

CONCEPTION D'UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE TABLIERS DE PONTS EN BÉTON ARMÉ À L'AIDE D'ARMATURES EN MATÉRIAUX COMPOSITES

Brahim Benmokrane¹, Ehab El-Salakawy¹, Dominique Nadeau², Thomas Lackey³, et Marco Quirion⁴

¹ Chaire de recherche du CRSNG sur les renforcements en matériaux composites pour les structures en béton, ISIS-Sherbrooke, Département de génie civil, Faculté de génie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1

² Le Groupe Teknika inc., Sherbrooke, Québec

³ Vermont Agency Transportation, Montpelier, Vermont, USA

⁴ Roctest Ltée, St-Lambert, Québec

RÉSUMÉ: Cet article présente les détails de conception et de construction de trois ponts en béton récemment construits en Amérique du Nord en utilisant des barres d'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone et de fibres de verre pour le renforcement des dalles. Deux ponts, les ponts Wotton et Magog, ont été construits au Québec (Canada), alors que le troisième, le pont Morristown, a, quant à lui, été construit au Vermont (USA). Les trois ponts sont constitués de dalles en béton supportées par des poutres métalliques ou des poutres en béton précontraint avec des travées simples ou multiples de longueur variant de 26,2 à 43 m. L'épaisseur des dalles varie de 200 à 230 mm avec un espacement entre poutres de 2,30 à 2,85 m. Les dalles ont été armées à l'aide de différents types d'armature en matériaux composites (verre et carbone) et à l'aide d'armature d'acier. Aussi, les conditions d'utilisation de ces trois ponts sont différentes en termes de trafic et conditions environnementales (fréquence et utilisation de sels de déglacage). Les trois ponts ont été instrumenté à l'aide de capteurs à fibre optique à des endroits spécifiques pour mesurer les déformations et les températures. Des systèmes d'acquisition de données reliés à un modem ont été installés sur place pour permettre la télésurveillance à distance du comportement des ponts en service. Aussi, deux des trois ponts, les ponts Wotton et Magog) ont été testés pour évaluer leur comportement sous charges statiques et dynamiques en utilisant des camions à poids calibré comme spécifié dans le nouveau Code canadien pour le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-00, 2000. Des essais analogues sont prévus au cours de l'été 2003 sur le pont Morristown. La réalisation de ces ponts permet l'évaluation sur le terrain et à long terme de différents types de barres en matériaux composites utilisées comme armature pour le renforcement de la dalle du tablier ainsi qu'une comparaison directe avec des armatures en acier sous les mêmes conditions environnementales et de service. Les travaux de construction de ces trois ponts ainsi que les résultats d'essais de chargement démontrent que les dalles de tabliers de ponts en béton armé à l'aide d'armature en matériaux composites ont une très bonne performance.

INTRODUCTION

La corrosion de l'acier d'armature est la principale cause de détérioration des infrastructures en béton et constitue présentement un grand défi pour les propriétaires d'ouvrages publics et privés à travers le monde. À titre d'exemple, les infrastructures en béton des municipalités au Canada nécessitent plusieurs dizaines de milliards de dollars

pour leur remise à jour. Aussi, les tabliers de ponts en béton armé sont parmi les structures les plus exposées aux conditions favorisant la corrosion de l'armature d'acier, la fissuration du bitume et l'éclatement du béton. Des milliers de ponts en béton armé tant au Québec qu'en Amérique du Nord, sont déficients en raison de la corrosion de l'armature en acier et de la détérioration du béton, accentuée par les conditions climatiques agressives et l'usage des sels de déglacage. Le ministère des Transports du Québec consacre près de la moitié de son budget pour la réfection de ses ouvrages en béton armé; c'est un problème énorme. De plus, les tabliers de ponts constituent les éléments pour lesquels l'endommagement dû à la corrosion des armatures est le plus coûteux, tant par les coûts directs d'auscultation, de réfection ou de remplacement, que par les coûts indirects reliés à la perturbation du trafic lorsque des interventions sont nécessaires. On a qu'à penser à l'autoroute Décarie à Montréal et la réfection ou la reconstruction de la quarantaine de ponts qui se trouvent au-dessus.

L'utilisation de béton à faible perméabilité, l'augmentation de l'enrobage de béton, le traitement des surfaces extérieures du béton à l'aide de silanes, la protection cathodique des armatures en acier, le revêtement de l'acier d'armature à l'aide d'une couche de résine d'époxyde, la galvanisation de l'acier sont les principales techniques qui ont été considérées en pratique pour retarder la corrosion de l'acier et l'éclatement du béton. Cependant, ces matériaux et techniques se sont avérés inefficaces, surtout dans le cas de structures exposées à des environnements particulièrement agressifs, tels que les tabliers de ponts, les stationnements étagés et les constructions côtières dans les régions nordiques où l'on a souvent recours à l'utilisation de sel et de produits de déglacage.

