

# Renforcement au cisaillement de poutres en béton armé par des lamelles composites collées à l'aide de résine époxy

## RÉSUMÉ

Cet article présente les résultats d'une investigation expérimentale en laboratoire sur des poutres en béton armé renforcées au cisaillement à l'aide de lamelles en matériaux composites à base de fibres de carbone collées extérieurement sur les parois de la poutre.

Trois séries de poutres sont considérées dans cette étude :

- une série de poutres de référence à pleine capacité,
- une série de poutres sous-dimensionnées au cisaillement,
- une série de poutres renforcées au cisaillement à l'aide de lamelles, verticales et inclinées, en matériaux composites à base de fibres de carbone collées sur les parois de la poutre.

Les résultats de l'étude ont montré que la technique de renforcement au cisaillement à l'aide de ces lamelles peut améliorer la résistance au cisaillement, mais aussi la rigidité globale de la poutre en atténuant sensiblement l'étendue de la fissuration diagonale. Ils ont également montré que les lamelles inclinées sont plus performantes que les lamelles verticales. Toutefois, à haut niveau de chargement, l'ancrage des lamelles dans la zone tendue de la poutre pourrait subir des décollements attribués aux concentrations de contrainte dans cette zone. Ces décollements empêcheraient la poutre renforcée d'atteindre sa pleine capacité. D'autres études se poursuivent pour explorer d'autres méthodes de renforcement.

**MOTS CLÉS :** 32-35 - Béton armé - Poutre - Renforcement (gén) - Cisaillement - Composite - Collage - Fibre - Carbone - Essai - Laboratoire - Résine époxyde.

Omar CHAALLAL  
Ingénieur, Ph.D., Professeur

Marie-José NOLLET  
Ingénieur, Ph.D., Professeur

Daniel PERRATON  
Ingénieur, Ph.D., Professeur

École de technologie supérieure  
Université du Québec

## Introduction

Il est à présent établi que la moitié des 600 000 ponts autoroutiers nord-américains a besoin d'être soit réhabilitée, soit remplacée.

Une grande partie de ces ponts a largement dépassé sa durée de vie et ne répond désormais plus aux exigences des normes actuelles, car ces ponts sont généralement conçus pour des charges et des surcharges nettement en deçà de celles autorisées. À cela s'ajoute, dans certains cas, le problème de la corrosion de l'acier d'armature, aggravée par l'utilisation des sels de dé verglaçage, ainsi que celui de l'éclatement et de la désagrégation du béton qui en résultent.

Parmi les techniques de renforcement préconisées, les plaques et lamelles en matériaux composites à base de fibres collées à l'aide d'époxy offrent plusieurs avantages, notamment du point de vue du coût (lorsque celui-ci inclut l'entretien), de la durabilité et de la légèreté. Ce dernier aspect est important dans la mesure où les plaques de renforcement en matériaux composites peuvent être appliquées alors que la structure est en service. Ceci peut, dans certaines situations, être très économique et très pratique, notamment en milieu urbain où la moindre perturbation du flux de circulation peut s'avérer chaotique.

Plusieurs recherches traitant du comportement des poutres renforcées à l'aide de plaques en matériaux composites à base de fibres ont été récemment entreprises (Inaba et al., 1995 ; Chaallal et al., 1996 ; Finch et al., 1994 ; Meier et al., 1992 ; Ritchie et al., 1991 ; Rostasy et al., 1992 ; An et al., 1991 ; Triantafillou et Plevris, 1991 ; Sharif et al., 1994). Mais il s'agit dans la grande majorité des cas de

renforcement en flexion, si bien que très peu de données sont disponibles pour l'ingénieur sur la faisabilité du renforcement au cisaillement. La recherche décrite dans cet article s'inscrit précisément dans cette optique et est donc limitée au renforcement au cisaillement des poutres en béton armé à l'aide de lamelles en matériaux composites à base de fibres de carbone.

