

Chemisage de poutres en béton précontraint au moyen de polymères renforcés de fibres de verre

M. DEMERS et P. LABOSSIÈRE

Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada
et **D. BÉRUBÉ**

Direction des structures, Ministère des Transports du Québec, Québec, Québec, Canada

Résumé

Le MTQ est propriétaire de nombreuses structures dont des ponts avec des poutres préfabriquées en béton précontraint par prétension qui présentent un délaminage superficiel localisé du béton. Bien que la résistance de ces poutres demeure adéquate, il importe cependant de prévenir la chute de fragments de béton pour assurer la sécurité du public circulant sous ces ouvrages. Un programme expérimental actuellement en cours vise à optimiser une méthode de chemisage de poutres en béton précontraint de type AASHTO à l'aide de matériaux composites. Le but d'un tel chemisage est de prévenir la chute de fragments de béton provoquée par la corrosion des étriers d'acier localisé trop près de la surface. Les essais sont effectués sur des segments de poutres de 1,8 mètres de longueur prélevés sur une structure démolie après environ 40 ans de service. En plus d'étudier la charge que peut soutenir un chemisage en matériaux composites, le programme d'essais explore la durabilité du chemisage ainsi que diverses préparations de surfaces afin de réduire les coûts. Les travaux réalisés à ce jour démontrent clairement que de tels chemisages offrent une résistance mécanique plus que suffisante, et les résultats disponibles tendent à confirmer la durabilité des réparations effectuées avec des matériaux composites.

INTRODUCTION

Dans le but de résoudre les problèmes causés par le vieillissement des structures, il semble avantageux d'envisager des méthodes innovatrices de réparation pour un certain nombre d'ouvrages. L'utilisation de matériaux composites mérite d'être prise en considération car cette solution peut, dans certains cas, permettre la réalisation de travaux de réparation d'une manière plus rapide et plus efficace qu'avec les méthodes conventionnelles. La problématique abordée dans ce projet a été identifiée à l'origine par le ministère des Transports du Québec, et serait particulièrement présente au sein d'une série de viaducs qui franchissent l'autoroute Décarie à Montréal. Il s'agit d'ouvrages dont l'intégrité générale a été bien préservée, et pour lesquels il n'est pas nécessaire d'augmenter la capacité portante ni les charges admissibles de véhicules. On observe cependant que la corrosion des étriers des poutres en béton précontraint provoque un délaminage localisé du béton, et ce, généralement à la semelle inférieure des poutres. Il s'agit d'une couche superficielle atteignant environ 25 mm d'épaisseur au droit de l'étrier et s'étendant de 100 à 200 mm de chaque côté de ce dernier (Fig. 1). Comme la chute occasionnelle de petits morceaux de béton a des incidences sur le trafic routier des autoroutes, la résolution de ce problème est importante pour le MTQ.

Le présent projet de recherche vise à déterminer dans quelle mesure des matériaux composites peuvent servir à effectuer des chemisages préventifs sur des ouvrages affectés par le problème décrit. À cette fin, des sections de la semelle inférieure des poutres d'un viaduc de l'autoroute Décarie, démoli en août 2001, ont été découpées puis chemisées à l'aide de divers polymères renforcés de fibres de verre (PRF). La résistance du chemisage a par la suite été mesurée dans les

laboratoires de l'Université de Sherbrooke en effectuant des essais d'arrachement. De plus, la durabilité de ces chemisages a été évaluée en faisant subir de nombreux cycles de gel-dégel à certains échantillons avant d'en mesurer la résistance résiduelle.

Projet de recherche

À la suite de discussions entre le ministère des Transports du Québec et l'Université de Sherbrooke, le programme expérimental a été établi en tenant compte des objectifs suivants :

- déterminer si des lamelles, feuilles ou stratifiés de PRF peuvent retenir les fragments de béton qui se détachent des poutres en béton précontraint à cause de la corrosion des étriers en acier;
- établir la configuration de PRF la plus économique possible pour ce rôle, en tenant compte des propriétés des matériaux, de la préparation de surface et de main d'oeuvre; et
- étudier la durabilité de ces réparations sous les conditions climatiques particulières au Québec, en tenant spécialement compte de leur comportement à la suite d'un nombre significatif de cycles de gel-dégel.

