

# Renforcement du pont de Saint-Urbain avec matériaux composites

**Christian Mercier, ing.**

Direction des structures, MTQ

**Claude Nazair, ing.**

Direction du laboratoire des chaussées, MTQ

## Résumé

Le ministère des Transports du Québec doit procéder annuellement à plusieurs travaux de renforcement d'ouvrages d'art qui ont été conçus avec des charges inférieures à celles en vigueur ou qui ont développé des problèmes de comportement depuis leur mise en service. Les matériaux composites collés aux faces externes des ouvrages en béton sont utilisés dans le domaine du génie civil depuis le début des années 1990. Par contre, l'utilisation de ce matériau dans le domaine des ponts au Québec et surtout comme mode de renforcement a été très limité depuis son apparition.

Les travaux effectués en 2009 au pont de Saint-Urbain sur la route 138 à Charlevoix sont une application réelle des nouvelles exigences du chapitre 16 de la norme CAN /CSA-S6-06 et des guides et normes d'essais nord-américains. Les poutres en béton armé de cet ouvrage, comportant deux travées simplement appuyées, ont été renforcées en cisaillement par l'application de bandes externes en matériaux composites collées à la surface. Les expériences du projet tirées de la conception du renforcement, de la préparation des documents d'appels d'offres, de l'application en chantier et des différents contrôles de qualité sont discutées dans cet article.

## MISE EN CONTEXTE

Les travaux de renforcement des poutres en béton armé du pont de la rivière du Gouffre ont été réalisés avec un matériau peu commun pour les différents intervenants en ouvrages d'art; les polymères renforcés de fibres (PRF) aussi appelés matériaux composites. Les PRF sont composés de fibres à haute résistance liées par une résine de polymère. Ils sont disponibles sous forme de bandes (tissus), de plaques, de barres ou de laminés. Dans le cadre du projet de Saint-Urbain, le renforcement a été effectué avec des tissus de fibres de verre ou de carbone (PRFV et PRFC) secs imbibés au chantier lors de l'installation en surface des poutres.

En fait, la dernière application structurale du genre au ministère des Transports avait été réalisée en 1998 au pont de Sainte-Émélie-de-l'Énergie. Dans le cadre de ce projet, des recherches à l'Université de Sherbrooke avaient été menées avant l'exécution des travaux afin de valider les équations et paramètres de calculs à utiliser pour le dimensionnement du renforcement puisque ce n'est qu'à la nouvelle édition 2000 de la norme CSA-S6 (Code canadien sur le calculs des ponts routiers) que les ouvrages renforcés de fibres ont fait leur apparition officielle dans les normes canadiennes de calculs des ouvrages d'art.

Évidemment, depuis douze (12) ans les sujets de recherche sur les matériaux composites appliqués aux ouvrages d'art existants ont augmenté de façon considérable, mais les applications de renforcement *in situ* aux ouvrages d'art au Québec ont été très limitées.

Cette limitation s'explique par la technique de renforcement par collage qui s'avère relativement simple mais qui nécessite une mise en place adéquate, souvent méconnue par les différents intervenants, pour assurer le bon comportement de la structure renforcée. En comparaison avec l'utilisation de matériaux plus conventionnels tels l'acier ou le béton armé, l'efficacité technique et économique de la mise en place des PRF passe inévitablement par les aspects suivants :

1. État (présence de défauts) et planéité des surfaces nécessitant un collage  
Des surfaces en mauvais état (délamination, fissuration, éclatement) augmenteront les coûts de réparation avant renfort. Les critères de planéité des surfaces exigés par la norme sont très sévères et nécessitent une correction sur des ouvrages existants coulés en place.
2. Propriétés physique du substrat  
La norme demande une résistance en traction minimale de 1,5 MPa en surface du collage des PRF. Cette exigence requiert des essais *in situ* avant la préparation du projet. Les substrats doivent de plus être préparés adéquatement afin de recevoir l'apprêt de collage (résine d'apprêt) et le PRF.
3. Système de PRF utilisé  
Les systèmes de PRF choisis doivent permettre d'être compatible avec les conditions de pose (verticale ou plafond). De plus, ils doivent détenir les propriétés mécaniques de conception qui auront été préalablement testés en laboratoire par lots d'échantillons. Le fabricant demeure responsable des valeurs de calculs de conception fournis au concepteur en fonction de chaque système. Il y a donc une gamme importante de produits disponibles avec des propriétés de conception variées.
4. Contrôle de qualité lors de la mise en place et conditions de pose  
La réussite du collage provient de la qualification et de l'expérience du personnel effectuant la pose et des conditions de travail disponibles (espace et temps). La surveillance des travaux doit permettre la vérification du mélange des résines, leur application sur le substrat et au besoin sur la membrane, de même que toutes les opérations de marquage, collage et de cure des PRF.

