

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. Ing.

PAR
MAZEN ALBOUCHI

L'EFFET D'ÉCHELLE DANS LES POUTRES EN BÉTON RENFORCÉES
EXTÉRIEUREMENT EN CISAILLEMENT
À L'AIDE DE MATÉRIAUX COMPOSITES

MONTRÉAL / DÉCEMBRE 2004

© Droits réservés de Mazen Albouchi

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

M. Amar Khaled, président de jury

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. France Bernard, examinateur

Ville de Montréal, arrondissement de Verdun

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

LE 2 DÉCEMBRE 2004

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

L'EFFET D'ÉCHELLE DANS LES POUTRES EN BÉTON RENFORCÉES EXTÉRIEUREMENT EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE MATÉRIAUX COMPOSITES

Mazen Albouchi

SOMMAIRE

Les campagnes de réhabilitation des structures en béton armé dégradées constituent une alternative économique, mais continuent à présenter un défi pour les ingénieurs. De plus en plus, ces campagnes de réhabilitation font appel à l'utilisation des matériaux composites avancés (MCA) comme un moyen de renfort. La maîtrise de l'utilisation des feuilles en MCA collées extérieurement pour le renforcement en cisaillement est encore sous investigation et la littérature montre que la majorité des recherches liées à ce domaine est effectuée par l'entremise d'essais en laboratoire réalisés sur des corps d'épreuve de taille réduite.

Le présent mémoire vise à évaluer l'effet d'échelle dans les poutres renforcées en cisaillement à l'aide des feuilles en MCA.

Des essais de chargement ont été réalisés en laboratoire sur vingt-quatre poutres en forme de "T", profondes et élancées renforcées de divers taux d'étriers internes et de feuilles en MCA à base de fibre de carbone (CFRP) externes.

Ce programme d'essais a montré l'existence d'un tel effet dans les poutres non renforcées à l'aide d'étriers.

Dans les poutres élancées, le gain en résistance au cisaillement obtenu grâce à l'ajout du CFRP est plus important dans les poutres de taille réduite que dans les poutres de taille régulière. Ceci pourrait indiquer que les résistances de telles poutres calculées à partir des modèles mathématiques et des formules de design élaborées sur la base des essais en laboratoire sur des poutres de taille réduite seraient surestimées et pourraient par conséquent être non sécuritaires.

À l'opposé, dans les poutres profondes, le gain en résistance au cisaillement obtenu grâce à l'ajout du CFRP est plus important dans les poutres de taille régulière que dans les poutres de taille réduite. Ceci pourrait indiquer que les résistances des poutres explicites calculées à partir des modèles mathématiques et des formules de design élaborées sur la base des essais en laboratoire sur des poutres de taille réduite seraient conservatrices puisque le gain dû au renfort en CFRP est sous-estimé.

SCALE EFFECT IN CONCRETE BEAMS REINFORCED IN SHEAR BY EXTERNALLY BONDED CARBON FIBER REINFORCED POLYMER SHEETS

Mazen Albouchi

ABSTRACT

The strengthening and rehabilitation of degraded concrete structures in lieu of their replacement can be an economic and viable alternative. However, it also presents an interesting challenge for the engineers. The use of Advanced Composite Materials (ACM) as a strengthening material is increasingly gaining popularity. The use of externally bonded ACM sheets for shear strengthening is under investigation and the literature shows that the majority of the research linked to this field is carried out by tests realized under laboratory conditions on reduced size specimens.

The main objective of the present work is to verify the existence of the scale effect in reinforced concrete T-beams strengthened in shear using ACM sheets.

Tests were carried out in laboratory on twenty-four deep as well as slender reinforced concrete T-beams reinforced in shear using different ratio of internal steel stirrups as well as different number of layers of externally bonded carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets. These laboratory tests showed the existence of scale effect in beams not reinforced with internal stirrups.

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de recherche, professeur Omar Chaallal, qui, par ses précieux conseils, ses interventions et l'intérêt qu'il a toujours porté à ce travail, a su me guider le long de cette recherche.

Je tiens à remercier les membres de l'équipe du DSRS de l'ÉTS pour leurs efforts soutenus pendant des années à parfaire les connaissances de l'utilisation du MCA comme renforcement dans les structures en béton. L'aide de cette équipe a été inestimable pour la réalisation de la présente étude.

Mes remerciements les plus chaleureux vont également à Monsieur John Lescelleur, technicien du laboratoire des structures lourdes de l'ÉTS, qui a permis, grâce à son travail minutieux, l'obtention des résultats précis et sans faille des travaux de laboratoire.

Je désire aussi remercier ma famille, amis et collègues pour leur soutien le long de mes études à l'ÉTS.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 DESCRIPTION DU PROJET DE RECHERCHE.....	5
1.1 Objectifs du projet de recherche	5
1.2 Méthodologie	5
1.3 Présentation du mémoire.....	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	8
2.1 L'effet d'échelle.....	8
2.2 Travaux pertinents.....	9
2.3 Synthèse et conclusion	14
CHAPITRE 3 CONCEPTION DES SPÉCIMENS	17
3.1 Introduction.....	17
3.2 Définition des paramètres de l'étude.....	19
3.2.1 Longueur de cisaillement	20
3.2.2 Taux de renfort avec l'armature transversale.....	20
3.2.3 Taux de renfort avec des feuilles en CFRP	20
3.3 Définition des séries d'essais	22
3.4 Géométrie des poutres.....	23
3.4.1 Design des poutres de la première phase	23
3.4.2 Design des poutres réduites de la deuxième phase	25
3.5 Comparaison entre les poutres des deux phases	33
CHAPITRE 4 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE	36
4.1 Description des matériaux utilisés	36

4.2	Instrumentation	39
4.2.1	Déplacements	39
4.2.2	Déformation dans l'acier.....	40
4.2.3	Déformation dans le béton	41
4.2.4	Déformation dans le composite.....	44
4.3	Pose du CFRP	45
4.4	Mise à l'essai et acquisition des données.....	47
CHAPITRE 5 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS		
EXPÉRIMENTAUX.....		50
5.1	Analyse de la performance en terme de résistance en cisaillement	50
5.1.1	Résistance en cisaillement de la Première série (PP-S0)	54
5.1.2	Résistance en cisaillement de la Deuxième série (PP-S1)	56
5.1.3	Résistance en cisaillement de la Troisième série (PÉ-S0)	58
5.1.4	Résistance en cisaillement de la Quatrième série (PÉ-S1).....	60
5.2	L'influence de l'effet d'échelle sur la résistance en cisaillement	61
5.3	Analyse de la performance en terme de raideur	63
5.3.1	Raideur de la Première série (PP-S0).....	63
5.3.2	Raideur de la Deuxième série (PP-S1).....	64
5.3.3	Raideur de la Troisième série (PÉ-S0).....	65
5.3.4	Raideur de la Quatrième série (PÉ-S1)	66
5.4	L'influence de l'effet d'échelle sur la raideur.....	67
5.5	Analyse des flèches	70
5.5.1	Flèches de la Première série (PP-S0)	70
5.5.2	Flèches de la Deuxième série (PP-S1)	71
5.5.3	Flèches de la Troisième série (PÉ-S0)	72
5.5.4	Flèches de la Quatrième série (PÉ-S1).....	74
5.6	L'influence de l'effet d'échelle sur les flèches	74
5.7	Analyse du mode de rupture	75
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		76
BIBLIOGRAPHIE		78

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Plan récapitulatif des essais dans les deux phases22
Tableau II	Comparaison entre les dimensions des poutres.....33
Tableau III	Comparaison entre les renforcements des poutres de la première et de la deuxième phase.....34
Tableau IV	Composition et caractéristiques du béton utilisé.....38
Tableau V	Propriétés mécaniques de l'acier d'armature utilisé38
Tableau VI	Propriétés mécaniques du CFRP utilisé39
Tableau VII	Résultats expérimentaux relatifs à la première phase51
Tableau VIII	Mesures pertinentes à l'effet d'échelle de la deuxième phase52
Tableau IX	Gains de résistance en cisaillement dus à l'ajout du CFRP - Premier série (PP-S0).....55
Tableau X	Gains de résistance en cisaillement dus à l'ajout du CFRP - Deuxième série (PP-S1)57
Tableau XI	Gains de résistance en cisaillement dus à l'ajout du CFRP - Troisième série (PÉ-S0)59
Tableau XII	Gains de résistance en cisaillement dus à l'ajout du CFRP - Quatrième série (PÉ-S1)61
Tableau XIII	Pentes des tangentes des courbes de la première série.....64
Tableau XIV	Pentes des tangentes des courbes de la deuxième série65
Tableau XV	Pentes des tangentes des courbes de la troisième série66
Tableau XVI	Pentes des tangentes des courbes de la quatrième série.....67
Tableau XVII	Raideurs sécantes sous charges maximales.....69

Tableau XVIII	Flèches à mi-portée - Première série.....	71
Tableau XIX	Flèches à mi-portée - Deuxième série.....	72
Tableau XX	Flèches à mi-portée -Troisième série	73
Tableau XXI	Flèches à mi-portée - Quatrième série	74

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2-1 Influence de la taille des poutres sur le diagramme de la contrainte nominale de compression.....	8
Figure 2-2 Modélisation en treillis montrant la transition de la poutre élancée à la poutre profonde.	11
Figure 3-1 Vue d'une poutre renforcée à l'aide de CFRP en forme de "U"	21
Figure 3-2 Vue latérale d'une poutre de la première phase	24
Figure 3-3 Représentation de la section droite de la poutre de la première phase.....	24
Figure 3-4 Représentation de la section droite de la poutre de la deuxième phase	30
Figure 3-5 Représentation des deux tests sur la même poutre.....	31
Figure 3-6 Programme des essais de la deuxième phase	32
Figure 3-7 Comparaison visuelle entre les poutres des deux phases : (a) vue transversale, (b) vue longitudinale et (c) vue des étriers.....	35
Figure 4-1 Confection des spécimens : (a) armatures prêtes pour insertion dans le coffrage, (b) coffrage de béton et (c) cure des spécimens.....	37
Figure 4-2 Positions des jauges de déformation dans l'acier.....	41
Figure 4-3 Jauge interne de déformation du béton	42
Figure 4-4 Capteur de déplacement et une jauge externe de déformation du béton...	43
Figure 4-5 Capteurs de fissures dans les sens horizontal et vertical.....	44
Figure 4-6 Capteurs de fissures sur le composite	45
Figure 4-7 Les étapes de la pose du CFRP : (a) préparation de l'époxyde, (b) application de l'époxyde et (c) collage des feuilles de CFRP.....	46
Figure 4-8 Mode de chargement	48
Figure 4-9 Système d'acquisition des données.....	49

Figure 5-1	Effort tranchant « V » en fonction de la flèche à mi-portée Première série	54
Figure 5-2	Effort tranchant « V » en fonction de la flèche à mi-portée Deuxième série	56
Figure 5-3	Effort tranchant « V » en fonction de la flèche à mi-portée Troisième série	58
Figure 5-4	Effort tranchant « V » en fonction de la flèche à mi-portée Quatrième série	60
Figure 5-5	Illustration de la raideur sécante des quatre séries : (a) série 1, (b) série 2, (c) série 3 et (d) série 4.....	68

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

0C, 1C, 2C	0 Couche de CFRP, 1 Couche de CFRP, 2 Couches de CFRP
4-25M	4 barres d'acier de diamètre nominal 25 mm
a	longueur de cisaillement
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ACM	<i>Advanced Composite Materials</i>
A_g	Aire brute de la section
A_s	Aire de l'armature longitudinale
ASCE	<i>American Society of Civil Engineering</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BA	Béton Armé
b_t	largeur de la table
b_{wI}	largeur de l'âme des poutres de la phase 1
b_{wII}	largeur de l'âme des poutres de la phase 2
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (matériaux composites à base de fibres de carbone)
d	hauteur utile des poutres
d_a	dimension maximale des agrégats
d_I	hauteur utile des poutres de la phase 1
d_{II}	hauteur utile des poutres de la phase 2
DRSR	Développement et Recherche en Structure et Réhabilitation
ÉTS	École de Technologie Supérieure
f'_c	résistance en compression du béton
f_u	contrainte ultime de l'acier
f_y	contrainte de plastification de l'acier
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> (Matériaux composites à base de fibres de verre)
GPa	Giga Pascal

h_I	hauteur des poutres de la phase 1
h_{II}	hauteur des poutres de la phase 2
h_t	hauteur de la table
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MCA	Matériaux Composites Avancés
M_{nom}	Moment fléchissant nominal de flexion
MPa	Méga Pascal
Ø 4.76	barre d'acier de diamètre 4,76 mm
Ø 8	barre d'acier de diamètre 8mm
P	Charge ponctuelle
PÉ	Poutre Élancé
Ph1	Phase 1 (poutres de taille réduite)
Ph2	Phase 2 (poutres de taille régulière)
PP	Poutre Profonde
ρ_{tr}	taux d'acier transversal dans les poutres
$\rho_{tr I}$	taux d'acier transversal dans les poutres de la phase 1
$\rho_{tr II}$	taux d'acier transversal dans les poutres de la phase 2
ρ_{CFRP}	taux de CFRP
$\rho_{CFRP I}$	taux de CFRP dans les poutres de la phase 1
$\rho_{CFRP II}$	taux de CFRP dans les poutres de la phase 2
s	espacement entre les étriers dans les poutres
S0	sans acier transversal
S1	avec acier transversal
s_I	espacement entre les étriers dans les poutres de la phase 1
s_{II}	espacement entre les étriers dans les poutres de la phase 2
t	épaisseur d'une feuille en CFRP
t_I	épaisseur du renfort en CFRP dans la phase 1
t_{II}	épaisseur du renfort en CFRP dans la phase 2

$\mu\epsilon$	<i>micro strain</i> (micro déformation)
V	effort de cisaillement
V_{0c}, V_{1c}, V_{2c}	Résistance au cisaillement maximale de la poutre avec 0, 1 et 2 couches de CFRP
V_c, V_s, V_{cfrp}	résistance au cisaillement due au béton, à l'acier transversal et au CFRP
V_{nom}	contrainte de cisaillement nominale
λ	constante
σ_n	contrainte normale nominale

INTRODUCTION

Contexte général

Le béton armé (BA) est un matériau très utilisé dans la construction. Les édifices en BA constituent un patrimoine important au Canada et dans le monde. Cependant, un bon nombre de ces constructions ont dépassé la durée de vie pour laquelle elles ont été conçues et sont parfois dans un état de détérioration avancé. Ces constructions nécessitent donc des interventions majeures pour s'assurer de leur intégrité structurale.

Deux types d'intervention s'offrent alors à l'ingénieur : (i) la démolition pure et simple et la reconstruction ou (ii) le renforcement et la réhabilitation du bâti existant.

La première alternative, bien qu'attrayante à première vue, présente des problèmes majeurs d'ordre économique et environnemental. Par ailleurs, pour les édifices à caractère patrimonial et historique, cette solution n'est pas appropriée. Dès lors, la réhabilitation et le renforcement des structures endommagées deviennent une solution pratique qui offre plusieurs avantages. En plus de rétablir la capacité et l'intégrité structurale des ouvrages, elle permet de recycler les matériaux vieillissants et leur donner une nouvelle vie, ce qui est avantageux du point de vue de la sauvegarde de l'environnement.

La réhabilitation d'un ouvrage consiste à prolonger la durée de vie de cet ouvrage tout en assurant sa fonctionnalité et surtout son exploitation sécuritaire conformément aux codes et règlements en vigueur. Réduire et prévenir les éventuelles détériorations futures et améliorer l'aspect extérieur sont d'autres aspects qui peuvent être couverts par la réhabilitation.

La réhabilitation et le renforcement du bâti existant sont considérés, par plusieurs experts, comme la plus importante activité de l'industrie de la construction pour le siècle en cours. Les coûts associés aux travaux de réhabilitation ont atteint des seuils très élevés. Rien qu'au Canada, les coûts reliés à la réfection des ponts endommagés excèdent 10 milliards de dollars. (Source : [http:// www.nce.gc.ca/ pubs/ reports/ 9697/ ann96-97-7d_f.htm](http://www.nce.gc.ca/pubs/reports/9697/ann96-97-7d_f.htm) (22 avril 2003)).

Les techniques traditionnelles de réhabilitation, bien que familières à l'ingénieur praticien, sont souvent coûteuses et lentes. De plus, le rythme de la réhabilitation ne réussit pas à prendre le dessus sur l'immense parc d'ouvrages à réhabiliter. L'innovation et le développement de technique de réhabilitation et de renforcement, à la fois rapides d'exécution, durables, performants et économiques, revêtent donc une importance capitale.

Renforcement en cisaillement à l'aide de MCA

Au cours de la dernière décennie, par le biais de recherches intensives de développement, les feuilles en Matériaux Composites Avancés (MCA) collées en surface ont apporté des solutions nouvelles et innovatrices au renforcement et à la réhabilitation des structures.

Les propriétés avantageuses des feuilles du MCA, comme la faible densité, la maniabilité, la résistance à la corrosion, la neutralité électromagnétique et la facilité d'installation sans équipements lourds et sans interruption de l'exploitation, ont rendu la réhabilitation à l'aide de ces feuilles, nettement plus attrayante et plus avantageuse en comparaison avec d'autres méthodes conventionnelles.

Toutefois l'utilisation du MCA pour le renforcement d'ouvrages déficients n'a pas connu l'essor et le succès escomptés. Cette situation est principalement due au manque

de données sur certains aspects du comportement de ce nouveau mode de renforcement. Les recherches récentes ont très bien documenté le comportement des poutres en béton armé, renforcées à l'aide de feuilles en MCA collées en surface. Mais, il s'agit dans la grande majorité des cas de renforcement en flexion. En revanche, les travaux consacrés au renforcement en cisaillement restent peu nombreux et leurs conclusions sont souvent controversées.

