

Renforcement des poutres en béton par tissus en fibre de carbone au pont Champlain

Jean de Gaspé Lizotte¹, Juan Echague²

¹ Directeur, Ponts et Ouvrages d'Art, Stantec Experts-conseils ltée

² Directeur, Ingénierie, La Société des Ponts Jacques Cartier et Champlain Inc.

SOMMAIRE:

Le pont Champlain a été construit en 1962 et il est l'un des ponts les plus stratégiques de la région de Montréal. Environ 60 millions de véhicules le traversent chaque année. Un programme spécial d'investissement pour le maintien et la réparation du pont est présentement en cours. Dans le cadre de ce programme, le renforcement des poutres de rive par le collage de tissus polymères renforcés en fibre de carbone (PRFC) constitue une des techniques utilisées pour améliorer la résistance en cisaillement des poutres. L'horizon de vie de l'ouvrage et son remplacement imminent ont permis l'utilisation massive de cette technique, conjointement aux autres techniques de renforcement et support des poutres de rive. Le choix de cette technique a été motivé par sa grande flexibilité en chantier, sa vitesse d'installation, et sa souplesse d'adaptation à différentes configurations existantes. Certains défis ont été identifiés dès l'étape d'études d'opportunité, comme le contrôle de qualité exigé par la norme en ce qui concerne les essais d'arrachement des bandes de renforcement, la grande variabilité de solutions en fonction du fournisseur du produit, l'absence de critères d'inspection des tissus en PRFC, la préparation et modification des surfaces préliminaires à l'installation du PRFC, parmi d'autres. Le devis de construction a été fait par performance afin de satisfaire ces contraintes et assurer une compétitivité pendant le processus d'appel d'offres.

1. GESTION DE L'ACTIF ET CHOIX DE LA TECHNIQUE DE RENFORCEMENT

Les travées d'approche du pont Champlain sont constituées de trois sections : les sections 5 et 7A, avec deux diaphragmes intermédiaires faisant la presque totalité de la hauteur des poutres, et la section 7B qui présente une autre configuration de tablier avec cinq diaphragmes intermédiaires élancés. La plupart des poutres intérieures montrent peu ou pas de signes de détérioration ou endommagement, ce qui n'est pas le cas de la majorité des poutres de rive, qui montre des traces de corrosion des câbles de précontrainte et du délaminage du béton. Dans le passé, le renforcement actif des poutres consistait en l'ajout de câbles de post-tension rectilignes de chaque côté des poutres de rive, et le nombre de torons à ajouter dépendait du nombre de câbles internes perdus en raison de la progression de la corrosion. Cependant, cette méthode n'ajoutait pas une capacité additionnelle suffisante en cisaillement, et des barres précontraintes ont été ajoutées comme étriers externes.

Depuis les dernières années, le collage des tissus en fibre de carbone a été privilégié comme renforcement en cisaillement, conjointement à d'autres techniques déjà utilisées telles que la précontrainte extérieure, les arbalètes à deux poinçons, et le support des poutres par des treillis modulaires. Ce choix a été influencé notamment par la rapidité de la mise en place et l'efficacité

du tissu en PRFC en tant que renforcement en cisaillement. Cette décision ouvre la porte aux techniques de réfection qui permettent d'assurer le maintien en fonction de l'ouvrage et de réparer un plus grand nombre d'éléments durant les travaux. Ce point est essentiel en considérant le grand nombre des poutres à réparer (100 poutres de rive en plus de quelques poutres intérieures) et l'envergure de l'ouvrage ; les coûts de mobilisation pour effectuer les travaux sont importants et la priorisation des éléments est un exercice délicat pour optimiser les investissements.

La première application des bandes de tissu en PRFC au pont Champlain a été effectuée en 2011, lors de l'installation d'une arbalète à deux poinçons et comme renforcement temporaire visant à reprendre les efforts en cisaillement d'une poutre de rive. Le système utilisé à l'époque utilisait des ancrages mécaniques en forme de mèches de fibres, ancrées aux âmes des poutres par le collage à l'époxy. Ce choix a été fait à cause des doutes sur l'efficacité des bandes de PRFC dans les zones des ancrages, à cause de la délamination des surfaces au soffite des poutres; ce problème a été abordé ultérieurement lors des derniers travaux de renforcement des deux dernières années tel que démontré sur la *Figure 1*. Cependant, cette solution a été problématique à cause du perçage des âmes pour l'installation des ancrages mécaniques, qui était concentrée sur la zone où les câbles internes sont disposés en éventail et le repérage des câbles a été une opération longue et ardue. De plus, la grosseur et la quantité d'ancrages requis risquent d'affaiblir la résistance de l'âme. Présentement, les ancrages mécaniques ne sont plus utilisés pour l'ancrage des bandes de

