

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

PAR
Sébastien THIVIERGE

RENFORCEMENT DE POUTRES DE BÉTON ARMÉ EN CISAILLEMENT À L'AIDE
DE MATÉRIAUX COMPOSITES : ÉTUDE COMPARATIVE

MONTREAL, LE 3 DÉCEMBRE 2015

©Tous droits réservés, Sébastien Thivierge, 2015

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Omar Chaallal, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Marie-José Nollet, codirectrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Amar Khaled, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 23 OCTOBRE 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens premièrement à remercier mon directeur de recherche, le professeur Omar Chaallal, de m'avoir confié ce projet de recherche, de m'avoir soutenu et guidé tout au long de cette étude et pour qui j'exprime ma sincère reconnaissance.

Merci à ma codirectrice de recherche, la professeure Marie-Josée Nollet, de m'avoir poussé vers cette avenue, la réalisation d'un projet de recherche.

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer ce mémoire.

À John Lesceller et Juan Mauricio Rios, techniciens au laboratoire de structures lourdes de l'ÉTS, à qui j'aimerais offrir mes remerciements pour leur implication durant la réalisation du programme expérimental et pour m'avoir accompagné durant cette préparation.

Finalement j'offre mon affection et ma plus sincère gratitude à mes deux garçons Mathis et Geoffroy pour m'avoir soutenu durant toutes ces années sans trop en être conscients. Vous êtes la source de mon énergie, celle qui me permet de me dépasser chaque jour et qui rend possible cet accomplissement.

RENFORCEMENT DE POUTRES DE BÉTON ARMÉ EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE MATÉRIAUX COMPOSITES : ÉTUDE COMPARATIVE

Sébastien THIVIERGE

RÉSUMÉ

Les recherches réalisées depuis les 23 dernières années sur le comportement en cisaillement des poutres de béton armé (BA) renforcées à l'aide de polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) ont permis de déterminer certains paramètres d'influence qui régissent aujourd'hui les différentes normes internationales de calcul. À travers ces études, plusieurs systèmes de renforcement ont été testés et ont su démontrer que leur utilisation était bénéfique pour procurer un gain de résistance en cisaillement lors de la réhabilitation de structures déficientes. Dans cette recherche, une revue de la théorie ainsi qu'un volet expérimental comprenant un programme d'essai constitué de 7 poutres en T de grandeur nature préfissurées en cisaillement, renforcées à l'aide de différents systèmes, sont analysées pour comparer l'efficacité en terme de gain de résistance et de faisabilité de mise en œuvre des différents systèmes développés par l'industrie. Les différents systèmes de renfort analysés sont : (i) tissus de fibre de carbone collé en surface sur l'âme de la poutre (EB), (ii) tiges de PRFC insérées au travers de la section (ETS "Embedded Through Section") et (iii) lamelle de PRFC en L collée sur l'âme de la poutre utilisant différentes longueurs d'ancrage (Sika Carboshear L). Afin de pouvoir comparer ces différentes techniques de renforcement, les poutres utilisées dans cette étude sont identiques et ont toutes subies un préchargement équivalent ayant causé un patron de fissuration de cisaillement similaire avant renforcement. Les données expérimentales recueillies suite au chargement statique jusqu'à rupture ont permis de quantifier le gain offert par les différentes méthodes de renforcement. Tous les spécimens de l'étude ont connu une rupture en cisaillement à l'exception d'un spécimen qui a rompu en flexion et a démontré une certaine ductilité suite au renforcement. En observant les déformations internes sur le renfort et l'acier d'armature, on peut affirmer que le renfort contribue à la reprise des efforts et permet de soulager les étriers et engendre ainsi un accroissement de la résistance en cisaillement. Bien que tous les systèmes aient démontré qu'ils pouvaient accroître la résistance en cisaillement, leur facilité de mise en place n'est pas pour autant équivalente. En évaluant les différentes étapes de préparation, en relevant les contraintes de dimensionnement et de mise en place et en identifiant les avantages et inconvénients, il est démontré que certains systèmes peuvent être mieux adaptés selon certains cas.

Mots-clés : préfissurée, cisaillement, poutres de béton armé, renforcement, PRFC

REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED IN SHEAR WITH ADVANCED COMPOSITE MATERIALS

Sébastien THIVIERGE

ABSTRACT

Research conducted for the past 23 years on shear behavior of concrete beams reinforced with FRP have determined some influencing parameters which today govern various international codes. Through these studies, some systems have been tested and were able to demonstrate that their use can provide a shear strength gain during the rehabilitation of deficient structures. In this study, a review of the theory and an experimental program including 7 full scale concrete T-beams pre-cracked in shear, reinforced with different systems, are analyzed to compare the efficiency in terms of gain of strength and feasibility of various systems developed by the industry. The different reinforcement systems analyzed are: (i) Externally Bonded (EB) system, (ii) Embedded Through Section (ETS) and (iii) L-shaped CFRP system (Sika CarboShear L). In order to compare these different building techniques, the beams used in this study are identical and all have experienced an equivalent preload causing a similar shear cracking pattern before strengthening. The experimental data collected following the static load to failure have quantified the gain offered by the different methods of reinforcement. All specimens of the study featured a shear failure except a specimen that has broken in bending and demonstrated some ductility following the strengthening. Examination of the internal deformations of the FRP reinforcement and stirrups reveals that the FRP reinforcement contributes to the resistance and helps relieve the stirrups and leads to increased shear strength. All systems have proven to be able to increase the shear strength at some degree. In assessing the various stages of preparation, by raising the design constraints and implementation and identifying the advantages and disadvantages, it is demonstrated that some systems may be better than others in some cases.

Keywords: pre-cracked, shear, concrete beam, reinforced, FRP

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 COMPOTEMENT DES POUTRES RENFORCÉES EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE PRF SOUS CHARGE STATIQUE – REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET SYNTHÈSE	9
1.1 Introduction.....	9
1.2 Revue des travaux sur le renforcement externe tissu collé en surface (EB)	9
1.3 Barres de PRFC noyées dans l'âme de la section (méthode ETS)	17
1.4 Lamelles Sika CarboShear L (LS)	19
CHAPITRE 2 ASPECTS THÉORIQUES : RENFORCEMENT EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE PRFC	23
2.1 Comportement en cisaillement de poutres en BA (sans renfort)	23
2.1.1 Fissuration.....	23
2.1.2 Mode de rupture.....	24
2.1.2.1 Rapport a/d	25
2.1.2.2 L'effort axial.....	25
2.1.2.3 Le taux d'armature	27
2.1.2.4 L'effet d'échelle.....	27
2.2 Comportement en cisaillement de poutres en BA renforcées de PRF	27
2.2.1 Modes de rupture	28
2.2.1.1 Rapport a/d	28
2.2.1.2 Le taux d'armature transversale	29
2.2.1.3 Le taux de renfort en PRF	29
2.2.1.4 L'effet d'échelle.....	29
2.3 Calcul des poutres en béton renforcées en cisaillement selon les normes et codes.....	30
2.3.1 ACI 440.2R 2008.....	31
2.3.2 CAN/CSA-S806 2012.....	32
2.3.3 CAN/CSA-S6 2014.....	33
2.3.4 <i>fib</i> -TG 9.3 2001.....	34
2.3.5 CNR-DT200 2004.....	35
2.3.6 HB 305-2008.....	37
2.4 Synthèse	39
CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL.....	41
3.1 Généralités (paramètres d'étude).....	41
3.2 Description du programme expérimental.....	42
3.2.1 Description et préparation des spécimens.....	42
3.2.1.1 Spécimen S1-CON.....	44
3.2.1.2 Spécimen S1-EB	45
3.2.1.3 Spécimen S1-ETS-9 mm.....	45

3.2.1.4	Spécimen S1-LS-NA	46
3.2.1.5	Spécimen S1-LS-TA	47
3.2.1.6	Spécimen S1-LS-PA	48
3.2.1.7	Spécimen S1-LS-BA	49
3.3	Procédure d'essais	50
3.3.1	Chargement	50
3.3.2	Instrumentation et acquisition de données	51
CHAPITRE 4	CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX	55
4.1	Béton	55
4.2	Acier d'armature	55
4.3	Renfort de CFRP	55
4.3.1	Renfort de PRFC	56
4.3.2	Sika CarboDur Rods	57
4.3.3	Sika CarboShear L	57
4.4	Colle	57
4.4.1	Sikadur 330	57
4.4.2	AnchorFix 4	58
4.4.3	Sikadur 30	58
4.5	Calcul de V_{FRP} selon les codes et normes	58
CHAPITRE 5	PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS	61
5.1	Présentation des résultats	61
5.1.1	Tableau des résultats	63
5.2	Analyse des résultats	67
5.2.1	Spécimen S1-EB	67
5.2.2	Spécimen S1-ETS-9 mm	77
5.2.3	Spécimen S1-LS-NA	84
5.2.4	Spécimen S1-LS-TA	90
5.2.5	Spécimen S1-LS-PA	96
5.2.6	Spécimen S1-LS-BA	103
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		111
ANNEXE I	FICHE TECHNIQUE – SikaWrap Hex 230C	117
ANNEXE II	FICHE TECHNIQUE – Sika CarboDur Rods	121
ANNEXE III	FICHE TECHNIQUE – Sika CarboShear L	123
ANNEXE IV	FICHE TECHNIQUE – Sika AnchorFix	127
ANNEXE V	FICHE TECHNIQUE – Sikadur 30	131
ANNEXE VI	FICHE TECHNIQUE – Sikadur 330	135

BIBLIOGRAPHIE	137
---------------------	-----

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Mode de rupture d'une poutre en BA (sans renfort)25
Tableau 2.2	Mode de rupture poutre en BA (avec PRF) en fonction du rapport a/d28
Tableau 2.3	Facteurs d'influence utilisés dans les différentes normes de conception pour le calcul du renforcement en cisaillement à l'aide de PRF31
Tableau 3.1	Présentation des différents spécimens44
Tableau 3.2	Identification des jauges52
Tableau 4.1	Propriétés mécaniques des types de renfort56
Tableau 4.2	Résistance en cisaillement du CFRP selon les codes et normes59
Tableau 5.1	Efforts internes subis par les spécimens durant les essais de préfissuration (avant les essais)63
Tableau 5.2	Déplacements63
Tableau 5.3	Efficacité du renforcement en PRF des différents spécimens64
Tableau 5.4	Gain de résistance en cisaillement des spécimens65
Tableau 5.5	Comparaison V_{FRP} : expérimentale vs codes et normes66

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Pourcentage de la valeur du parc de structures au Québec par décennie de construction2
Figure 0.2	Évolution des budgets (composante travaux)3
Figure 2.1	Types de fissures dans une poutre de béton armé24
Figure 2.2	Répartition de l'effort axial26
Figure 2.3	Analogie du treillis.....26
Figure 3.1	Caractéristiques des poutres : (a) longueur de la poutre; (b) dimension de la section; (c) ferraillage de la section43
Figure 3.2	Préparation du spécimen S1-EB : (a) préparation de surface CSP 3-4;.....45
Figure 3.3	Préparation du spécimen S1-ETS-9 mm.....46
Figure 3.4	Préparation du spécimen S1-LS-NA.....47
Figure 3.5	Préparation du spécimen S1-LS-TA48
Figure 3.6	Préparation du spécimen S1-LS-PA, ancrage partiel.....49
Figure 3.7	Préparation du spécimen S1-LS-BA.....50
Figure 3.8	Détail du chargement50
Figure 3.9	Banc d'essai51
Figure 3.10	Banc d'essai52
Figure 3.11	Séquence d'installation des jauges.....53
Figure 3.12	Jauges sur renfort externe54
Figure 3.13	Système d'acquisition automatique de données en temps réel54
Figure 5.1	Observation spécimen S1-EB (fissure en rouge)68
Figure 5.2	Force en fonction du temps spécimen S1-EB69

Figure 5.3	Déformation unitaire EB(R) en fonction du temps : spécimen S1-EB.....	71
Figure 5.4	Déformation unitaire acier transversal (R) en fonction du temps : spécimen S1-EB.....	71
Figure 5.5	Déformation unitaire acier longitudinal en fonction du temps : spécimen S1-EB.....	73
Figure 5.6	Mode de rupture du spécimen S1-EB	74
Figure 5.7	Délaminage du renfort du spécimen S1-EB.....	75
Figure 5.8	Fissure de flexion du PRFC spécimen S1-EB	75
Figure 5.9	Observation spécimen S1-ETS-9 mm (fissure en rouge)	77
Figure 5.10	Force en fonction du temps pour spécimen S1-ETS-9 mm	78
Figure 5.11	Déformation unitaire barres ETS(L) en fonction de la force : spécimen S1-ETS-9 mm	79
Figure 5.12	Déformation unitaire acier transversal (R) en fonction du temps pour spécimen S1-ETS-9 mm.....	80
Figure 5.13	Déformation unitaire acier longitudinal en fonction du temps pour spécimen S1-ETS-9 mm.....	81
Figure 5.14	Mode de rupture du spécimen S1-ETS-9 mm.....	82
Figure 5.15	Rupture de l'étrier ST-2R du spécimen S1-ETS-9 mm.....	82
Figure 5.16	Observation du spécimen S1-LS-NA (fissure en rouge)	84
Figure 5.17	Force en fonction du temps pour spécimen S1-LS-NA	85
Figure 5.18	Déformation unitaire de l'acier transversal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-NA.....	86
Figure 5.19	Déformation unitaire L-Shape (L) en fonction du temps pour spécimen S1-LS-NA.....	87
Figure 5.20	Déformation unitaire de l'acier longitudinal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-NA.....	87
Figure 5.21	Mode de rupture du spécimen S1-LS-NA	88
Figure 5.22	Fissure de préfissuration du spécimen S1-LS-NA.....	89

Figure 5.23	Observation du spécimen S1-LS-TA (fissure en rouge).....	90
Figure 5.24	Force en fonction du temps pour spécimen S1-LS-TA	91
Figure 5.25	Déformation unitaire de l'acier transversal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-TA	93
Figure 5.26	Déformation unitaire L-Shape (L) en fonction du temps pour spécimen S1-LS-TA	93
Figure 5.27	Déformation unitaire de l'acier longitudinal en fonction du temps : spécimen S1 LS-TA.....	94
Figure 5.28	Mode de rupture du spécimen S1-LS-TA.....	95
Figure 5.29	Observation du spécimen S1-LS-PA (fissure en rouge).....	97
Figure 5.30	Force en fonction du temps pour spécimen S1-LS-PA.....	98
Figure 5.31	Déformation unitaire de l'acier transversal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-PA	99
Figure 5.32	Déformation unitaire L-Shape (L) en fonction du temps pour spécimen S1-LS-PA	100
Figure 5.33	Déformation unitaire de l'acier longitudinal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-PA	100
Figure 5.34	Mode de rupture du spécimen S1-LS-PA.....	101
Figure 5.35	Observation du spécimen S1-LS-BA (fissure en rouge).....	103
Figure 5.36	Force en fonction du temps pour spécimen S1-LS-BA	104
Figure 5.37	Déformation unitaire de l'acier transversal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-BA	105
Figure 5.38	Déformation unitaire L-Shape (L) en fonction du temps pour spécimen S1-LS-BA	106
Figure 5.39	Déformation unitaire de l'acier longitudinal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-BA	106
Figure 5.40	Mode de rupture du spécimen S1-LS-BA.....	107
Figure 5.41	Décollement et glissement du renfort pour spécimen S1-LS-BA.....	108
Figure 5.42	Rupture de l'étrier ST-3L pour spécimen S1-LS-BA	108

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

a	Distance entre le point d'application de la charge et le nu de l'appui
a/d	Longueur de cisaillement
A_f	Aire du renfort
BA	Béton armé
b_w	Largeur de l'âme de la poutre
CON	Spécimen de contrôle
CMD	Coefficient de majoration dynamique
d	Profondeur de la poutre (Hauteur utile)
Db	Diamètre de la barre d'armature
d_f	Distance entre la fibre extrême en compression et le centroïde du renfort en tension
D_f	Facteur de distribution de contrainte
EB	Externally bonded
E_f	Module élastique du renfort
E_{fu}	Module élastique du renfort à l'ultime
E_s	Module élastique de l'acier d'armature transversale
ETS	Embedded through section
FHWA	Federal Highway Administration
f'_c, f_{ck}, f_{cm}	Résistance en compression du béton obtenu à partir d'un test standard
f_{ctm}	Contrainte moyenne du béton en tension

f_{fd}	Contrainte ultime de conception du PRF
$f_{fd,max}$	Contrainte ultime maximale de conception du PRF
f_{fdd}	Contrainte de conception du décollement du PRF
f_{fe}	Contrainte effective du renfort (correspond à ε_{fe})
f_{fed}	Contrainte effective de conception du PRF
f_{fu}	Contrainte ultime du renfort
f_y	Limite élastique de l'acier d'armature (contrainte)
G_{fk}	Énergie de fracture au joint de chevauchement du renfort
GFRP	Glass fiber reinforced polymer
h_{fe}	Hauteur effective du renforcement
h_w	Hauteur de l'âme de la poutre
k_1	Facteur de modification de résistance du béton
k_2	Facteur de modification du modèle d'enveloppe
k_b	Covering/scale coefficient
L_e	Longueur effective du renfort
LG	Barre d'armature longitudinale des spécimens
L_{max}	Longueur d'adhérence maximale
LS	Série de spécimens renforcés à l'aide de lamelles Sika préfabriquées
LVDT	Linear Variable Displacement Transducers
MCA	Matériaux composites avancés

MTQ	Ministère des transports du Québec
NA	No anchorage
n_f	Nombre de couches de PRF
NSM	Near surface mounted
PA	Partiellement ancré
P_{max}	Charge maximale dans un cycle de chargement
PRF	Polymère renforcé de fibres
PRFC	Polymère renforcé de fibres de carbone
r_c	Rayon des coins
S1	Série de spécimens avec armature transversale espacée de $s=d/2$
s	Espacement des étriers
s_f	Espacement entre axes de deux lamelles successives du renfort
ST-i	Étrier numéro i (Stirrup)
s_{uf}	Glissement du PRF au décollement (0.20mm)
TA	Totalement ancré
t_f	Épaisseur du renfort
V	Effort tranchant total
V_c	Effort tranchant repris par le béton
V_f, V_{fd}	Effort tranchant repris par le renfort
V_{max}	Effort tranchant correspondant à la charge P_{max}
V_r	Résistance en cisaillement

V_s	Effort tranchant repris par l'armature transversale
w_f	Largeur des lamelles de renfort
α	Angle d'inclinaison du renfort par rapport à l'axe de la poutre
β_L	Coefficient de compensation de la longueur d'ancrage insuffisante du PRF
β_w	Coefficient du rapport largeur/espacement du PRF
γ_{fd}	Facteur partiel de sécurité sur la qualité de l'application du PRF
γ_{rd}	Facteur partiel de résistance
ϕ_R	Facteur de réduction dû aux contraintes locales de coin
δ_{max}	Déplacement vertical de la poutre (flèche) correspondant à P_{max}
ε_f	Déformation du renfort
ε_{fe}	Déformation effective du renfort
ε_{fu}	Déformation ultime du renfort
ε_y	Désignation générale de la limite élastique de l'acier d'armature (déformation)
κ_v	Coefficient qui tient compte de la longueur d'adhérence effective du renfort (L_e)
ρ_f	Taux du renfort dans un espacement s_f
ρ_s	Taux de l'armature transversale
θ	Angle d'inclinaison des fissures diagonales par rapport à l'axe de la poutre
λ	Longueur d'adhérence maximale normalisée
$\mu\varepsilon$	Microdéformation (microstrain)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

GPa Giga Pascal

kN Kilo Newton

MPa Méga Pascal

INTRODUCTION

Contexte général

Depuis le début du dernier siècle, le domaine des transports a connu une croissance phénoménale quant à son accessibilité. L'augmentation du débit journalier moyen annuel jumelé à l'augmentation des charges des véhicules circulants sur nos routes a contribué à la détérioration de nos structures routières. Les charges utilisées dans les conceptions se trouvent ainsi dépassées, ce qui a pour effet d'accélérer le processus de dégradation des matériaux. L'entretien souvent négligé durant plusieurs décennies a mené, depuis bientôt dix ans, à un accroissement des investissements majeurs dans le but de réhabiliter plusieurs structures et ainsi prolonger leurs durées de vie utile et offrir aux usagers un meilleur niveau de sécurité. Ces travaux de réfection souvent très coûteux nécessitent le remplacement de certains éléments. Cependant, les budgets restreints remettent souvent en cause les types d'interventions qui seront réalisées. On optera souvent pour la limitation des charges permises sur les structures en raison du manque de budget pour réparer ou remplacer la structure. Pourtant, l'utilisation de systèmes de renforts en PRF pourrait s'avérer un choix intéressant et économique afin d'offrir un prolongement de la vie utile et une augmentation de résistance en cisaillement de nos structures vieillissantes.

Déficiences des ponts existants

Le cisaillement fait partie des défaillances et problématiques rencontrées sur de nombreuses structures devant être réhabilitées à travers le monde. Au Québec, suite à l'effondrement du viaduc de la concorde en 2006, le ministère des Transports du Québec (MTQ) a révisé son plan d'intervention et d'entretien pour son parc d'infrastructures. Une méthode d'évaluation a été mise au point pour établir le plus précisément possible l'état général des structures et d'établir des priorités d'interventions, en se basant sur l'état des matériaux et sur le comportement des éléments à jouer leurs rôles. Le bilan de l'état des structures du réseau routier supérieur publié en 2011 révèle que plus de 70 % des structures sous la responsabilité du MTQ ont été construites entre 1960 et 1980 (figure 0.1). Ce contexte explique que 31,9 % de l'ensemble d'entre elles ont eu recours ou nécessiteront une intervention d'ici 2016. La

figure 0.2 montre l'investissement mis en place entre 1988 et 2011 pour la construction ou la réfection des structures au Québec.

Le ministre des Transports a annoncé en mars 2015 un investissement de 4,9 milliards de dollars pour le réseau routier entre 2015 et 2017, dont 3 milliards destinés aux structures : 1001 structures sur le réseau du MTQ et 392 structures sur le réseau municipal. Depuis 2009, le pourcentage des structures en bon état a cru de 10 %, ce qui est signe d'une nette amélioration. Cependant, il est important de noter que selon Transport Canada, le nombre de ponts âgés de plus de 50 ans est passé de 870 à 1318 entre 2006 et 2010. Comme quoi le vieillissement des structures est toujours un enjeu important.

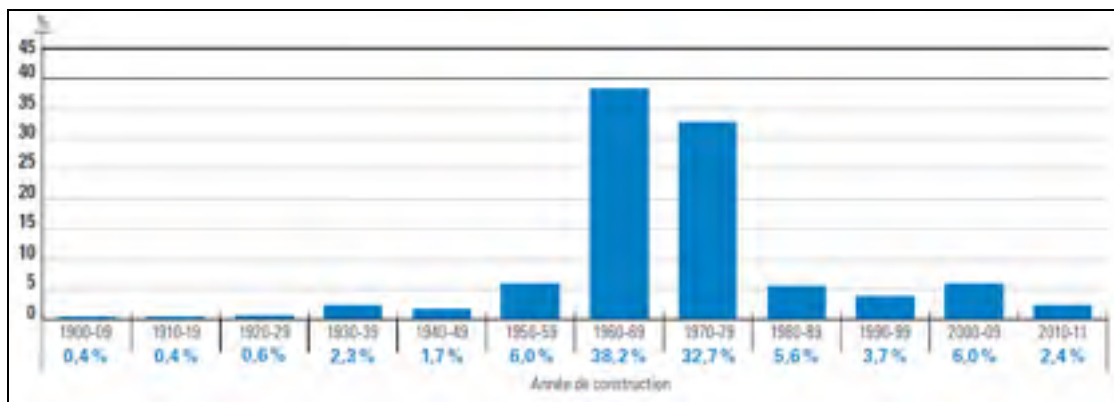


Figure 0.1 Pourcentage de la valeur du parc de structures au Québec par décennie de construction

Tirée de Ministère des Transports du Québec. 2011. « *Bilan de l'état des structures du réseau routier supérieur* ». En ligne. 34 p.

http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/per/0994120/05_2011.pdf.

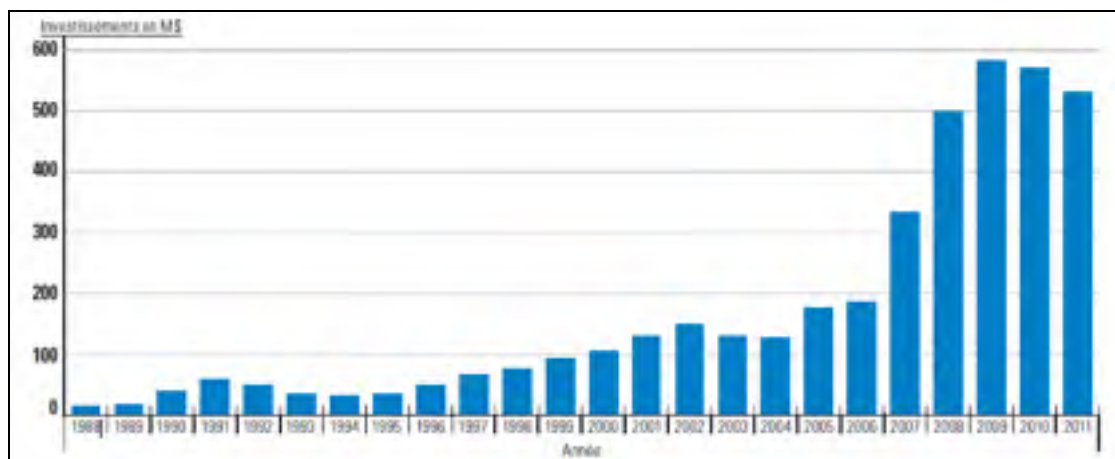


Figure 0.2 Évolution des budgets (composante travaux)

Ministère des Transports du Québec. 2011. « *Bilan de l'état des structures du réseau routier supérieur* ». En ligne. 34 p.

http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/per/0994120/05_2011.pdf.

Aux États-Unis, selon des statistiques de 2013 provenant de la FHWA (Federal Highway Administration) (U.S. Department of transportation 2015), près de 24 % des 607 750 ponts répertoriés présenteraient des déficiences structurelles, (10 %) auraient un fonctionnement obsolète et (14 %) seraient simplement déficients. Selon ce bilan alarmant, la FHWA estime que des investissements annuels de 20,5 milliards de dollars seraient nécessaires durant les 13 prochaines années pour rétablir cette situation.

Problématique du renforcement en cisaillement à l'aide de PRF

Dans le domaine des structures, le comportement des poutres en béton armé a fait l'objet de nombreuses études à travers le monde durant les deux dernières décennies. Cependant, la majorité des études réalisées traitent du comportement en flexion. Le cisaillement, un mode de rupture qui reste encore aujourd'hui interprété avec incertitude, fait l'objet d'un nombre grandissant de recherches. À ce jour, des analyses utilisant différentes méthodes de renforcement en cisaillement à l'aide de PRF ont été effectuées pour évaluer le comportement de poutres de béton armé renforcées à l'aide de matériaux composites. La méthode la plus courante est celle qui consiste à coller en surface sur l'âme des poutres un

tissu de PRF à l'aide d'une résine époxy; cette méthode est nommée "externally bonded" (EB). Plusieurs recherches ont démontré que cette méthode de renforcement permettait d'offrir un gain de résistance en cisaillement aux poutres de béton armé (Uji 1992; Chajes et al. 1995; Khalifa et Nanni 1999; Täljsten 2003; Bousselham et Chaallal 2004). L'application de bandes de PRFC est aussi une méthode de renfort couramment étudiée. Pour accélérer la mise en place de ce système, Sika a développé des lamelles préfabriquées pouvant être installées sur l'âme des poutres de béton armé en limitant ainsi le temps de mise en place. Ce système a aussi fait l'objet de recherches qui ont démontré des gains de résistance en cisaillement appréciables (Al-Mahaidi et al. 2001; Czaderski et Motavalli 2004; Mofidi et al. 2014). Pour pallier aux problèmes de décollement du renfort, empêchant de profiter de la pleine capacité du renfort, une méthode novatrice appelée "ETS (Embedded Trough Section)" a été développée récemment (Chaallal et al. 2011). Cette méthode utilise des tiges de fibre de carbone insérées à travers la section. Le confinement des tiges de PRF, offert par l'enrobage de béton, permet d'obtenir des gains de résistance en cisaillement importants. En se basant sur des conclusions tirées à ce jour et des résultats expérimentaux provenant des essais réalisés dans ce mémoire, ces différents systèmes de renforts seront comparés en termes de gain de résistance et de faisabilité de mise en place.

Lorsqu'il est question de conception, les différents codes et normes internationaux utilisent des modèles de calculs qui permettent d'estimer la contribution du renfort de PRF lors de la réhabilitation en cisaillement de poutres de béton armé. Cependant, qu'il s'agisse de la norme ACI 440-2R (2008), de la CSA S806 (2012), de la CSA S6 (2014), de la *fib-TG 9.3* (2001), CNR-DT200 (2004) ou de la HB 305 (2008), les résultats obtenus diffèrent en raison de certains paramètres d'influence majeure considérés par ces normes. Bien que clairement établi, le gain de résistance offert par les différents systèmes de renfort reste toujours difficile à évaluer. En effet, certains paramètres, tels que : (i) le patron de fissuration existant et (ii) l'effet des armatures transversales ne sont toujours pas considérés dans les modèles de calculs de ces différentes normes.

Objectif du projet

Le principal objectif de ce projet de recherche est de comparer les différentes méthodes de renforcement à l'aide de PRF utilisées dans l'industrie pour le renforcement en cisaillement de poutres de béton armé d'un point de vue de performance et de mise en place.

Les objectifs spécifiques du projet s'établissent comme suit :

- a) évaluer l'interaction entre le béton, l'armature et le renfort de PRF à l'aide des déformations unitaires des différentes composantes des spécimens lors du chargement en temps réel;
- b) comparer les charges à la rupture pour établir le gain de résistance en cisaillement des différentes méthodes de renforcement;
- c) analyser les modes de rupture sur les différents spécimens pour tirer des conclusions sur le comportement face aux efforts de cisaillement une fois la poutre renforcée et l'effet des ancrages.

Méthodologie

Pour rencontrer les objectifs, la méthodologie utilisée renferme une partie théorique et une partie expérimentale, comme suit :

- la partie théorique met en évidence l'état des connaissances à ce jour sur les différentes méthodes de renforcement à l'aide de PRF analysées dans ce mémoire. Elle inclut l'état des connaissances qui provient d'essais réalisés sur des spécimens renforcés avec les différentes méthodes de renforcement en cisaillement à l'étude : (i) renfort de tissu de PRFC collé en U (EB), (ii) renfort de tiges enduites à travers l'âme de la section (méthode ETS) et (iii) renfort en lamelles de PRFC préfabriquées en L collées en surface sur l'âme des poutres. L'étude de ce volet théorique a permis d'établir les points importants relevant du comportement des poutres en béton armé renforcées en cisaillement : la fissuration et les modes de rupture observés, les dimensions des spécimens couramment utilisés et à prioriser, l'identification des paramètres d'influence

majeure à considérer, ainsi que les mécanismes de résistance observés. Les dimensions des spécimens, les propriétés mécaniques des matériaux utilisés, le type et l'emplacement de l'instrumentation relatifs au présent programme expérimental ont tous été choisis selon des observations provenant de l'état des connaissances.

- la partie expérimentale, quant à elle, permet de comparer les différents systèmes de renforcement en les mettant à l'essai sur des spécimens préfissurés ayant un patron de fissuration similaire, soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture. Cette comparaison a été possible en considérant les paramètres suivants : (a) charge ayant créée la fissuration avant renforcement, (b) taux de renfort, (c) similitude du type de poutre et (d) similitude du taux d'armature transversale, et ce, entre les différents spécimens. Les difficultés et méthodes de mise en place ont été analysées et évaluées afin d'établir la faisabilité de mise en place des différents types de renfort en chantier.

Contenu du mémoire

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres :

- le chapitre 1 présente une revue de littérature sur le comportement des poutres de béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de PRF. Cette revue traite des différentes méthodes de renforcement à l'étude dans ce mémoire;
- le chapitre 2 présente les aspects théoriques en lien avec le renforcement en cisaillement à l'aide de PRFC. Il traite (a) du comportement face à l'effort tranchant des poutres en BA, (b) du comportement des poutres en BA renforcées en cisaillement à l'aide de PRF et (c) présente les différentes normes et modèles de conception des ouvrages en béton armé réhabilités en cisaillement à l'aide de PRF;

- les chapitres 3 et 4 sont consacrés au programme expérimental. Le chapitre 3 décrit le programme expérimental et présente les différents spécimens mis à l'essai ainsi que le système d'instrumentation mis en place afin de recueillir les données durant le chargement. Le chapitre 4 présente les propriétés des matériaux constituant les différents spécimens;
- le chapitre 5 présente les résultats expérimentaux obtenus suite aux essais et rend une analyse détaillée des valeurs obtenues et des comportements observés.

Pour terminer, une conclusion résume et explique les points importants observés suite aux essais réalisés et présente des recommandations pour l'utilisation et le choix des systèmes de renfort à préconiser selon certains paramètres.

CHAPITRE 1

COMPORTEMENT DES POUTRES RENFORCÉES EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE PRF SOUS CHARGE STATIQUE – REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET SYNTHÈSE

1.1 Introduction

Les recherches réalisées en termes de comportement des poutres renforcées en cisaillement à l'aide de PRF, depuis un peu plus de deux décennies, ont permis de développer différents systèmes de renforcement qui aujourd'hui permettent d'offrir un gain en résistance et d'augmenter la sécurité des usagers face à l'utilisation de structures ayant subi certains dommages.

L'ensemble des études réalisées sur les poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de PRF confirme les bienfaits d'utiliser ces différentes méthodes de renforcement. Qu'il s'agisse d'un renfort à l'aide de tissu collé en surface (EB), de tiges en PRF insérées à travers l'élément (ETS) ou de lamelles en U collées en surface (L-Shape), ces systèmes ont démontré un gain notable en résistance qui justifie leur utilisation pour le renforcement des structures endommagées en cisaillement.

La revue de littérature qui suit présente des études qui ont été réalisées sur les différentes méthodes de renforcement reportées dans la littérature. Chacun des articles présentés dans cette section met en revue les objectifs, le programme expérimental ainsi que les observations sur les comportements et le gain de résistance amené par le renforcement de PRF.

1.2 Revue des travaux sur le renforcement externe tissu collé en surface (EB)

La majeure partie des essais réalisés à ce jour sur les poutres renforcées en cisaillement à l'aide de PRF a été menée à l'aide de tissu collé en surface. Les premiers essais étaient principalement réalisés sur des poutres rectangulaires. Ce n'est qu'au début des années 2000

que les poutres en T ont commencé à être étudiées. L'analyse sur les poutres en T a permis d'offrir une représentation plus juste des conditions réelles, en considérant la contribution de la dalle située au-dessus de la poutre.

Berset (1992)

La première étude sur le renforcement en cisaillement à l'aide de PRF a été réalisée par Berset (1992). L'objectif visé par sa série de tests était d'analyser le comportement de poutres renforcées en cisaillement à l'aide de composite en PRF. Les tests ont été exécutés sur une série de six poutres rectangulaires ayant des dimensions de 102 mm x 114 mm x 600 mm. Cette expérimentation a été réalisée en considérant deux paramètres : (i) l'épaisseur du renfort de PRF et (ii) l'implication des étriers. Le renfort de PRF a été collé en surface sur les côtés des spécimens à un angle de 45°. Les gains en résistance en cisaillement obtenus se sont établis entre 33% et 66% en fonction de l'épaisseur du renfort. Les spécimens n'ayant aucun acier transversal ont présenté un mode de rupture par décollement du renfort tandis que ceux munis d'acier transversal ont cédé en flexion. Cette étude a permis de démontrer, par l'évaluation de la contrainte maximum du PRF, que l'utilisation de PRF pouvait accroître la résistance en cisaillement. L'auteur propose cependant de porter une attention particulière au phénomène de l'effet d'échelle puisque les spécimens étudiés étaient de dimensions réduites.

Uji (1992)

Uji (1992) a testé huit poutres rectangulaires de 100 mm x 200 mm x 1300 mm, renforcées en cisaillement à l'aide de PRF de carbone et ayant un rapport de longueur de cisaillement a/d de 2.5. L'objectif de cet essai était de comparer l'apport du renforcement en comparant : (i) la configuration par tissu collé en surface sur les côtés avec celle par tissu collé en U autour de la section et (ii) l'effet des barres transversales en analysant des poutres avec et sans barres de renforcement transversales. Le principal mode de rupture observé fut par décollement du renfort. La principale observation amenée par l'auteur est que la contrainte sur le renfort est supérieure à celle enregistrée sur les barres transversales des spécimens qui

en comportent. De plus, l'auteur affirme que la résistance en cisaillement des spécimens renforcés est gouvernée par l'adhérence du renfort à l'interface du béton.

Chajes et al. (1995)

Chajes et al. (1995) ont testé 12 poutres en T ayant un rapport a/d de 2.7, de dimensions 63 mm x 190 mm et une portée de 1220 mm. Les spécimens ne comportaient aucune armature transversale. Cette analyse visait à identifier le gain de résistance de poutres renforcées à l'aide de trois différents types de renforts, soit fibre de verre, d'aramide et de carbone. Tous les spécimens étaient enveloppés en U sur toute la longueur avec les fibres orientées à différents degrés (0° et 90°) et à des angles de 45° et 135° pour ceux utilisant la fibre de carbone. Les gains de résistance en cisaillement obtenus ont atteint 60% à 150% et une déformation unitaire à la rupture de 0,005 $\mu\epsilon$. Celle-ci a été utilisée pour évaluer la contribution du PRF à la résistance en cisaillement.

Kamiharako et al. (1997)

Kamiharako et al. (1997) ont testé huit poutres rectangulaires en deux séries. La série 1 incluait des spécimens de dimensions 250 mm x 400 mm x 3000 mm et la série 2 comportait des spécimens de dimensions 400 mm x 600 mm x 3000 mm. L'objectif visé par ces essais était d'évaluer l'influence de certains paramètres dont : (i) la rigidité du PRF des spécimens entièrement enveloppés de fibre aramide ou de fibre de carbone, (ii) d'évaluer l'influence de la résine en comparant des spécimens renforcés avec ou sans résine et (iii) d'évaluer l'influence de la taille du spécimen. Suite aux essais, les gains de résistance obtenus par le renfort de PRF variaient entre 31% et 93%, selon la rigidité du PRF et de la taille du spécimen. La disparité de ces résultats s'explique aussi par le rapport a/d qui diffère entre les spécimens de la série 1 et 2 (2.5 et 1.7, respectivement). L'auteur stipule que ce paramètre influencerait clairement le comportement en termes de résistance. Les résultats ont aussi démontré des valeurs supérieures pour les spécimens renforcés avec la fibre de carbone. Finalement, les résultats obtenus démontrent que l'utilisation de résine est essentielle au gain de résistance offert par le PRF.

Khalifa et Nanni (1999)

Khalifa et Nanni (1999) ont testé 12 poutres rectangulaires préfissurées ayant des dimensions de 150 mm x 305 mm x 3050 mm. L'objectif de cet essai visait à évaluer l'influence de certains paramètres, tels que : (i) l'influence des barres transversales, (ii) le rapport a/d ainsi que (iii) la configuration du renfort comme suit : (a) bandes de tissu de différentes largeurs collées en U, (b) tissu muni de fibres unidirectionnelles collé en U sur toute la longueur, et (c) tissu de fibres bidirectionnelles collé en continu sur le côté du spécimen. En comparant les tissus de fibres unidirectionnelles et bidirectionnelles, l'auteur visait à établir l'influence des fibres horizontales sur la résistance en cisaillement. Les résultats obtenus dans cette étude montrent que les fibres à 0 degré permettaient d'augmenter la résistance en cisaillement en offrant une retenue horizontale. Sur les spécimens munis d'étriers, l'utilisation de PRF soulageait les contraintes sur les barres transversales par interaction entre le renfort en PRF et les barres transversales. De plus, les résultats sur deux tests indiquaient un accroissement de la résistance en cisaillement lorsque que le rapport a/d augmentait. Une augmentation variant entre 40% et 138% a été obtenue dépendamment de la configuration des spécimens.

Deniaud et Cheng (2001)

Deniaud et Cheng (2001) ont testé huit poutres en T de dimensions 140 mm x 600 mm x 3700 mm. L'objectif visé était d'évaluer l'influence de certains paramètres, tels que : (i) l'espacement des étriers; (ii) le type de fibre utilisé : (a) fibre de verre ou (b) fibre de carbone; et (iii) l'orientation de la fibre : 90°, 45°/90°, et triaxiale 0°/60°/-60°. En observant les déplacements des différents spécimens, l'auteur note que les barres transversales et le renforcement externe n'influenceraient pas la rigidité puisque des déformations similaires ont été enregistrées sur l'ensemble des spécimens à l'étude. Par contre, la résistance ultime ainsi que la ductilité des spécimens étaient clairement influencées par la quantité d'armatures transversales et l'application de renforts en PRF. Enfin, l'auteur stipule qu'il y a une interaction entre les barres transversales et le renfort de PRF et remarque que la contribution du PRF diminue avec l'augmentation du taux d'armature transversale.

Chaallal et al. (2002)

Chaallal et al. (2002) ont réalisé 28 tests sur 14 poutres en T ayant des dimensions de 130 mm x 450 mm x 6000mm et un rapport a/d de 2. L'objectif de ces essais visait à étudier deux paramètres : (i) l'espacement des étriers et (ii) le nombre de couches de PRFC. Les spécimens renforcés présentaient un système de renforts collés en U sur l'âme de la poutre. Suite à la rupture de la table de compression et du renfort près des appuis des spécimens, le renfort a été retiré et un éclatement complet a été remarqué. De ce fait, le renfort avait donc joué un rôle de confinement du béton dans la zone de compression. Les auteurs ont également démontré que la résistance en cisaillement augmentait avec le nombre d'épaisseurs de renforts. Les résultats émanant de ces essais ont aussi démontré que plus l'espacement entre les barres d'acier transversales diminue, moins la contribution sur la résistance en cisaillement du PRFC est grande. Pour faire suite à cet essai, les auteurs proposent un modèle basé sur l'analogie du treillis en ajoutant un facteur qui prend en considération le rapport a/d pour l'étendre aux spécimens de poutres élancées.

Täljsten (2003)

Täljsten (2003) a réalisé des essais sur sept poutres rectangulaires ayant des dimensions de 180 mm x 500 mm x 4500 mm et un rapport a/d de 2,7. L'objectif de cette étude visait à évaluer l'influence de certains paramètres, tels que : (i) l'orientation des fibres (45°, 0°, 90°) et (ii) l'épaisseur du renfort de PRFC. Tous les spécimens à l'étude, à l'exception du spécimen de contrôle, étaient renforcés à l'aide de tissu collé en U. De plus, les poutres ne disposaient d'aucune armature transversale dans la zone de cisaillement pour mieux évaluer la contribution du béton, de résistance en compression comprise entre 59 MPa et 71 MPa, et le renfort muni de fibres unidirectionnelles. Les essais réalisés à l'aide d'un chargement en quatre points ont démontré un gain de résistance dû au PRFC variant entre 100% et 170%. Suite aux résultats obtenus, l'auteur remarque que le gain de résistance du PRF est limité par la résistance en compression du béton puisque l'ensemble des spécimens a cédé par écrasement de la bielle de compression. De plus, les spécimens dont l'orientation de la fibre est perpendiculaire à la fissure ont le mieux performé.

Bousselham (2005)

Bousselham (2005) a réalisé 34 tests répartis en deux séries dont la première constituée de 22 poutres en T de 152 mm x 406 mm x 4520 mm et une deuxième série de 12 poutres en T de 95 mm x 220 mm x 3000 mm. Toutes les poutres ont été renforcées à l'aide de tissu de fibres de carbone bidirectionnelles collé en U sur toute la longueur de l'âme des poutres. L'objectif visé lors de ces essais était d'évaluer le comportement des poutres renforcées en cisaillement en observant certains paramètres; tels que : (i) le taux de PRFC, (ii) le taux d'acier transversal, (iii) le type de poutre (élancée ou profonde), et (iv) la taille des spécimens. Ces essais ont montré que l'augmentation du taux de PRF n'était pas proportionnelle à sa contribution en termes de gain en résistance et que cette contribution était influencée par le taux d'acier transversal. Il a été observé que plus le taux d'acier augmente, moins la contribution du PRF est importante. De plus, l'auteur indique que de meilleurs résultats ont été obtenus sur les spécimens de type élancé et que la contribution du PRF est influencée par la taille du spécimen. Suite aux résultats obtenus, l'auteur propose un modèle fondé sur l'adhérence à l'interface PRF-Béton.