Les poutres en BA, particulièrement les poutres de pont et de stationnements étagés, souffrent aujourd'hui de problèmes d'insuffisances structurales, particulièrement en ce qui a trait à la résistance au cisaillement. Ceci est dû à l'évolution des conditions d'exploitation à la suite de la modification, d'une part des charges réglementaires et, d'autre part, des fréquences de passage de véhicules lourds. Une mise à niveau de la performance de ces éléments structuraux importants revêt désormais un caractère sécuritaire urgent. De plus, il est bien connu que tout renforcement en flexion est subordonné à la capacité en cisaillement. Ainsi, à défaut d'une résistance suffisante en cisaillement, la structure renforcée risque de ne jamais atteindre la capacité ciblée en flexion.

Le renforcement économique et fiable de ces structures est, encore aujourd'hui, un défi pour les ingénieurs et des économies considérables peuvent être réalisées si les propriétés des MCA, utilisées pour de tels renforcements, sont bien connues et rendues accessibles à l'ingénieur praticien.

Les propositions formulées jusqu'à présent par les recherches dans ce domaine sont calibrées sur les seuls résultats obtenus suite à des travaux effectués, dans la plupart des cas, en laboratoire sur des poutres de taille réduite. L'effet d'échelle, qui est observé en utilisant des structures de dimensions différentes avec des formes géométriques semblables, est fortement soupçonné d'influencer les résultats obtenus avec des pièces de taille réduite. Malgré cela, les recherches négligent l'influence de cet effet dans leurs

conclusions et la recherche bibliographique entreprise dans le cadre de cette investigation indique clairement l'absence d'études sur ce sujet.

Dans ce contexte, la présente étude se veut une contribution à l'étude de l'effet d'échelle sur les poutres en béton renforcées en cisaillement à l'aide de MCA collés en surface. Les objectifs et la méthodologie du projet retenu sont décrits en détail dans le chapitre 1.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DU PROJET DE RECHERCHE

1.1 Objectifs du projet de recherche

L'équipe DSRS (Développement et Recherche en Structure et Réhabilitation) de l'ÉTS mène depuis quelques années, des recherches sur le comportement des poutres en béton armé, renforcées en cisaillement à l'aide de feuilles en MCA à base de fibres de carbone collées en surface sur les parois de la poutre à l'aide d'une colle d'époxyde. Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre de ces recherches.

L'objectif global de l'étude est d'évaluer l'effet d'échelle sur les poutres en béton armé (BA) de section en "T" renforcées en cisaillement à l'aide du MCA.

Les objectifs spécifiques de l'étude peuvent s'énoncer comme suit :

- Faire une revue de la littérature reliée à l'effet d'échelle;
- Entreprendre une investigation expérimentale;
- Évaluer l'effet d'échelle sur la base des résultats expérimentaux en termes de :
 - Gain en résistance,
 - Raideur,
 - Flèche, et
 - Mode de rupture.

1.2 Méthodologie

La méthodologie comporte une étude théorique, une investigation expérimentale en laboratoire et une analyse des résultats obtenus.

- L'étude théorique du présent mémoire comprend :
 - une étude bibliographique sur l'effet d'échelle et sur le renforcement en cisaillement à l'aide de MCA;
 - une recherche et une analyse des paramètres susceptibles d'influencer l'effet d'échelle;
 - des travaux de simulation exploratoire permettant de détecter l'influence de chacune des dimensions de la poutre et les divers taux de renforcement sur les essais projetés.
- L'investigation expérimentale est effectuée en laboratoire, par des essais de chargement jusqu'à la rupture de vingt-quatre spécimens de poutres en béton armé de section en "T", renforcées en cisaillement à l'aide de divers taux d'armature transversale interne (étriers en acier) et des feuilles en matériaux composites à base de fibres de carbone (CFRP) (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) collées en surface sur les parois de la poutre à l'aide d'une colle d'époxyde. Ces poutres forment douze couplets de poutres. Chaque couplet comporte deux poutres : la première poutre est de taille régulière, comparable à celle utilisée en pratique dans la construction, alors que la deuxième poutre a les mêmes caractéristiques que la poutre de taille régulière, mais elle est de taille réduite.
- L'analyse des résultats consiste à comparer les performances des poutres d'un même couplet en terme de cisaillement.

1.3 Présentation du mémoire

Ce mémoire comporte trois parties :

- La première partie présente une revue bibliographique des recherches récentes reliées au sujet de notre recherche,

- La deuxième partie est dédiée au programme expérimental. La description des spécimens et le calcul théorique ayant mené au design optimal des poutres expérimentales y sont présentés,
- La troisième partie présente, quant à elle, les résultats des essais effectués en laboratoire. Elle présente ensuite l'analyse et l'interprétation de ces résultats expérimentaux. Enfin, les conclusions obtenues dans le cadre de cette étude y sont également présentées.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 L'effet d'échelle

Les structures géométriquement semblables doivent normalement se caractériser, sous charges ultimes, par des valeurs identiques des contraintes nominales « σ_n ». À l'opposé, lorsqu'il est constaté qu'il y a une dépendance entre ces valeurs de « σ_n » et la taille de la structure (Figure 2-1) on dit qu'il y a un effet d'échelle (ACI Committee 446.1R, 1991).

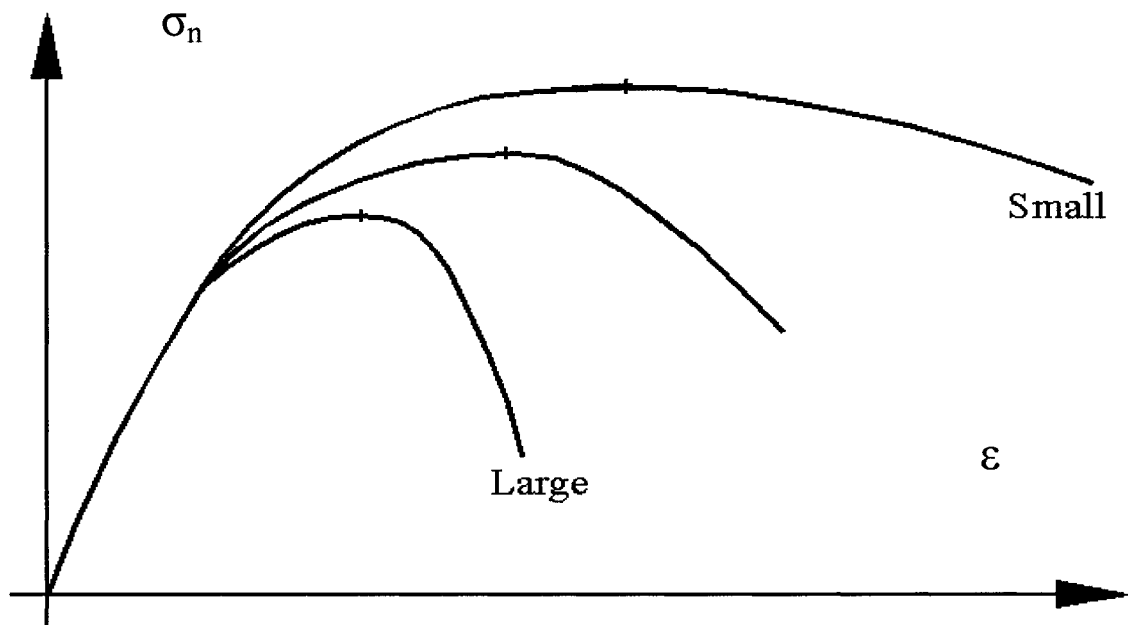


Figure 2-1 Influence de la taille des poutres sur le diagramme de la contrainte nominale de compression (Source : Bažant, 1997)

L'effet d'échelle dans les divers éléments en béton a été bien démontré sous les différents types de chargement. Dans le cas de poutres en béton, l'effet d'échelle peut

être observé par l'analyse des poutres de dimensions différentes mais ayant, d'une part, le même taux du renforcement et, d'autre part, le même rapport « a / d » où « a » est la longueur de cisaillement et « d » la hauteur utile (Bažant et coll., 1984).

Dans l'étude du cisaillement des poutres en béton armé et au-delà d'une certaine limite de la hauteur utile « d », il est constaté que lorsque « d » augmente la contrainte nominale « σ_n » diminue et vice versa. Ce constat montre à lui seul l'importance de tenir compte de l'effet d'échelle dans les poutres.

La norme américaine ACI-318.95 ne tient pas compte de l'effet d'échelle. À l'opposé, Beeby et coll. (1999) dans l'Eurocode 2, tiennent compte dans le calcul de la force de cisaillement reprise par le béton.

La norme canadienne du béton (CSA-CAN3 94 article 11.3.5.2), en tient compte en remplaçant le coefficient (0.2) par le terme $(\frac{260}{1000 + d})$, dans la formule de la force de cisaillement reprise par le béton « V_c » dans les poutres, sans étriers, dont la hauteur utile « d » dépasse 300 mm.

2.2 Travaux pertinents

Afin de mieux comprendre l'évolution des contraintes de cisaillement, Bažant et coll. (1984) ont analysé les résultats d'études faisant appel à la mécanique de la rupture, sur l'effondrement dû au cisaillement dans les poutres en béton armé sans étriers.

Ils en concluent que, pour les petites poutres, représentatives de la grande majorité des poutres d'essais en laboratoire, la contrainte nominale est presque constante. Cependant, pour les poutres plus profondes, cette contrainte à la rupture diminue considérablement avec l'augmentation de la grandeur des poutres et varie avec le terme $[1 + d / d_a * \lambda]$.

Dans cette expression, « d » est la hauteur utile de la poutre, « d_a » est la dimension maximale des agrégats et « λ » est une constante.

Suite à une comparaison des données recueillies sur près de 300 essais, les chercheurs ne trouvent aucune évidence expérimentale significative de la présence de l'effet d'échelle dans les poutres renforcées en cisaillement à l'aide des étriers.

Selon le rapport de l'ACI Committee 446.1R (1991), les structures en béton sont décrites comme des structures qui contiennent beaucoup de fissures. Le rapport indique que la rupture de ces structures implique généralement un élargissement constant des zones de larges fissures. Le rapport recommande la maîtrise de l'effet d'échelle dans le design des structures, qui est généralement basé sur une extrapolation des résultats de l'échelle du laboratoire à l'échelle réelle des structures.

Kotsovos et coll. (1997) notent que plusieurs études ont démontré qu'il n'y a pas d'effet d'échelle dans les poutres renforcées en cisaillement à l'aide des étriers. Selon ces chercheurs, l'effet d'échelle résulte des effets secondaires, tel que les fissures non symétriques dans les poutres en béton, qui en l'absence des étriers, peuvent précipiter la rupture.

Bažant et coll. (1997) notent que malgré les connaissances acquises au cours du siècle dernier sur la rupture en cisaillement des poutres en béton, le mécanisme physique de la rupture n'est pas encore maîtrisé. Ils ont observé que parmi les 470 études expérimentales sur la rupture en cisaillement des poutres en béton armé seulement dix études, récentes pour la plupart, ont exploré l'effet d'échelle et ont conclu à des preuves évidentes de son existence.

En 1998, une revue de littérature entreprise par Triantafillou et coll. (1998) a montré que, malgré les nombreuses études sur le renforcement en cisaillement des poutres en béton armé à l'aide des feuilles en MCA, les équations de design proposées pour ces

éléments demeurent incomplètes voir inexactes. De plus, ces chercheurs avancent que les modèles analytiques proposés dans la littérature sont aussi nombreux que les études, et sont, dans la majorité des cas, contradictoires.

Ces chercheurs soulèvent une question importante quant aux résultats obtenus par essais sur des poutres de petite taille renforcées latéralement à l'aide de MCA. Ils se demandent si ces petites poutres sont vraiment représentatives des poutres de taille réelle, sachant que les feuilles de MCA collées latéralement à l'extérieur des poutres ont besoin d'une certaine longueur « d'ancrage » afin d'assurer le transfert des contraintes au béton. Selon les chercheurs, les résultats obtenus à l'aide de petites poutres sous-estiment la résistance en cisaillement.

Dans son rapport sur le cisaillement et la torsion, l'ASCE-ACI Committee 445 (1998) précise qu'il y a une influence de l'effet d'échelle sur l'intensité du cisaillement dans les éléments en béton armé sans armatures transversales et que cet effet est très significatif dans les poutres profondes (Figure 2-2), dont le rapport (a / d) est inférieur à 2.5.

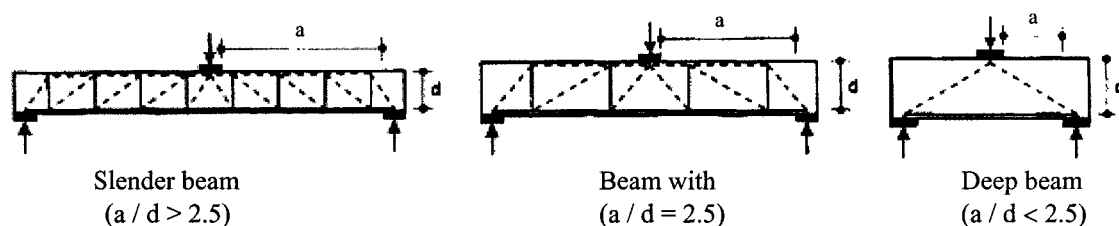


Figure 2-2 Modélisation en treillis montrant la transition de la poutre élancée à la poutre profonde (Source : ASCE-ACI committee 445, 1998)

L'étude analytique effectuée par Li et coll. (1998) a porté sur l'influence de l'ajout des fibres dans le béton sur l'effet d'échelle dans les poutres en béton de fibres. Ces chercheurs nous font remarquer, à la lumière des nouvelles théories de mécanique de la rupture, que l'effet d'échelle dans les structures en béton peut être réduit par la

modification du patron des fissures. Ils concluent que les poutres réalisées avec du béton de fibres, compte tenu de la modification de la propagation des fissures due à l'ajout des fibres, doivent en principe être moins affectées par l'effet d'échelle que celles réalisées avec du béton armé conventionnel.

Le calcul de la contribution des MCA à la capacité de la résistance en cisaillement aux éléments en béton armé est décrit dans les travaux de Triantafillou et coll. (2000). Ces derniers proposent un modèle de design simple basé sur les formules introduites par l'Eurocode. Ainsi, selon leur modèle, pour une certaine résistance de béton donnée, la contribution du MCA augmente linéairement avec la rigidité axiale des fibres du MCA jusqu'à une certaine limite au-delà de laquelle le mode de décollement gouverne et le gain en capacité de cisaillement devient relativement petit.

Khalifa et coll. (2000) effectuent des essais sur des poutres de section en "T" renforcées en cisaillement à l'aide de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Les poutres utilisées ont une taille régulière non réduite, contrairement à la majorité des poutres utilisées dans d'autres recherches. Ils étudient l'influence sur la capacité en cisaillement des poutres de la quantité de CFRP, du schéma d'application (en bandes ou en continu) et de l'ancrage de l'extrémité des feuilles en CFRP. Ils obtiennent un meilleur gain en capacité de cisaillement quand le renforcement en CFRP est en forme de "U" et les feuilles sont ancrées mécaniquement à leur extrémité au béton. Ils concluent que la performance du renforcement à l'aide de feuilles en CFRP peut être améliorée moyennant un ancrage adéquat.

À l'issue d'essais effectués sur huit poutres en béton armé de section en "T", de taille standard ($h = 600$ mm) renforcées en cisaillement à l'aide du MCA en verre (GFRP) et en carbone (CFRP), Deniaud et coll. (2001a) rapportent que :

- Le gain en cisaillement varie entre 77 % et 117 % et dépend, entre autres, du renforcement en cisaillement interne (étriers);

- Plus les poutres ont un renforcement en cisaillement interne élevé, moins importante sera la contribution du renfort en MCA à la résistance en cisaillement;
- Le renforcement à l'aide des feuilles en MCA collées extérieurement résulte en l'augmentation de l'angle de fissuration dans l'âme et change donc le chemin critique de cisaillement.

Zararis et coll. (2001) proposent une formule pour calculer la contrainte nominale de cisaillement. Leur formule théorique, calibrée sur 166 résultats d'essais extraits de la littérature de 1962 à 1999, introduit un terme qui tient compte de l'effet d'échelle. Ils concluent que l'effet d'échelle ne dépend pas uniquement de la hauteur utile « d », comme c'est généralement répandu, mais dépend également du rapport « a / d ».

Deniaud et coll. (2001b) soupçonnent l'effet d'échelle dans les poutres renforcées, au même titre que les poutres non renforcées. Ils observent, après une analyse des essais reportés dans la littérature, que relativement peu d'essais sur le renforcement en cisaillement à l'aide du MCA sont effectués sur des poutres de taille régulière.

Ils effectuent douze essais sur des poutres de hauteur $h = 400$ mm et $h = 600$ mm. Toutefois, leurs essais ne peuvent être considérés dans l'étude de l'effet d'échelle, puisque les hauteurs des poutres utilisées sont supérieures à 300 mm et plusieurs autres paramètres, tels que le type du béton et le type du MCA, varient simultanément.

Après les essais, les chercheurs constatent que la taille de la poutre affecte de manière significative le comportement du MCA dans les spécimens. Ils concluent que d'autres tests sont nécessaires pour évaluer l'effet d'échelle et ils recommandent de tenir compte de cet effet dans les méthodes d'évaluation du cisaillement dans les poutres renforcées à l'aide de MCA.

Dans le but de déterminer l'existence d'un effet d'échelle, Sener et coll. (2002) ont effectué des essais sur des poutres en béton avec et sans fibres métalliques.

