

EFFICACITÉ D'UTILISATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES POUR LE RENFORCEMENT DE POUTRES DE PONTS EN BÉTON PRÉCONTRAIT ENDOMMAGÉES

Viacheslav Koval
Ingénieur de laboratoire

Bruno Massicotte
Professeur titulaire

Groupe de recherche de génie des structures
École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succursale Centre-Ville
Montréal (Québec), H3C 3A7

RÉSUMÉ : De nombreux ponts du réseau routier québécois ont un tablier constitué de poutres en béton précontraint qui, suite à des détériorations, peuvent nécessiter un renforcement. L'étude présentée dans cet article porte sur l'efficacité du renforcement avec des matériaux composites de poutres de ponts en béton précontraint endommagées. La méthode de renforcement externe à l'aide de lamelles en matériaux composites collées au béton a été retenue comme une alternative à l'ajout de précontrainte externe.

L'objectif de la présente étude était de développer une technique fiable pour le renforcement à l'aide de composites permettant d'éliminer la rupture prématurée par décollement des lamelles. Le programme expérimental de la présente étude comprend deux phases où la configuration des spécimens ainsi que les conditions de renforcement convergent vers une solution efficace.

INTRODUCTION

Le réseau québécois des infrastructures de transport comporte un grand nombre d'ouvrages d'art. Parmi ceux-ci, on observe sur certains ponts et viaducs en béton précontraint une perte de capacité en flexion provenant de la corrosion ou la collision accidentelle de véhicules qui rendent des câbles de précontraintes inefficaces.

Plusieurs techniques de réparation et de renforcement des structures ont été développées au fil du temps. Parmi celles-ci on retrouve les structures renforcées par des plaques, bandes ou lamelles fixées aux structures à partir de la face externe. Divers matériaux sont utilisés pour cette application afin d'atteindre une réponse structurale composite plus efficace. La technique de renforcement étudiée dans le cadre de cette étude consiste à utiliser des lamelles de matériaux composites collées à la surface externe sans appliquer une tension initiale au moment de l'installation. Cette technique constitue un renforcement dit passif. Au contraire d'un renforcement actif, l'application d'un renforcement passif ne referme pas l'ouverture de fissure existante.

Lors de la phase expérimentale des études réalisées par Folcher (2002), le phénomène du décollement prématuré des matériaux composites a été observé. Par conséquent, une incertitude lors de la détermination ou la prédiction de capacité portante résiduelle pour une structure endommagée et par la suite renforcée par des matériaux composites ne permettait pas d'identifier

la plage à l'intérieure de laquelle ce type de renforcement est applicable. Le but de l'étude présentée dans cet article était de trouver une solution à ce problème.

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL AU LABORATOIRE

Description des spécimens

Les spécimens de première phase de la présente étude ont été endommagés puis réparés à l'aide de lamelles de fibre de carbone (Sika Carbodur). L'étude a adopté la même configuration de poutre que pour les études de Folcher (2002) afin de tirer des conclusions comparatives entre les études. Le programme expérimental comptait quatre poutres ayant une section rectangulaire de 750 x 250 mm et une longueur de 5.5 m. La figure 1 indique la position et le type de renforcement actif sur la section transversale des poutres ainsi que le renforcement en cisaillement par les étriers 10M et le renforcement local dans la zone d'appui. La figure 2 présente les espacements et les positions des armatures transversales.