Godat et al. (2010)

Godat et al. (2010) ont réalisé des essais sur sept poutres rectangulaires de dimensions différentes afin d'être en mesure d'obtenir une compréhension plus juste de l'influence de l'effet d'échelle sur la contribution du renfort en PRF des poutres renforcées en cisaillement à l'aide de PRF. Les dimensions des trois séries de spécimens étaient respectivement de 100 mm x 200 mm x 900 mm pour la première série, de 200 mm x 400 mm x 1800 mm pour la deuxième série et de 300 mm x 600 mm x 2700 mm pour la troisième série. Les spécimens ont été renforcés à l'aide de bande en U et de bande enveloppant entièrement le spécimen, espacé de façon variable selon la dimension du spécimen. Notons que toutes les poutres mises à l'essai avaient le même pourcentage d'acier longitudinal et ne comportaient aucune armature transversale. L'analyse des contraintes enregistrées sur le béton, l'acier et le renfort ont été traités à l'aide d'un logiciel en trois dimensions par la méthode des éléments finis. Cette méthode d'analyse a permis d'observer que la contrainte axiale n'était pas répartie uniformément sur toute la hauteur des bandes de renfort. Enfin, ces essais ont démontré que

la contribution du PRF était plus grande sur les spécimens de petite taille comparativement à ceux ayant des dimensions qui s'approchent de la réalité. En comparant les résultats expérimentaux aux différentes normes, les auteurs mentionnent que la norme ACI est celle qui, en termes de résistance offerte par le PRF, s'approche le plus des résultats obtenus.

Mofidi et Chaallal (2011)

Mofidi et Chaallal (2011) ont dressé une liste des paramètres influant sur la contribution en cisaillement de poutres renforcées à l'aide de PRF: méthode de renfort (en U ou en lamelle sur le côté), déformation unitaire, longueur d'ancrage, rapport largeur des bandes VS espacement, paramètres des fissures, et l'effet des armatures transversales. Ces paramètres ont été analysés en lien avec les normes en vigueur, dont aucune ne tient compte de l'influence de l'acier transversal. L'objectif visé dans cette étude était de proposer un modèle de calcul qui prendrait en considération l'influence du taux d'armatures transversales dans le calcul de la contribution du renfort en PRF. Le modèle a été développé en utilisant et en analysant 75 résultats de recherches provenant de la littérature, de poutres renforcées à l'aide de tissu en U et de bande collée sur les côtés ayant rompues par décollement du renfort, en les comparant avec les modèles de calculs proposés par les normes actuelles. Le modèle proposé par les auteurs présente des valeurs plus près des résultats expérimentaux que ceux obtenus à l'aide des différentes normes actuelles. Une nouvelle largeur effective considérant l'implication du patron de fissure multiple a été introduite dans l'équation ainsi qu'un nouveau coefficient tenant compte de l'influence de l'armature transversale.

El-Maaddawy et Chekfeh (2012)

El-Maaddawy et Chekfeh (2012) ont réalisé 14 tests sur huit poutres en T de 120 mm x 240 mm x 3200 mm renforcés à l'aide de différentes épaisseurs de tissus collés en U sur toute la longueur. Tous les spécimens étaient munis d'étriers 15M espacés de 120 mm dans la zone de cisaillement. Le programme expérimental a été mené sous deux groupes : (A) trois poutres chargées jusqu'à rupture n'ayant pas été préfissurées avant l'application du renfort et (B) cinq poutres ayant été chargées jusqu'à la charge maximale avant d'être renforcées et chargées à nouveau jusqu'à rupture. L'objectif de ces essais était de : (i) vérifier s'il était possible de redonner, à des poutres ayant subi des dommages sévères, leur résistance

d'origine, (ii) étudier l'influence de différents systèmes d'ancrages mécaniques et (iii) comparer les résultats obtenus avec les différentes normes internationales. Les résultats ont montré qu'il était possible de restaurer une poutre ayant subi des dommages sévères en recouvrant 91% de sa résistance originale lorsqu'aucun système d'ancrage n'est mis en place, 117% pour les poutres renforcées avec un système de fixation d'une tige de 4 mm de diamètre enfoncée à l'aide d'une charge explosive et entre 130% et 145% de gain de résistance pour une tige filetée de 10 mm de diamètre introduite à travers la partie supérieure de l'âme. De plus, les auteurs mentionnent que le nombre de couches n'aurait pas une grande influence sur le gain de résistance pour les spécimens munis d'ancrage.

El-Saikaly et al (2014)

El-Saikaly et al. (2014) ont réalisé 12 essais sur des spécimens ayant des dimensions de 152 mm x 406 mm x 4520 mm. Le programme expérimental comportait trois séries munies de : (a) poutres sans étrier, (b) poutres avec étriers espacés de 260 mm et (c) poutres avec étriers espacés de 175 mm. Les trois séries comptaient : (i) un spécimen de contrôle, (ii) un spécimen renforcé à l'aide de tissu en U collé sur toute la longueur, (iii) un spécimen renforcé de bande en L et (iv) un spécimen renforcé de bande en L avec ancrages par cordage introduit à travers la semelle de la poutre en T. L'objectif visé par ces essais était de valider l'efficacité d'un nouveau système d'ancrages composé de cordes de CFRP introduites à travers la semelle, visant à reproduire les effets du tissu collé enveloppant entièrement le spécimen. Les résultats ont montré que ce système pouvait amener jusqu'à 96% en gain de résistance pour le spécimen qui ne contient pas d'armature transversale. Ceci indique qu'une meilleure performance est obtenue lorsque le décollement prématuré du renfort est contrôlé. De plus, les résultats ont montré que la contribution du PRF doublait en présence d'ancrages. Ainsi, ce système mène à l'utilisation de la pleine capacité des matériaux et se traduit par une rupture par éclatement du béton. Il a aussi été noté que l'angle de fissuration s'accroissait en présence d'acier transversal et du système d'ancrages. Les auteurs avancent que cette méthode pourrait amener une diminution considérable des coûts reliés à la mise en place de système d'ancrages.

1.3 Barres de PRFC noyées dans l'âme de la section (méthode ETS)

À ce jour, peu d'essais ont été réalisés à l'aide de ce système de renforcement, qui consiste à insérer des tiges de PRFC à l'intérieur de trous forés dans l'âme de la section et les sceller à l'aide de résine époxy. Une présentation d'un essai réalisé avec cette technique de renforcement est décrite ci-dessous.

Chaallal et al. (2011)

Chaallal et al. (2011) ont effectué 12 tests sur six poutres en T ayant des dimensions de 152 mm x 406 mm x 4520 mm, renforcées en cisaillement à l'aide de trois méthodes de renforcement, soit : tissu en U continu collé en surface (EB), barres encastrées en surface sur les parois latérales de l'âme (NSM) ainsi que des barres noyées dans l'âme de la section (ETS). L'objectif visé par ces essais était de comparer l'efficacité, en termes de gain de résistance en cisaillement, des barres ETS avec les autres méthodes de renforcement en cisaillement existantes. Les paramètres étudiés dans ce programme étaient : (i) le gain de résistance pour le même taux de renfort, (ii) l'influence de la présence d'étriers internes et (iii) l'espacement des étriers. Les résultats obtenus ont clairement montré que le système ETS présentait des performances supérieures. Une augmentation de la résistance moyenne de 60% pour les spécimens renforcés à l'aide des barres ETS comparativement à 23% et 31% pour les spécimens EB et NSM respectivement. Les auteurs précisent que le gain de résistance aurait été supérieur pour les spécimens ETS contenant des barres transversales si ceux-ci n'avaient pas rompu en flexion. Un comportement ductile a aussi été observé pour les spécimens ETS contenant des barres transversales, une flèche beaucoup plus importante a été enregistrée avant rupture. Suite aux résultats obtenus, les auteurs décrivent qu'il serait bénéfique de pousser la recherche sur ce type de renforcement en étudiant plus en détail l'effet des espacements des étriers pour ensuite développer un modèle de calcul relié à cette méthode de renforcement.

Godat et al. (2012)

Godat et al. (2012) ont réalisé 13 tests d'arrachement sur des blocs de béton de 190 mm x 190 mm. Les barres de type Sika Carbodur Rods et V-Rod de Pultrall recouvertes de sable ont été soumises à un test d'arrachement pour être en mesure de quantifier l'influence de certains paramètres. L'objectif de cette étude avait pour but d'évaluer l'efficacité d'adhésion et de comparer certaines configurations en considération : (i) de la résistance en compression du béton, (ii) du diamètre du trou foré, (iii) du diamètre de la barre de PRF, (iv) de la surface de contact et (v) de la longueur d'adhésion. Les spécimens testés avaient une profondeur d'ancrage variant entre 48 mm et 285 mm et des trous préalablement forés de 1,25 Db et 2,0 Db, où Db représente le diamètre de la tige de renfort de PRF. Les résultats obtenus ont montré que le décollement pouvait être prévenu et contrôlé en utilisant une profondeur d'ancrage suffisante et un béton ayant une résistance en compression élevée. Les tests ont aussi montré que le diamètre de préperçage idéal était de 1,5 fois le diamètre de la barre de PRF. Le traitement à la surface des barres s'est avéré inutile sur les spécimens offrant une longueur d'ancrage suffisante et il n'avait aucun effet sur la rigidité contrairement à la résistance du béton. Les auteurs mentionnent que les résultats de résistance d'adhésion seraient dus à un meilleur confinement des barres de PRF.

Qin et al. (2014)

Qin et al. (2014) ont réalisé des essais sur neuf poutres en T ayant des dimensions de 125 mm x 360 mm x 2700 mm, munies d'étriers de 8 mm espacés de 275 mm. L'objectif de ces essais était d'étudier l'influence de la corrosion de l'armature sur la contribution de deux méthodes de renforcement en cisaillement : tissu de PRF collé en U (EB) et tige de renfort en PRF insérée par forage dans l'âme de la poutre (méthode ETS). Le programme expérimental comptait neuf poutres réparties en trois groupes : (i) poutre sans renfort, (ii) poutres renforcées avec le système EB et (iii) poutres renforcées avec la méthode ETS. Trois niveaux de corrosion ont été analysés pour chacun des trois groupes : (a) 0% de corrosion, (b) 7% de corrosion et (c) 12% de corrosion. Les résultats obtenus suite au chargement ont montré que plus le niveau de corrosion augmente, plus la contribution du renfort sur le gain de résistance au cisaillement diminue. Cependant, il faut noter que lorsque le niveau de corrosion se situe à 7%, cette réduction n'est pas significative. De plus, les contraintes enregistrées sur le système

de renfort ETS sont supérieures à celles obtenues sur le renfort EB qui a cessé de contribuer suite à un décollement prématuré, tandis qu'aucun signe de décollement n'a été observé sur les spécimens renforcés avec la méthode ETS.

1.4 Lamelles Sika CarboShear L (LS)

À ce jour, les essais réalisés sur le renforcement en cisaillement de poutres en béton armé à l'aide de PRF ont surtout été réalisés à l'aide de tissu collé en surface, soit sous forme de tissu continu en U, ou de bandes de tissu espacées en U. Afin d'accélérer la mise en œuvre du système de renforts en bande de PRF, Sika a développé un système de lamelle en L préfabriquée servant au renfort en cisaillement de poutres rectangulaires ou en T en béton. Les études réalisées sur ce type de renforts seront présentées dans ce qui suit.

Al-Mahaidi et al. (2001)

Al-Mahaidi et al. (2001) ont testé trois poutres en T de 140 mm x 305 mm x 3500 mm préfissurées en cisaillement et renforcées à l'aide de lamelles Sika L-Shape espacées de 150 mm, soit $d/2$. Les lamelles étaient toutes ancrées dans la semelle supérieure de la section. En plus de l'analyse des résultats expérimentaux, une analyse non linéaire par éléments finis a été menée. L'objectif de ces essais était, dans un premier temps : (i) d'évaluer la contribution sur la résistance au cisaillement de lamelles Sika L-Shape et (ii) valider si l'analyse non linéaire par éléments finis était viable pour prédire le comportement des poutres renforcées en cisaillement à l'aide de PRF. Les résultats obtenus suite aux essais ont montré un gain de résistance en cisaillement variant entre 68% et 87%. L'analyse non linéaire par éléments finis a prouvé qu'il était possible de prédire le comportement des poutres renforcées en cisaillement et de tracer une image claire des contraintes dans les lamelles de renfort et du profil de fissuration de l'élément.

EMPA (2002)

EMPA (2002) a réalisé six tests sur des poutres en T de 150 mm x 500 mm x 4000 mm. Cette série de spécimens était composée de deux poutres de contrôle, avec et sans acier transversal, et de quatre poutres renforcées à l'aide de lamelles L-Shape de Sika espacées de 300 mm

dont une ne possédant pas de barre transversale. Le programme expérimental a été mené en trois étapes soit : (i) quatre poutres intactes sous charge statique croissante, (ii) une poutre préfissurée sous charge statique croissante, et (iii) une poutre intacte sous charge cyclique suivie d'une charge statique croissante. L'objectif de ces essais visait à : (a) déterminer la contribution en cisaillement des lamelles en L (L-Shape), (b) déterminer l'influence de la préfissuration sur la contribution en cisaillement des lamelles L-Shape et (c) déterminer l'influence d'une charge cyclique sur la contribution en cisaillement des lamelles L-Shape. Les résultats obtenus lors de ces essais ont démontré que l'utilisation des lamelles Sika L-Shape offrait une contribution favorable au gain de résistance en cisaillement et pouvait aussi permettre de procurer une certaine ductilité avant rupture. Dans le cas de la poutre préfissurée, une augmentation de la résistance a aussi été enregistrée et l'étude a démontré que la part de contribution due à l'acier transversal est plus élevée que dans les spécimens renforcés non fissurés. La poutre renforcée soumise à cinq millions de cycles avant d'être testée sous charge statique jusqu'à la rupture n'a quant à elle montré aucun changement majeur concernant les contraintes et déformations à l'atteinte de la charge maximale enregistrée comparativement à un spécimen semblable n'ayant pas été testé en fatigue.

Czaderski et Motavalli (2004)

Czaderski et Motavalli (2004) ont testé deux poutres en T préfissurées de 150 mm x 500 mm x 4000 mm ayant un rapport a/d de 2,9 et renforcées en cisaillement à l'aide de lamelles Sika L-Shape. Les deux spécimens étaient munis d'étriers de 8 mm de diamètre espacé de 150 mm. L'objectif visé était de comparer la résistance maximale et la contribution du renfort soumis à une charge cyclique. Pour mener à bien cette étude expérimentale, un protocole en quatre étapes a été réalisé soit : (i) application d'une charge statique de 450 kN pour créer une préfissuration sur les spécimens, (ii) chargement cyclique en fatigue jusqu'à cinq millions de cycles variant entre 300 et 450 kN, (iii) application de charges statiques de 450 kN et 300 kN, et (iv) application d'une charge statique jusqu'à la rupture. Pour être en mesure de quantifier l'influence de la fatigue, le deuxième spécimen a été testé sous charge statique uniquement. Les résultats obtenus ont permis de démontrer que les lamelles L-Shape permettaient d'offrir un excellent comportement sous charges cycliques. En effet, les

résultats présentés ont montré que les charges maximales atteintes à la rupture ainsi que les contraintes dans les deux spécimens étaient similaires. Par contre, une augmentation des contraintes dans le renfort et de la flèche a été observée suite aux cycles répétés de chargement en comparaison au spécimen n'ayant pas été testé en fatigue.

Robertson et al. (2007)

Robertson et al. (2007) ont réalisé des essais sur deux spécimens de poutres préfabriquées AASHTO identiques préfissurées ayant des dimensions de 250 mm x 572 mm x 2324 mm; une poutre de contrôle sans renfort et une poutre renforcée en cisaillement. L'objectif de ces essais visait à étudier le comportement en cisaillement de poutres AASHTO renforcées à l'aide de lamelles Sika CarboShear L et de comparer les résultats obtenus avec les prédictions théoriques de la norme ACI-440R-02. Le programme expérimental a été mené comme suit : (i) en appliquant une charge cyclique ayant pour but de créer un patron de fissures de cisaillement avant renfort, (ii) en appliquant le renfort sur un des deux spécimens, et (iii) en appliquant une charge croissante jusqu'à rupture. Notons que pour être en mesure d'installer les lamelles sur ce type de poutre, des surépaisseurs de béton ont été coulées à espacement régulier sur l'âme de la poutre pour accueillir les lamelles de renfort. Les résultats obtenus suite aux essais ont permis d'observer que les lamelles permettaient de contrôler la progression des fissures, principalement par l'augmentation de la rigidité mise en évidence par une réduction de la flèche lors du chargement. De plus, l'ancrage dans la partie supérieure s'est avéré suffisant pour résister et poursuivre sa contribution à la résistance en cisaillement, même une fois le décollement complet sur l'âme de la poutre à l'interface béton-PRF.

Mofidi et al. (2014)

Mofidi et al. (2014) ont développé une équation pour évaluer la contribution de la résistance en cisaillement de lamelles Sika CarboShear L. Le modèle développé, contrairement aux modèles actuels dans le calcul des bandes de tissu collé en U, permet d'estimer la résistance, peu importe la profondeur d'ancrage dans la dalle. De plus, le modèle considère différents modes de rupture qui peuvent survenir avec l'utilisation de ce type de système de renforcement : (a) rupture par arrachement du béton dans la zone d'ancrage, (b) rupture dans

la partie ancrée par glissement à l'interface époxy/béton, (c) rupture dans la partie ancrée par glissement à l'interface époxy/PRF, (d) rupture du chevauchement de la partie inférieure de l'âme et (e) par décollement des lamelles sur les côtés de l'âme. Le modèle proposé a été construit en se basant sur des valeurs expérimentales provenant de la littérature, en partie de certains spécimens provenant de ce mémoire.

El-Saikaly et Chaallal (2015)

El-Saikaly et Chaallal (2015) ont réalisé des essais en fatigue sur six poutres en T ayant des dimensions de 152 mm x 406 mm x 4520 mm soumises à six millions de cycles et sous une charge statique jusqu'à rupture. Le programme expérimental était constitué de poutres non renforcées et de poutres renforcées à l'aide de lamelle de PRF de 20 mm de largeur x 1,4 mm d'épaisseur. Ces deux catégories de poutres étaient munies d'armatures transversales selon un taux variable, soit : (a) spécimen sans armature transversale, (b) barres 8M espacées de 175 mm et (c) barres 8M espacées de 260 mm. L'objectif de l'étude visait à vérifier les performances en fatigue des poutres de béton armé renforcées à l'aide de lamelle de PRF. En comparant les contraintes sur les spécimens renforcés munis d'étriers avec ceux sans renfort, les auteurs notent qu'il y a une interaction entre l'acier transversal et le renfort de PRF et que plus le taux d'acier augmente, plus la contribution du PRF diminue. La réponse aux cycles de chargement s'est traduite par une dégradation importante au début et s'est ensuite stabilisée dans une seconde phase, notons qu'aucun spécimen renforcé ne s'est rompu suite aux six millions de cycles. De ce fait, les auteurs concluent que cette méthode de renforcement est effective et permettrait d'accroître la durée de vie des structures endommagées et permet même de modifier le comportement de la rupture en mode ductile.

CHAPITRE 2

ASPECTS THÉORIQUES : RENFORCEMENT EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE PRFC

Le comportement des structures en béton armé (BA) à l'effort tranchant est encore aujourd'hui considéré comme une problématique lorsqu'il est question de prédiction. Bien que plusieurs études aient été menées dans les dernières décennies afin de comprendre le comportement en cisaillement, il est encore difficile d'évaluer exactement la façon dont réagissent les structures en BA, souvent vieillissantes, face aux contraintes qui en découlent. Le chapitre 2 présentera l'état des connaissances à ce jour en lien avec ce sujet en mettant en revue : (i) les comportements observés sur les poutres en béton armé, (ii) les comportements des poutres ayant été renforcées et (iii) les modèles de calculs utilisés dans les différentes normes et codes en vigueur, pour la conception des ouvrages en BA réhabilités en cisaillement à l'aide de PRF.

2.1 Comportement en cisaillement de poutres en BA (sans renfort)

Les fissures engendrées par les efforts de cisaillement sont en général causées par les contraintes de traction qui en découlent et qui excèdent la faible résistance en traction du béton. Notons que plusieurs paramètres peuvent influencer les propriétés des fissures qui sont observées. Par exemple : les dimensions de la poutre, le rapport a/d , le taux d'armature longitudinale, les conditions d'appui et la présence ou non d'armature transversale. Ces paramètres auront comme effet de changer le type, l'angle, la position ainsi que l'étendue et l'importance des fissures. Ces particularités influenceront aussi le mode de rupture qui sera observé lorsque les poutres sont chargées jusqu'à la rupture.

2.1.1 Fissuration

La figure 2.1 présente les différents types de fissures qui sont généralement observées sur les poutres en béton armé. Les fissures verticales sont générées par le moment fléchissant. Ces

fissures apparaissent en premier lieu à l'endroit où le moment est maximum, principalement au centre de la travée ou au droit des appuis dans le cas d'une poutre continue. Ces fissures de flexion s'inclinent davantage à mesure qu'on s'approche des appuis en raison de l'effort tranchant qui s'accroît, ces fissures se transforment peu à peu en fissure de cisaillement-flexion. Les fissures de cisaillement, quant à elles, se propagent en débutant au centre de l'âme des poutres en s'étendant vers le haut et le bas suivant une inclinaison variant généralement entre 35° et 45° .

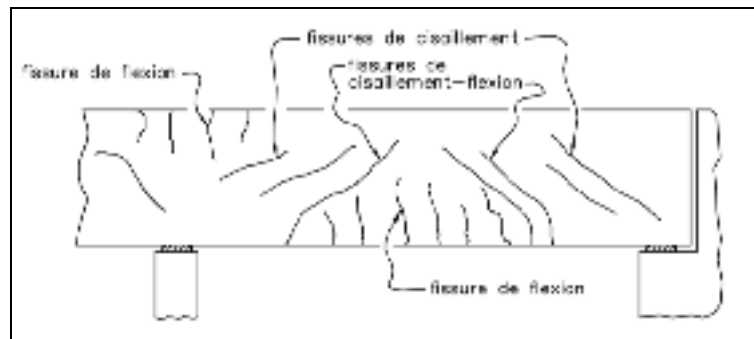


Figure 2.1 Types de fissures dans une poutre de béton armé
Tirée du Manuel d'inspection des structures, MTQ (2012)

2.1.2 Mode de rupture

La rupture d'un élément est atteinte lorsque l'un des matériaux qui le composent dépasse sa résistance et que les autres ne suffisent plus à pallier à l'augmentation de contrainte due au transfert du matériau rompu. Plusieurs paramètres peuvent influencer le mode de rupture qui peut être observé : le type et le point d'application de la charge, les dimensions et la géométrie des éléments, et le taux et les propriétés mécaniques des différents matériaux utilisés.

2.1.2.1 Rapport a/d

Le rapport a/d est d'une influence capitale sur le comportement des poutres en béton armé. Ce paramètre d'influence implique la position de la charge ainsi que la dimension du spécimen puisque : a représente la distance entre l'appui et la position de la charge et d la profondeur effective de la poutre. On distingue à l'aide de ce paramètre deux types de poutres : les poutres profondes ($a/d < 2,5$), et les poutres élancées ($a/d \geq 2,5$). Les modes de rupture observés selon ce paramètre ont été étudiés en distinguant quatre types de poutres (MacGregor et Bartlett, 2000). Le tableau 2.1 présente les modes de rupture observés selon différents rapports a/d .

Tableau 2.1 Mode de rupture d'une poutre en BA (sans renfort)
en fonction du rapport a/d
Tiré de Bousselham (2005)

Rapport a/d	Mode de rupture possible
$a/d < 1$	• perte d'ancrage aux extrémités des barres longitudinales tendues
$1 \leq a/d < 2.5$	• perte d'adhérence; • glissement des armatures longitudinales tendues; • cisaillement des barres d'armatures tendues (effet goujon); • écrasement du béton et prolongement des fissures inclinées.
$2.5 \leq a/d < 6$	• cisaillement le long des fissures inclinées; • écrasement du béton et Plastification de l'acier longitudinale.
$a/d \geq 6$	• flexion

2.1.2.2 L'effort axial

L'effort axial peut être de traction ou de compression. Il est établi que le béton offre une excellente résistance en compression et une moins bonne en traction. C'est pour cette raison

que les poutres en béton armé contiennent des barres d'acier dans la zone tendue (figure 2.2). Un effort de traction sur le béton a pour effet de le fragiliser et diminuer sa cohésion en entraînant une diminution de sa résistance en cisaillement. L'analogie du treillis montre bien le phénomène de distribution des efforts axiaux qui se créent lors d'application de charges créant les fissures de cisaillement. En étudiant la figure 2.3, on comprend mieux l'importance des barres transversales pour reprendre l'effort axial de tension dans la barre verticale du treillis. Sans les étriers, le béton agirait seul dans la reprise de l'effort axial de traction dans cette zone et réduirait grandement la résistance en cisaillement.

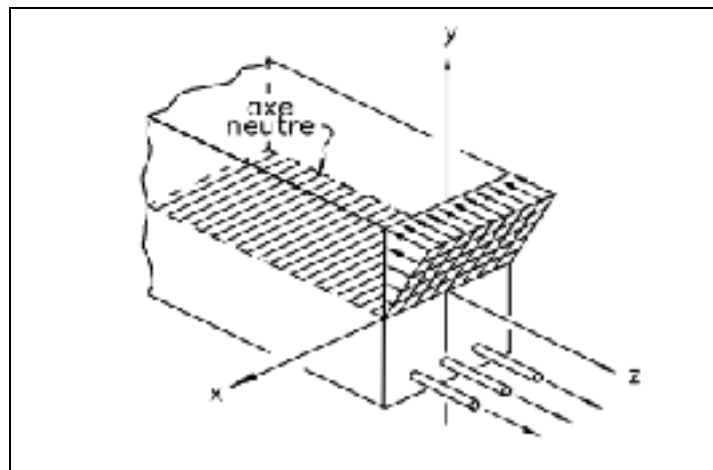


Figure 2.2 Répartition de l'effort axial
Tirée du Manuel d'inspection des structures, MTQ (2012)

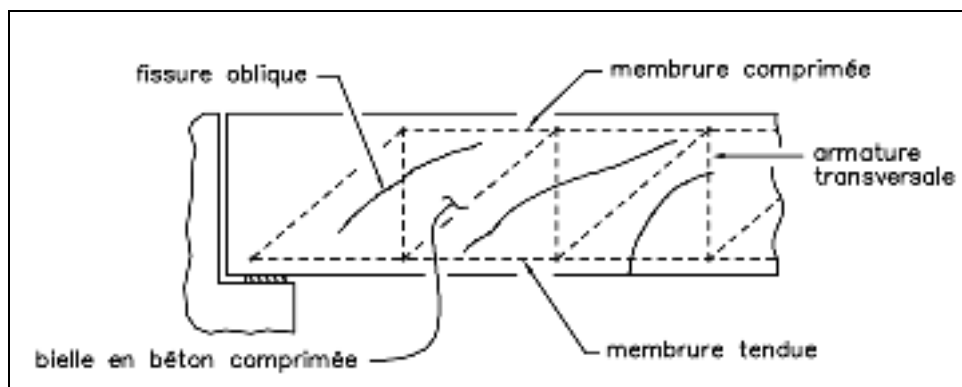


Figure 2.3 Analogie du treillis
Tirée du Manuel d'inspection des structures, MTQ (2012)

2.1.2.3 Le taux d'armature

Le taux d'armature longitudinale contribue à la résistance au cisaillement. Jusqu'à un certain point, l'effet de goujon des barres longitudinales permet d'accroître la résistance au cisaillement et contribue à réduire l'ouverture des fissures de cisaillement. Comme expliqué au paragraphe précédent, les barres transversales ont pour effet de reprendre la charge de traction axiale. Donc plus le taux d'acier transversal est élevé, moins les chances d'obtenir un mode de rupture par cisaillement seront élevées.

2.1.2.4 L'effet d'échelle

L'effet d'échelle est un paramètre qui influence de façon importante le comportement des poutres de béton armé. De nombreuses recherches ont démontré que la dimension de l'élément avait une influence majeure sur les résistances obtenues en cisaillement. L'ASCE-ACI Task Committee 445 (1998) rapporte que des essais réalisés par Shioya et al. (1989) ont montré que l'influence de la dimension des spécimens à l'étude pouvait réduire la résistance en cisaillement jusqu'au tiers en comparaison avec des spécimens de taille réduite. C'est pour cette raison qu'il est favorable de réaliser des études sur des spécimens de taille réelle dans les projets de recherche. Les résultats obtenus sont ainsi plus représentatifs de la réalité.

2.2 Comportement en cisaillement de poutres en BA renforcées de PRF

Les recherches réalisées sur les poutres renforcées en cisaillement à l'aide de PRF montrent clairement qu'il est bénéfique d'utiliser ces méthodes de renforcement. Tout comme les poutres de béton armé non renforcées, les types de fissures et les modes de rupture qui peuvent être observés varient selon certains paramètres d'influence résultant de la conception des éléments lors de la construction initiale et des particularités reliées au type et à la configuration du renfort utilisé. Suite à une analyse de plus de 100 tests, Bousselham et Chaallal (2004) ont conclu que les propriétés des matériaux utilisés, le rapport a/d et la géométrie des spécimens étaient d'une influence majeure sur le comportement en cisaillement de poutre en BA renforcées à l'aide de PRF.

2.2.1 Modes de rupture

Les modes de rupture qui peuvent être observés sont similaires à ceux des poutres non renforcées. En plus de ceux observés sur les spécimens non renforcés, on remarque plusieurs autres modes de rupture différents comme (i) l'écrasement du béton dans la bielle de compression, (ii) la fracture du renfort, (iii) le décollement du renfort à l'interface béton – PRF et (iv) le glissement ou perte d'ancrage. Ces différents modes de rupture peuvent survenir dépendamment de la prédominance de certaines conditions.

2.2.1.1 Rapport a/d

Qu'il s'agisse d'une poutre profonde ($a/d < 2,5$) ou d'une poutre élancée ($a/d \geq 2,5$), le mode de rupture observé diffèrera en fonction de ce paramètre. Il a été démontré par Khalifa et Nanni (1999) qu'un accroissement de résistance en cisaillement de poutres renforcées était observé avec l'augmentation du rapport a/d . De ce fait, les possibilités d'obtenir une rupture en cisaillement se trouvent réduites en présence de poutres élancées renforcées à l'aide de PRF.

Le tableau 2.2 présente les modes de rupture observés en fonction du rapport a/d (Bousselham, 2005).

Tableau 2.2 Mode de rupture poutre en BA (avec PRF) en fonction du rapport a/d
tiré de Bousselham (2005)

Rapport a/d	Modes de rupture observés
$a/d < 2.5$	rupture en cisaillement accompagnée de la fracture du renfort;
$2.5 \leq a/d < 3.2$	- rupture en cisaillement accompagnée de la fracture du renfort; - décollement du renfort;
$a/d \geq 3.2$	décollement du renfort.

2.2.1.2 Le taux d'armature transversale

Il a été démontré que le taux d'armature influençait le comportement des poutres renforcées en cisaillement. Chaallal et al. (2002) indiquent que lorsque le taux d'acier transversal augmente, la contribution du PRF diminue. Ceci montre que l'acier et le renfort travaillent conjointement dans la reprise des efforts de cisaillement. Ainsi, le mode de rupture sera influencé par la présence ou non et par le taux d'armature transversale de l'élément pour reprendre les efforts axiaux de traction verticale dans la zone de cisaillement.

2.2.1.3 Le taux de renfort en PRF

Il a été démontré dans plusieurs recherches, Chaallal et al. (2002), Täljsten (2003) et Bousselham (2005), que le taux de renfort avait une influence sur la résistance en cisaillement. En effet, l'augmentation du taux de PRF par l'application d'épaisseurs de couches subséquentes ou par la réduction de l'espacement entre les bandes de renfort augmente la résistance en cisaillement des poutres en béton armé. Ce paramètre agit sur les fissures de cisaillement en réduisant l'ouverture de ces fissures par l'augmentation du taux de PRF. L'adhérence à l'interface béton-PRF permet au renfort de reprendre les efforts de traction axiale verticale et de réduire cette contrainte sur le béton.

2.2.1.4 L'effet d'échelle

Tout comme sur les poutres non renforcées, l'effet d'échelle a une influence sur la résistance au cisaillement des poutres renforcées à l'aide de PRF. Le gain de résistance au cisaillement observé lors d'essais sur des spécimens de dimensions variables, diminue avec l'augmentation de la hauteur utile (d) (Bousselham 2005). Ce phénomène a aussi été validé par Godat et al. (2010) qui affirment que les contraintes enregistrées sur le PRF démontraient une plus grande contribution sur les spécimens de petite taille que sur ceux de taille grandeur nature. L'effet d'échelle est donc un paramètre capital qui devrait être considéré lors de l'étude des comportements des poutres renforcées en cisaillement à l'aide de PRF.

2.3 Calcul des poutres en béton renforcées en cisaillement selon les normes et codes

Les règles de calcul utilisées par les différents codes dans le calcul de la résistance au cisaillement des poutres en béton armé renforcées en cisaillement proposent une approche utilisant la contribution de chacun des matériaux. Ainsi, la résistance totale en cisaillement (V) est donnée par la sommation de V_c pour la résistance en cisaillement du béton, V_s pour la résistance de l'acier transversal et de V_f pour celle du renfort de PRF.

$$V = V_c + V_s + V_f \quad (2.1)$$

Bien que les différents codes utilisent l'analogie du treillis pour le calcul de la résistance en cisaillement du renfort, leurs équations diffèrent. Ceci s'explique par le fait que ces codes ne considèrent pas tous les différents facteurs d'influence, tels que : le mode de renfort, la longueur d'ancrage, l'angle des fissures et le taux de renfort. Le tableau 2.3 présente les paramètres d'influence utilisés dans les différentes normes et codes. Les différentes équations découlant des normes ACI 440-2R (2008), de la CSA S806 (2012), de la CSA S6 (2014), de la fib-TG 9.3 (2001), CNR-DT200 (2004) et de la HB 305 (2008) seront présentées en détail.

Tableau 2.3 Facteurs d'influence utilisés dans les différentes normes de conception pour le calcul du renforcement en cisaillement à l'aide de PRF

(adapté de Mofidi et Chaallal 2011)

Normes et codes	Dernière révision	Méthode de renfort	Déformation unitaire effective	Longueur d'ancrage	w_f/s_f	Angle de fissuration	Patron de fissuration	Effet des armatures transversales
ACI 440.2R	2008	x	x	x				
CAN/CSA-S806	2012	x	x	x		x		
CAN/CSA-S6	2014	x	x	x		x		
<i>fib</i> -TG 9.3	2001		x			x		
CNR-DT200	2004	x	x	x	x	x		
HB 305	2008	x	x	x	x	x		

Note : x = inclus

2.3.1 ACI 440.2R 2008

Le modèle proposé par la norme ACI-440.2R 2008 pour estimer la contribution du PRF est donné par la formule suivante :

$$V_f = \frac{A_f f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (2.2)$$

où $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$

La déformation unitaire effective maximale ε_{fe} est quant à elle ajustée selon le mode de renfort utilisé. Pour le renfort en enveloppe, elle fixe la limite à l'ouverture des fissures maximum qui assurent un certain confinement des granulats au béton, tandis que c'est l'adhérence béton-PRF qui gouverne dans le cas du renfort collé en U et en surface sur les côtés de l'âme.

En enveloppe :

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{fu} \quad (2.3)$$

En U où collé sur l'âme :

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (2.4)$$

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75; L_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \quad (2.5)$$

$$k_1 = \left(\frac{f_{cm}}{27} \right)^{2/3}; k_2 = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{d_f - L_e}{d_f} & \text{(renfort en U)} \\ \frac{d_f - 2L_e}{d_f} & \text{(collé sur côté de l'âme)} \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

2.3.2 CAN/CSA-S806 2012

Le modèle de calcul proposé par la norme CSA-S806 (2012) pour la conception d'éléments en BA de bâtiment avec PRF est similaire à celui de la norme S6-2014 et s'articule comme suit :

$$V_f = \frac{A_f E_f \varepsilon_{fe} d_f (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha}{s_f} \quad (2.7)$$

En enveloppe :

$$\varepsilon_{fe} = 0,006 < 0,75 \varepsilon_{fu} \quad (2.8)$$

En U avec système d'ancrage reconnu :

$$\varepsilon_{fe} = 0,005 < 0,75 \varepsilon_{fu} \quad (2.9)$$

En U ou collé sur les côtés de l'âme sans système d'ancrage :

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} < 0,004 \quad (2.10)$$

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75; L_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \quad (2.11)$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3}; k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad (2.12)$$

2.3.3 CAN/CSA-S6 2014

Le modèle proposé par la norme CSA-S6-14 pour le calcul des ponts routiers est similaire à celui proposé par la norme ACI 440-2R-08. Cependant, plutôt que d'utiliser l'analogie du treillis à 45°, elle utilise l'analogie du treillis à angle variable ce qui mène à l'équation suivante :

$$V_f = \frac{A_f E_f \varepsilon_{fe} d_f (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha}{s_f} \quad (2.13)$$

En enveloppe :

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 < 0,75 \varepsilon_{fu} \quad (2.14)$$

En U ou collé sur les côtés de l'âme sans système d'ancrage :

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} < 0,004 \quad (2.15)$$

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (2.16)$$

où

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad (2.17)$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad (2.18)$$

$$L_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \quad (2.19)$$

2.3.4 *fib*-TG 9.3 2001

Le modèle proposé par la norme *fib*-TG 9.3 (2001) pour établir la contribution en cisaillement du PRF se base sur l'analogie du treillis à angle variable et est donné par l'équation suivante :

$$V_f = \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fe} \cdot b \cdot d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (2.20)$$

La déformation unitaire maximale prescrite par cette norme est fonction de la méthode de renforcement utilisée, du type de fibre composant le renfort, de la rigidité du renfort ($\rho_f \cdot E_f$) et de la résistance en compression du béton. Les formules qui découlent de ces paramètres sont présentées comme suit :

En enveloppe :

$$\varepsilon_{fe} = \left[0,17 \left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,30} \right] \varepsilon_{fu} \quad (2.21)$$

En U ou collé sur les côtés de l'âme :

$$\varepsilon_{fe} = \min \left[0,65 \left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,56} 10^{-3} ; 0,17 \left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \right] \quad (2.22)$$

En enveloppe munie de fibre aramide :

$$\varepsilon_{fe} = \left[0,048 \left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,47} \right] \varepsilon_{fu} \quad (2.23)$$

E_f représente le module d'élasticité du PRF en GPa et f_c' la résistance en compression du béton en MPa.

2.3.5 CNR-DT200 2004

Le modèle proposé par la norme italienne CNR-DT200 2004 est celui, avec la norme australienne HB 305-2008, qui considère le plus de paramètres d'influence, tels que : le mode de renfort, la déformation unitaire effective, la longueur d'ancrage, le taux de renfort et l'angle de la fissuration. Les seuls facteurs qui ne sont pas considérés sont ceux du patron de fissuration et de l'effet des armatures transversales. L'équation qui relève de cette norme est la suivante :

$$V_f = \frac{1}{\gamma_{rd}} \cdot 0,9d \cdot f_{fed} \cdot 2t_f (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \frac{w_f}{s_f} \quad (2.24)$$

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{L_e \sin \alpha}{\min\{0,9d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} (\phi_R f_{fd} - f_{fdd}) \left[1 - \frac{L_e \sin \alpha}{\min\{0,9d; h_w\}} \right] \quad (2.25)$$

Où

$$\phi_R = 0,2 + 1,6 \frac{r_c}{b_w}; \quad 0 \leq \frac{r_c}{b_w} \leq 0,5 \quad (2.26)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}}; \quad f_{fdd} = \frac{0,8}{\gamma_{fd}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot G_{fk}}{t_f}} \quad (2.27)$$

$$G_{fk} = 0,03k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}; \quad k_b = \sqrt{\frac{2 - w_f / s_f}{1 + w_f / 400}} \geq 1 \quad (2.28)$$

Tissu collé en U :

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{L_e \sin \alpha}{\min\{0,9d; h_w\}} \right] \quad (2.29)$$

Tissu collé sur les côtés de l'âme :

$$V_{fd} = \frac{1}{\gamma_{rd}} \cdot \min\{0,9d; h_w\} \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \theta} \cdot \frac{w_f}{s_f} \quad (2.30)$$

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \frac{Z_{red,eq}}{\min\{0,9d; h_w\}} \cdot \left[1 - 0,6 \cdot \sqrt{\frac{L_{eq}}{Z_{red,eq}}} \right]^2 \quad (2.31)$$

Où

$$Z_{red,eq} = Z_{red} + L_{eq} \quad (2.32)$$

$$Z_{red} = \min\{0,9d; h_w\} - L_e \cdot \sin \alpha \quad (2.33)$$

$$L_{eq} = \frac{s_{uf}}{f_{fdd} / E_f} \cdot \sin \alpha \quad (2.34)$$

2.3.6 HB 305-2008

Le modèle proposé par la norme australienne HB 305-2008 pour déterminer la contribution en cisaillement du renfort en PRF, tout comme la norme italienne, est celle qui inclut et considère le plus de paramètres d'influence pour quantifier l'apport de la résistance en cisaillement. Le mode de renfort, la déformation unitaire effective, la longueur d'ancrage, le taux de renfort et l'angle de la fissuration sont tous pris en considération dans ce modèle.

L'équation établie par cette norme est la suivante :

$$V_f = 2f_{fed} \cdot t_f \cdot \frac{w_f}{S_f} \cdot h_{fe} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (2.35)$$

$$h_{fe} = z_b - z_t ; z_b = 0,9d - d_{fb} ; z_t = d_{ft} \quad (2.36)$$

$$f_{fed} = D_f \cdot f_{fd,max} \quad (2.37)$$

En enveloppe :

$$f_{fd,max} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_f} \cdot \phi_{R'} \cdot f_{fu} ; & \varepsilon_f \leq 1,5\% \\ \frac{1}{\gamma_f} \cdot \phi_{R'} \cdot E_f \cdot \varepsilon_f ; & \varepsilon_f > 1,5\% \end{cases} \quad (2.38)$$

$$D_f = 0.5 \left(1 + \frac{z_t}{z_b} \right) \quad (2.39)$$

En U ou collé sur les côtés de l'âme :

$$f_{fd,max} = \min \begin{cases} \frac{1}{\gamma_f} \cdot \phi_{R'} \cdot f_{fu} \\ \frac{1}{\gamma_f} \cdot 0.35 \cdot \beta_L \cdot \beta_w \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot \sqrt{f_{ck}}}{t_f}} \end{cases} \quad (2.40)$$

$$\phi_{R'} = 0.80 \text{ et } \gamma_f = 1.25 \quad (2.31)$$

$$\beta_L = \begin{cases} \lambda, & \lambda \leq 1 \\ 1, & \lambda > 1 \end{cases}; \beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_f / (s_f \cdot \sin \alpha)}{1 + w_f / (s_f \cdot \sin \alpha)}} \quad (2.42)$$

$$D_f = \begin{cases} \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \lambda\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \lambda\right)}; & \lambda = \frac{L_{max}}{L_e} \leq 1 \\ 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \cdot \lambda}; & \lambda = \frac{L_{max}}{L_e} > 1 \end{cases} \quad (2.43)$$

$$L_{max} = \begin{cases} \frac{h_{fe}}{\sin \alpha} & (\text{collé en U}) \\ \frac{h_{fe}}{2 \sin \alpha} & (\text{collé sur les côtés de l'âme}) \end{cases} \quad (2.44)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{\sqrt{f_{ck}}}} \quad (2.45)$$

2.4 Synthèse

La présentation des différents codes et normes en vigueur pour le calcul de la résistance en cisaillement des poutres en béton armé renforcées à l'aide de PRFC permet de mieux visualiser les différents paramètres d'influence pris en considération dans les équations des différentes normes. Bien qu'aucune de ces normes présentées dans ce chapitre ne considère l'influence de l'acier transversale, Mofidi et Chaallal 2011 stipulent que la contribution du PRF est influencée par le taux d'acier transversal et propose une nouvelle approche pour déterminer la contribution du renfort de PRF. Suite à cette présentation, il est possible de comparer les gains de résistances obtenus par les différents systèmes de renfort à l'étude avec les valeurs théoriques proposées par les différentes normes. Les calculs selon les codes et normes seront calculés pour les spécimens dans le chapitre 4.

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Généralités (paramètres d'étude)

Ce programme expérimental est mené afin d'évaluer les avantages des différents systèmes de renforcement à l'aide de PRF proposé par l'industrie. Les conditions de chargement, les caractéristiques mécaniques ainsi que le mode de chargement ont soigneusement été choisis pour reproduire les conditions en service des différents ouvrages en béton armé. De plus, les essais ont été réalisés sur des spécimens ayant été préfissurés en cisaillement avant d'être renforcés à l'aide de système de renfort en PRF. L'utilisation de spécimens préfissurés a pour but de simuler les conditions réelles d'application des PRF, généralement sur des éléments qui présentent des signes de dégradation avant renforcement.

