

# Tablier de pont préfabriqué en béton précontraint au moyen de tendons en PRF

**Marc Demers** Université de Sherbrooke  
**Adel R. Zaki** SNC-Lavalin, Montréal  
**Kenneth W. Neale** Université de Sherbrooke  
**Gamil Tadros** ISIS Canada, Calgary

## RÉSUMÉ

La corrosion des armatures en acier est l'une des plus grandes entraves à la durabilité des ouvrages d'art. Le développement d'éléments en béton, armé ou précontraint, sans acier constitue donc une alternative prometteuse pour augmenter la durée de vie utile des ponts. L'objectif de cette étude consiste à évaluer le potentiel que possèdent les tendons de polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) pour la préfabrication d'éléments de ponts en béton précontraint sans acier. À cette fin, le comportement structural d'éléments conventionnels renforcés d'acier est comparé à celui d'éléments innovateurs sans acier renforcés de PRFC.

Pour réaliser cette étude, des éléments en béton précontraint, semblables à ceux qui ont été récemment utilisés pour la reconstruction du tablier du pont Jacques-Cartier à Montréal, ont été fabriqués en remplaçant les câbles d'acier par des tendons de PRFC. L'excentricité de la précontrainte, qui est la même pour les câbles en acier et pour les tendons en PRFC, est optimisée par des déviateurs dans les âmes de profondeur variable afin d'assurer une résistance adéquate. Un béton à haute performance, dont la résistance spécifiée en compression est de 60 MPa, a été utilisé pour tous ces éléments.

La mise au point d'un système d'ancrage fiable pour les tendons en PRFC, et qui demeure compatible avec les pratiques des chantiers de construction, est également abordée dans cette étude. Les systèmes d'ancrages mécaniques sont préférés aux systèmes collés puisqu'ils peuvent être ajustés rapidement à la position désirée. Le principal défi à relever pour ces ancrages consiste à saisir les tendons en PRFC sans les endommager, car ils sont sensibles aux contraintes transversales.

Les résultats des essais de chargement sur les éléments pleine grandeur démontrent les bonnes performances du béton précontraint sans acier, tant pour le niveau de charge de service que pour la résistance ultime. Dans une deuxième phase de ce projet, un modèle numérique sera calibré à partir de ces résultats, et ce, dans le but d'étudier davantage de configurations.

## INTRODUCTION

Le coût de remplacement des ponts, à la fin de leur vie utile, devient très élevé lorsque l'on prend en considération les impacts sociaux. Similairement, les coûts d'entretien ont tendance à augmenter avec le vieillissement des structures. Ainsi, il est avantageux d'employer des techniques de construction et des matériaux plus durables afin de réduire ces coûts. Puisque la corrosion des armatures en acier est l'une des plus grandes entraves à la durabilité des ouvrages d'art, la mise au point d'éléments en béton, armé ou précontraint, sans acier constitue une alternative prometteuse. Les polymères renforcés de fibres (PRF), sous forme de barres d'armature et tendons de précontrainte, sont de bons candidats pour remplacer l'acier, car ils possèdent une grande résistance en tension et sont insensibles à la corrosion.

L'étude présentée dans cet article évalue le potentiel des tendons de polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) pour la préfabrication d'éléments de ponts en béton précontraint sans acier. À cette fin, le comportement structural d'éléments conventionnels renforcés d'acier est comparé expérimentalement à celui d'éléments innovateurs sans acier renforcés de PRFC. Les essais ont été réalisés sur des éléments de tablier de pont en béton précontraint préfabriqués pleine grandeur, inspirés de ceux employés pour le remplacement du tablier du pont Jacques-

Cartier à Montréal en 2001-02 (Zaki et Mailhot, 2002). Jusqu'à maintenant, quatre éléments de 7,4 mètres de longueur ont été testés; deux dalles de pont à double âme, et deux poutres en T ou à âme simple.

Puisqu'en général les PRF possèdent une résistance en tension comparable ou supérieure à celle des câbles de précontrainte en acier, ils sont donc tous candidats pour les remplacer. Toutefois, les torons en PRFC constituent un meilleur choix à cause de leurs propriétés supérieures en regard de la résistance au fluage et à la fatigue (CSA S806-02; CSA S6-00). D'un autre côté, les polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) sont préférés comme armatures passives rectilignes et pour les étriers, car ils sont plus économiques.

Le remplacement des câbles d'acier par des torons en PRFC présente certains défis à cause de différences fondamentales dans les propriétés mécaniques de ces matériaux. Les PRFC sont sensibles aux contraintes perpendiculaires à l'axe des fibres et il s'ensuit des difficultés particulières lors de la mise en tension des tendons (Reda Taha et Shrive, 2003). La mise au point d'un système d'ancrage fiable et compatible avec les pratiques des chantiers de construction constitue un des aspects importants de l'élaboration de cette technologie, et qui est abordée en premier dans cet article.

