

DÉVELOPPEMENT ET ÉVALUATION DE NOUVEAUX ÉTRIERS EN FIBRE DE CARBONE COMME ARMATURE DE CISAILLEMENT POUR LES POUTRES DE PONTS EN BÉTON PRÉCONTRAIT

Ahmed El-Sayed, Éhab El-Salakawy, and Brahim Benmokrane
Département de génie civil, Université de Sherbrooke
Sherbrooke, Québec, J1K 2R1

ABSTRACT: Une étude expérimentale sur le développement de nouveaux étriers en PRF (Polymères Renforcés de Fibres) à base de fibres de carbone comme armature de cisaillement pour les poutres en béton a été réalisée durant les deux dernières années à l'Université de Sherbrooke. Cette étude a été réalisée sur trois Phases. La Phase I inclut le développement d'étriers alors que la Phase II inclut les essais de ces étriers dans des blocs de béton pour quantifier l'effet des différents paramètres sur les caractéristiques d'adhérence et la capacité en traction d'étriers noyés dans le béton. La Phase III comprend des essais à grande échelle sur des poutres en béton armé de barres en PRF avec et sans étriers à base de fibres de carbone comme armature de cisaillement (armature d'âme). Dans cette Phase, les poutres ont des dimensions de 250x400x3250 mm et sont armées longitudinalement avec différents types de barres en PRF (carbone et verre) et différents taux d'armature (0,87, 1,23, et 1,72%). Les poutres ont été testées en flexion à quatre points sur une portée de 2750 mm avec une portée de cisaillement de 1000 mm. Les résistances expérimentales à l'effort tranchant des poutres sont comparées avec les prédictions théoriques du manuel de design d'ISIS M03-01, du code CAN/CSA-S806-02, et du guide de calcul ACI 440.1R-03.

Cette publication présente les résultats d'essais de la Phase I et les résultats d'essais complétés de la Phase III. Les résultats des essais indiquent que les nouveaux étriers à base de fibres de carbone développés peuvent être utilisés comme armature de cisaillement dans les poutres en béton. Aussi, pour les poutres en béton armé de PRF, la méthode de calcul de l'ACI 440 pour prédire la résistance à l'effort tranchant due au béton est très conservatrice, particulièrement pour les poutres renforcées de barres PRF à base de fibres de verre. De meilleures prédictions de la résistance à l'effort tranchant sont obtenues en utilisant les équations proposées dans le manuel d'ISIS M03-01 et le Code CAN/CSA-S806-02.

1. INTRODUCTION

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. En Amérique du Nord et plus particulièrement au Québec, la corrosion occasionnée par l'épandage de sel de déglacage est le premier facteur réduisant la durée de vie de l'ouvrage et engendrant des coûts de réparation très grands.

Il faut donc trouver une solution durable pour prolonger la durée de vie des structures de béton armé et pour réduire les coûts de réparation sans cesse croissants. L'une des solutions à envisager est l'utilisation de renforcements en matériaux composites à base de fibres de carbone dans les éléments structuraux en béton des tabliers de ponts (dalle et poutres).

Ce projet, réalisé conjointement à l'Université de Sherbrooke (Professeur Brahim Benmokrane) et l'École Polytechnique de Montréal (Professeur Bruno Massicotte), porte sur la conception de poutres de pont en béton précontraint renforcées avec des étriers en matériaux composites à base de fibres de carbone. Le nouveau Code Canadien sur le Calcul des Ponts Routiers (CAN/CSA-S6-00) permet l'utilisation de renforcements en matériaux composites (armature passive, étrier et armature de précontrainte) pour les éléments structuraux de ponts en béton.

2. OBJECTIFS DU PROJET

Les armatures en PRF sont des matériaux anisotropes avec une résistance transversale plus faible comparativement à la résistance uniaxiale. Ce programme de recherche vise le développement de nouveaux étriers en PRF à base de fibres de carbone comme armature de cisaillement pour des poutres de ponts en particulier, et pour les structures en béton armé d'une façon générale.

La plupart des codes de calcul recommande la traditionnelle équation $V_{cf} + V_f$ pour le calcul de la résistance à l'effort tranchant de poutres en béton armé de PRF (longitudinalement et transversalement). La contribution des étriers à la résistance à l'effort tranchant est évaluée. Cette recherche va permettre de fournir des équations pour le calcul de la résistance à l'effort tranchant de poutres en béton armé de PRF (armature passive ou précontrainte).