Différents systèmes de renforcement de poutres en béton armé ont fait l'objet de nombreuses recherches et analyses. La revue de la littérature présente différentes méthodes de renforcement qui ont été étudiées et qui démontrent les bénéfices du renforcement en cisaillement à l'aide de PRFC. Cependant, il est rarement question de comparaison entre ces différentes méthodes de renforcement. Dans cette étude, trois systèmes de renforcement à l'aide de PRFC seront mis à l'essai et comparés : le tissu SikaWrap Hex 230C, la tige Sika CarboDur Rods 9 mm et les lamelles Sika CarboShear L. Ces différents produits seront analysés en terme de :

- a charge maximale atteinte ainsi que le gain de résistance par mm^2 de PRFC correspondant à cette charge;
- les déformations internes enregistrées sur le renfort et les aciers d'armatures transversales et longitudinales;
- la fissuration et le mode de rupture à l'atteinte de la charge maximale;
- la faisabilité de mise en place du système en chantier.

Sur les trois (3) spécimens utilisant les lamelles en L (Sika CarboShear L), l'effet de la profondeur d'ancrage du renfort sur la performance du système sera également étudié.

Cette étude compare donc le gain en résistance des différents types de renfort en cisaillement de poutres en BA ayant subi des dommages irréversibles en termes de cisaillement.

3.2 Description du programme expérimental

Le programme expérimental comporte six poutres renforcées à l'aide de différentes méthodes utilisant la technologie de PRF ainsi que d'une poutre de contrôle sans aucun système de renforcement en PRF. La poutre de contrôle a donc été utilisée pour comparer le gain de résistance en cisaillement entre les différents systèmes mis à l'essai. Il est important d'observer que tous les spécimens comportent les mêmes propriétés en termes de dimensionnement, matériaux, taux d'armature et qu'ils ont subi des efforts similaires lors d'essais de préchargement ayant causé des fissures de cisaillement. Ceci a permis de contrôler ces paramètres tout en comparant les paramètres considérés à l'étude. Les essais de flexion ont été menés en appliquant sur les spécimens une charge croissante située à mi-portée entre les deux appuis. Notons qu'aucune comparaison n'a pu être établie avec les essais de préchargement puisque les extrémités chargées des poutres lors de ces tests ne comportaient pas le même taux d'armature transversale, soit un espacement $s = 3d/4$.

3.2.1 Description et préparation des spécimens

Toutes les poutres mises à l'essai portent la désignation S1, qui signifie que les poutres sont composées d'étriers espacés d'une valeur $s = d/2$, où d représente la profondeur effective de la poutre, correspondant à 350 mm (figure 3.1). Le tableau 3.1 présente les différents spécimens et explique la nomenclature qui permet de les identifier.

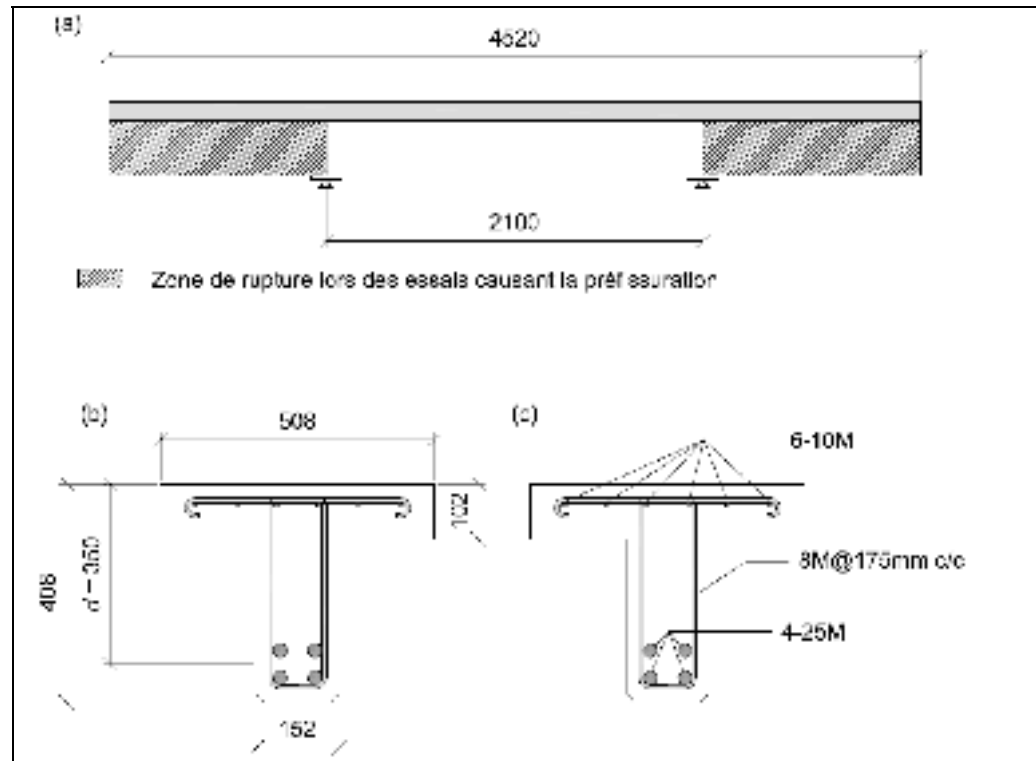


Figure 3.1 Caractéristiques des poutres : (a) longueur de la poutre; (b) dimension de la section; (c) ferrailage de la section

Tableau 3.1 Présentation des différents spécimens

Spécimen	Renfort utilisé	Identification	Définition	Particularité	Identification
S1-CON	Aucun	CON	Contrôle	N/A	N/A
S1-EB	SikaWrap Hex 230C	EB	Tissu collé en surface (Externally Bounded)	N/A	N/A
S1-ETS-9mm	Sika CarboDur Rods 9 mm	ETS	Enduit à travers la section	Barres CFRP 9 mm	9 mm
S1-LS-NA	Sika CarboShear L	LS	Lamelle Sika	Non ancrée	NA
S1-LS-TA	Sika CarboShear L	LS	Lamelle Sika	Totalement ancrée	TA
S1-LS-PA	Sika CarboShear L	LS	Lamelle Sika	Partiellement ancrée	PA
S1-LS-BA	Sika CarboShear L	LS	Lamelle Sika	Barre d'ancrage	BA

3.2.1.1 Spécimen S1-CON

Le spécimen S1-CON est un spécimen de contrôle servant à déterminer la charge maximale atteinte par les poutres n'ayant pas été renforcées à l'aide de PRF. La charge maximale enregistrée par cette poutre sera utilisée pour établir par comparaison le gain de résistance des systèmes de renforcement en PRF mis à l'essai. Comme tous les autres spécimens, la poutre est de section en T à âme pleine en béton de type normal à base de ciment Portland, ayant une résistance en compression à 28 jours de 29,6MPa. La figure 3.1 présente les dimensions ainsi que les différentes composantes propres à l'ensemble des spécimens mis à l'essai.

3.2.1.2 Spécimen S1-EB

Le spécimen S1-EB a été renforcé à l'aide d'un tissu SikaWrap Hex 230C. Le tissu a été collé, sur la surface de l'âme, et ce, sur toute la longueur du spécimen, à l'aide d'une résine d'imprégnation époxyde Sikadur 330 (figure 3.2-a). Une fois liées, ces deux composantes forment un système de renforcement composite qui permet d'accroître la résistance structurale de l'élément renforcé. Avant la mise en place du tissu, la surface du béton a été nettoyée au jet abrasif afin de créer une surface de contact sans impureté et améliorer l'adhérence entre le béton et la matrice de renfort (figure 3.2-b). De plus, avant l'application du tissu, les arêtes ont été arrondies à un rayon minimum de 10 mm à l'aide d'une rectifieuse au diamant. Notons qu'aucun moyen d'ancrage n'a été utilisé sur ce spécimen pour contrer le décollement du tissu.

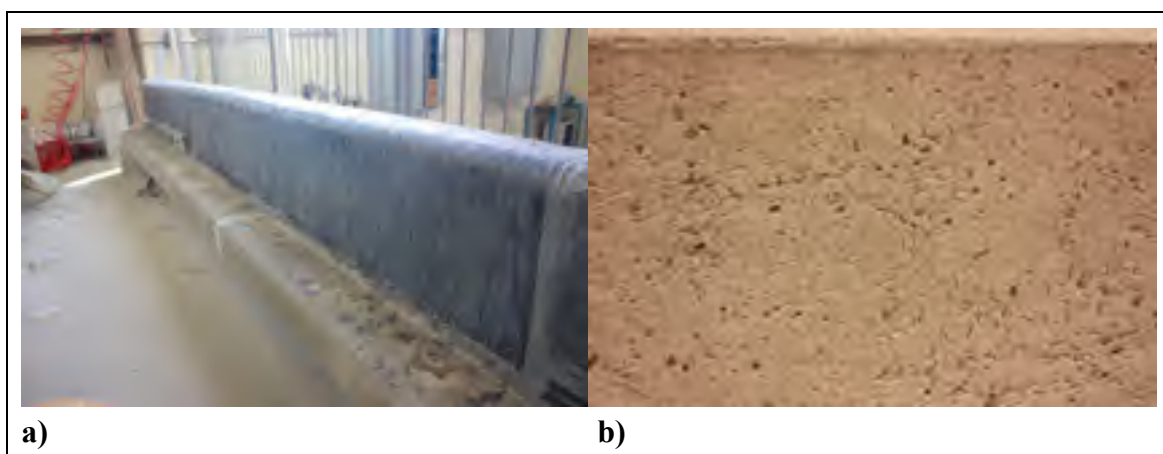


Figure 3.2 Préparation du spécimen S1-EB : (a) préparation de surface CSP 3-4;
(b) poutre renforcée

3.2.1.3 Spécimen S1-ETS-9 mm

Le spécimen S1-ETS-9 mm a été renforcé à l'aide de tiges Sika CarboDur Rods de 9 mm de diamètre. Ces tiges en polymère renforcé de fibres de carbone ont été insérées au centre de l'âme de la poutre dans des trous forés, noyées dans une résine époxyde, entre les étriers existants, donc espacés de 175 mm (figure 3.3). Cette méthode de renforcement est de loin celle qui requiert le moins de préparation. Outre la localisation des barres existantes avant le

perçement et du nettoyage des trous suite au perçement, cette méthode est d'une grande simplicité et s'adapte facilement à tout type de poutre.



Figure 3.3 Préparation du spécimen S1-ETS-9 mm

3.2.1.4 Spécimen S1-LS-NA

Les spécimens portant la désignation LS sont des poutres en T renforcées à l'aide de lamelles en L Sika CarboShear L. La désignation NA (No Anchorage) signifie que les lamelles ne comportent aucune profondeur d'ancrage dans le béton à la jonction de la semelle supérieure de la poutre. Les lamelles en L ont été collées en surface avec un espacement régulier de 175 mm c/c entre les étriers internes de la poutre. Tout comme le système renforcé de tissu, une préparation du béton au jet abrasif a été réalisée localement vis-à-vis le positionnement des lamelles pour améliorer l'adhérence. Les lamelles en L sont ensuite collées en surface à l'aide d'une fine couche adhésive structurale Sikadur 30. L'application du Sikadur 30 est

réalisée entre deux lanières de ruban adhésif pour une question d'esthétique. La figure 3.4 présente le détail de mise en place de la technique de renforcement à l'aide de lamelles en L.



Figure 3.4 Préparation du spécimen S1-LS-NA

3.2.1.5 Spécimen S1-LS-TA

Le spécimen S1-LS-TA est composé du même type de renfort que les autres spécimens portant la mention LS, à l'exception de la profondeur d'ancrage des lamelles Sika CarboShear L dans la semelle supérieure de la poutre. Les lamelles en L ont été ancrées selon les recommandations du fournisseur, soit 100 mm. Pour permettre de rencontrer cette exigence, des trous ont d'abord été forés dans la semelle au droit du positionnement des

lamelles de renfort. De plus, pour améliorer davantage l'adhérence de l'ancrage, la partie ancrée des lamelles est rendue rugueuse à l'aide de Sikadur 30, tel que montré à la figure 3.5.

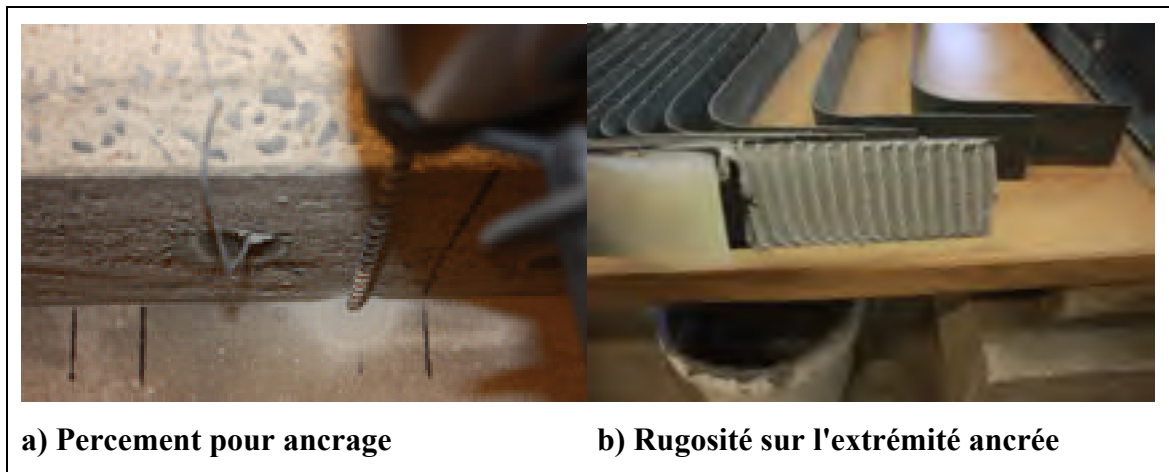


Figure 3.5 Préparation du spécimen S1-LS-TA

3.2.1.6 Spécimen S1-LS-PA

Le spécimen S1-LS-PA présente exactement les mêmes particularités de réalisation que le spécimen S1-LS-TA, à l'exception de la profondeur d'ancrage des lamelles (figure 3.6). Ce spécimen a été mis à l'essai pour quantifier l'apport de ce système s'il devait être utilisé dans un cas où il serait impossible de respecter la profondeur d'ancrage recommandée en raison de la répartition imprévisible des barres d'armature de la dalle. En effet, la profondeur d'ancrage a été limitée à 25 mm dans ce cas pour limiter le forage et éviter ainsi d'atteindre l'armature inférieure de la dalle lors du percement. Notons que l'armature inférieure est généralement située à une distance de recouvrement d'environ 35 mm. De plus, ce spécimen permet de vérifier si une profondeur d'ancrage de 25 mm permettrait de retarder suffisamment le décollement prématuré des lamelles de renfort et d'offrir un gain intéressant en termes de résistance.



Figure 3.6 Préparation du spécimen S1-LS-PA, ancrage partiel

3.2.1.7 Spécimen S1-LS-BA

Le spécimen S1-LS-BA est composé d'une barre d'aluminium ancrée à l'âme de la poutre à la jonction supérieure de la section en T. Deux tiges filetées de 8 mm, à une distance de 50 mm de part et d'autre du centre des lamelles de renfort, ont été ancrées à l'aide de Sika AnchorFix 3 (figure 3.7). Une plaque d'aluminium a ensuite été fixée par boulonnage en surface sur la totalité des lamelles de renforcement en PRF. Cette plaque d'aluminium a été mise en place pour tenter d'empêcher le décollement des lamelles à la jonction de l'âme et de la semelle supérieure puisque les lamelles CarboShearL ne disposent d'aucune profondeur d'ancrage pour ce spécimen.

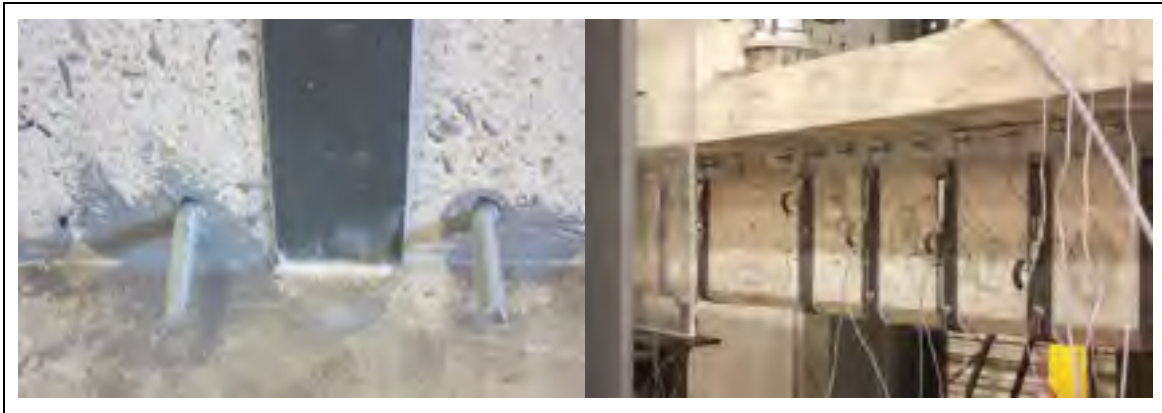


Figure 3.7 Préparation du spécimen S1-LS-BA

3.3 Procédure d'essais

3.3.1 Chargement

Comme mentionné plus tôt, les poutres ont été soumises à une charge croissante située à mi-portée entre les deux appuis, correspondant à une distance $a = 3d$, soit 1 050 mm des appuis (figure 3.8). La poutre a été installée sur un banc d'essai muni d'un vérin hydraulique (figure 3.9) et soumise à une charge statique monotone croissante en contrôle de déplacement à un taux constant de 2 mm/min.

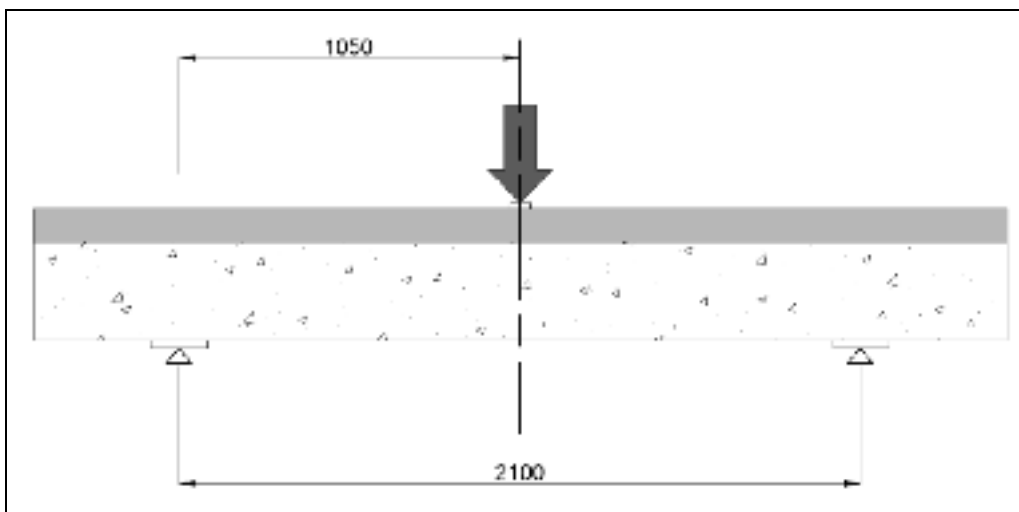


Figure 3.8 Détail du chargement



Figure 3.9 Banc d'essai

3.3.2 Instrumentation et acquisition de données

Pour s'assurer de la verticalité des spécimens lors du chargement, des capteurs LVDTs (*linear variable differential transformers*) ont été utilisés pour mesurer le déplacement transversal. Ce paramètre est vérifié pour s'assurer qu'aucun effort de torsion n'agit sur la poutre durant le chargement (figure 3.10). Le même type de capteur a été utilisé pour mesurer la flèche à mi-portée au droit de la charge. Des jauges à déformation de marque Kyowa KC 60 ont été soigneusement collées en surface sur les étriers internes pour enregistrer les efforts et déformations unitaires de l'acier durant tout le chargement. Ces jauges ont été installées à des endroits stratégiques et propices pour intercepter le profil de fissures en cisaillement. Une jauge du même type a aussi été installée sur une barre longitudinale pour évaluer les contraintes et allongements de l'acier dans la zone en flexion. Une séquence de mise en place de ces jauges est présentée à la figure 3.11. Notons que le même type de jauges a été collé en surface sur les tiges de renfort du spécimen S1-ETS-9 mm avant de les noyer dans l'âme de la poutre.

Pour enregistrer les déformations du renfort des spécimens utilisant les lamelles de PRFC et le tissu collé en surface, des jauges à déplacement (Crack gauges) ont été collées en surface sur les lamelles de renfort et le tissu (figure 3.12). Afin d'identifier facilement ces différents capteurs de déformation, une nomenclature a été établie pour faciliter le traitement des données. Le tableau 3.2 décrit la façon dont ont été identifiées les différentes jauges de déformation sur les spécimens mis à l'essai.

Tableau 3.2 Identification des jauges

Identification	Localisation	Côté droit* (R)	Côté gauche* (L)
ST	Acier transversal (Stirrups)	1R à 4R	1L à 4L
LG	Acier longitudinal	1	
EB	Tissu (EpoxyBounded)	1R à 4R	1L à 4L
ETS	Barres CFRP 9 mm	1R à 4R	1L à 4L
LS	Lamelle Sika	1R à 4R	1L à 4L

*Numéroté de façon croissante à partir des appuis

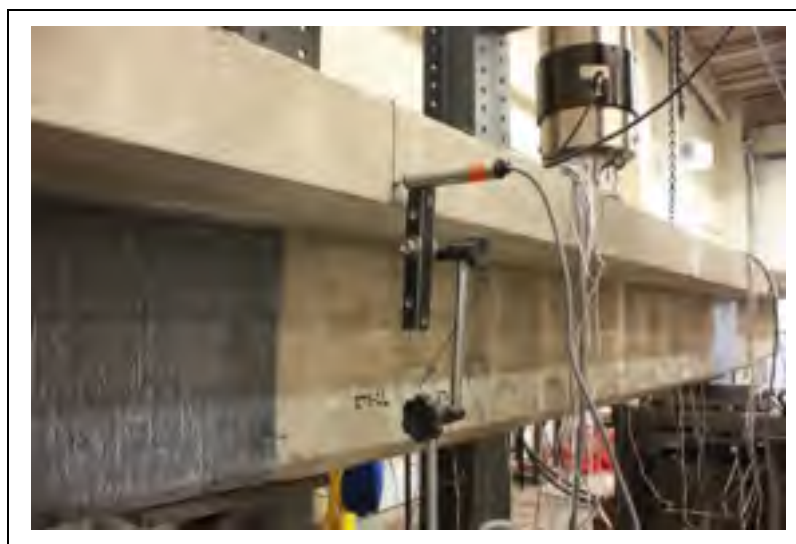


Figure 3.10 Banc d'essai

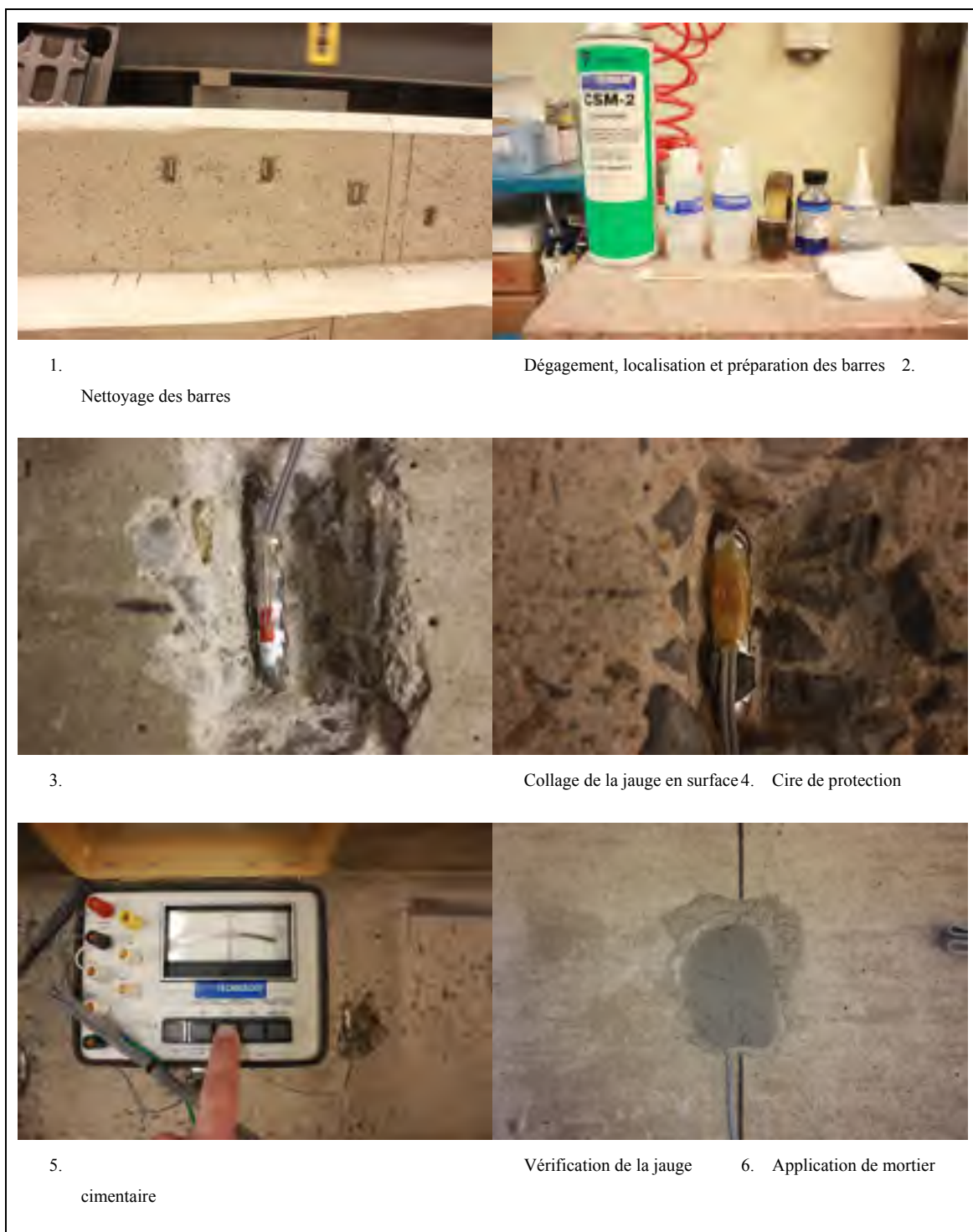


Figure 3.11 Séquence d'installation des jauges



Figure 3.12 Jauges sur renfort externe

Afin d'analyser chacun des spécimens, les jauges étaient reliées à un système d'acquisition automatique de données qui enregistre toutes les déformations en temps réel tout au long du chargement (figure 3.13). Ainsi, les données recueillies ont été analysées et comparées afin de comprendre le comportement des différents éléments des systèmes de renforcement mis à l'essai et d'évaluer leur gain en résistance.



Figure 3.13 Système d'acquisition automatique de données en temps réel

CHAPITRE 4

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

4.1 Béton

Le béton utilisé a été produit en usine et livré au laboratoire de structures lourdes de l'ETS. Tous les spécimens ont été confectionnés avec une même coulée de béton pour assurer les mêmes propriétés pour toutes les poutres utilisées lors de l'essai. La résistance en compression spécifiée cible était de 20 MPa. La formule de mélange du béton est composée d'un ciment de type 10, de sable et de granulats ayant un diamètre maximal de 14 mm. Les tests réalisés sur les cylindres normalisés à 28 jours ont donné une résistance en compression de 29,6 MPa. Un essai sur une éprouvette a également été réalisé le jour des essais et a donné une résistance en compression de 33,7 MPa.

4.2 Acier d'armature

Tel que décrit au chapitre 3, les spécimens sont armés de barres longitudinales 25M dans la partie tendue de la poutre et de barres 10M dans la semelle supérieure comprimée. Des étriers 8M sont également disposés sur toute la longueur des poutres pour reprendre les efforts tranchants. La limite élastique f_y des barres d'armature longitudinales est de 540 MPa. Sur la base des essais de traction réalisés en usine conformément aux normes ASTM A82-02 et ASTM A496-02. Une contrainte élastique moyenne de 685MPa et un pourcentage d'élongation de 6,4 % ont été obtenus pour les barres 8M.

4.3 Renfort de CFRP

Le tableau 4.1 présente les propriétés mécaniques et élastiques des renforts en PRF utilisées dans la présente étude.

Tableau 4.1 Propriétés mécaniques des types de renfort
(données du fabricant)

Type	Résistance en traction de la fibre GPa	Allongement de la fibre à la rupture %	Module d'élasticité de la fibre GPa	Résistance en traction du composite MPa	Allongement du composite à la rupture %	Module d'élasticité du composite GPa
SikaWrap Hex	3,45	1,5	230	894	1,33	65
Sika CarboDurRods	2,80	1,8	155	1700	ND	ND
Sika CarboShear L	1,35	1,3	90	ND	ND	ND

ND : Non disponible

4.3.1 Renfort de PRFC

Le renfort utilisé sur renforcement du spécimen S1-EB est un tissu de fibre de carbone unidirectionnelle à 0° produit par la compagnie Sika-Canada. Selon les spécifications du fournisseur, ce tissu a une densité de 1,8 et un poids de 230 g/m² de surface. La fibre de carbone du tissu a une résistance en traction de 3,45 GPa, un module d'élasticité de 230 GPa et un allongement maximum de 1,5 % à la rupture. Une fois imprégnées dans une résine époxyde compatible de type Sikadur 330, ces deux composantes forment un composite de renforcement ayant une résistance en traction de 894 MPa, un module de traction de 65 GPa et un allongement à la rupture de 1,33 %. Les propriétés de la fibre de carbone utilisée pour le tissu et du composite sont présentées au tableau 4.1. Les fiches techniques du SikaWrap Hex 230C et de la colle Sikadur 330 sont présentées aux annexes I et VI respectivement.

4.3.2 Sika CarboDur Rods

Le système utilisé pour le renforcement du spécimen S1-ETS-9 mm est composé de tiges en polymère renforcé de fibres (PRF) de carbone ayant un contenu volumétrique de fibres équivalent à 65 %. Contrairement aux spécifications de la fiche technique présentée à l'annexe II, ces tiges sont insérées dans des trous forés à travers l'âme de la section dans le sens vertical de l'élément. Ces trous sont préalablement remplis avec une colle compatible, de type Sika AnchorFix 4. Les tiges en PRF ont une résistance en traction de 2,8 GPa, un module d'élasticité de 155 GPa et un allongement maximal de 1,8 %. Une fois imprégnée dans la résine, la résistance en traction est de 1,7 GPa.

4.3.3 Sika CarboShear L

Les spécimens qui comportent la mention LS dans leur désignation sont renforcés extérieurement à l'aide de lamelles préimprégnées en PRF de carbone ayant un taux de fibres équivalent à 56 %. Ces lamelles sont offertes en plusieurs dimensions. Leurs propriétés géométriques et mécaniques sont présentées à l'annexe III. Les éléments de renfort utilisés pour les spécimens de la présente étude étaient de 200 mm x 500 mm et ont été coupés pour s'ajuster parfaitement aux dimensions des poutres à l'essai. Les lamelles CarboShear L sont de 40 mm de largeur et de 2 mm d'épaisseur, et ce, pour toutes les longueurs offertes. Les lamelles ont une résistance ultime en traction de 1,35 GPa, un module élastique de 90 GPa et présentent un allongement à la rupture de 1,3 %. Notons que la résistance à l'arrachement est influencée par la profondeur d'ancrage des lamelles dans la partie supérieure de l'élément.

4.4 Colle

4.4.1 Sikadur 330

La colle époxyde utilisée pour le spécimen S1-EB, renforcé de tissu SikaWrap Hex 230C, est une résine à deux composantes ayant une haute résistance. La résistance en traction, l'allongement à la rupture ainsi que le module élastique de cette colle époxyde sont

respectivement de 30 MPa, 1,5 % et de 3,8 GPa. L'annexe VI présente la fiche technique complète de ce produit.

4.4.2 AnchorFix 4

Les tiges CarboShear Rod de Sika utilisées pour le renforcement du spécimen S1-ETS-9 mm ont été imprégnées dans une résine époxyde à deux composantes de type Sika AnchorFix 4. Ladite résine a une résistance de liaisonnement de 17 MPa à 14 jours, une résistance au cisaillement de 24,5 MPa et présente un allongement à la rupture de 2,56 %. La fiche technique décrivant les propriétés du produit en détail est présentée à l'annexe IV.

4.4.3 Sikadur 30

Les lamelles Sika CarboShear L des spécimens LS ont été collées en surface à l'aide d'un adhésif époxyde structural en pâte à 2 composantes de type Sikadur 30. Cet adhésif a une résistance en traction à 7 jours de 24,8 MPa, un module élastique de 4,5 GPa et un allongement à la rupture de 1 %. La fiche technique décrivant en détail les propriétés du produit Sikadur 30 est présentée à l'annexe V.

4.5 Calcul de V_{FRP} selon les codes et normes

Le tableau 4.2 présente les résistances en cisaillement théoriques offertes par les différents systèmes mis à l'essai de chacun des spécimens selon les codes et normes à l'exception du spécimen S1-ETS-9mm car la technique ETS n'est couverte par aucune norme.

Tableau 4.2 Résistance en cisaillement du CFRP selon les codes et normes

Normes et codes	Dernière révision	spécimen					
		S1-EB	S1-ETS- 9mm	S1-LS-NA	S1-LS-TA	S1-LS-PA	S1-LS-BA
ACI 440.2R	2008	117	-	38	38	38	38
CAN/CSA-S806	2012	117	-	38	102	38	38
CAN/CSA-S6	2014	117	-	38	38	38	38
<i>fib</i> -TG 9.3	2001	37	-	22	22	22	22
CNR-DT200	2004	267	-	82	82	82	82
HB 305	2008	52	-	26	26	26	26

Note : les résistances sont en kN

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

5.1 Présentation des résultats

Afin d'être en mesure de comparer les résultats de chacun des spécimens, les efforts appliqués lors des essais initiaux, de préfissuration ont été analysés et comparés pour s'assurer que chacun des spécimens avait subi des contraintes initiales (avant essai post-fissuration) similaires. À cet égard, le tableau 5.1 présente les contraintes enregistrées sur les spécimens durant l'essai de préfissuration, c'est-à-dire avant nos essais, du côté où la rupture a eu lieu lors de nos essais. Ces résultats montrent que l'écart entre l'effort tranchant moyen et l'effort ayant causé la fissuration (qui s'élève à 139 kN) varie entre 2.2 % et 7.9 %. Cet écart est faible et indique que tous les spécimens ont subi des contraintes similaires lors des essais de préfissuration. De fait, tous les spécimens sont retenus pour les essais post-fissuration et leurs résultats peuvent être comparés aux fins d'analyse.

De plus, lors des essais de chargement, des senseurs de déplacement (LVDT : Linear Variable Displacement Transducer) installés sur le banc d'essai ont permis d'enregistrer en temps réel le déplacement transversal et la flèche des poutres grâce à un système automatique de saisie de données. Le tableau 5.2 présente les déplacements enregistrés par les senseurs LVDT à l'atteinte de la force maximale enregistrée. Ces mouvements sont négligeables et permettent de confirmer qu'aucun effort de torsion significatif n'a agi sur les spécimens durant les essais. Ainsi, et tel qu'anticipé, les forces, déplacements et déformations enregistrés lors des essais sont exclusivement liés au cisaillement et à la flexion. Les flèches enregistrées correspondant à la force maximale atteinte sont aussi présentées dans le tableau 5.2.

Les tableaux 5.3 et 5.4 présentent les charges et les résistances atteintes lors des essais pour chacun des spécimens. Ces valeurs sont traduites en gain de résistance par rapport à la poutre de contrôle pour être analysées plus tard.

Le tableau 5.5 présente une comparaison entre les résistances en cisaillement théoriques du renfort selon les codes et normes en vigueur et la valeur expérimentale obtenue lors des chargements jusqu'à rupture selon les différents spécimens mis à l'essai. On observe que les codes et normes ne permettent pas d'estimer avec suffisamment de précision le gain de résistance offert sur les spécimens utilisant les lamelles Carboshear L de Sika. Toutes les normes sous-estiment les valeurs théoriques, entre 12,2 % et 571%, sous les résistances expérimentales obtenues lors des essais. Cependant on observe que les normes ACI 440-2R, CAN/CSA-S806 et CAN/CSA-S6-14 présentent des estimations s'approchant de 5,1 % de la valeur expérimentale du spécimen utilisant le tissu collé en surface.

5.1.1 Tableau des résultats

Tableau 5.1 Efforts internes subis par les spécimens durant les essais de préfissuration (avant les essais)

Spécimen	Charge à la rupture test précédent côté rupture kN	Effort tranchant max. sur spécimen par test préfissuration kN	Rapport efforts tranchants/ Vmax. moyen %	Résistance Vr théorique calculée selon CAN/CSA-A23.3-F04 kN	% de Vr atteint avant le renforcement %
S1-EB	421,6	142,3	2,2	183	78
S1-ETS 9 mm	423,8	143,1	2,7	183	78
S1-LS-NA	431,0	145,6	4,6	183	80
S1-LS-TA	425,5	143,7	3,1	183	79
S1-LS-PA	402,6	128,3	7,9	183	70
S1-LS-BA	393,0	132,7	4,7	183	73

Note : Vmax. moyenne des tests de préfissuration précédents

139,3 kN

Tableau 5.2 Déplacements

Spécimen	Déplacement transversal mm	Flèche max. mm
S1-EB	0,02	21,3
S1-ETS 9 mm	0,95	13,8
S1-LS-NA	2,31	14,8
S1-LS-TA	1,47	43,5
S1-LS-PA	0,86	19,1
S1-LS-BA	0,47	18,9

Tableau 5.3 Efficacité du renforcement en PRF des différents spécimens

Spécimen	Charge à la rupture kN	Gain en résistance %	Aire CFRP/ espacement de 175mm mm²	Gain résistance par mm² de PRFC %	Mode de rupture
S1-CON	432	0	0	0	Cisaillement
S1-EB	588	36	133	0,27	Cisaillement/délami nation du CFRP
S1-ETS 9 mm	518	20	64	0,31	Cisaillement
S1-LS-NA	551	28	112	0,25	Cisaillement/éclate ment du béton table de compression
S1-LS-TA	671	55	112	0,49	Flexion
S1-LS-PA	600	39	112	0,35	Cisaillement/éclate ment du béton table de compression
S1-LS-BA	510	18	112	0,16	Cisaillement/éclate ment du béton table de compression

Tableau 5.4 Gain de résistance en cisaillement des spécimens

Spécimen	Résistance au cisaillement théorique de la poutre avant renfort selon CSA-A23.3-F04	Résistance au cisaillement expérimental de la poutre de contrôle	Résistance au cisaillement expérimental du spécimen après renfort	Gain de résistance en cisaillement par rapport à la valeur théorique	Gain de résistance en cisaillement par rapport à la poutre de contrôle	Mode de rupture
	kN	kN	kN	%	%	
S1-EB	183	216	294,0	61	36	Cisaillement / délamination du PRFC
S1-ETS 9mm	183	216	259,0	42	20	Cisaillement
S1-LS-NA	183	216	275,5	51	28	Cisaillement / éclatement du béton table de compression
S1-LS-TA	183	216	335,5	83	55	Flexion
S1-LS-PA	183	216	300,0	64	39	Cisaillement / éclatement du béton table de compression
S1-LS-BA	183	216	255,0	39	18	Cisaillement / éclatement du béton table de compression

Tableau 5.5 Comparaison V_{FRP} : expérimentale vs codes et normes

Normes et codes	Dernière révision	V_{FRP}	spécimen					
			S1-EB	S1-ETS-9mm	S1-LS-NA	S1-LS-TA	S1-LS-PA	S1-LS-BA
			(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
ACI 440.2R	2008	Théo.	117	-	38	38	38	38
		Exp.	111	76	92,5	152,5	117	72
		$\Delta\%$	5,1	-	143,4	300	207,9	89,4
CAN/CSA-S806	2012	Théo.	117	-	38	102	38	38
		Exp.	111	76	92,5	152,5	117	72
		$\Delta\%$	5,1	-	143,4	49,0	207,9	89,4
CAN/CSA-S6	2014	Théo.	117	-	38	38	38	38
		Exp.	111	76	92,5	152,5	117	72
		$\Delta\%$	5,1	-	143,4	49,0	207,9	89,4
<i>fib</i> -TG 9.3	2001	Théo.	37	-	22	22	22	22
		Exp.	111	76	92,5	152,5	117	72
		$\Delta\%$	200	-	318,2	590,9	431,8	227,3
CNR-DT200	2004	Théo.	267	-	82	82	82	82
		Exp.	111	76	92,5	152,5	117	72
		$\Delta\%$	58,4		12,2	86,0	42,7	12,2
HB 305	2008	Théo.	52	-	26	26	26	26
		Exp.	111	76	92,5	152,5	117	72
		$\Delta\%$	113,5		255,8	486,5	350	176,9

5.2 Analyse des résultats

Objectifs :

Les tests réalisés avaient pour but d'évaluer et de comparer différentes méthodes de renforcement en cisaillement à l'aide de matériaux composites de poutres en béton armé préfissurées. Cette évaluation-comparaison est exprimée en termes d'efficacité, c'est-à-dire gain en résistance, mais aussi en termes de mode de rupture et de transfert de charges.

De façon spécifique, l'analyse des résultats vise à comparer les résultats obtenus en identifiant les caractéristiques et les comportements des éléments en jeu (béton, acier d'armature et PRF) durant la mise à l'essai des spécimens de poutres sous charge croissante jusqu'à la rupture de la poutre. Ainsi, les charges appliquées avant et durant l'essai, les modes de rupture, les fissures, les déformations internes de l'acier d'armatures longitudinales et transversales, les efforts dans le béton ainsi que les déformations du renfort en matériaux composites seront analysés pour chacun des spécimens afin d'évaluer la contribution du renforcement sur la résistance en cisaillement. Cette évaluation exhaustive permettra d'identifier les avantages de chacune des différentes configurations de renforcement et de tirer des enseignements quant aux potentiels de ces méthodes de renforcement avant-gardistes pour l'industrie de la construction.

5.2.1 Spécimen S1-EB

La figure 5.1 présente une image globale de poutre S1-EB, suite à l'enlèvement du renfort après l'essai, on peut y observer la configuration ainsi que l'endroit où les fissures de cisaillement se sont produites.

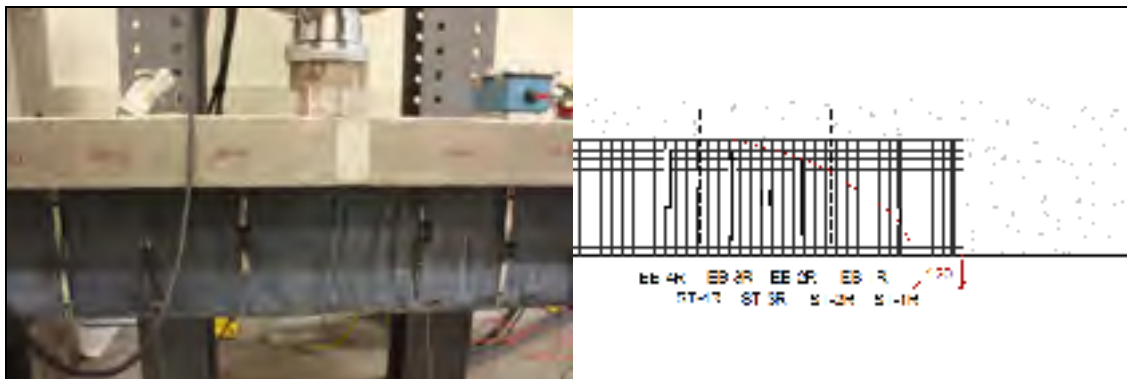


Figure 5.1 Observation spécimen S1-EB (fissure en rouge)

Charge atteinte :

La charge maximale atteinte lors de l'essai était de 588 kN; celle-ci représente une augmentation de 36 % par rapport à la poutre de contrôle (432 kN). On observe que la force progresse linéairement jusqu'à ce que l'acier transversal entre dans la phase plastique et que le renfort atteigne la déformation maximale prescrite en EB-1R et EB-3R (figure 5.2). Notons que ce type de renfort est celui qui représente la section de PRF pour un espacement de 175 mm (soit : 133.4 mm^2) la plus élevée, tous spécimens confondus, soit 133.4 mm^2 comparativement à 112 mm^2 et $63,6 \text{ mm}^2$ pour les lamelles en L (L-Shape) et les barres ETS, respectivement. Afin d'être en mesure de comparer les gains de résistance entre les différents types de renforcements étudiés, le gain de résistance total est divisé par l'aire du renfort par espacement. Ainsi, on obtient un gain de résistance de $0.27 \text{ \%/mm}^2$ de renfort pour le spécimen S1-EB.