Les résultats obtenus à partir de ces essais confirment clairement l'existence d'un effet d'échelle significatif dans la contrainte nominale, particulièrement dans le cas des poutres contenant des fibres d'acier. Ils recommandent que l'effet d'échelle soit introduit pour corriger les codes actuels.

Dans le but de vérifier la validité des diverses formules controversées disponibles, qui traitent de l'effet d'échelle dans la littérature, Karihaloo et coll. (2003) ont effectué des essais sur des poutres en béton. Les chercheurs nous font remarquer que, jusqu'à présent, seule la théorie de la mécanique de la rupture a pu clarifier l'effet d'échelle sur la résistance du béton. Ils reconnaissent que leur travail expérimental n'a pas pu résoudre la controverse actuelle rencontrée dans la littérature à ce sujet.

Bousselham et coll. (2004), ont effectué une analyse des résultats de recherche sur le renforcement en cisaillement de poutres en béton armé, à l'aide de MCA.

Ils ont observé que les données expérimentales disponibles sont limitées à des poutres élancées de forme rectangulaire et de tailles, relativement, petites. Après une analyse des résultats de 38 tests, ils constatent que le gain en cisaillement dans les poutres dont la hauteur utile « d » est supérieure à 300 mm, a tendance à diminuer avec l'augmentation de la hauteur utile.

2.3 Synthèse et conclusion

La revue de la littérature a permis de constater que, même si les conclusions sont parfois contradictoires, les chercheurs s'accordent sur l'existence de l'effet d'échelle dans les

poutres en béton armé et que cet effet soit plus important dans les poutres dont le taux de renforcement interne en cisaillement à l'aide d'étriers n'est pas élevé.

L'utilisation des feuilles en MCA pour le renforcement externe en cisaillement des poutres en béton armé n'est pas une pratique courante. De nombreux travaux de recherche sont encore requis avant que tous les aspects du comportement de ces poutres renforcées, ne soient adéquatement documentés. Compte tenu de l'introduction relativement récente de ce nouveau matériau, les normes ne tiennent pas encore compte de l'effet d'échelle et la littérature disponible ne cite aucune étude traitant du sujet en relation avec le renforcement externe à l'aide de MCA.

Cependant, au sujet de l'effet d'échelle dans les poutres renforcées à l'aide de MCA, deux hypothèses contradictoires, existent :

- La première estime qu'un effet d'échelle existe dans de telles poutres. Dans ce cas, les résultats qui découlent des études effectuées sur des poutres de petite taille sont optimistes.
- La deuxième estime que les feuilles en MCA, collées extérieurement sur des poutres ont besoin d'une certaine longueur « d'ancrage » afin d'assurer le transfert des contraintes entre le béton et les feuilles en MCA. Ainsi, un manque d'ancrage peut causer une rupture prématurée des poutres rendant ainsi les règles basées sur des résultats obtenus sur de telles poutres conservatrices.

Les conclusions des recherches effectuées en laboratoires sur des poutres de taille réduite peuvent être influencées par l'existence d'un effet d'échelle, ce qui explique le besoin de mettre cet aspect en évidence.

Compte tenu de l'interface des divers paramètres et leur interprétation sur le comportement en cisaillement des poutres renforcées en cisaillement à l'aide de MCA,

la comparaison des données de différents laboratoires peut s'avérer un exercice dont les résultats ne sont pas valides. De plus, les différents laboratoires ne respectent pas la même géométrie de poutres et n'utilisent pas le même matériau composite. Cette situation complique l'étude de l'effet d'échelle et rend la représentation d'un tel effet par des modèles mathématiques difficile. Cet état de fait indique clairement le besoin pour un programme visant spécifiquement l'étude d'un tel effet.

Le présent travail a pour but d'apporter une contribution pour élucider le phénomène de l'effet d'échelle dans les poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide des feuilles en MCA collées sur les parois à l'aide d'époxyde.

CHAPITRE 3

CONCEPTION DES SPÉCIMENS

Ce chapitre présente les matériaux utilisés pour la confection de poutres en "T" mises à l'essai. Les paramètres d'étude qui ont conduit au design des poutres retenues et des essais entrepris dans le cadre de ce mémoire y sont également définis.

3.1 Introduction

Ce mémoire vise à étudier le phénomène de l'effet d'échelle dans les poutres en béton armé renforcées à l'aide des feuilles en MCA et d'évaluer, s'il y a lieu, l'ampleur d'un tel phénomène dans de telles poutres et ce, par des essais de chargement menés en laboratoire sur des séries de poutres ciblées.

La revue de la littérature a permis de déterminer les seuils qui influencent l'effet d'échelle sur le comportement d'une poutre face au cisaillement. Ces seuils servent de base pour établir les paramètres d'étude et pour effectuer le design des poutres mises à l'essai. Ceci permet d'optimiser les essais, c'est à dire minimiser le nombre d'essais tout en tirant le maximum d'information sur les différents aspects de l'influence de l'effet d'échelle, dans le renforcement en cisaillement des poutres.

Ces seuils sont :

- $d = 300 \text{ mm}$: Ce seuil distingue les poutres susceptibles d'être influencées par l'effet d'échelle;
- $a / d = 2.5$: Ce seuil distingue les poutres élancées des poutres profondes;
- L'existence du renforcement en cisaillement interne (étriers).

Le programme expérimental mis en œuvre dans le cadre de cette étude, a porté sur des essais réalisés sur des poutres de section droite en forme de "T", renforcées à l'aide d'armature de cisaillement sous forme d'étriers en acier et de feuilles en « CFRP » collées sur les parois de la poutre.

Le choix de la forme géométrique a été dicté par la volonté de viser la forme des poutres les plus utilisées dans la construction, soient les poutres de section droite en forme de "T". Pour les mêmes raisons les feuilles en « CFRP » ont été utilisées comme renforcement en « MCA ».

Les poutres ont été mises à l'essai de chargement statique en trois points jusqu'à la rupture. L'influence de chacun des paramètres étudiés est évaluée expérimentalement grâce à des poutres dont seul ce paramètre varie. Une comparaison des résultats des essais effectués permet de vérifier l'existence de l'effet d'échelle et d'évaluer son ampleur.

Le programme expérimental a été conduit en deux phases :

- La première phase a consisté à mettre à l'épreuve des poutres de taille régulière. Ces poutres, en béton armé, sont renforcées en cisaillement à l'aide d'acier transversal (étriers) et des feuilles en « CFRP », en forme de "U", collées sur les parois à l'aide d'une colle d'époxyde;
- La deuxième phase d'essais expérimentaux a été effectuée sur des poutres analogues aux poutres de la première phase, mais de taille réduite. Ces dernières se caractérisent par une hauteur utile « d » inférieure à 300 mm.

Ces essais font partie d'un vaste programme expérimental, qui vise à étudier, en plus de l'effet d'échelle, l'influence du renfort en « MCA » et de l'acier transversal sur le

comportement en cisaillement des poutres en béton armé. Cependant, seul l'effet d'échelle est visé par le présent mémoire.

3.2 Définition des paramètres de l'étude

L'étude consiste à rassembler le maximum de données sur les divers paramètres pouvant influencer l'effet d'échelle, ce qui permet de définir leur ordre de priorité et leurs niveaux d'influence. Après une analyse des divers paramètres, l'influence des trois paramètres suivants est étudiée :

1. la longueur de cisaillement;
2. le taux de renfort avec de l'armature transversale;
3. le taux de renfort avec des feuilles en « MCA ».

Dans le but de s'assurer d'une comparaison fiable des résultats, qui aiderait à évaluer correctement l'effet d'échelle, plusieurs paramètres sont communs aux deux éléments du même couplet. Ces paramètres communs sont :

- La forme géométrique;
- La composition du béton;
- Le type de renforcement;
- Le type du « MCA »;
- Le taux de renforcement en acier longitudinal;
- Le taux de renforcement en acier transversal;
- Le taux de renforcement en « MCA ».
- Le mode de chargement;
- Le rapport « a / d »;

3.2.1 Longueur de cisaillement

Pour étudier l'influence de l'effet d'échelle sur les poutres élancées ($a / d > 2.5$) et les poutres profondes ($a / d \leq 2.5$), deux longueurs de cisaillement (a / d) ont été considérées :

1. (a / d) = 1.5 pour les poutres profondes;
2. (a / d) = 3.0 pour les poutres élancées.

3.2.2 Taux de renfort avec l'armature transversale

La littérature exclut l'effet d'échelle sur les poutres fortement renforcées transversalement. On étudie, donc, deux taux de renfort en cisaillement des poutres à l'aide d'étriers :

1. Le premier taux, identifié par « S0 », correspond aux poutres qui ne contiennent pas d'armature transversale;
2. Le second taux, identifié par « S1 », correspond, quant à lui, aux poutres renforcées transversalement avec des étriers espacés de « s ». Dans la première phase, l'espacement « s » est égal à la moitié de la hauteur utile « d » de la poutre. Dans la deuxième phase, l'espacement des étriers est tel que le taux de renfort en acier transversal est égal au taux de la première phase.

3.2.3 Taux de renfort avec des feuilles en CFRP

La présente étude sur l'effet d'échelle considère trois taux de renfort en CFRP :

1. Le premier taux de renforcement, identifié par (0C), correspond aux poutres sans renforcement en CFRP;

2. Le second taux de renforcement, identifié par (1C), correspond, dans la première phase, aux poutres renforcées à l'aide d'une seule couche, d'épaisseur $t = 0.1219$ mm. Dans la deuxième phase, les poutres identifiées par (1C), ont été renforcées par un nombre de couches assurant le même taux de renfort en CFRP que celui d'une couche de la première phase. La configuration géométrique de ce renforcement est en forme de "U", appliqué de façon continue sur toute la longueur de cisaillement, tel que montré à la photographie de la figure 3-1;
3. Enfin, le troisième taux de renforcement en MCA, identifié par (2C), correspond aux poutres renforcées à l'aide de deux couches de CFRP dans la première phase. Dans la deuxième phase, les poutres identifiées par (2C), ont été renforcées par un nombre de couches assurant le même taux de renfort en CFRP que celui de deux couches de la première phase.

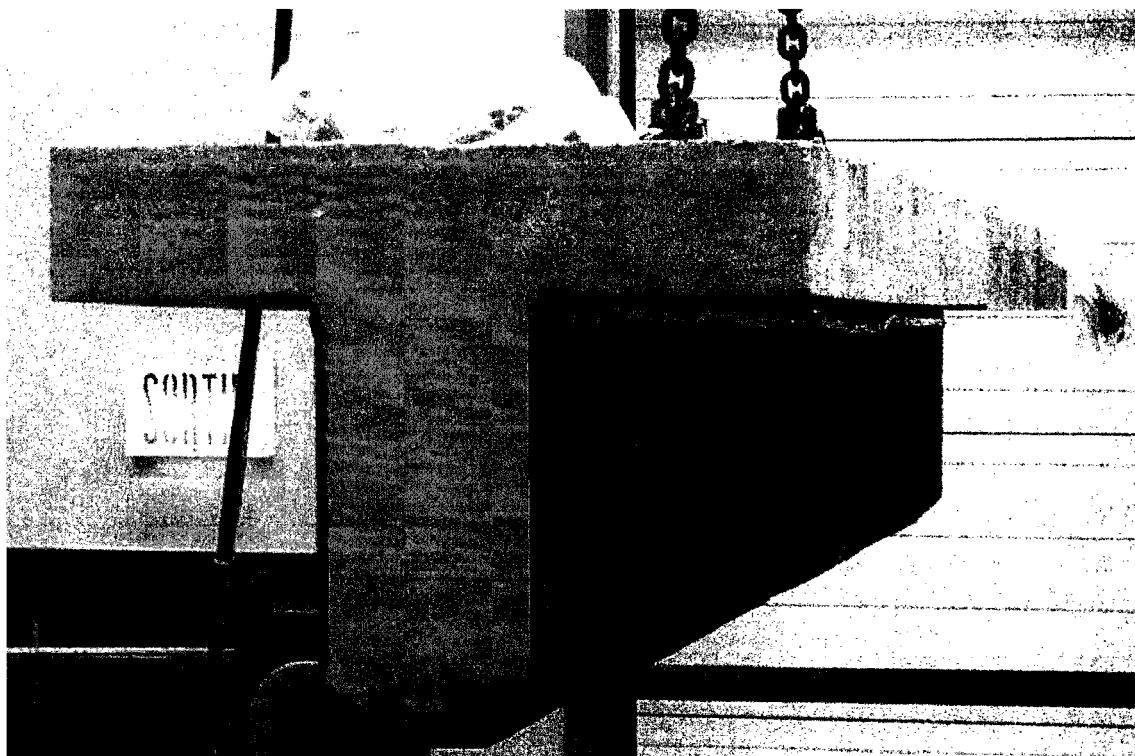


Figure 3-1 Vue d'une poutre renforcée à l'aide de CFRP en forme de "U"

3.3 Définition des séries d'essais

Au total, l'étude considère vingt-quatre essais, soit douze essais dans chacune des deux phases.

Ces essais sont regroupés en quatre séries. Chaque série comporte trois couplets d'essais qui se distinguent, entre eux, par le taux de renforcement en CFRP comme le montre le tableau I.

1. La première série représente les poutres profondes sans armatures transversales, identifiée par « PP - S0 »;
2. La deuxième série représente les poutres profondes avec armatures transversales, identifiée par « PP - S1 »;
3. La troisième série représente les poutres élancées sans armatures transversales, identifiée par « PÉ - S0 »;
4. La quatrième série représente les poutres élancées avec armatures transversales, identifiée par « PÉ - S1 ».

Tableau I

Plan récapitulatif des essais dans les deux phases

			Longueur de cisaillement			
			Poutres profondes « PP » a / d = 1.5		Poutres élancées « PÉ » a / d = 3	
			Série 1 PP-S0	Série 2 PP-S1	Série 3 PÉ-S0	Série 4 PÉ-S1
Renforcement en CFRP	0 C	Phase I	Ph1-PP-S0-0C	Ph1-PP-S1-0C	Ph1-PÉ-S0-0C	Ph1-PÉ-S1-0C
	1 C		Ph1-PP-S0-1C	Ph1-PP-S1-1C	Ph1-PÉ-S0-1C	Ph1-PÉ-S1-1C
	2 C		Ph1-PP-S0-2C	Ph1-PP-S1-2C	Ph1-PÉ-S0-2C	Ph1-PÉ-S1-2C
	0 C	Phase II	Ph2-PP-S0-0C	Ph2-PP-S1-0C	Ph2-PÉ-S0-0C	Ph2-PÉ-S1-0C
	1 C		Ph2-PP-S0-1C	Ph2-PP-S1-1C	Ph2-PÉ-S0-1C	Ph2-PÉ-S1-1C
	2 C		Ph2-PP-S0-2C	Ph2-PP-S1-2C	Ph2-PÉ-S0-2C	Ph2-PÉ-S1-2C

3.4 Géométrie des poutres

Comme mentionné plus haut, deux catégories de poutres sont considérées dans cette étude.

La première catégorie comportant des poutres de taille régulière a été mise à l'épreuve lors de la phase I. Quant aux poutres de la deuxième phase, elles ont la même forme géométrique que celles de la première phase mais elles sont de taille plus réduite.

3.4.1 Design des poutres de la première phase

Les poutres de la première phase ont été conçues pour répondre à des exigences dictées par l'ensemble des essais nécessaires pour réaliser le programme d'étude global sur le cisaillement des poutres renforcées en MCA. Ces poutres d'une longueur de 4515 mm et d'une hauteur de 406 mm, ont été armées longitudinalement avec 4-25M réparties sur deux lits espacés de 25 mm, soit un pourcentage d'acier longitudinal de 3,76 % et une hauteur utile « d » de 350 mm. Leur renforcement en cisaillement a été réalisé à l'aide d'étriers internes de Ø8 et à l'aide d'un tissu en fibre de carbone en forme de "U" collé extérieurement sur les parois à l'aide d'époxyde et ce sur toute la longueur de cisaillement. La figure 3-2 montre une représentation schématique de la vue latérale de la poutre et la figure 3-3 montre une représentation de la section droite type d'une poutre de la première phase.