SOLUTION INNOVATRICE OU NOUVELLE TECHNOLOGIE PROPOSÉE

Afin d'éliminer la source du problème qui est la corrosion, des organismes gouvernementaux, des industriels et des chercheurs universitaires se sont alliés pour trouver une solution durable qui allongera la durée de vie des structures en béton armé, et qui permettra d'éliminer, en partie ou en totalité, les coûts de réparation sans cesse croissants. Cette solution, qui constitue d'ailleurs un sujet d'actualité dans de nombreux pays industrialisés, consiste en l'utilisation de la nouvelle technologie d'armature à béton en matériaux composites à base de polymère renforcé de fibres (PRF). Les armatures en PRF sont constituées de fibres continues (tels le carbone, le verre ou l'aramide) noyées dans une résine polymérique à haute performance. Ces matériaux composites en PRF, légers et de haute résistance, se caractérisent par une grande immunité contre la corrosion, une longue durée de vie et une réduction des coûts liés à l'entretien. L'armature en matériaux composites peut donc constituer une solution très avantageuse pour les tabliers de ponts (dalles et poutres). Ces nouvelles armatures à béton font maintenant l'objet d'une nouvelle Section (Section 16) dans le nouveau Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-00, 2000). Aussi, en dépit de leur arrivée récente dans le domaine du génie de la construction, les structures de béton armé de PRF sont de plus en plus acceptées comme étant des technologies novatrices et économiques. Le Québec possède présentement l'un des plus grands centres de recherche au monde dans ce domaine au département de génie civil de l'Université de Sherbrooke.

Cet article présente les détails de calcul et de construction de trois ponts en béton récemment construits en Amérique du Nord (Québec, Vermont) et pour lesquels de

l'armature en matériaux composite a été utilisée pour le renforcement des dalles. Des résultats d'essais de chargement statique effectués sur deux ponts sont aussi décrits.

OBJECTIFS DE CES PROJETS DE PONTS DE DÉMONSTRATION

Les objectifs de ces projet de ponts de démonstration sont :

- 1) Optimiser les méthodes de calcul et d'installation de l'armature en matériaux composites dans les tabliers de ponts..
- 2) Évaluer le comportement à court et à long terme de l'armature en PRF sous différentes conditions de charge de service et différentes conditions environnementales et effectuer une comparaison directe avec les armatures en acier
- 3) Définir une stratégie d'instrumentation à l'aide de capteurs à fibre optique pour les futurs projets de construction de ponts
- 4) Améliorer et valider les méthodes de design et les codes de calcul tel que le nouveau Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-00, 2000)

CONCEPTION DES DALLES DES TABLIERS DE PONTS EN BÉTON ARMÉ D'ARMATURE DE PRF

Un béton normal de résistance en compression de 27 à 50 MPa a été utilisé. Des barres d'armature Isorod à base de fibres de verre et de fibres de carbone sont utilisées pour le renforcement des dalles des trois ponts. Les propriétés de ces barres sont données dans le Tableau 1. Des études approfondies sur l'amélioration des propriétés de ces barres (ou le développement de nouvelles barres en PRF) ont été menées au cours des trois dernières années au Département de génie civil de l'Université de Sherbrooke dans le cadre des travaux de recherche de la Chaire du CRSNG sur les renforcements en matériaux composites pour les structures en béton (Benmokrane et al., 2002).

Le calcul des dalles des deux ponts construits au Québec (ponts Wotton et Magog) a été fait conformément à la Section 8.18 (méthode de calcul en flexion) et à la Clause 16.8.7 (transformation de l'armature d'acier en armature de PRF) du nouveau Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-00, 2000).

Le calcul de la dalle du pont Morristown (Vermont USA) a été fait conformément aux spécifications du Code AASHTO et au recommandations de calcul données dans le document de l'ACI (ACI 440.1R-01, 2001).

Le calcul des dalles des trois ponts a été vérifié en laboratoire à l'aide d'essais de flexion effectués sur plusieurs dalles en béton armé à l'aide d'armature en PRF (Benmokrane et El-Salakawy, 2002). Aussi, le comportement de ces dalles testées en laboratoire a été comparé à celui de dalles analogues mais armées d'acier.