Pour le concepteur ou le propriétaire, il advient que l'utilisation de ces matériaux est dictée par la confiance des systèmes mis en place et du contrôle de qualité effectué en chantier.

## **PONT EXISTANT**

Le pont ciblé par le projet est situé sur la route 138, au-dessus de la rivière du Gouffre à Saint-Urbain, dans la MRC de Charlevoix. Il se trouve sur le territoire de la Direction de la Capitale-Nationale (DCNAT). Le pont comporte deux (2) travées simples à cinq (5) poutres en béton armé coulé en place, pour une longueur de 19,8 m par travée, tel qu'illustrée sur la figure 1. L'ouvrage a été construit en 1958, avec un biais de 18 degrés, afin de porter la largeur carrossable à deux (2) voies de 4,57 m chacune, pour une largeur hors-tout de 11 m.



Le pont est la porte d'entrée de la Côte-Nord et est situé sur une route nationale ne permettant pas un affichage à tonnage réduit étant donné la longueur de détour nécessaire via la région du Saguenay. Pour les automobilistes, le détour est de 12 km en passant par la route 381 ou 362. Les charges lourdes, quant à elles, doivent faire un détour de plus de 130 km ! Le DJMA de cette section de route est de 4 800 véhicules pour un ratio important de charges lourdes de 14 %.

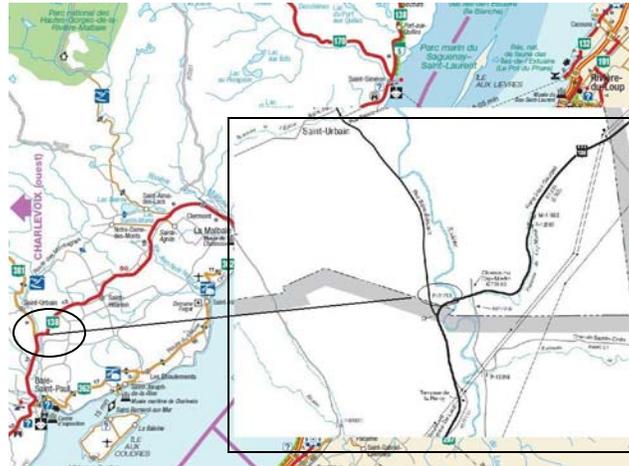


Figure 3 : Localisation de l'ouvrage

Le tablier de l'ouvrage a été évalué selon les paramètres du chap. 14 de la norme S6. Selon les dommages apparents sur les poutres et la dalle de tablier, les résultats théoriques de capacité pouvaient permettre le libre passage des véhicules routiers hors-normes. Par contre, à la lecture des documents d'archives disponibles, les évaluateurs ont constaté la rupture de plusieurs branches d'étriers dénudés lors de travaux de réparation antérieurs. La rupture était localisée au rayon de pliage inférieur des barres, tel que montré sur les photos 1. Les analyses chimique et physique de certaines barres prélevées ont permis de faire les constats suivants sur les étriers prélevés :

- Barres non-soudables de type R ( $CE = 0.50$ ) ;
- $F_y = 345 \text{ MPa min.}$   $\epsilon_y = 9 \%$ ;  $F_u = 595 \text{ MPa}$  ;  $\epsilon_u = 17,5 \%$  ;
- Acier ductile (partie droite) ;
- Rupture fragile de la partie courbée (sans striction), rayon de pliage trop sévère.



Photos 1 : Rupture de la partie courbée des étriers

La mise à jour de l'évaluation de capacité suite à ces constats a dû remettre en cause la bonne capacité des poutres observée depuis sa construction. La norme S6 exige un ancrage de l'extrémité des étriers (art. 8.15.1.5) afin de permettre la plastification de ces derniers de manière ductile. Un renforcement s'imposait donc afin palier à cette faiblesse théorique.

L'ouvrage a donc été placé sous surveillance périodique afin de suivre l'évolution de divers dommages, avant la réalisation des travaux de renfort. Une solution devait être envisagée afin de redonner à l'ouvrage une capacité acceptable.