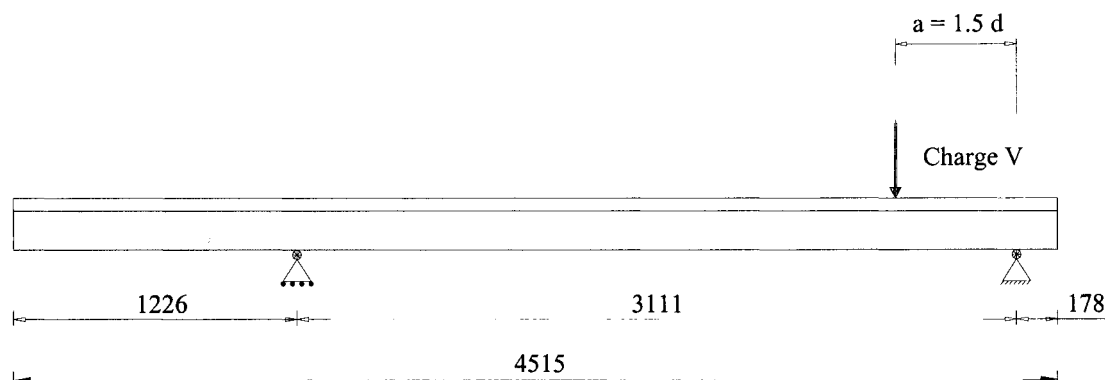


Figure 3-2 Vue latérale d'une poutre de la première phase
(dimensions en mm)

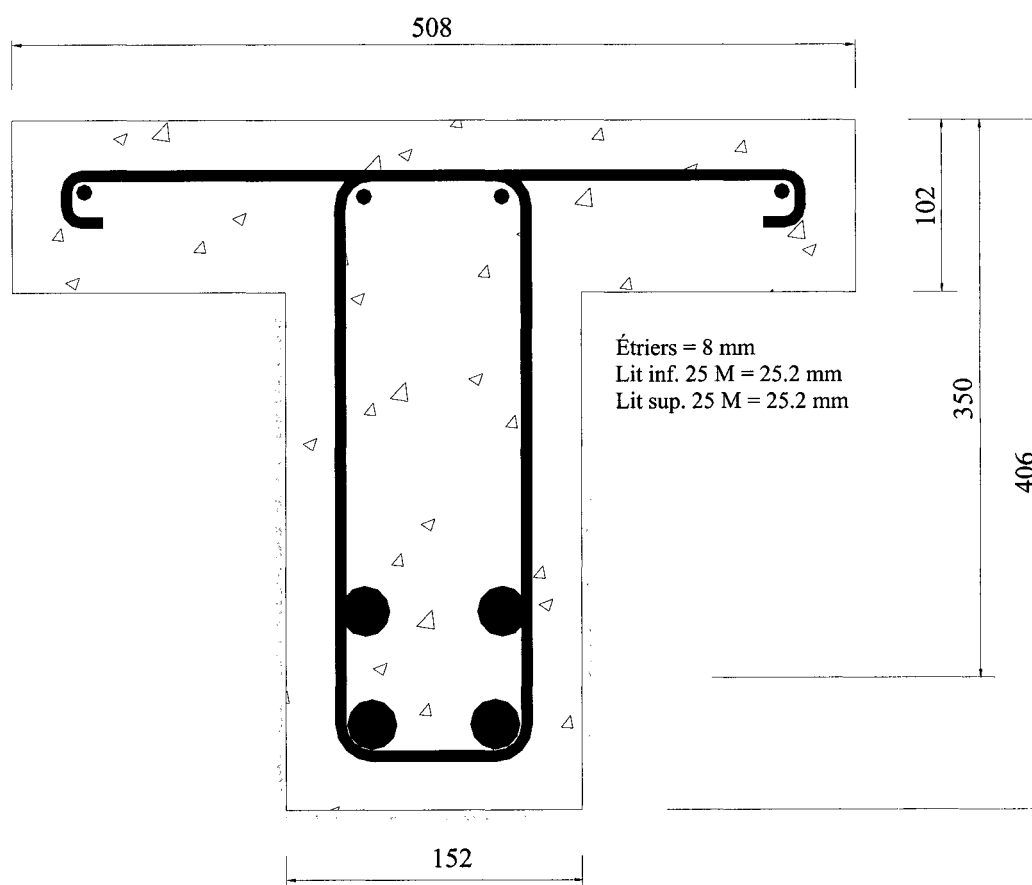


Figure 3-3 Représentation de la section droite de la poutre de la première phase
(dimensions en mm)

3.4.2 Design des poutres réduites de la deuxième phase

La conception des poutres de taille réduite, mises à l'essai dans la deuxième phase, a été élaborée de sorte à bien ressortir l'effet d'échelle. Les paramètres impliqués dans la conception de ces poutres sont les suivants :

- a. Largeur de l'âme des poutres « b_{wII} »;
- b. Hauteur des poutres « h_{II} »;
- c. Armature transversale des poutres;
- d. Renforcement en CFRP;
- e. Armature longitudinale des poutres;
- f. Longueur des poutres.

3.4.2.a Largeur de l'âme des poutres « b_{wII} » :

Les poutres de taille réduite doivent avoir des dimensions aussi petites que possible, tout en étant réalisables du point de vue technique. Dans ce contexte, nous avons essayé, dans une première approche, de concevoir des poutres réduites dont les dimensions représentent 50 % celles des poutres régulières de la première phase. Ainsi, en rapport avec ce choix, la largeur de l'âme « b_{wII} » devait être 80 mm. Puisque le recouvrement requis est d'au moins 15 mm, cette option ne laisse donc que 50 mm pour loger les étriers et deux barres d'armatures longitudinales. Dans ce cas, nous ne pouvions mettre qu'une seule barre de grand diamètre dans un étrier sous forme d'épingle, ce qui pourrait favoriser un autre mode de rupture de la poutre et rendre ainsi difficile la comparaison entre deux poutres semblables (d'un même couplet).

Nous avons alors décidé de redéfinir « b_{wII} » à partir de la condition pratique qui consiste à loger dans l'âme de la poutre deux barres longitudinales 15M ayant un espacement entre elles de 20 mm, installés dans des étriers $\varnothing 6$ et un recouvrement de 15 mm. Cette

façon de faire aboutit à une largeur minimale de l'âme de 94 mm. La dimension adoptée fut alors de 95 mm, ce qui est équivalent à 62 % de la valeur de « b_{wI} ».

3.4.2.b Hauteur des poutres « h_{II} » :

La hauteur utile « d » est l'élément clé de la comparaison dans l'observation de l'effet d'échelle. Nous proposons que la valeur du « d_{II} » soit égale à la moitié de « d_I », soit 175 mm.

On considérant que :

- l'enrobage est de 15 mm;
- les étriers sont des $\varnothing 6$;
- l'armature longitudinale se compose de deux lits de 15M;
- la distance entre les lits est de 20 mm.

Alors, la distance entre le centre de gravité de l'armature longitudinale et la fibre la plus tendue sera de : $(h_{II} - d_{II}) = 15 + 6 + 16 + (20 / 2) = 47$ mm.

Donc, la hauteur de la poutre « h_{II} » aura une valeur approximative de : $175 + 47 = 222$ mm. Nous adoptons donc la valeur ($h_{II} = 220$ mm), ce qui est équivalent à 54 % de la valeur de h_I .

3.4.2.c Armature transversale des poutres :

L'armature transversale des poutres réduites devra remplir, entre autres, les deux conditions suivantes :

- Permettre d'avoir dans les poutres réduites le même taux d'acier transversal que celui des poutres régulières;
- Avoir un espacement qui permet d'intercepter les fissures dues au cisaillement, c'est à dire que l'espacement « s_{II} » devra être inférieur à la hauteur utile « d_{II} ».

Le taux d'acier transversal, dans la première phase et dans le cas de ($s_I = d_I / 2 = 350 / 2 = 175$ mm), est :

$$\rho_{trI} = \frac{2 * (\text{Aire d'étriers})_I}{b_{wI} * s_I} = \frac{2 * 50.24}{152 * 175} = 0.00377$$

Donc, pour des essais équivalents et pour avoir le même taux, l'espacement « s_{II} » entre les étriers devra être de :

$$s_{II} = \frac{2 * \text{Aire d'étriers}}{b_{wII} * \rho_{trII}} = \frac{2 * 28.27}{95 * 0.00377} = 157.9 \text{ mm}$$

Dans ce cas, la valeur de « s_{II} » est proche de la valeur de « d_{II} » ($d_{II} = 175$ mm) et donc, les étriers risquent de ne pas intercepter les fissures.

Nous nous contraignons de réduire l'espacement « s_{II} », soit en augmentant la valeur de b_{wII} ou en diminuant la section des étriers. Mais, vu que la largeur « b_{wII} » est déjà assez élevée par rapport à « b_{wI} » (62.33 % de b_{wI}), nous avons donc opté pour la réduction de la section des étriers en adoptant un plus faible diamètre nominal soit des étriers Ø4 (diamètre = 4.76 mm).

Avec ces étriers Ø4.76 (aire = 17.81 mm²) et un taux d'armature transversale de 0.00377, correspondant au cas de ($s_I = d_I / 2$) de la première phase, le calcul nous donne un espacement s_{II} entre les étriers de :

$$s_{II} = \frac{2 * 17.81}{95 * 0.00377} = 99.45 \text{ mm}$$

Nous avons donc décidé d'adopter la valeur ($s_{II} = 100$ mm), ce qui est équivalent à 57 % de la valeur de « d_{II} », et assure, donc, une interception des fissures.

3.4.2.d Renforcement en CFRP :

Le taux de renforcement en CFRP dans la deuxième phase doit être équivalent à celui de la première phase. Donc :

$$\rho_{CFRP II} = \rho_{CFRP I} \Rightarrow \frac{2t_I}{b_{wI}} = \frac{2t_{II}}{b_{wII}} \Rightarrow t_{II} = t_I \frac{b_{wII}}{b_{wI}}$$

Où : « t » est l'épaisseur de la feuille de CFRP.

Ceci implique que :

$$t_{II} = 95/152 * t_I$$

$$\text{soit : } t_{II} = 0.625 * t_I$$

Dans la phase I, trois niveaux de renforcement sont considérés :

- i. sans renforcement en CFRP et donc : $t_I = 0.00$ mm;
- ii. avec renforcement à l'aide d'une couche de CFRP d'épaisseur totale $t_I = 0.1219$ mm et un taux :

$$\rho_{CFRP I} = \frac{2t_I}{b_{wI}} = \frac{2 * 0.1219}{152} = 0.0016$$

- iii. avec renforcement à l'aide de deux couches de CFRP d'épaisseur totale $t_I = 0.2438$ mm et un taux :

$$\rho_{CFRP I} = \frac{2t_I}{b_{wI}} = \frac{2 * 2 * 0.1219}{152} = 0.0032$$

Donc, les trois niveaux correspondants de renforcement, dans la deuxième phase, sont :

- i. $t_{II} = 0.00$ mm, sans renforcement en CFRP;
- ii. $t_{II} = 0.625 * 0.1219 = 0.076$ mm, ce qui correspond à l'équivalent à 0.623 couches. Nous adoptons la valeur de 0.60 couche;
- iii. $t_{II} = 0.2438 * 0.625 = 0.152$ mm, ce qui correspond à l'équivalent à 1.246 couches. Nous adoptons la valeur de 1.20 couche.

3.4.2.e Armature longitudinale des poutres :

Les essais de chargement entrepris doivent produire, à l'ultime, une rupture par cisaillement et non par flexion. L'armature longitudinale doit donc assurer une résistance suffisante au moment de flexion développé par le chargement appliqué. L'intensité de la charge dépendra de la grandeur de la poutre et du taux de renforcement en cisaillement.

Dans la deuxième phase, c'est le cas où la poutre est renforcée en cisaillement à l'aide des étriers distants de 100 mm et de 1.2 couches de CFRP qui nécessitera la charge d'application la plus importante. Il est à noter que le moment de flexion développé, dans le cas où $a = 3 * d$, est le moment le plus élevé auquel l'armature longitudinale devra résister. Plusieurs opérations d'itération nous ont permis de conclure, pour ce cas, que :

- Largeur de la table des poutres : $b_t = 270$ mm;
- Hauteur de la table : $h_t = 55$ mm;
- La contrainte de cisaillement nominale : $V_{nom} = 67.93$ kN;
- Le moment de flexion nominale : $M_{nom} = 35.26$ kNm;
- L'armature longitudinale : $A_s = 2-15M + 2-10M$, repartis dans deux lits espacés de 20 mm;
- Et, par conséquent : « $d = 177.58$ mm ».

Cette poutre, représentée à la figure 3-4, assure, théoriquement, une rupture par cisaillement et un axe neutre dans la table de compression, tout en étant techniquement réalisable.

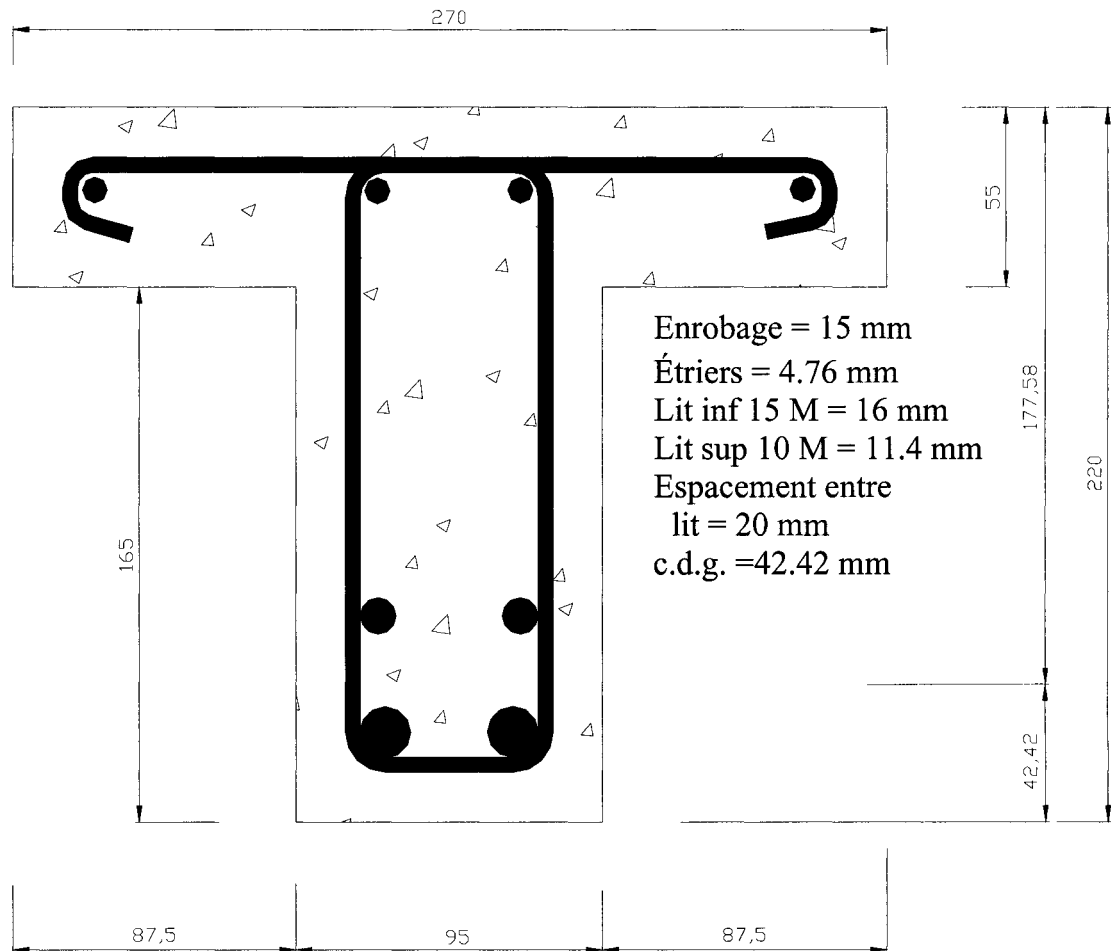


Figure 3-4 Représentation de la section droite de la poutre de la deuxième phase

3.4.2.f Longueur des poutres :

Les conditions suivantes nous ont permis de déterminer la longueur nécessaire des poutres réduites appartenant à la phase II :

- A. Pour des raisons d'économie, chaque poutre est utilisée pour réaliser deux tests, le premier avec « $a = 1.5 d$ » et le second avec « $a = 3 d$ » comme le montre la figure 3-5. Il fallait donc s'assurer que la partie qui sera soumise au deuxième essai ne soit pas affectée par les effets du premier et, par conséquent, devra être en dehors de la zone sollicitée par ce premier essai.

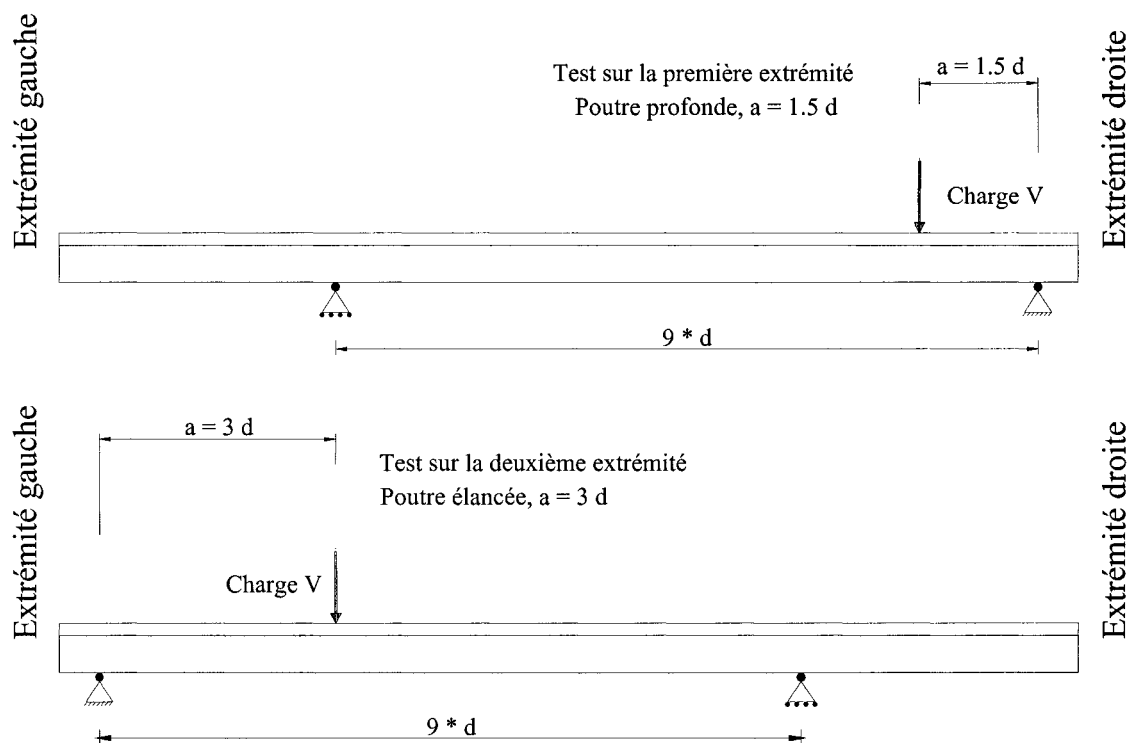


Figure 3-5 Représentation des deux tests sur la même poutre

B. La distance entre les deux appuis dans la première phase est de 3111 mm, ce qui est équivalente à $9 d_I$. Pour avoir la même rigidité, dans la deuxième phase, nous imposons une distance équivalente à $9 d_{II}$ entre les deux appuis;

C. La longueur d'ancrage des barres longitudinales sans crochets.

Ces trois conditions ont permis de choisir la longueur totale des poutres, soit 3000 mm.