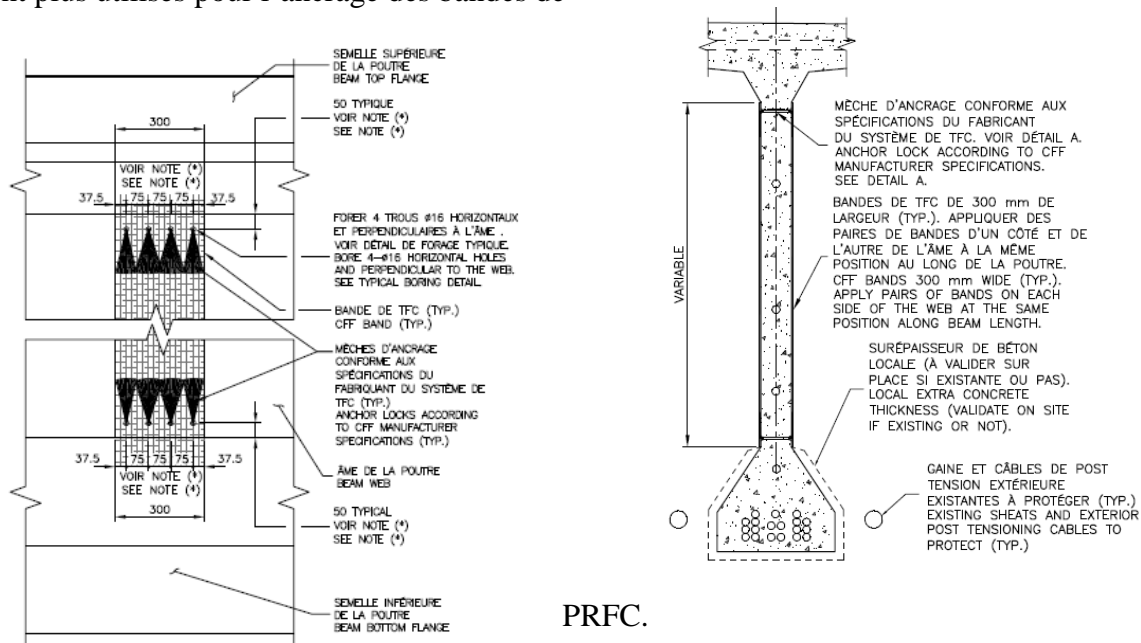


Figure 1 – Ancrage de bandes de PRFC par ancrage mécanique (mèches)

2. NORMES, RECOMMANDATIONS CONNUES ET LIMITATIONS DE CALCUL

Les modèles de calcul et critères de conception d'un renfort en cisaillement par PRF ont été traités dans plusieurs normes et bulletins tels que l'ACI 440, la CAN/CSA S806 et le fib-TG9.3. Dans chacun des documents susmentionnés, la contribution des bandes de PRF dans la capacité en cisaillement des poutres est déterminée par des équations plutôt analytiques liées dans certains cas au mode de rupture (rupture du PRF, délamination du béton ou décollement des bandes) ainsi qu'à la configuration des bandes (wrapping scheme).

De plus, certains vont plus loin en intégrant des facteurs de sécurité pour tenir compte de l'efficacité de la méthode d'application des bandes, comme c'est le cas de fib-TG9.3, ou imposer une limitation par rapport à la méthode d'ancrage des bandes, tel que spécifié par la CAN/CSA S806.

Un autre critère d'importance est l'allongement maximal des bandes de PRF. Il a été fixé à 0.004 par la majorité des documents traitant ce sujet. Cette valeur a été spécifiée uniquement pour le cas des bandes entourant complètement l'élément (complete wrapping) par ACI 440 et pour les cas de rupture de PRF par CAN/CSA S806. De plus, le CAN/CSA S806 propose un allongement maximal de 0.002 pour les cas gouvernés par le décollement des bandes.