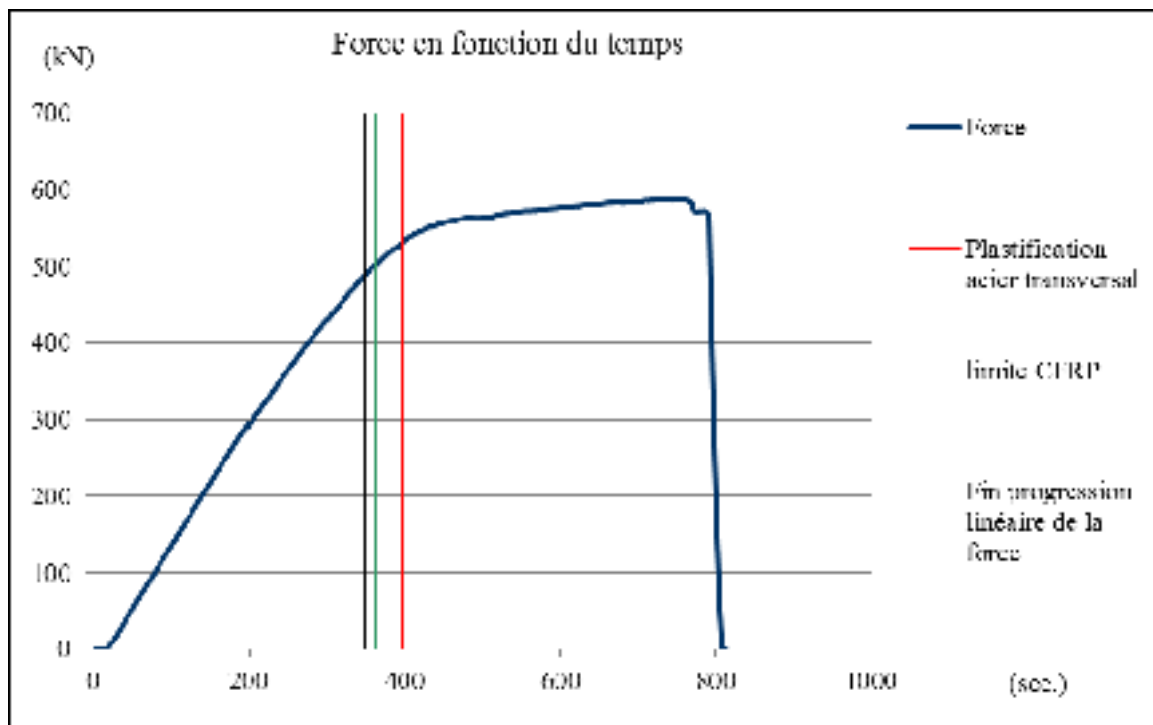


Figure 5.2 Force en fonction du temps spécimen S1-EB

Déformations :

Tel que décrit plus tôt, les jauges de déformation placées en surface sur le renfort en PRFC ainsi que sur les aciers d'armature internes ont permis d'enregistrer les déformations unitaires en temps réel tout au long du chargement, et ce, jusqu'à la rupture. Pour le spécimen S1-EB, les déformations unitaires de chacun des éléments n'ont pas atteint les valeurs maximales simultanément. La déformation unitaire maximale de l'acier transversal enregistrée est de 8790 $\mu\epsilon$ pour l'étrier ST-1R, cette valeur indique que l'acier transversal est plastifié puisqu'elle dépasse largement la valeur de 3425 $\mu\epsilon$, limite de déformation élastique de l'acier transversal pour une contrainte élastique limite de 685 MPa. Pour le renfort à la position de la jauge EB-4R, une déformation de 2612 $\mu\epsilon$ a été atteinte lors du chargement alors que la déformation limite prescrite par le fournisseur était de 13300 $\mu\epsilon$. Une déformation de 10945 $\mu\epsilon$ pour l'armature longitudinale a été enregistrée, dépassant également la limite élastique mesurée de 3250 $\mu\epsilon$.

En analysant plus en profondeur la déformation du renfort du côté où la rupture s'est produite (figure 5.3), on remarque un changement de direction de la courbure presque à l'instant où la force cesse de progresser linéairement. Cette observation peut s'expliquer par l'arrêt de la contribution du renfort, du moins vis-à-vis de la jauge EB-2R. En effet, il s'agit de l'instant (approximatif) où le décollement du PRFC a été observé dans la partie supérieure du renfort. Le changement de courbure vers le bas sur le graphique des déformations indique que le renfort commence à se rétrécir (comprimer). On remarque aussi à ce moment, en EB-1R et EB-3R, que la déformation du renfort demeure plutôt stable lorsque la force cesse de progresser linéairement. On peut en déduire que l'influence du renfort sur le gain de résistance est minime puisqu'à ce moment, les contraintes maximales enregistrées sont principalement observées sur l'acier transversal de la partie comprimée du renfort, en ST-1R et ST-2R. Cependant, il est important de noter qu'en EB-3R et EB-4R, les déformations enregistrées montrent clairement que le renfort continue de contribuer jusqu'à l'atteinte de la force maximale. Les valeurs enregistrées sont cependant inférieures à la déformation maximale de 4000 $\mu\epsilon$ fixée par la norme canadienne CSA-S806-12, qui elle se situe largement sous la déformation ultime (1,33%) spécifiée par le manufacturier. Ceci met en évidence l'importance d'ancrer ce type renfort pour éviter la délamination ou le décollement prématuré.

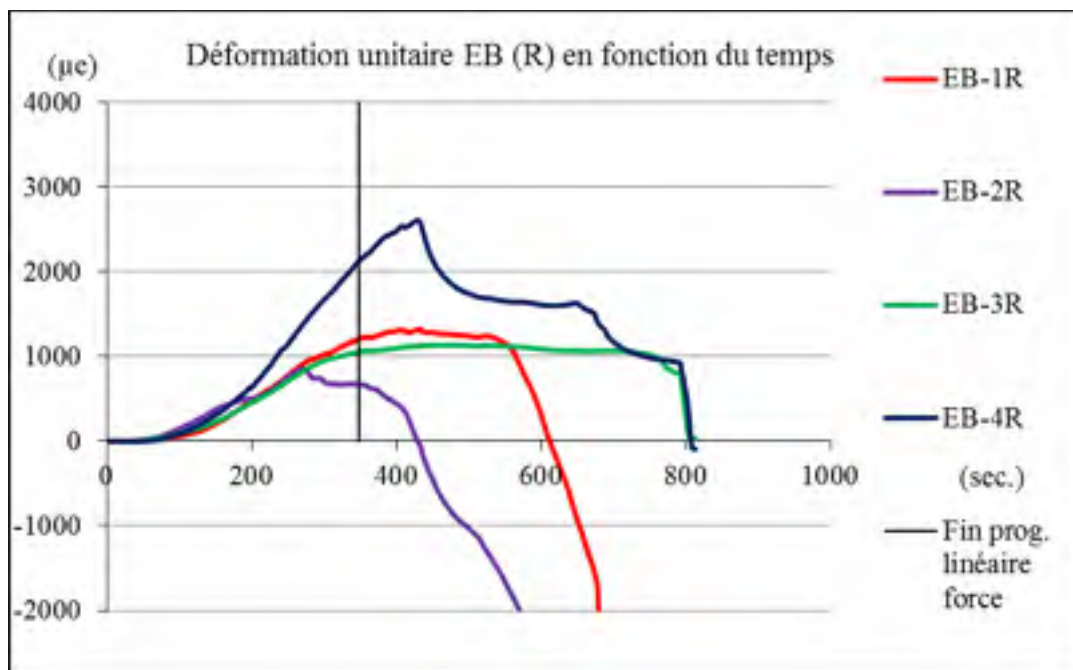


Figure 5.3 Déformation unitaire EB(R) en fonction du temps : spécimen S1-EB

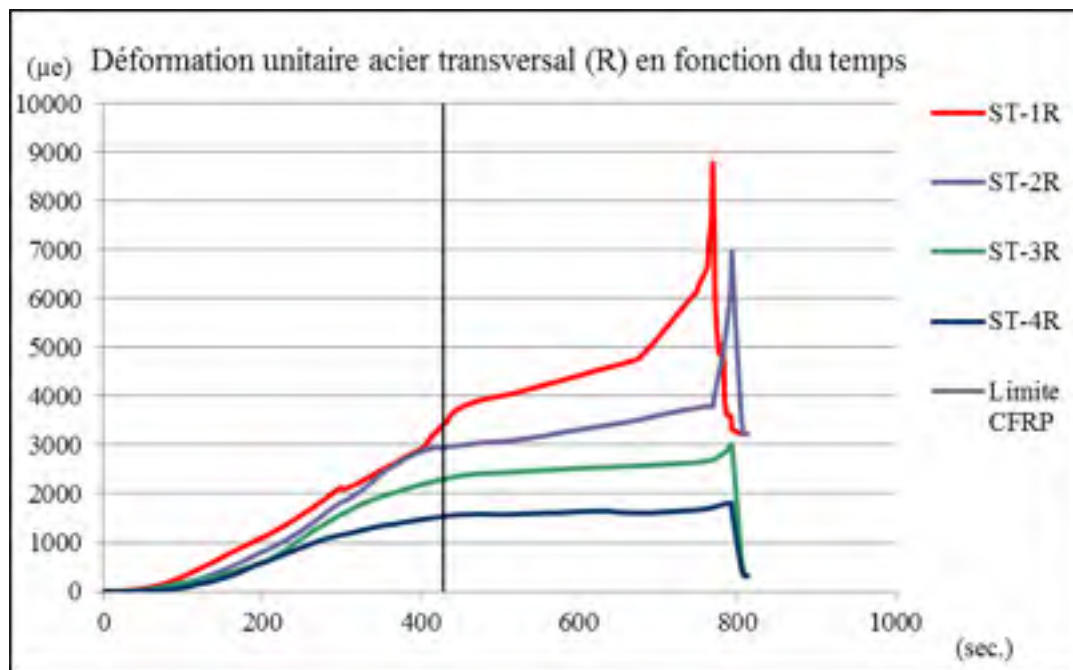


Figure 5.4 Déformation unitaire acier transversal (R) en fonction du temps : spécimen S1-EB

Les déformations internes enregistrées sur les étriers internes en acier décrivent clairement que l'acier transversal a commencé à se plastifier au moment où le renfort a cessé de contribuer au gain de résistance en cisaillement, en EB-1R et EB-2R (figure 5.4). On remarque également que la barre transversale ST-2R est la première à atteindre l'état plastique. Observons qu'elle se situe non loin de la jauge EB-2R, point où l'on note les premiers signes de compression sur le renfort. Ceci laisse croire qu'il y a transfert de contrainte vers l'acier transversal lorsque le renfort cesse de contribuer. Toutefois, l'acier transversal reprend les efforts jusqu'à l'atteinte de la résistance maximale observée, plus particulièrement la barre ST-1R qui enregistre une déformation unitaire de $5910 \mu\epsilon$ à l'atteinte de la force maximale.

Un autre phénomène se produit quand on observe de près l'acier longitudinal au moment où la majorité de l'acier transversal se trouve plastifié : une augmentation de la déformation unitaire de l'acier longitudinal est aussitôt enregistrée (figure 5.5). Ceci montre que l'acier longitudinal contribue à la reprise des efforts quand l'acier transversal se plastifie, cessant du coup de contribuer de façon significative. Ce phénomène peut facilement s'expliquer par l'analogie du treillis à 45° . De plus, lorsque l'acier longitudinal tend vers une déformation plus importante, une possible contribution du renfort (en flexion) dans la partie inférieure de la poutre analysée n'est pas à écarter, compte tenu des signes, tels que fissures de flexion, qui ont été observées sur le renfort suite à l'essai (figure 5.8).

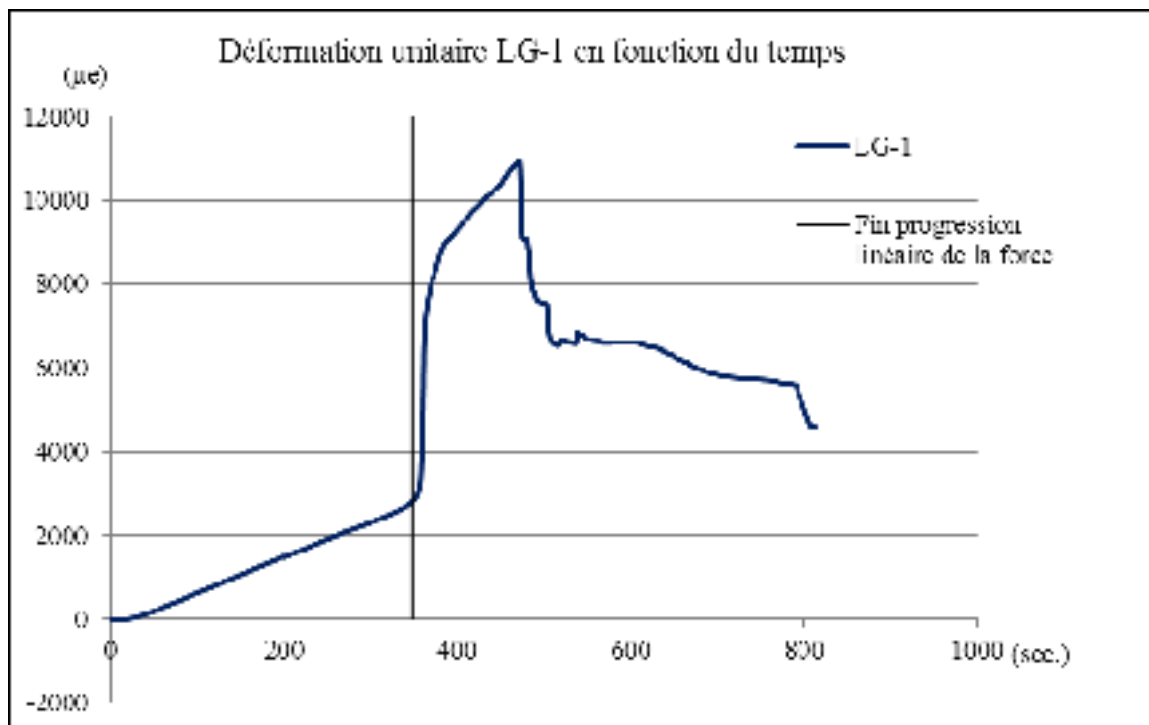


Figure 5.5 Déformation unitaire acier longitudinal en fonction du temps :
spécimen S1-EB

Mode de rupture :

La fin de l'essai s'est conclue par une rupture en cisaillement du côté droit comme en témoigne la figure 5.6. L'angle de la fissure principale observée est de 30,8 degrés et s'est développé à 120 mm du point d'appui. Un délaminage du composite en PRFC de la partie supérieure du renfort (figure 5.7) a initié à la jonction de la semelle supérieure du spécimen et de l'âme. Ce délaminage a été remarqué près de la jauge EB-2R pour commencer, où une compression du renfort est notée sur le graphique de la figure 5.3. De plus, des fissures de flexion sur le renfort ont été observées avant la rupture en cisaillement (figure 5.8). Lorsqu'on analyse les contraintes qui ont été appliquées au spécimen lors des essais précédents de préfissuration, on observe que la rupture a lieu du côté sur lequel les efforts maximaux ont été enregistrés. Ceci permet de dire que la rupture du spécimen s'est produite du côté ayant été le plus sollicité lors des essais de préfissuration précédents.

En observant les paramètres de la rupture (figure 5.1), l'emplacement et l'angle de la fissure montrent clairement qu'il s'agit d'une fissure de cisaillement. Les microfissures présentes avant l'application de la charge qui sont dues aux essais réalisés sur les extrémités de la poutre n'ont cependant pas pu être observées durant le chargement puisque ce type de renforcement, collé en surface, vient entièrement cacher le béton.



Figure 5.6 Mode de rupture du spécimen S1-EB

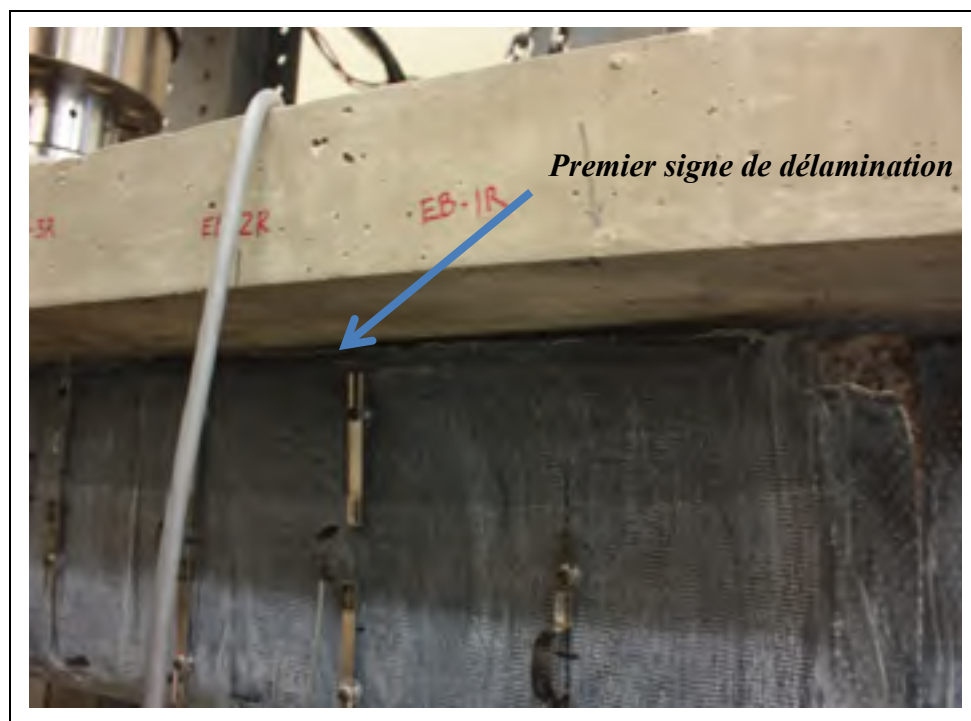


Figure 5.7 Dé laminage du renfort du spécimen S1-EB



Figure 5.8 Fissure de flexion du PRFC spécimen S1-EB

Maniabilité / mise en œuvre du système :

Considérant que le renforcement en cisaillement doit être appliqué sur des éléments de structure déjà en place, voire en service, se trouvant en majeure partie au-dessus du sol et pouvant être de formes différentes, l'utilisation de ce système est facilement adaptable aux différentes situations. Qu'il s'agisse d'une poutre de dalle nervurée, d'une poutre de pont coulée en place, d'une poutre ASSHTO ou NEBT, il sera possible d'utiliser ce type de renforcement. Contrairement au système de lamelles Sika L-Shape, le tissu en PRF permet d'épouser différentes formes et d'accommoder toutes les dimensions possibles. Le temps de cure minimal recommandé pour la colle Sikadur 330 est de 5 jours dans des conditions de températures situées entre 21 et 24°C, des données sont disponibles dans la fiche technique relative au produit SikaWrap Hex 230C dans ces conditions (annexe I). Notons que ce délai est comparable aux autres systèmes étudiés. La superficie de poutre à préparer est cependant plus importante que celle des autres systèmes. En effet, la surface de contact de ce type de renfort étant plus importante, cela nécessite un nettoyage plus étendu de la surface au jet abrasif. De plus, toutes les arêtes doivent être arrondies à un rayon de 10 mm minimum avant la mise en place du tissu en PRF. Lorsque l'élément renforcé est soumis aux rayons de soleil, le fabricant recommande l'application d'une couche de protection afin d'accroître la durabilité du système. Somme toute, la mise en place de ce système est relativement simple à réaliser malgré les nombreuses étapes de préparation requises.

Résumé sommaire-spécimen S1-EB :

L'analyse du spécimen S1-EB montre que le renfort sous forme de tissu collé en surface (EB) permet une augmentation significative de la résistance en cisaillement des poutres préfissurées. Cependant, la rupture en cisaillement est difficilement prévisible. L'application de ce type de renfort permet d'accroître la résistance, mais empêche d'observer les signes avant-coureurs, tels que l'apparition et la progression des fissures. Mis à part le décollement et le délaminage du renfort qui sont apparents à l'œil nu, il est difficile de prédire une rupture imminente de l'élément une fois renforcé à l'aide de cette méthode de renforcement externe.

Il est recommandé, lors des prochains essais sur des poutres renforcées avec tissu continu, de considérer d'installer une jauge de déformation sur la partie inférieure du renfort, dans la zone en tension. Cette jauge permettrait d'analyser la contribution sur la résistance en cisaillement du renfort dans la partie tendue.

5.2.2 Spécimen S1-ETS-9 mm

La figure 5.9 présente une image globale de poutre S1-ETS-9 mm, on peut y observer la configuration ainsi que l'endroit où la fissure de cisaillement s'est produite.

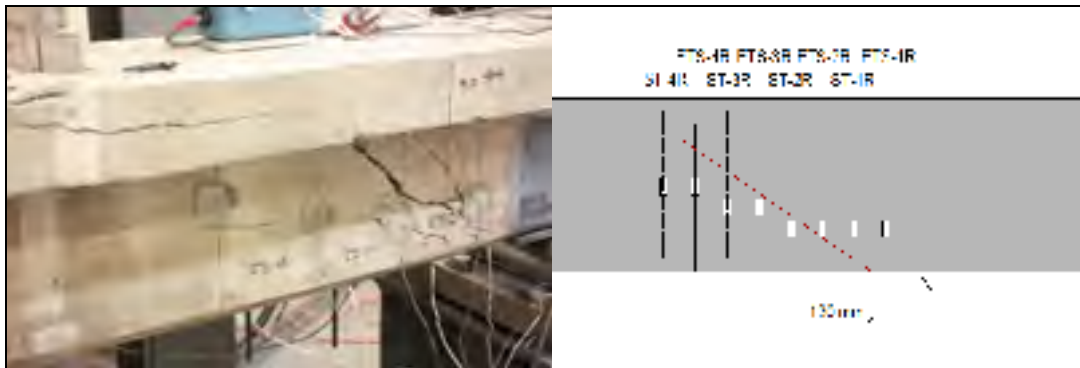


Figure 5.9 Observation spécimen S1-ETS-9 mm (fissure en rouge)

Charge atteinte :

La charge maximale atteinte lors de l'essai était de 518 kN, ce qui représente une augmentation de 20 % par rapport à la poutre de contrôle (432 kN). On observe que la force progresse linéairement jusqu'au moment où l'acier transversal entre dans la phase plastique (figure 5.10). En comparant la progression de la force avec celle du spécimen précédent (S1-EB), on remarque que le spécimen S1-ETS-9 mm ne comporte pas de plateau avant l'atteinte de la force maximale avant rupture. Contrairement au renfort collé en surface, les éléments de renfort encastrés dans l'âme de la poutre du spécimen S1-ETS-9 mm permettent d'empêcher le décollement en surface et continue de contribuer jusqu'à l'atteinte de la force maximale. Cette participation s'observe par une constante croissance de la force avant la rupture. Nous ne pouvons cependant pas

quantifier clairement la contribution du renfort puisqu'aucune donnée sur le renfort n'a pu être enregistrée du côté où la rupture s'est produite. Le système d'acquisition de données n'a pas enregistré les déformations subies par le renfort durant le chargement. Cependant, en analysant le comportement du renfort du côté opposé de la rupture (figure 5.11), nous remarquons que les déformations unitaires du renfort croient de façon linéaire jusqu'à l'atteinte de la force maximale. Notons que ce type de renfort est celui qui représente la section de PRF par espacement de 175 mm la plus faible (soit : 64 mm^2) tous spécimens confondus, comparativement à 112 mm^2 et 133 mm^2 pour les lamelles en L (L-Shape) et le tissu SikaWrap Hex, respectivement. Bien que des données soient manquantes à l'analyse de ce spécimen, nous sommes tout de même en mesure de comparer le gain de résistance avec les autres spécimens à l'étude. Ainsi, en divisant le gain de résistance total par l'aire du renfort par espacement, on obtient un gain de résistance de $0.31 \text{ \%/mm}^2$ de renfort pour le spécimen S1-ETS-9 mm.

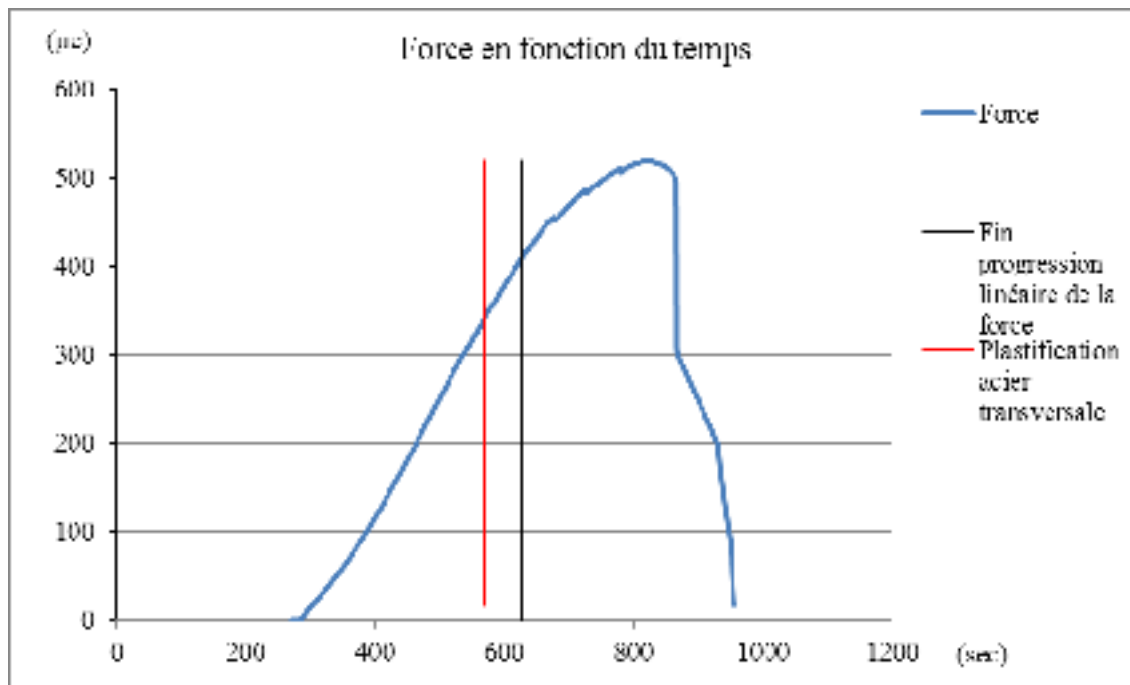


Figure 5.10 Force en fonction du temps pour spécimen S1-ETS-9 mm

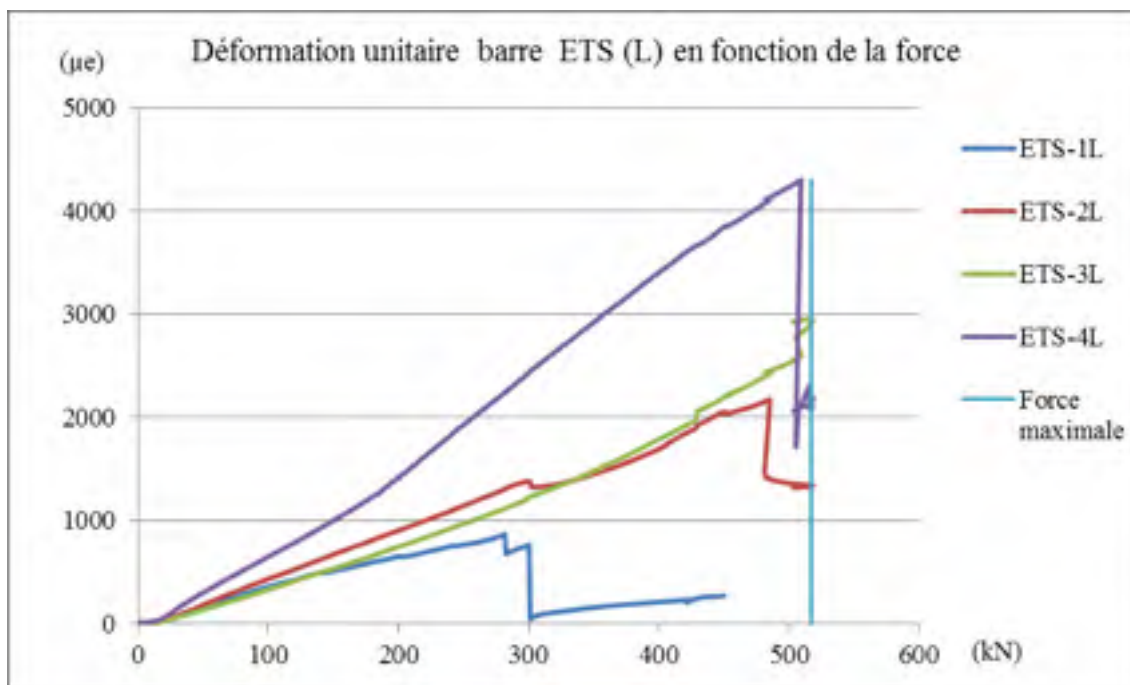


Figure 5.11 Déformation unitaire barres ETS(L) en fonction de la force :
spécimen S1-ETS-9 mm

Déformations :

Tel que décrit plus tôt, les jauges de déformation placées sur le renfort en PRFC interne ainsi que sur les aciers d'armature internes, outre ceux des renforts du côté droit, ont permis d'enregistrer les déformations unitaires en temps réel tout au long du chargement, et ce, jusqu'à la rupture. Pour le spécimen S1-ETS-9 mm, les déformations unitaires de chacun des éléments ont atteint les valeurs maximales simultanément non loin du point de rupture. La déformation unitaire maximale de l'acier transversal enregistrée est de 14373 $\mu\epsilon$ pour l'étrier ST-1R. Cette valeur indique que l'acier transversal s'est plastifié puisqu'elle dépasse largement la valeur de 3425 $\mu\epsilon$, limite de déformation élastique de l'acier transversal pour une contrainte élastique limite de 685 MPa. Pour le renfort du côté opposé à la rupture, le capteur placé sur la barre ETS-4L présente une déformation maximale de 4304 $\mu\epsilon$ lors du chargement alors que la déformation limite prescrite par le fournisseur est de 18000 $\mu\epsilon$. Une déformation de 12874 $\mu\epsilon$ pour l'armature longitudinale a été enregistrée, dépassant également la limite élastique mesurée de 3250 $\mu\epsilon$.

Le graphique des déformations unitaires de l'acier transversal (figure 5.12), indique clairement qu'une fois que la limite élastique de l'acier a été atteinte, on observe que la force cesse de progresser linéairement. La contribution de l'acier transversal à la résistance de l'élément est réduite considérablement. Toutefois, la déformation de l'acier augmente jusqu'à l'atteinte de la force maximale. Bien que les données sur la contribution du renfort du côté de la rupture ne soient pas disponibles, il est raisonnable d'admettre que les barres de PRFC encastrées contribuent, car l'absence d'un plateau plastique sur le graphique de la force en fonction du temps (graphique 5) indique qu'un élément, autre que l'acier transversal, permet une augmentation presque constante de la force enregistrée jusqu'à la force maximale.

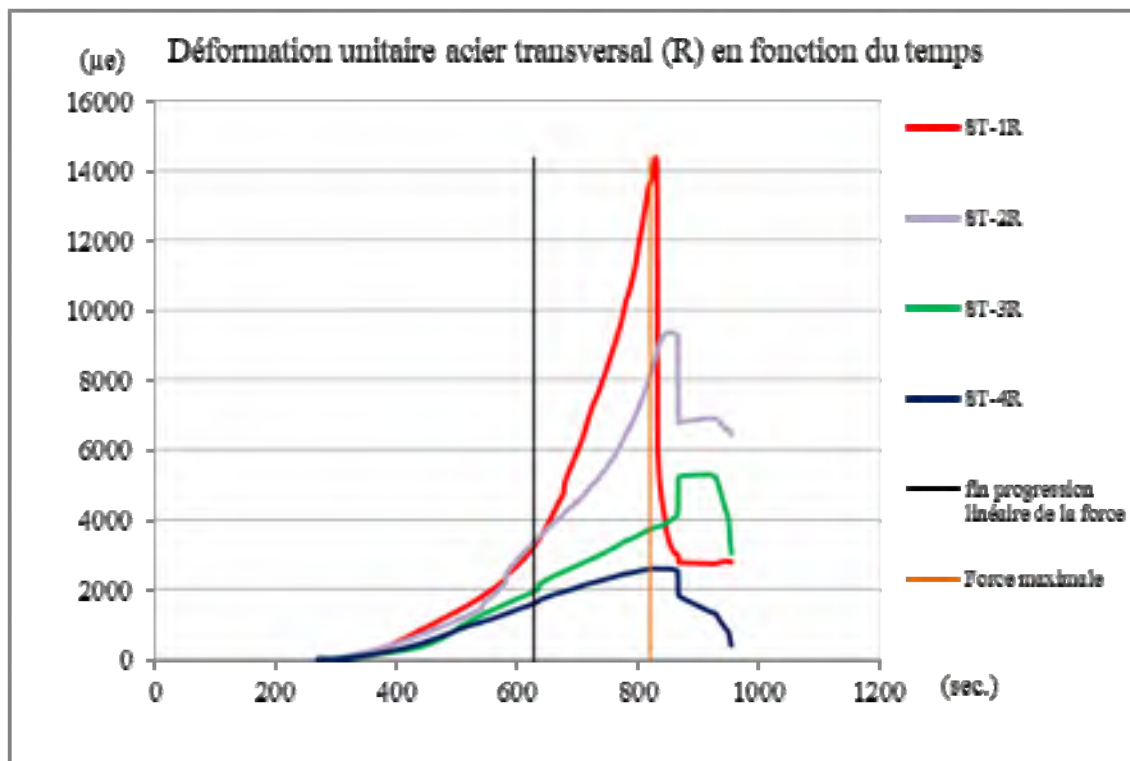


Figure 5.12 Déformation unitaire acier transversal (R) en fonction du temps pour spécimen S1-ETS-9 mm

La limite élastique de l'acier longitudinal est aussi atteinte durant le chargement du spécimen S1-ETS-9 mm (figure 5.13). Par contre, puisque nous ne détenons pas les

données du côté de la rupture sur le renfort de PRFC, nous ne sommes pas en mesure d'établir l'influence de la plastification des éléments d'acier sur le comportement du renfort.

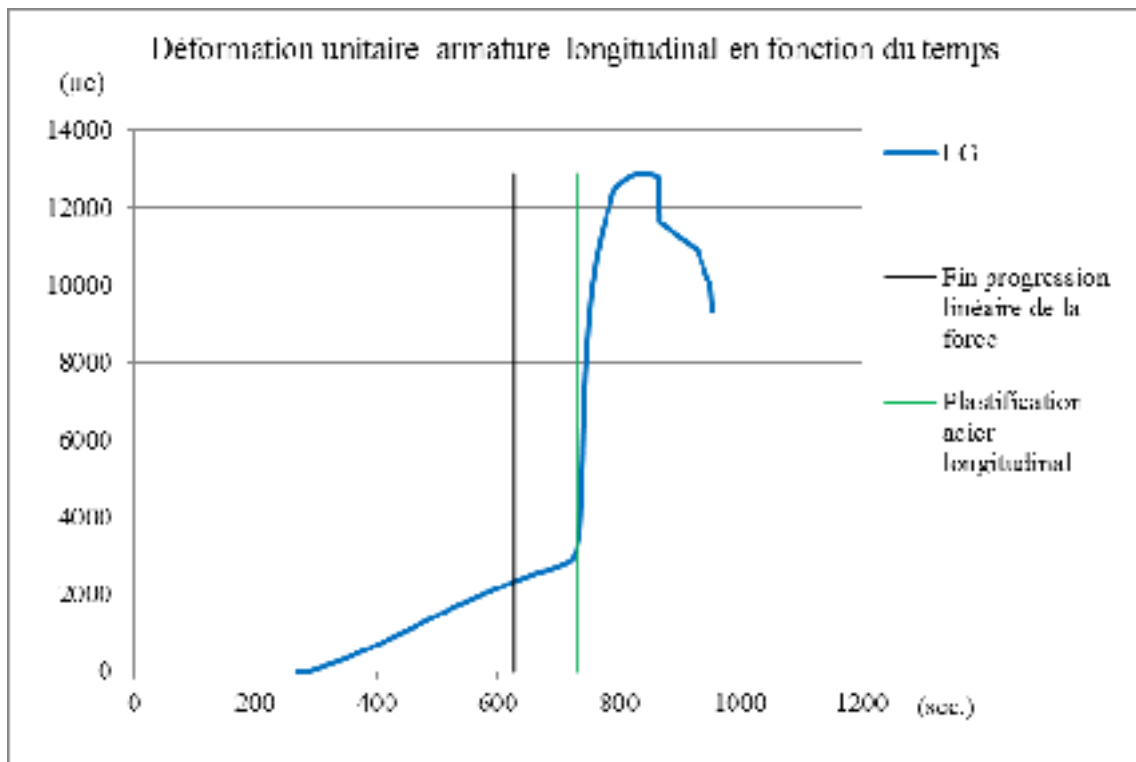


Figure 5.13 Déformation unitaire acier longitudinal en fonction du temps pour spécimen S1-ETS-9 mm

Mode de rupture :

La fin de l'essai s'est conclue par une rupture en cisaillement du côté droit comme en témoigne la figure 5.14. L'angle de la fissure principale observée est de 30.8 degrés et s'est développé à 130 mm du point d'appui. De plus, suite à une auscultation post-chargement, nous avons découvert que l'étrier ST-2R s'était sectionné dans l'axe de la fissuration (figure 5.15). Ces observations permettent d'affirmer que lors de l'atteinte de la force maximale, le spécimen S1-ETS-9 mm a cédé en cisaillement.

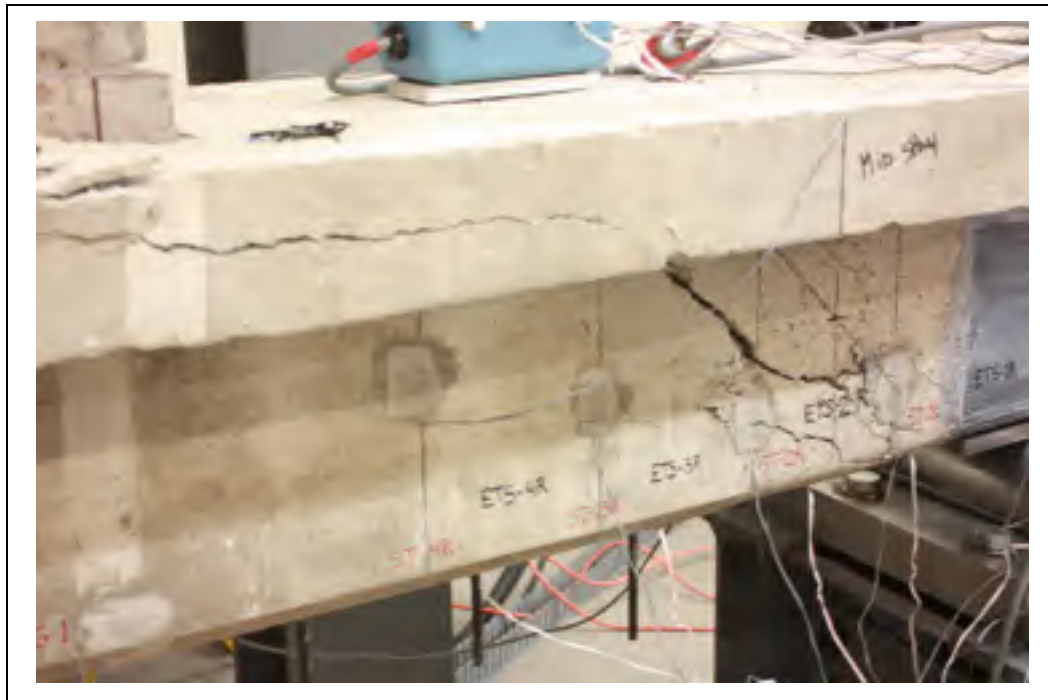


Figure 5.14 Mode de rupture du spécimen S1-ETS-9 mm

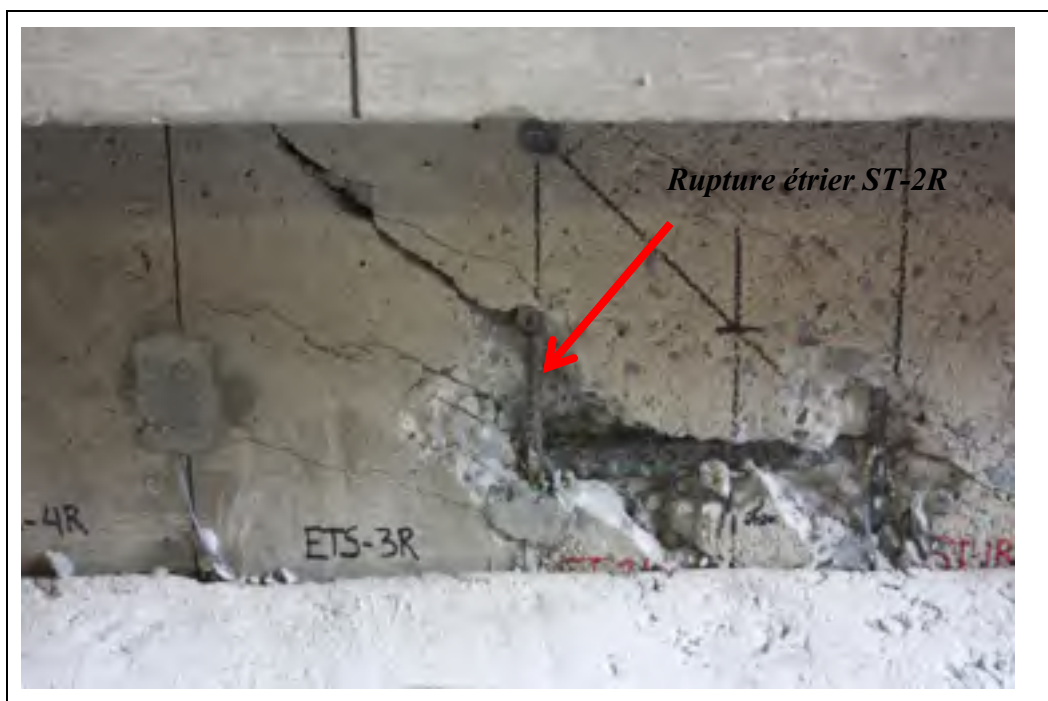


Figure 5.15 Rupture de l'étrier ST-2R du spécimen S1-ETS-9 mm

Maniabilité / mise en œuvre du système :

L'application du renforcement en cisaillement à l'aide de ce système n'est pas limitée. Le système peut être utilisé pour tous types de poutre de béton armé, de dalle nervurée ou même au niveau des dalles épaisses. Du fait que les barres de PRFC sont encastrées dans le béton, cette méthode, représentée par le spécimen S1-ETS-9 mm, offre une protection contre les rayons directs du soleil contrairement aux systèmes de renforcement des autres poutres à l'étude. Ceci en fait un avantage au niveau de la durabilité des poutres exposées. Des dispositions particulières seront cependant nécessaires à la localisation des barres d'armatures existantes des éléments renforcés avant d'entreprendre le percement. Il pourrait être parfois difficile d'effectuer le forage nécessaire à l'insertion des barres sans croiser l'acier d'armature existante. Ce point pourrait être encore plus contraignant dans le cas des poutres de béton armé précontraintes, surtout dans le cas où la quantité de torons dans la semelle inférieure est importante. De plus, avant de s'arrêter sur ce choix de système, il faudra s'assurer qu'il y ait suffisamment d'espace sous les poutres pour utiliser l'équipement de forage. Outre ces précautions, la facilité, la rapidité d'exécution et de préparation de ce système pourraient s'avérer avantageuses.

Résumé sommaire-spécimen S1-ETS-9 mm :

L'interprétation que nous pouvons tirer suite à l'analyse des données recueillies lors de l'essai sur le spécimen S1-ETS-9 mm démontre que l'utilisation de ce type de renfort permet d'augmenter considérablement la résistance des poutres de béton armé préfissurées. La contribution du renfort ne peut toutefois être quantifiée compte tenu de la défaillance du système de saisie de données du côté de la rupture. Néanmoins, l'augmentation de la force maximale observée comparativement à la poutre de contrôle témoigne de l'efficacité et la contribution évidente du système de renfort du spécimen S1-ETS-9 mm. Par contre en comparant avec les autres systèmes de renforcement mis à l'essai, cette méthode de renforcement présente un comportement moins ductile. Ce point est illustré sur le graphique de la figure 5.13 et ne présente aucun plateau avant la rupture. De plus, le spécimen ne montre aucun signe précurseur de la rupture avant la

ruine de l'élément. Contrairement aux autres spécimens qui présentaient tous un décollement du renfort par arrachement du béton en surface avant rupture, le renfort du spécimen S1-ETS-9 mm ne pouvait être évalué visuellement, car le renfort de cette poutre était encastré dans l'âme.

5.2.3 Spécimen S1-LS-NA

La figure 5.16 présente une image globale de poutre S1-LS-NA, on peut y observer la configuration ainsi que l'endroit où la fissure de cisaillement s'est produite.