Les échantillons utilisés dans la réalisation de cette étude expérimentale sont des segments de semelles inférieures de trois poutres récupérées lors du remplacement du viaduc Édouard-Montpetit de l'autoroute Décarie de Montréal. Après une quarantaine d'années de service dans des conditions environnementales difficiles, le béton de ces poutres affiche une résistance en compression de 55 MPa. Des segments réguliers d'une longueur de 1,8 m, prélevés sur ces poutres, ont été employés pour étudier les paramètres principaux de l'étude. Des contraintes sur le poids et les dimensions maximums des échantillons soumis à des cycles de gel-dégel ont conduit à l'emploi de segments de plus petite taille pour ce type de vieillissement. Ces segments courts ont une longueur de 0,6 m et sont obtenus en sciant longitudinalement la semelle de la poutre précontrainte (Fig. 2).

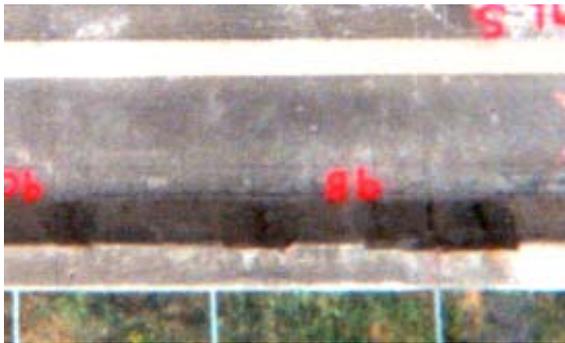


Figure 1 : Délaminage superficiel au droit des étriers



Figure 2 : Segments courts avec chemisage

Le coût et la disponibilité des produits de PRF ont été les facteurs décisifs lors de la sélection des matériaux employés pour cette étude. Puisqu'il est impossible d'étudier toutes les possibilités d'un marché où le nombre de produits va en augmentant, il a été décidé de réaliser les essais en utilisant des trois systèmes de PRF suivants :

1. Le système Fibrwrap, constitué du tissu de fibres de verre SEH51 (925 g/m^2) et de la résine époxy Tyfo S (liquide), fabriqué par Fyfe Co. LLC.

2. Le système SikaWrap, constitué du tissu de fibres de verre SikaWrap 100G (915 g/m²) et de la résine époxy Sikadur Hex 300 (liquide), que le fabricant Sika Canada inc. a cessé de recommander au cours de l'avancement des travaux.
3. Le nouveau système SikaWrap, constitué du tissu de fibres de verre SikaWrap 430G (430 g/m²) et de la résine époxy Sikadur 330 (pâte), fabriqué par Sika Canada inc. Des essais supplémentaires ont été nécessaires afin d'étudier ce système qui a remplacé le précédent.

En plus des trois systèmes de PRF, le principal paramètre étudié est la préparation de la surface du béton avant le collage du chemisage. À l'origine du projet, il avait été convenu de réduire au minimum la préparation de surface afin de réduire le coût et la durée des travaux en chantier. Les premiers essais ayant produit des résultats inacceptables, il a été décidé de préparer les surfaces de béton selon les directives standards pour la pose de matériaux composites (Fig. 3). Puisqu'un nettoyage des surfaces de béton au jet d'eau sous pression est moins polluant pour les riverains qu'un jet de sable, qui est habituellement employé, ces deux options ont été étudiées. Quatre préparations de surfaces ont finalement été étudiées au cours du projet de recherche, à savoir :

1. Le nettoyage au jet de sable sans correction du profil.
2. Le nettoyage au jet d'eau sous pression sans correction du profil.
3. La préparation de la surface au jet de sable suivi d'une correction du profil avec un mortier de réparation.
4. La préparation de la surface au jet d'eau sous pression suivi d'une correction du profil avec un mortier de réparation.