3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Pour atteindre les objectifs de cette recherche, un programme expérimental comportant trois Phases a été mis en place. La Phase I porte sur le développement d'étriers en PRF de carbone ayant une résistance en traction au moins équivalente à celle des étriers conventionnels en acier (400-500 MPa. La Phase II, est réalisée pour évaluer la capacité en résistance et la longueur d'ancrage d'un simple étrier en PRF(développé à la Phase I). Afin de simuler le mécanisme de comportement des étriers dans les poutres en béton, l'étrier est noyé dans deux blocs de béton qui sont soumis à des essais de traction. Les paramètres d'essai sont le rayon de courbure (r_b), la longueur (l_t), et le diamètre (d_b) de l'étrier en PRF.

La Phase III comprend, quant à elle, deux séries de poutres d'essais. La série 1 comprend six poutres à renforcées avec deux différents types d'armature longitudinale en PRF (carbone et verre) avec trois poutres de contrôle armées en acier. Cette série est réalisée pour étudier les effets de la différence des modules d'élasticité des barres d'armature en PRF et en acier, et le taux d'armature sur la contribution du béton à l'effort tranchant, V_{cf} , pour des poutres en béton sans armature de cisaillement. La série 2 comprend huit poutres en béton armé pour investiguer les modes de rupture et la contribution des étriers en PRF V_f à l'effort tranchant. Les paramètres d'essai sont l'espacement et la taille des étriers en PRF ainsi que le type de renforcement en flexion (PRF, acier).

Comme ce programme de recherche est en cours, cette publication présente uniquement les résultats des travaux complétés. Les sections suivantes présentent les matériaux, les détails des échantillons et des procédures d'essais, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus lors de la Phase I et la série 1 de la Phase III.

3.1 Matériaux

Les barres courbes (étriers) en PRF à base de fibres de carbone, avec un recouvrement de surface, ont été utilisées dans la Phase I. Les barres sont faites de fibres de carbone longitudinales imprégnées d'une résine vinyl ester utilisant le procédé d'infusion. Le pourcentage de fibres des échantillons testés varie entre 54 et 70% par volume. Les étriers utilisés dans cette étude ont un diamètre nominal de 12,7 mm.

Les barres en PRF à base de fibres de carbone et de verre recouvertes de sable sont utilisées comme armature de traction dans les poutres d'essais de la série 1/Phase III de ce programme de recherche. Les barres d'armature en acier No. 10 M ($d_b = 11.3$ mm) et No. 15M ($d_b = 15.96$ mm) ont été utilisées comme armature de traction dans les poutres de contrôle. Les propriétés mécaniques des barres d'armature ont été déterminées à l'aide d'essais de traction sur des échantillons représentatifs. Le module élastique, la résistance ultime et la déformation ultime de chaque type de barre d'armature sont donnés dans le Tableau 1.

Les poutres ont été fabriquées en utilisant un béton normal (Type V, MTQ). La résistance moyenne en compression des cylindres varie entre 43,6 et 50,0 MPa au moment des essais. La résistance moyenne en traction varie entre 3,0 et 3,7 MPa.

Tableau 1 – Propriétés des barres d'armature

Type de barre	Diamètre (mm)	Aire (mm ²)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance en traction (MPa)	Déformation ultime (%)
PRF carbone	9,50	71	128±5	1536±31	1,20±0,00
	12,70	127	134±9	986±50	0,74±0,05
PRF verre	9,50	71	39±1	608±28	1,56±0,09
	15,90	198	42±1	754±19	1,80±0,04
Acier	11,30	100	200	$f_y = 453$	$\epsilon_y = 0,23$
	15,96	200	200	$f_y = 460$	$\epsilon_y = 0,23$

3.2 Étriers à base de fibres de carbone

La résistance au coude des étriers en PRF est influencée par plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, on peut noter le procédé de fabrication (procédé de courbure et procédé de cure). D'autres facteurs sont la configuration des étriers en PRF dont notamment le rayon de courbure, r_b , et le diamètre de l'étrier, d_b . La composition des étriers en PRF, incluant le pourcentage et le type de fibres, a aussi un effet significatif.

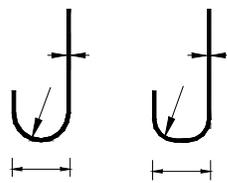
Cinq groupe d'étriers en PRF de carbone (Type A, B, C, D, et E) nous ont été fournis par le manufacturier (Pultrall inc., Thetford Mines). Les principales variables sont le procédé de fabrication et le mûrissement, et le volume en fibres de carbone. Les cinq groupes d'échantillons ont été fabriqués avec une résine analogue à base de vinyl ester.