DÉTAILS DE CONSTRUCTION DES PONTS

Instrumentation des ponts

Les trois ponts ont été instrumentés de façon analogue à l'aide de capteurs à fibre optique à des endroits spécifiques pour mesurer les déformations et les températures, comme montré à la Figure 1. Des systèmes d'acquisition de données reliés à un modem ont été installés sur place pour permettre la télésurveillance à distance du comportement des ponts en service.

Aussi, pendant les essais de chargement statique et dynamique, les déflexions de la dalle et des poutres des ponts ont été mesurés en utilisant un système de règles et de théodolites.

Installation des barres d'armature en PRF

Les entrepreneurs assignés à construction de ces trois ponts ont réagi très positivement quant à l'installation des armatures en matériaux composites de PRF. La légèreté de ces barres rend les opérations de manutention et d'installation des barres très simples et aisées. Des supports en plastique ont été placés à tous les 0.9 m pour maintenir l'enrobage de béton à la valeur prescrite.

Pont Wotton

Le pont Wotton se situe sur le chemin du 6^e Rang Ouest, au-dessus de la rivière Nicolet-Centre à Wotton (Québec). C'est un pont biais en béton à une seule travée d'une longueur totale de 30,60 m et d'une largeur de 8,90 m. La dalle du tablier a une épaisseur de 200 mm et repose sur quatre poutres en béton précontraint AASHTO de type IV avec un espacement entre poutres de 2,3 m et un porte-à-faux de 1 m de chaque côté du tablier. L'armature en matériaux composites a été utilisée dans la moitié de la dalle du pont pour la nappe supérieure et sur une longueur de cinq mètres pour la nappe inférieure. De l'armature à base de fibre de verre (No 16 – 15,9 mm) a été utilisée dans toutes les directions excepté dans la direction transversale de la nappe inférieure où de l'armature à base de fibre de carbone (No 10 – 9,5 mm) a été utilisée. Le reste de la dalle du tablier du pont a été armé avec de l'armature en acier de 15M (Figure 2). Il est également à noter que de l'armature droite et courbe en matériaux composites à base de fibre de verre (No 16 – 15,9 mm) a été utilisée pour le renforcement du béton du chasse-roue sur une longueur correspondant à la moitié du pont; l'autre moitié du chasse-roue a été armé avec de l'armature conventionnelle en acier. L'armature en matériaux composites (en fibres de verre et de carbone) utilisée dans ce projet est produite par une compagnie québécoise (Pultrall, Inc., Thetford Mines). Un béton normal (type V MTQ) avec une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 37 MPa a été utilisé pour la dalle du tablier du pont.

Pont Magog

Le pont Magog est situé sur l'autoroute 55 Nord au-dessus de la rivière Magog proche de la frontière Canada-Etats-Unis. C'est un pont à trois travées d'une longueur totale de 84 m et d'une largeur de 14,1 m. La dalle du tablier a une épaisseur de 200 mm et repose sur cinq poutres en acier avec un espacement de 2,85 m et un porte-à-faux de 1,35 m de chaque portée. La dalle d'une travée de rive de 26,5 m a été entièrement armée de barres en PRF Isorod tant pour le lit supérieur que pour le lit inférieur (Figure 3). Les deux autres travées du pont ont été armées d'armature en acier galvanisé. La figure 4 montre le bétonnage de la dalle.

Pont Morrystown

Le pont Morrystown est situé sur la Route 100 au-dessus de la rivière Ryder Brook à la sortie de la ville Morrystown dans l'état du Vermont (Etats-Unis). C'est un pont à une travée à culées intégrales d'une longueur totale de 43 m et d'une largeur de 11,3 m. La dalle du tablier a une épaisseur de 228,6 mm et repose sur cinq poutres en acier avec un espacement entre les poutres de 2,4 m et un porte-à-faux de 0,92 m de chaque côté. La dalle

du tablier a été entièrement armée à l'aide d'armature Isorod en fibre de verre. L'armature du lit supérieur est identique à l'armature du lit inférieur et a la configuration suivante : 19 M @ 100 et 150 mm dans la direction principale et secondaire , respectivement (Figure 5). Ce pont constitue le premier pont au monde dont la dalle est entièrement armée d'armature en matériaux composites à base de fibre de verre (Figure 6).

Essais de chargement statique

Des essais de chargement statique à l'aide de camions à poids calibré conformément au nouveau Code canadien sur le calcul des ponts routiers (charge par essieu) ont été effectués sur les deux ponts au Québec (ponts Wotton et Magog) (voir Figures 7 et 8). Quelques résultats obtenus sont donnés dans les figures 9 à 15. Plus de détails et d'analyses de ces résultats d'essais seront présentés lors de la communication orale durant le colloque.