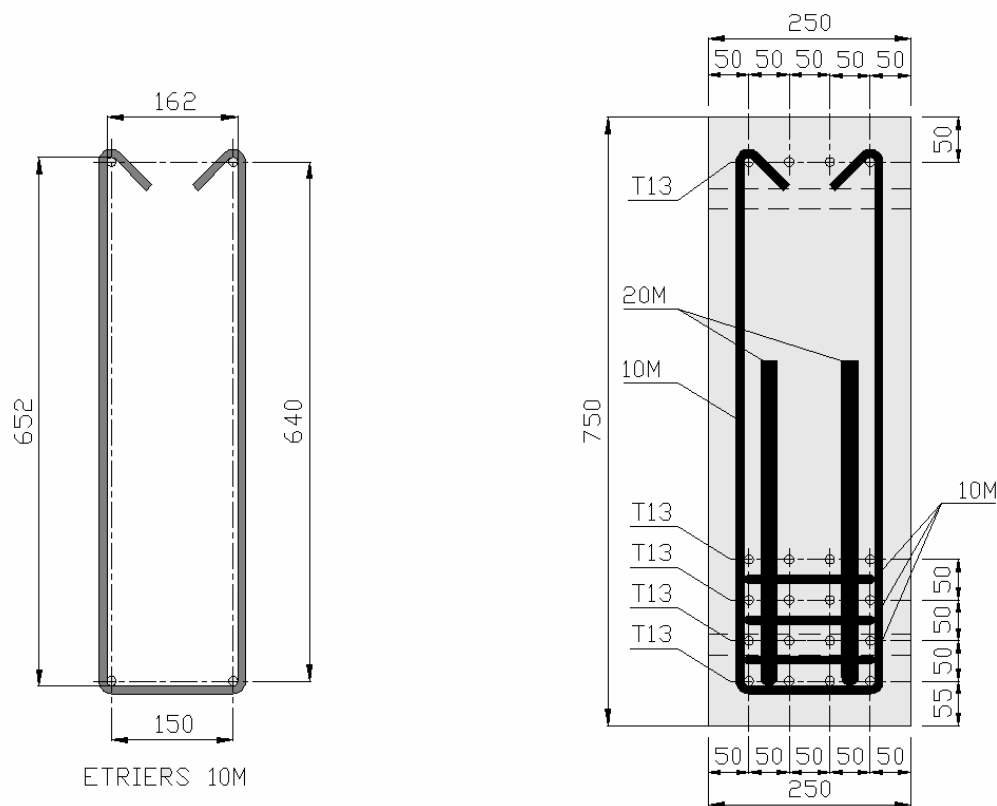


Figure 1 - Section de la poutre

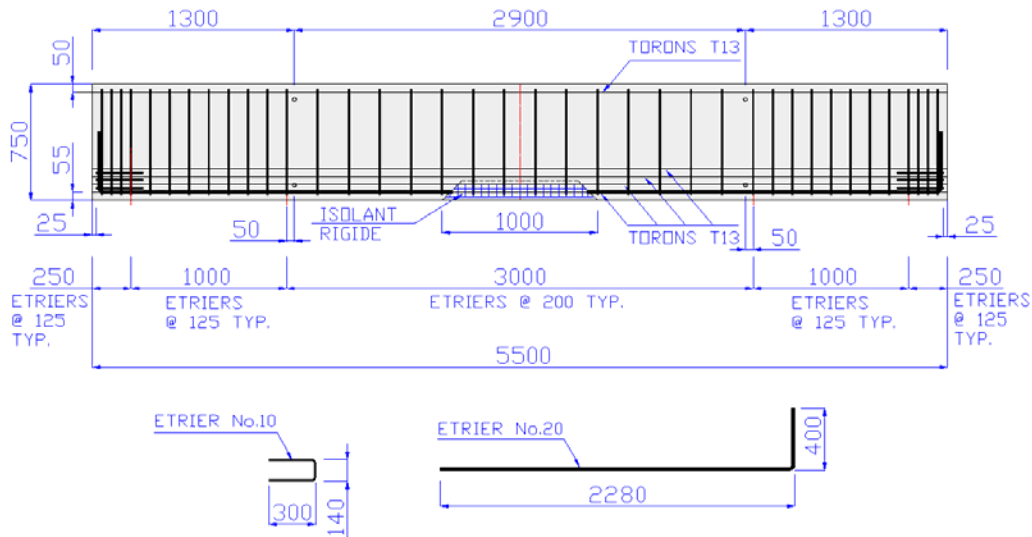


Figure 2 - Distribution des armatures transversales et longitudinales

Chacune des quatre poutres a été précontrainte à l'aide de 20 torons T13 installés sur 5 lits, dont 4 lits dans la partie inférieure et 1 lit dans la partie supérieure. La précontrainte a été appliquée lors de l'essai pour reproduire l'état de contrainte d'une poutre réelle dans la zone des torons. Un pont situé à Saint-Éphrem sur la route 271 a été adopté comme objet d'étude lors du choix et conception des spécimens dans le projet de Folcher (2002) ainsi que pour la validation du logiciel AIS par Bédard et Massicotte (2001). Le tablier à portée simple de 31.8 m est formé de quatre poutres AASHTO de type V. Lors du programme expérimental, le type de torons, leur position relative et l'état de contrainte à la fibre inférieure du béton devaient être simulés. Les caractéristiques nominales des torons employés sont présentées au tableau 1. Le niveau de contrainte de 8.5 MPa à obtenir dans le béton a été déterminé en fonction de l'information fournie par le MTQ. Compte tenu des pertes de précontrainte, une force initiale de 60 kN a été appliquée pour tendre les torons, soit une contrainte de 608 MPa. Celle-ci est loin de la contrainte au transfert usuelle correspondant à $0.75f_{pu} = 1395$ MPa mais procure l'état de contrainte désiré dans la partie inférieure de la poutre.