Les étriers du groupe A ont été produits avec 70% en volume de fibres sans dispositifs d'enfilage.
 Les étriers du groupe B ont été produits avec 62% en volume de fibres sans dispositifs d'enfilage.
 Les étriers du groupe C ont été produits avec 54% en volume de fibres sans dispositifs d'enfilage.
 Les étriers du groupe D ont été produits avec 62% en volume de fibres avec dispositifs d'enfilage.
 Les étriers du groupe E ont été produits avec 54% en volume de fibres avec dispositifs d'enfilage.

Tous les échantillons reçus (3 à 5 échantillons selon le groupe) sont constitués de barres de PRF en fibre de carbone de diamètre 12,7 mm, de forme en U et de longueur totale de 1200 mm, de largeur totale de 290 mm et d'environ 75 mm pour le rayon intérieur des parties courbées (6 fois le diamètre de l'étrier).

Le type E (avec 54% de pourcentage de fibres) a donné la résistance maximale et par conséquent a été retenu pour la suite de cette Phase d'essais. Le Tableau 2 montre les dimensions disponibles et les configurations en J et en U des étriers en PRF.

Tableau 2 – Tailles et configurations disponibles de barres courbes en PRF fournies par le manufacturier.

Legend	d_b (mm)	Min. r_b (mm)	Max. A (mm)	Min. B (mm)
	6.4	25.4	63.5	95.3
	9.5	38.1	95.3	133.4
	12.7	50.8	127.0	165.1
	15.9	63.5	158.8	203.2
	19.1	76.2	190.5	235.0
	22.2	88.9	222.3	273.1
	25.4	101.6	254.0	304.8

Les échantillons de Type E sont des barres en PRF à base de fibres de carbone No.13 ($d_b = 12.7$ mm) en forme de U avec une longueur totale de 1200 mm, une largeur totale de 290 mm, et 75 mm de rayon de courbure (6 fois le diamètre de la barre). Neuf échantillons ont été testés. Sept échantillons ont été testés pour évaluer la résistance au coude. Des essais de traction sur les parties droites des étriers ont été réalisés pour déterminer la résistance uniaxiale à la traction de la partie droite de l'étrier. Pour les deux essais, chaque échantillon a été ancré avec un système d'ancrage à chaque extrémité. Cette méthode d'ancrage permet l'adhérence de la barre dans un tube en acier en utilisant un mortier (résine ou coulis de

ciment). La partie ancrée utilisée dans ce projet consiste en des tubes en acier de 400 mm et 300 mm remplis de mortier de résine à haute performance, pour les barres courbes et les barres droites, respectivement.

La longueur de l'échantillon est de 500 mm. La Figure 1 montre des étriers en PRF à base de fibres de carbone utilisés dans cette Phase. Trois échantillons parmi les sept échantillons testés ont été instrumentés en utilisant des jauges de déformation électrique pour mesurer la déformation en traction des portions courbes et droites comme montré à la Figure 1.

L'essai de traction sur l'étrier de PRF a été réalisé conformément à la méthode d'essai B.12 du document de l'ACI 440 K (2003). Cette méthode d'essai permet de déterminer l'effet de la courbure (ou le rayon de courbure) sur la résistance à la traction de barres en PRF utilisées comme armature passive (ou précontrainte) pour les structures en béton. Cette méthode d'essai nécessite l'utilisation d'un montage spécial. Ce montage est constituée de deux parties : une partie inférieure et une partie supérieure comprenant des coins d'insertion interchangeables. Cette méthode d'essai requiert l'utilisation d'étriers de forme d'un U. La Figure 3 montre le montage d'essai comprenant l'échantillon d'étrier de PRF. Les dimensions des différents éléments métalliques constituant le montage et la méthodologie d'essai sont décrites ailleurs (ACI 440 K, 2003). Les essais de traction sur les parties courbes et droites ont été réalisés en utilisant une machine hydraulique de 270 kN de capacité, opérée manuellement.