CONCLUSIONS

Sur la base des étapes de construction du pont et des résultats des essais de chargement, on peut émettre les conclusions suivantes :

1. Aucun problème de manutention ou de placement relié à l'utilisation des barres en matériaux composites de PRF durant la construction du pont n'a été signalé
2. La performance des barres en PRF est très similaire à celle des barres en acier.
3. Les déformations en traction dans le béton sur la surface supérieure atteignent un maximum de 10 à 25 $\mu\epsilon$. Ces valeurs sont bien au-dessous de la déformation à la fissuration du béton (100 à 125 $\mu\epsilon$ pour les bétons utilisés)
4. Durant les essais statiques, la déformation en traction maximum dans les barres en PRF était de 15 $\mu\epsilon$. Cette valeur représente moins de 0,12% de la déformation ultime du matériau
5. La déflexion du tablier du pont reste inférieure aux limites permises par le Code.

RÉFÉRENCES

1. Humar, J. and Razaqpur, G. (editors), "Advanced Composite Materials in Bridges and Structures", Proceeding of the 3rd International Conference, Ottawa, Ontario, Canada, 2000, 876 p.
2. Rizkalla, S., and Tadros, G., "First Smart Bridge in Canada", ACI Concrete International, Vol. 16, No. 6, 1994, pp. 42-44.
3. CAN/CSA-S6-00, "Canadian Highway Bridge Design Code", Canadian Standard Association, Rexdale, Toronto, Ontario, Canada, 2000, 734 p.
4. CSA S806-02, "Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers", Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 2002, 192p.
5. ISIS-M03-01, "Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers", The Canadian Network of Centres of Excellence, ISIS Canada, University of Winnipeg, Manitoba, 2001, 81 p.
6. ACI 440.1R-01, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2001, 41p.
7. Pultrall Inc., "ISOROD Composite Reinforcing Rod", Technical Sheets, Thetford Mines, Quebec, 2000, 7 p.

8. Benmokrane, B., Zhang, B., Laoubi, K., Tighiouart, B. and Lord, I., "Mechanical and Bond Properties of New Generation of CFRP Reinforcing Bars for Concrete Structures", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 2, 2002, pp. 338-343.
9. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridges", 16th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1996.
10. Benmokrane, B. and El-Salakawy, E. F., "Construction, Design, and Monitoring of a Bridge Deck Reinforced with FRP Bars: Wotton Bridge," *Proceedings, 1st International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures*, Winnipeg, Manitoba, Sept. 19-20, 2002, pp. 175-184.