Tableau 1 - Caractéristiques nominales des torons

Désignation (mm)	Aire de la section (mm ²)	Quantité de fils	f_{py} (MPa)	f_{pu} (MPa)
Toron - T13	98.7	7	1674	1860

Une seule configuration d'endommagement a été utilisée dans cette étude. Tous les spécimens possèdent une zone au centre de la poutre sans béton. Cette faiblesse a été introduite lors du bétonnage. Le premier lit des torons a été coupé pour présenter une perte de 25% de torons dans la zone tendue. La figure 3 montre cette configuration d'endommagement.

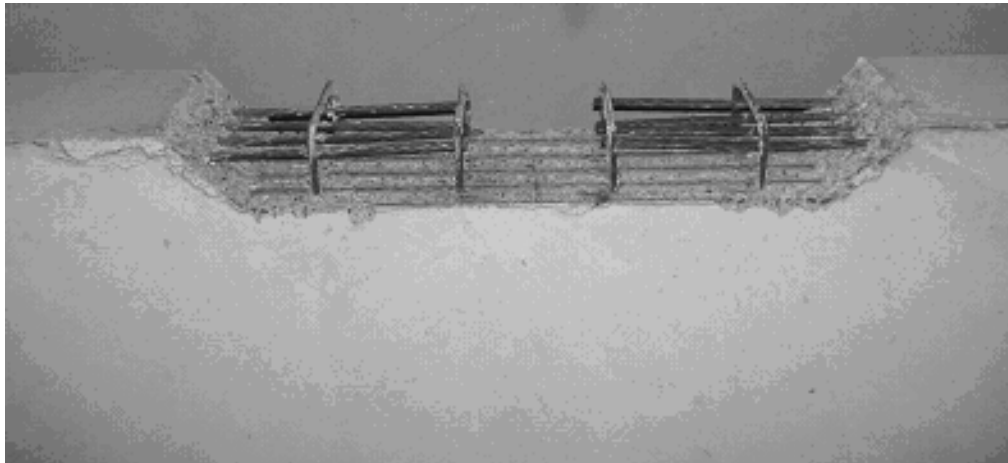


Figure 3 - Endommagement des torons

Quatre configurations différentes de renforcement des poutres ont été utilisées pour valider une solution efficace (Tableau 2). Une fois coulis de réparation mise en place, la préparation par jet de sable de la surface du contact entre le béton et le composite a été appliquée aux quatre spécimens. Il s'agit de la technique couramment utilisée pour augmenter l'adhérence de surface.

Tableau 2 – Type de renforcement

Type de renforcement		Réparation de la zone endommagée	
		Zone endommagée sans renforcement	Chevauchement de torons coupés et treillis
Préparation de surface	Jet de sable	Spécimen L1	Spécimen L2
	Jet de sable et préparation spéciale	Spécimen L3	Spécimen L4

La zone endommagée pour la poutre L2 a été renforcée avant que le béton de réparation soit placé. Chacun des quatre torons coupés a été chevauché par une barre d'armature 10M puis un treillis en acier a été installé. La longueur de chevauchement utilisée a été définie à partir de l'espace disponible. La figure 4 montre cette technique.



Figure 4 - Renforcement de la zone réparée pour la poutre L2

La zone endommagée des poutres L1 et L3 n'a été réparée que par de coulis du béton, sans renforcement supplémentaire. Ce type de réparation a été testé pendant les essais de Folcher (2002). Cependant, une série d'améliorations a été apportée à cette méthode lors du présent projet. Premièrement, un changement graduel de la géométrie des surfaces latérales à 45 degré a été adopté. De plus, contrairement à Folcher, les torons n'ont pas été coupés au niveau des surfaces latérales afin qu'ils puissent pénétrer dans la zone du coulis de réparation pour y développer un ancrage par friction.