## **SYSTÈMES D'ANCRAGE**

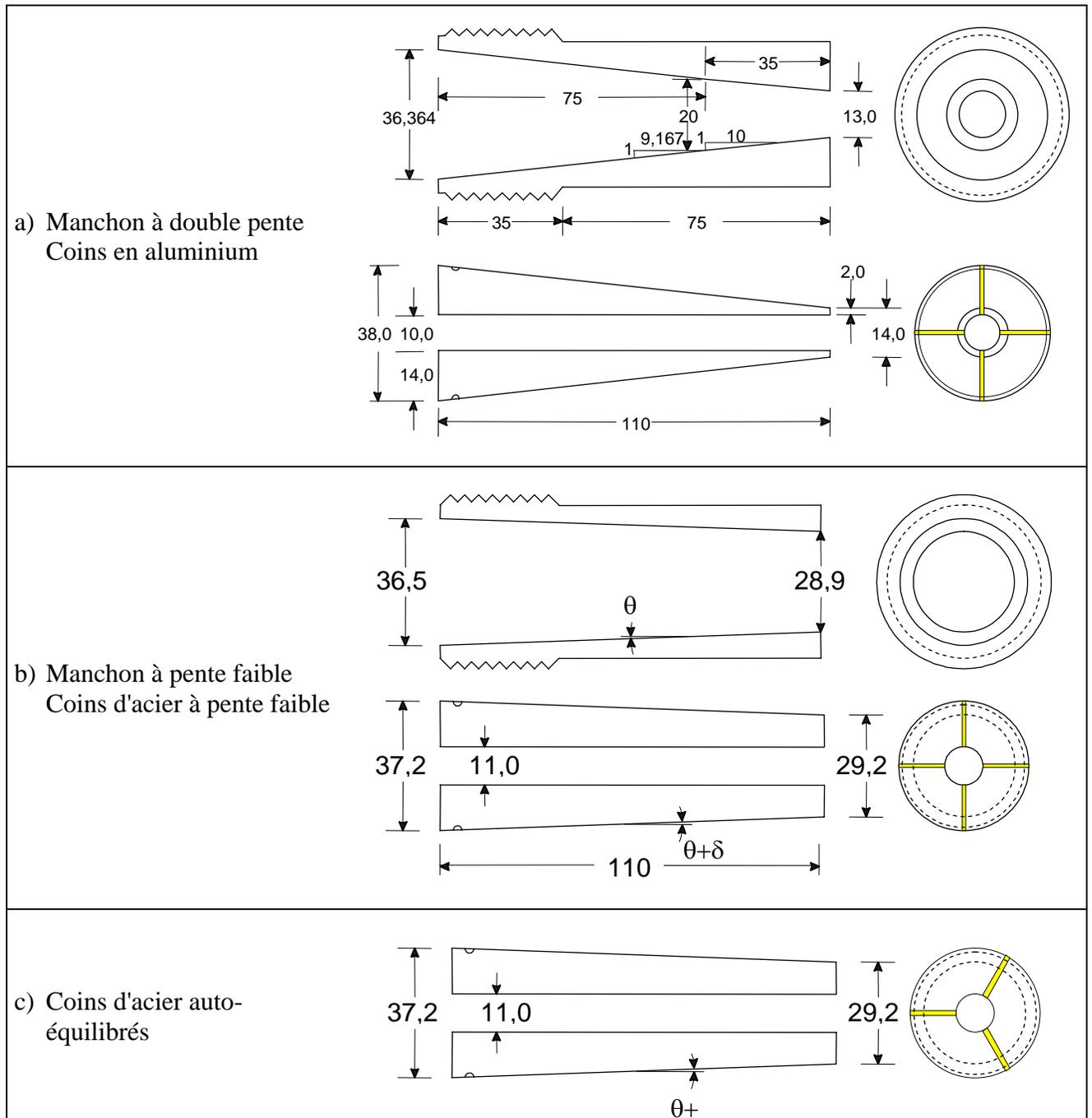
Les systèmes d'ancrages sont des dispositifs qui saisissent les câbles ou les tendons de précontrainte et permettent de les maintenir sous tension. Les systèmes pour ancrer les câbles d'acier sont fiables et facilement disponibles, mais ne conviennent pas pour les tendons en PRFC car ces derniers sont sensibles aux contraintes transversales. D'autre part, les producteurs de tendons en PRFC ont élaboré des systèmes d'ancrages spécifiques à leur propre produit, lesquels, dans certains cas, doivent être installés par le manufacturier. Ces systèmes d'ancrage spécifiques ne sont pas toujours adaptés aux pratiques de chantier, soit parce qu'ils sont trop encombrants ou qu'ils requièrent un équipement spécifique lors de la mise en tension.