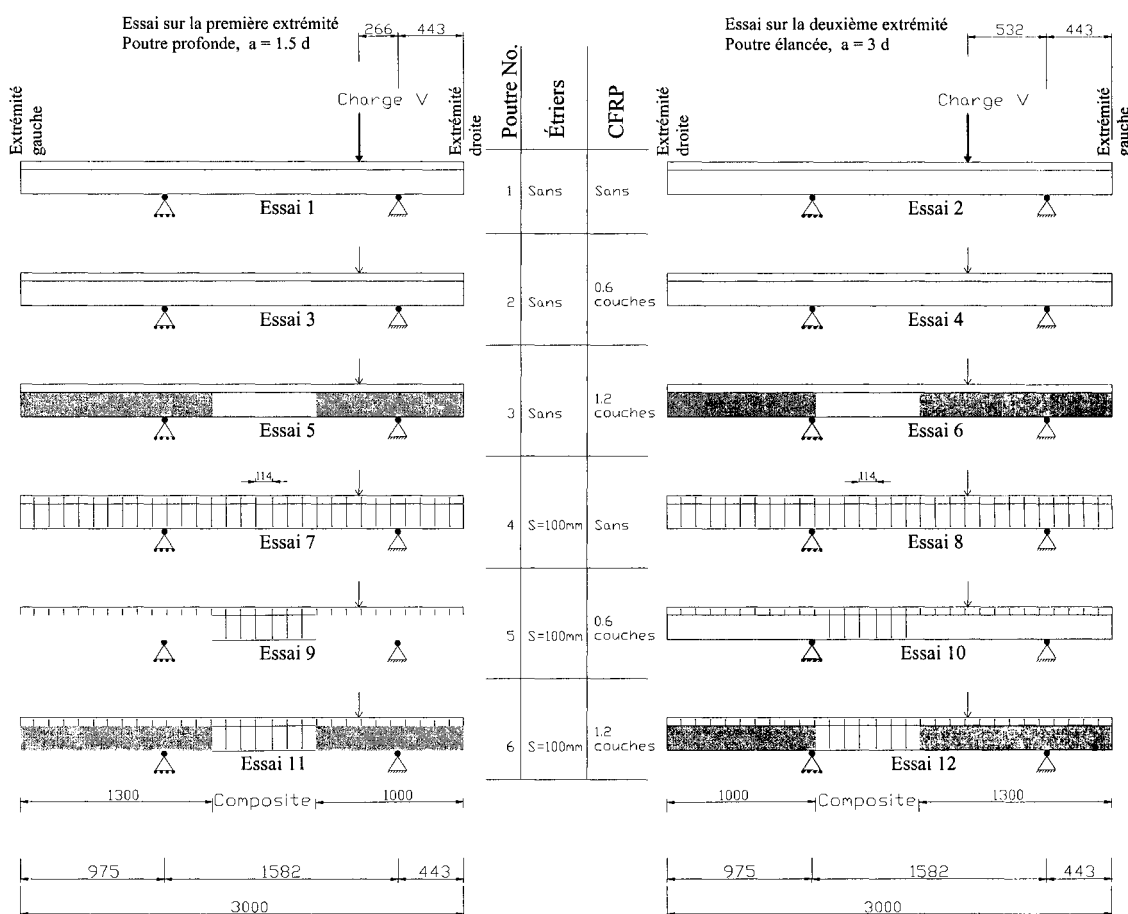


Figure 3-6 Programme des essais de la deuxième phase

En ce qui concerne les essais lors de la deuxième phase, les caractéristiques de chargement sont présentées à la figure 3-6. Cette figure présente les différents essais de la deuxième phase, ainsi que les longueurs des poutres, le renfort en étriers, le renfort en CFRP, la distance entre les appuis et la position du point d'application de la charge appliquée.

3.5 Comparaison entre les poutres des deux phases

Les tableaux II et III présentent, respectivement, les dimensions et les renforcements des différentes poutres des deux phases. Une comparaison visuelle entre les étriers des deux phases est montrée à la figure 3-7.

Tableau II

Comparaison entre les dimensions des poutres

Dimension	Poutres de la première phase (mm)	Poutres de la deuxième phase (mm)	% deuxième / première
d	350	177.5	50.71
b _t	508	270	53.15
h _t	102	55	53.92
h	406	220	54.13
b _w	152	95	62.33
Longueur de cisaillement « a »	(1.5 * d _I) et (3*d _I)	(1.5 * d _{II}) et (3*d _{II})	---
Distance entre appuis	(9 * d _I)	(9 * d _{II})	---
Longueur totale (mm)	3'000	4'515	---

Tableau III

Comparaison entre les renforcements des poutres de la première et de la deuxième phase

Renforcement	Poutres de la première phase	Poutres de la deuxième phase
Aire de l'acier longitudinal (mm ²)	2'000	600
Acier transversal (étriers)	Ø 8 (8 mm)	Ø 4 (4.76 mm)
Espacement acier transversal (mm)	0 / 175	0 / 100
t (CFRP) (mm)	0 / 0.1219 / 0.2438	0 / 0.0731 / 0.1463



Fig. 3-7 (a)

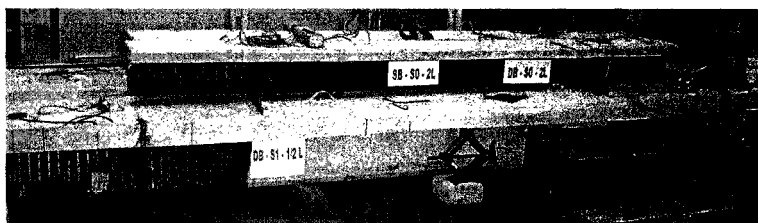


Fig. 3-7 (b)

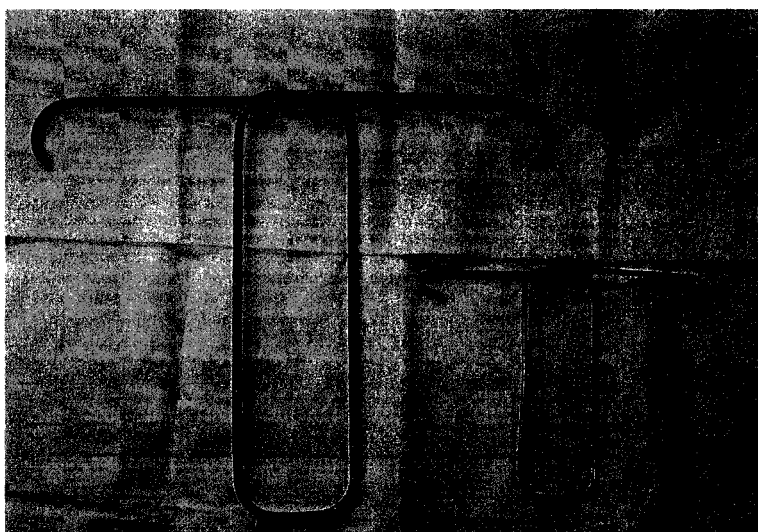


Fig. 3-7 (c)

Figure 3-7 Comparaison visuelle entre les poutres des deux phases : (a) vue transversale, (b) vue longitudinale et (c) vue des étriers

CHAPITRE 4

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Toutes les étapes de la confection des poutres des deux phases ont été réalisées au laboratoire de structures lourdes de l'ÉTS (Figure 4-1). Ce chapitre décrit les diverses étapes ayant mené à la confection des poutres, selon les dimensions définies dans le chapitre précédent, l'instrumentation utilisée ainsi que la procédure des essais.

Il faut rappeler que les poutres de la première phase ont été confectionnées et mises à l'essai dans le cadre d'un autre programme de recherche (Bousselham, 2004) avant la conception, la confection et la mise à l'essai des poutres de la deuxième phase. On se limite donc ici à la description des spécimens de la deuxième phase. Les détails des spécimens de la première phase sont publiés ailleurs (Bousselham, 2004).

4.1 Description des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, dans les deux phases, sont le béton pour la confection des poutres, l'armature d'acier pour le renforcement des poutres et le matériau composite à base de fibre de carbone (CFRP) pour le renforcement externe par collage à l'aide d'époxyde.

Ces matériaux sont fournis par l'industrie et ont été caractérisés dans le laboratoire de structures lourdes de l'ÉTS, selon les normes ASTM, pour préciser certaines de leurs caractéristiques les plus pertinentes pour l'étude.

Le tableau IV présente la composition et les caractéristiques de base du béton utilisé, alors que les tableaux V et VI présentent les propriétés mécaniques et élastiques des poutres d'armature en acier et du renfort en CFRP, respectivement.

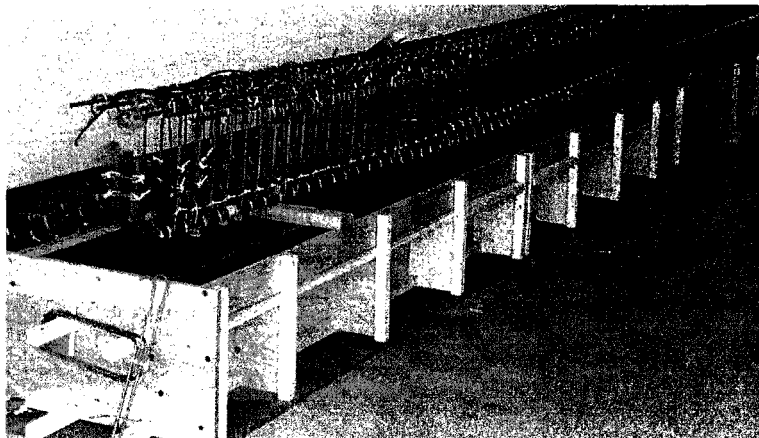


Fig. 4-1 (a)



Fig. 4-1 (b)

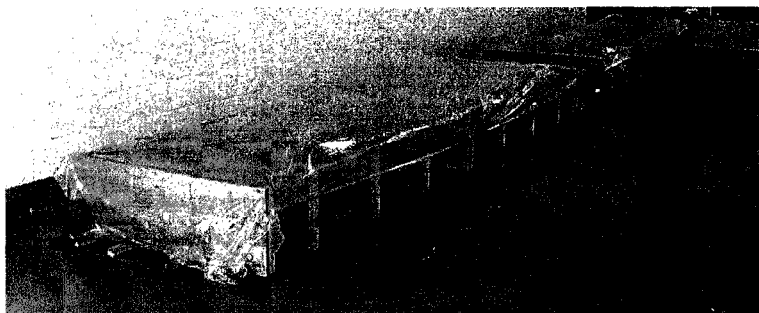


Fig. 4-1 (c)

Figure 4-1 Confection des spécimens : (a) armatures prêtes pour insertion dans le coffrage, (b) coffrage de béton et (c) cure des spécimens

Tableau IV

Composition et caractéristiques du béton utilisé

Ciment type 10	255	(kg/m ³)
Sable	1029	(kg/m ³)
Gravier	908	(kg/m ³)
Dimension du plus gros granulat utilisé « d _a »	14	(mm)
Eau	184	(kg/m ³)
Air entraîné	3	(% en volume)
Masse volumique	2360	(kg/m ³)
Affaissement au cône d'abrams	40	(mm)
Résistance en compression à 28 jours « f' _c »	24 ± 3	(MPa)

Tableau V

Propriétés mécaniques de l'acier d'armature utilisé

Programme expérimental	Identification de la barre	Propriétés mécaniques		
		Module de Young (GPa)	Contrainte limite élastique f _y (MPa)	Déformation à la plastification (μ strains)
Phase I	25 M	200	470	2400
	Ø 8 (mm)	215	650	3000
Phase II	15 M	175	420	2500
	10 M	205	530	3000
	Ø 4.76 (mm)	165	420	3300

Tableau VI
Propriétés mécaniques du CFRP utilisé

Propriétés	Manufacturier (une couche)	ÉTS (une couche)
Module de déformation (GPa)	231	243
Déformation ultime	1.4 %	1.3 %
Contrainte ultime (MPa)	3650	3100
Épaisseur (mm)	0.1219	---

4.2 Instrumentation

Il est important de déterminer le comportement de chacun des matériaux lors de la mise à l'essai. L'instrumentation sert à traduire ce comportement, en un point précis, par des mesures en temps réel de la déformation ou du déplacement. Bien qu'il soit souhaitable de saisir le maximum possible de mesures, il est important de cibler les éléments à instrumenter et préciser l'emplacement des instruments.

4.2.1 Déplacements

Pour mesurer les flèches de la poutre à mi-portée et sous le point d'application de la charge, des capteurs de déplacement, de type *Linear Variable Displacement Transducer* « LVDT », sont placés sous la poutre.

À l'extérieur des poutres, des deux côtés de la table de compression, le même type de capteur est installé pour vérifier la stabilité de la poutre et saisir, s'il y a lieu, d'éventuel déversement pendant l'essai (Photographie de la figure 4-4).

4.2.2 Déformation dans l'acier

La mesure du comportement de l'acier est effectuée par des jauges de déformation (type PL-60-11 du fournisseur Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd.) installées aux points les plus critiques, soit :

- Sur une des barres longitudinales du lit inférieur, dans les poutres élancées, deux points sont instrumentés : le premier est à droite du point d'application de la charge et le deuxième est à droite du point d'appui. Dans les poutres profondes, seuls les points à droite du point d'application de la charge sont instrumentés. Ces jauges mesurent la déformation unitaire ($\mu\epsilon$) durant le chargement, ce qui permet de vérifier si ces barres atteignent, ou non, le stade de la plastification et d'identifier, éventuellement, la charge correspondante à cette plastification.
- Dans une même perspective, on a mis en place le même type de jauges de déformation sur chacun des étriers se trouvant à l'intérieur de la longueur de cisaillement, au point de l'intersection de cet étrier avec la ligne théorique qui relie le point d'appui au point d'application de la charge.

La figure 4-2 présente les positions des différentes jauges utilisées lors des essais de la phase II.

Ces jauges de déformation sont collées à l'aide de produits fournis par le fabricant et sur des surfaces préparées selon ses instructions.

La préparation de surface consiste en un nettoyage mécanique par sablage, un lissage par limage et un nettoyage chimique par des produits nettoyants spécifiques. Cette préparation de surface est nécessaire pour garantir l'adhésion totale de la jauge à la surface.

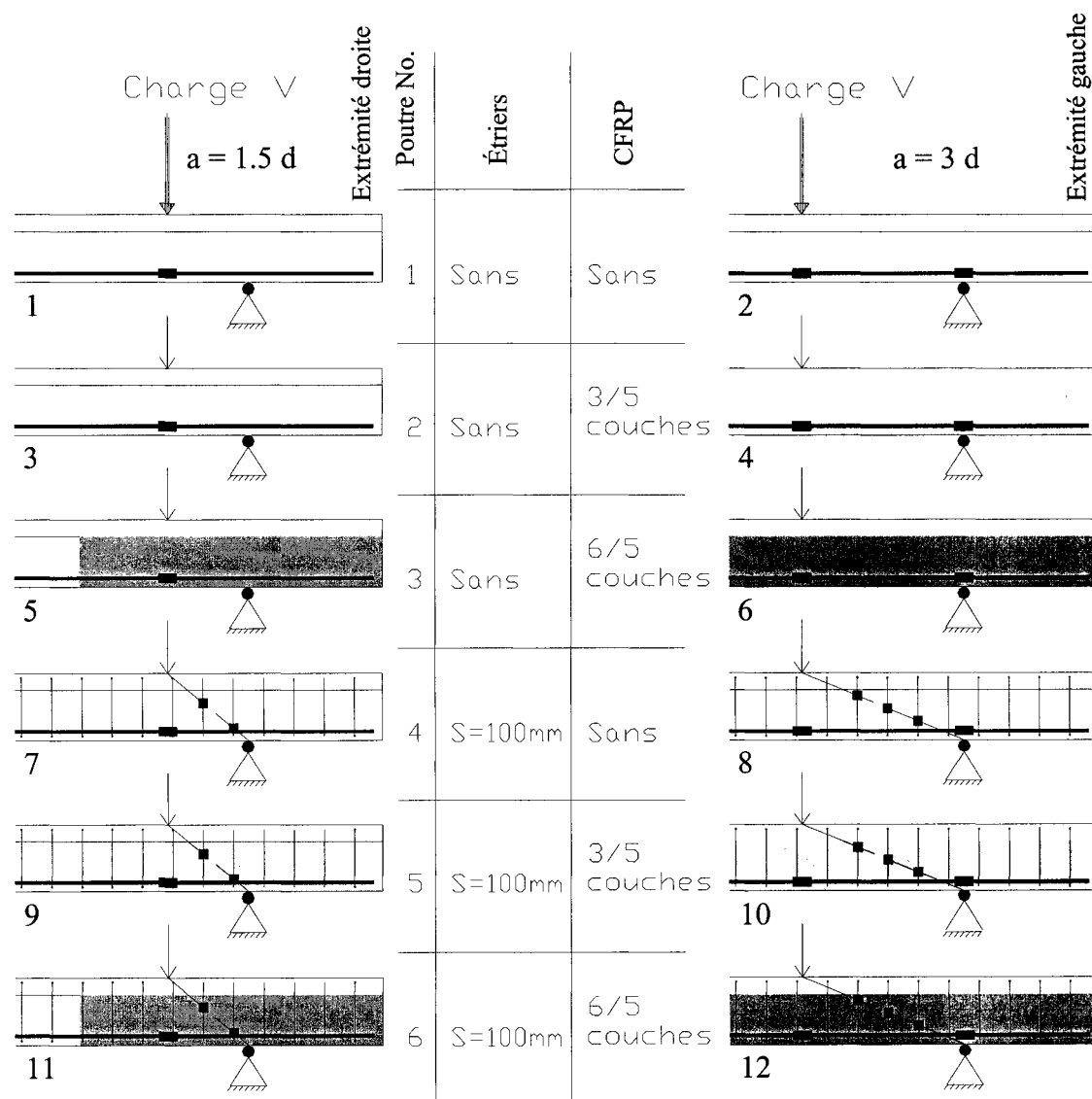


Figure 4-2 Positions des jauges de déformation dans l'acier

4.2.3 Déformation dans le béton

La mesure du comportement du béton est effectuée par des jauges de déformation. Ces jauges sont soit installées à l'intérieur de la poutre ou collées à l'extérieur en surface :

- Les jauges de déformation interne, de type PML-60 du fournisseur Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd., sont placées à l'intérieur de la poutre avant le bétonnage le long de la ligne théorique, qui joint le point d'appui au point d'application de la charge, pour mesurer l'allongement du béton et la largeur des fissures qui se propagent. La figure 4-3 montre une vue rapprochée de ce type de jauge telle qu'installée avant l'opération de bétonnage.