Fig. 1 – Échantillons d'étriers

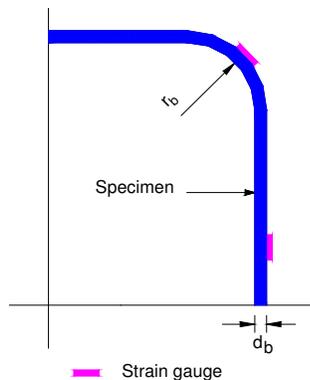


Fig. 2 – Disposition des jauges de déformation

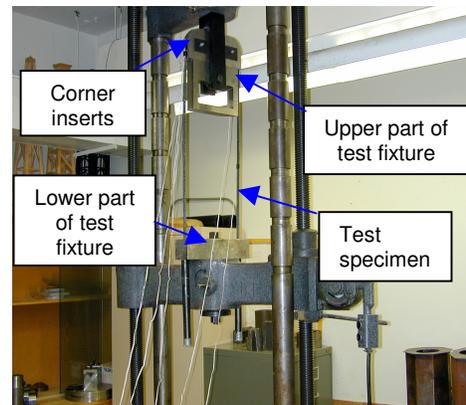


Fig. 3 – Montage pour les essais sur des étriers

3.3 Poutres d'essais

Neuf (9) poutres en béton armé ont été fabriquées et testées jusqu'à la rupture. Ces poutres représentent la série 1 de la Phase III de ce programme de recherche. Les poutres ont les dimensions suivantes : 3250 mm de longueur, 250 mm de largeur, et 400 mm de hauteur comme montré à la Figure. 4. La portée en cisaillement a été prise égale à 1000 mm, correspondant à un rapport portée en cisaillement à la profondeur de 3,1. Ces essais permettent d'évaluer les effets de la différence des modules d'élasticité des barres en PRF et en acier ainsi que le taux d'armature de traction sur la contribution à la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton sans armatures transversales (sans armature d'âme). Ces séries sont divisées en trois groupes avec différents taux d'armature. Chaque groupe contient trois poutres renforcées avec de l'acier, des barres en PRF carbone et des barres en PRF verre avec le taux d'armature. Toutes les poutres renforcées de barres en PRF étaient sur-armées ($\rho > \rho_b$). Les détails des poutres d'essais sont donnés dans le Tableau 3.

Tableau 3 – Résumé des essais sur des poutres en béton armé sans étriers.

Poutre		Armature longitudinale (de traction)					Nb. de poutres
		Barre d'armature	ρ_{act} (%)	ρ_b (%)	ρ_{act} / ρ_b	Rigidité axiale, $E_r A_r$ (N x10 ⁶)	
Groupe I	SN-1	Acier	0,86	3,50	0,25	140	1
	CN-1	FRP Carbone	0,87	0,36	2,40	90,9	1
	GN-1	FRP Verre	0,87	0,74	1,18	27,7	1
Groupe II	SN-2	Acier	1,23	3,15	0,39	200	1
	CN-2	FRP Carbone	1,24	0,75	1,66	136	1
	GN-2	FRP Verre	1,22	0,49	2,50	41,6	1
Groupe III	SN-3	Acier	1,72	3,15	0,55	280	1
	CN-3	FRP Carbone	1,72	0,75	2,28	187,2	1
	GN-3	FRP Verre	1,71	0,49	3,50	58,2	1

Tous les échantillons ont été instrumentés avec des jauges de déformation électriques collées sur les barres d'armature et à mi-portée sur le béton. La déflexion à mi-portée a été mesurée en utilisant deux LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sur chaque côté de la poutre. Les poutres ont été testées en flexion à quatre points, appuyées simplement sur une portée de 2750 mm, comme montré à la Figure 4. La charge a été appliquée à travers deux poutres en forme de I. Le chargement est arrêté lorsque les deux premières fissures de flexion apparaissent et les largeurs de ces fissures initiales sont mesurées manuellement en utilisant un microscope manuelle de 50 x de grossissement. Deux autres LVDT à haute sensibilité (± 0.001 mm) ont été installés pour mesurer électroniquement la largeur des fissures en fonction de l'augmentation de la charge. La formation de fissures sur les poutres a été relevé durant l'essai.