## PRÉPARATION DU PROJET

Plusieurs options de renforcement étaient sur la table et pouvait être réalisées. Ajout de poutres en acier entre celles en béton, surépaisseur de la poutre afin d'ajouter des étriers, ajout d'étriers externes aux poutres et mise en place de bandes de composites collées à la surface des poutres.

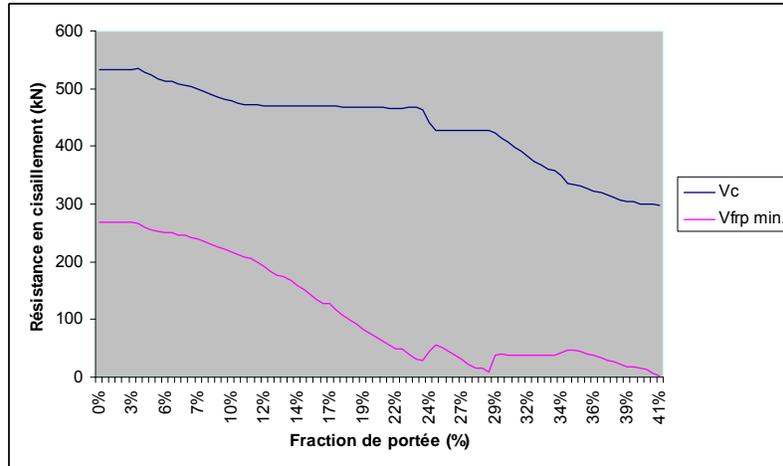
La Direction des structures du ministère des Transports a choisi l'option de renforcement en PRF en raison du bon état général des poutres en béton, surtout les poutres intérieures. De plus, la compatibilité structurale des poutres avec l'ajout de bandes de PRF s'y prêtaient pour les raisons suivantes :

- Facteur de capacité de surcharge supérieure à 0,50 (art. 16.11.1 - S6-06);
- Résistance à la traction du béton existant supérieure à 1,50 MPa (A16.1.4 - S6-06).

La conception des bandes de PRF a donc suivi les prescriptions de la norme CAN S6-06, mais en limitant la déformation des bandes de PRF ( $\epsilon$ ) à 0,003 au lieu du maximum permis de 0,004 afin de tenir compte de la capacité limitée en traction d'un ancien béton de réparation. L'apport en résistance en cisaillement ( $V_{frp}$ ) des bandes de FRP a été ajouté à celle du béton ( $V_c$ ) pour donner la résistance globale des poutres renforcées :

$$V_r = V_c + V_{frp}$$

L'apport ( $V_s$ ) des étriers a été négligé étant donné la forte probabilité de rupture de ces derniers. Par contre, leur présence a été considérée à 50 % (selon un plan de cisaillement moyen) afin de limiter la fissuration du béton et d'atteindre une résistance en cisaillement du béton plus réaliste. Le graphique 1 illustre les valeurs de  $V_c$  obtenues et celles de  $V_{frp}$  nécessaires pour le renforcement pour une poutre intérieure.



Graphique 1 : Résistance en cisaillement  $V_c$  et  $V_{frp}$  minimale pour le renforcement d'une poutre intérieure

La norme S6, art. 16.11.3.1, exige que les nouveaux étriers de FRP soient ancrés de façon appropriés dans les zones de compression, mais en ne mentionnant pas la capacité que les ancrages doivent développer et les modes de calculs de ces types d'ancrage. Considérant le peu d'équations de calculs développées dans le milieu à ce niveau, nous avons établi nos zones d'ancrage de la même manière que celles du projet de Sainte-Émélie-de-l'Énergie qui avaient été préalablement validées en laboratoire en considérant une largeur de bande d'ancrage équivalente à la largeur des bandes verticales (étriers). La disposition des bandes d'ancrage est illustrée à la figure 4, de même que celles des nouveaux étriers.

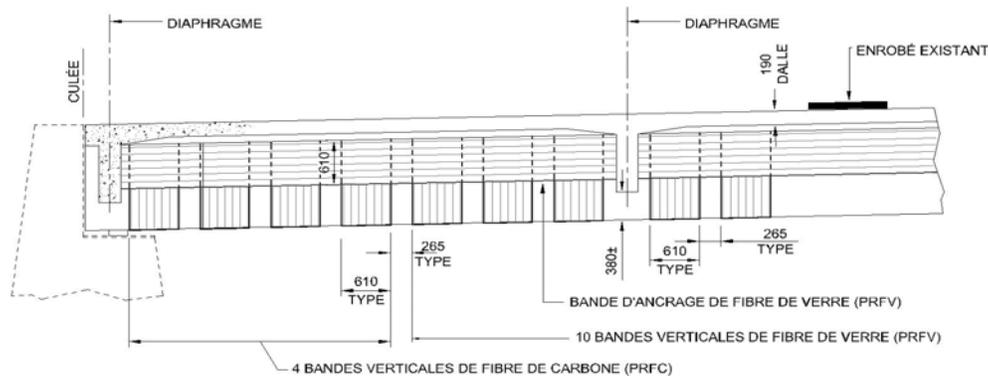


Figure 4 : Position des bandes verticales (étriers) et des bandes horizontales (ancrages)