Figure 4-3 Jauge interne de déformation du béton

- Après la cure des jauges externes de déformation, de type PL-90-11 du fournisseur Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd., sont collées à la surface du béton le long de la ligne théorique de la fissure, comme illustré à la photographie de la

figure 4-4. Ces jauges ont pour but de valider les lectures effectuées à l'aide des jauges noyées dans le béton.

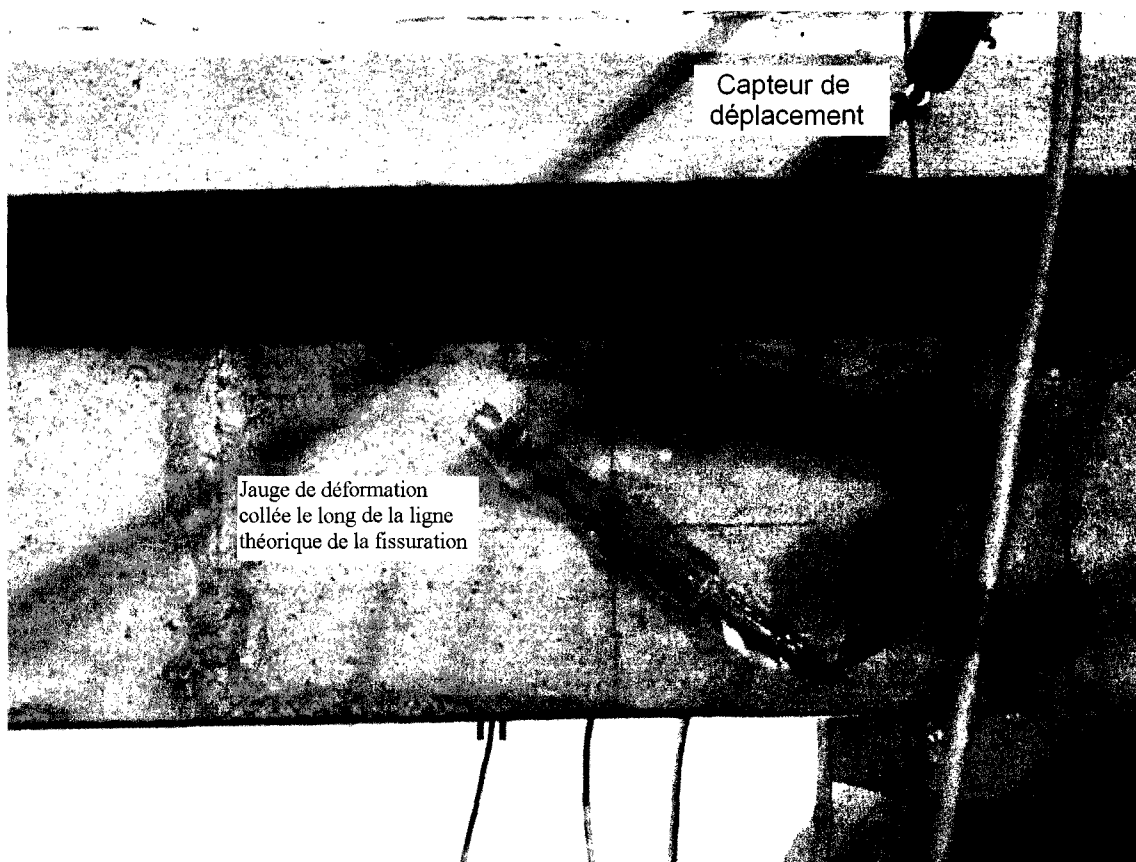


Figure 4-4 Capteur de déplacement et une jauge externe de déformation du béton

- Afin de mesurer l'ouverture des fissures dans la poutre, des capteurs de fissures « crack gages » sont installées sur l'autre face de l'âme de la poutre dans les sens horizontal et vertical, comme le montre la photographie de la figure 4-5.

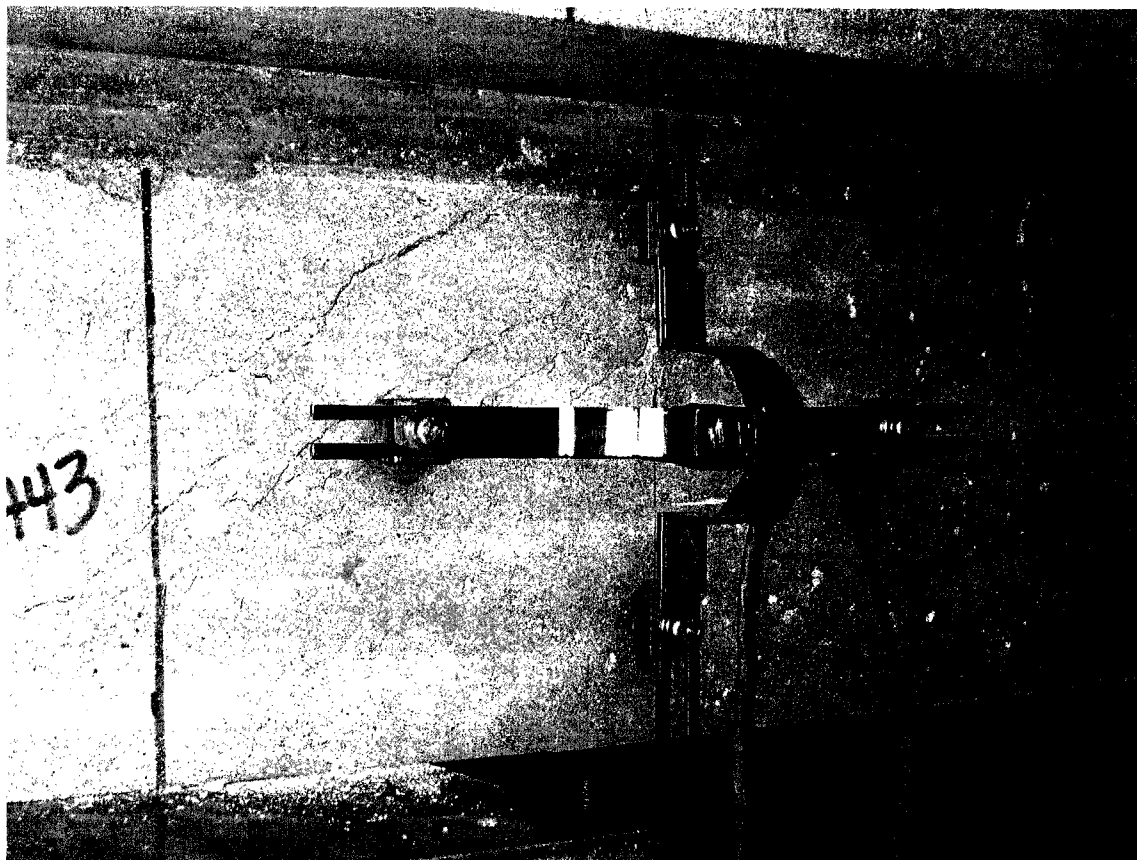


Figure 4-5 Capteurs de fissures dans les sens horizontal et vertical

4.2.4 Déformation dans le composite

En parallèle aux jauges installées sur l'acier transversal (étriers), des capteurs de fissures, « *crack gages* », sont installés sur le composite afin de comparer les déformations du CFRP collé en surface (externe) avec celles dans les étriers (interne) correspondants, comme le montre la photographie de la figure 4-6.

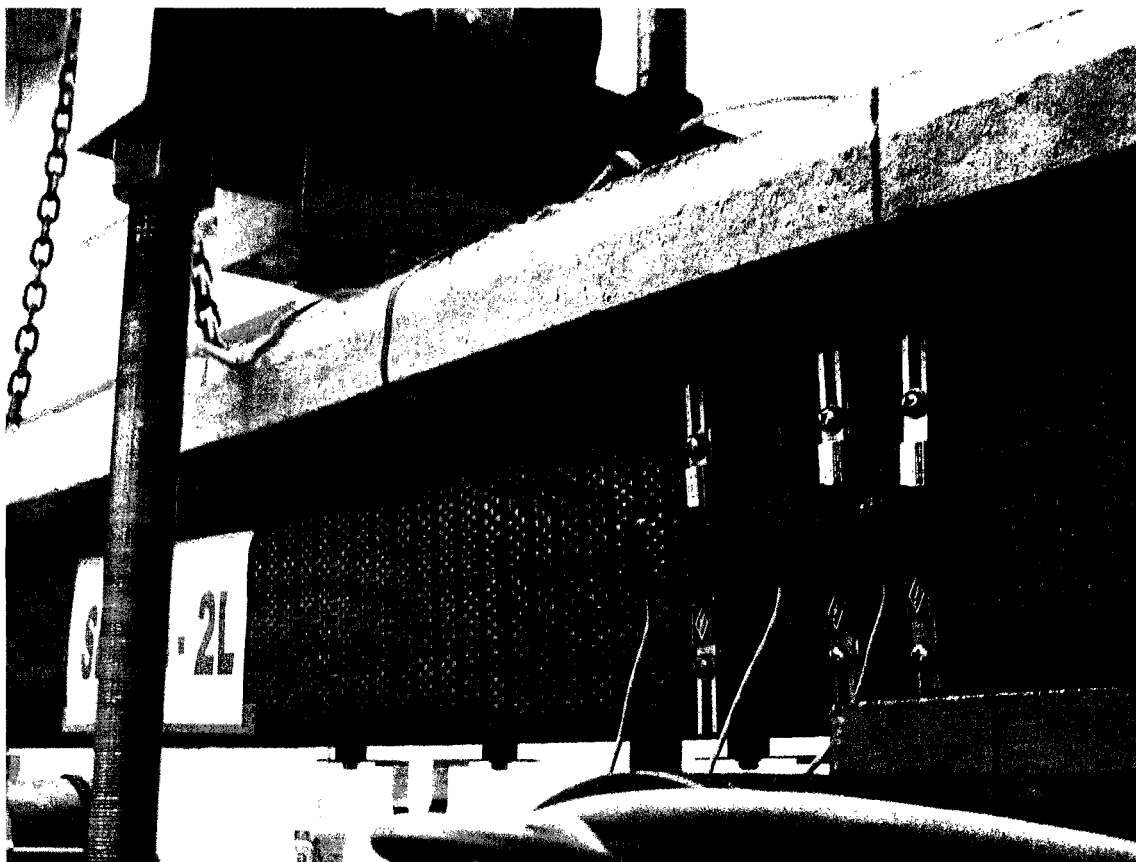


Figure 4-6 Capteurs de fissures sur le composite

4.3 Pose du CFRP

Les feuilles de CFRP sont collées sur la surface de béton à l'aide d'une colle d'époxyde recommandée par le fabricant et sur des surfaces préparées selon ses instructions. Les photographies de la figure 4-7 montrent les différentes phases d'installation du composite incluant la préparation et l'application de la colle l'époxyde.

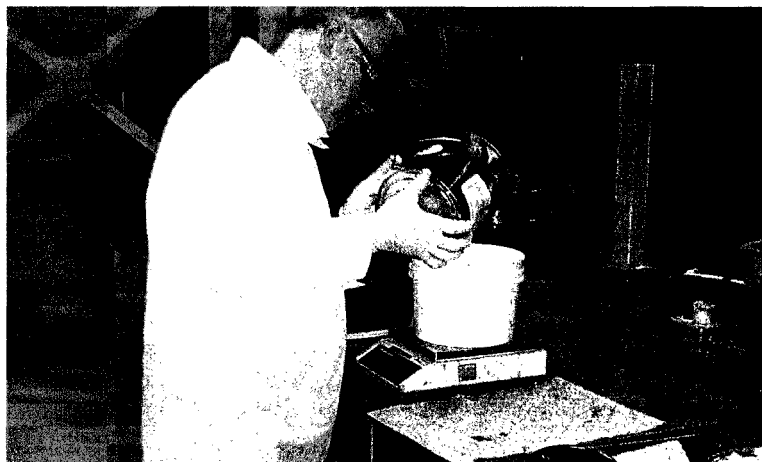


Fig. 4-7 (a)



Fig. 4-7 (b)

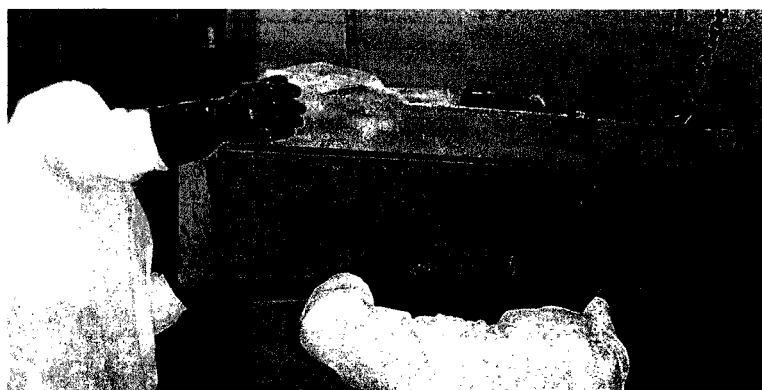


Fig. 4-7 (c)

Figure 4-7 Les étapes de la pose du CFRP : (a) préparation de l'époxyde, (b) application de l'époxyde et (c) collage des feuilles de CFRP

La préparation consiste en un nettoyage mécanique du surplus de béton dû aux défauts d'alignement de coffrage, pour éviter une concentration des contraintes qui peut causer la déchirure de la feuille de CFRP, et un nettoyage à jet d'eau, pour dégager les débris et la poussière qui peuvent empêcher le collage. Sur les surfaces propres et sèches du béton, la colle époxyde est alors appliquée en deux couches avant de mettre en place les feuilles découpées au préalable.

Pour les poutres renforcées à l'aide des feuilles en CFRP collées en surface à l'aide d'époxyde, un délai minimal de 15 heures entre la pose de feuilles et la mise à l'essai a été observé afin d'assurer la prise de l'époxyde et une adhérence aussi parfaite que possible des feuilles en CFRP au béton. Dans le cas de renforcement à l'aide de deux couches, un délai d'une heure est observé entre la pose de la première et celle de la deuxième couche.

4.4 Mise à l'essai et acquisition des données

Un chargement en trois points, comme le montre la photographie de la figure 4-8, a été adopté pour les deux phases. Ceci a permis de réaliser deux tests sur la même poutre, comme le montre la figure 3-5.

Tout d'abord, sur la première extrémité un test, correspondant à la catégorie des poutres profondes, est réalisé avec une charge concentrée à une distance « a » égale à ($a = 1.5 d$) à partir de l'appui. Ensuite, sur la deuxième extrémité un autre test, correspondant à la catégorie des poutres élancées, est réalisé avec une charge concentrée à une distance « a » égale à ($a = 3 d$) à partir de l'appui.