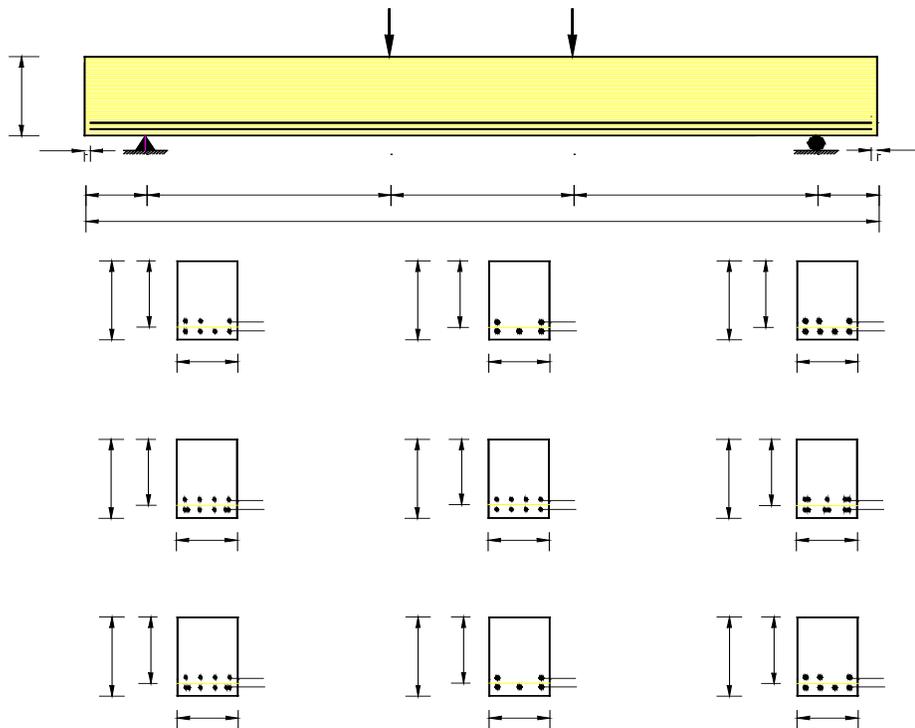


Fig. 4 – Dimensions et configurations des poutres sans étriers

4. RÉSULTATS D'ESSAIS

4.1 Résistance au coude des étriers

Tous les étriers ont été testés jusqu'à la rupture. Le mode de rupture a été une rupture des fibres au niveau de la courbure. La Figure 5 montre un mode de rupture typique au niveau de la partie courbe de l'étrier testé. Les résistances au coude obtenues sur les échantillons testés varient entre 408 et 534 MPa avec une résistance moyenne (f_{fb}) de 460 ± 53 MPa, ce qui est comparable à la résistance en traction des étriers conventionnels en acier.

Pour les parties droites, les quatre échantillons ont rompu à des contraintes de traction variant de 1101 à 1237 MPa avec une résistance moyenne (f_{fu}) de 1185 ± 65 MPa et un module élastique moyen (E_f) de 109 GPa (Tableau 4). La résistance au coude f_{fb} est d'environ 39% de la résistance de la partie droite de l'étrier f_{fu} . La réduction de la résistance est attribuée à une concentration de contraintes et de déformations dans la partie courbe due à la courbure. Ceci peut être confirmé en comparant les déformations ultimes mesurées sur les échantillons courbes et les échantillons droits. Les échantillons courbes ont rompu à une déformation ultime moyenne ($\epsilon_{fb} = 7410 \mu\epsilon$) inférieure à la déformation ultime moyenne ($\epsilon_{fu} = 10871 \mu\epsilon$) des portions droites.

Le Tableau 4 présente aussi la résistance moyenne au cisaillement (τ_{fu}) de étriers (cisaillement direct perpendiculaire aux fibres). Les essais de cisaillement ont été réalisés sur cinq échantillons conformément à la méthode d'essai de l'ACI 440K [4]. Aussi, des essais d'arrachement ont été réalisés sur cinq échantillons conformément à la norme de l'ACI 440K [4] (armature noyée dans des blocs de béton et soumise à un essai d'arrachement « Pullout test »). La longueur d'ancrage a été maintenue constante et égale à $5 d_b$ pour tous les essais. La valeur moyenne de la contrainte d'adhérence maximum est supérieure à 13 MPa.

Le code japonais (Japan Society of Civil Engineers (JSCE 1997) [5]) a retenu l'équation suivante pour l'évaluation de la capacité de traction des barres courbes en PRF.

$$f_{fb} = \left[0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3 \right] f_{fu} \quad (1)$$

Cette équation a été adoptée par le code canadien des ponts (Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC) [6]) pour l'évaluation de la résistance à la traction d'étriers de PRF. La Figure 6 montre que l'Équation 1 surestime la résistance en traction de l'étrier testé dans le cadre de ce projet. Les échantillons testés ont un rayon de courbure relativement grand ($r_b/d_b = 6$).