Les quatre poutres ont été renforcés en flexion avec des lamelles en fibres de carbone de type CarboDur S1012 (Sika Construction) de 100 mm de largeur et 1.2 mm d'épaisseur. Ces lamelles ont une section nominale de 120 mm². Deux lamelles de 4700 mm de longueur ont été installées sur la face inférieure de chaque spécimen.

Programme expérimental

Une série de quatre essais a été réalisée dans cette phase expérimentale. Les poutres avaient une portée de 5300 mm entre les appuis simples à rouleaux aux deux extrémités. Une poutre de transfert a été utilisée pour appliquer la charge en deux points espacés de 1200 mm afin d'avoir une zone de moment constant dans la zone de réparation. Une répartition égale de la charge entre les deux points a été réalisée grâce à l'utilisation d'une rotule d'interface entre la presse et la poutre de transfert. Les figures 5 et 6 présentent le montage expérimental.

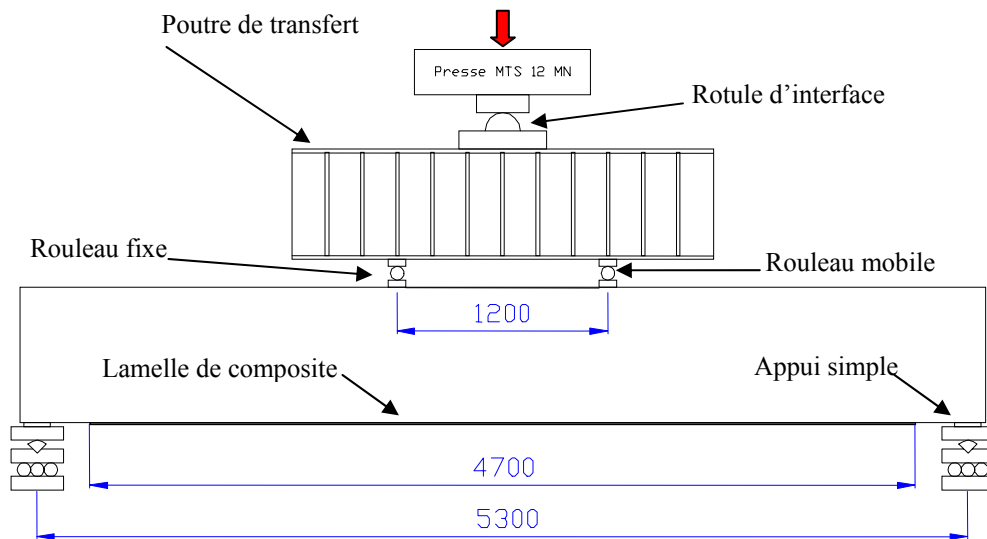


Figure 5 - Montage expérimental



Figure 6 - Montage expérimental – Essai sur la poutre L4

Résultats expérimentaux

Un comportement similaire a été remarqué dans la phase initiale de chargement pour les quatre spécimens. Les fissures transversales, espacées d'environ 200 mm, se forment dans la région de flexion constante au-dessus de la zone endommagée. Ce phénomène est observable jusqu'à une charge de 300 kN-m, ce qui correspond à une déformation d'environ de 1000 $\mu\epsilon$ dans le composite. Par la suite, un autre mécanisme de fissuration se manifeste pour la région réparée. Le spécimen L1 a été utilisé comme la poutre de référence pour évaluer le niveau d'amélioration obtenu en fonction de chaque type de renforcement.

Le tableau 2 présente le sommaire des résultats des essais réalisés dans cette phase expérimentale. Les photos sur les figures de 7 à 10 mettent en évidence le mode de rupture pour chaque spécimen.

Tableau 2 - Tableau comparatif du mécanisme de rupture

Spécimen	Préparation de surface / réparation de la zone endommagée	Mesures à la rupture	Mécanisme de rupture
L1	Jet de sable / -----	$M_u=781$ kN-m $\epsilon_{max}=4763$ $\mu\epsilon$	Fissures critiques au niveau des torons coupés. Décollement du composite à l'interface béton-colle au droit de la fissure critique.
L2	Jet de sable / Barres d'armature et treillis	$M_u=981$ kN-m $\epsilon_{max}=5088$ $\mu\epsilon$	Fissures critiques aux extrémités de la zone réparée. Décollement du composite à l'interface béton-colle au droit de la fissure critique.
L3	Jet de sable et préparation spéciale/ -----	$M_u=891$ kN-m $\epsilon_{max}=5891$ $\mu\epsilon$	Fissures critiques au niveau des torons coupés et aux extrémités de la zone réparée. Décollement du composite par arrachement d'une couche du béton de 55 mm d'épaisseur.
L4	Jet de sable et préparation spéciale / Barres d'armature et treillis	$M_u=1033$ kN-m $\epsilon_{max}=5912$ $\mu\epsilon$	Fissures critiques au niveau des torons coupés et aux extrémités de la zone réparée. Déchirure dans une des lamelles de composite puis décollement du composite à l'interface béton-colle au droit de la fissure critique.