Finalement, l'effet des vibrations au cours de la cure de la résine du chemisage est le dernier paramètre étudié afin d'évaluer la possibilité d'autoriser la circulation durant les travaux de chemisage d'une poutre.



Figure 3 : Segment régulier préparé pour le chemisage

L'imposition de cycles de gel-dégel est le type de vieillissement accéléré retenu pour étudier la durabilité dans le cadre de ce projet de recherche. Un cycle type consiste en une période de 16 heures dans l'air d'un congélateur réglé à -20 °C suivi d'une période de 8 heures à la température ambiante du laboratoire dans un bassin d'eau. L'eau utilisée pour la partie dégel du cycle est conservée en permanence dans le laboratoire, mais elle n'est pas chauffée pour en contrôler la température. Les cycles de gel-dégel ont été effectués dans les laboratoires de l'Université Queen's à Kingston, membre du Réseau de Centres d'excellence d'ISIS Canada. Pour des considérations esthétiques et pour la protection des PRF contre le rayonnement ultraviolet, un enduit de surface doit être appliqué sur les chemisages en chantier. En

conséquence, l'effet d'un enduit de surface, le Tex-Cote XL-70 Bridge-cote de Solhydroc inc., est inclus à l'étude de la durabilité.

Le programme expérimental du projet comprend 11 essais sur des segments réguliers de 1,8 m et 14 essais sur des segments courts de 0,6 m. Quatre segments courts ont dû être réutilisés à cause de l'ajout d'un troisième système de PRF en cours de projet. À ces 25 essais s'ajoutent trois essais préparatoires successifs sur un même segment court, lesquels ont permis de valider à la fois l'orientation des fibres de verre, le montage d'essai et l'instrumentation requise.

Résultats des essais

Le principal test effectué sur les échantillons consiste à mesurer la force d'arrachement, appliquée sous la semelle inférieure de la poutre, que peut supporter le chemisage en PRF de verre. Afin d'exercer une charge à l'intérieur de l'enveloppe en PRF, une plaque d'acier de 9,5 mm d'épaisseur a été ajoutée entre le béton et l'enveloppe en PRF au moment du chemisage des échantillons. Les côtés des plaques ont été chanfreinés à 45°, de manière à prolonger la géométrie de la section de béton. La longueur du chemisage en PRF correspond à la longueur de la plaque d'acier, soit 1300 mm pour les segments réguliers et 300 mm pour les segments courts. Les fibres de verre du chemisage sont orientées perpendiculairement à l'axe longitudinal de la poutre de manière à exploiter au mieux la grande résistance en tension du PRF. Un polythène a été installé entre cette plaque d'acier et le béton afin d'éliminer toute adhésion à cet endroit et de mesurer la charge réelle soutenue par le chemisage en PRF.