## Aspects théoriques

Dans le cas d'une poutre conventionnelle, la force de résistance en cisaillement initiale,  $V_{ri}$ , résulte de la composante reprise par le béton,  $V_c$ , et de celle reprise par les étriers en acier,  $V_s$ , soit :

$$V_{ri} \geq V_c + V_s \quad (1)$$

En pratique, le renforcement au cisaillement a pour but d'accroître cette résistance initiale d'une force  $\Delta V = (V_{rf} - V_{ri})$  où  $V_{rf}$  est la force de résistance en cisaillement finale ciblée, telle que :

$$V_{rf} \geq V_c + V_s + V_F \quad (2)$$

où  $V_F$  est la composante reprise par le renforcement en matériaux composites,

$$V_F \geq \Delta V \quad (3)$$

Conformément aux normes canadiennes (CSA, 1994), par exemple,  $V_c$  est donné par :

$$V_c \leq 0,2 \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (4a)$$

si l'une ou l'autre des conditions suivantes sont vérifiées

$$A_v > A_{v,min} = 0,06 s \sqrt{f'_c} b_w / f_y \text{ ou } d \leq 300 \text{ mm},$$

et, dans le cas contraire, par

$$V_c = \left( \frac{260}{1000 + d} \right) \quad (4b)$$

$$\phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \geq 0,1 \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d$$

où

- $\phi_c$  = facteur de pondération sur la résistance du béton ;
- $f'_c$  = résistance du béton en compression ;
- $b_w$  = largeur de l'âme de la poutre ;
- $d$  = distance entre la fibre la plus comprimée et le centre de gravité de l'armature tendue ;
- $f_y$  = contrainte nominale élastique de l'acier d'armature ;
- $A_v$  = section de l'armature transversale en acier ;
- $s$  = espacement des étriers.

Par ailleurs, en supposant qu'aussi bien les étriers en acier que les lamelles en matériaux

composites sont inclinés d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale (fig. 1), les composantes  $V_s$  et  $V_F$  peuvent s'écrire :

$$V_s = n_s \phi_s A_v f_y \sin \alpha = \phi_s A_v f_y \frac{\delta}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha \tan \theta) \quad (5a)$$

$$V_F = n_F \phi_F A_{vF} \sin \alpha = \phi_F A_{vF} f_{yF} \frac{\delta}{s_F} (\sin \alpha + \cos \alpha \tan \theta) \quad (6a)$$

où

➤  $n_F$  = nombre de paires de lamelles traversant la fissure ;

➤  $\phi_F$  = coefficient de pondération de la résistance des lamelles ;

➤  $A_{vF}$  = section des lamelles transversales ;

➤  $f_{yF}$  = résistance nominale des lamelles en traction ;

➤  $s_F$  = espacement des lamelles.

En supposant  $\delta = d$  et  $\theta = 45^\circ$ , alors :

$$V_s = \phi_s A_v f_y \frac{d}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (5b)$$

$$V_F = \phi_F A_{vF} f_{yF} \frac{d}{s_F} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (6b)$$

En combinant les équations (3) et (6), l'aire de l'armature transversale de renforcement en matériaux composites  $A_{vF}$  (ou son espacement  $s_F$ ) requise pour reprendre  $\Delta V$  peut être aisément déduite :

$$A_{vF} = \frac{(V_f - V_c - V_s) s_F}{\phi_F f_{yF} d (\sin \alpha + \cos \alpha)} = \frac{\Delta V \times s_F}{\phi_F f_{yF} d (\sin \alpha + \cos \alpha)} \quad (7)$$

ou, dans le cas où les lamelles sont verticales ( $\alpha = 90^\circ$ ) :

$$A_{vF} = \frac{(V_f - V_c - V_s) s_F}{\phi_F f_{yF} d} = \frac{\Delta V \times s_F}{\phi_F f_{yF} d} \quad (8)$$

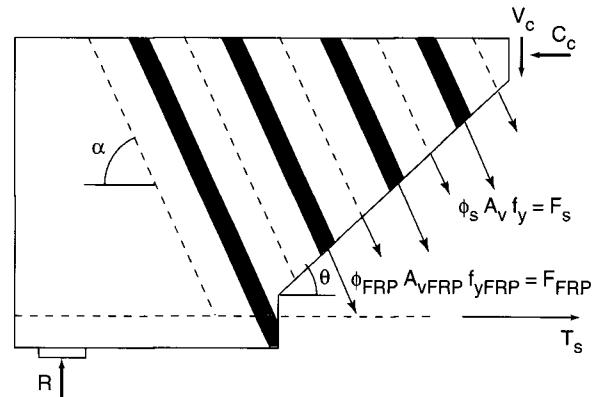


Fig. 1 - Forces internes dans les armatures transversales d'une poutre renforcée.