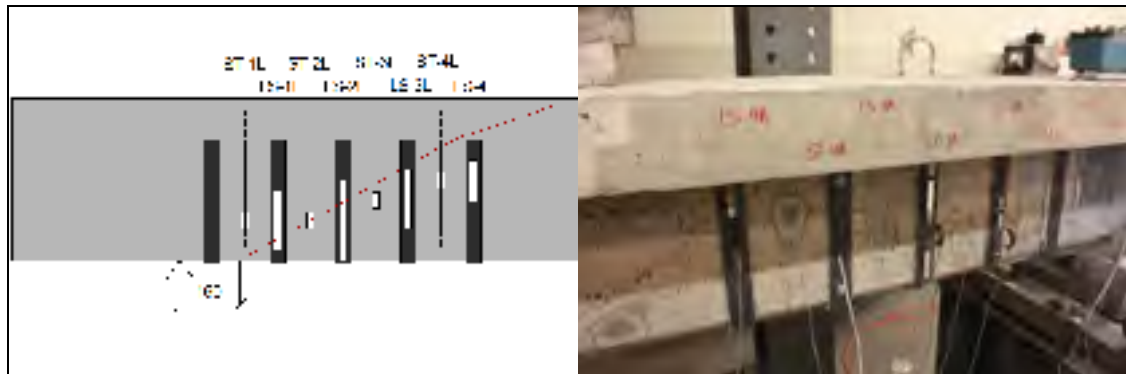


Figure 5.16 Observation du spécimen S1-LS-NA (fissure en rouge)

Charge atteinte :

La charge maximale atteinte lors de l'essai était de 551 kN, ce qui représente une augmentation de 28 % comparativement à la poutre de contrôle (432 kN). Lorsqu'on observe la progression de la force (figure 5.17), on remarque que lorsque le renfort arrête de contribuer et que l'acier se plastifie, ces deux paramètres se situent près du moment où la force cesse de progresser de façon linéaire. Ce phénomène indique que l'accroissement de la force est lié directement à l'interaction de ces deux composantes. On peut aussi observer qu'au moment où le renfort cesse de contribuer, une augmentation de la force est tout de même visible, bien que l'acier ait commencé à se plastifier. On remarque aussi que l'acier d'armature commence à se plastifier au-delà de la force maximale atteinte de la poutre de contrôle. Cette observation, qu'on peut voir

aussi sur plusieurs spécimens à l'essai, démontre une certaine interaction entre l'acier transversal et le renfort de PRFC. Notons enfin que ce système a permis d'obtenir un gain de résistance de 0,25 % par mm² de PRFC.

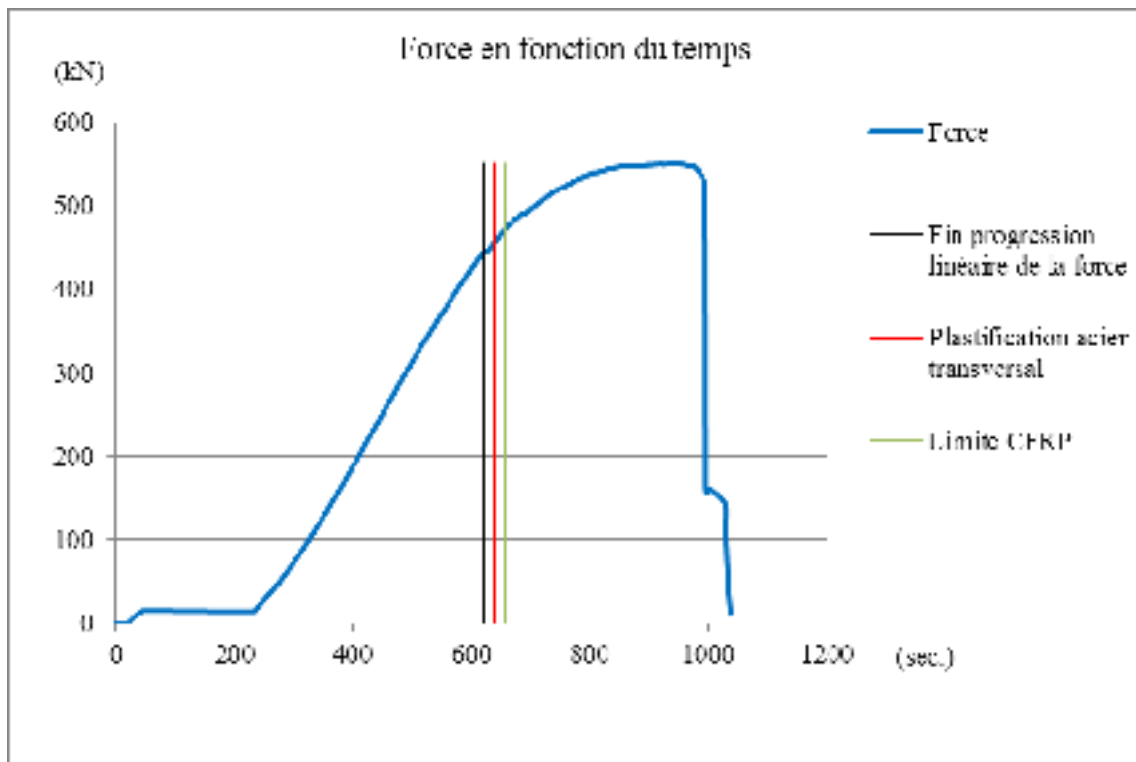


Figure 5.17 Force en fonction du temps pour spécimen S1-LS-NA

Déformations :

Tout au long de l'essai, les jauges à déformation placées sur l'armature interne et sur le renfort en PRFC ont enregistré les déformations dans les différents éléments du spécimen lors du chargement jusqu'à la rupture. Du côté de la rupture, la déformation maximale atteinte par la barre ST-2L a été de 15862 $\mu\epsilon$. Cette valeur, située au-delà de la limite élastique de 3425 $\mu\epsilon$, confirme que l'armature transversale a atteint l'état de plastification lors du chargement en ST-1L et ST-2L. Toutefois, on peut remarquer qu'en ST-3L et ST-4L les déformations enregistrées montrent que ces barres n'étaient pas encore plastifiées à l'atteinte de la force maximale. Au moment de l'atteinte de la force maximale, on remarque en ST-2L une augmentation significative de la

déformation au-delà de cette limite, qui se traduit par la fin de sa contribution (figure 5.18). Notons que ST-2L s'est fractionnée à la fin du chargement. Le renfort quant à lui a subi une déformation unitaire maximale de 1176 $\mu\epsilon$. Cette déformation est très loin de la limite prescrite par le fournisseur de 13000 $\mu\epsilon$. Cette faible performance est principalement due au décollement prématuré du renfort occasionné par l'absence d'encastrement des lamelles de CFRP sur ce spécimen. En observant la déformation du renfort lors du chargement (figure 5.19), on remarque que lorsque la déformation commence à décroître, le renfort commence à décoller dans la partie supérieure de l'âme (figure 5.21). Cette observation est visible par la compression des capteurs de déplacement externes placés sur les lamelles de PRFC. L'armature longitudinale a enregistré une déformation de 10690 $\mu\epsilon$ à la fin du chargement. Cette valeur, supérieure à 3250 $\mu\epsilon$, indique que l'acier longitudinal était aussi dans un état plastifié à la fin de l'essai. Malgré cette plastification, le graphique de la figure 5.20 témoigne de la contribution de l'acier longitudinal jusqu'à l'atteinte de la force maximale.

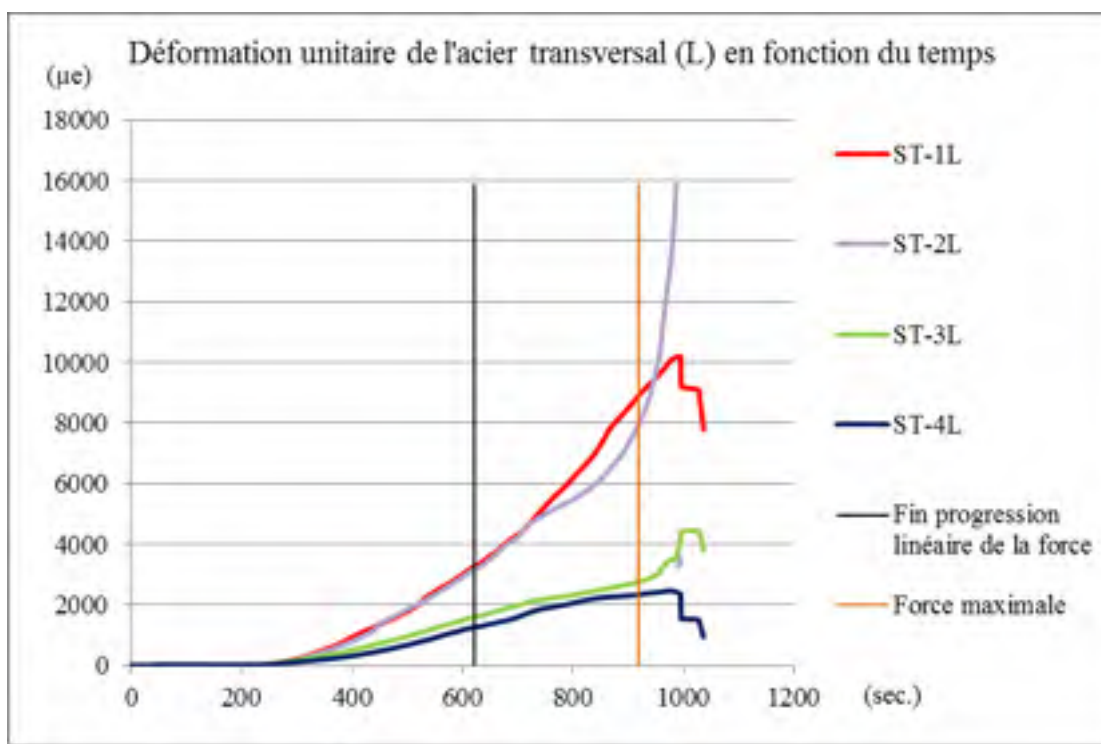


Figure 5.18 Déformation unitaire de l'acier transversal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-NA

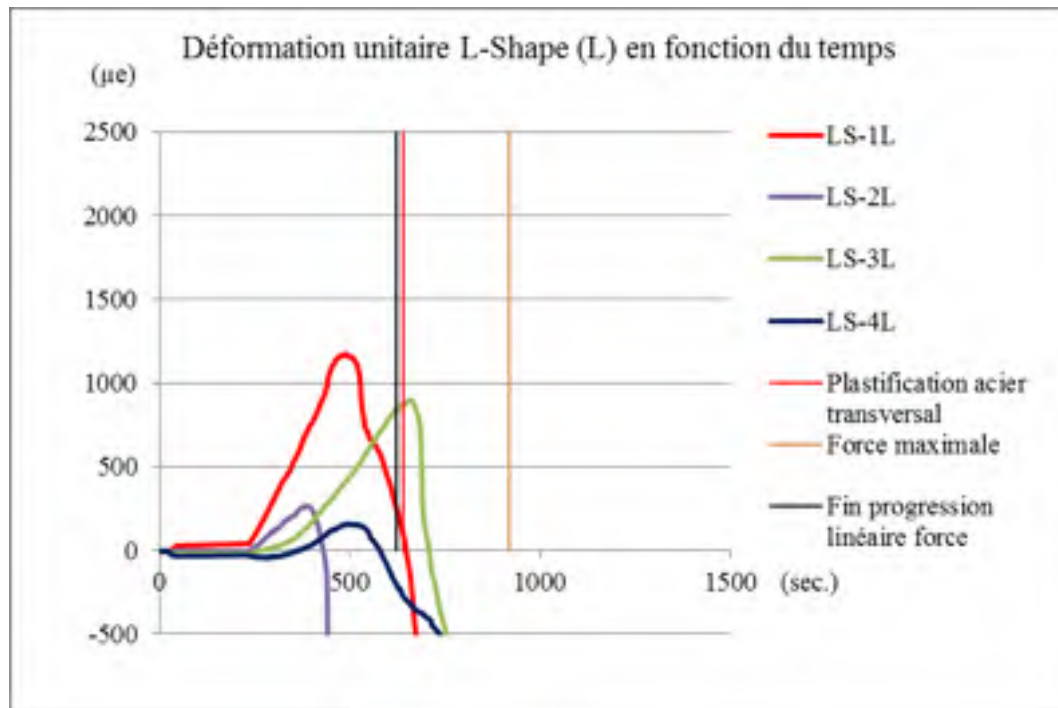


Figure 5.19 Déformation unitaire L-Shape (L) en fonction du temps pour spécimen S1-LS-NA

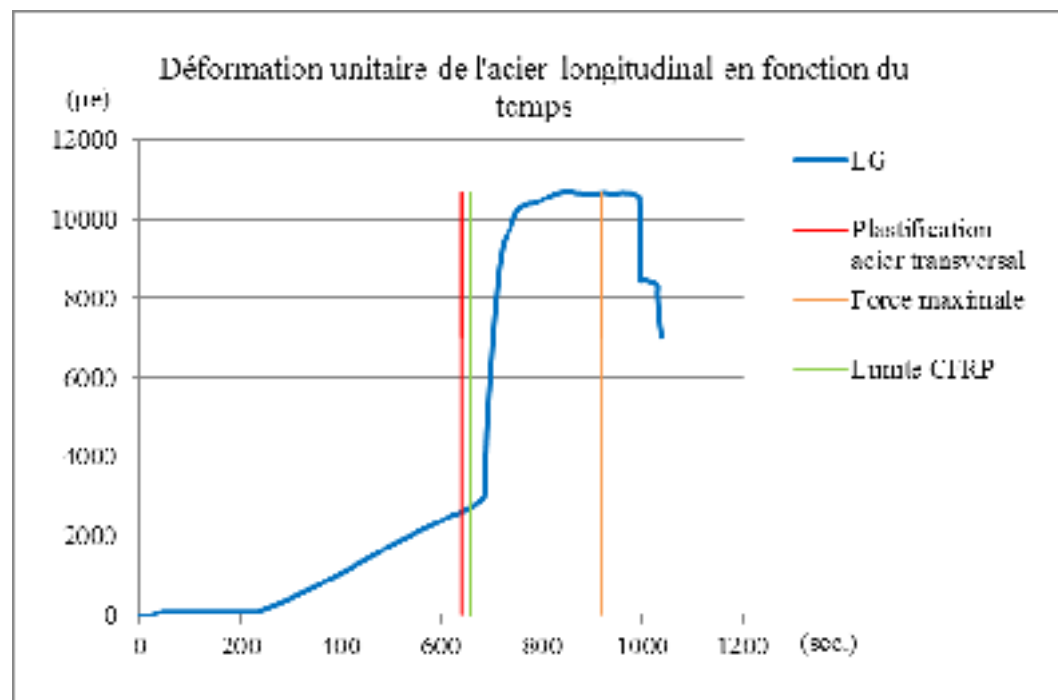


Figure 5.20 Déformation unitaire de l'acier longitudinal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-NA

Mode de rupture :

La fin de l'essai s'est terminée par une rupture en cisaillement du côté gauche comme on peut voir sur la figure 5.21. L'angle de la fissure principale observée est de 27.7 degrés et s'est développé à 160 mm du point d'appui. Nous avons aussi pu observer que l'étrier ST-2L s'était sectionné dans le plan de la fissuration. On peut aussi observer le décollement des lamelles de PRFC sur cette figure. Ces observations permettent d'affirmer que suite à l'atteinte de la force maximale, le spécimen S1-LS-NA a cédé en cisaillement à la fin du chargement. En examinant spécifiquement l'endroit où la fissure s'est produite, on remarque que le spécimen a cédé exactement à un endroit où on pouvait observer une fissure due au préchargement. Cette fissure avait été identifiée par un trait rouge sur la poutre avant le chargement (figure 5.22).



Figure 5.21 Mode de rupture du spécimen S1-LS-NA

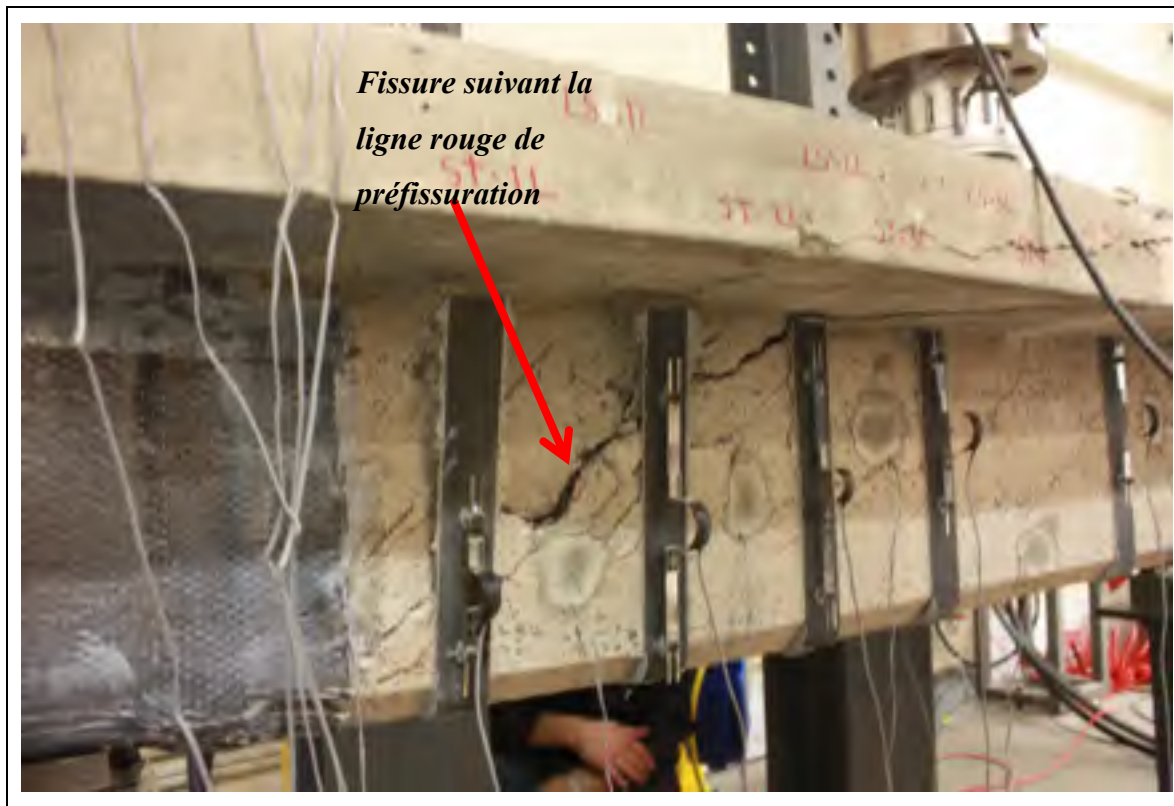


Figure 5.22 Fissure de préfissuration du spécimen S1-LS-NA

Maniabilité / mise en œuvre du système :

Le spécimen S1-LS-NA, muni de lamelles CarboShear L, constitue un système de renforcement dont la facilité d'application se situe entre celle du spécimen S1-ETS-9 mm et du spécimen S1-EB. Un minimum de préparation est toutefois nécessaire avant la mise en place du renfort. En effet, une préparation au jet abrasif des surfaces vis-à-vis le positionnement des lamelles est nécessaire afin de permettre une meilleure adhésion en surface. Cette préparation demande par contre de confiner la zone renforcée lors de la mise en œuvre, demandant ainsi des dispositions particulières qui pourraient augmenter le coût des travaux. De plus, ce système de renfort ne peut être utilisé sur tous les types de poutres. Seulement les poutres rectangulaires ou en T peuvent être renforcées à l'aide de ce système. Cette particularité en fait un inconvénient puisqu'il peut être difficile de l'utiliser pour le renforcement de poutres préfabriquées, AASHTO et NEBT, que l'on retrouve sur la plupart des ponts du réseau routier québécois. Contrairement au système

avec tissu collé en surface, spécimen S1-EB, cette méthode de renfort permet d'observer la progression des fissures une fois la poutre renforcée, laissant ainsi prévoir la ruine de l'ouvrage.

Résumé sommaire-spécimen S1-LS-NA :

Bien que le fournisseur recommande l'encastrement des lamelles sur une profondeur de 100 mm minimum, nous avons tout de même évalué le gain de résistance de ce système sans aucun ancrage avec le spécimen S1-LS-NA. La contribution de ce système de renforcement a clairement été influencée par ce manque d'encastrement. Le décollement prématuré des lamelles Sika CarboShear L dans la partie supérieure a visiblement affecté la progression de la force. Aussitôt le décollement initié, les efforts sont transférés à l'acier d'armature interne, limitant le gain possible de résistance. Même si ce système permet un certain gain de résistance, les bienfaits d'ancrer les lamelles dans la table de compression sur une profondeur sera discuté lors de l'étude des spécimens suivants.

5.2.4 Spécimen S1-LS-TA

La figure 5.23 présente une image globale de poutre S1-LS-TA, on peut y observer la configuration ainsi que l'endroit où la fissure de cisaillement s'est produite.

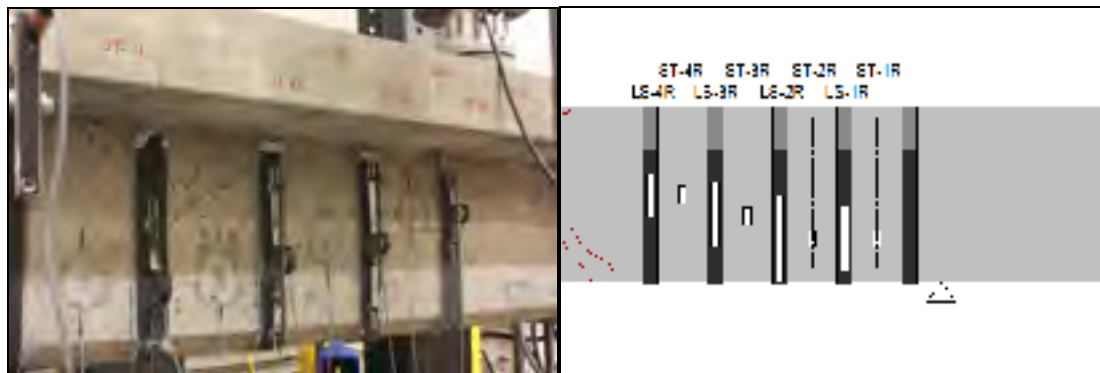


Figure 5.23 Observation du spécimen S1-LS-TA (fissure en rouge)

Charge atteinte :

La charge maximale atteinte lors de l'essai était de 671 kN, ce qui représente une augmentation de 55 % comparativement à la poutre de contrôle (432 kN). Cette charge est la plus élevée, tous spécimens confondus. L'acier transversal ainsi que le renfort ont contribué jusqu'à l'atteinte de la force maximale. Contrairement à la plupart des autres spécimens, la fin de la progression linéaire de la force ne coïncide pas avec la plastification de l'acier transversal, mais avec celle de la plastification de l'acier longitudinal (figure 5.24). Lors du chargement, on remarque également que l'acier transversal se plastifie beaucoup plus tard que l'acier longitudinal. Cette observation peut s'expliquer par le soulagement des barres transversales dû à une contribution bénéfique et efficace du renfort. Cette configuration permet ainsi à l'acier transversal de se plastifier sous une charge beaucoup plus élevée que les autres spécimens, autour de 600 kN. Notons que ce système a permis d'obtenir le gain de résistance le plus efficace, soit 0,49 % par mm² de PRFC.

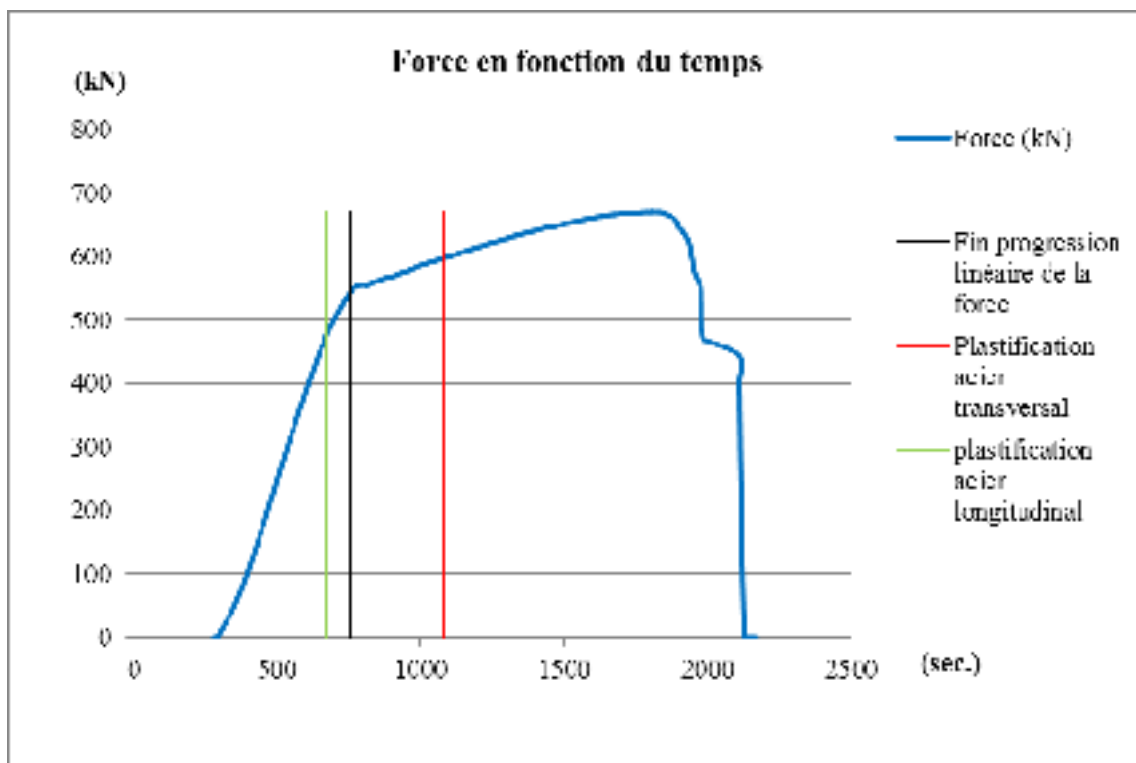


Figure 5.24 Force en fonction du temps pour spécimen S1-LS-TA

Déformations :

Puisque les jauges de déformation des armatures internes et du renfort ont permis la saisie de données similaires sur les deux côtés du spécimen, et que la rupture s'est produite en flexion au centre de la poutre mise à l'essai, les données d'un seul côté seront alors représentées graphiquement. Une déformation maximale de 13977 $\mu\epsilon$ a été atteinte sur la barre transversale ST-4L, passée la force maximale atteinte. On remarque sur le graphique de la figure 5.25, qu'au-delà de la limite maximale de la force enregistrée, les déformations unitaires s'amplifient au niveau des barres ST-3L et ST-4L, contrairement à la plupart des autres spécimens qui ont démontré des déformations plus importantes sur les barres situées à proximité des appuis. Cette amplification décrit une augmentation des contraintes dans les barres transversales situées plus près de la zone de flexion. Il est important de noter que toutes les barres et tous les éléments de renfort ont contribué jusqu'à l'atteinte de la force maximale. La déformation la plus élevée observée pour les lamelles en L (L-Shape) a été de 10479 $\mu\epsilon$ au renfort LS-4L (figure 5.26). Cette valeur s'approche davantage de la limite de 13000 $\mu\epsilon$ prescrite par le fournisseur. Tout comme pour l'acier transversal, ce maximum obtenu est situé plus près de la fissure en flexion que des appuis. Ceci pourrait s'expliquer par un changement de mode de rupture de cisaillement vers un mode de rupture en flexion-cisaillement. L'armature longitudinale, contrairement à la plupart des autres spécimens, s'est plastifiée avant l'acier transversal. Une déformation unitaire de 13345 $\mu\epsilon$ a été enregistrée bien avant l'atteinte de la force maximale. Suite à cette déformation, une baisse significative de la force a été observée pour se stabiliser jusqu'à l'atteinte de la force maximale (figure 5.27).

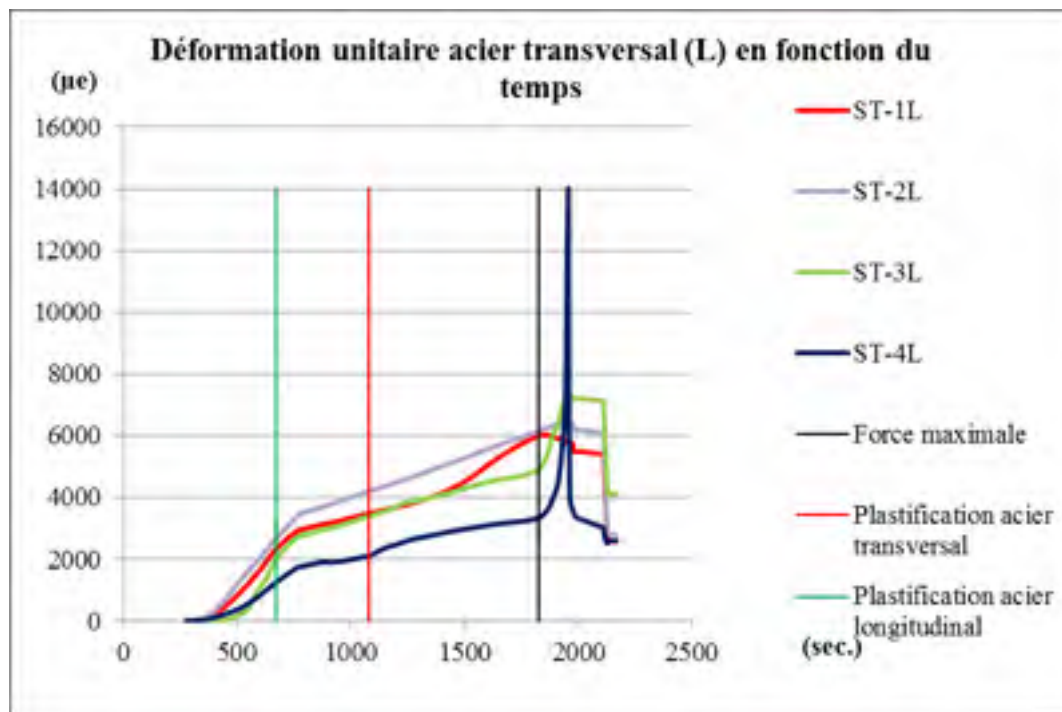


Figure 5.25 Déformation unitaire de l'acier transversal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-TA

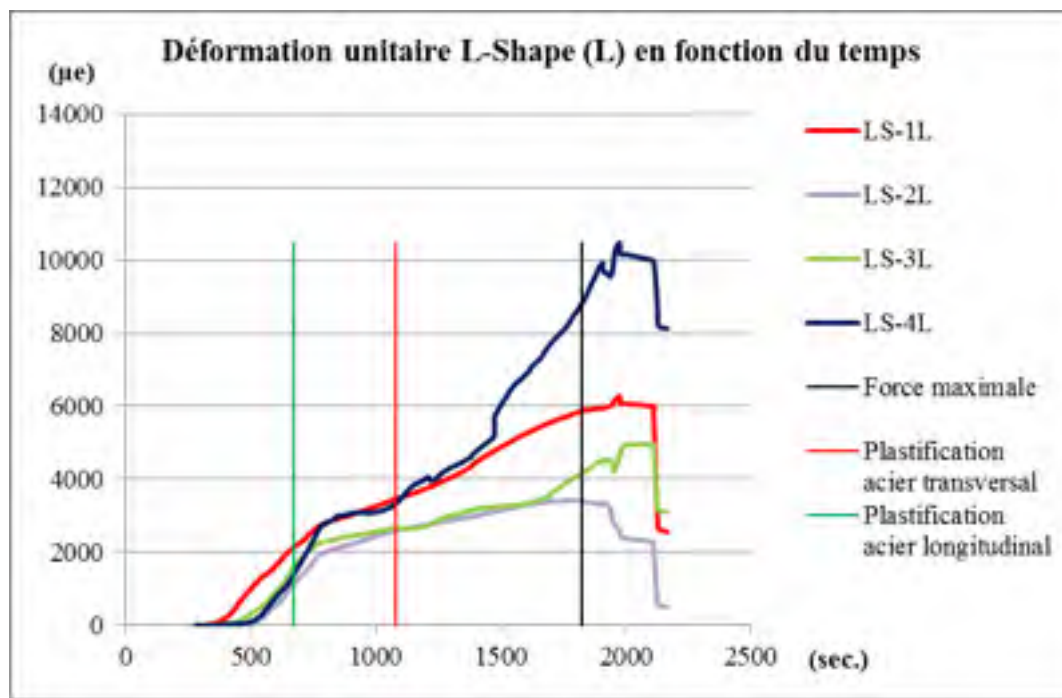


Figure 5.26 Déformation unitaire L-Shape (L) en fonction du temps pour spécimen S1-LS-TA

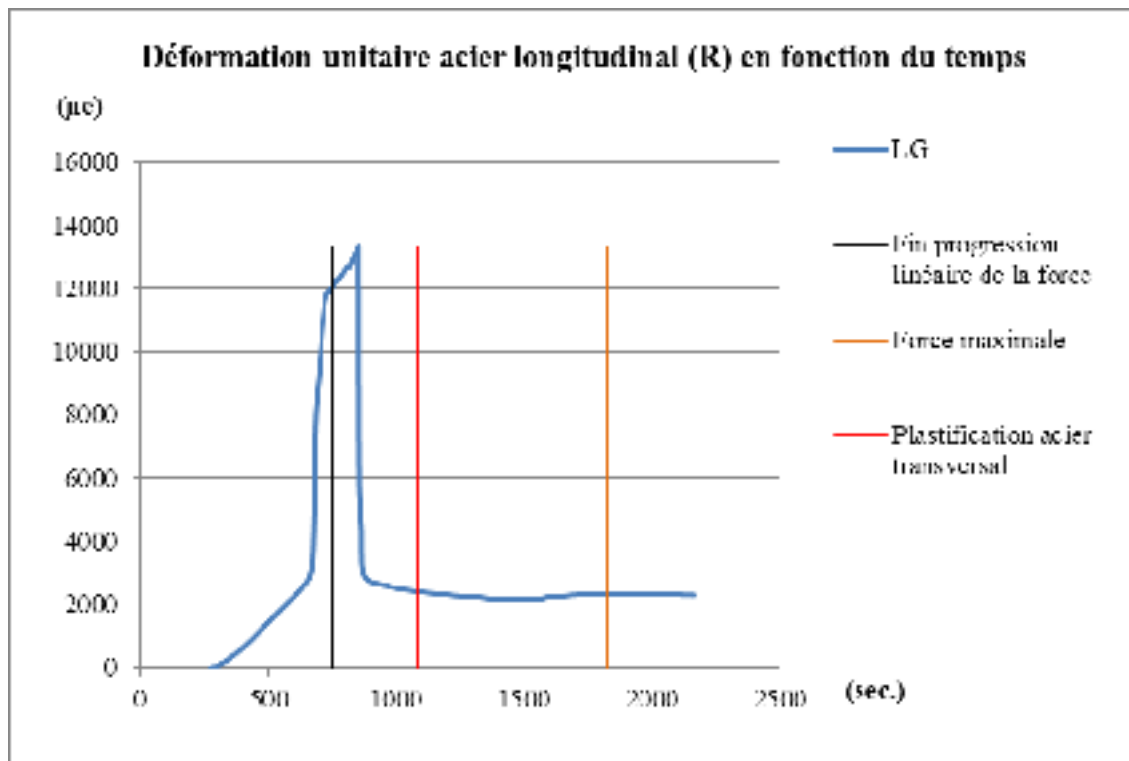


Figure 5.27 Déformation unitaire de l'acier longitudinal en fonction du temps : spécimen S1 LS-TA

Mode de rupture :

Le spécimen S1-LS-TA a montré certaines particularités intéressantes. Il s'agit de la seule poutre mise à l'essai dont le mode de rupture est par flexion. Cette observation démontre clairement l'efficacité de ce système de renforcement et des bienfaits d'ancrer les lamelles de PRFC comme le recommande le fournisseur. Bien que les spécimens à l'étude avaient été dimensionnés pour atteindre une rupture par cisaillement avant une rupture par flexion, ce type de renforcement a permis d'augmenter la résistance au cisaillement au-delà de sa résistance en flexion, et ce, même après avoir subi des efforts ayant causé une préfissuration lors des essais de préchargement. En observant la figure 5.28, on aperçoit clairement les fissures de flexion au centre de la poutre, mais on remarque aussi une fissure de cisaillement qui passe par le renfort LS-3L, ST-4L et LS-4L. Cette fissure s'apparente clairement à une fissure de flexion-cisaillement, ce qui explique pourquoi les déformations des éléments à proximité du centre de la poutre sont

plus importantes que celles des éléments près des appuis à la rupture du spécimen. On peut aussi voir sur cette figure que le béton a éclaté dans la zone de compression, ce qui montre que le spécimen a été jusqu'à la limite de sa capacité.

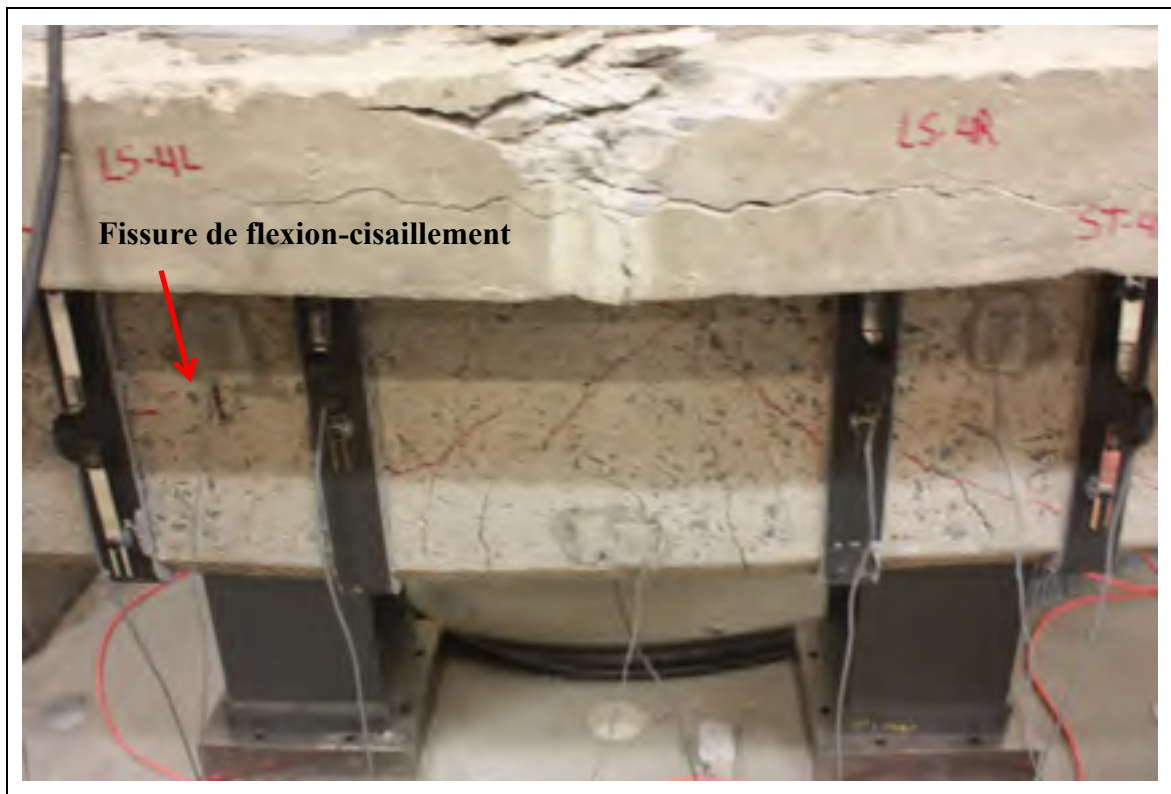


Figure 5.28 Mode de rupture du spécimen S1-LS-TA

Maniabilité / mise en œuvre du système :

Tout comme les autres spécimens S1-LS, par la forme de lamelles préfabriquées, ce mode de renfort est limité aux poutres rectangulaires ou en T et aux dalles nervurées. Un nettoyage de surface, au niveau du renfort, à l'aide d'un jet d'abrasif est aussi nécessaire pour une meilleure adhésion de la colle servant de liaison entre le béton et les lamelles de PRFC. Cette méthode de nettoyage demande une certaine mesure de confinement de l'élément renforcé lors de la préparation au jet abrasif, ce qui représente une certaine contrainte de mise en œuvre. De plus, une tâche supplémentaire est nécessaire pour permettre d'ancrer les lamelles CarboShear L d'une certaine profondeur. Un forage doit

être réalisé dans la partie inférieure de la dalle pour obtenir une profondeur d'ancrage. Ce forage de 100 mm pourrait être particulièrement difficile à réaliser en raison de l'armature dans la dalle supportée par les poutres. La surveillance lors de la mise en place des armatures à l'époque, n'étant pas aussi contrôlée qu'aujourd'hui, pourrait impliquer une irrégularité de l'espacement qui rendrait difficile d'établir un espacement constant pour l'installation des lamelles sans intercepter ces barres lors du forage de préparation. Outre ces inconvénients, l'exposition du béton entre les lamelles de renforcement permet d'observer la progression et le comportement des fissures répertoriées avant ou après le renforcement.

Résumé sommaire-spécimen S1-LS-TA :

La justification d'ancrer les lamelles de PRFC Sika CarboShear L a clairement été démontrée par cet essai de chargement. La contribution du renfort a permis de changer le mode de rupture établi par le dimensionnement en amenant le spécimen à céder en flexion. En transformant ainsi le mode de rupture, le spécimen devient plus ductile. Cette particularité permet d'observer des signes avant-coureurs avant la ruine de l'élément, contrairement à la rupture en cisaillement qui survient généralement sans qu'on puisse la prédire. La flèche de la poutre et les fissures de flexion sont des signes qui sont facilement observables avant la rupture. La ductilité des éléments est maintenant un critère incontournable faisant partie des normes à respecter lors d'une conception. Outre les difficultés d'ancrage et de confinement de l'élément renforcé lors du nettoyage, ce système de renforcement présente le gain de résistance le plus important de tous les systèmes mis à l'essai. Les résultats démontrent qu'il serait avantageux d'utiliser cette méthode de renforcement en présence d'éléments de géométrie qui permettent son utilisation.

5.2.5 Spécimen S1-LS-PA

La figure 5.29 présente une image globale de poutre S1-LS-PA, on peut y observer la configuration ainsi que l'endroit où la fissure de cisaillement s'est produite.