L'approche retenue dans le cadre de ce projet pour effectuer la mise en tension des torons en PRFC consiste à appliquer la précontrainte avec les équipements régulièrement utilisés en chantier par l'intermédiaire de courts câbles d'acier. À cette fin, des unions pour câbles d'acier ont été modifiées de manière à permettre le raccordement d'un câble d'acier à un tendon en PRFC. La modification consiste simplement à dévisser un des deux ancrages pour câble d'acier de l'union, et le remplacer par un ancrage pour tendon en PRFC ayant les mêmes filets. Par contre, la sélection et le développement d'un système d'ancrage pour tendons en PRFC qui respecte l'espacement standard de 50 mm constituent une partie importante de cette étude.

Sur les chantiers, les systèmes d'ancrages mécaniques constitués d'un manchon à intérieur conique et de coins sont préférés aux systèmes collés, parce qu'ils sont rapides d'installation et ajustables. Afin de respecter cette préférence, le principe manchon et coins est à la base du développement des ancrages pour les tendons en PRFC. Tous les modèles testés avaient trois caractéristiques fondamentales pour réduire les contraintes transversales sur le tendon; notamment la longueur du système d'ancrage de 110 mm, un métal mou en contact avec le tendon, et la géométrie favorisant le serrage du talon en premier (Fig. 1).

Le premier modèle d'ancrage testé possède quatre coins en aluminium qui sont en contact direct avec le tendon. L'angle intérieur du manchon en acier est très légèrement inférieur à celui des coins sur environ les deux tiers de la longueur afin de réduire les contraintes transversales à

l'extrémité tendue du tendon (Fig. 1a). Lors des essais en laboratoire, ce système a réussi à transférer une charge de tension d'environ 80 % de la résistance spécifiée du tendon avant la rupture de ce dernier près de l'ancrage. Par contre, au cours de la tentative d'utilisation en chantier, les tendons ont glissé dans les coins d'aluminium sous des charges inférieures à la précontrainte désirée, soit 55 % de la résistance spécifiée.



Le second système d'ancrage testé a été mis au point par Sayed-Ahmed et Shrive (1998). L'angle intérieur du manchon en acier est faible afin de réduire les contraintes transversales générées par la mise en tension du tendon. Les quatre coins en acier ont une pente extérieure très légèrement supérieure à celle du manchon (Fig. 2b). Cette géométrie permet de réduire les contraintes transversales sur la partie tendue du tendon en PRFC, puisque l'autre extrémité entre en contact en premier. Une tôle de cuivre de 0,5 millimètre d'épaisseur est insérée entre les coins d'acier et le tendon dans le but de protéger ce dernier.

Les essais de traction en laboratoire ont montré que le second système d'ancrage permet de mobiliser une charge supérieure à 90 % de la résistance spécifiée du tendon sans glissement. Malgré le succès observé en laboratoire, ce système n'a pas passé l'épreuve du chantier lors de la fabrication de la dalle de pont à double âme sans acier. En effet, certains ancrages ont glissé avant d'atteindre la précontrainte désirée, établie à 55 % de la résistance spécifiée. Cet échec est partiellement attribué à l'endommagement des tendons en PRFC causé par plusieurs tentatives infructueuses de mise en tension, et partiellement à la difficulté d'obtenir une répartition uniforme des contraintes parmi les quatre coins de l'ancrage.

Le dernier système d'ancrage mis à l'essai utilise les manchons à pente faible avec seulement trois coins en acier (Fig. 2c). Comme pour le cas précédent, le tendon est protégé par une tôle de cuivre. Une telle configuration assure automatiquement une distribution égale des contraintes entre les trois coins sur le tendon. La performance de cette variante du système à pente faible est sensiblement la même que celle de l'original. Plus de 90 % de la résistance spécifiée du tendon est obtenue lors des essais en laboratoire, mais certains ancrages ont glissé en deçà du 55 % désiré pour la fabrication de la poutre en T sans acier.

La mise au point d'un système d'ancrage pour les tendons en PRFC se poursuit en conservant les objectifs de fiabilité et de convivialité en chantier. Une investigation en cours recherche les causes des glissements observés lors des mises en œuvre de la précontrainte en condition de chantier sur des éléments pleine grandeur.