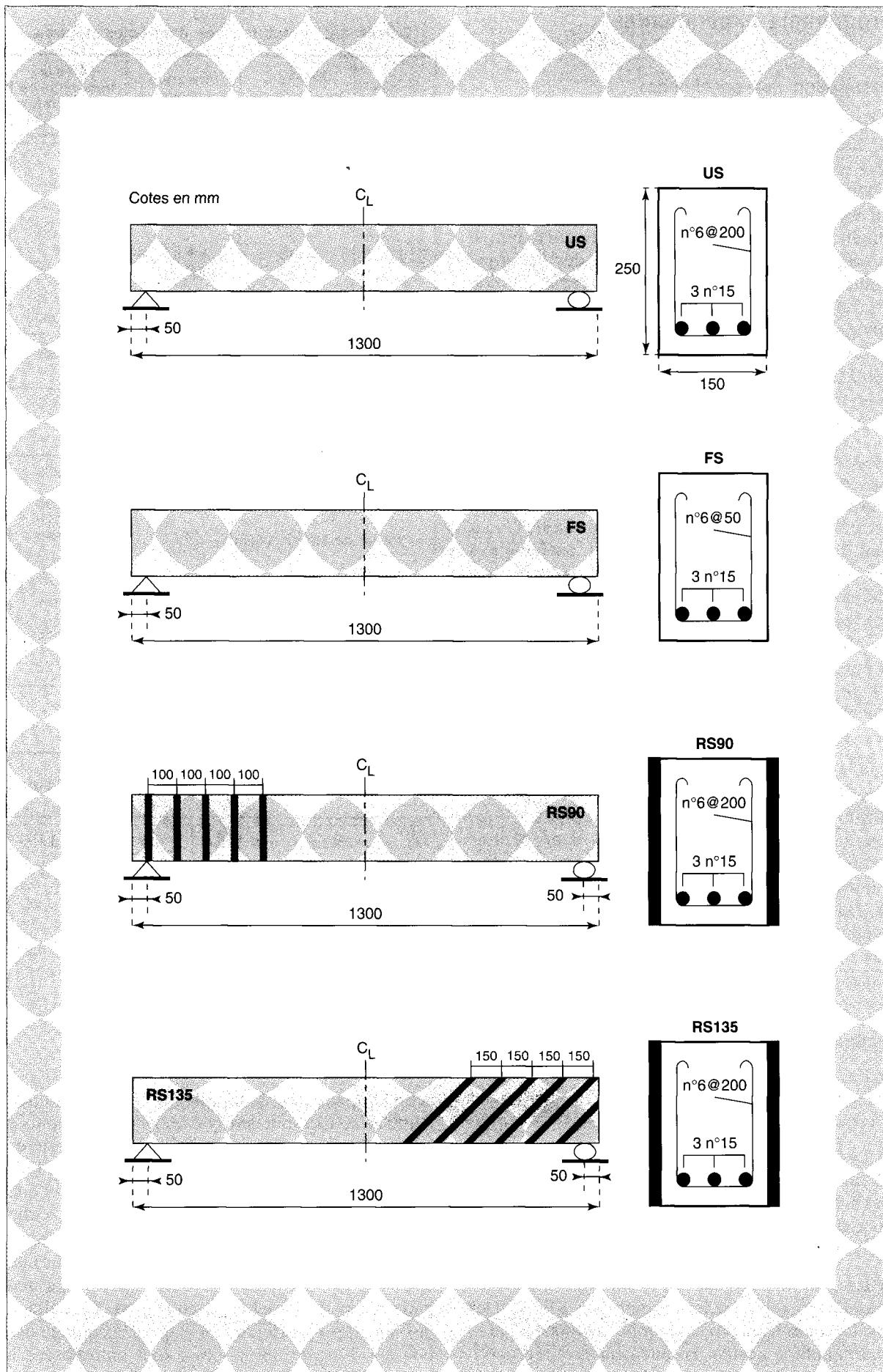


Fig. 2 - Détails des modèles de poutre US, FS, RS90 et RS135.