En raison de nombre élevé de paramètres à tenir en compte lors de la conception des bandes de PRF en cisaillement (incluant sans toutefois s'y limiter, la rigidité et propriétés des bandes, propriétés de substrat, qualité de l'interface, méthode d'application, configuration des bandes, longueur de développement, mode de rupture et système d'ancrage), les expressions de calcul restent compliquées et des fois difficiles à mettre en pratique. De plus, chaque méthode proposée traite uniquement un certain nombre de paramètres s'adressant aux autres.

3. CRITÈRES DE CONCEPTION ET DEVIS DE PERFORMANCE

Un point important défini par le Propriétaire était de procéder à l'appel d'offres pour les travaux de PRFC au moyen d'un devis de performance. Une fois la solution de renforcement par bandes de PRFC choisie, une comparaison des différentes solutions établies par différents fabricants présents au marché québécois a été faite. Le renforcement par bandes de tissu en PRFC est un système variable dépendant du fabricant (voir *Tableau 1* ci-dessous), et pour une même résistance spécifiée, les quantités de tissu, le nombre de plis, les couches d'époxy et les coûts associés peuvent varier grandement d'un fournisseur à un autre.

Sommaire des capacités selon les 4 manufacturiers de PRFC						
<i>(supposant capacité manquante de 850 kN avec charges pondérées)</i>						
<i>(ACI440 & S6-06)</i>						
		tf	nf	V _{f,ex}	ε _x	V _{f,ex=0.002*}
		épaisseur/ pli (mm)	# plis	(kN)		(kN)
Fyfe	Tyfo SCH-41-2X	2	1	1230	0.00290	848
Sika	Sikawrap 900C	1.3	1	1080	0.00344	628
		1.3	2	1450	0.00231	1255
Freyssine	Foreva TFC75	0.48	2	995	0.00384	518
		0.48	3	1182	0.00304	778
		0.48	4	1336	0.00258	1036
Mappei	MapeWrap-C-Uniax600 & résine Mapewrap 21	1.496	2	1241	0.0029	856

* Si l'on se limite conservativement au critère de déformation élastique des étriers selon divers articles, le code S806 (bâtiment Canadien) et NCHRP- report 678 section 2.5 avec PRFC critique en décollement sans ancrage mécanique

Tableau 1: Comparaison entre le renforcement proposé par différents fournisseurs pour une charge en cisaillement donnée.

Au final, les critères de conception ont été établis suivant de multiples discussions avec divers fabricants de PRFC, avec le surveillant de chantier sur le pont Champlain ainsi qu'avec le Propriétaire afin de déterminer la meilleure configuration possible du renforcement en cisaillement pour combler le besoin en capacité en cisaillement (500 kN pour les poutres et 350 kN pour les diaphragmes). Voici certains des critères limitatifs qui ont été considérés:

- la condition du pont et l'état actuel des éléments structuraux;
- la faible épaisseur des âmes;
- la disposition et corrosion existante des câbles de précontrainte interne des poutres de rive;
- les conditions des réparations existantes avec/sans surépaisseur au niveau des âmes et semelles des poutres et diaphragmes;
- la rapidité d'exécution des réparations par PRFC (préparation de surface) ainsi que les techniques de mise-en-œuvre (ex. PRFC en feuille par mouillage en préférence versus systèmes de PRFC actifs);
- éliminer la nécessité de percer des ancrages dans la structure, en raison de la condition actuelle des poutres et pour éviter un travail colossal de repérage d'acier d'armature et de câbles internes de post-tension;
- la possibilité d'ajouter des plis ultérieurement.

Suite à cet exercice, et compte tenu du coût élevé de l'ensemble des travaux prévus, le Propriétaire a exigé que les plans et devis soient préparés de façon à n'exclure aucun des

principaux fournisseurs de PRFC. En conséquence, les indications aux plans ainsi que les clauses du devis ont été établies de manière à définir la *performance* requise du produit et des travaux plutôt que de préciser un ou des fournisseurs spécifiques. Les plans et les clauses du devis de construction ont ainsi été élaborés de façon à définir le niveau de performance requis de même que les exigences et critères à respecter tels que :

- l'obligation pour l'Entrepreneur d'impliquer un ingénieur spécialiste en PRFC pour réaliser la conception finale du renforcement par PRFC ;
- l'inspection et approbation de la condition des surfaces et du substrat ;
- l'interdiction de fermetures de voies pour la mise en œuvre des bandes de PRFC ;
- les spécifications pour la préparation des surfaces, la modification des coins et arêtes de la poutre pour éviter les poussées au vide des bandes de PRFC ;
- les essais de contrôle de la température et de l'humidité ambiante pendant l'application ;
- les certifications des applicateurs du PRFC, l'application et interprétation des exigences du chapitre 16 de la norme CAN/CSA-S6-06 ;
- des exigences relatives à la finition des surfaces, la préparation des tissus et de la résine époxydique ;
- la définition des essais d'arrachement du PRFC selon la norme ASTM D4541 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, parmi d'autres exigences;
- diverses autres exigences liées à la conception telle que l'allongement maximal qui a été limité à 0.0015 afin de s'assurer de rester dans les déformations élastiques linéaires.