Figure 7 – Mode de rupture pour L1



Figure 8 – Mode de rupture pour L2

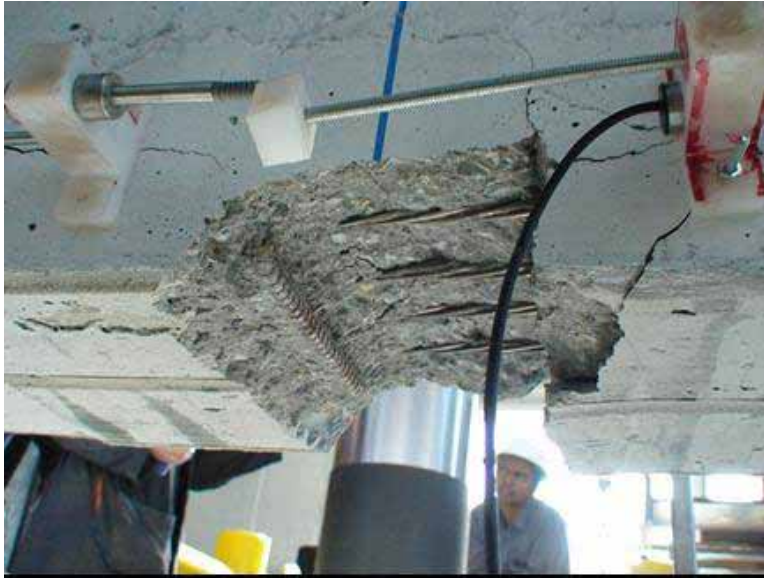


Figure 9 – Mode de rupture pour L3



Figure 10 – Mode de rupture pour L4

Les graphiques présentés sur la figure 11 illustrent le comportement global des spécimens. Le comportement est pratiquement linéaire pour les quatre spécimens jusqu'à un moment d'environ 300 kN-m qui correspond au début de la fissuration.