## Programme expérimental

### Description des spécimens

Trois séries de poutres en béton armé (huit poutres au total), de section rectangulaire (150 mm × 250 mm) et ayant une longueur totale de 1 300 mm, sont considérées. La hauteur des poutres fut choisie pour permettre un ancrage suffisant des lamelles en matériaux composites, ce qui explique la rigidité relativement élevée des poutres. Toutefois, les poutres sont confectionnées à l'aide d'un même béton commercial ordinaire, livré au laboratoire. Des cylindres et poutrelles de contrôle furent également confectionnés avec le même béton pour évaluer les résistances en compression et en traction ainsi que les modules d'élasticité et de rupture du béton.

Les deux poutres de la première série sont conçues pour résister à la pleine capacité en cisaillement et sont désignées par FS (*Full strength in Shear*). Les deux poutres de la deuxième série, quant à elles, sont sous-dimensionnées en cisaillement et sont désignées par US (*Under-designed in Shear*). Les quatre dernières poutres de la troisième série sont identiques aux poutres US, mais elles sont renforcées au cisaillement, à l'aide de lamelles en matériaux composites à base de fibres de carbone collées sur les côtés de la poutre, pour atteindre la même résistance au cisaillement que les poutres FS. Elles sont désignées par RS (*Reinforced strength in Shear*).

Ces lamelles sont collées perpendiculairement à l'axe longitudinal de la poutre pour deux poutres (RS90) et à un angle de 45° par rapport à l'axe longitudinal de la poutre pour les deux poutres restantes (RS135). La section des lamelles requise fut estimée à l'aide des équations (7) et (8). Les poutres de toutes les séries sont identiquement armées en flexion (fig. 2). Les détails des armatures et des renforcements des différentes séries sont présentés dans le tableau I.

### Matériaux utilisés

- ◆ La composition du béton utilisé est présentée dans le tableau II et les propriétés de l'acier d'armature dans le tableau III.
- ◆ Les lamelles de renforcement, de section 50 mm × 1 mm, sont en matériaux composites à base de fibres de carbone unidirectionnelles et sont produites par SIKA. Leurs propriétés sont également présentées dans le tableau III.
- ◆ La colle utilisée est une résine époxy appelée Sikadur-30, également produit par SIKA. Des essais préliminaires en laboratoire ont montré que ce type de colle convenait parfaitement au type d'application considéré dans cette étude. Les propriétés de Sikadur-30 sont présentées dans le tableau III.

TABLEAU I  
Détails des armatures des différentes poutres

Modèle de poutre	Armature longitudinale (%)	Armature transversale en acier	Lamelle transversales en matériaux composites
FS	3ø15 (1,90)	ø6 e = 50 mm	-
US	3ø15 (1,90)	ø6 e = 200 mm	-
RS90	3ø15 (1,90)	ø6 e = 200 mm	LV à 100 mm
RS135	3ø15 (1,90)	ø6 e = 200 mm	LI à 150 mm

$\text{ø}6 = 28 \text{ mm}^2$ ;  $\text{ø}15 = 200 \text{ mm}^2$ ; LV = lamelle verticale de 50 mm<sup>2</sup>; LI = lamelle inclinée de 50 mm<sup>2</sup>

TABLEAU II  
Composition et propriétés du béton

Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	370
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	890
Gravier de 10 mm (kg/m <sup>3</sup> )	850
Eau (kg/m <sup>3</sup> )	185
Air entraîné (pourcent en poids)	0,1
Résistance en compression, $f_c$ (MPa)	35
Module d'élasticité, $E_c$ (GPa)	26