4. DIFFÉRENTS PARAMÈTRES D'IMPORTANCE

4.1 CONFIGURATION « U-WRAP »

Comme clairement stipulé dans des recherches et projets antérieurs, l'effet de géométrie de la poutre de type AASHTO influence grandement les résultats de renforcement en cisaillement. Une recherche extensive a été effectuée afin d'obtenir divers résultats de tests ainsi que des conceptions antérieures de poutres renforcées en cisaillement par PRFC.

La *Figure 2* démontre l'importance de descendre le PRFC jusqu'au bas de la poutre, tout comme un étrier standard. Ceci permet d'intercepter les fissures dès leur apparition, et ce, partout le long de l'âme. De plus, une fissuration typique en cisaillement est démontrée sur la *Figure 3* ce qui confirme l'importance d'une telle configuration pour ce type de poutres. Dans le cas de poutres de types AASHTO avec bulbe inférieur, les résultats des tests indiquent clairement qu'une configuration des bandes de PRFC de type « U-Wrap », dans laquelle les bandes sont installées non seulement sur les âmes, mais également prolongées tout autour du bulbe inférieur (voir la *figure 4*), est nettement préférable.

La *Figure 5* présente un test à grande échelle typique avec configuration de type “U-Wrap” effectué par le « Florida Department of Transportation » sur des poutres AASHTO. Les résultats démontrent souvent des hausses de capacité allant jusqu’à 25% par rapport à la configuration originale (bandes seulement sur les surfaces verticales de l’âme sans « U-Wrap »). Il faut par contre mentionner qu’aucun test n’a été effectué avec plus de 30-35% de torons sectionnés. À ce point, il est stipulé d’avoir également des systèmes mécaniques supplémentaires comme des câbles de post-tension extérieurs entre autres.

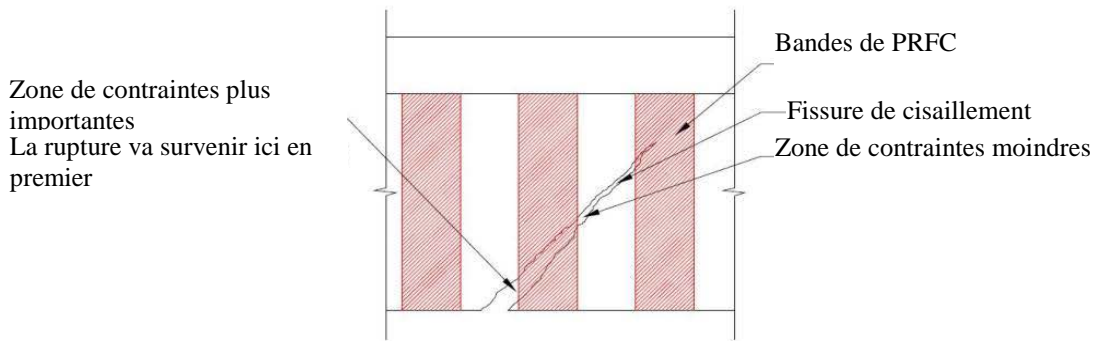


Figure 2 : Importance de la configuration « U-Wrap »