Aux zones d'effort de cisaillement important, quatre (4) bandes de PRFC ont été installées à chaque extrémité des poutres. Tandis que cinq (5) bandes de PRFV ont été prévues à la suite des bandes de PRFC. Les bandes prévues ont une largeur de 610 mm, donnant des espaces libre entre les bandes d'environ 250 mm. La conception a été réalisée en considérant les systèmes illustrés au tableau 1 provenant de deux fabricants dont des applicateurs du Québec sont accrédités. Le choix des matériaux a été donc laissé à la discrétion de l'entrepreneur et de l'applicateur autorisé.

Propriétés de conception des systèmes commercialisés en PRFC					
Système	Nombre de couches	$t_{FRP}$ (mm)	$f_{FRP}$ (Mpa)	$E_{(FRP)}$ (Gpa)	$\epsilon_{FRP}$ (%)
SikaWrap Hex 103C / Sikadur® 330 et 300	1	1,14	717	65,10	0,98
Tyfo® SCH-41 / Tyfo® S	1	1,00	834	82,00	0,85
SikaWrap Hex 230C / Sikadur® 330	3	1,02	715	61,00	1,09
Propriétés de conception des systèmes commercialisés en PRFV					
Système	Nombre de couches	$t_{FRP}$ (mm)	$f_{FRP}$ (Mpa)	$E_{(FRP)}$ (Gpa)	$\epsilon_{FRP}$ (%)
SikaWrap Hex 100G / Sikadur® 300	1	1,02	558	24,40	2,23
Tyfo® SEH-51A / Tyfo® S	1	1,30	460	20,90	1,76

Tableau 1 : Propriétés des systèmes de PRF utilisés lors de la conception

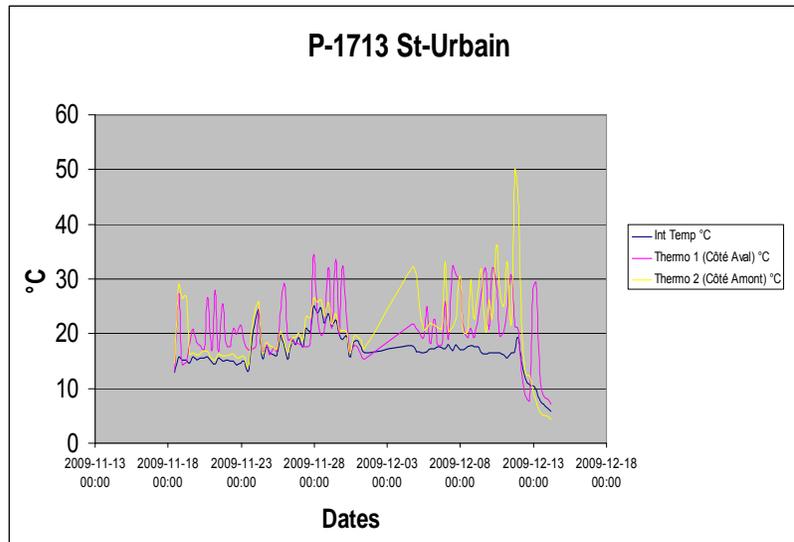
Le contrôle de la qualité en chantier était assuré en premier lieu par un programme d'assurance qualité conjoint entre le surveillant et le représentant ingénieur du fournisseur des matériaux composites. Des points de contrôles étaient obligatoires lors des étapes principales de la mise en œuvre du renforcement. De plus, des contrôles par un laboratoire indépendant devaient être réalisés en chantier par des essais d'arrachement sur le substrat et sur des bandes témoins installées sur les poutres. Finalement, des échantillons devaient être préparés au chantier afin de valider en laboratoire les caractéristiques mécaniques des PRF et de valider les hypothèses de conception.

En résumé, le système en place permettait à l'équipe de surveillance de valider les composantes essentielles d'un bon collage soit la capacité de la surface et des bandes de PRF à reprendre et distribuer les efforts de cisaillement des poutres.