TABLEAU III  
Propriétés des matériaux utilisés

Propriété	Acier	Lamelle en matériaux composites	Époxy
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	7 800	1 400	1 650
Module d'élasticité (GPa)	200	150	12,8
Contrainte élastique limite en traction (MPa)	400	2 400	> 26
Contrainte élastique limite en compression (MPa)	400	-	> 100
Élongation maximale (%)	16	1,4	-

### Préparation et cure

Avant l'application de la colle, les côtés des poutres RS90 et RS135 sont nettoyés au jet de sable, puis à l'air comprimé, afin d'améliorer leurs propriétés d'adhérence. Les lamelles sont coupées à la longueur désirée et bien nettoyées à l'acétone, tel que recommandé par le manufacturier. La colle Sikadur-30 est mélangée manuellement et appliquée uniformément à l'aide d'une spatule sur une épaisseur de 1 mm sur les côtés des poutres, d'une part, et sur les lamelles, d'autre part. Le collage des lamelles est effectué 28 j après le coulage des poutres. Ensuite, les poutres sont entreposées à température ambiante au laboratoire pendant 7 j avant d'être mises à l'essai.

## Procédure d'essai

Les poutres sont instrumentées à l'aide d'un capteur de déplacement LVDT (*Linear variable displacement transducer*) pour mesurer la flèche au centre de la poutre. Des jauge électriques sont également collées sur les armatures pour y mesurer les déformations unitaires et identifier ainsi la charge correspondant à la plastification de l'acier d'armature. Les poutres de portée 1 200 mm sont alors soumises à l'essai de flexion quatre-points. Un système d'acquisition automatique est utilisé pour le suivi aussi bien du chargement que des flèches et des déformations correspondantes. La charge est appliquée pas à pas à l'aide d'un vérin hydraulique et est mesurée à l'aide d'une cellule de charge. À la fin de chaque pas de chargement, les fissures sont identifiées et reliées à la charge appliquée.

## Résultats expérimentaux et discussions

Quelques résultats expérimentaux sont résumés dans le tableau IV. On y trouve les charges et les flèches correspondant à la plastification de l'acier d'armature longitudinale, les charges et les flèches correspondant au stade ultime, ainsi que les modes de rupture observés. Il convient de noter que la plastification correspond à une déformation mesurée de 2 000  $\mu\text{m}/\text{m}$ , alors que le stade ultime correspond à l'instant où la poutre n'est plus en mesure d'accueillir des déformations additionnelles au même niveau de chargement. Également présenté dans le tableau IV le facteur de ductilité en déplacement,  $\mu_d$ , défini comme le rapport de la flèche ultime sur la flèche de plastification. Les courbes typiques charge-déplacement à mi-portée sont présentées sur la figure 3 pour comparaison. À noter que les courbes des autres poutres sont très similaires à celles de la figure 3, et n'ont pas été tracées sur la même figure par souci de clarté.

La première fissure de flexion est apparue à environ 13 kN pour toutes les poutres. Après cette première fissuration, toutes les poutres ont subi une réduction de rigidité, comme on pouvait s'y attendre. Cette réduction fut néanmoins beaucoup plus prononcée dans les poutres US. Du point de vue de la restauration de la rigidité, les lamelles inclinées ont été plus efficaces que les lamelles verticales. Les aciers longitudinaux des poutres US n'ont pu atteindre leur point de plastification, contrairement à ceux des poutres RS90 et RS135. Par conséquent, la charge maximale atteinte par les poutres US (110 kN) était substantiellement plus petite que celles développées par les modèles RS90 (190 kN) et RS135 (199 kN). Ceci est attribué aux lamelles en matériaux composites, qui ont substantiellement atténué la fissuration diagonale dans la zone de cisaillement.