Fig. 1 Instrumentation à l'aide de capteurs à fibre optique



Fig. 2 Armature du pont Wotton



Fig. 3 Pont Magog



Fig. 4 Bétonnage de la dalle du pont Magog



Fig. 5 Bétonnage de la dalle du pont Morristown



Fig. 6 Vue du pont Morristown



(a) Pont Wotton



(b) Pont Magog

Fig.7 Essais de chargement sur le pont à l'aide de camions

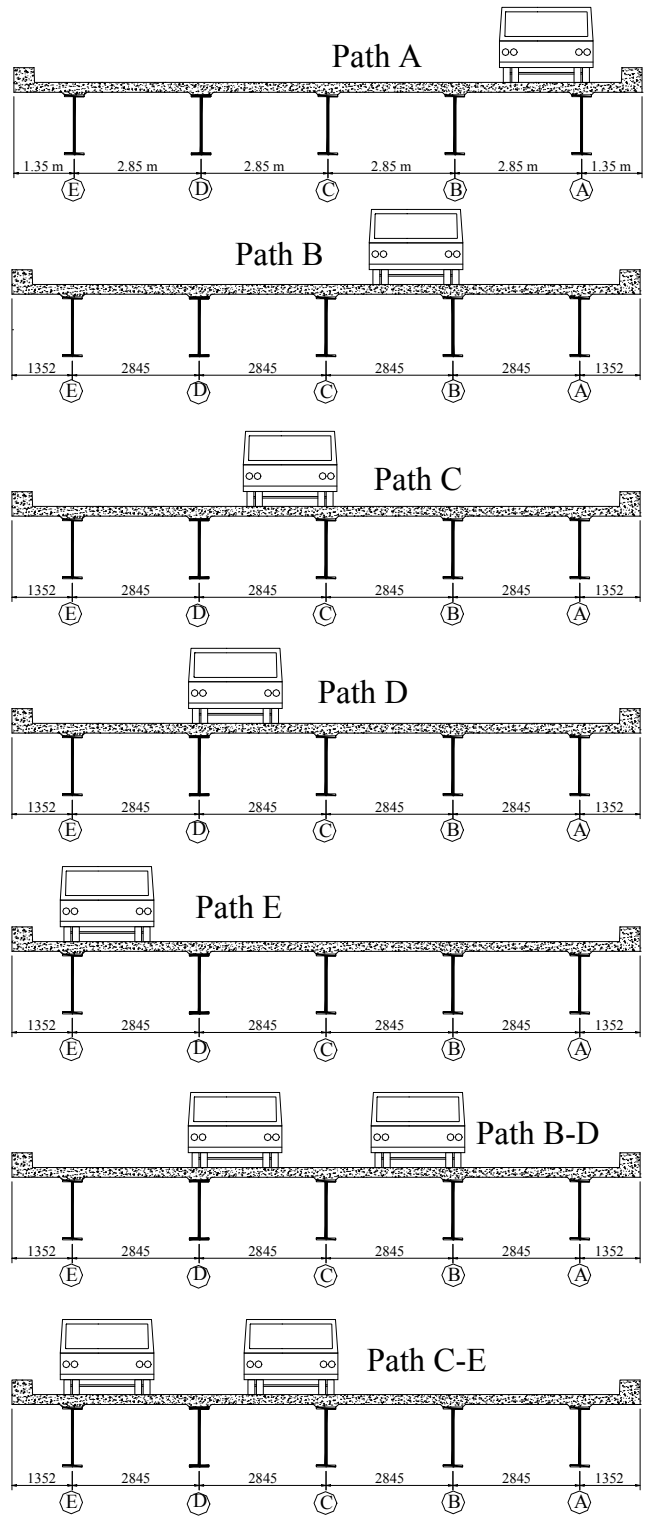


Fig. 8 Cheminements des camions lors des essais de chargement statique sur le pont
Magog

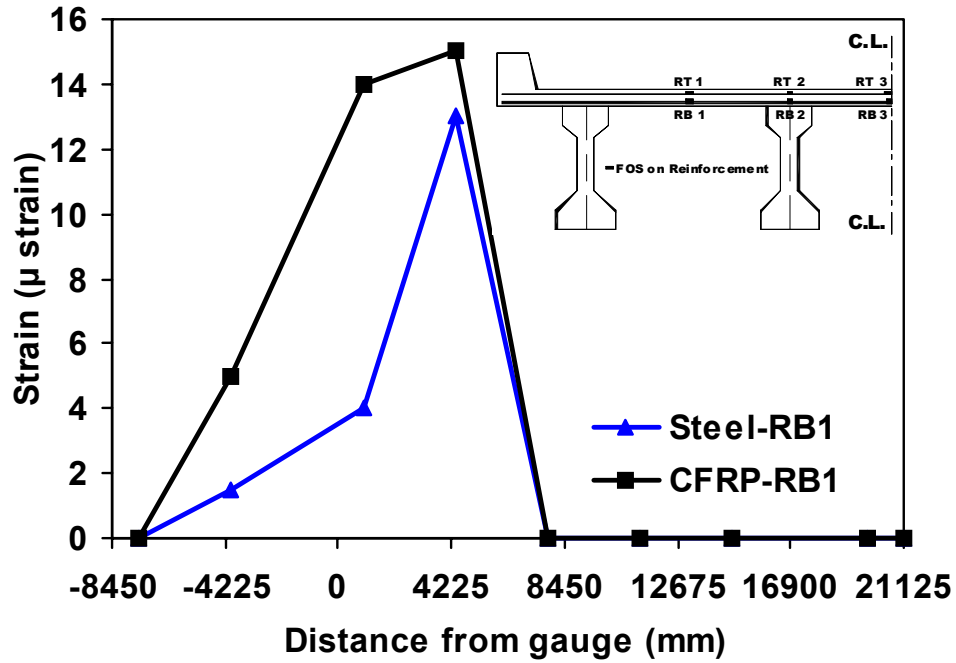


Fig. 9 Déformation en traction maximum dans les armatures du lit inférieur (pont Wotton)