## **ESSAIS SUR LES ÉLÉMENTS PLEINE GRANDEUR**

### **Fabrication des éléments pleine grandeur**

Les éléments pleine grandeur de cette étude ont été fabriqués dans un des coffrages utilisés lors du remplacement du tablier du pont Jacques-Cartier à Montréal. La seule modification apportée à la géométrie externe des éléments expérimentaux porte sur la largeur de la dalle qui a été ajustée de manière à obtenir une symétrie de la section transversale et le bon nombre des âmes. Le dimensionnement de ces éléments de 7,4 mètres de longueur, tant ceux armés d'acier que de PRF, a été basé sur les efforts induits par le camion de conception QS-660. L'excentricité de la précontrainte, qui est la même pour les câbles en acier et pour les tendons en PRFC, est optimisée par trois déviateurs dans les âmes de profondeur variable de manière à assurer une résistance adéquate sur toute la longueur. La résistance spécifiée à la compression du béton à haute performance est de 60 MPa.

La figure 2 montre la disposition théorique des armatures des éléments expérimentaux. On note que les quatre câbles d'acier de 15 mm ont été remplacés par six tendons de 10 mm pour chacune des âmes, ce qui représente une réduction de 23 % de la section totale de précontrainte. Le fondement théorique du dimensionnement d'éléments en béton précontraint avec des tendons en PRFC est présenté par Burke et Dolan (2001). Dans la dalle, l'espacement des barres

transversales de 16 mm passe de 160 mm pour l'acier à 150 mm pour le PRFV. Les armatures longitudinales d'acier et de PRFV de 16 mm ont les mêmes positions pour les deux configurations. Finalement, les étriers d'acier de 11 mm sont remplacés par des étriers en C obtenus à partir de tiges en PRFV de 9,5 mm et placés par paires face-à-face. L'espacement des étriers d'acier est différent de son équivalent en PRFV.

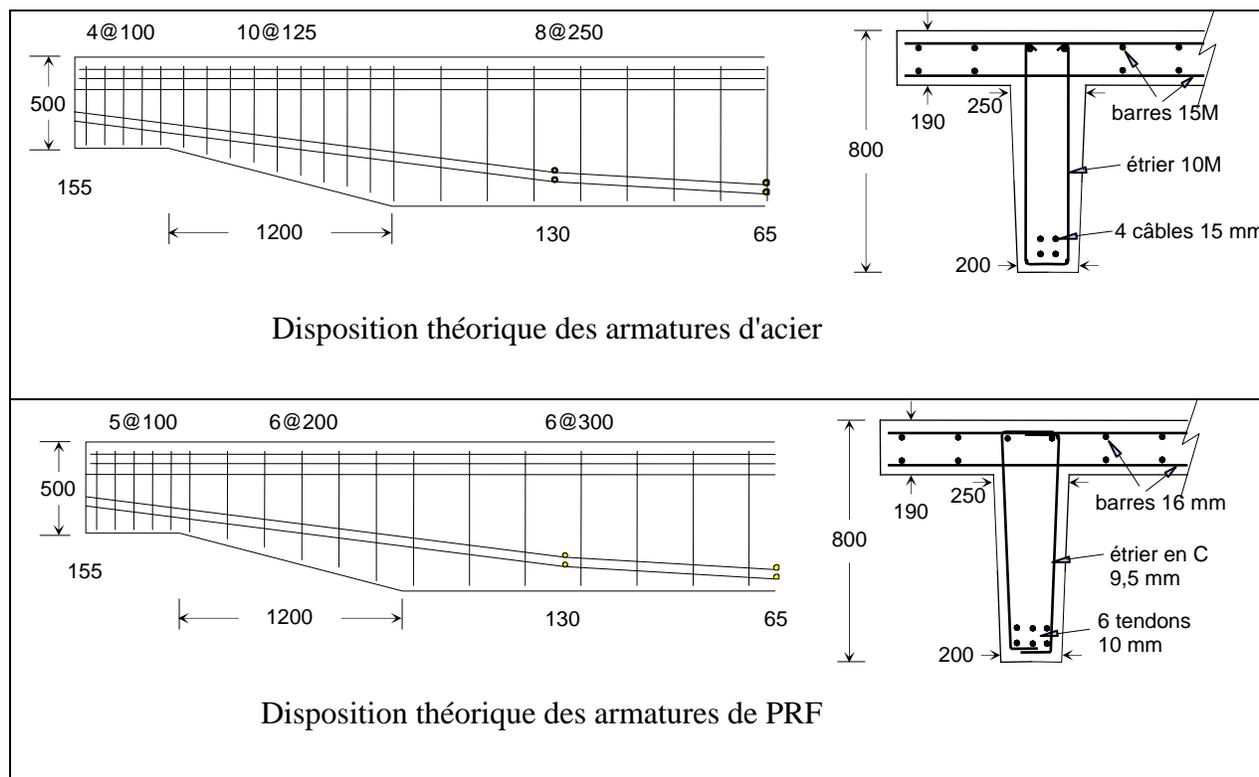


Figure 2 : Configuration théorique des éléments pleine grandeur

Pour de nombreuses raisons, les éléments fabriqués diffèrent du modèle théorique issu de la conception. La figure 3 présente une coupe transversale des quatre éléments expérimentaux. On note la présence d'armature passive de 16 mm, dont la fonction est de maintenir les étriers, dans les deux dalles de pont à double âme. L'addition de deux barres d'acier de 16 mm dans le bas des âmes augmente considérablement la résistance en flexion, contrairement à l'unique barre de 16 mm de PRFV par âme placée à 475 mm du bas. Ces barres ont été repositionnées dans la dalle pour les deux poutres en T.