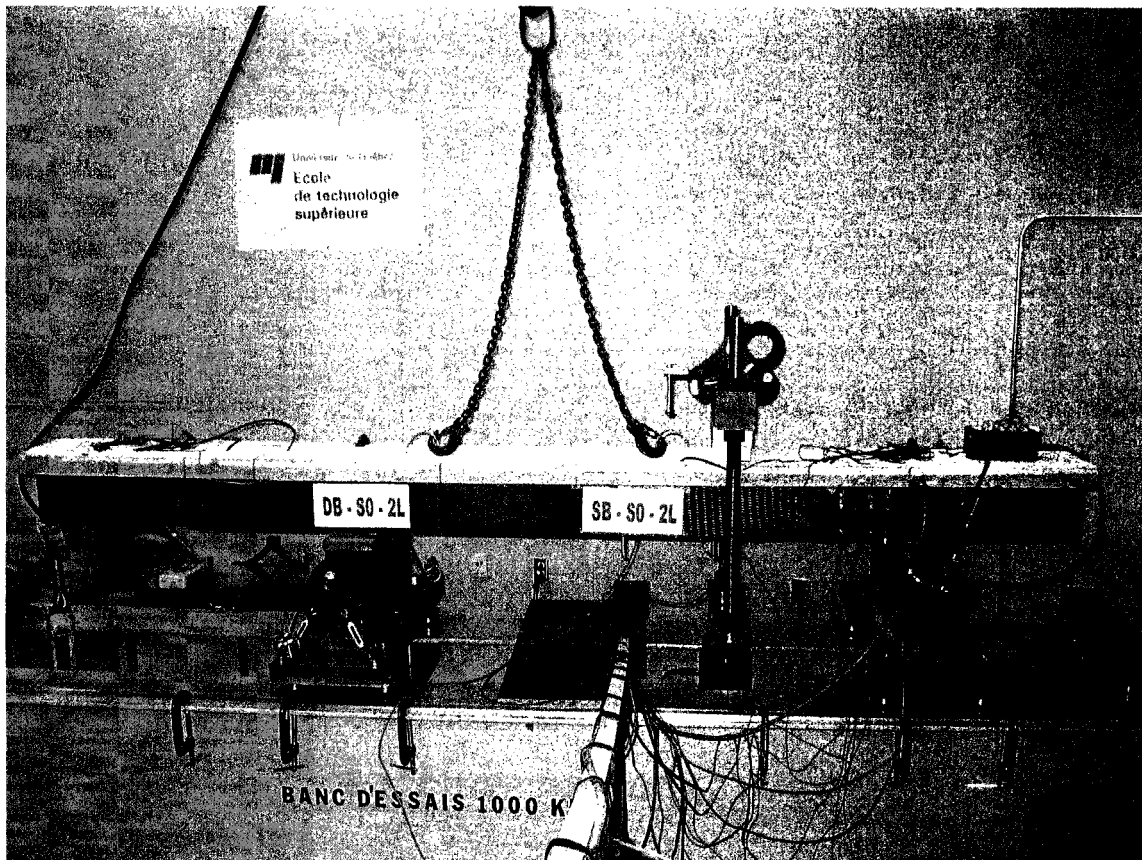


Figure 4-8 Mode de chargement

Pour assurer la stabilisation de données enregistrées par les différents instruments de mesure, la poutre incluant l'instrumentation externe et le câblage est posée sur le banc d'essai la veille de l'essai.

La charge concentrée est appliquée à l'aide d'un vérin hydraulique (type ASSY-243.45) doté d'une capacité de 500 kN. Le vérin est actionné à une vitesse constante de 2 mm /min.

Un système automatique d'acquisition des données a été utilisé (Figure 4-9). Ce système permet la saisie et l'acquisition continue des données, notamment celles relatives à la charge appliquée et aux déformations et aux flèches correspondantes.

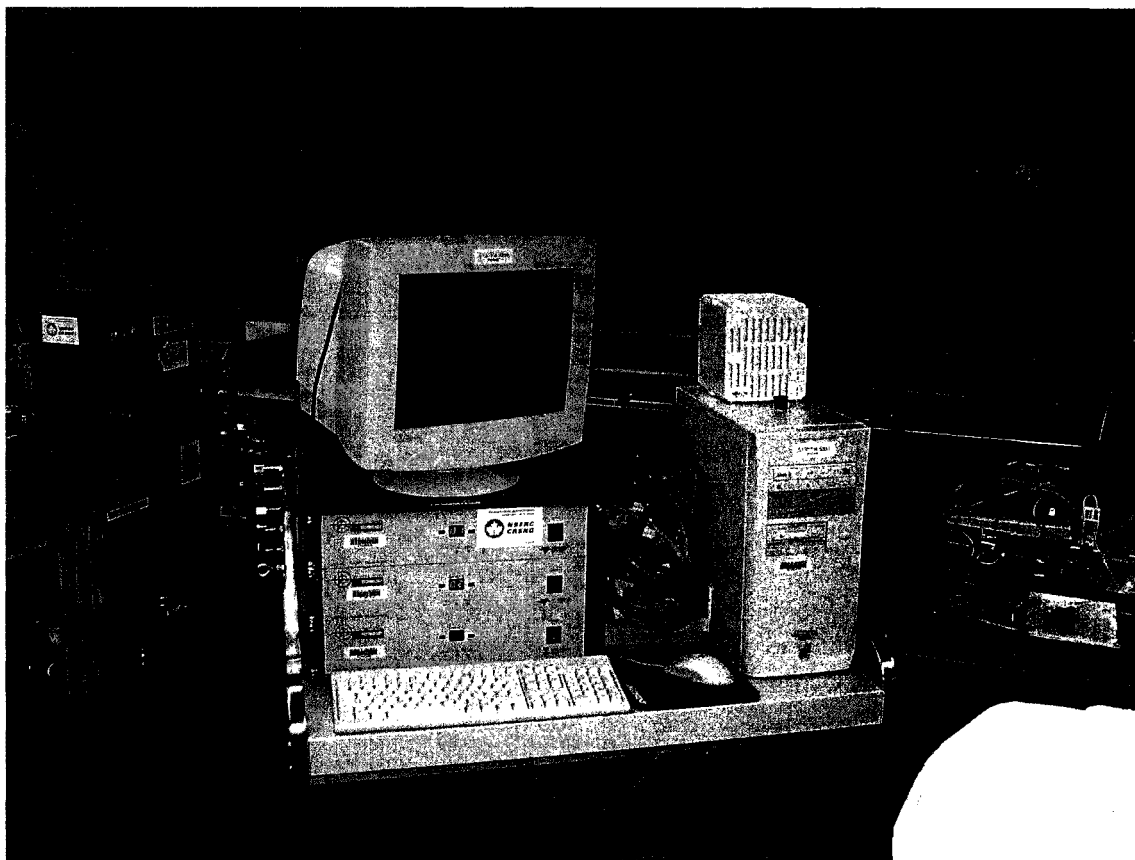


Figure 4-9 Système d'acquisition des données

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les essais effectués sur les poutres dans les deux phases étaient concluants. L'instrumentation, qui a bien fonctionné, a saisi fidèlement les réponses des divers éléments de poutres lors des essais et a montré qu'aucune des poutres n'avait subi de déversement.

Le nombre de mesures prises lors des essais dépasse ce que notre étude, de l'effet d'échelle, exige. Ces mesures sont toutefois nécessaires pour mener un vaste programme d'études à volets multiples sur le renforcement en cisaillement des poutres en béton armé à l'aide de feuilles en CFRP. Ce mémoire, qui fait partie de ce vaste programme, vise uniquement l'étude de l'effet d'échelle dans de telles poutres. Par conséquent, nous n'étudierons que les données servant à la comparaison du gain entre les poutres de taille régulière de la première phase avec les poutres de taille réduite de la deuxième phase.

L'évaluation de l'effet d'échelle se fait par la comparaison entre la poutre régulière et la poutre réduite d'un même couplet. Pour quantifier les gains obtenus dus à l'ajout de CFRP, nous comparons les poutres renforcées en CFRP, de la même série et de la même taille, à la poutre témoin non renforcée correspondante.

5.1 Analyse de la performance en terme de résistance en cisaillement

Le tableau VII présente les lectures les plus pertinentes relatives aux douze essais de la première phase (poutres de taille régulière) subdivisés selon les séries. On y trouve les valeurs de la charge de rupture « P_{max} » ainsi que les valeurs des flèches à mi-portée correspondantes aux moments de la rupture. De façon simultanée, le tableau VIII

présente les lectures correspondantes aux douze autres poutres de la deuxième phase (poutres de taille réduite).

Tableau VII

Résultats expérimentaux relatifs à la première phase

			CFRP	$P_{\max}$ (kN)	Flèche à mi-portée (mm)	$V_{\max}$ (kN) ^a	V_c (kN) ^b	V_s (kN) ^c	V_{CFRP} (kN) ^d
Phase 1 (poutres régulières)	Poutres profondes	Série 1 (sans étriers)	0 C	214.4	3.03	178.2	178.17	---	---
			1 C	343.6	5.20	285.5			107.4
			2 C	347.8	4.89	289.0			110.9
		Série 2 (avec étriers)	0 C	389.3	5.85	323.5		145.3	---
			1 C	427.8	7.17	355.5			32.0
			2 C	430.5	6.82	357.8			34.2
	Poutres élancées	Série 3 (sans étriers)	0 C	122.7	2.54	81.2	81.20	---	---
			1 C	181.2	4.09	120.0			38.8
			2 C	183.8	3.97	121.7			40.5
		Série 4 (avec étriers)	0 C	397.0	15.15	262.8		181.6	---
			1 C	385.2	14.37	255.0			-7.8
			2 C	403.6	15.33	267.2			4.4

^a $V_{\max}$ est la résistance maximale de la poutre en cisaillement = $0.831 P_{\max}$ pour les poutres profondes et $0.662 P_{\max}$ pour les poutres élancées.

^b V_c est la contribution du béton [= $V_{\max}$ de la poutre sans aucun renforcement en cisaillement].

^c V_s est la contribution des étriers [= $V_{\max}$ (du spécimen renforcé à l'aide des étriers) - $V_{\max}$ (du spécimen sans renforcement)].

^d V_{CFRP} est la contribution du CFRP [= $V_{\max}$ (du spécimen renforcé à l'aide d'une couche de CFRP) - $V_{\max}$ (du spécimen sans renforcement)].

Tableau VIII

Mesures pertinentes à l'effet d'échelle de la deuxième phase

			CFRP	$P_{\max}$ (kN)	Flèche à mi-portée (mm)	$V_{\max}$ (kN) ^e	V_c (kN) ^f	V_s (kN) ^g	V_{CFRP} (kN) ^h
Phase 2 (poutres réduites)	Poutres profondes	Série 1 (sans étriers)	0 C	176.2	3.99	146.40	146.40	---	---
			1 C	194.7	4.54	161.80			15.40
			2 C	192.8	4.46	160.22			13.82
		Série 2 (avec étriers)	0 C	179.8	4.45	149.41		3.01	---
			1 C	195.1	4.62	162.13			12.72
			2 C	200.2	4.66	166.37			16.96
	Poutres élancées	Série 3 (sans étriers)	0 C	54.3	1.77	35.90	35.90	---	---
			1 C	89.2	4.68	59.10			23.20
			2 C	103.0	4.67	68.20			32.30
		Série 4 (avec étriers)	0 C	139.7	8.10	92.48		56.58	---
			1 C	143.9	7.90	95.26			2.78
			2 C	158.0	8.61	104.60			12.12

La valeur de la résistance maximale de la poutre en cisaillement « $V_{\max}$ » correspondante à « $P_{\max}$ » est calculée et présentée dans les tableaux VII et VIII. En comparant les valeurs de « $V_{\max}$ » relatives aux différents essais de la même série, nous évaluons la

^e $V_{\max}$ est la résistance maximale de la poutre en cisaillement = $0.831 P_{\max}$ pour les poutres profondes et $0.662 P_{\max}$ pour les poutres élancées.

^f V_c est la contribution du béton [= $V_{\max}$ de la poutre sans aucun renforcement en cisaillement].

^g V_s est la contribution des étriers [= $V_{\max}$ (du spécimen renforcé à l'aide des étriers) - $V_{\max}$ (du spécimen sans renforcement)].

^h V_{CFRP} est la contribution du CFRP [= $V_{\max}$ (du spécimen renforcé à l'aide d'une couche de CFRP) - $V_{\max}$ (du spécimen sans renforcement)].

contribution à la résistance en cisaillement des différentes composantes : béton « V_c », aciers « V_s » et CFRP « V_{CFRP} ».

Dans ce qui suit, pour chacune des séries, une figure est présentée montrant les courbes représentant l'effort tranchant « V » en fonction de la flèche à mi-portée pour les six essais de la même série (trois dans chaque phase).

Aussi, un tableau est présenté. Ce dit tableau résume les valeurs des résistances maximales des poutres pour chacune des séries « V_{max} » et les gains en résistance en cisaillement maximale attribués à l'ajout du CFRP pour chacune des deux phases. Ces gains sont :

A. Le gain dû à l'ajout du CFRP de la poutre renforcée par rapport à la poutre sans

CFRP. Ce gain est évalué, en pourcentage, par le terme $\left[\left(\frac{V_{1c} - V_{0c}}{V_{0c}} \right) * 100 \right]$ dans

le cas de renforcement des poutres à l'aide d'une couche de CFRP (1C), et par le

terme $\left[\left(\frac{V_{2c} - V_{0c}}{V_{0c}} \right) * 100 \right]$ dans le cas de renforcement des poutres à l'aide de

deux couches de CFRP (2C). Les termes « V_{1c} » et « V_{2c} » représentent les résistances en cisaillement maximales des poutres renforcées, avec une et deux couches de CFRP, respectivement, et « V_{0c} » est la résistance en cisaillement maximale des poutres témoins, non renforcées avec du CFRP.

B. Le gain dû à l'ajout de la deuxième couche du CFRP, par rapport à la poutre renforcée à l'aide d'une couche de CFRP. Ce gain est évalué, en pourcentage,

par le terme $\left[\left(\frac{V_{2c} - V_{1c}}{V_{1c}} \right) * 100 \right]$.

5.1.1 Résistance en cisaillement de la Première série (PP-S0)

Les courbes de la figure 5-1, représentent les valeurs de l'effort tranchant « V » en fonction des flèches à mi-portée des six essais de la première série.

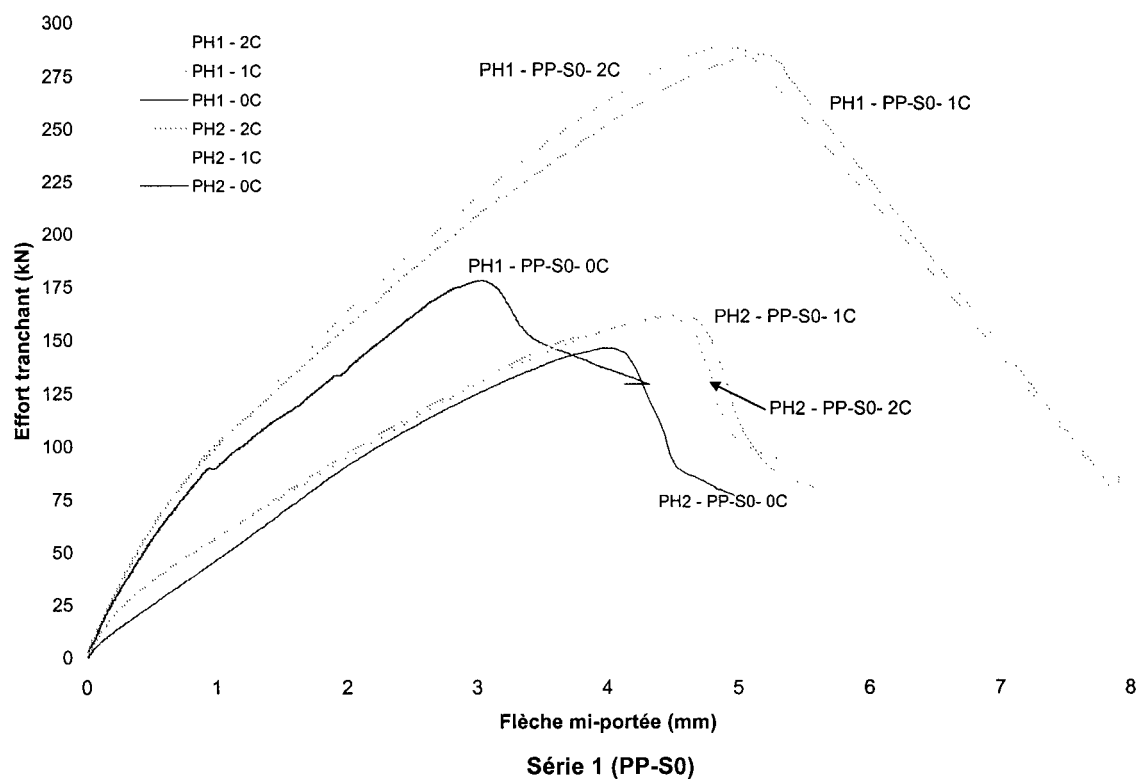


Figure 5-1 Effort tranchant « V » en fonction de la flèche à mi-portée
Première série

Les valeurs des résistances maximales en cisaillement des poutres « $V_{\max}$ » relatives à la première série (PP-S0) sont présentées dans le tableau XI.

Tableau IX

Gains de résistance en cisaillement dus à l'ajout du CFRP - Premier série (PP-S0)

CFRP	Série 1 - Phase 1 (Régulières)			Série 1 - Phase 2 (Petites)		
	$V_{\max}$ (kN)	Gain $V_{\max}/V_{0c}$ (%)	Gain V_{2c}/V_{1c} (%)	$V_{\max}$ (kN)	Gain $V_{\max}/V_{0c}$ (%)	Gain V_{2c}/V_{1c} (%)
0 C	178.2	---	---	146.4	---	---
1 C	285.5	60.3	---	161.8	10.5	---
2 C	289.0	62.2	1.22	160.2	9.4	-0.98

Les résultats présentés dans ce tableau montrent que le gain en cisaillement dû à l'ajout du CFRP, dans les poutres régulières de la première phase est de 60 %, ce qui est plus important que le gain de 10 % observé dans les petites poutres. Le gain additionnel dû à l'ajout d'une deuxième couche de CFRP est négligeable dans cette série.

5.1.2 Résistance en cisaillement de la Deuxième série (PP-S1)

Les courbes de la figure 5-2 représentent les valeurs de l'effort tranchant « V » en fonction des flèches à mi-portée des six essais de la deuxième série.