## CONDITIONS DE CHANTIER

À l'origine, les travaux devaient se dérouler pendant l'été, mais pour des raisons administratives, ceux-ci n'ont pu débuter qu'avant la mi-septembre 2009, pour se terminer trois mois plus tard soit à la mi-décembre 2009. Par conséquent, la grande majorité des travaux de renforcement a dû être réalisé par temps froid, ce qui a amené à la mise en place de mesures et de protection qui n'étaient pas prévues initialement. Deux conteneurs chauffés et étanches ont été installés à proximité du pont pour permettre l'entreposage et la préparation adéquate des matériaux. Des toiles et des unités de chauffage ont également été mises en place dès le mois d'octobre le long des poutres de rive, côté aval et amont de façon à contenir la chaleur sous le tablier du pont.

Le devis spécifiait une température de pose recommandée se situant aux environs de 20 °C. De plus, la température ne devait être, en aucun temps, inférieure à 10 °C. Pour s'assurer du respect des ces exigences, le Service des matériaux d'infrastructures a installé trois thermocouples sous la dalle de façon à obtenir des relevés de température en continu à différents endroits. Les relevés de température ont débuté dès la première pose de bandes en PRF, soit le 27 octobre 2009.



Graphique 2 : Relevés de température à l'intérieur de l'abri

## RÉPARATION ET PRÉPARATION DES SURFACES

L'installation des bandes en polymère sur poutres en béton requiert une préparation adéquate et minutieuse, répartie en différentes étapes. Premièrement, une inspection rigoureuse de la qualité du substrat est essentielle de façon à bien identifier et délimiter les zones de réparations nécessaires. Entre autres choses, il a fallu définir les zones de réparation dites de surface où l'utilisation de mortier ou d'époxy est adéquate, de celle en profondeur où l'utilisation du béton autoplaçant était de mise comme matériaux de réparation.

Des quantités de réparation en surface et en profondeur avaient été prévues initialement au contrat. Il est important, dans le cadre d'un renforcement, de limiter les effets de la corrosion des armatures sous le composite afin de conserver le bon comportement des étriers en PRF. Les zones d'ancrage sont très sensibles au délaminage et à l'éclatement du béton, un contrôle plus sévère était donc apporté à ces zones situées sur la partie supérieure de la poutre.

Par contre, lors du contrat, les poutres extérieures se sont avérées beaucoup plus endommagées que nos prévisions. Les réparations des parties inférieures des poutres, anciennement réparées par béton projeté dans les années 1990, ont été très importantes. Les causes de l'étendue de ces zones endommagées sont très probablement les suivantes :

- Réparations antérieures déficientes avec une préparation de surface limitée, occasionnant un joint de réparation en profondeur de faible qualité (photo 2);
- Présence de barres lisses de gros diamètre ne favorisant pas l'adhérence du béton de réparation antérieure (photo 2).



Photo 2 : Démolition pour réparation en profondeur

Une analyse méthodique des différents types de fissures présents était également nécessaire afin de décider s'il fallait procéder à des travaux d'injection ou de réparation. Selon le fournisseur des produits, une injection de fissure était nécessaire pour des ouvertures de plus de 0,3 mm.



Photos 3: Vérification des fissures

Par la suite, une vérification des arrondis des arêtes inférieures des poutres est exigée pour éviter d'endommager les bandes lors de leur collage sur les parois de béton des poutres. Un gabarit avec un rayon de courbure a été préparé au chantier pour vérifier la conformité de l'arrondi. Dans certains cas, les arêtes trop vives ont dû être meulées pour se conformer aux recommandations (rayon minimum de 35 mm).



Photos 4 : Vérification des arrondies et meulage des arêtes

La prochaine étape consistait au sablage des zones à réparer à l'aide de jet de sable pour assurer une adhérence adéquate des matériaux de réparation au substrat de béton. Cette étape de réparation a été suivie par le remplissage des zones à réparer à l'aide des matériaux appropriés. Finalement, des travaux de meulage se sont avérés nécessaires pour procurer une bonne planéité des surfaces des poutres avant l'application des bandes en polymère.

La préparation de surface des poutres a été faite de façon à obtenir un profil de surface de béton de type CSP 3, tel que défini par les plaquettes des profils de surface de l'ICRI (International Concrete Repair Institute). Il a fallu également enlever toute la poussière de la surface avec un aspirateur industriel. La surface devait être sèche avec une teneur maximale d'humidité du substrat inférieure à 4 %. Pour ce faire, plusieurs lectures ont été prises à l'aide d'un appareil détecteur d'humidité, tel qu'illustré à la photo 5.