Tableau 4 – Résultats d'essai de traction sur des étriers en PRF en carbone

Échantillon	Résistance à la traction moyenne (MPa)			Déformation ultime moyenne ($\mu\epsilon$)		E_f (GPa)	τ_{fu} (MPa)
	f_{fb}	f_{fu}	f_{fb} / f_{fu} (%)	ϵ_{fb}	ϵ_{fu}		
Type E	460 ± 53	1185 ± 65	39	7410 ± 362	10871 ± 154	109 ± 2	190 ± 17

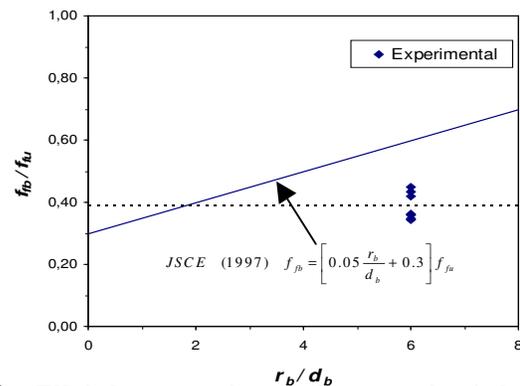


Fig. 5 – Rupture des étriers de PRF aux coudes. Fig. 6 – Effet du rayon de courbure sur la résistance

4.2 Poutres en béton armé sans étriers

Les neuf poutres en béton armé sans étriers (sans armature d'âme) ont rupturé en cisaillement (fissure diagonale). Le mode de rupture en cisaillement diagonal est montré à la Figure 7. Les déformations maximales du béton en compression à la rupture varient entre 966 et 1409 (valeurs inférieures à la déformation ultime en compression du béton, 3500 $\mu\epsilon$). Les déformations maximales en traction mesurées à la rupture varient de 3388 à 4064 $\mu\epsilon$ pour les barres en carbone et de 4910 à 10600 $\mu\epsilon$ pour les barres en verre. Les déformations maximale en traction de l'acier varient entre 2250 et 2720 $\mu\epsilon$. Un résumé des résultats d'essais est donné au Tableau 5. La Figure 7 montre la déflexion à mi-portée en fonction de la charge appliquée pour les poutres testées et la Figure 8 montre la relation entre la valeur du taux d'armature (ρ) et la résistance à l'effort tranchant normalisée ($V_{exp} / \sqrt{f_c} bd$). On peut noter à partir de la Figure 8 que la résistance à l'effort tranchant augmente lorsque le taux d'armature longitudinale augmente. Ce comportement est plus prononcé pour les poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de carbone et les barres en acier. Les deux Figures (Figs. 7 et 8) indiquent que la rigidité de flexion post-fissuration et la résistance à l'effort tranchant des poutres testées sont fonction de la rigidité axiale ($E_r A_r$) des barres d'armature de traction.

Les poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de verre ayant une rigidité axiale plus faible donnent une résistance à l'effort tranchant plus faible comparativement à celles des poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de carbone ou de barres conventionnelles en acier. Ces Figures montrent aussi que les deux poutres CN-2 (PRF en carbone) et SN-1 (acier), ayant la même rigidité axiale (Tableau 3), ont le même comportement en flexion et une résistance à l'effort tranchant analogue.

Ce comportement a été aussi observé pour les deux poutres CN-3 et SN-2. Les résistances à l'effort tranchant expérimentales des poutres renforcées de barres en PRF ont été comparées aux valeurs prédites en utilisant le manuel de design d'ISIS M03-01, du code CAN/CSA-S806-02, et du guide de calcul ACI 440.1R-03, comme montré au Tableau 6.



(a) Poutre CN-3



(b) poutre GN-3

Fig. 6 – Mode de rupture en cisaillement diagonal

Tableau 5 – Résumé des résultats d'essais de flexion sur des poutres sans étriers

Poutre	f_c (MPa)	Charge de rupture (kN)	Résistance à l'effort tranchant, V_{exp} (kN)	$\frac{V_{exp}}{\sqrt{f_c} bd}$	Déflexion à mi-portée à la rupture (mm)	Déformation max ($\mu\epsilon$)		Mode de rupture
						barres	béton	
SN-1	50.0	197	98.5	0.17	11.3	2720	966	Y-DT
CN-1	50.0	155	77.5	0.13	10.8	3410	968	DT
GN-1	50.0	141	70.5	0.12	34.0	10600	1409	DT
SN-2	44.6	233	116.5	0.21	9.7	2250	1078	DT
CN-2	44.6	208	104.0	0.19	11.9	4064	987	DT
GN-2	44.6	120	60.0	0.11	13.8	4910	1070	DT
SN-3	43.6	289	144.5	0.27	13.1	---**	1236	DT
CN-3	43.6	249	124.5	0.23	15.6	3388	1132	DT
GN-3	43.6	155	77.5	0.14	17.3	5106	1037	DT

* Y-DT = diagonal tension failure after yielding; DT = diagonal tension failure; ** strain gauges malfunctioned

