 8 – Résultats des essais de la série 2 pour les spécimens circulaires

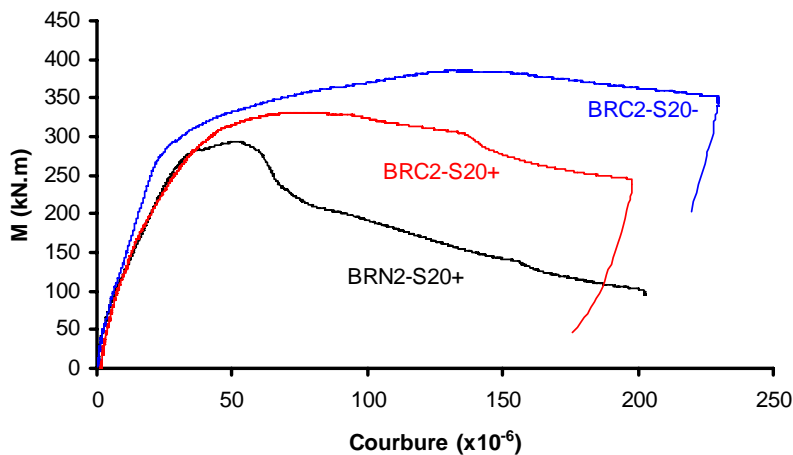


Figure 9 – Résultats des essais de la série 2 pour les spécimens rectangulaires

RECHERCHES FUTURES

Le projet de recherche présenté ici constitue la phase exploratoire d'un plus vaste projet. En particulier, l'utilisation des PRF pour les sections rectangulaires s'avère prometteur et il fait l'objet d'un second projet qui sera réalisé dans le cadre des travaux financés par ISIS Canada. Dans cet autre projet, des essais cycliques à haut taux de chargement seront réalisés à basse température. Cette étude devra également permettre de bien comprendre les mécanismes de rupture des zones de chevauchement afin de pouvoir proposer une méthode de calcul rationnelle.

CONCLUSIONS

Un programme de recherche a été élaboré pour évaluer l'influence de l'utilisation des PRF pour le renforcement en flexion et en cisaillement de piles de ponts présentant des déficiences de conception pour la résistance parasismique. Les résultats obtenus à ce jour ont permis de démontrer que les PRF permettent d'accroître considérablement la ductilité des éléments structuraux qui auraient autrement présentés des modes de rupture fragiles. L'effet des basses températures affecte positivement la résistance des éléments renforcés. L'étude de l'effet combiné du taux de chargement élevé et des basses températures n'a pas encore été complétée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Centre d'Excellence ISIS Canada qui a apporté le support financier nécessaire à la réalisation de ce programme expérimental. Les auteurs remercient également le personnel technique et les assistants de recherche du laboratoire de Structures de l'École Polytechnique de Montréal pour leur support.

RÉFÉRENCES

- Chagnon, N. and Massicotte, B. 2005. "Seismic retrofitting of rectangular bridge piers with CFRP. CONMAT'05, Vancouver. CD Rom, Session 38, paper 5.
- CSA 1988. "Calcul des ponts routes – Code CSA/S6-88". Canadian Standard Association, Willowdale, Ontario, Canada.
- CSA 2000. "Code canadien du calcul des ponts routiers – Code CSA/S6-00". Canadian Standard Association, Mississauga, Ontario, Canada.
- Holleran, M. 1998. "Seismic performance of reinforced concrete bridge piers under simulated winter conditions", Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M. 1996. "Seismic Design and Retrofit of Bridges" Wiley-Interscience Publications, New York.