Photo 5 : Appareil de détection d'humidité

Toutes les surfaces après réparation présentant des irrégularités de nivellement dépassant les critères de la norme, profondeur de dépressions supérieure à 2 mm sur 300 mm ou 4 mm sur 2 000 mm, ont dû être corrigées à l'aide d'un adhésif époxyde structural en pâte ou un mortier de réparation au polymère appliqués par truelle ou spatule. De plus, les surfaces ne devaient pas présenter aucune aspérité ou saillie ponctuelles supérieures à 0,5 mm.

## **MÉTHODE DE POSE**

Deux équipes de travail étaient affectées de façon simultanée à la pose des bandes. Une première équipe procédait au découpage des bandes de tissu en fonction des dimensions spécifiées sur les plans et devis. Par la suite, cette même équipe procédait au malaxage de la résine d'imprégnation qui consiste à combiner deux composants dans un même contenant selon les ratios de malaxage spécifiés par le fournisseur. La résine d'imprégnation, soit le Sikadur® 300, est ensuite appliquée sur le tissu manuellement à l'aide d'une spatule et ce, sur les deux côtes du tissu.



Photos 6 : Préparation des bandes (découpage et imprégnation)

Après l'enroulement du tissu imprégné de résine autour d'un rouleau de bois, les bandes sont transférées à une deuxième équipe qui est directement sur place. Cette équipe procède par la suite à l'installation des bandes sur la surface des poutres qui ont été préalablement tracées de façon à bien délimiter et identifier les zones des poutres à renforcer conformément aux exigences de conception. Les zones à renforcer doivent être recouvertes d'une résine, soit dans le cas de ce projet le Sikadur® 330, utilisée comme apprêt de surface avant l'application des bandes déjà imprégnées de Sikadur® 300.

L'apprêt doit être appliqué à l'aide d'une truelle ou d'un pinceau en couvrant le substrat selon le profil de la surface recherché. L'utilisation de ce type d'apprêt permet une adhésion adéquate des bandes sur le substrat. Ensuite, le tissu imbibé de résine est disposé et lissé avec soin sur l'apprêt. Toute bulle d'air emprisonnée ou irrégularités de surface doivent être éliminées en se servant d'un rouleau en plastique appliqué sur la totalité de la surface fraîchement recouverte de tissus.



Photos 7: Application de l'apprêt et pose de la bande sur l'apprêt



Photo 8: Élimination des bulles d'air à l'aide d'un rouleau

Afin d'éviter que les bandes de polymères qui sont exposées aux rayons UV subissent une dégradation accélérée, les poutres de rive sur les faces côtés amont et aval ont été recouvertes d'une couche de peinture Sikagard® Color A50.

## **PROBLÉMATIQUE RENCONTRÉE LORS DE LA POSE**

Une seule mauvaise manipulation semble avoir été rencontrée pendant l'exécution des travaux de pose de membrane, soit celle de l'apparition d'un phénomène de bullage supérieur aux tolérances permises de surface de 1 500 mm<sup>2</sup> qui a été constaté lors de la dernière application de bandes sur les poutres de rive. Après investigation, il a été constaté que l'emplacement de certaines sorties de l'unité de chauffage était situé trop près des bandes fraîchement appliquées. Un apport de chaleur ponctuel et supérieur à la tolérance maximale fixée par le fournisseur, c'est-à-dire 50 °C, fut ainsi constaté (phénomène confirmé par la lecture des données recueillies à l'aide des thermocouples, voir la figure 2). Ces non-conformités qui ont été constatées lors d'une inspection des travaux, soit 24 heures après la pose des dernières bandes en décembre 2009, ont été corrigées, pour les plus petits défauts par injection des vides à l'aide d'une résine époxyde d'injection à très faible viscosité, c'est-à-dire le Sikadur® 52. Les défauts plus importants ont été découpés localement et une bande supplémentaire a été mise en place avec un chevauchement adéquat. L'efficacité des travaux de réparation a par la suite été validée à l'aide d'essais d'arrachement sur les bandes réparées. Les résultats obtenus ont confirmé l'obtention d'une valeur de résistance à la traction toujours supérieure à 1,5 MPa.