Les difficultés avec les ancrages des tendons en PRFC ont non seulement causé la perte d'un tendon par âme de la dalle de pont, mais ont aussi causé une réduction de la précontrainte dans d'autres tendons. La précontrainte appliquée sur chaque câble ou tendon est indiquée à la figure 3. Une précontrainte de 0 kN indique que l'ancrage de ce tendon en PRFC a glissé, mais que ce dernier est demeuré en position sans être rompu. Afin de minimiser l'écart de précontrainte entre les poutres en T qui ont été construites dans un deuxième temps, celle armée de PRF a été fabriquée en premier. Par la suite, la précontrainte de la poutre en T armée d'acier a été ajustée à la même résultante totale.

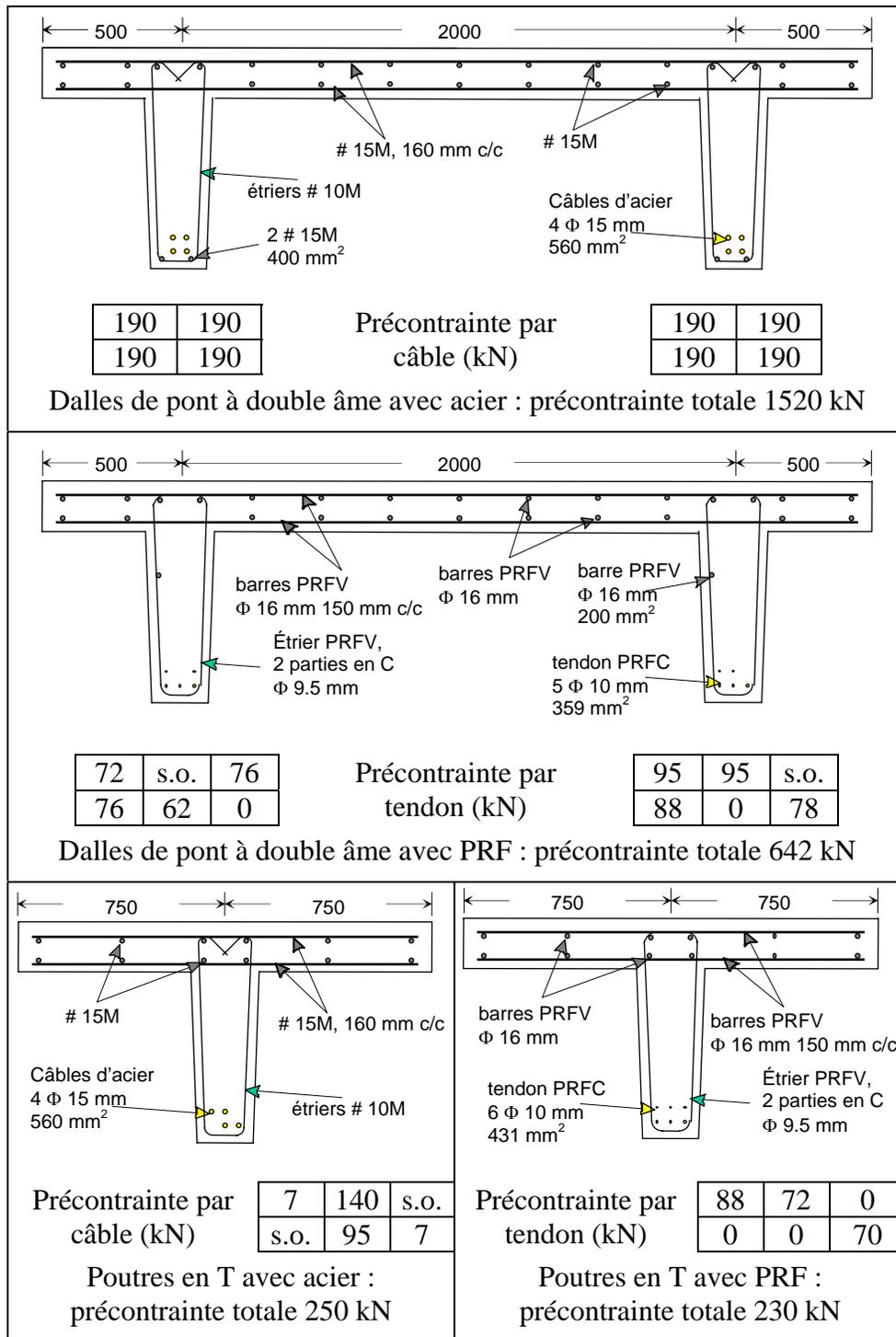
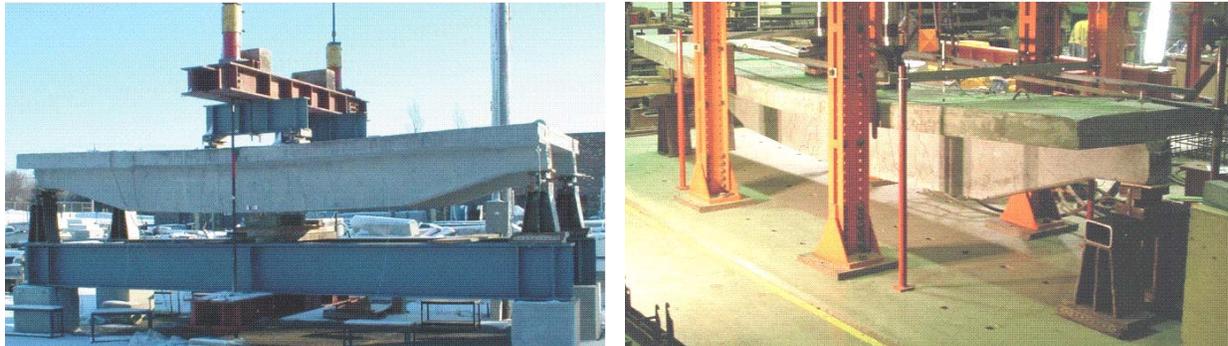