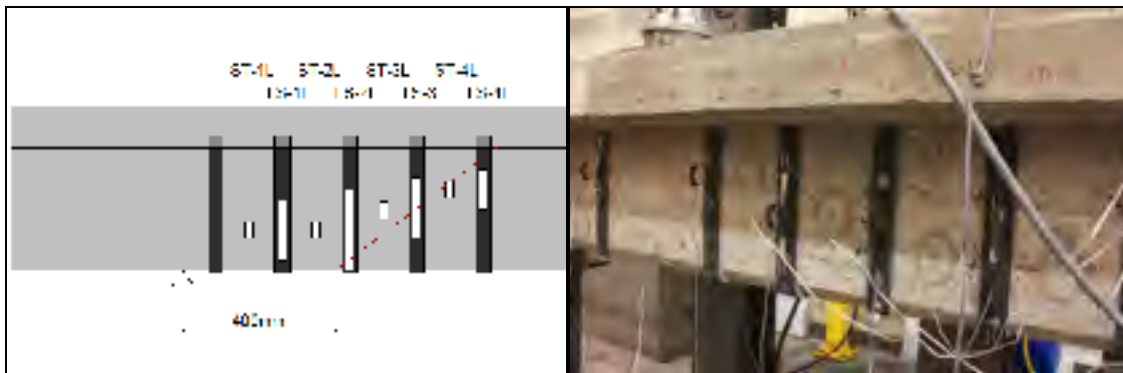


Figure 5.29 Observation du spécimen S1-LS-PA (fissure en rouge)

Charge atteinte :

La charge maximale atteinte lors de l'essai était de 600 kN, ce qui représente une augmentation de 39 % comparativement à la poutre de contrôle (432 kN). Le spécimen S1-LS-PA se retrouve au second rang, des spécimens à l'essai, au niveau de son efficacité. Comme pour le spécimen S1-LS-TA, la force cesse de progresser linéairement suite à la plastification de l'acier longitudinal (figure 5.30). Ce sont les deux seuls spécimens où l'on observe une plastification de l'acier longitudinal avant celle de l'acier transversal. La contribution efficace du renfort L-Shape en PRFC permet de soulager les étriers des contraintes induites par l'effort tranchant en redistribuant une partie de ces efforts vers les renforts de PRFC. Ainsi, la charge obtenue lorsque les étriers se plastifient est clairement sous une charge plus élevée (570 kN) que le spécimen de contrôle et la plupart des autres poutres à l'essai. Le gain de résistance obtenu pour ce spécimen est de 0.35 % par mm² de PRFC

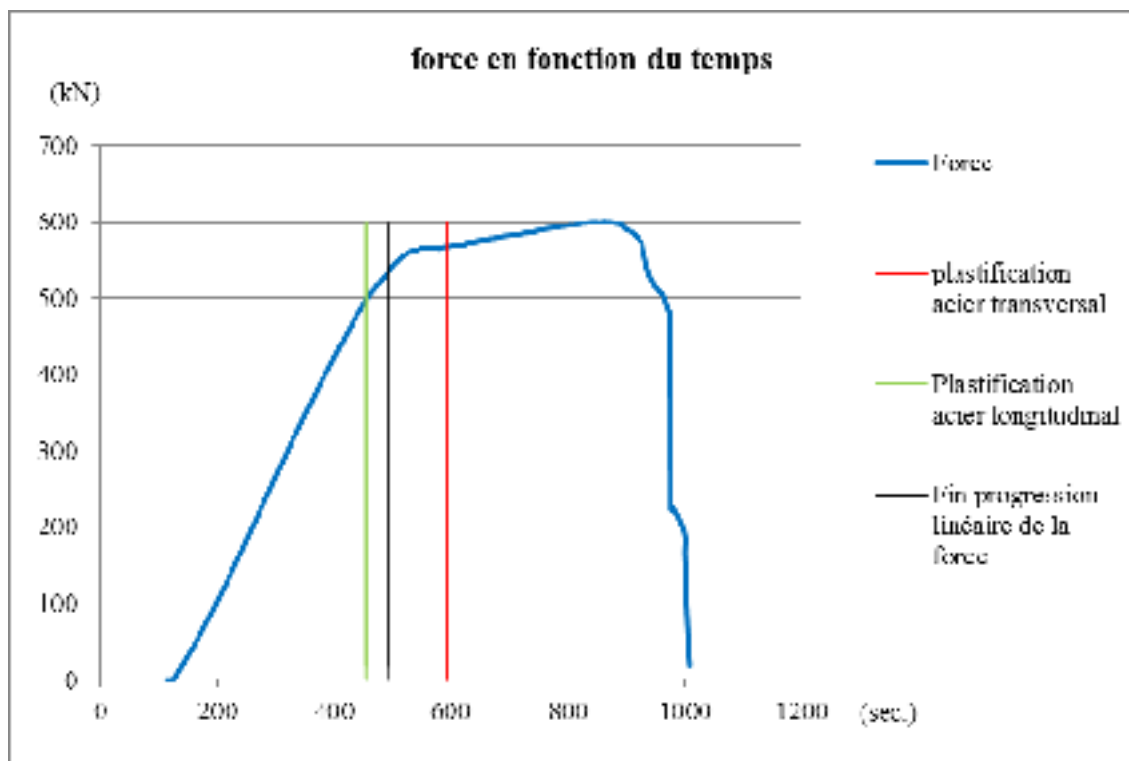


Figure 5.30 Force en fonction du temps pour spécimen S1-LS-PA

Déformations :

Les jauges de déformation placées sur les armatures et les lamelles de renfort nous permettent d'analyser la contribution de chacun des éléments sous charge. Pour le spécimen S1-LS-PA, les données du côté de la rupture sont analysées pour traduire les réactions lors de l'essai. Une déformation unitaire maximale de l'acier transversal de $16110 \mu\epsilon$ a été atteinte en ST-2L après l'atteinte de la force maximale. Au-delà de cette force, on observe que les déformations des barres transversales s'amplifient jusqu'à la rupture du spécimen, particulièrement en ST-3L et ST-4L (figure 5.31). Contrairement aux autres poutres à l'essai, à l'exception de S1-LS-TA, les déformations les plus importantes de l'acier se trouvent plus éloignées de l'appui. Ce phénomène peut s'expliquer par l'arrêt de la contribution du renfort en LS-3L et LS-4L (figure 5.32). En analysant les déformations des renforts les plus près du centre de la poutre, on voit que lorsque la poutre fléchit, le renfort se décolle de l'âme par arrachement du béton en surface. Cet aspect peut être observé sur le graphique de la figure 5.32, par une

diminution des déformations puisque les jauges à déformation se compriment lorsque le renfort bombe au niveau de l'âme. En examinant le comportement du renfort LS-3L, on remarque qu'au moment où il commence à se comprimer, la déformation unitaire dans l'acier ST-3L augmente. Ce phénomène démontre clairement l'interaction entre le renfort et l'acier d'armature transversale. Les renforts LS-1L et LS-2L ont cependant contribué jusqu'à la rupture du spécimen. L'armature longitudinale, quant à elle, s'est plastifiée avant l'acier transversal pour finalement atteindre une déformation unitaire de 9272 $\mu\epsilon$ bien avant d'atteindre la force maximale enregistrée (figure 5.33).

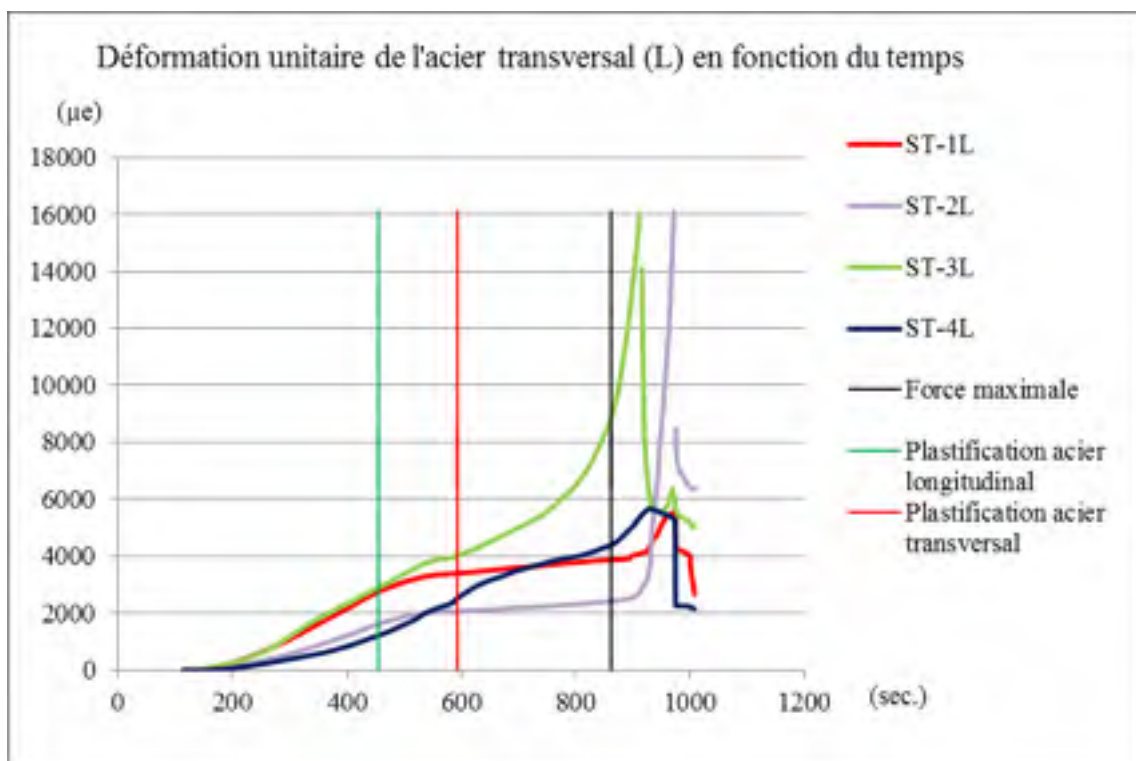


Figure 5.31 Déformation unitaire de l'acier transversal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-PA

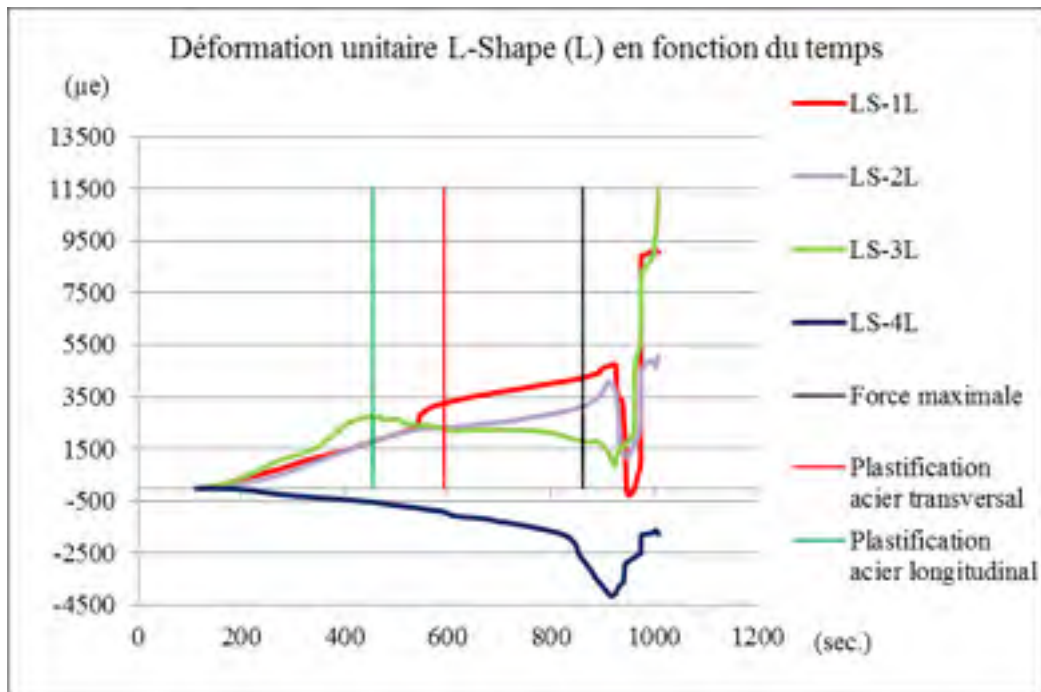


Figure 5.32 Déformation unitaire L-Shape (L) en fonction du temps pour spécimen S1-LS-PA

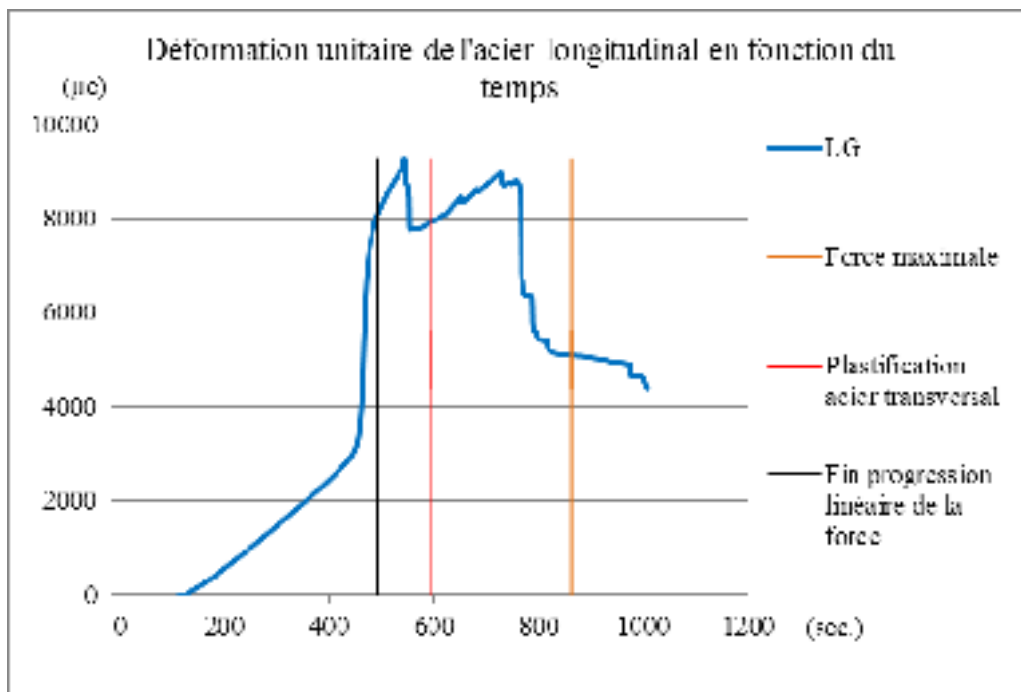


Figure 5.33 Déformation unitaire de l'acier longitudinal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-PA

Mode de rupture :

La fin du chargement s'est résumée par une rupture en cisaillement du côté gauche du spécimen (figure 5.34). Cependant, la fissure s'est développée à une distance de 400 mm de l'appui, ce qui est particulier puisque les contraintes de cisaillement sont toujours plus importantes à proximité des appuis pour ce type de chargement (deux appuis et une charge au centre). Bien que la fissure soit développée à une distance des appuis supérieure aux autres spécimens, l'angle de la fissure est de 35,8 degrés, ce qui s'apparente tout de même à une fissure de cisaillement. On peut aussi remarquer que la rupture n'a pas eu lieu dans une des fissures de préchargement, marquées d'un trait rouge sur le spécimen. Outre la fissure de cisaillement, on voit que les lamelles de PRFC, au droit de la fissure, ont cédé par arrachement du béton dans la semelle supérieure de la poutre. Ceci vient confirmer les recommandations du fournisseur à ancrer d'au moins 100 mm les lamelles de PRFC dans l'élément afin d'éviter l'arrachement du béton aux points d'ancrage.

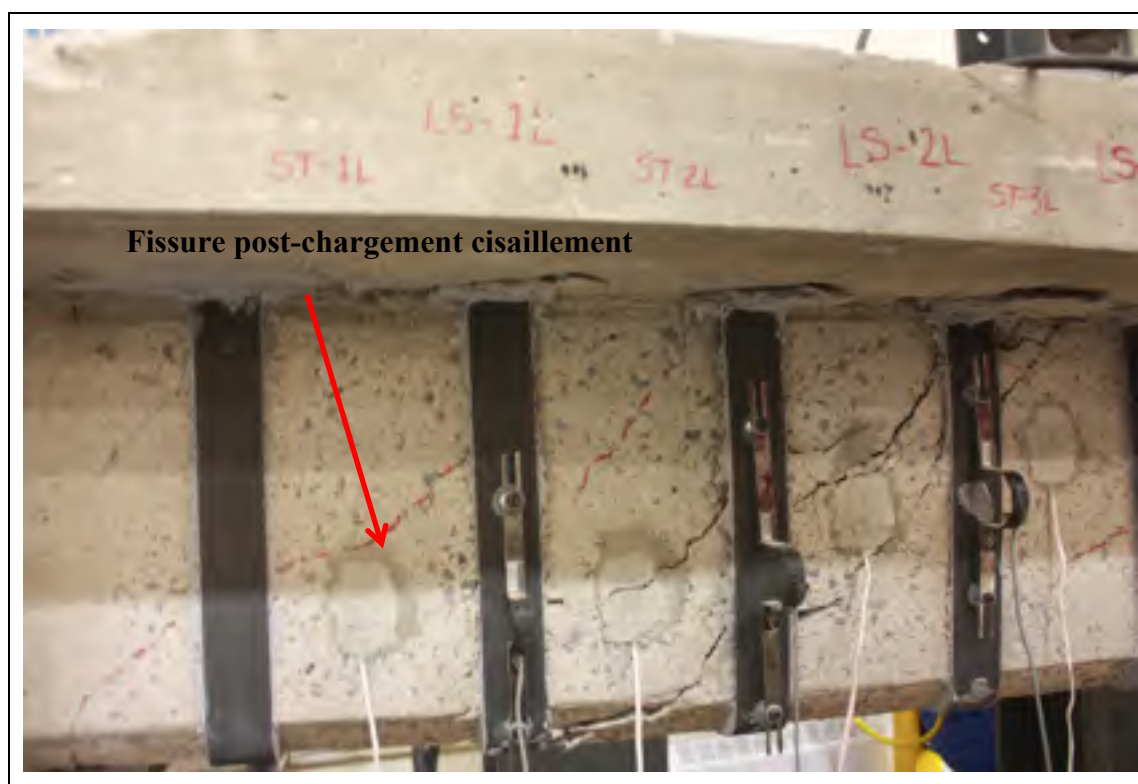


Figure 5.34 Mode de rupture du spécimen S1-LS-PA

Maniabilité / mise en œuvre du système :

Ce spécimen comporte tous les mêmes avantages et inconvénients que les autres spécimens renforcés à l'aide des lamelles CarboShear L : zone de préparation limitée à la largeur des lamelles, possibilité du suivi des fissures existantes et suivi du comportement global de la poutre. Cependant puisque les ancrages sous la dalle sont limités à 25 mm de profondeur, cet aspect permet d'éviter d'intercepter l'armature des dalles généralement placée à 35 mm de recouvrement. Cet avantage supplémentaire augmente considérablement la rapidité d'installation ainsi que les limitations d'espacement du système de renfort. En limitant la profondeur d'ancrage, on évite ainsi les possibilités d'abîmer ou d'intercepter l'armature de la dalle. Bien que le fournisseur prescrive un encastrement minimum de 100 mm, cette configuration avec une profondeur d'ancrage réduite a quand même été mise à l'essai en raison de cette particularité. Ce mode de renforcement comporte tout de même les inconvénients d'un nettoyage au jet abrasif, de confinement de l'élément lors de la préparation et de limitation des types de poutres pouvant être renforcées à l'aide de ce système.

Résumé sommaire-spécimen S1-LS-PA :

Le spécimen S1-LS-PA a montré un gain de résistance élevé avant rupture. Même si les recommandations d'encastrement du fournisseur n'ont pas été respectées, un encastrement de 25 mm des lamelles de PRFC Sika CarboShear L a permis d'obtenir une augmentation de résistance en cisaillement de 39 %. Cependant, les éléments de renfort à proximité de la zone en flexion de la poutre n'ont pas réussi à contribuer jusqu'à la résistance optimale obtenue. Un arrachement du béton en surface entre l'âme et le renfort est survenu assez tôt lors du chargement, ce qui a aussitôt fait réagir davantage les étriers ST-3L et ST-4L. Puisque les renforts en LS-1L et LS-2L ont continué de contribuer, la rupture s'est déplacée vers le centre de la poutre se trouvant fragilisée par l'absence de contribution du PRFC dans cette zone. L'effort tranchant étant plus faible en s'approchant du centre de la poutre a donc permis d'augmenter la charge sous laquelle on obtient la rupture du spécimen. Cette méthode de renforcement, bien qu'elle ne respecte pas les recommandations de mise en œuvre du fournisseur,

présente des résultats qui justifieraient son utilisation lors de situation problématique particulière. Par exemple, lorsqu'un élément présente un espacement d'armature irrégulier au niveau de la dalle, limitant ainsi la possibilité d'intercepter l'armature lors du percement pour l'encastrement.

5.2.6 Spécimen S1-LS-BA

La figure 5.35 présente une image globale de poutre S1-LS-BA, on peut y observer la configuration ainsi que l'endroit où la fissure de cisaillement s'est produite.



Figure 5.35 Observation du spécimen S1-LS-BA (fissure en rouge)

Charge atteinte :

Le spécimen S1-LS-BA est celui qui a atteint la force la moins élevée parmi toutes les poutres renforcées, malgré l'installation d'une plaque d'acier en surface pour limiter l'arrachement prématuré des lamelles de renfort et du béton en surface. L'augmentation de la charge maximale enregistrée de 18 % par rapport à la poutre de contrôle se retrouve sous celle du spécimen S1-LS-NA de 28 %, n'utilisant aucun système pour empêcher le décollement du renfort. La charge atteinte de 510 kN représente un gain de 0,16 % par mm² de PRFC, de loin le moins efficace de tous les spécimens mis à l'essai. Le graphique de la figure 5.36 présente l'augmentation de la force lors du chargement jusqu'à la rupture du spécimen. On remarque qu'une fois la fin de la progression linéaire de la force atteinte, aucun plateau n'est observé sur le graphique, traduisant ainsi

l'absence de ductilité de ce spécimen. Ce phénomène peut s'expliquer par la fin de la contribution du renfort en LS-1L et LS-2L qui s'observe pratiquement au même moment que la plastification de l'acier. Notons aussi que la barre d'armature ST-3L s'est fracturée au même moment où l'acier longitudinal atteint la phase plastique.

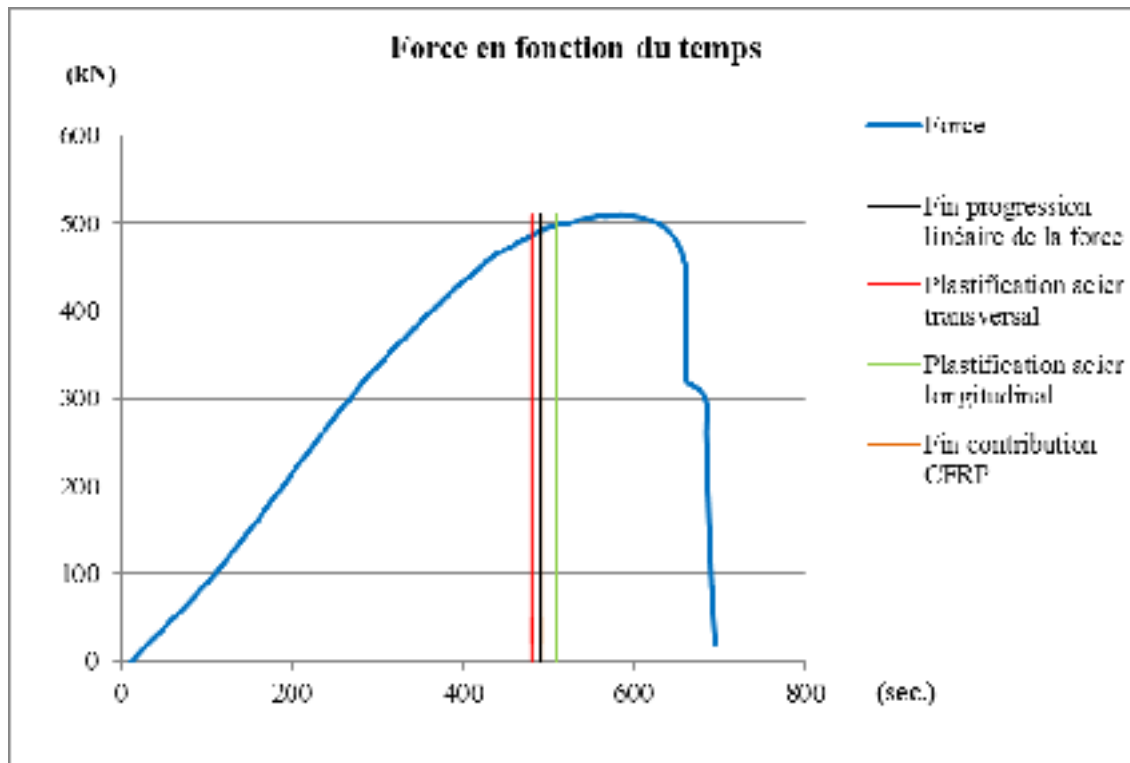


Figure 5.36 Force en fonction du temps pour spécimen S1-LS-BA

Déformations :

Afin d'étudier le spécimen S1-LS-BA, les déformations relevées par les jauges de déformation placées sur les armatures internes et sur le renfort externe du côté de la rupture seront analysées afin de décrire le comportement de cette méthode de renforcement. En observant les déformations unitaires de l'armature transversale (figure 5.37), on voit que ce ne sont pas toutes les barres qui ont contribué jusqu'à l'atteinte de la force maximale. La barre ST-3L s'est rompue bien avant la fin du chargement, ce qui a aussitôt causé une augmentation des contraintes vers les autres barres d'acier. Plus particulièrement sur l'étrier ST-4L qui est celui dont la déformation unitaire a connu

l'augmentation la plus significative suite à la rupture de ST-3L, soit jusqu'à $10379 \mu\epsilon$, bien au-dessus de la limite élastique de $3450 \mu\epsilon$. Comme pour les autres spécimens renforcés avec les Sika L-Shape, la contribution du renfort a aussi cessé en premier dans la zone située près du centre de la poutre en LS-4L (figure 5.38). Notons que les premiers signes de décollement du renfort ont eu lieu en LS-4L, suivi respectivement de LS-1L et LS-2L. Le renfort LS-3L est le seul ayant contribué jusqu'à l'atteinte de la force maximale. On remarque ce fait par la décroissance des déformations sur les autres renforts. Cette diminution est visible par la compression des jauges due au bombement du renfort en surface. La déformation unitaire du renfort en LS-3L n'a toutefois pas dépassé $2515 \mu\epsilon$. Cette valeur est loin de la limite de $13000 \mu\epsilon$ prescrite par le fournisseur. L'armature longitudinale a quant à elle contribué jusqu'à la rupture de l'élément. Cependant, la déformation enregistrée a légèrement excédé la limite élastique de $3250 \mu\epsilon$ pour atteindre $3405 \mu\epsilon$. Ceci indique que la charge exercée sur le spécimen était clairement dirigée vers la déficience en cisaillement du spécimen une fois la barre ST-3L rompue.

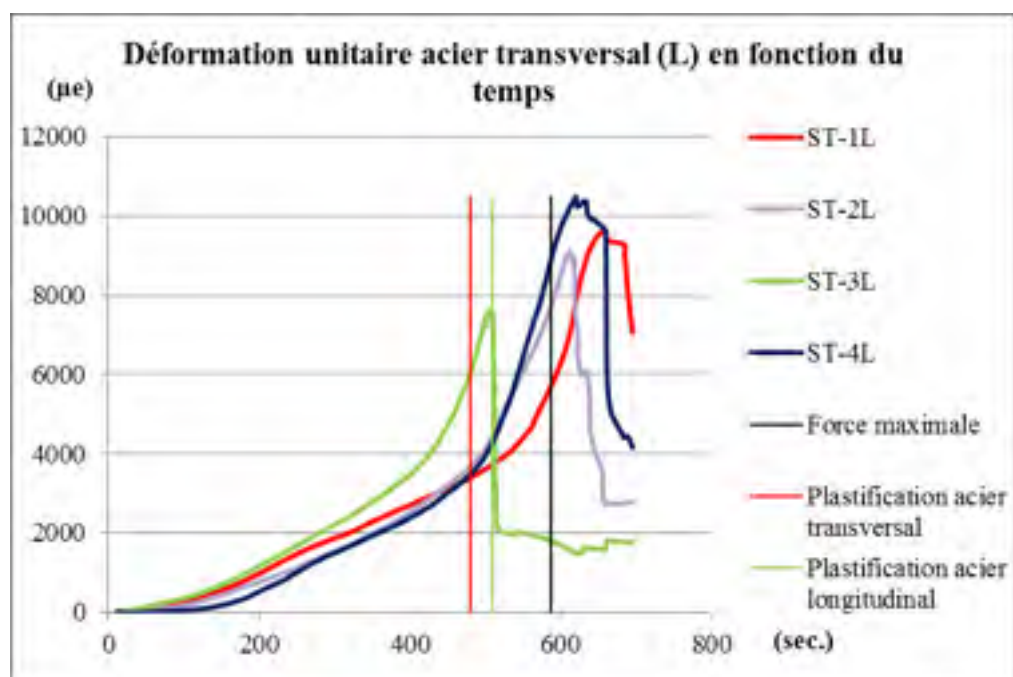


Figure 5.37 Déformation unitaire de l'acier transversal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-BA

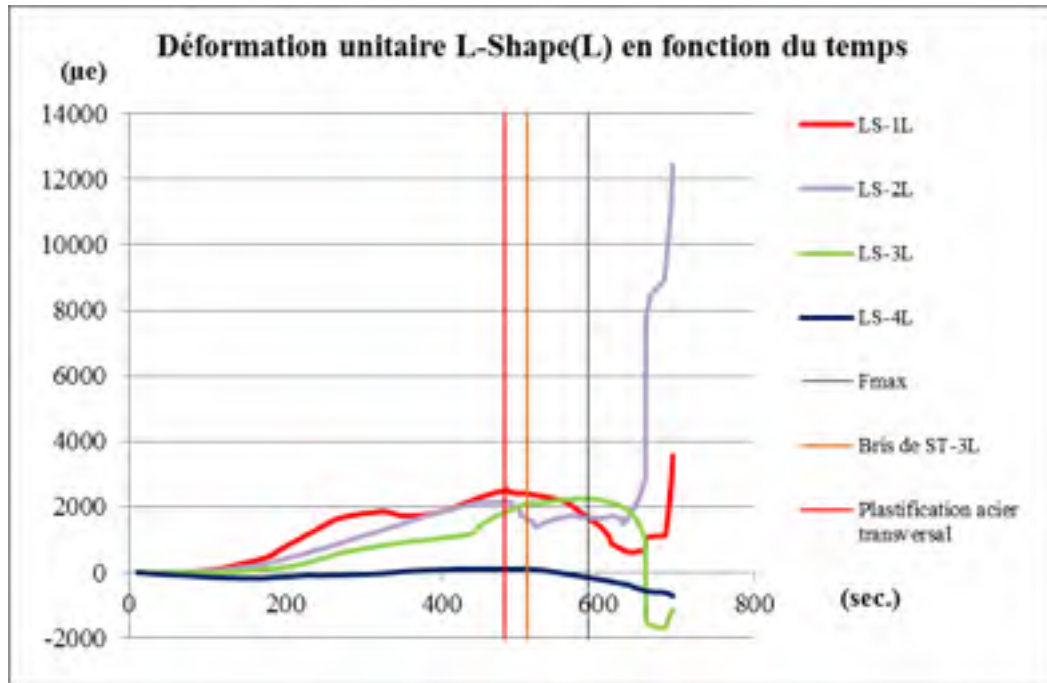


Figure 5.38 Déformation unitaire L-Shape (L) en fonction du temps pour spécimen S1-LS-BA

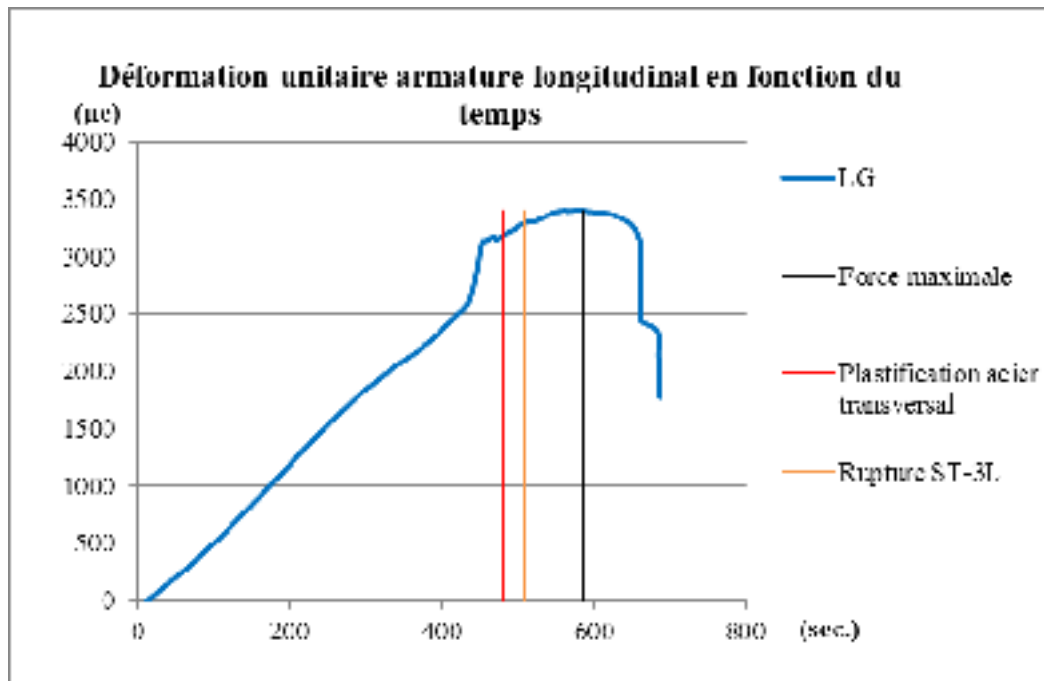


Figure 5.39 Déformation unitaire de l'acier longitudinal en fonction du temps pour spécimen S1-LS-BA

Mode de rupture :

La fin du chargement s'est résumée par une rupture en cisaillement du côté gauche du spécimen (figure 5.40). Comme toutes les poutres renforcées avec les lamelles en L (L-Shape), la rupture s'est produite à une distance de l'appui supérieure aux poutres utilisant les barres ETS et le tissu de PRFC, soit à une distance de 360 mm de l'appui avec un angle de 38,5 degrés. La barre d'acier placée au haut de l'âme servant à empêcher le décollement n'a pas permis d'atteindre un rendement supérieur au spécimen S1-LS-NA, conçu sans aucun dispositif d'ancrage. Après le décollement du béton en surface sous les lamelles, un glissement du renfort sous la barre d'ancrage a été observé avant la rupture (figure 5.41). Cette figure montre aussi que la rupture a eu lieu dans une fissure existante causée lors des essais de préchargement, interceptant la barre ST-3L qui s'est rompue avant l'atteinte de la force maximale enregistrée (figure 5.42).

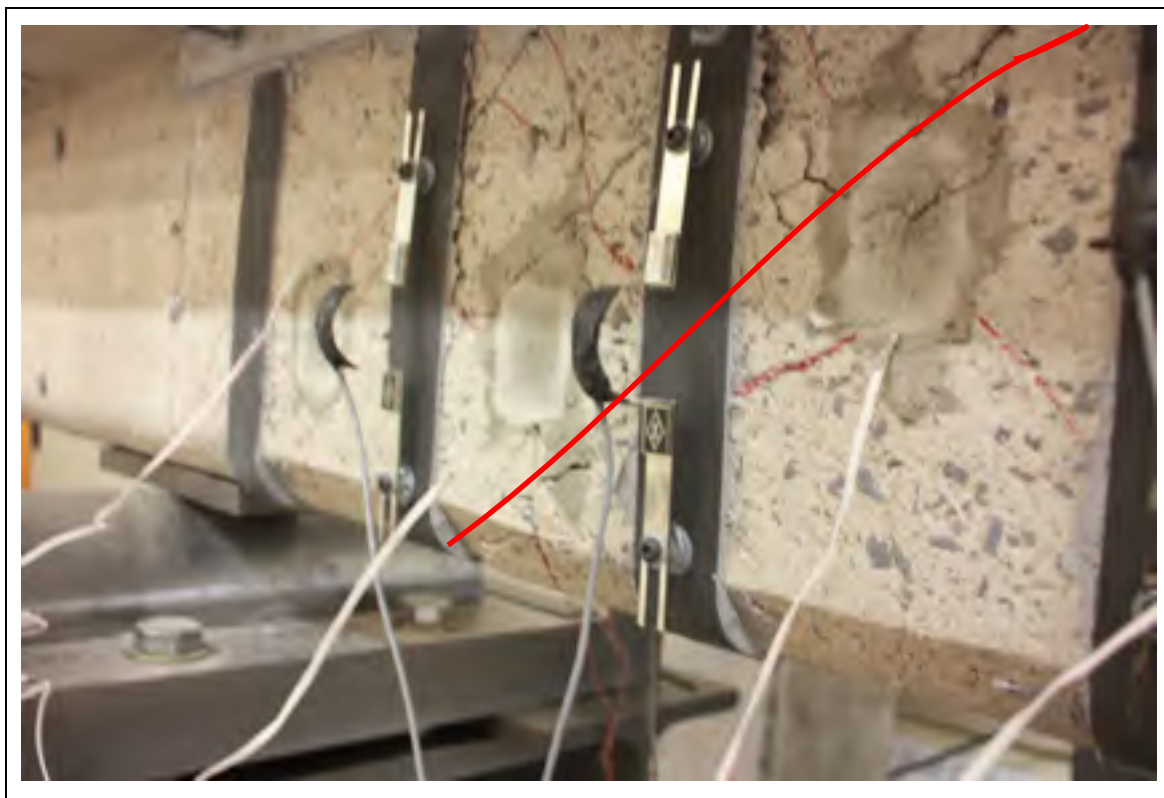


Figure 5.40 Mode de rupture du spécimen S1-LS-BA

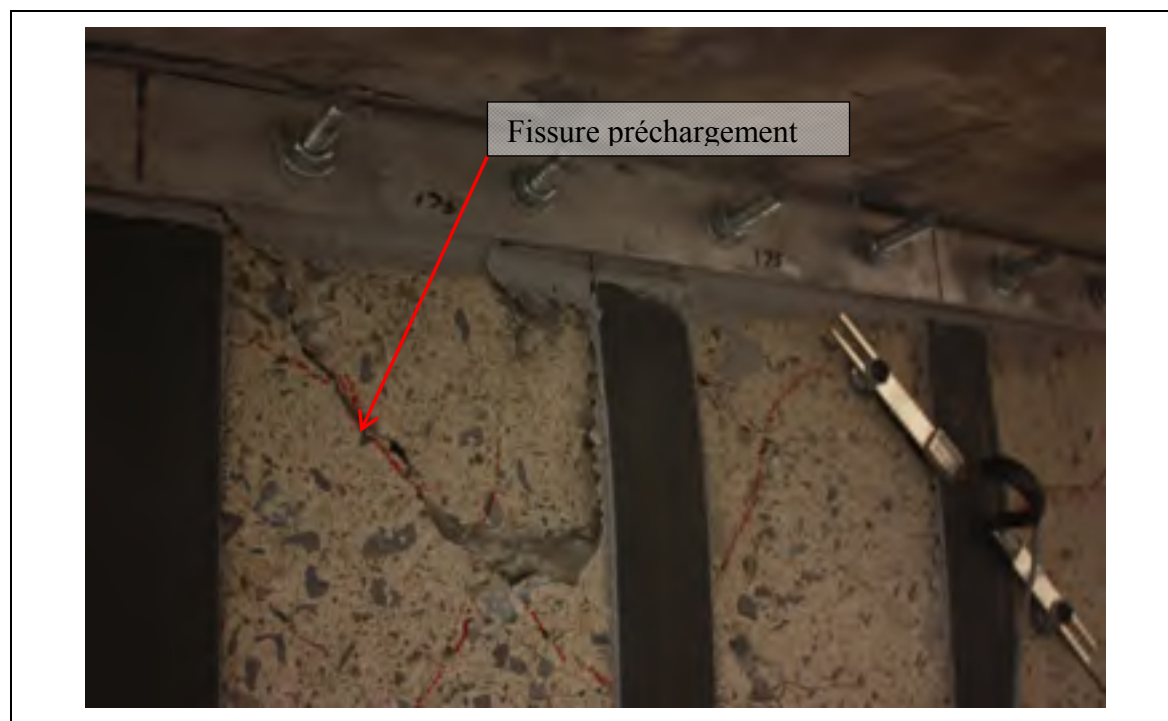


Figure 5.41 Décollement et glissement du renfort pour spécimen S1-LS-BA



Figure 5.42 Rupture de l'étrier ST-3L pour spécimen S1-LS-BA

Maniabilité / mise en œuvre du système :

Comparativement aux autres spécimens utilisant les lamelles Sika CarboShear L, le spécimen S1-LS-BA comporte certaines étapes supplémentaires quant à sa préparation. Puisqu'une plaque d'acier est installée sur la partie supérieure des lamelles à la jonction de l'âme et de la semelle supérieure, un temps de préparation est nécessaire à la coupe et au perçement de cette plaque. Cette plaque devra ensuite être ancrée à l'âme de la poutre à l'aide de tiges filetées à laquelle on devra réaliser un perçement afin d'y introduire les tiges en utilisant un produit d'ancrage qui demandera un temps de cure avant l'installation de la plaque. Tout comme les spécimens avec les lamelles en L (L-Shape), la possibilité d'intercepter l'acier d'armature lors du perçement pourrait rendre sa réalisation plus délicate. De plus, son utilisation est aussi limitée aux éléments de forme rectangulaire comme les dalles nervurées et poutres rectangulaires ou en T. Notons que ce système de renforcement est le plus complexe parmi ceux renforcés à l'aide des lamelles Sika CarboShear L.

Résumé sommaire-spécimen S1-LS-BA :

Les résultats obtenus lors de l'essai sur le spécimen S1-LS-BA montrent clairement que cette méthode de renforcement n'est pas celle à privilégier. L'augmentation de résistance de 18 % est la plus faible de toutes les méthodes mises à l'essai. Cependant, le spécimen S1-LS-BA est le seul qui a connu une rupture prématurée d'un étrier. Tous les autres spécimens ont connu une contribution de toutes les barres d'armature transversale jusqu'à l'obtention de la force maximale enregistrée. On peut se questionner sur l'état de la barre ST-3L suite au test réalisé lors de l'essai de préchargement. Notons que cette barre transversale se retrouvait dans un plan de fissuration visible avant nos essais. Il est tout de même important de spécifier que la poutre a tout de même résisté jusqu'à l'atteinte d'une charge supérieure suite à la rupture de la barre ST-3L. Tel que décrit précédemment, la fissure s'est développée à une distance plus éloignée de l'appui comme les autres spécimens renforcés avec les lamelles Sika L-Shape. On peut croire que cette observation est liée à la faible contribution du renfort lorsqu'il est placé près de

l'effort de flexion maximum, démontrant ainsi une résistance inférieure au renforcement situé à proximité des appuis.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les résultats obtenus suite au programme expérimental et les théories développées dans le cadre de cette étude permettent de répondre aux objectifs fixés dans cette étude qui étaient de comparer les différentes méthodes de renforcement en cisaillement de poutres en béton armé à l'aide de PRF et de comparer la faisabilité de mise en place de ces différents systèmes. En effet, les données théoriques et expérimentales amenées par les différentes recherches au cours des dernières années ainsi que les résultats obtenus lors de nos essais permettent de conclure que certaines méthodes de renforcement sont plus efficaces et qu'il y a certainement des systèmes qui conviennent mieux selon différentes particularités dimensionnelles et contraintes physiques.

Le volet théorique à travers les observations faites sur le comportement des poutres de béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de PRF et les différents modèles de calculs ont permis de mieux cibler les paramètres d'influences lors de l'établissement du programme expérimental et de déterminer la résistance initiale théorique des spécimens avant renfort selon le modèle proposé par la norme CAN/CSA A23.3-F04.

À travers les études sur le renforcement des poutres en BA à l'aide de PRF qui ont été analysées dans la revue de la littérature, les différents systèmes utilisés pour le renforcement en cisaillement nous ont guidé dans le choix des systèmes étudiés dans le cadre de ce mémoire. De plus, le problème récurrent de décollement attribué à la longueur d'ancrage du renfort de PRF nous a amené à vérifier son influence au sein d'un groupe de spécimens utilisant le même type de système en faisant varier la profondeur d'ancrage des lamelles Sika CarboShear L.

Ainsi, le choix des systèmes de renforts étudiés et le nombre de spécimens choisi pour cette étude ont conduit à un ensemble de sept spécimens comme suit :

- une poutre de contrôle préfissurée (S1-CON) servant de mesure comparative avec les autres poutres renforcées;
- une poutre renforcée à l'aide de tissu de PRFC collé en continu sur l'âme de la poutre (S1-EB);
- une poutre renforcée à l'aide de tiges de PRFC insérées à travers l'âme de la poutre (S1-ETS);
- quatre poutres renforcées à l'aide de lamelles Sika CarboShear L collées sur l'âme des poutres à espacement régulier de 175 mm, comportant des profondeurs d'ancrage dans la semelle supérieure variées de 0 mm, 25 mm, 100 mm et 0 mm munies d'une plaque d'ancrage sur les côtés à l'extrémité des lamelles de la partie verticale (S1-LS-NA, S1-LS-PA, S1-LS-TA, S1-LS-BA).