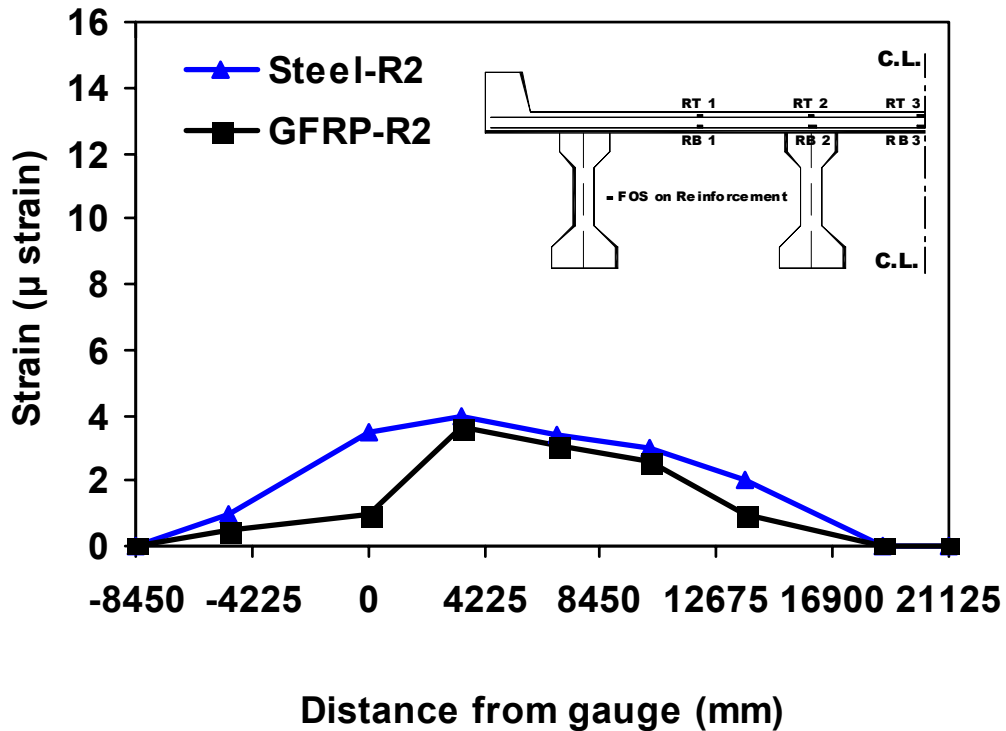


Fig. 10. Déformation en traction maximum dans les armatures du lit supérieur (pont Wotton)

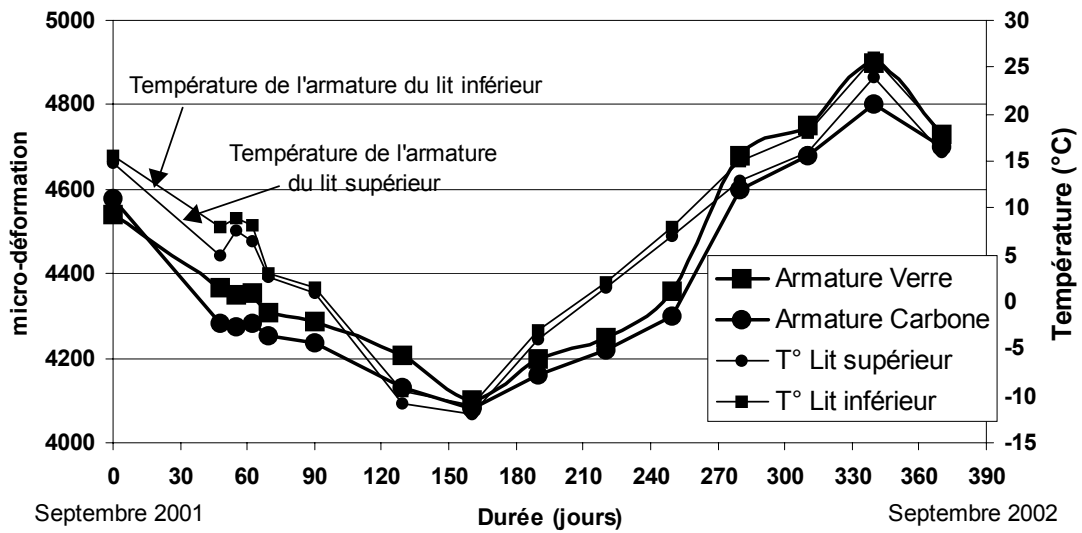


Fig. 11 Variation des déformations sous conditions de service (pont Wotton)