Figure 3 : Section et précontrainte des éléments expérimentaux

### Résultats des essais de chargement

Puisque la portée libre de ces éléments de pont est relativement courte, seulement 7,2 mètres, deux charges espacées longitudinalement de 1,2 mètres simulent le camion de conception QS-660 adapté aux ponceaux. Chacune de ces charges, alignées directement sur les âmes, est distribuée

sur une surface de 200x300 mm de manière à simuler une roue de camion. La figure 4 montre les deux montages utilisés pour charger les éléments pleine grandeur. Au cours des essais, les déplacements aux appuis et à la mi-portée sont tous mesurés par rapport au sol, pour ensuite calculer la flèche réelle de chacune des âmes.



Dalles de pont à double âme

Poutres en T, âme simple

Figure 4 : Montages de chargement

Les quatre éléments expérimentaux ont subi plusieurs chargements. Dans une première étape, la charge de fissuration est mesurée en plusieurs positions afin de déterminer le comportement en service. La zone de flexion maximale au centre, la zone d'effort tranchant maximal près d'un appui et une zone d'interaction au tiers de la portée ont été ainsi évaluées. Ces résultats sont présentés au tableau 1. On constate que le manque de précontrainte réduit considérablement les charges de fissuration pour la dalle de pont à double âme avec PRF. Ce tableau indique aussi la résistance en compression du béton au moment des essais pour chacun des éléments. La variabilité de la résistance en tension du béton, qui est liée à celle en compression, influence aussi le comportement en service.

Tableau 1 : Charge de fissuration des éléments pleine grandeur

Élément testé	Dalle avec acier	Dalle avec PRF	Poutre en T avec acier	Poutre en T avec PRF
Zone de flexion maximale (kN)	600	250	110	85
Zone d'interaction (kN)	680	280	non testée	110
Zone d'effort tranchant (kN)	950	420	200	195
Résistance ultime en flexion (kN)	1200	825	505	410
Résistance du béton (MPa)	74	31	58	44

La dernière étape du chargement consiste à mesurer la résistance ultime en flexion des éléments (Tableau 1). Notons qu'aux états limites ultimes, la variabilité de la résistance du béton influence surtout la résistance aux efforts tranchants, mais n'a que peu d'effet sur la résistance en flexion. La figure 5 montre l'évolution de la flèche en fonction de la charge totale appliquée jusqu'à

l'obtention d'un état ultime pour les quatre essais. La présence d'armatures d'acier passives supplémentaires ainsi que la perte de tendons en PRFC expliquent la différence marquée de résistance entre les dalles de pont à double âme. Les deux poutres en T affichent cependant un comportement similaire jusqu'à la rupture des tendons en PRFC sous une flèche de l'ordre 100 mm puisqu'elles ont la même précontrainte. On note que la flèche à la rupture de la dalle de pont à double âme armée de PRF est également de l'ordre de 100 mm, ce qui correspond à 1/72 de la portée. Même si la ductilité de l'acier permet de poursuivre le chargement au-delà de cette limite, le nombre et l'ouverture des fissures, supérieure à deux millimètres, indiquent que la capacité en flexion est dépassée.