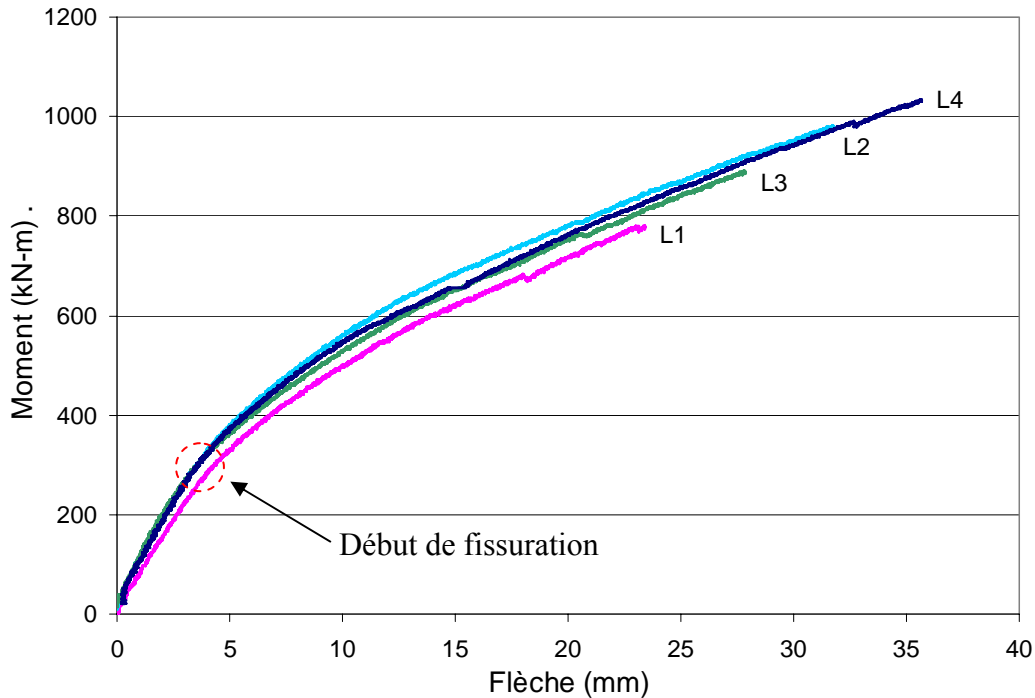


Figure 11 - Flèche au centre – comparaison L1, L2, L3 et L4

ESSAIS IN-SITU

Afin de valider les résultats obtenus au laboratoire, une série d'essais sur les poutres grandeur réelle était requise. Lors des travaux de réfection sur le pont Lavolette à Trois-Rivières, deux poutres précontraintes AASHTO de type IV ont été conservées par le MTQ pour les fins de cette évaluation. Une configuration d'endommagement identique à la phase d'essais réalisés au laboratoire a été adoptée pour les poutres de 30 m. La poutre 1 a été testée sans aucune réparation tandis que la poutre 2 a été réparée avec la technique utilisée pour la poutre L4 testé au laboratoire. Afin d'obtenir une réparation efficace, la technique de renforcement de la zone endommagée par chevauchement de torons coupés ainsi qu'une préparation spéciale pour la surface de collage a été employée. Cinq lamelles de fibre de carbone (CarboDur S1012) ont été collées à la semelle inférieure sur toute la longueur de la poutre 2.

La figure 12 montre la configuration de la poutre AASHTO. Une dalle en béton de 1400 mm de largeur et 165 mm d'épaisseur repose sur la semelle supérieure de la poutre. La figure 13 illustre configuration de renforcement par composite.

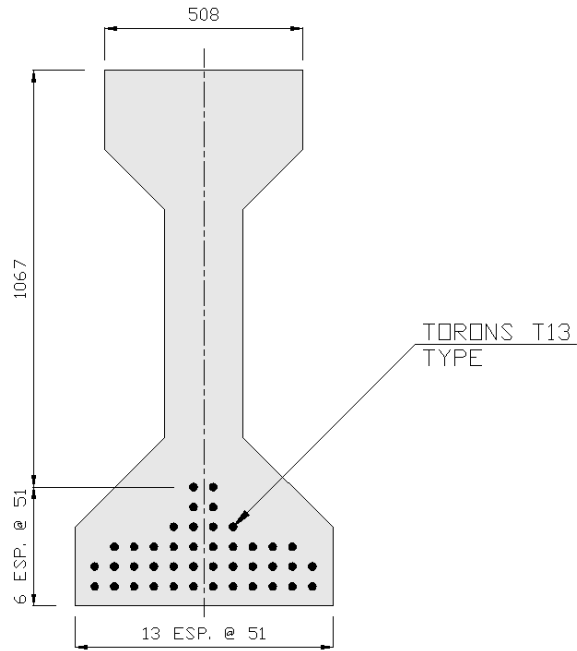


Figure 12 - Configuration de la poutre AASHTO type IV

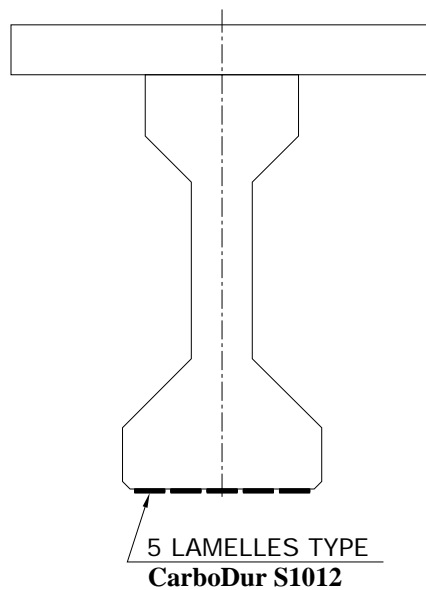


Figure 13 - Configuration de renforcement par cinq lamelles

La figure 14 présente le montage expérimental avant l'essai alors que la figure 15 montre la zone de simulation de l'endommagement ainsi que la poutre réparée.



Figure 14 – Montage expérimental



Figure 15 – Endommagement et réparation

Le comportement en flèche de deux poutres testées en situ est présenté à la figure 16. Ce graphique met en évidence une rigidité accrue pour la poutre 2 due au renforcement par des lamelles de composite. Pour raison de sécurité, les deux tests ont été arrêtés avant d'avoir une rupture finale.