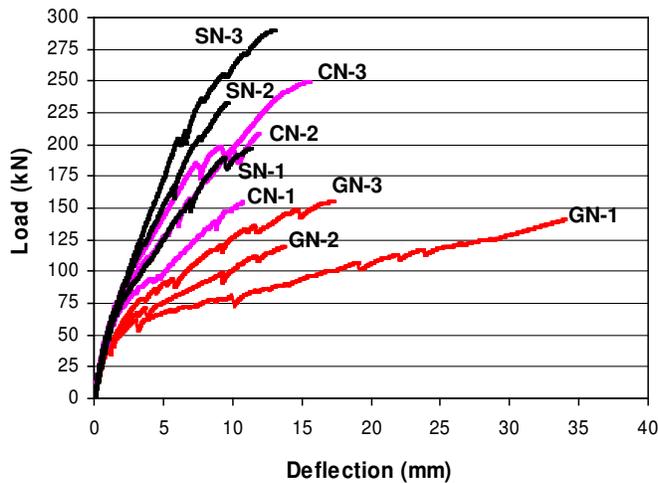


Fig. 7 – Relation Charge-Déflexion

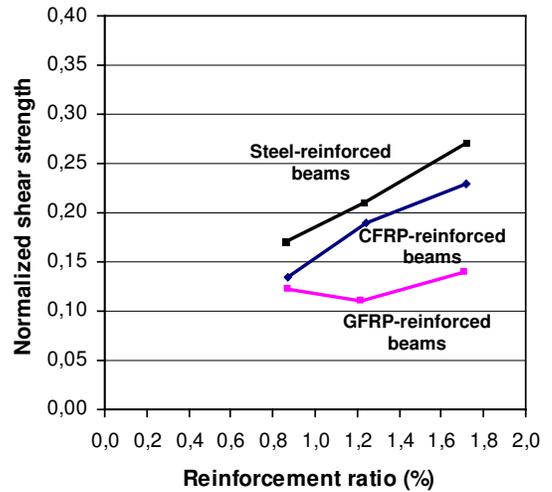


Fig. 8 – Résistance à l'effort tranchant normalisée versus taux d'armature

Pour les poutres sans armature de cisaillement et avec une hauteur effective plus grande que 300 mm, le manuel d'ISIS recommande l'utilisation de l'équation suivante pour l'évaluation de la résistance à l'effort tranchant procurée par le béton V_{cf} des éléments renforcés longitudinalement avec des barres en PRF.

$$V_{cf} = \left[\frac{260}{1000 + d} \right] \lambda \phi_c \sqrt{f_c} bd \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} \geq 0.1 \lambda \phi_c \sqrt{f_c} bd \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} \quad (2)$$

Où, b et d sont la largeur et la hauteur effective des sections des poutres, respectivement, E_f et E_s sont les modules élastiques des barres en PRF et en acier respectivement, f_c est la résistance à la compression du béton. Les facteurs λ et ϕ_c , qui prennent en compte la densité et la résistance du béton, respectivement, sont pris égaux à 1.0.

L'équation proposée par le code CSA-S806-02 est la suivante :

$$V_{cf} = \left[\frac{130}{1000 + d} \right] \lambda \phi_c \sqrt{f_c} bd \geq 0.08 \lambda \phi_c \sqrt{f_c} bd \quad (3)$$

Les facteurs λ et ϕ_c ont été pris égal à 1,0. Il est évident que l'Équation 3 peut être dérivée de l'Équation 2 par substitution du terme $\sqrt{E_f / E_s}$ par 0,5, en considérant $E_f = 50$ GPa et $E_s = 200$ GPa. L'Équation 3 représente la limite inférieure de la contribution du béton à la résistance à l'effort tranchant des éléments en béton renforcés de barres en PRF, comme montré dans le Tableau 6. Aussi, les deux équations ne prennent pas en compte du taux d'armature en traction.

Le guide de l'ACI 440 propose l'équation suivante :

$$V_{cf} = \frac{\rho_f E_f}{90 \beta_1 f_c} \left[\frac{\sqrt{f_c}}{6} bd \right] \leq \frac{\sqrt{f_c}}{6} bd \quad (4)$$

Où ρ_f est le taux d'armature des barres en PRF et β_1 est un facteur pris égal à 0.85 pour la résistance du béton f_c jusqu'à 28 MPa. Pour des résistances supérieures à 28 MPa, ce facteur est réduit de 0.05 pour chaque 7 MPa de résistance en excès de 28 MPa, mais pas moins que 0,65. L'Équation 3 a été aussi utilisée pour la prédiction de la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton armé de PRF testées.