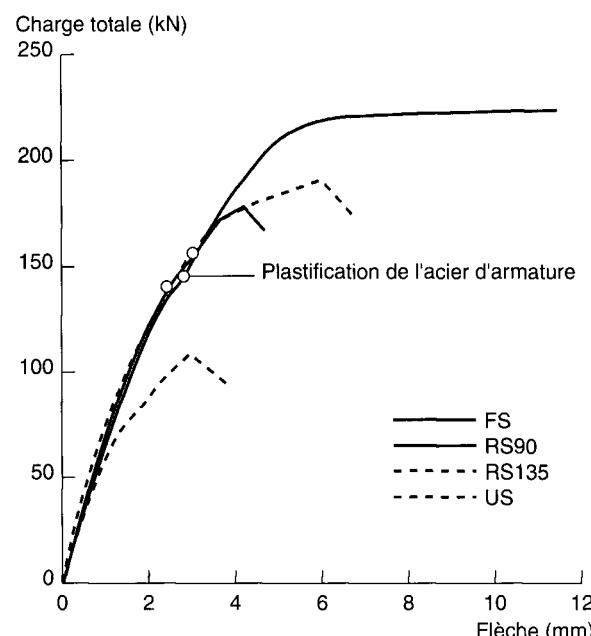


Fig. 3 - Charge appliquée versus flèche à mi-portée.

TABLEAU IV  
Résultats expérimentaux

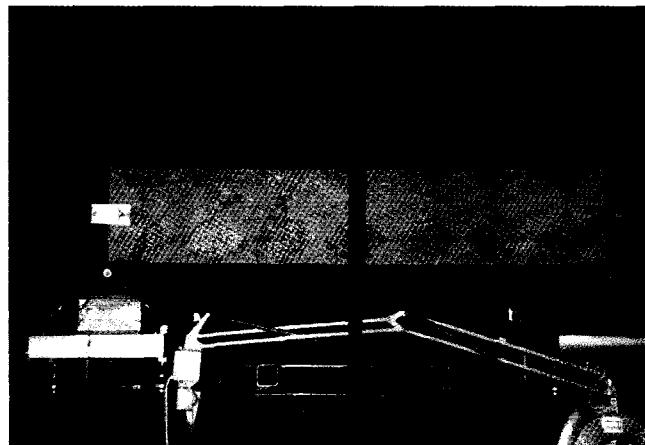
Poutre	À la limite élastique		Au stade ultime		Facteur de ductilité $\mu_d$	Mode de rupture
	Charge * (kN)	Flèche (mm)	Charge * (kN)	Flèche (mm)		
FS1	140	2,64	220	12,1	4,58	Écrasement du béton
FS2	145	2,73	216	11,5	4,21	Écrasement du béton
US1	--	--	110	3,91	--	Fissure diagonale
US2	--	--	103	3,02	--	Fissure diagonale
RS90-1	150	2,90	175	3,87	1,33	Fissure le long de la 2 <sup>e</sup> lamelle
RS90-2	153	2,82	190	3,79	1,34	Fissure au-dessous de la poutre
RS135-1	135	2,30	188	5	2,17	Fissure au-dessous de la poutre
RS135-2	145	2,58	199	4,92	1,91	Fissure au-dessous de la poutre

\* Charge totale, P

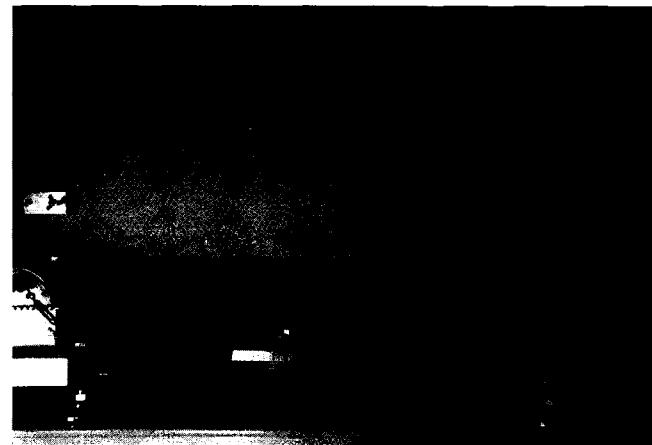
Dans les poutres US, les fissures diagonales sont apparues à une charge moyenne de 65 kN. Ces fissures diagonales se sont vite propagées dans la zone de compression jusqu'à atteindre à la rupture une distance de 50 mm de la fibre la plus compressée de la poutre (fig. 4). Dans les poutres RS90 et RS135, les premières fissures diagonales sont apparues à une charge moyenne de 100 kN et 130 kN, respectivement. Les lamelles inclinées des poutres RS135 ont empêché la propagation des fissures diagonales (fig. 5). En revanche, les lamelles verticales des poutres RS90 semblent avoir changé la trajectoire des fissures diagonales, qui étaient désormais moins inclinées par rapport à la verticale, comparées aux poutres US.