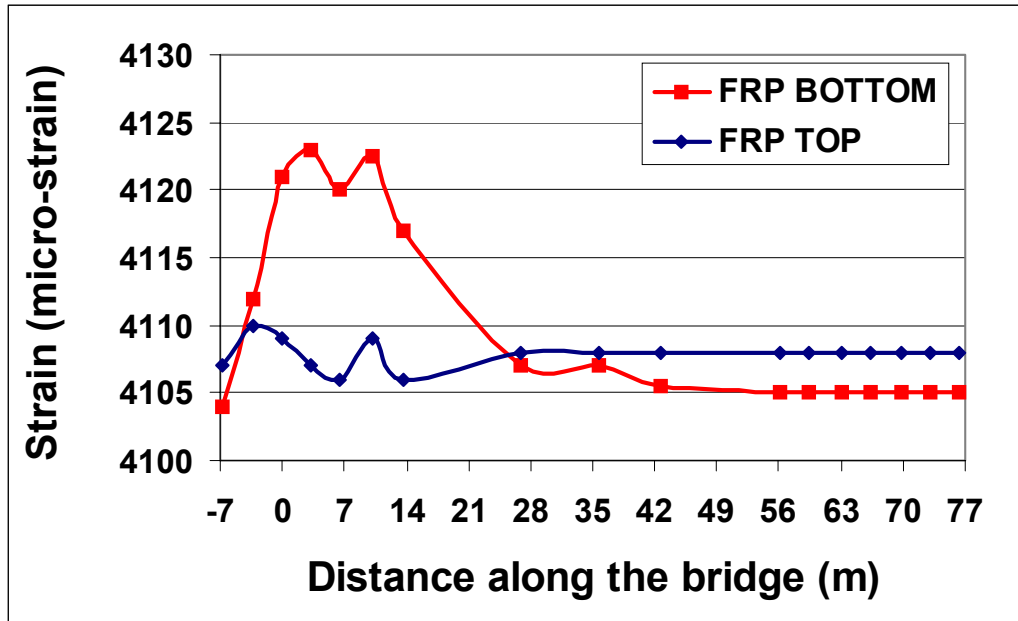


Fig. 12. Déformation en traction maximum dans les armatures en PRF (pont Magog - Un camion et remorque - Path C)

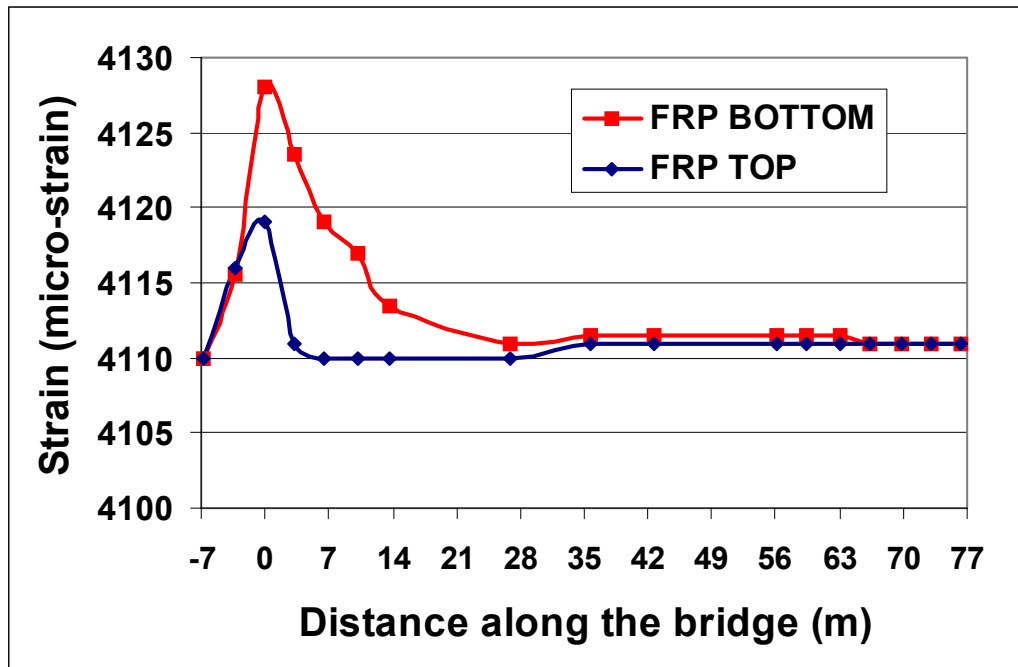


Fig. 13. Déformation en traction maximum dans les armatures en PRF (pont Magog - Deux camions - Path C-E)