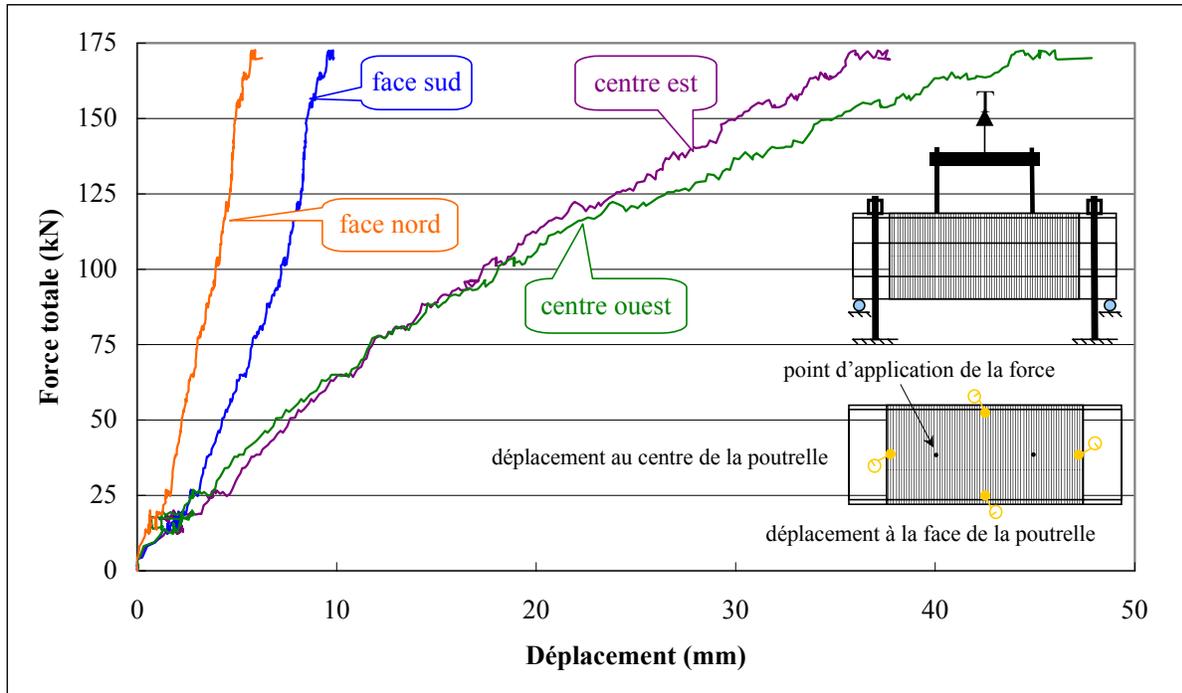


Figure 4 : Courbe force-déplacements typique

La figure 4 présente un résultat typique de la force d'arrachement appliquée sur la plaque d'acier en fonction du déplacement mesuré au centre des quatre bordures de cette plaque. On y observe

que les déplacements au centre de la semelle sont beaucoup plus grands que près des faces latérales, parce que la plaque d'acier a fléchi dans l'axe transversal de l'échantillon. Ce fléchissement qui est facilement observable indique une ductilité appréciable du chemisage. La charge maximale supportée par le chemisage de ce segment régulier, qui atteint près de 175 kN, est 350 fois plus grande que le poids d'une couche de béton de 25 mm d'épaisseur couvrant une surface de 1300 x 660 mm, soit 0,5 kN.

Deux types de rupture du chemisage ont été observés lors des essais. Le premier est amorcé par le décollement du PRF depuis le chanfrein jusqu'à l'âme de la poutre et est généralement accompagné de la rupture localisée des fibres (Fig. 5). Le second type de rupture est observé lorsque les fibres du chemisage sont coupées par l'arête vive du chanfrein à 45° de la plaque d'acier (Fig. 6). Le premier mode de rupture est évité par un collage adéquat du chemisage, tandis que le second est atténué en chantier par l'arrondissement des angles du béton.



Figure 5 : Rupture par décollement du chemisage en PRF



Figure 6 : Rupture du chemisage sur l'arête de la plaque d'acier

Le tableau 1 regroupe les caractéristiques et les principaux résultats des différents paramètres étudiés sur les segments réguliers. Les numéros du système de PRF et de la préparation de la surface de béton indiqués dans ce tableau font référence aux descriptions citées précédemment. Les observations sur les 11 essais effectués sur les segments réguliers de 1,8 m de longueur sont divisées en quatre groupes.

- Les quatre segments réguliers du groupe 1 ont démontré que le profil des surfaces de béton doit impérativement être corrigé afin que le chemisage puisse y être appliqué sans laisser d'espace vide entre le béton et le PRF. Initialement, il était prévu de minimiser la préparation des surfaces afin de réduire le coût et la durée des travaux en chantier. Ces segments ont aussi mis en évidence le fait que la résine très fluide Sikadur 300 ne convient absolument pas pour cet usage, puisque la surface des vides dépasse 50 %. Les segments réguliers du groupe 1 ont finalement démontré qu'un chemisage convenablement installé offre une résistance plus que suffisante pour retenir des fragments de béton, et qu'il peut accommoder un gonflement que des inspecteurs peuvent déceler.
- Les trois segments réguliers du groupe 2 ont servi de référence pour les nouveaux matériaux recommandés par Sika Canada. Ils ont démontré que la nouvelle résine permet d'installer convenablement un chemisage en PRF et, par la même occasion, d'éviter tout décollement lors des essais d'arrachement. Ils démontrent aussi qu'une correction du profil de béton permet d'éliminer les vides sous le chemisage. Par contre, on constate que la plaque d'acier, insérée entre le PRF et le béton pour appliquer la charge, amorce systématiquement la rupture sur ses