Les poutres US et la poutre RS90-1 ont subi une rupture par cisaillement ; elles ne pouvaient donc pas atteindre leur pleine capacité en

flexion. La fissure de cisaillement, qui a causé la rupture de la poutre RS90-1, a engendré un décollement important le long du côté gauche de la seconde lame à partir de l'appui droit (fig. 5). La rupture des poutres RS135 et de la poutre RS90-2 était principalement due à une fissure longitudinale développée au-dessous des poutres le long de l'armature longitudinale interne. Cette fissuration, plutôt inhabituelle, est attribuée à des contraintes excessives de décollement au niveau de la zone d'ancrage des lamelles dans la partie tendue de la poutre. Il convient de noter que, dans cette partie de la poutre, une forte concentration de la contrainte normale de traction est également présente, notamment à haut niveau de chargement. Ce décollement s'est produit le long du plan de faiblesse que constitue le plan des armature transversale et longitudinale.

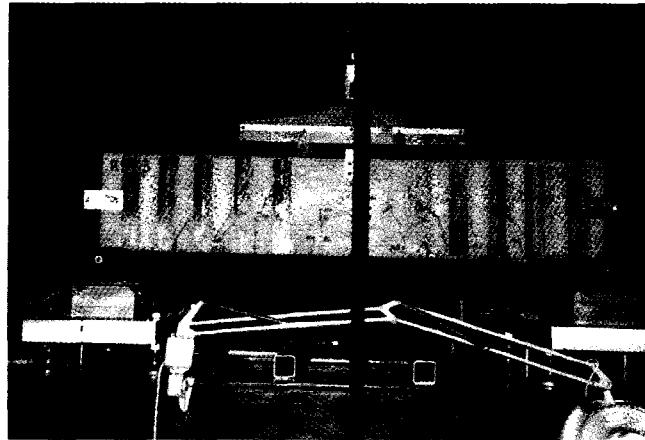


*Spécimen US.*

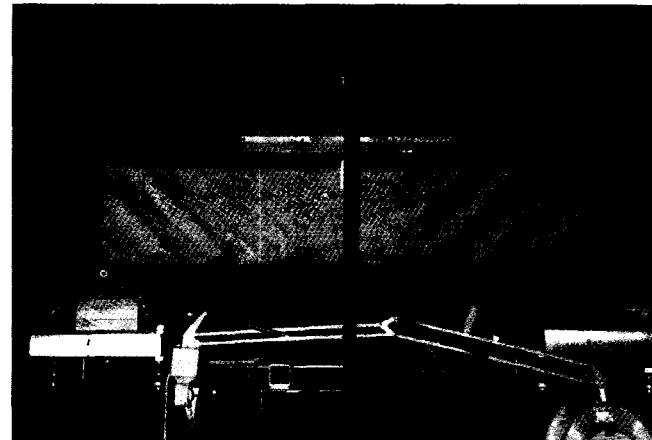


*Spécimen FS.*

Fig. 4 - Vues typiques des poutres US et FS après essais.



*Spécimen RS90.*



*Spécimen RS135.*

Fig. 5 - Vues typiques des poutres RS90 et RS135 après essais.

## Conclusion

La présente étude avait pour objectif d'explorer la possibilité de renforcement au cisaillement de poutres à l'aide de lamelles en matériaux composites à base de fibres collées extérieurement sur les parois des poutres. Les résultats de l'étude ont montré que la technique de renforcement au cisaillement à l'aide de ces lamelles peut améliorer la résistance au cisaillement mais aussi la rigidité globale de la poutre en atténuant sensiblement l'étendue de la fissuration diagonale. Ils ont également montré que les lamelles inclinées sont plus performantes que les lamelles verticales. Toutefois, à haut niveau de chargement, l'ancrage