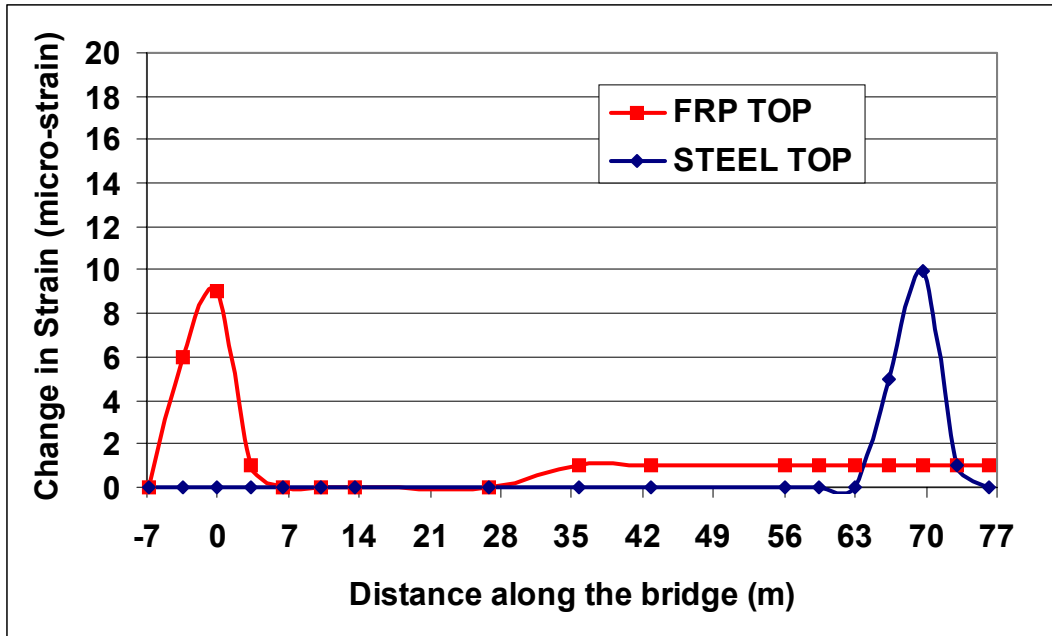


Fig. 14. Comparison entre les déformations armature PRF vs armature d'acier (Lit d'armature supérieur - Deux camions - Path C-E)

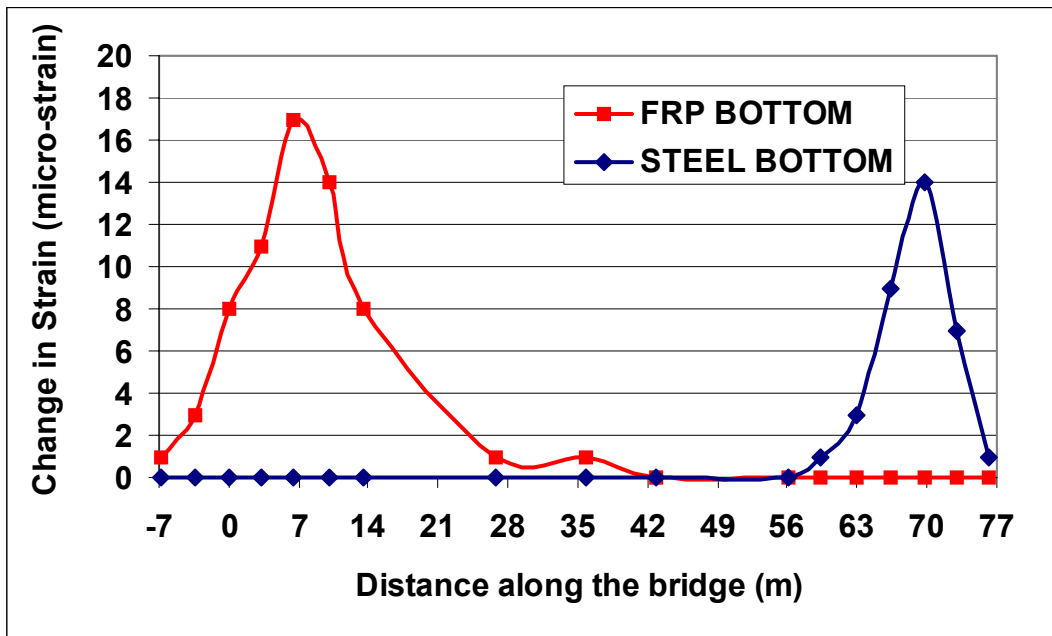


Fig. 15 Comparison entre les déformations armature PRF vs armature d'acier (Lit d'armature inférieur - Deux camions - Path C-E)