arêtes vives. Il est donc recommandé d'arrondir les angles des chanfreins des poutres à chemiser lors des travaux en chantier afin d'atténuer le risque de ce type de rupture.

- Le groupe 3 comprend deux segments réguliers dont les surfaces de béton ont été préparées au jet d'eau sous pression, tandis que tous les autres segments réguliers sont préparés au jet de sable. Il a été observé que les deux types de préparation de surface conviennent et permettent une surface propre, solide et légèrement rugueuse.
- L'enveloppe en PRF des deux segments réguliers du groupe 4 doit être installée lorsque ces derniers supportent des charges variables. La réalisation de ces essais est prévue au printemps 2003.

Tableau 1 : Résultats des essais sur les segments réguliers

Système PRF de verre	Préparation du béton	Surface des vides (%)	Charge rupture (kN)	Déplacement		Type de rupture*
				centre (mm)	bord (mm)	
Groupe 1 : Première série de référence (non satisfaisante)						
2	1	≅50	155	39	20	décollement puis déchirure
2	1	≅70	40	15	14	décollement et déchirure
1	1	<5	312	>70	>7,5	déchirure
1	1	≅20	175	41	7,5	décollement puis déchirure
Groupe 2 : Deuxième série de référence (nouveaux produits de Sika Canada inc.)						
3	3	0	80	11	1,9	déchirure
3	3	0	85	11	2,5	déchirure
1	3	0	190	16	3,3	déchirure
Groupe 3 : Type de jet de nettoyage du béton						
3	4	0	125	16	3,8	déchirure
3	4	0	112	19	3,3	déchirure
Groupe 4 : Vibration pendant la cure du PRF						
3	3					essai à venir
3	3					essai à venir

* décollement : décollement du chemisage sur les faces verticale et inclinée

déchirure : rupture des fibres du chemisage sur l'arête vive de la plaque d'acier

Le programme expérimental comporte aussi 14 essais sur des segments courts de 0,6 m de longueur, divisés en quatre groupes, pour étudier la durabilité. Les caractéristiques et les principaux résultats du volet durabilité de cette étude sont regroupés au tableau 2.

- Les quatre segments courts du groupe A servent de référence pour ce type d'échantillon chemisé avec les deux produits initiaux et ne subissent aucun vieillissement. Ils ont cependant révélé que la face sciée de ces échantillons constitue une zone de faiblesse pour l'adhérence des PRF. Malgré cette faiblesse, la charge supportée est largement suffisante pour retenir une mince couche de béton et le déplacement mesuré au centre de la plaque d'acier est facilement observable.
- Les quatre segments courts du groupe B ont pour objectif de fournir rapidement des indications sur la durabilité. À cet effet, ils affichent différentes combinaisons de matériau de chemisage et de préparation de la surface de béton, et ils n'ont subi que 100 cycles de gel-dégel. Ces segments courts démontrent qu'une préparation au jet d'eau est plus efficace sur la surface extrêmement lisse produite par le sciage du béton, puisque le mode de rupture change.

Les résultats de ces essais ont démontré qu'après 100 cycles de gel-dégel, le chemisage demeure aussi résistant.

- Les deux segments courts du groupe C, qui doivent subir 300 cycles de gel-dégel, ont pour objectif d'établir la durabilité du produit Fibrwrap. L'effet d'un enduit de surface est également étudié sur l'un d'eux. La fin des cycles de gel-dégel est prévue pour juin 2003.
- Les quatre segments courts du groupe D ont été ajoutés afin d'étudier la durabilité des nouveaux matériaux de Sika Canada. Deux d'entre eux servent de référence en ne subissant aucun cycle de gel-dégel, tandis que les deux autres en subiront 300. L'effet d'un enduit de surface sera aussi étudié sur un échantillon vieilli. La fin des cycles de gel-dégel est prévue pour juin 2003.