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus dans cette étude, on peut conclure que certains systèmes offrent de meilleures performances en terme de gain de résistance et que d'autres, sans être de loin moins performant, peuvent offrir d'autres avantages de facilité de mise en place et de durabilité à long terme. Plus spécifiquement, les conclusions suivantes peuvent être énoncées :

- tous les spécimens ont cédé en cisaillement à l'exception du spécimen S1-LS-TA qui a rompu en flexion avec un comportement qu'on pourrait qualifier de ductile. Il s'agit d'un net avantage si on considère que ce type de comportement est priorisé aujourd'hui lors des nouvelles conceptions de structures. Ce spécimen est aussi celui qui a offert le gain de résistance en cisaillement le plus élevé par rapport à la poutre de contrôle, soit une augmentation de 55 %. De plus, en comparant les gains de résistance par mm² de PRFC, ce spécimen est de loin celui qui offre le meilleur rendement. On peut grossièrement estimer que ce système procure 0,49 % d'augmentation de résistance pour chaque mm² de PRFC par espacement de 175 mm. Il est important de noter que ce spécimen rencontrait les exigences minimales d'ancrage de 100 mm recommandées par le fournisseur;

- le spécimen S1-LS-PA conçu avec une profondeur d'ancrage de 25 mm, nettement sous les recommandations du fournisseur, pour empêcher d'intercepter les barres d'armature de la dalle existante lors du perçage, a démontré des résultats très satisfaisants malgré la dérogation de profondeur recommandée. Ce spécimen est celui qui se loge au deuxième rang dans le gain de résistance en offrant une augmentation de 39 % par rapport à la poutre de contrôle. Ce résultat prouve que dans des conditions où la localisation des barres d'armature d'une dalle serait difficile à trouver, l'utilisation de ces lamelles ancrées de seulement 25 mm offrirait un résultat dépassant les gains de résistance en cisaillement offert par les autres systèmes mis à l'essai. La contribution du renfort s'est terminée par une rupture par arrachement du béton autour de la partie ancrée des lamelles. En revanche, les deux spécimens utilisant les lamelles sans profondeur d'ancrage sont ceux qui ont le moins contribué en termes de gain de résistance. Ceci prouve qu'une profondeur minimale d'ancrage serait à respecter pour le système utilisant les lamelles Sika CarboShear L;
- le spécimen S1-ETS-9 mm muni de tiges de PRFC n'est pas de ceux qui ont donné un gain de résistance parmi les plus élevés. Par contre, si on analyse le gain selon le taux de renfort par espacement de 175 mm, celui-ci offre un gain de 0,31 % par mm² de renfort. Ce résultat se situe au troisième rang parmi les spécimens à l'étude. On peut donc en déduire que si on avait utilisé des tiges ayant une section plus grande, un gain de résistance en cisaillement global aurait sûrement été enregistré;
- en ce qui a trait à la facilité de mise en place, le système de tissu collé en surface est de loin celui qui nécessite le plus de travail. Tout comme les autres systèmes, à l'exception du système ETS, c'est la préparation de surface au jet abrasif qui rend difficile et contraignante son utilisation. En chantier, cette étape requiert l'installation d'enceintes de confinement et des précautions de sécurité en raison des résidus de béton devenus volatiles suite au décapage par abrasion. Ces particules peuvent causer des problèmes de silicose, une maladie qualifiée d'extrêmement dangereuse par la CSST, un enjeu devenu important dans le milieu de la construction. D'autre part, la méthode de renforcement ETS est de loin celle qui nécessite le moins de travail. Il suffit simplement de forer un trou, le nettoyer, le remplir d'une résine époxy et d'y insérer une tige. La seule difficulté

de ce système est rencontrée lorsqu'un nombre important d'armatures se trouve concentré à l'endroit où le forage est requis. Dans un tel cas, il serait difficile de vendre l'idée d'utiliser ce système s'il y a risque de sectionner des barres d'armature longitudinale ou des torons lors du percement qui réduirait la résistance en flexion de l'élément renforcé.

Enfin, le choix du système de renforcement utilisé peut être influencé par certains critères pouvant favoriser l'un des trois systèmes mis à l'étude : (i) l'importance du gain de résistance à obtenir, (ii) l'exposition aux agresseurs physiques, (iii) la concentration importante d'acier longitudinal, (iv) la forme de l'élément renforcé et ses dimensions, (v) le suivi des fissures existantes, (vi) la localisation connue ou non des armatures de dalle et (vii) la difficulté de mise en place d'enceintes de confinement. Puisque les différentes méthodes de renforcement ont toutes montré qu'elles étaient capables, à différents niveaux, d'augmenter la résistance en cisaillement des poutres de béton armé préfissurées, le choix du système de renforcement recommandé repose sur les différentes contraintes de mise en place ou de conception. Pour faciliter le choix des systèmes à utiliser, le tableau C-1 propose aux concepteurs un guide d'aide à la décision pour le choix du système de renforcement en fonction des paramètres prédominants.

Particularité des différents systèmes

Spécimen	Gain de résistance par mm ² de renfort/S (%)	Exposé aux agressions physiques	Restreint par le taux d'armature longitudinale	Contrainte de forme ou dimension	Empêche le suivi des fissures	Localisation de l'armature de dalle nécessaire	Nécessite une enceinte de confinement en chantier
S1-EB	0,27	x			x		x
S1-ETS 9mm	0,31		x				
S1-LS-NA	0,25	x		x			x
S1-LS-TA	0,49	x		x		x	x
S1-LS-PA	0,35	x		x			x
S1-LS-BA	0,16	x		x			x

x = applicable

Les différents gestionnaires des parcs de structures auraient grandement avantage à considérer l'utilisation de la technique de renforcement à l'aide de PRF aux structures déficientes en cisaillement. Les nombreuses études depuis les 23 dernières années ont prouvé que plusieurs systèmes de renforcement en cisaillement pouvaient améliorer le comportement des poutres en béton armé comportant des fissures ou dommages en cisaillement et offrir une résistance souvent supérieure à celle offerte à l'origine. Compte tenu des restrictions budgétaires, il faudrait se pencher sur les avantages économiques que pourrait procurer l'utilisation de ces systèmes de renforcement en tenant compte du prolongement de la durée de vie de certaines structures et du retrait de certains affichages de restrictions de charge sur un nombre important de ponts et donc la réduction des coûts associés à des reconstructions prématurées.

ANNEXE I

FICHE TECHNIQUE – SikaWrap Hex 230C

Construction

Fiche technique du produit
 Edition 06.2010(A)
 DCC Master Format™ 03 01 30
 SikaWrap® Hex 230C

SikaWrap® Hex 230C

Tissu de fibre de carbone pour système de renforcement structural

Description	SikaWrap® 230C est un tissu de fibre de carbone unidirectionnelle. Lorsque mis en place par superposition d'épaisseurs du tissu sur la résine d'impregnation époxyde Sikadur® 330, il forme un système de renforcement composite.																																																				
Domaines d'application	Renforcement des structures de béton armé, de maçonnerie ou de bois, des éléments structuraux des ponts, des stationnements en hauteur, des installations marines, des cheminées, des silos, des tunnels, des réservoirs, des pipelines et autres structures semblables. Augmentation de la charge ■ Augmentation de la charge vive dans les entrepôts. ■ Augmentation du débit de circulation sur les ponts. ■ Installation d'équipements lourds dans les bâtiments industriels. ■ Equipement vibrant. ■ Changement de vocation d'un bâtiment. Renforcement sismique ■ Colonnes. ■ Murs de maçonnerie. Dommages aux éléments structuraux ■ Vieillessement des matériaux de construction. ■ Impacts de véhicules. ■ Incendies. Changements structuraux aux systèmes de construction ■ Enlèvement de murs ou de colonnes. ■ Enlèvement de sections de dalles pour pratiquer des ouvertures. Défauts de conception ou de construction ■ Renforts insuffisants. ■ Epaisseur structurale insuffisante.																																																				
Avantages	■ Homologué par l'ICBO ER-5558 (SikaWrap® Hex 230C). ■ Tissu léger, idéal pour les endroits exigus. ■ Superposition d'épaisseurs de tissu. ■ Employé pour le renforcement en cisaillement, en confinement ou à la flexion. ■ Souple, s'enroulant facilement autour de formes complexes. ■ Résistance élevée. ■ Faible poids. ■ Non-corrosif. ■ Résistant aux alcalis. ■ Faible impact sur l'esthétique.																																																				
Données techniques <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Emballage</th> <th>Sikadur® 330</th> <th>SikaWrap® Hex 230C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>Unité de 5 kg (3,8 l)</td> <td>Rouleau de 610 mm x 46,7 m (24 po x 150 pi)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Unité de 11 lb (1 gal. US)</td> <td>Rouleau de 305 mm x 46,7 m (12 po x 150 pi)</td> </tr> <tr> <td>Couleurs</td> <td>Comp. A : Blanc Comp. B : Gris</td> <td>Noir</td> </tr> <tr> <td>Composition</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Première couche</td> <td>0,7 - 1,2 kg/m² (0,14 - 0,24 lb/po²)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Couche intermédiaire</td> <td>0,5 kg/m² (0,10 lb/po²)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Couche de finition</td> <td>0,5 kg/m² (0,10 lb/po²)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Conservation</td> <td colspan="2">Résine : 2 ans dans son emballage d'origine, non ouvert. Entreposer au sec entre 5 et 25 °C (41 et 77 °F). Conditionner le produit entre 10 et 24 °C (50 et 75 °F) avant de l'utiliser. Tissu : Blanc. Entreposer au sec entre 5 et 32 °C (41 et 90 °F). A/B = 4:1 en fonction du poids. Se servir de balances pour s'assurer de l'exactitude du rapport de mélange.</td> </tr> <tr> <td>Rapport de mélange</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Propriétés de la fibre</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Direction de la fibre primaire</td> <td colspan="2">0° (unidirectionnelle)</td> </tr> <tr> <td>Résistance en traction</td> <td colspan="2">3,45 GPa (5 x 10⁵ lb/po²)</td> </tr> <tr> <td>E-Module en traction</td> <td colspan="2">230 GPa (33,4 x 10⁵ lb/po²)</td> </tr> <tr> <td>Allongement</td> <td colspan="2">1,5 %</td> </tr> <tr> <td>Densité</td> <td colspan="2">1,8 g/cm³ (0,085 lb/po³)</td> </tr> <tr> <td>Poids par unité de surface</td> <td colspan="2">230 g/m² (8,8 oz/y²)</td> </tr> </tbody> </table>			Emballage	Sikadur® 330	SikaWrap® Hex 230C		Unité de 5 kg (3,8 l)	Rouleau de 610 mm x 46,7 m (24 po x 150 pi)		Unité de 11 lb (1 gal. US)	Rouleau de 305 mm x 46,7 m (12 po x 150 pi)	Couleurs	Comp. A : Blanc Comp. B : Gris	Noir	Composition			Première couche	0,7 - 1,2 kg/m ² (0,14 - 0,24 lb/po ²)		Couche intermédiaire	0,5 kg/m ² (0,10 lb/po ²)		Couche de finition	0,5 kg/m ² (0,10 lb/po ²)		Conservation	Résine : 2 ans dans son emballage d'origine, non ouvert. Entreposer au sec entre 5 et 25 °C (41 et 77 °F). Conditionner le produit entre 10 et 24 °C (50 et 75 °F) avant de l'utiliser. Tissu : Blanc. Entreposer au sec entre 5 et 32 °C (41 et 90 °F). A/B = 4:1 en fonction du poids. Se servir de balances pour s'assurer de l'exactitude du rapport de mélange.		Rapport de mélange			Propriétés de la fibre			Direction de la fibre primaire	0° (unidirectionnelle)		Résistance en traction	3,45 GPa (5 x 10 ⁵ lb/po ²)		E-Module en traction	230 GPa (33,4 x 10 ⁵ lb/po ²)		Allongement	1,5 %		Densité	1,8 g/cm ³ (0,085 lb/po ³)		Poids par unité de surface	230 g/m ² (8,8 oz/y ²)	
Emballage	Sikadur® 330	SikaWrap® Hex 230C																																																			
	Unité de 5 kg (3,8 l)	Rouleau de 610 mm x 46,7 m (24 po x 150 pi)																																																			
	Unité de 11 lb (1 gal. US)	Rouleau de 305 mm x 46,7 m (12 po x 150 pi)																																																			
Couleurs	Comp. A : Blanc Comp. B : Gris	Noir																																																			
Composition																																																					
Première couche	0,7 - 1,2 kg/m ² (0,14 - 0,24 lb/po ²)																																																				
Couche intermédiaire	0,5 kg/m ² (0,10 lb/po ²)																																																				
Couche de finition	0,5 kg/m ² (0,10 lb/po ²)																																																				
Conservation	Résine : 2 ans dans son emballage d'origine, non ouvert. Entreposer au sec entre 5 et 25 °C (41 et 77 °F). Conditionner le produit entre 10 et 24 °C (50 et 75 °F) avant de l'utiliser. Tissu : Blanc. Entreposer au sec entre 5 et 32 °C (41 et 90 °F). A/B = 4:1 en fonction du poids. Se servir de balances pour s'assurer de l'exactitude du rapport de mélange.																																																				
Rapport de mélange																																																					
Propriétés de la fibre																																																					
Direction de la fibre primaire	0° (unidirectionnelle)																																																				
Résistance en traction	3,45 GPa (5 x 10 ⁵ lb/po ²)																																																				
E-Module en traction	230 GPa (33,4 x 10 ⁵ lb/po ²)																																																				
Allongement	1,5 %																																																				
Densité	1,8 g/cm ³ (0,085 lb/po ³)																																																				
Poids par unité de surface	230 g/m ² (8,8 oz/y ²)																																																				

SikaWrap® Hex 230C

03 01 30 - SYSTÈMES DE RENFORCEMENT STRUCTURAL

3-640


Propriétés du tissu noir et imprégné avec l'époxyle Sikadur® 330

Après une cure standard entre 21 et 24 °C (70 et 75 °F) 5 jours

Propriétés	Valeur moyenne ¹ MPa (lb/po ²)	Valeur de conception ² MPa (lb/po ²)	Méthode d'essai
Résistance en traction ³	884 (1,26 x 10 ⁵)	216 (3,14 x 10 ⁴)	D3338
Module en traction ³	85 402 (9,49 x 10 ³)	61 012 (8,86 x 10 ³)	D3039
Allongement à la rupture % ³	1,33 (1,33)	1,09 (1,09)	D3338
80 °C (180 °F) - Résistance en traction	814 (1,18 x 10 ⁵)	203 (2,92 x 10 ⁴)	D3338
80 °C (180 °F) - Module en traction	87 452 (9,78 x 10 ³)	59 989 (8,68 x 10 ³)	D3039
80 °C (180 °F) - Allongement à la rupture %	1,18 (1,18)	1,00 (1,00)	D3338
Résistance à la compression	778 (1,13 x 10 ⁵)	898 (1,30 x 10 ⁵)	D882
Module d'élasticité en compression	87 003 (9,72 x 10 ³)	85 587 (1,23 x 10 ⁵)	D882
90° - Résistance en traction	27 (3917)	23 (3337)	D3338
90° - Module en traction	5878 (8,53 x 10 ³)	5662 (8,26 x 10 ³)	D3338
90° - Allongement à la rupture %	0,45 (0,45)	0,40 (0,40)	D3338
Résistance en cisaillement dans un état ad5	85 (1241)	50 (725)	D3518
Module en cisaillement dans un état ad5	2882 (4,21 x 10 ³)	2882 (4,21 x 10 ³)	D3518
Épaisseur	0,381 mm (0,015 po)	-	-

¹ 34 échantillons par série d'essais, toutes les autres valeurs sont basées sur une série d'essais de 6 échantillons.

² Valeur moyenne d'une série d'essais.

³ Valeur moyenne moins 2 fois l'écart type.

Mode d'emploi
Préparation de la surface

Décapier la surface en la sablant ou par meulage (CSP 3-4). Enlever toute la poussière et les matériaux désagrégés de la surface avec un aspirateur industriel. La surface doit être propre, exempte de graisse, d'huile et sèche. La teneur maximale d'humidité du substrat doit être < 4 % par poids.

La surface doit être nivelée et ne présenter aucune aspérité ni saillie > 0,5 mm (20 mils). Il faut niveler toute irrégularité supérieure en se servant de Sikadur® 330, auquel est ajoutée du sable de silice sèche au four (rapport de 1:1 en fonction du volume).

 La résistance à la traction du substrat devant être renforcé doit être au moins de 1,5 MPa (215 lb/po²). Tous les coins de la structure doivent être arrondis à un rayon de 10 mm (3/8 po).

Malaxage

Consulter la Fiche technique du produit Sikadur® 330 pour de plus amples renseignements sur la résine époxyde.

Prémélanger chacun des composants. Puis mélanger tout l'ensemble, et non en lots séparés. Verser le composant B dans le contenant du composant A. Mélanger soigneusement pendant 3 minutes au moyen d'une perceuse électrique réglée à basse vitesse (400 - 600 tr/min) et munie d'une pale de malaxage, jusqu'à ce que la couleur devienne uniforme. Verser le mélange époxyde dans un contenant propre, puis mélanger à nouveau pendant environ 1 minute à faible vitesse, afin d'emprisonner le moins d'air possible.

La vie en pot commence au moment du malaxage des deux composants (la résine et le durcisseur). À basse température, la vie en pot est plus longue, à température élevée, plus courte. Plus la quantité de matériau mélangé est grande, plus la vie en pot est courte.

Application

Tailler le tissu selon la dimension voulue.

 Appliquer ensuite directement sur le substrat préparé, le mélange de résine époxyde Sikadur® 330, en couvrant de 0,7 - 1,2 g/cm² (0,14 - 0,24 lb/po²), selon le profil de la surface, à l'aide d'une spatule ou d'un pinceau.

Disposer avec soin le tissu dans la résine, dans le sens requis, en prenant soin de porter des gants, puis lisser la surface. Éliminer l'air emprisonné et les irrégularités, en se servant d'un rouleau en plastique pour l'encre. Permettre à la résine de passer au travers des tranches du tissu.

 Si plus d'une épaisseur de tissu est requise, appliquer davantage de Sikadur® 330 (0,5 g/cm² - 0,10 lb/po²) dans les 60 minutes, à 20 °C (68 °F), suivant l'application de la couche précédente. Si l'attente dépasse 60 minutes à 20 °C (68 °F), attendre 12 heures avant de recommencer l'application. Répéter les étapes décrites ci-dessus.

 Appliquer sur la surface exposée, une couche de finition de Sikadur® 330 (0,5 g/cm² - 0,10 lb/po²). À basse température ou si l'humidité relative est élevée, l'attente peut prendre plus de 12 heures et la surface, devenir légèrement collante. Il faut éliminer, avant de déposer une nouvelle épaisseur de tissu, l'effet poisseux de la surface. Pour ce faire, laver la surface à l'aide d'une éponge humide ou immerger à l'eau.

Appliquer, afin d'éviter que le tissu de renforcement puisse être exposé directement au soleil, une couche de finition de Sikagard® 550 W Elastic, de Sikagard® Color A50 ou d'un autre produit approprié. Pour favoriser l'adhérence d'une couche de finition cimentaire à l'époxyle durci, appliquer au préalable une couche additionnelle d'époxyle (15 - 20 mils) et saupoudrer la surface de sable siliceux.

Nettoyage

Nettoyer la zone. Confirmer le déversement. Enlever avec un matériau absorbant. Éliminer conformément aux réglementations locales, provinciales et fédérales. Le produit non durci peut être enlevé avec un solvant recommandé. Le produit durci ne peut être enlevé que par un moyen mécanique.

Restrictions	■ Le chevauchement du tissu, dans le sens des fibres, doit être d'au moins 100 mm (4 po). ■ Si les pièces de tissu sont placées côte à côte, le chevauchement n'est pas nécessaire. ■ Température du substrat et température ambiante minimum de 4 °C (39 °F). ■ La température ambiante doit dépasser le point de rosée de 3 °C (6 °F). ■ La température de service maximale est de 50 °C (122 °F). ■ Ne pas diluer avec des solvants. ■ Le produit devient pare vapeur une fois durci. ■ Le béton doit avoir été coulé entre 21 et 28 jours au minimum, selon les conditions de séchage et de mûrissement. ■ Mélanger les rejets et les restes de Sikadur® 330 dans des seaux métalliques, le volume ne devant pas excéder 1 kg (750 mL) [2,2 lb (25 oz liq)]. ■ Protéger le système de renforcement du rayonnement solaire direct. ■ Protéger de la pluie la résine fraîchement appliquée pendant au moins 12 heures. Les calculs de conception doivent être réalisés et certifiés par un ingénieur indépendant dûment qualifié.
Avertissement	SikaWrap® Hex 230C est un tissu non-réactif et complètement mûr. Il ne nécessite donc pas de fiche signalétique. Toutefois, il faut prendre des précautions lors de la manipulation du SikaWrap puisque de la poussière de carbone peut être présente. Il faut porter des gants afin de prévenir les irritations de la peau. Il faut également prendre des précautions lors de la coupe du tissu SikaWrap®, susceptible d'occasionner de la poussière de carbone. L'utilisation d'un appareil approuvé NIOSH bien ajusté est recommandée.
Premiers soins	En cas de contact avec la peau, rincer à l'eau et au savon. En cas de contact avec les yeux, rincer immédiatement et abondamment à l'eau pendant au moins 15 minutes. Consulter un médecin. En cas de problèmes respiratoires, évacuer la victime et lui faire respirer de l'air frais. Retirer les vêtements contaminés et laver avant de les remettre. GARDER HORS DE LA PORTÉE DES ENFANTS POUR USAGE INDUSTRIEL SEULEMENT

Les renseignements et, notamment, les recommandations touchant l'application et l'entretien des produits Sika sont communiqués de bonne foi, sur la base des connaissances et des expériences actuelles de Sika et concernant les produits entreposés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, dans le cadre d'utilisation prévue. Cette pratique, les matériaux, les équipements et les conditions réelles du site peuvent varier de manière substantielle. Par conséquent, Sika n'offre aucune garantie quant à la qualité marchandise ou à la conformité à un usage particulier et décline toute responsabilité relativement aux renseignements, aux recommandations et aux conseils fournis. Les droits réservés des tiers doivent être respectés. Sika accepte toutes les commandes sous réserve de son modèle de paiement et de livraison courantes. Les utilisateurs doivent toujours consulter le plus récent numéro de la Notice technique du produit qu'ils peuvent obtenir sur demande ou en consultant notre site Internet à www.sika.ca.

Sika Canada Inc.	Ontario	Alberta	1-800-833-SIKA www.sika.ca
601 avenue Delmar Pointe-Claire, QC H9R 4A8 Tel : 514-897-2610 Fax : 514-897-3087	6915 Denard Drive Mississauga, ON L5T 1L5 Tel : 905-796-3177 Fax : 905-795-3192	19131-174th Avenue NW Edmonton, AB T5C 1T8 Tel : 780-486-6111 Fax : 780-483-1580	Une compagnie certifiée ISO 9001 Pointe-Claire - SMC certifié ISO 9001

ANNEXE II

FICHE TECHNIQUE – Sika CarboDur Rods

Construction

Fiche technique du produit
Édition 01/2012/-/-
DCC Master Format™ 03 01 30
Sika® CarboDur® Rods

Sika® CarboDur® Rods

Tiges de fibres de carbone pour le renforcement structural

Description	Sika® CarboDur® Rods sont des tiges de polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC), destinées au renforcement des structures de béton, de bois et de maçonnerie. Les tiges sont principalement installées en utilisant la technique Near Surface Mounted (NSM) (installation près de la surface), par insertion dans des rainures effectuées dans le substrat et liées à l'aide de résine époxyde. Les tiges peuvent également servir à ancrer les tissus SikaWrap® au béton ou à l'ouvrage de maçonnerie.																																											
Domaines d'application	■ Renforcement d'armature de moment négatif dans les dalles et les tabliers. ■ Ancrage pour les tissus SikaWrap. ■ Renforcement des murs de maçonnerie. ■ Goujonnage. ■ Protection cathodique. Augmentations de la charge ■ Charges vives accrues dans les entrepôts. ■ Charge accrue sur les dalles de stationnement. ■ Installation de machinerie lourde. ■ Structures soumises à la vibration. ■ Changement de vocation d'un bâtiment. Éléments structuraux endommagés ■ Vieillessement des matériaux de construction. ■ Corrosion de l'armature du béton. ■ Impact de véhicule. ■ Incendie. Améliorations des conditions de service ■ Diminution de la déformation. ■ Diminution de la contrainte dans l'acier d'armature. ■ Diminution de la largeur des fissures. Changement apporté à la structure ■ Élimination de murs ou de colonnes. ■ Élimination de sections de la dalle pour créer des ouvertures. Défauts de conception ou de construction ■ Renforts insuffisants. ■ Épaisseur structurale insuffisante.																																											
Avantages	■ Résistance très élevée. ■ Faible poids. ■ Non-corrosif. ■ Facile à manipuler. ■ Haut module d'élasticité. ■ Supporte la circulation sur la surface (les tiges sont encastrées). ■ Forte résistance de liaisonnement en raison de l'enrobage total. ■ Les tiges sont invisibles après l'installation. ■ Résistance exceptionnelle à la fatigue. ■ Résistance aux alcalis.																																											
Données techniques <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Conditionnement</td> <td style="width: 30%;">Diamètre: 6,35 mm (1/4 po) ; Longueur jusqu'à 250 m 9,52 mm (3/8 po) ; En longueur de 6 m (20 pi)</td> <td style="width: 40%;"></td> </tr> <tr> <td>Couleur</td> <td colspan="2">Noir</td> </tr> <tr> <td>Conservation</td> <td colspan="2">Stable (aucune exposition aux rayons directs du soleil)</td> </tr> <tr> <td>Base</td> <td colspan="2">Polymère renforcé de fibres de carbone avec matrice de résine époxyde</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Propriétés à 23 °C (73 °F) et 50 % H.R.</td> </tr> <tr> <td>Résistance à la traction</td> <td colspan="2">2800 MPa (4.06 x 10⁵ lb/in²)</td> </tr> <tr> <td>Module d'élasticité en traction</td> <td colspan="2">156 000 MPa (22,5 x 10⁵ lb/in²)</td> </tr> <tr> <td>Allongement à la rupture</td> <td colspan="2">1,8 %</td> </tr> <tr> <td>Teneur volumétrique en fibres</td> <td colspan="2">55 %</td> </tr> <tr> <td>Résistance thermique</td> <td colspan="2">> 150 °C (> 300 °F)</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Propriétés physiques</td> </tr> <tr> <td>Diamètre</td> <td>Section transversale</td> <td>Résistance à la traction</td> </tr> <tr> <td>6,35 mm (1/4 po)</td> <td>31,67 mm² (0,06 po²)</td> <td>56,8 kN (12 500 lb)</td> </tr> <tr> <td>9,52 mm (3/8 po)</td> <td>71,25 mm² (0,11 po²)</td> <td>122,3 kN (27 500 lb)</td> </tr> </table>			Conditionnement	Diamètre: 6,35 mm (1/4 po) ; Longueur jusqu'à 250 m 9,52 mm (3/8 po) ; En longueur de 6 m (20 pi)		Couleur	Noir		Conservation	Stable (aucune exposition aux rayons directs du soleil)		Base	Polymère renforcé de fibres de carbone avec matrice de résine époxyde		Propriétés à 23 °C (73 °F) et 50 % H.R.			Résistance à la traction	2800 MPa (4.06 x 10 ⁵ lb/in ²)		Module d'élasticité en traction	156 000 MPa (22,5 x 10 ⁵ lb/in ²)		Allongement à la rupture	1,8 %		Teneur volumétrique en fibres	55 %		Résistance thermique	> 150 °C (> 300 °F)		Propriétés physiques			Diamètre	Section transversale	Résistance à la traction	6,35 mm (1/4 po)	31,67 mm ² (0,06 po ²)	56,8 kN (12 500 lb)	9,52 mm (3/8 po)	71,25 mm ² (0,11 po ²)	122,3 kN (27 500 lb)
Conditionnement	Diamètre: 6,35 mm (1/4 po) ; Longueur jusqu'à 250 m 9,52 mm (3/8 po) ; En longueur de 6 m (20 pi)																																											
Couleur	Noir																																											
Conservation	Stable (aucune exposition aux rayons directs du soleil)																																											
Base	Polymère renforcé de fibres de carbone avec matrice de résine époxyde																																											
Propriétés à 23 °C (73 °F) et 50 % H.R.																																												
Résistance à la traction	2800 MPa (4.06 x 10 ⁵ lb/in ²)																																											
Module d'élasticité en traction	156 000 MPa (22,5 x 10 ⁵ lb/in ²)																																											
Allongement à la rupture	1,8 %																																											
Teneur volumétrique en fibres	55 %																																											
Résistance thermique	> 150 °C (> 300 °F)																																											
Propriétés physiques																																												
Diamètre	Section transversale	Résistance à la traction																																										
6,35 mm (1/4 po)	31,67 mm ² (0,06 po ²)	56,8 kN (12 500 lb)																																										
9,52 mm (3/8 po)	71,25 mm ² (0,11 po ²)	122,3 kN (27 500 lb)																																										

Sika® CarboDur® Rods
03 01 30 - SYSTÈMES DE RENFORCEMENT STRUCTURAL 3-602

ANNEXE III

FICHE TECHNIQUE – Sika CarboShear L

Construction

Fiche technique du produit
Édition 01/2012
DOC Master Format™ 03 01 30
Sika® CarboShear L

Sika® CarboShear L

Élément de renforcement haute performance en PRFC résistant à l'effort de cisaillement

Description
Les éléments Sika® CarboShear L sont utilisés dans le cadre d'un système de renforcement des structures de béton armé à l'effort de cisaillement. Le système est composé de :
• Sika® CarboShear L : Éléments préformés en plastique renforcé de fibre de carbone (PRFC)
• Sikadur® 30 : Adhésif structural pour armature externe en PRFC.
Sika® CarboShear L est un complément du système de renforcement composite Sika® CarboDur®, utilisé pour le renforcement au moment flexionnant. L'efficacité du système Sika® CarboShear L a été vérifiée par des essais grandeur réelle en collaboration avec le laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche EMPA en Suisse.

Domaines d'application
Renforcement contre l'effort de cisaillement dans le cas de :
• Augmentation de charge à la suite de :
• Augmentation des charges d'exploitation de bâtiments et de ponts.
• Changement de vocation du bâtiment.
• Endommagements d'éléments structuraux à la suite de :
• Corrosion des armatures intérieures.
• Impacts de véhicules contre les structures.
• Dommages sur le béton armé causés par le feu.
• Amélioration de l'aptitude au service par :
• Réduction des contraintes sur les armatures.
• Réduction de la taille des fissures et de la fatigue.
• Modification d'éléments structuraux :
• Suppression de murs porteurs, de colonnes ou des sections de dalles pour créer des ouvertures.
Changement de spécifications :
• Mises en conformité aux normes sismiques.
• Changement de philosophie de conception.
Erreurs de conception et de construction telles que :
• Renforcement insuffisant ou inadéquat des armatures.

Avantages
• Faible poids.
• Résistant à la corrosion.
• Haute résistance et durabilité.
• Système d'ancrage ayant fait ses preuves.
• Excellente résistance à la fatigue.
• Profil mince permettant d'être enduit.
• Faible impact sur l'esthétique de la structure ou du bâtiment.

Données techniques

Conditionnement
Coulé en aspect : Soit de 30 éléments ou vendus à l'unité.
Nœud : Éléments en équerres (90°) en PRFC avec matrice époxy. Les deux faces de chaque élément sont recouvertes d'un ruban de protection détachable, exempt d'agent de séparation.
Conservation
Stockage : Stocker au sec et ne pas exposer directement au soleil.
Densité : 1,68 g/cm³ (0,60 lb/pou³)
Température de transition vitreuse : > 80 °C (>190 °F)
Contenu en fibres : > 50 % par volume

Propriétés physiques

Sika® CarboShear L, Sikadur® 30 [†] Dimension des éléments	Consommation	Longueur des branches		Largeur	Épaisseur nominale sans ruban protecteur
		Courte	Longue		
mm (po)		mm (po)	mm (po)	mm (po)	mm (po)
405/50	0,5 kg (1,1 lb)	200 (8)	400 (20)	40 (1,57)	2 (0,079)
405/70	0,6 kg (1,3 lb)	300 (12)	700 (28)	40 (1,57)	2 (0,079)
405/100	0,7 kg (1,5 lb)	500 (20)	1000 (39)	40 (1,57)	2 (0,079)
480/150	1,0 kg (2,2 lb)	800 (32)	1500 (59)	40 (1,57)	2 (0,079)

Les branches peuvent être coupées à la longueur désirée à l'aide d'une scie (de préférence à la scie au ruban) ou d'un couteau. Le rayon intérieur mesure 25 mm (1 po).

[†] La consommation d'adhésif dépend de la taille de la zone d'ancrage, de sa planéité et de sa rugosité. Profondeur de la zone d'ancrage : 150 mm (6 po) (typique).

Résistance ultime à la traction : > 1350 MPa (19,6 x 10³ kgf/cm²)
Module d'élasticité E^{*} : > 90 000 MPa (12,9 x 10³ kgf/cm²)
Allongement à la rupture[†] : > 1,30 %

^{*} Dans les tests longitudinaux des fibres, considérer une épaisseur nominale de 2 mm (0,079").

Les propriétés des produits Sika® doivent être vérifiées par des essais réalisés en laboratoire. Ces propriétés sont des valeurs typiques et ne doivent pas être utilisées pour des applications critiques sans l'approbation écrite du fabricant et des autorités de certification.





Conception La procédure de conception doit être entreprise selon les standards du code du bâtiment canadien, les règles de calcul et de construction des composants contenant des polymères renforcés de fibres établis par les normes CAN/CSA S806-02 et ACI 440.2R-08 ou selon le modèle décrit dans le rapport de test 116/1-2002 de la FEMPA.

Des considérations supplémentaires devraient inclure :

Diagnostic :

Géométrie de la surface, renforcement, planéité de la surface à être renforcée, qualité des matériaux de construction, conditions climatiques et l'utilisation d'un plan de zonage.

Forces d'ancrage :

Zone d'ancrage : La branche la plus longue de l'équerre est ancrée dans la dalle de compression de la structure existante du Sikadur® 30. La longueur d'encastrement a l'influence suivante sur la force d'ancrage :

Longueur d'ancrage mm (po.)	Force d'arrachement* kN (lbf)	Force d'arrachement relative (en % de la charge de rupture)
100 (4)	env. 77 (17210)	env. 60
150 (6)	env. 100 (22480)	env. 80
200 (8)	env. 120 (26977)	env. 95

En sous-face de poutre :

La longueur de recouvrement entre 2 branches de Sika® CarboShear L, collées de part et d'autre de la poutre pour former un « U » influence la charge de rupture :

Longueur de la zone de recouvrement mm (po.)	Force de rupture moyenne* kN (lbf)	Efficacité (En % de la force ultime à la traction)
150 (6)	67 (15062)	53
225 (9)	69 (15511)	55
300 (12)	74 (16635)	59

* Ces chiffres représentent des résultats de tests. Pour des valeurs de calcul, se référer au rapport de test 116/1-2002 de la FEMPA mentionné plus haut.

Une valeur de 45 kN (10116 lbf) par élément de Sika® CarboShear L peut être choisie à titre d'estimation dans le cadre d'une étude de faisabilité.

Mode d'emploi

Préparation de la surface

Décapier la surface en la sablant ou par un autre moyen approuvé pour conférer une texture rugueuse ouverte – conforme à la norme ICRI CSP 5 – des faces latérales et la sous-face de l'âme de la poutre. Enlever les particules non adhérentes et la poussière au moyen d'un aspirateur industriel. Le support doit être propre, exempt de graisse, d'huile et sec (humidité maximale du support : 4 % par poids).

La résistance d'adhérence du béton après la préparation de la surface doit être vérifiée par des essais d'arrachement aléatoires (ACI 508R), à la discrétion de l'ingénieur. Une résistance à la traction moyenne de 2 MPa (290 psi)* et une résistance à la traction minimale de 1,5 MPa (216 psi)* avec rupture du substrat de béton est requise avant de procéder aux travaux.

La planéité de la surface est vérifiée au moyen d'une règle métallique. Une tolérance maximale de 2,5 mm (0,098 po) sous la règle pour une longueur de 500 mm (1,94 pi) est admise. En cas d'irrégularités plus importantes, il est impératif de procéder à un resablage de la surface à l'aide d'un mélange d'adhésif structural Sikadur® 30 et sable de silice propre, séché au four (rapport de mélange de 1 : 1 par volume).

L'arête de l'élément structural (où vendra se loger le coude de l'équerre) doit être abattue ou arrondie à la mesure du rayon intérieur de 25 mm (1 po) de l'élément Sika® CarboShear L. Cette opération peut être effectuée à la meuleuse à disque.

Préparation de l'adhésif Sikadur® 30

Consulter la fiche technique du Sikadur® 30 pour les informations concernant la préparation, le mélange et l'application du produit.

Préparation du Sika® CarboShear L

Le ruban adhésif de protection sur les deux faces des éléments Sika® CarboShear L doit être soigneusement enlevé jusqu'à la ligne de coupe. S'assurer que le profil soit propre, exempt de particules non adhérentes et de tout autre contaminant.

Les éléments Sika® CarboShear L peuvent alors être coupés à la longueur désirée (préférentiellement à l'aide d'une scie à disque diamant).

Le jour précédant l'installation, les surfaces des éléments en PRFC doivent être nettoyées avec un linge blanc propre, ne faisant pas de peluches et imbibé d'acétone jusqu'à l'enlèvement complet de la poussière de carbone et de colle (le linge blanc doit rester blanc après avoir essuyé la surface).

L'extrémité devant être ancrée sera enduite d'une couche d'adhésif Sikadur® 30 sur les deux faces, à la longueur voulue avec une marge supplémentaire de 10 mm (3/8 po). L'application de l'adhésif se fera à l'aide d'une brosse dentelée de 5 mm (3/16 po) de manière à former des rainures transversales au sein de la fibre.

ANNEXE IV

FICHE TECHNIQUE – Sika AnchorFix

Construction

Fiche technique du produit
 Édition 01/2012 (v1)
 DCC Master Format® 07 92 16
 Sika® AnchorFix®-3^{CA}/Sika® AnchorFix®-4^{CA}

Sika® AnchorFix®-3^{CA}/Sika® AnchorFix®-4^{CA}

Gels d'ancrage multiusages, injectables et non-affaissant

Description	Sika® AnchorFix®-3 ^{CA} et Sika® AnchorFix®-4 ^{CA} sont des gels d'ancrage époxydés à deux composants structuraux à haut module et haute résistance. Ils ne contiennent aucun solvant et sont insensibles à l'humidité. Grâce à leur texture non-abrative, ils se prêtent aux applications par pontage ou par injection sous pression.																																																													
Domaines d'application	- Injection d'ancrages d'équipements mécaniques (boulons, goujons, siges, attaches spéciales, lièges de machine fixe et automatiques, plaques d'appui, etc.). - Imperméabilisation de tunnels, chambres de câbles, réservoirs, vases-sûcs, etc. - Ré-ancrage de passages de maçonnerie. - Régénération de membranes en bois. - Détention préventif - Injection de fissures importantes se produisant dans les structures neuves ou existantes afin d'éviter l'acier d'armature des éléments corrodés. - Sceller les fissures et fuir les tubes à injection. - Injection sous pression de fissures dans le béton structural. - Collage des surfaces irrégulières. - Scellant «Fibre Profonde».																																																													
Avantages	- S'emploient dans les lieux humides et humides. - Insensibles à l'humidité avant, pendant et après le durcissement. - S'emploient dans les zones soumises aux vibrations dues aux intempéries. - Résistants aux cycles de gel-dégel. - Faible odeur. - Se prêtent à l'injection sous pression automatisée grâce à leur texture unique non-abrative. - Excellente adhérence à la maçonnerie, au béton, au bois, à l'acier et à la plupart des matériaux structuraux. - Consistance en pâte convenant parfaitement aux applications verticales ou en surplomb. - Adhésifs à prise rapide et résistants. - Faciles à mélanger - rapport de 1:1. - Excellent pouvoir lubrifiant - pénétration en profondeur. - Approuvé par l'Agence canadienne d'inspection des aliments. - Sika® AnchorFix®-3^{CA} : ANS/NSF 61 approuvé pour contact avec l'eau potable. - Sika® AnchorFix®-3^{CA} : conforme à la norme ASTM C881, types I, II, III, IV, grade 3, classes A, B et C. - Sika® AnchorFix®-3^{CA} : agréé par le ministère des Transports de l'Ontario. - Sika® AnchorFix®-4^{CA} : conforme à la norme ASTM C881, types I, II, IV et V, grade 3, classes B et C. - Sika® AnchorFix®-3^{CA} et Sika® AnchorFix®-4^{CA} : agréés par le Ministère des Transports du Québec. - Sika® AnchorFix®-3^{CA} et Sika® AnchorFix®-4^{CA} : satisfont également aux normes ICCA pour l'utilisation dans les lieux de transformation des produits alimentaires. - Sika® AnchorFix®-3^{CA} et Sika® AnchorFix®-4^{CA} : rencontrent les normes du C.O.M., les exigences du ICC-10-AC08 (Sec. 5.3.3). - Sika® AnchorFix®-3^{CA} et Sika® AnchorFix®-4^{CA} : ASTM E1512 (Sec. 7.3 & 7.5) pour l'essai de Rupe à température élevée.																																																													
Données techniques	<table border="1"> <tr> <td>Conditionnement</td> <td>Sika® AnchorFix®-3^{CA}</td> <td>Sika® AnchorFix®-4^{CA}</td> </tr> <tr> <td></td> <td>cartouche de 500 mL (20 oz) (kg) US</td> <td>cartouche de 250 mL (8.45 oz) (kg) US</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Sika® AnchorFix®-4^{CA}</td> <td>cartouche de 500 mL (20 oz) (kg) US</td> </tr> <tr> <td>Couleur</td> <td colspan="2">Composant A : blanc Composant B : gris</td> </tr> <tr> <td>Conservation</td> <td colspan="2">3 ans dans son emballage d'origine, non-ouvert. Stocker entre 5 et 35 °C (45 et 95 °F). Conditionner le produit à 23 °C (73 °F) avant de l'utiliser. Par temps froid (en deçà de 21 °C/70 °F), amener lentement la température du produit entre 15 et 30 °C (55 et 85 °F) pour faciliter l'application du produit.</td> </tr> <tr> <td>Rapport de mélange</td> <td colspan="2">6,6 : 1,1 par volume</td> </tr> <tr> <td>Propriétés à 23 °C (73 °F) et 50 % R.H.</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Temps de gélification (60 g)</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Sika® AnchorFix®-3^{CA}</td> <td colspan="2">6 - 8 min</td> </tr> <tr> <td>Sika® AnchorFix®-4^{CA}</td> <td colspan="2">25 min</td> </tr> <tr> <td>Temps de polymérisation*</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Sika® AnchorFix®-3^{CA}</td> <td colspan="2">2 h</td> </tr> <tr> <td>Sika® AnchorFix®-4^{CA}</td> <td colspan="2">8 - 10 h</td> </tr> <tr> <td colspan="3">* Le temps de durcissement varie selon la température ambiante et la classe de l'adhésif. L'obtention de la fissure doit avoir complètement durci avant de commencer les travaux d'ajout.</td> </tr> <tr> <td>Résistance de cisaillement ASTM C881</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>2 jours</td> <td>20 MPa (2914 lbpsi)</td> <td>15 MPa (2175 lbpsi)</td> </tr> <tr> <td>14 jours</td> <td>21 MPa (3019 lbpsi)</td> <td>17 MPa (2465 lbpsi)</td> </tr> <tr> <td>Absorption ASTM D1176</td> <td>0,41 %</td> <td>0,82 %</td> </tr> <tr> <td>Température de flexionnement ASTM D648</td> <td>94,7 °C (192,4 °F)</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Coefficient de retrait linéaire ASTM D2148</td> <td>0,001</td> <td>0,001</td> </tr> </table>		Conditionnement	Sika® AnchorFix®-3 ^{CA}	Sika® AnchorFix®-4 ^{CA}		cartouche de 500 mL (20 oz) (kg) US	cartouche de 250 mL (8.45 oz) (kg) US		Sika® AnchorFix®-4 ^{CA}	cartouche de 500 mL (20 oz) (kg) US	Couleur	Composant A : blanc Composant B : gris		Conservation	3 ans dans son emballage d'origine, non-ouvert. Stocker entre 5 et 35 °C (45 et 95 °F). Conditionner le produit à 23 °C (73 °F) avant de l'utiliser. Par temps froid (en deçà de 21 °C/70 °F), amener lentement la température du produit entre 15 et 30 °C (55 et 85 °F) pour faciliter l'application du produit.		Rapport de mélange	6,6 : 1,1 par volume		Propriétés à 23 °C (73 °F) et 50 % R.H.			Temps de gélification (60 g)			Sika® AnchorFix®-3 ^{CA}	6 - 8 min		Sika® AnchorFix®-4 ^{CA}	25 min		Temps de polymérisation*			Sika® AnchorFix®-3 ^{CA}	2 h		Sika® AnchorFix®-4 ^{CA}	8 - 10 h		* Le temps de durcissement varie selon la température ambiante et la classe de l'adhésif. L'obtention de la fissure doit avoir complètement durci avant de commencer les travaux d'ajout.			Résistance de cisaillement ASTM C881			2 jours	20 MPa (2914 lbpsi)	15 MPa (2175 lbpsi)	14 jours	21 MPa (3019 lbpsi)	17 MPa (2465 lbpsi)	Absorption ASTM D1176	0,41 %	0,82 %	Température de flexionnement ASTM D648	94,7 °C (192,4 °F)	-	Coefficient de retrait linéaire ASTM D2148	0,001	0,001
Conditionnement	Sika® AnchorFix®-3 ^{CA}	Sika® AnchorFix®-4 ^{CA}																																																												
	cartouche de 500 mL (20 oz) (kg) US	cartouche de 250 mL (8.45 oz) (kg) US																																																												
	Sika® AnchorFix®-4 ^{CA}	cartouche de 500 mL (20 oz) (kg) US																																																												
Couleur	Composant A : blanc Composant B : gris																																																													
Conservation	3 ans dans son emballage d'origine, non-ouvert. Stocker entre 5 et 35 °C (45 et 95 °F). Conditionner le produit à 23 °C (73 °F) avant de l'utiliser. Par temps froid (en deçà de 21 °C/70 °F), amener lentement la température du produit entre 15 et 30 °C (55 et 85 °F) pour faciliter l'application du produit.																																																													
Rapport de mélange	6,6 : 1,1 par volume																																																													
Propriétés à 23 °C (73 °F) et 50 % R.H.																																																														
Temps de gélification (60 g)																																																														
Sika® AnchorFix®-3 ^{CA}	6 - 8 min																																																													
Sika® AnchorFix®-4 ^{CA}	25 min																																																													
Temps de polymérisation*																																																														
Sika® AnchorFix®-3 ^{CA}	2 h																																																													
Sika® AnchorFix®-4 ^{CA}	8 - 10 h																																																													
* Le temps de durcissement varie selon la température ambiante et la classe de l'adhésif. L'obtention de la fissure doit avoir complètement durci avant de commencer les travaux d'ajout.																																																														
Résistance de cisaillement ASTM C881																																																														
2 jours	20 MPa (2914 lbpsi)	15 MPa (2175 lbpsi)																																																												
14 jours	21 MPa (3019 lbpsi)	17 MPa (2465 lbpsi)																																																												
Absorption ASTM D1176	0,41 %	0,82 %																																																												
Température de flexionnement ASTM D648	94,7 °C (192,4 °F)	-																																																												
Coefficient de retrait linéaire ASTM D2148	0,001	0,001																																																												

Sika® AnchorFix®-3^{CA}/Sika® AnchorFix®-4^{CA}
 07 92 16 SCÉLLANTS POUR JOINTS RIGIDES

7-260

	Sika® AnchorFix®-3	Sika® AnchorFix®-4
Résistance à la compression		
ASTM D155	75 MPa (10 800 lbpsi)	77,8 MPa (11 220 lbpsi)
Module d'élasticité en compression		
ASTM D155	3455 MPa (500 720 lbpsi)	1125 MPa (160 500 lbpsi)
Déplacement à la rupture ASTM D155	1 %	2,56 %
Résistance au cisaillement ASTM D155	-	24,5 MPa (3500 lbpsi)
Résistance à la traction ASTM D155	-	35,8 MPa (5142 lbpsi)

Les caractéristiques techniques indiquées ci-dessus sont des valeurs moyennes obtenues en laboratoire. Elles ne constituent pas une garantie de performance. Elles sont données à titre indicatif et ne doivent pas être utilisées pour des calculs de dimensionnement. Elles sont données à titre indicatif et ne doivent pas être utilisées pour des calculs de dimensionnement.