des lamelles dans la zone tendue de la poutre pourrait subir des décollements attribués aux concentrations de contraintes dans cette zone. Ces décollements empêcheraient la poutre renforcée d'atteindre sa pleine capacité. Aussi, bien que d'autres études expérimentales et théoriques soient nécessaires pour asseoir toute conclusion définitive, des études préliminaires laissent penser que l'utilisation de lamelles continues en U pourrait améliorer davantage la technique de renforcement par lamelles verticales. La continuité offerte par la géométrie des lamelles en U minimiseraît l'effet de la concentration des contraintes. Des études se poursuivent actuellement dans nos laboratoires pour explorer cette piste.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AN W., SAADATMANESH H., EHSANI M.R. (1991), RC beams strengthened with FRP plates, part. II : Analysis and Parametric Study, *ASCE Journal of Structural Eng.*, vol. 117, **11**, pp. 3434-3455.
- CHAALLAL O., NOLLET M.J., PERRATON D. (1996), RC beams strengthened with externally bonded FRP laminates : Design guidelines for shear and flexure, *Can. J. Civ. Eng.*, 40 pages.
- CSA (Canadian Standards Association) (1994), Design of concrete structures for buildings, Standard CAN3-A23.3-94, Rexdale, Ontario, Canada.
- FINCH W.W., CHAJES M.J., MERTZ D.R., KALIAKIN V.N., FAQUIRI A. (1994), *Bridge rehabilitation using composite materials*, Infrastructure : New Materials and Methods of Repair, Third Materials Engineering Conference, San Diego, CA, November, K. Basham editor, pp. 1140-1147.
- INABA C.M., WARREN G.E., INABA C. (1995), *Reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets*, Proceedings, Non-Metallic (FRP) Reinforcements for Concrete Structures, FRPCS-2, Ghent, Belgium, 23-25 august.
- MEIER U., DEURING M., MEIER H., SHWEGLER G. (1992), *Strengthening of structures with CFRP lami-*  
*nates : research and applications in Switzerland*, Proceedings of the First International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Sherbrooke, Québec, pp. 243-251.
- RITCHIE P.A., THOMAS D.A., LE-WU Lu, CONNELLY G.M. (1991), External reinforcement of concrete beams using fiberglass reinforced plastic, *ACI Structural Journal*, vol. 88, **4**, july-august, pp. 490-500.
- ROSTASY F., HANKERS C., RANISCH E. (1992), *Strengthening of R/C and P/C structures with bonded FRP plates*, Proceedings of the First International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Sherbrooke, Québec, october, pp. 253-263.
- SHARIF A., AL-SULAIMANI G.J., BASUNBUL I.A., BALUCH M.H., GHALEB B.N. (1994), Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates, *ACI Structural Journal*, **(91)2**, pp. 160-168.
- TRIANTAFILLOU T.C., PLEVRISS N. (1991), *Post-strengthening of R/C beams with epoxy-bonded fibre composite materials*, in Advanced composite materials in civil engineering structures. Proceedings of the Specialty Conference, Las Vegas, Nevada, january 31- february 1, American Society of Civil Engineers, New-York, pp. 245-256.

**Remerciements.** Les auteurs tiennent à remercier John Lescelleur, technicien au laboratoire de structures du département de Génie de la construction, pour son aide précieuse dans la conduite des essais et SIKA Canada pour sa contribution partielle au coût des matériaux.

### ABSTRACT

### **Shear stiffening of reinforced concrete beams using external epoxy-bonded composite material sheets**

O. CHAALLAL - M.-J. NOLLET - D. PERRATON

The results of a laboratory experimental investigation into the shear stiffening of reinforced concrete beams using external epoxy-bonded carbon fibre composite material sheets are presented.

The results indicate that the technique of shear reinforcement using these sheets can improve not only shear strength but also the overall stiffness of the beam by considerably reducing the extent of diagonal cracking. It was also shown that inclined sheets performed better than vertical sheets. However, at a high level of loading the sheets in the zone of the beam which is under tension may debond as a result of stress concentrations. This debonding would prevent the beam from attaining its full potential. Other studies are in progress in order to investigate different methods of stiffening.