Tableau 2 : Résultats des essais de durabilité sur les segments courts

Système PRF de verre	Préparation du béton	Surface des vides (%)	Cycles gel-dégel	Charge rupture (kN)	Déplacement centre (mm)	Type de rupture*
Groupe A : Segments courts de référence						
2	1	≅10	0	58	32	décollement côté scié et déchirure des deux côtés
2	1	≅10	0	65	24	décollement côté scié
1	1	≅20	0	64	19	décollement côté scié
1	1	≅20	0	67	37	décollement côté scié
Groupe B : Vieillissement court terme						
2	1	≅30	100	66	35	déchirure côté extérieur décollement côté scié
1	1	≅0	100	74	29	décollement côté scié
2	2	≅0	100	70	28	déchirure côté scié
1	2	≅10	100	80	29	déchirure côté scié
Groupe C : Vieillissement long terme						
1°	3	0	300			essai à venir
1	3	0	300			essai à venir
Groupe D : Nouveaux matériaux de Sika Canada inc.						
3	3	0	0			essai à venir
3	3	0	0			essai à venir
3°	3	0	300			essai à venir
3	3	0	300			essai à venir

* décollement : décollement du chemisage sur les faces verticale et inclinée

déchirure : rupture des fibres du chemisage sur l'arête vive de la plaque d'acier

° avec enduit de surface Tex Cote recouvrant le chemisage en PRF

Conclusion

Le chemisage de poutres en béton précontraint à l'aide de polymères renforcés de fibres s'avère une méthode efficace pour empêcher la chute de fragments de béton qui se détachent occasionnellement à cause de la corrosion des étriers en acier. La résistance du chemisage en PRF de verre est au moins 100 fois plus grande que le poids de 25 mm de béton délaminé. Le

chemisage possède également une ductilité suffisante pour que d'éventuels gonflements puissent être décelés par le personnel chargé de l'inspection avant la rupture du chemisage. Pour favoriser la durabilité et obtenir la pleine résistance du chemisage, il est nécessaire d'installer l'enveloppe en PRF en respectant la méthodologie reconnue pour ce type de matériaux, particulièrement en ce qui concerne la préparation de la surface du béton.

Les résultats préliminaires de l'étude de la durabilité indiquent un excellent comportement à long terme. Les derniers essais, après 300 cycles de gel-dégel, sont attendus pour le mois de juin 2003. À la suite de ces derniers essais en laboratoire, un projet de démonstration sera réalisé sur le pont d'étagement du chemin de la Côte-Saint-Antoine, au-dessus de l'autoroute Décarie à Montréal, au cours de l'été 2003. Les deux poutres de rives seront chemisées au moyen de PRF de verre puis instrumentées afin de suivre leur comportement à long terme.

Remerciements

Ce projet de recherche a été financé principalement par le Ministère des Transports du Québec et par le Réseau de Centres d'excellence ISIS Canada. L'Université de Sherbrooke et les fournisseurs de matériaux ont aussi contribué de diverses manières au projet. Leur implication dans ce projet est grandement appréciée.

Références

- Demers, M. 2003. Rapport d'étape – Chemisage de poutres en béton précontraint au moyen de matériaux composites, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 41 p.
- Bisby, L.A., Green, M.F., Beaudoin, Y. et Labossière, P. 2000. FRP Plates and Sheets Bonded to Reinforced Concrete Beams, *Comptes rendus de la 3^e Conférence internationale sur les matériaux composites d'avant-garde pour ponts et charpentes (MCAPC-III)*, J. Humar et A. Ghani, éditeurs, Ottawa, Ontario, 209–216.
- Raïche, A., Beaudoin, Y. et Labossière, P. 1999. Durability of Composite Materials Used as External Reinforcement for RC Beams, *Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil*, Société canadienne de génie civil, 155–164.