Les difficultés rencontrées lors de la fabrication des éléments expérimentaux ont conduit à des résultats variés qui se comparent difficilement entre eux. Toutefois, la résistance ultime des sections telles que construites peut être évaluée avec une précision raisonnable à partir des spécifications de la norme CSA-S6-00. Finalement, la variété des configurations constitue un avantage pour la validation du modèle numérique qui sera élaboré au cours de la deuxième phase de cette étude.

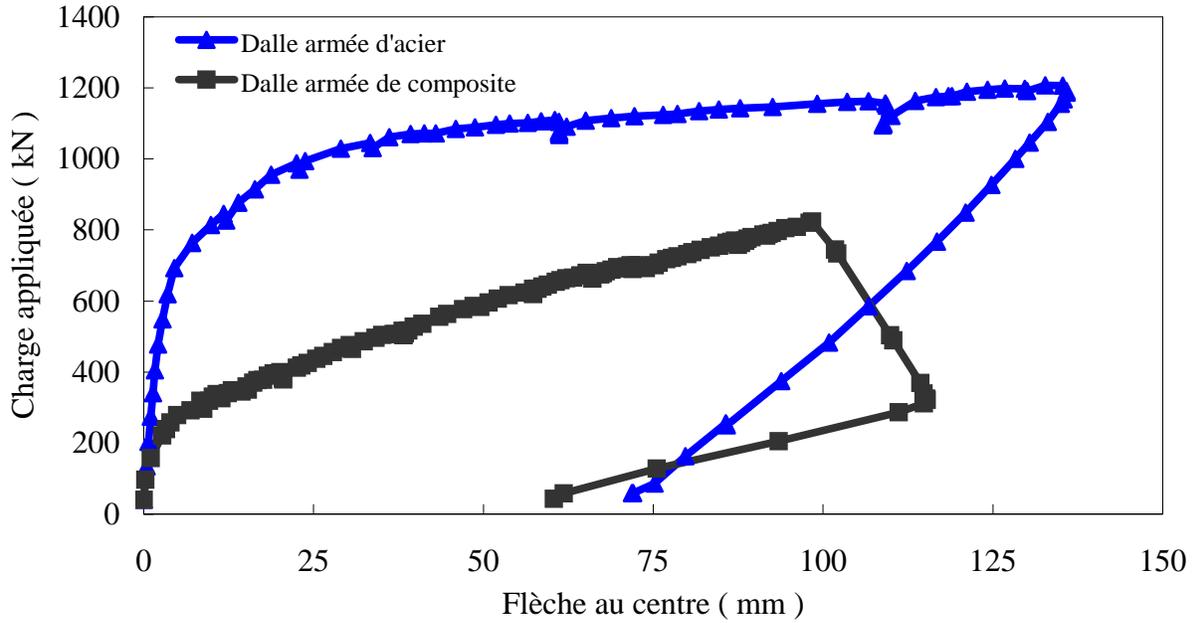
## CONCLUSIONS

Cette étude évalue le potentiel que possèdent les PRFC pour remplacer les armatures de précontrainte en acier. Le remplacement des câbles d'acier par des tendons en PRFC présente certains défis à cause de deux différences fondamentales des propriétés mécaniques de ces matériaux. Premièrement, les tendons en PRFC sont sensibles aux contraintes perpendiculaires à l'axe des fibres. Cette caractéristique rend difficile la mise au point d'un système d'ancrage mécanique fiable. Les modèles testés jusqu'à maintenant, composés d'un manchon à intérieur conique et de coins, ont bien performé lors des essais en laboratoire, mais ont glissé lors de l'utilisation en conditions de chantier. Les travaux se poursuivent sur cet aspect de l'étude.

Le comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture des PRFC, contrairement à l'acier qui peut supporter d'importantes déformations plastiques, constitue la deuxième grande différence entre ces matériaux. Cette absence de plasticité chez le PRFC se traduit par une ductilité réduite de l'élément en béton, bien que les fissures indiquent un désordre bien avant la rupture. Par ailleurs, les résultats des essais de chargement, réalisés sur des éléments de tablier de pont en béton précontraint préfabriqués pleine grandeur de 7,4 mètres de longueur, démontrent les bonnes performances du béton précontraint sans acier, tant pour le niveau de charge de service que pour la résistance ultime.