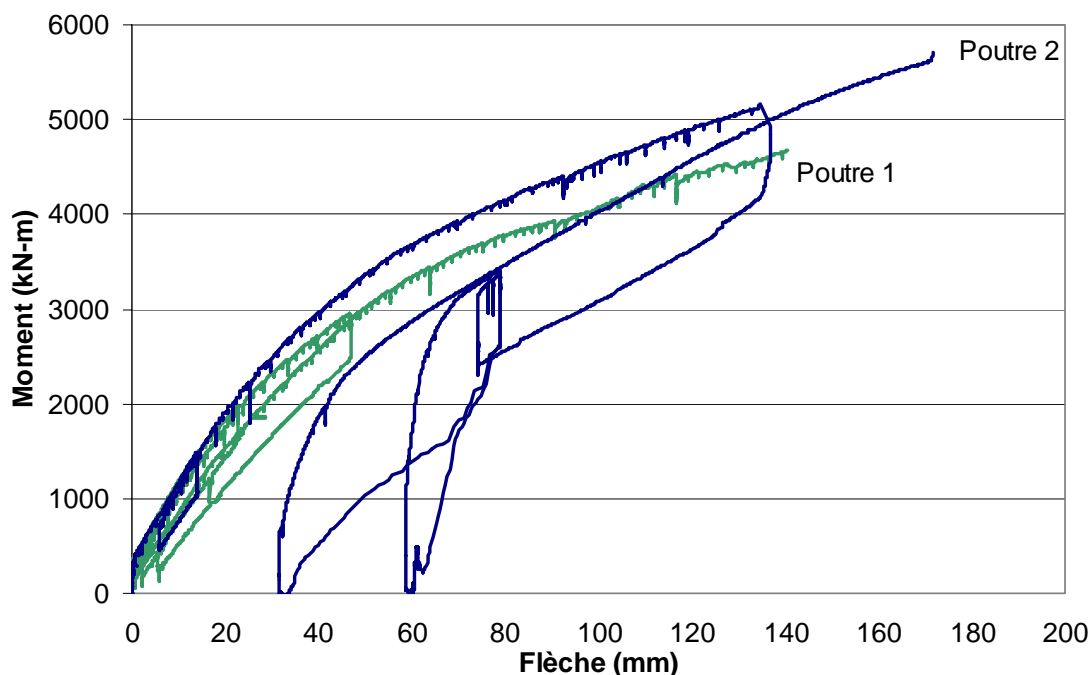


Figure 16 – Flèche au centre – essais in situ

CONCLUSIONS

Dans le cadre de la présente étude différentes configurations de renforcement ont été testées afin d'évaluer l'efficacité de la méthode de renforcement à l'aide de matériaux composites.

La technique de préparation spéciale de surface augmente la résistance de l'interface de collage de 14 % par rapport à la poutre avec collage ordinaire sans renforcement (spécimen L1). La technique de renforcement avec chevauchement de torons endommagés (spécimen L2) présente un gain en résistance de 26% par rapport au spécimen L1. Les trois premiers spécimens ont subi une rupture prématurée par décollement des lamelles. La combinaison de deux techniques employées pour le spécimen L4 offre une amélioration de 32% avec la rupture d'une de deux lamelles. Celle-ci est considérée comme l'option la plus efficace.

Les résultats des deux essais in situ ont été considérée concluants pour valider l'efficacité de la technique de renforcement appliquée sur une poutre AASHTO de type IV.

Cette étape expérimentale était déterminante pour démontrer l'efficacité de la technique de réparation proposée par rapport à la méthode traditionnelle de collage ordinaire ainsi que pour identifier ses limites.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient, pour leur support financier, le ministère des Transports du Québec, la compagnie Sika Construction. Les auteurs remercient les nombreux étudiants et techniciens du laboratoire de Structures de l'École Polytechnique pour leur précieuse assistance.

RÉFÉRENCES

CSA. (2000). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*, CAN/CSA-S6-2000. Association canadienne de normalisation, Rexdale, Ontario.

Folcher, D., Massicotte, B. et Labossière, P. (2002) Étude du renforcement passif d'une poutre en béton précontraint. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal

Koval, V., Massicotte, B. (2007) Efficacité d'utilisation des matériaux composites pour le renforcement de poutres de ponts en béton précontrainte endommagées. Rapport SR08-03, Groupe de recherche en génie des structures, École Polytechnique de Montréal