Photo 9: Injection de bulle d'air emprisonnée sous la membrane

## **CONTRÔLE DE LA QUALITÉ**

Le renforcement en cisaillement par l'application de bandes externes en matériaux composites collées à la surface de poutres en béton armé requiert un contrôle de la qualité rigoureux pour s'assurer de l'efficacité de cette technologie relativement récente. Notamment, les essais suivants ont été réalisés dans le cadre du projet de Saint-Urbain :

- Planches d'essais et formation hors chantier préalables aux travaux *in situ*;

- Essais de compression et traction sur des échantillons de béton de réparation autoplaçant en sac (BAP) prélevés au chantier.



Photo 10 : Essai de traction sur éprouvette de BAP en sac prélevé au chantier (résultat = 3,2 MPa)

- Essais d'arrachement sur le substrat, le BAP et le mortier de réparation avant la pose des bandes en PRF;
- Essais d'arrachement sur les bandes en PRF après la pose de celles-ci (ASTM D4541);



Photo 11 : Essai d'arrachement sur bande en PRFV (rupture dans substrat à 2,7 MPa)

- Enregistrements et contrôle de la température avant, pendant et après la pose des bandes;
- Contrôle de l'humidité du béton avant la pose des bandes en PRF;
- Essais de caractérisation en laboratoire sur les différents époxy et peinture utilisées pour valider leur conformité aux exigences de fabrication;
- Essais sur plaques témoins fabriquées en chantier et en laboratoire pour valider les résistances des bandes en PRF lorsque soumis à des essais de traction directe (ASTM D3039).

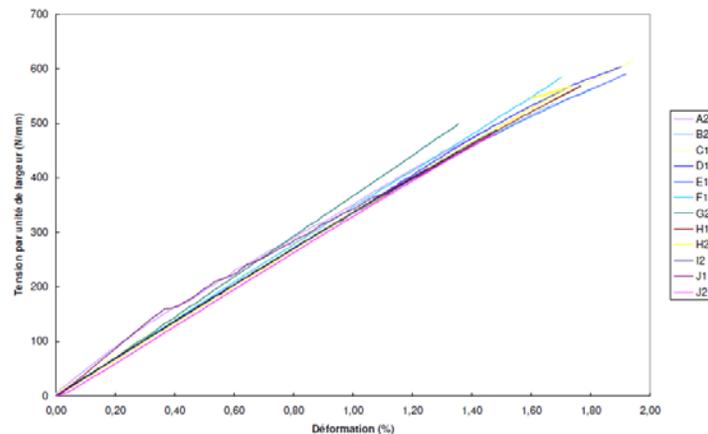
Tous les essais d'arrachements qui ont été réalisés dans le cadre du projet de Saint-Urbain ont démontré des valeurs de résistance à la traction supérieures à l'exigence de 1,5 MPa, que ce soit sur le substrat, les matériaux de réparation ou les bandes en PRF.

De plus, la présence d'un ingénieur expérimenté dans l'application des composites était exigée aux documents d'appel d'offres afin d'orienter le travail de l'entrepreneur et de valider les conditions de pose et les surfaces de contact avec le PRF. Cette mesure n'était pas négligeable et fut profitable à tous les intervenants au chantier.

## ESSAIS DE TRACTION DES PRF

Des essais en laboratoire ont été réalisés sur des plaques témoins des systèmes préparés et mûris en chantier. La préparation des plaques de PRF et les essais en laboratoire devaient être conformes à la norme ASTM D3039. Les essais ont été réalisés sur des spécimens de 15 mm de largeur découpés à partir des plaques. Une première série d'essai a été effectuée et les résultats observés de la résistance à l'ultime ont été inférieurs de 5 à 20 % aux valeurs de conception du fabricant. Les causes de ces ruptures prématurées étaient possiblement les suivantes :

- Épaisseurs des échantillons variables et ondulations des plaques, provenant de plis dans le polythène utilisé pour la fabrication des spécimens ;
- Désalignement des fibres dans l'axe longitudinal occasionnant une coupure des fibres lors du sciage des spécimens;
- Essais effectués en utilisant seulement une couche de PRF (1 pli).



Graphique 3 : Résistance en traction sur la déformation des échantillons de PRFV

Suite à ces constats décevants, les mêmes lots ont été préparés en chantier en améliorant l'alignement des fibres et en diminuant les ondulations. Parallèlement, avec les mêmes lots de tissus de PRF, d'autres échantillons ont été préparés en laboratoire par le fabricant avec 1 pli ou 2 plis. Les résultats des essais des deux types de témoins ont été supérieurs, pour la plupart, aux valeurs de conception et ont permis de constater la pertinence de préparer des échantillons d'essai en laboratoire afin d'éliminer les risques de désalignement des fibres et de variabilité des épaisseurs. Par contre, les essais effectués sur 1 pli de PRF ou 2 plis ont donné des résultats similaires par couche de système testé.