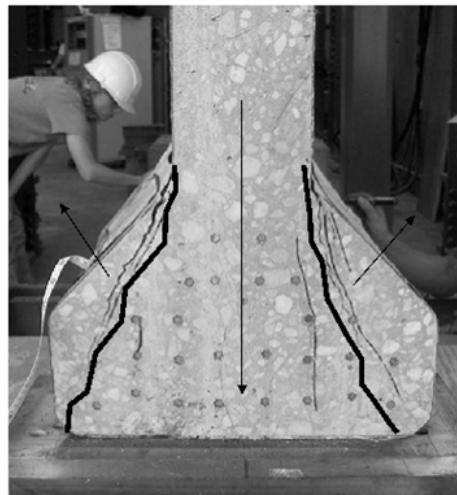
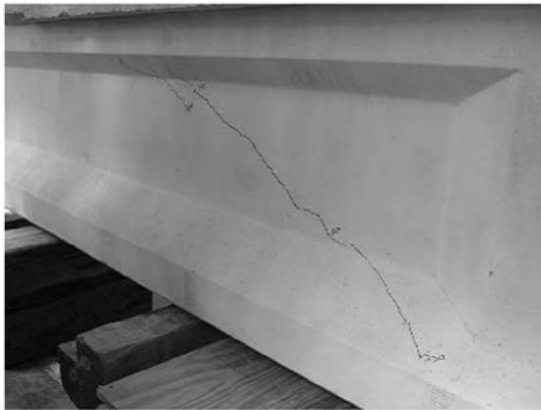


Figure 3 : Fissuration typique en cisaillement d'une poutre AASHTO

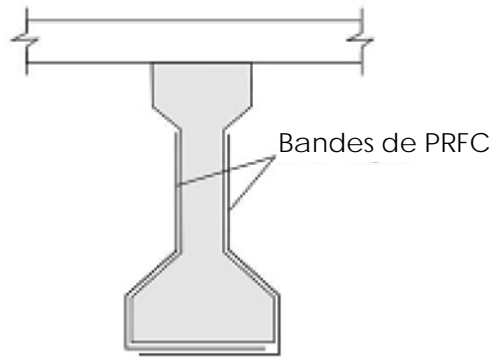


Figure 4 : Exemple de configuration des bandes de type « U-Wrap »



Figure 5: Exemple typique de test à grande échelle d'un renforcement PRFC en cisaillement configuration « U-Wrap », réf. DOT Floride

4.2 INFLUENCE DE LA FISSURATION

Il a été démontré que la fissuration n'affecte pas les performances du PRFC collé en surface en cisaillement. D'ailleurs, ces renforcements sont souvent installés sur des poutres déjà fissurées. Aux états limites ultimes, les faibles allongements du PRFC limiteront les déformations des étriers sous le seuil élastique et, à titre d'exemple, pourront permettre l'interception de deux (2) fissures de 2.25mm ($\epsilon \Delta/L$, $\epsilon = 0.0015$, $L = 3000\text{mm}$, avec $\Delta = \text{ouverture des fissures} = 0.0015 \times 3000 = 4.5\text{mm}$) sans besoin d'ancrage (en assumant les étriers corrodés ou sectionnés).

4.3 INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

Après multiples discussions avec divers fabricants de PRFC, la température de pose ainsi que du substrat a été établie à +10°C (plage de pose au devis de 10°C à 32°C). Le concepteur désirait initialement une plage de 20°C à 32°C afin de diminuer le temps de pose en cas de basses températures et permettre une cure plus rapide. Ceci s'est avéré non viable

économiquement puisque selon les données de certains entrepreneurs, le béton des poutres atteint rarement 20°C. La plage de température inscrite au devis respecte autant les normes CAN/CSA-S6-06 et ACI 440 que les fiches techniques des résines époxydes des PRFC. Notons que la majorité des travaux auront lieu dans la période estivale de toute façon et que les entrepreneurs doivent rencontrer les échéanciers de pose de PRFC inscrits aux plans.

4.4 AUTRES

- Les renforcements de PRFC doivent être recouverts d'une protection UV;
- Les câbles de précontraintes et fissures existantes doivent être injectés avant la pose de PRFC;
- Éviter le perçage de trous dans les PRFC après la cure de la résine sinon une réparation de reprise des efforts équivalents au PRFC doit être ajoutée localement;
- Importance du reprofilage des surfaces ainsi que des réparations de béton afin d'assurer l'efficacité du PRFC collé en surface du béton.