Mode d'emploi

Préparation de la surface

La surface doit être saine et sèche. Elle peut être affectée par l'humidité, mais sans être stagnante. Éliminer la poussière, la saleté, la graisse, les agents de corrosion, les agents d'oxydation, le sel, les huiles étrangères et les substances désagréables.

Attention : Gelée ou autre méthode mécanique appropriée.

Adhérer : Collage jusqu'à l'obtention d'un aspect blanc (DIP 10).

Malaxage

Construire : Sika® AnchorFix®-3 et Sika® AnchorFix®-4 s'emploient facilement en cartouches, ce qui élimine les opérations de dosage et de malaxage.

Ratier les embouts D de la plus petite extrémité de la cartouche et la charger dans un applicateur approprié. Plier la cartouche jusqu'à ce que les deux composants soient de l'applicateur parfaitement mélangés. Cette méthode assure la qualité du matériau et évite tout blocage dans le mélangeur statique tout en facilitant l'application.

Vidier le mélangeur statique d'un pas de vis mélangé à la cartouche. Pour une application plus aisée, l'extrémité du mélangeur statique peut être remplie jusqu'à la troisième anse.

Placer la cartouche équipée du mélangeur dans un applicateur pneumatique ou manuel approprié. Extruder l'adhésif jusqu'à l'obtention d'une couleur uniforme grise. Ne pas utiliser l'apport de des bandes de couleur sont présentes dans le mélange.

Appliquer en exerçant une pression constante. En cas d'interruption des travaux, répéter cette dernière opération (extrusion de l'adhésif) jusqu'à l'obtention d'un mélange gris et uniforme avant de reprendre l'application. Lorsqu'un applicateur manuel est utilisé, relâcher la pression en appuyant sur le bouton-poussoir lors de chaque arrêt d'application. Sinon, il faudra extruder de l'adhésif jusqu'à l'obtention d'une couleur uniforme grise avant de continuer les opérations.

Application

Ancrage des boulons, des goujons et des tiges

1. Percer les trous selon le diamètre et le profondeur voulus.
2. Nettoyer les trous avec une brosse de nylon.
3. Purger avec de l'air comprimé (sans huile), en commençant au fond du trou et en procédant vers son ouverture.
4. Une fois que le contenu de l'adhésif est uniforme, insérer le mélangeur statique au fond du trou. Extruder l'adhésif tout en retirant le mélangeur statique et en l'insérant dans le trou est rempli à moitié. Toucher légèrement le bouchon en insérant dans le trou. Le vide annulaire ne doit pas dépasser 1,5 mm (1/16 po).

Scellement des orifices et des fissures

Sélectivement, Sika® AnchorFix®-3 et Sika® AnchorFix®-4, selon le temps de gelation désiré. Choisir Sika® AnchorFix®-3 pour les applications qui nécessitent un temps plus long ou pour un traitement rapide des orifices d'injection. Le temps d'emploi de Sika® AnchorFix®-4 est plus long. Appliquez une petite quantité d'époxide sur la surface du tube d'injection en contact avec le fissure en retirant le tube avec soin. S'assurer de ne pas appliquer une trop grande quantité d'époxide au fond de l'orifice d'injection, cela risquerait d'obstruer le tube. Utiliser un vilebriquet ou un bouchon. Après l'installation des tubes et des que l'adhésif a durci, enduire d'époxide les épaulements des tubes d'injection et sur 15 mm (1/2 po) de part et d'autre de la fissure. Couvrir la zone en place de l'adhésif sur la fissure entre les tubes d'injection. Pour éviter les fuites sous pression, isoler l'adhésif en couches de 5 mm (1/4 po) d'épaisseur. Ne pas utiliser l'adhésif ou il commencer à sécher à chauffer ou à devenir collant, cela compromettrait la qualité des travaux et causerait des fuites. Laisser sécher. Le temps de durcissement varie en fonction de la température ambiante et de la masse appliquée. L'obtention de la fissure doit avoir complètement séché avant de commencer les travaux d'injection.

Collage des surfaces irrégulières

Appliquez Sika® AnchorFix®-3 ou Sika® AnchorFix®-4 mélangé aux substrats préparés. Faire pénétrer dans le substrat pour assurer une adhérence effective. Remplir les surfaces collées jusqu'à durcissement de l'adhésif. L'épaisseur de l'adhésif ne doit pas dépasser 3 mm (1/8 po).

Matériel d'application recommandé (à privilégier) :

Pour les cartouches de 250 ml : Applicateur manuel Cox, modèle A200.
Pour les cartouches de 600 ml : Applicateur pneumatique Cox, modèle PPA 300 ou PPA 300x (manuel).

Pour une application optimale – et dans la mesure du possible – l'utilisation d'applicateurs pneumatiques est préférable. Tous les applicateurs devraient avoir un multiplicateur de 25 :1.

Mûrissement

En général, il faut compter au moins 2 heures pour Sika® AnchorFix®-3 et de 4 à 6 heures pour Sika® AnchorFix®-4 pour un mûrissement complet à 22 °C (72 °F).

Nettoyage

Ramasser avec un matériau absorbant. Éliminer les déchets conformément aux règlements municipaux. Le produit non durci s'élève avec Sika® Equipment Cleaner. Le produit durci ne peut être enlevé que mécaniquement.

Restrictions

- Sika® AnchorFix®-3 et Sika® AnchorFix®-4 sont des résines pures et doivent, par conséquent, être conditionnées à des températures appropriées (se référer au tableau des Données techniques), surtout par temps froids, ce qui aura pour effet de faciliter l'application du produit au pressur.
- Température minimale du substrat : 5 °C (40 °F).
- Age minimum du béton : 2 à 7 jours, selon les conditions de mûrissement.
- Ne pas diluer car les soléants empêcheront le produit de mûrir convenablement.
- Ne pas verser le contenu d'époxide mélange dans le mélangeur statique de la mélangeur pendant plus de 5 minutes car le produit risque de gélifier et de bloquer le matériel.
- Sika® AnchorFix®-3 et Sika® AnchorFix®-4 jouent le rôle de pare-vapeur après mûrissement.

Santé et sécurité

Pour plus de renseignements et conseils relatifs à la manipulation, l'emballage et l'élimination des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter les fiches signalétiques les plus récentes du produit contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données portant sur la sécurité.

GARDER HORS DE LA PORTÉE DES ENFANTS
POUR USAGE INDUSTRIEL SEULEMENT



1 - VALEURS ADMISSIBLES EN TRACTION - TIGES FILTRES DANS UN BÉTON DE CONSISTENCE NORMALE*									
Diamètre de l'ancrage (mm)	Diamètre de la barre (mm)	Profondeur d'encastrement (mm)	Résistance admissible d'arrachement (N)				Résistance admissible de l'acier (N)		
			2000 kg/cm ²	2500 kg/cm ²	3000 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	A242CST	A102 ST	ASTA/R20a
30	10	100	1000	1250	1500	1750	2100	4350	3800
35	12	120	1200	1500	1800	2100	2550	4950	4350
40	14	140	1400	1750	2100	2450	2950	5650	4950
45	16	160	1600	2000	2400	2800	3350	6450	5650
50	18	180	1800	2250	2700	3150	3800	7250	6450
55	20	200	2000	2500	3000	3500	4200	8100	7250
60	22	220	2200	2750	3300	3850	4600	8950	8100
65	24	240	2400	3000	3600	4200	5000	9800	8950
70	26	260	2600	3250	3900	4550	5400	10650	9800
75	28	280	2800	3500	4200	4900	5800	11500	10650
80	30	300	3000	3750	4500	5250	6200	12350	11500
85	32	320	3200	4000	4800	5600	6600	13200	12350
90	34	340	3400	4250	5100	5950	7000	14050	13200
95	36	360	3600	4500	5400	6300	7400	14900	14050
100	38	380	3800	4750	5700	6650	7800	15750	14900

2 - VALEURS ADMISSIBLES EN CHAÎLLEMENT - TIGES FILTRES DANS BÉTON DE 2000 kg/cm ²									
Diamètre de l'ancrage (mm)	Diamètre de la barre (mm)	Profondeur d'encastrement (mm)	Résistance admissible d'arrachement (N)				Résistance admissible de l'acier (N)		
			2000 kg/cm ²	2500 kg/cm ²	3000 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	A242CST	A102 ST	ASTA/R20a
30	10	100	1000	1250	1500	1750	2100	4350	3800
35	12	120	1200	1500	1800	2100	2550	4950	4350
40	14	140	1400	1750	2100	2450	2950	5650	4950
45	16	160	1600	2000	2400	2800	3350	6450	5650
50	18	180	1800	2250	2700	3150	3800	7250	6450
55	20	200	2000	2500	3000	3500	4200	8100	7250
60	22	220	2200	2750	3300	3850	4600	8950	8100
65	24	240	2400	3000	3600	4200	5000	9800	8950
70	26	260	2600	3250	3900	4550	5400	10650	9800
75	28	280	2800	3500	4200	4900	5800	11500	10650
80	30	300	3000	3750	4500	5250	6200	12350	11500
85	32	320	3200	4000	4800	5600	6600	13200	12350
90	34	340	3400	4250	5100	5950	7000	14050	13200
95	36	360	3600	4500	5400	6300	7400	14900	14050
100	38	380	3800	4750	5700	6650	7800	15750	14900

3 - VALEURS DE CHAÎLLEMENT ET DE TRACTION - ACIER D'ARMATURE*									
Diamètre de l'ancrage (mm)	Diamètre de la barre (mm)	Profondeur d'encastrement (mm)	Résistance admissible d'arrachement (N)				Résistance admissible de l'acier (N)		
			2000 kg/cm ²	2500 kg/cm ²	3000 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	A242CST	A102 ST	ASTA/R20a
30	10	100	1000	1250	1500	1750	2100	4350	3800
35	12	120	1200	1500	1800	2100	2550	4950	4350
40	14	140	1400	1750	2100	2450	2950	5650	4950
45	16	160	1600	2000	2400	2800	3350	6450	5650
50	18	180	1800	2250	2700	3150	3800	7250	6450
55	20	200	2000	2500	3000	3500	4200	8100	7250
60	22	220	2200	2750	3300	3850	4600	8950	8100
65	24	240	2400	3000	3600	4200	5000	9800	8950
70	26	260	2600	3250	3900	4550	5400	10650	9800
75	28	280	2800	3500	4200	4900	5800	11500	10650
80	30	300	3000	3750	4500	5250	6200	12350	11500
85	32	320	3200	4000	4800	5600	6600	13200	12350
90	34	340	3400	4250	5100	5950	7000	14050	13200
95	36	360	3600	4500	5400	6300	7400	14900	14050
100	38	380	3800	4750	5700	6650	7800	15750	14900

4 - VALEURS DE CHAÎLLEMENT ET DE TRACTION - COLONNES BÉTON*									
Diamètre de l'ancrage (mm)	Diamètre de la barre (mm)	Profondeur d'encastrement (mm)	Résistance admissible d'arrachement (N)				Résistance admissible de l'acier (N)		
			2000 kg/cm ²	2500 kg/cm ²	3000 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	A242CST	A102 ST	ASTA/R20a
30	10	100	1000	1250	1500	1750	2100	4350	3800
35	12	120	1200	1500	1800	2100	2550	4950	4350
40	14	140	1400	1750	2100	2450	2950	5650	4950
45	16	160	1600	2000	2400	2800	3350	6450	5650
50	18	180	1800	2250	2700	3150	3800	7250	6450
55	20	200	2000	2500	3000	3500	4200	8100	7250
60	22	220	2200	2750	3300	3850	4600	8950	8100
65	24	240	2400	3000	3600	4200	5000	9800	8950
70	26	260	2600	3250	3900	4550	5400	10650	9800
75	28	280	2800	3500	4200	4900	5800	11500	10650
80	30	300	3000	3750	4500	5250	6200	12350	11500
85	32	320	3200	4000	4800	5600	6600	13200	12350
90	34	340	3400	4250	5100	5950	7000	14050	13200
95	36	360	3600	4500	5400	6300	7400	14900	14050
100	38	380	3800	4750	5700	6650	7800	15750	14900

5 - ESPACEMENT DES ANCRAGES ET DISTANCE DE RIVE ADMISSIBLE*									
Diamètre de l'ancrage (mm)	Diamètre de la barre (mm)	Profondeur d'encastrement (mm)	Espacement des ancrages (mm)				Facteur de réduction		
			2000 kg/cm ²	2500 kg/cm ²	3000 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	A242CST	A102 ST	ASTA/R20a
30	10	100	1000	1250	1500	1750	2100	4350	3800
35	12	120	1200	1500	1800	2100	2550	4950	4350
40	14	140	1400	1750	2100	2450	2950	5650	4950
45	16	160	1600	2000	2400	2800	3350	6450	5650
50	18	180	1800	2250	2700	3150	3800	7250	6450
55	20	200	2000	2500	3000	3500	4200	8100	7250
60	22	220	2200	2750	3300	3850	4600	8950	8100
65	24	240	2400	3000	3600	4200	5000	9800	8950
70	26	260	2600	3250	3900	4550	5400	10650	9800
75	28	280	2800	3500	4200	4900	5800	11500	10650
80	30	300	3000	3750	4500	5250	6200	12350	11500
85	32	320	3200	4000	4800	5600	6600	13200	12350
90	34	340	3400	4250	5100	5950	7000	14050	13200
95	36	360	3600	4500	5400	6300	7400	14900	14050
100	38	380	3800	4750	5700	6650	7800	15750	14900

6 - DISTANCE DE RIVE MINIMALE POUR LES CHARGES DE TRACTION - ANCRAGES DANS LE BÉTON*									
Diamètre de l'ancrage (mm)	Diamètre de la barre (mm)	Profondeur d'encastrement (mm)	Distance de rive minimale (mm)				Facteur de réduction		
			2000 kg/cm ²	2500 kg/cm ²	3000 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	A242CST	A102 ST	ASTA/R20a
30	10	100	1000	1250	1500	1750	2100	4350	3800
35	12	120	1200	1500	1800	2100	2550	4950	4350
40	14	140	1400	1750	2100	2450	2950	5650	4950
45	16	160	1600	2000	2400	2800	3350	6450	5650
50	18	180	1800	2250	2700	3150	3800	7250	6450
55	20	200	2000	2500	3000	3500	4200	8100	7250
60	22	220	2200	2750	3300	3850	4600	8950	8100
65	24	240	2400	3000	3600	4200	5000	9800	8950
70	26	260	2600	3250	3900	4550	5400	10650	9800
75	28	280	2800	3500	4200	4900	5800	11500	10650
80	30	300	3000	3750	4500	5250	6200	12350	11500
85	32	320	3200	4000	4800	5600	6600	13200	12350
90	34	340	3400	4250	5100	5950	7000	14050	13200
95	36	360	3600	4500	5400	6300	7400	14900	14050
100	38	380	3800	4750	5700	6650	7800	15750	14900

TEMPS DE MURISSAGE*									
Température ambiante de la surface (°C)	Température ambiante de l'air (°C)	Température ambiante de l'eau (°C)	Temps de murissage (min)				Facteur de réduction		
			2000 kg/cm ²	2500 kg/cm ²	3000 kg/cm ²	3500 kg/cm ²	A242CST	A102 ST	ASTA/R20a
10 °C	10 °C	10 °C	1000	1250	1500	1750	2100	4350	3800
15 °C	15 °C	15 °C	1200	1500	1800	2100	2550	4950	4350
20 °C	20 °C	20 °C	1400	1750	2100	2450	2950	5650	4950
25 °C	25 °C	25 °C	1600	2000	2400	2800	3350	6450	5650
30 °C	30 °C	30 °C	1800	2250	2700	3150	3800	7250	6450
35 °C	35 °C	35 °C	2000	2500	3000	3500	4200	8100	7250
40 °C	40 °C	40 °C	2200	2750	3300	3850	4600	8950	8100
45 °C	45 °C	45 °C	2400	3000	3600	4200	5000	9800	8950
50 °C	50 °C	50 °C	2600	3250	3900	4550	5400	10650	9800
55 °C	55 °C	55 °C	2800	3500	4200	4900	5800	11500	10650
60 °C	60 °C	60 °C	3000	3750	4500	5250	6200	12350	11500

* Voir les annexes à cette réglementation.

* Les valeurs indiquées dans ce tableau sont des valeurs moyennes. Elles peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes. Ils peuvent varier en fonction des conditions de réalisation.

* Les temps de murissage sont des valeurs moyennes.

ANNEXE V

FICHE TECHNIQUE – Sikadur 30

Construction

Fiche technique du produit
 Édition 06.2015 (A)
 DOC Master Formis™ 03 01 30
 Sikadur® 30

Sikadur® 30

Adhésif époxyde structural en pâte, haute résistance, de module élevé à utiliser avec le système de renforcement structural Sika® CarboDur®

Description	Sikadur® 30 est un adhésif époxyde structural en pâte, à haute résistance, de module élevé, à deux composants et 100 % de solides. Conforme aux normes ASTM C881 et AASHTO M-235.
Domaines d'application	■ Pour coller des éléments de renfort externes au béton, à la maçonnerie, à l'acier, au bois, à la pierre, etc. ■ Collage structural des lamelles composites (Sika® CarboDur® CPFC) au béton, maçonnerie et bois de construction. ■ Collage structural de plaques d'acier au béton. ■ Convient aux applications verticales et au plafond. ■ Adhésif structural époxyde polyvalent, haute résistance, en pâte. ■ Liant pour les réparations au mortier époxyde. ■ Conçu pour être utilisé à des températures entre 5 et 35 °C (40 et 95 °F).
Avantages	■ Longue vie en pot et de mise en œuvre. ■ Tolérant à l'humidité avant, pendant et après durcissement. ■ Adhésif structural en pâte, haute résistance et module élevé. ■ Excellente adhérence au béton, à la maçonnerie, aux métaux, au bois et à la plupart des matériaux structuraux. ■ Entièrement compatible et excellente adhérence aux lamelles composites Sika® CarboDur® CPFC. ■ La consistance pâteuse est idéale pour applications verticales et au plafond. ■ Résistance élevée au fluage sous charge permanente. ■ Résistance élevée à l'abrasion et aux chocs. ■ Rapport de mélange pratique A:B = 3:1 par poids. ■ Sans solvant. ■ Composants de couleur différente pour assurer un contrôle approprié du mélange. ■ Approuvé par l'Agence canadienne d'inspection des aliments. ■ Approuvé par le Ministère des Transports au Québec.

Données techniques

Emballage	Unité de 6 kg (2.6 L)	
Conteneur	Composant A	Blanc
	Composant B	Noir
	Composants A+B	Couleur pâte
Consommation	Sikadur® 30	
Type de lamelle	kg/mètre linéaire	
3512/H514	0.30	(0.005)
0512/0514/M514	0.36	(0.024)
3912	0.49	(0.32)
0914/M914	0.54	(0.36)
01012	0.60	(0.40)
01212/01214/M1214	0.72	(0.48)
01512	0.90	(0.60)

Le rendement est basé sur une épaisseur théorique de 3 mm (1/8 po) et ne tient pas compte de nettoyage, la rugosité du substrat ainsi que des crochets de lamelles. La consommation réelle de l'adhésif sera alors supérieure.

Conservation

7 ans dans son emballage d'origine, non-ouvert. Entreposer au sec entre 5 et 32 °C (41 et 89 °F). Conditionner le produit entre 15 et 24 °C (59 et 75 °F) avant de l'utiliser.

Ratio de mélange

A:B = 3:1 par poids et par volume

Propriétés à 23 °C (73 °F) et 50 % R.H.

Densité relative (A+B)

1.85 kg/L (14.0 lb/gal US)

Vie en pot (20 °C (68 °F))

Environ 1 h 30 min

Temps ouvert

Environ 1 h 30 min

Propriétés en traction ASTM D638

7 jours

Résistance à la traction: 24.8 MPa (3558 psi)
 Allongement à la rupture: 1 %
 Module d'élasticité: 4.5 GPa (65.3 x 10³ psi)

Propriétés en flexion ASTM D790

14 jours

Module de rupture: 46.8 MPa (6790 psi)
 Module d'élasticité tangent en flexion: 11.7 GPa (17.0 x 10³ psi)

Sikadur® 30
 03 01 30 - SYSTÈMES DE RENFORCEMENT STRUCTURAL
 3-605

**Résistance au cisaillement ASTM D733**18 jours, immergé à 15 °C (59 °F) 15 MPa (2175 lb/po²)14 jours, immergé à 35 °C (95 °F) 17 MPa (2465 lb/po²)**Résistance d'adhérence ASTM C882**

Béton dur à béton dur

2 jours, Moussement humide 18,6 MPa (2689 lb/po²)2 jours, Moussement sec 22 MPa (3182 lb/po²)14 jours, Moussement humide 21,3 MPa (3081 lb/po²)

Béton dur à l'acier

2 jours, Moussement humide 17,9 MPa (2567 lb/po²)2 jours, Moussement sec 20,6 MPa (2989 lb/po²)14 jours, Moussement humide 17,9 MPa (2567 lb/po²)**Températures de déflexion ASTM D644**

7 jours, immergé à 15 °C (59 °F) Effort élastique = 30 °C (86 °F)

7 jours, immergé à 35 °C (95 °F) 1,8 MPa (264 lb/po²) 53 °C (127 °F)**Absorption d'eau ASTM D670**

24 h 0,03 %

Résistance à la compression ASTM D690, MPa (lb/po²)

5 °C (41 °F) 23 °C (73 °F) 32 °C (90 °F)

4 h - - 37,8 (5488)

8 h - 24,1 (3437) 46,2 (6703)

16 h - 46,2 (6703) 51 (7400)

1 jour 6,1 (740) 53,7 (7782) 53,1 (7782)

3 jours 43,8 (6300) 57,2 (8300) 57,2 (8300)

7 jours 55,1 (7986) 59,3 (8604) 59,3 (8604)

14 jours 58,9 (8552) 59,3 (8604) 61,3 (8844)

28 jours 59,8 (8652) 59,3 (8604) 62 (8996)

*Produit (m) et mps à l'essai aux températures indiquées

Module d'elasticité ASTM D6907 jours 2,69 GPa (39,0 x10³ lb/po²)Coefficient de dilatation thermique 6 x 10⁻⁶ (dilatation des températures : 15 à 40 °C / 59 à 104 °F)**Mode d'emploi****Préparation de la surface**

La surface sera propre et saine. Elle peut être sèche ou humide, mais exempte d'eau stagnante ou givré. Enlever la poussière, l'huile, la graisse, les agents de moussage, les produits d'impregnation, les résidus, les particules étrangères, les matériaux désagrégés et autres matériaux susceptibles de nuire à l'adhérence. Boucher les surfaces irrégulières avec un mortier approprié (ex. Sikadur® 30 additionné de 1 partie de sable de silice). Vérifier la résistance d'adhérence du béton après la prestation de la surface, par essai d'arrachement statique (ACI 508R) à la disposition de l'ingénieur. Résistance à la traction minimale de 1,5 MPa (218 lb/po²) avec l'acier du substrat en béton.

La préparation du substrat doit être vérifiée avec une latte métallique. La règle pour 2 m (6,5 pi) de longueur est 10 mm (3/8 po) ou respectivement 2,5 mm (3/32 po) pour 50 cm (20 po) de longueur.

Béton - Décaper la surface en la saillant ou par un autre moyen approuvé pour procurer une texture rugueuse ouverte. (CSP 3)

Acier - Sabler la surface jusqu'au métal blanc.

Bois - Préparer par sablage ou ponçage. Après la préparation, éliminer toute la poussière de la surface avec un aspirateur industriel.

CarboDur® - La surface doit être essuyée avec un solvant approprié. Essuyer le côté (non étiqueté) qui recevra l'adhésif avec un linge blanc propre imbibé d'acétone jusqu'à l'entièrement complet de la poussière de carbone (le linge blanc reste blanc après avoir essuyé la lamelle). Dans les cas de superposition de lamelles, le côté identifié de la lamelle devant être sablé (papier d'émou type 180) et nettoyé légèrement, comme indiqué ci-dessous, avant l'application de la seconde bande.

Mélange

Prémélanger chaque composant. Mélanger 1 partie de composant B pour 3 parties de composant A dans un seau propre. Mélanger pendant 3 minutes avec une perceuse électrique à basse vitesse (300 - 450 tr/min) pour minimiser l'empriement d'air. Utiliser un mélangeur (ex. Exomixer) (mode recommandé). Pendant le mélange, ratisser les parois et le fond du contenant avec une truelle plate ou à bord droit au moins une fois pour assurer un mélange complet. Au terme du mélange, Sikadur® 30 doit avoir une couleur homogène. Ne mélanger que la quantité pouvant être utilisée pendant la durée de vie en pot du mélange.

Application

Pour renfort externe collé - Appliquer Sikadur® 30 pur sur le béton avec une truelle ou une spatule, sur une épaisseur nominale de 1,5 mm (1/16 po). Appliquer Sikadur® 30 mélangé sur la lamelle CarboDur® avec une spatule "en forme de tige", sur une épaisseur nominale de 1,5 mm (1/16 po). À l'intérieur du temps ouvert de l'époxyle et compte tenu de la température, presser la lamelle CarboDur® sur la surface du béton. Avec un rouleau de caoutchouc dur, presser la lamelle jusqu'à ce que l'adhésif ressorte sur les deux côtés. Enlever l'adhésif excédentaire. La ligne de colle ne doit pas faire plus de 3 mm (1/8 po) d'épaisseur. Ne pas perturber les lamelles pendant 24 h au moins. L'époxyle atteindra sa résistance de calcul en 7 jours.

Pour le rattachement vertical ou au plafond - Appliquer Sikadur® 30 additionné de 1 partie de sable séché au four, sur le substrat propre et boucher la cavité. Aérer la surface de la réparation. Placer le produit par couches de 25 mm (1 po) d'épaisseur, maximum.



Nettoyage	Nettoyer immédiatement les outils et le produit avec Sika® Equipment Cleaner. Le produit durci ne peut être enlevé que mécaniquement. Se laver soigneusement les mains et la peau à l'eau chaude savonneuse.
Restrictions	■ Température ambiante et de substrat minimale : 5 °C (41 °F) ■ Température ambiante et de substrat maximale : 35 °C (95 °F) ■ Ne pas diluer puisque les solvants empêcheront un mûrissement approprié ■ N'utiliser que du sable séché au four ■ Épaisseur maximale de la ligne de colle d'époxyde pur : 3 mm (1/8 po) ■ Épaisseur maximale de mortier époxyde par couche : 25 mm (1 po) ■ Le produit mûri est un pare-vapeur ■ Résistance d'adhérence minimale du substrat de béton : 1,5 MPa (218 lb/po²) ■ Le béton doit avoir été coulé entre 21 et 28 jours au minimum, selon les conditions de séchage et de mûrissement ■ Les substrats poreux doivent être expertisés pour la transmission de vapeur d'eau avant d'appliquer le mortier.
Avertissement	Composant A - Irritant - Contient des résines époxydes. Le contact prolongé avec la peau peut causer une irritation. Éviter le contact avec les yeux. Composant B - Irritant - Contient des amines. Le contact avec la peau peut causer des brûlures graves. Éviter le contact avec les yeux. Éviter d'en respirer les vapeurs. Le produit est un sensibilisateur puissant. Il est recommandé de porter des lunettes protectrices, des gants résistants aux produits chimiques et un respirateur pour vapeurs organiques homologué NIOSH/MSHA. Prévoir une ventilation adéquate. Enlever les vêtements contaminés. Pour plus d'information, consulter l'étiquette du produit.
Premiers soins	En cas de contact avec la peau, rincer à l'eau et au savon. En cas de contact avec les yeux, rincer immédiatement et abondamment à l'eau pendant au moins 15 minutes. Consulter un médecin. En cas de problèmes respiratoires, évacuer la victime et lui faire respirer de l'air frais. Retirer les vêtements contaminés et laver avant de les remettre. Pour plus de détails, consulter la fiche signalétique du produit Sika. PORTER DES VÊTEMENTS DE PROTECTION, DES LUNETTES DE SÉCURITÉ, ET DES GANTS GARDER HORS DE LA PORTÉE DES ENFANTS POUR USAGE INDUSTRIEL SEULEMENT

Les renseignements et, notamment, les recommandations touchant l'application et l'utilisation correcte des produits Sika sont communiqués de bonne foi, sur la base des connaissances et de l'expérience actuelles de Sika, et concernent les produits tels qu'ils sont livrés et appliqués dans des conditions normales, dans le délai d'utilisation prescrit. Dans la pratique, les matériaux, les supports et les conditions réelles du site peuvent varier de manière substantielle. Par conséquent, Sika n'offre aucune garantie quant à la qualité matérielle ou à la conformité à un usage particulier et décline toute responsabilité relativement aux renseignements, aux recommandations et aux conseils fournis. Les droits réservés des brevets doivent être observés. Tous droits réservés réservés. Pour obtenir de plus amples renseignements, des conseils de nos ingénieurs de placement et de formation gratuites. Les utilisateurs doivent toujours consulter le plan d'installation et la fiche technique du produit qu'ils peuvent obtenir sur demande ou en consultant notre site internet à www.sika.ca.

Sika Canada Inc.	Ontario	Alberta	1-800-833-SIKA www.sika.ca
801 avenue Delval	6915 Denard Drive	18131-174th Avenue NW	
Porte-Clair, QC H8R 4A8	Mississauga, ON L5T 1L5	Edmonton, AB T5G 1T8	
Tél : 514-897-2810	Tél : 905-795-3177	Tél : 780-489-6111	
Fax : 514-897-3087	Fax : 905-795-3192	Fax : 780-483-1580	

Une copie gratuite 800 833-3142
Porte-Clair : 514 897-3087

ANNEXE VI

FICHE TECHNIQUE – Sikadur 330

Construction

Fiche technique du produit
Edition 06/2010/Art
DCC Master Format™ 03 01 30
Sikadur® 330

Sikadur® 330

Résine d'impregnation pour les tissus de renforcement

Description	Sikadur® 330 est une résine époxyde thermodurcissable, à deux composants, à 100% de matières solides, à haut module et haute résistance, tolérante à l'humidité, convenant particulièrement aux applications verticales et au-dessus de la tête.								
Domaines d'application	■ Sert de résine d'impregnation avec les systèmes de renforcement structural SikaWrap® Hex 230C et SikaWrap® Hex 430G. ■ Peut également servir d'apprêt avec SikaWrap® Hex 100C, SikaWrap® Hex 100G ou autres tissus, afin de favoriser l'encollage, dans le cadre d'applications verticales ou suspendues.								
Avantages	■ Longue période de vie en pot. ■ Temps ouvert prolongé. ■ Facile à mélanger. ■ Adhésif à haut module et haute résistance. ■ Excellente adhérence au béton, aux métaux, aux ouvrages de maçonnerie, au bois et à la plupart des matériaux structuraux. ■ Parfaitement compatible avec le système SikaWrap et mis au point expressément pour ce système. ■ Résistance aux températures élevées. ■ Haute résistance au fluage sous une charge permanente. ■ Haute résistance à l'abrasion et aux chocs. ■ Sans solvant et conforme aux réglementations sur les COV.								
Données techniques									
Emballage	Unité de 5 kg (11 lb) (3,8 L / 1 gal US)								
Couleur	Comp. A : Blanc Comp. B : Gris								
Consommation									
Première couche	0,7 - 1,2 kg/m² (0,14 - 0,24 lb/p²)								
Couche intermédiaire	0,5 kg/m² (0,10 lb/p²)								
Couche de finition	0,5 kg/m² (0,10 lb/p²)								
Conservation	2 ans dans son emballage d'origine, non-ouvert. Entreposer au sec entre 5 et 25 °C (41 et 77 °F). Conditionner le produit entre 18 et 24 °C (65 et 75 °F) avant de l'utiliser.								
Rapport de mélange	A/B = 4/1 en fonction du poids. Se servir de balances pour s'assurer de l'exactitude du ratio de mélange.								
Propriétés à 23 °C (73 °F) et 80 % H.R.									
Densité (comp. A + B mélangés)	1,31 kg/L (10,8 lb/gal US)								
Viscosité	Pâte ferme								
Vie en pot, 5 kg (11 lb)	10 °C (50 °F) : 1 h 30 min 20 °C (68 °F) : 30 min 30 °C (86 °F) : 20 min								
Temps ouvert	30 min								
Résistance en traction	30 MPa (4350 lb/p²)								
Allongement à la rupture	1,5 %								
Module en flexion	5,8 GPa (85,1 x 10³ lb/p²)								
Résistance à la déformation	Marquage								
Norme ASTM D942	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>7 jours à 10 °C (50 °F)</td> <td>38 °C (100 °F)</td> </tr> <tr> <td>7 jours à 23 °C (73 °F)</td> <td>47 °C (116 °F)</td> </tr> <tr> <td>7 jours à 35 °C (95 °F)</td> <td>53 °C (127 °F)</td> </tr> <tr> <td>7 jours à 40 °C (104 °F)</td> <td>59 °C (138 °F)</td> </tr> </table>	7 jours à 10 °C (50 °F)	38 °C (100 °F)	7 jours à 23 °C (73 °F)	47 °C (116 °F)	7 jours à 35 °C (95 °F)	53 °C (127 °F)	7 jours à 40 °C (104 °F)	59 °C (138 °F)
7 jours à 10 °C (50 °F)	38 °C (100 °F)								
7 jours à 23 °C (73 °F)	47 °C (116 °F)								
7 jours à 35 °C (95 °F)	53 °C (127 °F)								
7 jours à 40 °C (104 °F)	59 °C (138 °F)								

Mode d'emploi

Préparation de la surface

Décaper la surface en la sablant ou en la meulant (CSP 3-4). Enlever toute la poussière de la surface avec un aspirateur industriel. La surface doit être propre, exempte de graisse et d'huile, et sèche. La teneur maximale d'humidité du substrat devant être < 4 % par poids. La surface doit être nivelée et ne présenter aucune aspérité ni saillie > 0,5 mm (20 mils). Il faut niveler toute irrégularité supérieure en se servant de Sikadur® 30, auquel est ajouté du sable de silice sèche au four (ratio de 1:1 par volume). La résistance à la traction du substrat devant être renforcé doit être au moins de 1,5 MPa (215 lb/p²). Tous les coins de la structure doivent être arrondis à un rayon de 10 mm (3/8 po).

Sikadur® 330
03 01 30 - SYSTÈMES DE RENFORCEMENT STRUCTURAL
3-615

BIBLIOGRAPHIE

- ACI Committee 440.2R. 2008. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Farmington Hills, Michigan: American concrete institute.
- ASCE-ACI Task Committee 445. 1998. *Recent approaches to shear design of structural concrete*. Journal of Structural Engineering, 124(12): p. 1375-1417.
- Al-Mahaidi, R., Lee, K., and Taplin, G. 2001. *Behavior and Analysis of RC T-Beams Partially Damaged in Shear and Repaired with CFRP Laminates*. Structures 2001: p. 1-8.
- Berset, J.-D. 1992. Strengthening of Reinforced Concrete Beam for Shear Using FRP Composites. MSc Thesis, Departement of Civil and Environnemental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Boston MA. USA : 105 p.
- Bousselham, A. and Chaallal, O. (2004). Shear-strengthening reinforced concrete beams strengthened in shear with externally bonded FRP. *J. Compos. Constr.* 12(5), 499-512
- Bousselham, A. 2005. Comportement des poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés. Thèse Ph.D. École de technologie supérieure, Montréal, Canada. 404 p.
- Chaallal, O, Shahawy, M. and Hassan, M. 2002. *Performance of reinforced concrete T-girder strengthened in shear with CFRP fabrics*. ACI Struct. J. 99(3), p. 335-343.
- Chaallal, O., Mofidi, A., Benmokrane, B. and Neale, K. 2011. *Embedded Through-Section FRP Rod Methode for shear strengthening of RC beams : Performance and comparison with existing techniques*. ASCE, J. Compos. Const. 15(3), p. 374-383.
- Chajes, M.J., Januszka, T.F., Mertz, D.R., Thomson, T.A. Jr. and Finch W.W. Jr. 1995. *Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics*. ACI Struct. J. 92(3), p. 295-303.
- CIDAR. 2006. *Design Guideline for RC Structures Retrofitted with FRP and Metal Plates : Beams and Slabs*. Draft 3 – submitted to Standards Australia, The University of Adelaide, Australia.
- CNR-DT200. 2004. *Guidelines for Design, Execution, and Control of Strengthening Interventions by means of Fibre-Reinforced Composites*. National Research Council, Italy.

- CSA Committee S6-14. 2014. *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Toronto, Ontario, Canadian Standards Association.
- CSA Committee S806. 2012. *Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymer*. Mississauga, Ontario, Canadian Standards Association.
- Czaderski, C., and Motavalli, M. 2004. *Fatigue behaviors of CFRP L-Shaped plates for shear strengthening of RC beams*. Elsevier, Composites. Part B. 35(4), p. 279-290
- Deniaud, C. and Cheng, J.J.R. 2001. *Shear behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheet*. ACI Struct. J. 98(3), p. 386-394
- El-Maaddawy, T. and Chekfeh, Y. 2012. « *Retrofitting of Severely Shear-Damaged Concrete T-Beams Using Externally Bonded Composites and Mechanical End Anchorage* ». *J. Compos. Constr.*, 16(6), p. 693–704.
- El-Saikaly, G., Godat, A., and Chaallal, O. 2014. « *New Anchorage Technique for FRP Shear-Strengthened RC T-Beams Using CFRP Rope* ». *J. Compos. Constr.*, [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000530), 04014064.
- El-Saikaly, G., Chaallal, O. 2015. *Fatigue behavior of RC T-beams strengtened in shear with EB CFRP L-shaped laminates*. Elsevier, Composites : Part B 68 (2015), p. 100-112
- EMPA. 2002. *Shear strengthening with prefabricated L-shaped plates : Test beams S1 to S6. Test rep. 116/7*. Eidgenössische Materialprüfungs-und Forschungsanstalt.
- Fib-TG 9.3. 2001. *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland.
- Godat, A., L'Hady, A., Chaallal, O., and Neale, K. 2012. « *Bond Behavior of the ETS FRP Bar Shear-Strengthening Method* ». *J. Compos. Constr.*, 16(5), p. 529–539.
- Godat, A., Qu, Z. , Lu, X. Z. , Labossière, P. , Ye, L. P. , Neale, K. W. 2010. *Size effects for reinforced concrete beams strengthened in shear wiht CFRP strips*. *J.compos. constr.* may/june. 2010, p. 260-271
- Kamiharako, A., Maruyama, K., Takada, K. and Shiomura, T. 1997. Evaluation of Shear Contribution of FRP Sheets attached to concrete beams. *Proceeding of the third international Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for concrete Structures*, October, 1997, 1, p.467-474.
- Khalifa, A. and Nanni, A. 1999. *Rehabilitation of rectangular Simply supportes RC Beams with Shear Deficiencies Using CFRP Composites*. *Construction and Building Materials*, 16(3), p. 135-146

- MacGregor, J., G., Bartlett, F., M. 2000. *Reinforced Concrete - Mechanics and Design*. Scarborough, Ontario, Prentice Hall Canada Inc.
- Ministère des Transports du Québec. 2012. « Manuel d'inspection des Structures ». Publications du Québec. En ligne.
http://www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier/guides/guide24.fr.html. Consulté le 13 juin 2015.
- Ministère des Transports du Québec. 2011. « Bilan de l'état des structures du réseau routier supérieur ». En ligne. 34 p.
http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/per/0994120/05_2011.pdf. Consulté le 16 juillet 2015.
- Mofidi, A. and Chaallal, O. 2011. *Shear strengthening of RC beams with EB FRP : influencing factors and conceptual debonding models*. J.compos. constr. Jan. /fev. 2011, p. 1-13
- Mofidi, A. 2012. *Shear strengthening or reinforced- concrete Beams using Advanced composite materials*. Manuscript-Bases Thesis. École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada. 204 p.
- Mofidi, A., Chaallal, O., Benmokrane, B., and Neale, K. 2012. « *Experimental Tests and Design Model for RC Beams Strengthened in Shear Using the Embedded Through-Section FRP Method* ». J. Compos. Constr., 16(5), p. 540-550.
- Mofidi, A., Thivierge, S., Chaallal, O., and Shao, Y. 2013. *Performance of reinforced concrete beams strengthened in shear using L-shaped CFRP plates- An experimental investigation*. ASCE, J.Compos. Constr., 10.1061, p. 1 - 8
- Mofidi, A., Chaallal, O., and Shao, Y. (2014). « *Analytical Design Model for Reinforced-Concrete Beams Strengthened in Shear Using L-Shaped CFRP Plates* ». J. Compos. Constr., 18(1), 04013024.
- Oehler, D.J., Seracio, R and Smith, S.T. (2008). *Design Guideline for RC Structures Retrofitted with FRP and Metal Plates : Beams and Slabs*. HB-305-2008, Standards Australia, Sydney, Australia, ISBN 0 7337 7831 3, 73 pp.
- Qin, S., Dirar, S., Yang, J., Chan, A., and Elshafie, M. 2014. « *CFRP Shear Strengthening of Reinforced-Concrete T-Beams with Corroded Shear Links* ». J. Compos. Constr., 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000548 , 04014081.
- Robertson, I., Johnson, G.P., and Sharma, B. 2007. *Shear retrofit of concrete T-beams using CFRP*. Proc., 8th Int. Symp. on Fiber reinforced Polymers in reinforced concrete structures.

- Statistique Canada. 2015. *L'âge de l'infrastructure publique au Canada*.
<http://www.statcan.gc.ca/pub/11-621-m/11-621-m2006035-fra.htm>.
Consulté le 15 juillet 2015.
- Täljsten, B. 1997. *Strengthening of concrete structures for shear with bonded CFRP fabrics*. Proceedings, US-Canada-Europe Workshop on Bridge Engineering, organized by EMPA, Zurich, Switzerland, p.57-64.
- Täljsten, B. 2003. *Strengthening of concrete beam for shear with bonded CFRP sheets*. Construction and Building Materials, Elsevier, 17, p. 15-26.
- Transports Canada. 2015. Transport routier : *Récapitulatif 2007-2011*.
<https://www.tc.gc.ca/fra/politique/anre-menu-3021.htm>. Consulté le 16 juillet 2015.
- Transport Québec. 2015. *Infrastructure de transport : Investissement 2015-2017*.
<https://www.mtq.gouv.qc.ca/infrastructures-transport/investissements-routiers-2015-2017/Pages/default.aspx>. Consulté le 13 juillet 2015.
- Ugi, K. 1992. *Improving shear capacity of existing reinforced concrete members by applying carbon fiber sheet*. Trans. Jpn. Concr. Institute 14(253), p.66
- U.S. Departement of Transportation. 2015. *Federal Highway Administration : Bridges by year built*. <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/structyr.cfm>. Consulté le 23 juillet 2015.