Photo 12 : Sciage de plaques témoins pour essais en traction



Photo 13 : Échantillons de PRFV après les essais

## **THERMOGRAPHIE INFRAROUGE**

En plus des contrôles de la qualité du collage exercée en chantier, des essais (non contractuels) ont été réalisés lors des travaux en utilisant la technique de détection de défaut de surface par thermographie infrarouge active. L'application de cette technique consiste en une excitation du matériel à la surface afin de détecter et de visualiser via une caméra infrarouge les vitesses relatives de pertes de refroidissement sur une surface donnée. Bien que la norme CAN/CSA-S6 accorde une place à la thermographie pour l'assurance qualité du collage, la technique semble pour le moins méconnue par les différents intervenants. La plupart du temps, la technique d'inspection consiste à une inspection visuelle et acoustique (marteau) afin de déceler les vides.

Lors des différents essais en chantier, quelques vides sous les bandes ont été décelés mais étaient conformes aux tolérances permises. Les essais ont permis de valider la technique d'excitation la plus performante en fonction de contraintes *in situ*. Le chauffage à air chaud, les lampes halogènes et les lampes infrarouge ont été testés. Les photos suivantes montrent les applications de la technique en chantier avec la lampe infrarouge.



Photo 14 : Essais avec lampe infrarouge et données de la caméra portable

## CONCLUSIONS

La dernière application terrain d'un renforcement de pont en composite datait de plus de 12 ans. Depuis, les méthodes de calculs se sont améliorées et normalisées de même que les méthodes de contrôles de la qualité. Les expériences, bonnes et mauvaises, tirées de cette application chantier d'un collage de FRP se décrivent ainsi :

- La norme de conception du renforcement en PRF est vague en regard du calcul des ancrages des étriers et de la déformation unitaire limitée à 0,004, des améliorations à ce sujet doivent être apportées;
- Les candidats (ouvrages) potentiels à un renforcement doivent faire l'objet d'une campagne de caractérisation des matériaux importante afin de déterminer l'état des surfaces et la capacité en traction du substrat. On doit éviter de renforcer avec des PRF des ouvrages dont une réparation majeure est nécessaire avant renfort;
- Les conditions de chantier hivernales avec des protections adéquates sont nécessaires au bon déroulement du projet mais les températures doivent être constantes de manière à éviter les pointes de chaleur. Des exigences de température minimales et maximales doivent être précisées aux documents d'appel d'offres en fonction des exigences des fournisseurs;
- Un contrôle conjoint des étapes principales des travaux doit être réalisé entre le surveillant et l'ingénieur du fabricant;

- Les méthodes de contrôles en chantier et en laboratoire sont nombreuses et des prévisions doivent être spécifiées aux documents d'appel d'offres si les résultats ne rencontrent pas les exigences contractuelles;
- La norme d'essai, ASTM-D3039 devrait être améliorée afin de proposer des méthodes de préparation des échantillons réalistes en conditions de chantier et d'interprétation des résultats d'essai de traction. À ce jour, les échantillons devraient être préparés soigneusement en laboratoire avec le nombre de couches reflétant l'application en chantier;
- La thermographie infrarouge semble être un outil prometteur pour les applications chantier et le suivi dans le temps de l'état du collage. La méthode acoustique usuelle comporte une capacité de détection limitée (surface et nombre).

## **RÉFÉRENCES**

Association canadienne de normalisation, *Code canadien sur le calcul des ponts routiers, S6-06*. Toronto, Ontario, Canada (2006).

ISIS Canada, *FRP Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Design manual No 4-V2*. Winnipeg, Manitoba, Canada (2008).

Sika Canada Inc., *Projet : ASTM D-3039, Méthode d'essai standard pour les propriétés d'une matrice de matériaux composites de polymère (LP10/002)*. Pointe-Claire, Québec, Canada (2010).

Université de Sherbrooke, *Essais sur des échantillons de PRF de CIMOTA Inc. Sherbrooke*, Québec, Canada (2009).

Groupe Qualitas Inc., *Essais en chantier, rapport final (09-130-001)*. Québec, Québec, Canada (2010).

LCPC, *L'apport de la thermographie infrarouge pour la détection des défauts de collage*. CETE de Lyon, France (2008).