5. DÉFIS RENCONTRÉS AU CHANTIER

En raison du large historique de réparations du pont Champlain et à la diversité de techniques utilisées dans le passé, la conception des renforts à l'aide de PRFC a dû faire face à toute une panoplie de contraintes, principalement géométriques, ce qui a conditionné le format final du renfort dans l'objectif d'uniformisation voulue :

- Étant donné le niveau de dégradation très élevé et variable, nous nous retrouvions face à des anciennes réparations avec ou sans surépaisseur. Il a fallu soit démolir et reconstruire les anciennes réparations, soit créer des transitions entre les surépaisseurs et la géométrie de base des poutres, et ce, dans l'âme, mais aussi et très fréquemment, dans la semelle inférieure. En outre, des dessins qui démontrent le phasage de travaux pour chaque poutre ont été préparés afin de minimiser les zones temporairement affaiblies par les travaux de préparation des surfaces.
- Toutes les poutres de rive avaient été déjà renforcées dans le passé à l'aide de câbles de post-tension externe. Les dimensions et positions des composantes du système de post-tension tel que les blocs d'ancrage, les gaines et les supports des gaines varient d'une poutre à l'autre selon l'année de réparation et l'entrepreneur en charge. De plus, certaines poutres de rive à renforcer comportaient des étriers externes, datant des années 90, ancrées dans la semelle supérieure des poutres et attachées par paires en dessous de la semelle inférieure. Donc, différentes configurations des bandes de PRFC (largeur et espacement) ont été requises pour à la fois satisfaire les contraintes de chaque poutre et fournir la capacité requise.
- Différents conflits de percement du PRFC avec les autres systèmes de renforts tels que les supports de gaines et la post-tension transversale pour renfort de la dalle ont été observés. De nouveaux critères de conception ont donc été développés afin d'éviter la création de zones à faible résistance dans le PRFC.

- En outre, il faut mentionner qu'en addition à toutes les contraintes mentionnées auparavant, la majorité des poutres de rive a déjà été équipée de capteurs de déformation, tant en flexion qu'en cisaillement, faisant partie du système de monitoring avec son câblage nécessaire de communications. Il a donc fallu démonter ces systèmes avant les travaux et les réinstaller par la suite.
- Finalement, les critères d'approbation concernant le test d'arrachement ont dû être modifiés afin d'inclure le fait que la rupture pendant le test pouvait se produire entre l'ancienne réparation et le béton d'origine.

6. PROGRAMME D'INSPECTION ET DE SUIVI

Afin d'assurer une performance adéquate des renforcements en PRFC réalisés sur les poutres de rive du pont Champlain, et de façon à suivre l'évolution du système dans un contexte où la dégradation des poutres se poursuit en raison de la corrosion des câbles de post-tension, un programme d'inspection et de suivi a été élaboré pour le Propriétaire.

Le programme vise deux points en particulier : dans un premier temps, définir les essais et le suivi à réaliser pour valider le comportement du renforcement en PRFC au fil des ans et, en deuxième lieu, établir les méthodes d'inspection et critères d'acceptation permettant d'identifier et juger les défaillances et défauts potentiels.

Le programme du suivi proposé comprend deux composantes : un suivi visuel ainsi que des essais périodiques de résistance à l'arrachement du composite des surfaces de béton. À ces éléments s'ajoute également un suivi par instrumentation, à partir des équipements mis en place sur les poutres de rive par le Propriétaire, afin de mesurer les sollicitations dans le béton des poutres et de déceler l'apparition de fissures dans les âmes.

En ce qui concerne l'identification et l'évaluation des défauts potentiels, les recommandations visent à définir les méthodes d'inspections à utiliser (inspection visuelle, martelage des surfaces, etc.) et à établir les critères d'évaluation des défauts et déficiences afin d'y rattacher des cotes de matériau et de comportement (cotes CEM et CEC).

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Toutes les poutres de rive ne comportant pas de système de renforcement de type « Queen Post » (arbalètes) ou « monotorons déviés-gainés-graissés » ont fait l'objet d'un renforcement avec PRFC tel que décrit ci-dessus. Le programme de renforcement a été complété avec succès en 2014 dans le cadre de 4 contrats de réparation des sections 5 et 7 du pont Champlain. Au final, 2 différents fabricants/fournisseurs de PRFC ont été impliqués dans les travaux, résultat de l'appel d'offres de type « Devis de performance » utilisé.

Un total d'environ 68 poutres de rive, de même que certains diaphragmes et poutres intérieures ont été renforcés en cisaillement à l'aide de PRFC, représentant une superficie totale de l'ordre de 20 000 m².

Outre certains éclaircissements faits relativement aux exigences d'adhérence des bandes sur le substrat et de résistance d'arrachement du béton existant, les travaux se sont déroulés sensiblement sans problème, et ce, pour tous les différents entrepreneurs/fournisseurs impliqués.

Des renforcements similaires sont prévus sur certaines poutres intérieures dans les contrats de réfection/renforcement à venir en 2016 et 2017.