Cette étude expérimentale couvre trop peu de configurations pour émettre des recommandations pour la conception d'éléments de tablier de pont en béton précontraint sans acier. Pour combler cette lacune, un modèle numérique, calibré à partir de ces résultats, sera élaboré dans une deuxième phase de ce projet.

### Chargement jusqu'à la rupture des dalles de pont à double âme



### Chargement jusqu'à la rupture des poutres en T (âme simple)

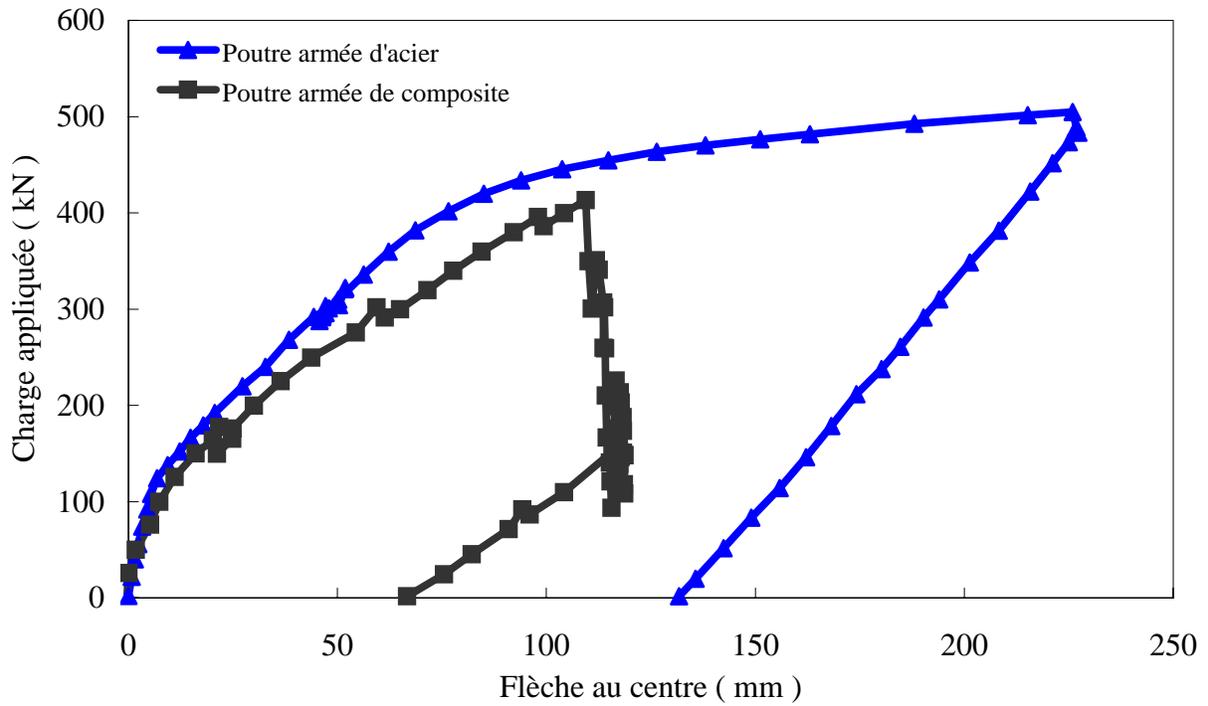


Figure 5 : Évolution de la flèche en fonction de la charge totale appliquée

## REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche est le résultat d'un partenariat entre SNC-Lavalin inc. et le Réseau de Centres d'excellence ISIS Canada, dont le support financier, logistique et technique de chacun est grandement apprécié.

## BIBLIOGRAPHIE

1. CAN/CSA-S6-00, 2000. "Canadian Highway Bridge Design Code", Association canadienne de normalisation, 734 p.
2. CAN/CSA-S806-02, 2002. "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers", Association canadienne de normalisation, 177 p.
3. Burke, C.R. et Dolan, C.W., 2001. "Flexural Design of Prestressed Concrete Beams Using FRP Tendons," *PCI Journal*, Vol. 46, No. 2, 76–87.
4. Reda Taha, M.M. et Shrive, N.G., 2003. "New Concrete Anchors for Carbon Fiber-Reinforced Polymer Post-Tensioning Tendons - Part 1: State-of-the-Art Review/Design," *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 1, 86–95.
5. Sayed-Ahmed, E.Y. et Shrive, N.G., 1998. "A New Steel Anchorage System for Post-Tensioning Applications Using Carbon Fiber Reinforced Plastic Tendons," *Revue canadienne de génie civil*, SCGC, Vol. 25, No. 1, 113–127.
6. Zaki, A.R. et Mailhot, G., 2002. "Deck Reconstruction of Jacques-Cartier Bridge Using Prefabricated HPC Panels", présenté au *The First fib Congress*, Osaka, Japon.