Table 6 – Comparaison des résistances à l'effort tranchant expérimentales et prédites

Poutre	Résistance expérimentale au cisaillement, V_{exp} (kN)	ISIS-M03-01		CSA-S806-02		ACI 440.1R-03	
		V_{pred}	V_{exp} / V_{pred}	V_{pred}	V_{exp} / V_{pred}	V_{pred}	V_{exp} / V_{pred}
CN-1	77.5	90.4	0.86	56.5	1.37	34.5	2.25
GN-1	70.5	49.9	1.41	56.5	1.25	10.5	6.71
CN-2	104.0	87.4	1.19	53.4	1.94	51.7	2.01
GN-2	60.0	48.9	1.23	53.4	1.12	15.8	3.80
CN-3	124.5	86.4	1.44	52.8	2.36	70.9	1.75
GN-3	77.5	48.4	1.60	52.8	1.47	22.1	3.51

Comme montré au Tableau 6, l'équation proposée par le code CSA donne de bonnes prédictions pour les poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de verre et les prédictions sont plus conservatrices pour les poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de carbone. D'un autre côté, l'équation de l'ACI 440 donne des résultats très conservateurs, particulièrement pour les poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de verre. Cependant, on peut noter que les meilleures prédictions sont obtenues à l'aide de l'équation du manuel d'ISIS pour les poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de verre ou à base de fibres de carbone.

5. CONCLUSIONS

Un programme de recherche comportant trois phases d'étude est en cours à l'Université de Sherbrooke pour le développement d'étriers en PRF à base de fibres de carbone comme armature de cisaillement pour les poutres maîtresses de ponts en particulier et les structures en béton en général. Les résultats des essais obtenus sont encourageants et peuvent être résumés comme suit:

- (a) Des étriers en PRF à base de fibres de carbone ont été développés comme armature au cisaillement pour les poutres en béton. La résistance en traction développée par les étriers (au coude) correspond à environ 40% de la résistance en traction de la portion droite de l'étrier.

Cependant, la résistance de l'étrier au coude est comparable à la résistance en traction des étriers conventionnels en acier.

- (b) La rigidité flexionnelle et la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton armé de PRF sans étriers augmentent avec l'augmentation du taux d'armature de traction. Par ailleurs, les résultats indiquent que les comportements à la flexion et à l'effort tranchant apparaissent être en fonction de la rigidité axiale des barres d'armature de PRF.
- (c) L'équation proposée par CSA-S806-02 pour la calcul de la résistance à l'effort tranchant procurée par le béton de poutres avec une hauteur effective plus grande que 300 mm et sans étriers donne de bonnes prédictions pour les poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de verre et les prédictions sont plus conservatrices pour les poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de carbone.
- (d) D'un autre côté, la méthode de calcul de l'ACI 440 donne des résultats très conservateurs, particulièrement pour les poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de verre. Généralement, les meilleures prédictions peuvent être obtenues par l'équation proposée dans le manuel d'ISIS pour les poutres renforcées de barres en PRF à base de fibres de verre ou de carbone.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie du Canada (CRSNG) pour son support financier, Pultral Inc. (Thetford Mines, Québec), le Ministère des Transports du Québec, et le Réseau des centres d'excellence ISIS-Canada et l'Université de Sherbrooke.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Shehata, E., Morphy, R., and Rizkalla, S., "Fibre Reinforced Polymer Shear Reinforcement for Concrete Members: Behaviour and Design Guidelines," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, 2000, pp 859-872.
- [2] Ishihara, K., Obara, T., Sato, Y., Ueda, T., and Kakuta, Y., "Evaluation of Ultimate Strength of FRP Rods at Rent-up Portion," *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, Japan, Vol. 2, 1997, pp 27-34.
- [3] Maruyama, T., Honama, M., and Okamura, H., "Experimental Study on Tensile Strength of Bent Portion of FRP Rods," *Fiber-Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures, SP-138*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 1993, pp. 163-176.
- [4] ACI 440 K, *Guide Test Methods for Fiber Reinforced Polymer (FRP) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2003, 112 p.
- [5] Machida, A., *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fibre Reinforcing Materials*, Concrete Engineering Series 23, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 1997, 325 p.
- [6] CAN/CSA-S6-00, *Canadian Highway Bridge Design Code*, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2000, 192 p.
- [7] ISIS-M03-01, *Reinforcing Concrete structures with Fibre Reinforced Polymers*, the Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada, University of Manitoba, Canada, 2001, 81 p.
- [8] CSA S806-02, *Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers*, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2002, 177 p.
- [9] ACI 440.1R-03, *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2003, 41 p.