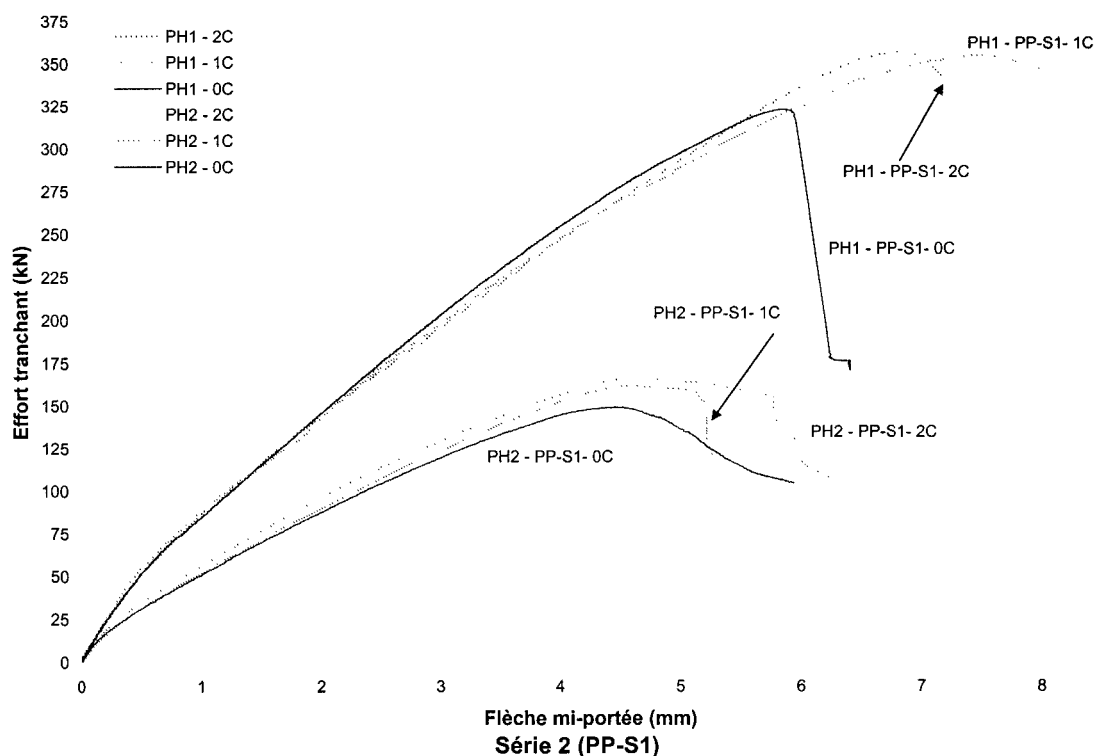


Figure 5-2 Effort tranchant « V » en fonction de la flèche à mi-portée
Deuxième série

Les valeurs des résistances maximales en cisaillement des poutres « $V_{\max}$ », de la deuxième série (PP-S1), sont présentées dans le tableau X.

Tableau X

Gains de résistance en cisaillement dus à l'ajout du CFRP - Deuxième série (PP-S1)

CFRP	Série 1 - Phase 1 (Régulières)			Série 1 - Phase 2 (Petites)		
	$V_{\max}$ (kN)	Gain $V_{\max}/V_{0c}$ (%)	Gain V_{2c}/V_{1c} (%)	$V_{\max}$ (kN)	Gain $V_{\max}/V_{0c}$ (%)	Gain V_{2c}/V_{1c} (%)
0 C	323.51	---	---	149.41	---	---
1 C	355.50	9.89	---	162.13	8.51	---
2 C	357.75	10.58	0.63	166.37	11.35	2.62

Les résultats présentés dans ce tableau montrent que les gains dus à l'ajout de CFRP dans les poutres régulières (autour de 10 %) sont quasi identiques à ceux relatifs aux poutres de taille réduite correspondantes. Il est à noter que le gain additionnel dû à l'ajout de la deuxième couche est minime (0.6 % pour la première phase et 2.6 % pour la deuxième phase).

5.1.3 Résistance en cisaillement de la Troisième série (PÉ-S0)

Les courbes de la figure 5-3 représentent les valeurs de l'effort tranchant « V » en fonction des flèches à mi-portée des six essais de la troisième série.

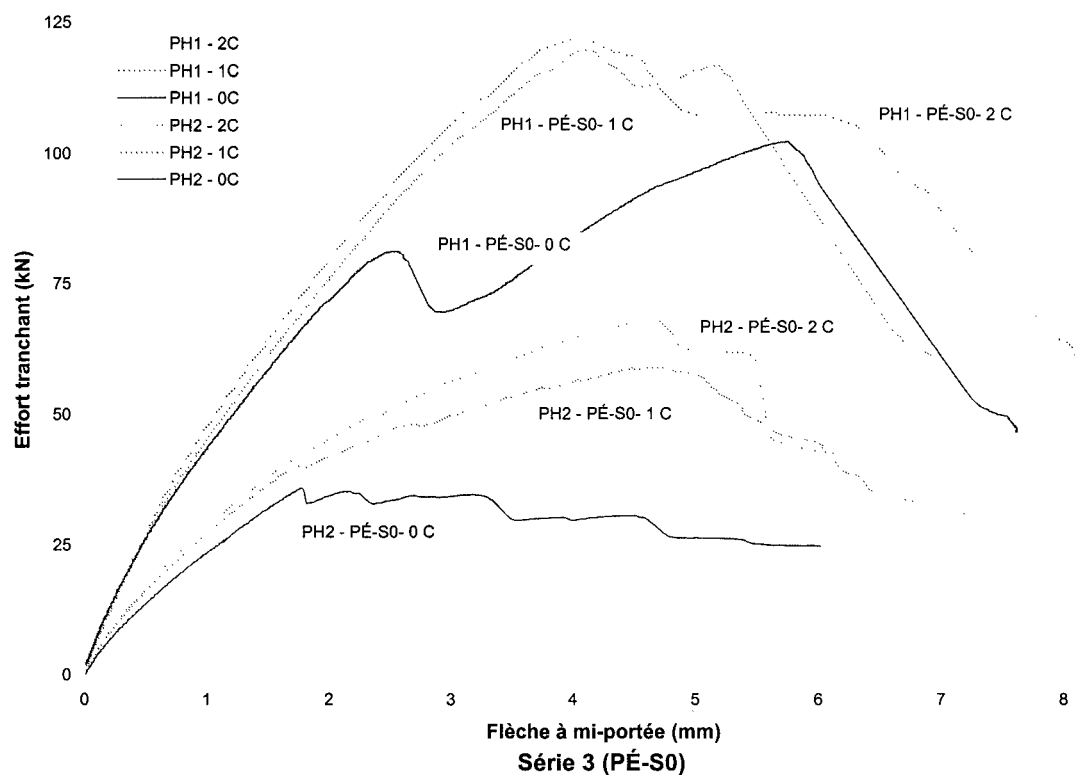


Figure 5-3 Effort tranchant « V » en fonction de la flèche à mi-portée
Troisième série

Les valeurs des résistances maximales en cisaillement des poutres « $V_{\max}$ », de la troisième série (PÉ-S0), sont présentées dans le tableau XI suivant.

Tableau XI

Gains de résistance en cisaillement dus à l'ajout du CFRP - Troisième série (PÉ-S0)

CFRP	Série 1 - Phase 1 (Régulières)			Série 1 - Phase 2 (Petites)		
	$V_{\max}$ (kN)	Gain $V_{\max}/V_{0c}$ (%)	Gain V_{2c}/V_{1c} (%)	$V_{\max}$ (kN)	Gain $V_{\max}/V_{0c}$ (%)	Gain V_{2c}/V_{1c} (%)
0 C	81.2	---	---	35.9	---	---
1 C	120.0	47.8	---	59.1	64.6	---
2 C	121.7	49.9	1.42	68.2	90.0	15.40

Les résultats présentés dans ce tableau montrent que l'ajout du CFRP a permis d'augmenter considérablement les performances des poutres de cette série (PÉ-S0), particulièrement celles des poutres de la deuxième phase où le gain dû à l'ajout d'une couche a atteint 65 % et l'ajout de la deuxième couche a résulté en un gain supplémentaire de 15 %.

5.1.4 Résistance en cisaillement de la Quatrième série (PÉ-S1)

Les courbes de la figure 5-4 représentent les valeurs de l'effort tranchant « V » en fonction des flèches à mi-portée des six essais de la quatrième série.

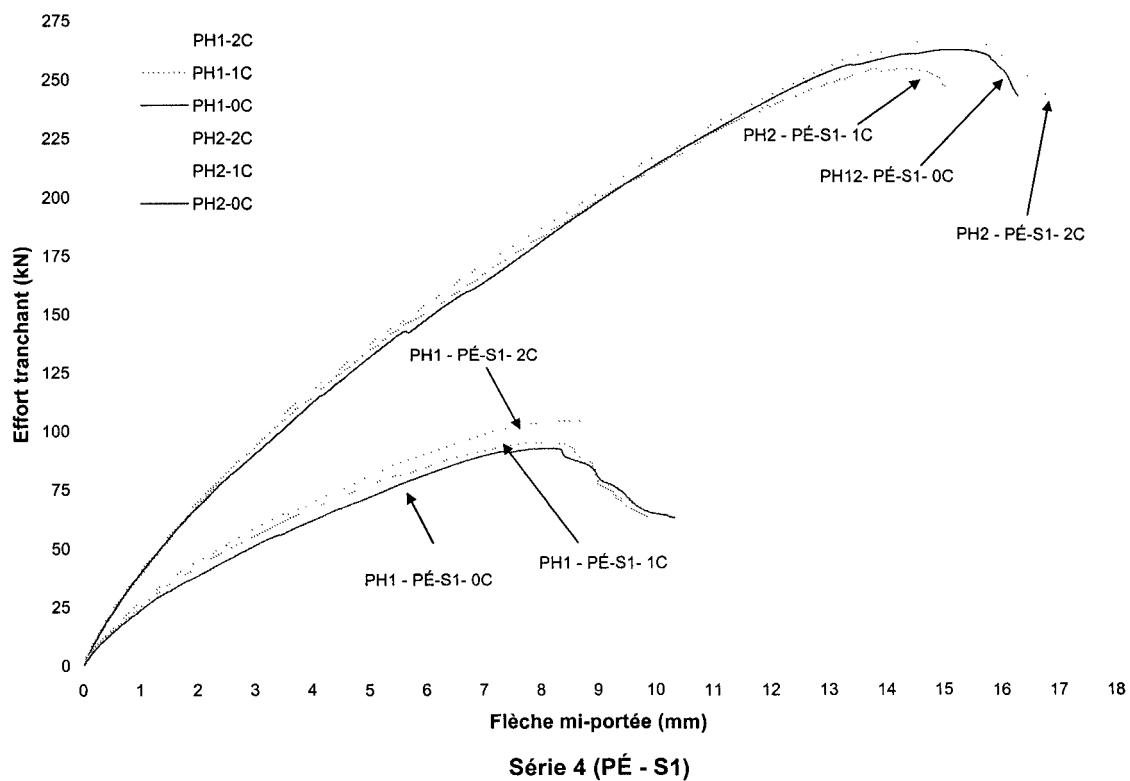


Figure 5-4 Effort tranchant « V » en fonction de la flèche à mi-portée
Quatrième série

Les valeurs des résistances maximales en cisaillement des poutres « $V_{\max}$ », de la quatrième série (PÉ-S1), sont présentées dans le tableau XII.

Tableau XII

Gains de résistance en cisaillement dus à l'ajout du CFRP - Quatrième série (PÉ-S1)

CFRP	Série 1 - Phase 1 (Régulières)			Série 1 - Phase 2 (Petites)		
	$V_{\max}$ (kN)	Gain $V_{\max}/V_{0c}$ (%)	Gain V_{2c}/V_{1c} (%)	$V_{\max}$ (kN)	Gain $V_{\max}/V_{0c}$ (%)	Gain V_{2c}/V_{1c} (%)
0 C	262.8	---	---	92.5	---	---
1 C	255.0	-3.0	---	95.3	3.0	---
2 C	267.2	1.7	4.78	104.6	13.1	9.80

Les résultats présentés dans ce tableau montrent que, contrairement à la troisième série (PÉ-S1), les poutres de cette quatrième série ne présentent aucun gain notable dû au renforcement par du CFRP. Toutefois, un gain de 13.1 % dû à l'ajout de l'équivalent de deux couches de CFRP dans la deuxième phase a été atteint.

5.2 L'influence de l'effet d'échelle sur la résistance en cisaillement

L'analyse des tableaux VII et VIII nous permet d'observer, aussi bien pour les poutres régulières de la première phase que pour les petites poutres de la deuxième phase, que :

- L'ajout de la deuxième couche du CFRP (ou de son équivalent dans les poutres réduites) n'a pas eu pour effet d'augmenter, d'une manière significative la résistance des poutres en cisaillement.
- Le gain en résistance en cisaillement dû à l'ajout du CFRP est beaucoup plus important dans les poutres sans armatures transversales (séries 1 et 3) que dans les poutres contenant des étriers (séries 2 et 4). Ce gain devient particulièrement insignifiant dans les poutres élancées contenant des étriers (série 4).

Sur la base des résultats obtenus, on observe l'absence d'un effet d'échelle significatif dans les poutres contenant des étriers, qu'elles soient profondes ou élancées (séries 2 et 4). À l'opposé, dans les poutres sans armatures transversales (séries 1 et 3), l'effet d'échelle semble être présent, mais dans deux sens opposés comme suit :

- A. Dans les poutres profondes (première série), les poutres de taille régulière renforcées à l'aide de CFRP ont montré une meilleure performance que les poutres de taille réduite correspondantes. Ainsi, à l'ajout de l'équivalent d'une couche de CFRP le gain en résistance obtenu grâce à ce rajout est de 60.3 % dans les poutres de taille régulière et de 10.5 % dans les poutres de taille réduite. À l'ajout de l'équivalent de deux couches de CFRP, le gain en résistance obtenu grâce à ce rajout est de 62.2 % dans les poutres de taille régulière et de 9.4 % dans les poutres de taille réduite. Ceci pourrait indiquer que les résistances des poutres explicites calculées à partir des modèles mathématiques et des formules de design élaborées sur la base des essais en laboratoire sur des poutres de taille réduite seraient conservatrices puisque ces modèles sous-estiment le gain dû au renfort en CFRP.
- B. Dans les poutres élancées (troisième série), les poutres de taille réduite renforcées à l'aide de CFRP ont montré une meilleure performance que les poutres de taille régulière correspondantes. Ainsi, à l'ajout de l'équivalent d'une couche de CFRP le gain en résistance obtenu grâce à ce rajout est de 64.6 % dans les poutres de taille réduite et de 47.8 % dans les poutres de taille régulière. À l'ajout de l'équivalent de deux couches de CFRP le gain en résistance obtenu grâce à ce rajout est de 90.0 % dans les poutres de taille réduite et de 49.9 % dans les poutres de taille régulière. Ceci pourrait indiquer que les résistances des poutres explicites calculées à partir des modèles mathématiques et des formules de design élaborées sur la base des essais en laboratoire sur des poutres de taille réduite seraient surestimées et seraient par conséquent non sécuritaires.

5.3 Analyse de la performance en terme de raideur

L'examen des pentes des tangentes des courbes des figures 5-1 à 5-4 (effort tranchant « V » en fonction de la flèche à mi-portée), permet de comparer les performances des poutres en terme de raideur pour chacune des quatre séries. La raideur est définie ici comme la pente de la tangente à la courbe effort tranchant versus flèche à mi-portée.

Pour comparer, en chiffres, la raideur au début du chargement des différentes poutres, on présente dans un tableau, pour chacune des séries, les valeurs des pentes des tangentes des courbes correspondant à une flèche à mi-portée de 0.5 mm pour les deux phases et pour les différents taux de renfort en CFRP. La valeur de 0.5mm pour la flèche est retenue puisque les courbes deviennent stables à partir de ce seuil. Les gains en raideur dus à l'ajout du CFRP y sont également présentés dans ces tableaux.

5.3.1 Raideur de la Première série (PP-S0)

L'examen des courbes de la première série (Figure 5-1) et l'analyse du tableau XIII, qui résume les pentes des tangentes des courbes de la première série correspondantes à une flèche à mi-portée de 0.5 mm, révèlent qu'au début du chargement les poutres de taille réduite renforcées en cisaillement à l'aide de CFRP présente un gain important en raideur (44%) en comparaison aux poutres de taille régulière qui ne présentent que (9 %) de gain.

Tableau XIII

Pentes des tangentes des courbes de la première série
correspondantes à une flèche à mi-portée de 0.5 mm

CFRP	Phase 1		Phase 2	
	Pentes des tangentes (kN / mm)	Gain dû à l'ajout du CFRP (%)	Pentes des tangentes (kN / mm)	Gain dû à l'ajout du CFRP (%)
0 C	113.34	--	50.36	--
1 C	123.98	9.39	72.46	43.88
2 C	124.32	9.69	73.46	45.87

Par la suite, la poutre témoin de taille réduite maintient sa raideur mieux que les poutres renforcées. La poutre témoin de taille régulière subit une perte nette de raideur quand « V » atteint 91 kN (soit 62 % de $V_{\max}$), cette perte est due à la parution des premières fissures. À l'opposé, les poutres renforcées à l'aide de CFRP de cette phase ne montrent pas ce type de perte subite de raideur.

5.3.2 Raideur de la Deuxième série (PP-S1)

L'examen des courbes de la deuxième série (Figure 5-2) et l'analyse du tableau XIV, qui résume les pentes des tangentes des courbes de la deuxième série correspondantes à une flèche à mi-portée de 0.5 mm, permet de constater qu'au début du chargement les courbes des poutres renforcées en CFRP se confondent avec les courbes des poutres témoins. Ceci est valable autant pour les poutres de la première phase que pour les poutres de la deuxième phase.

Tableau XIV

Pentes des tangentes des courbes de la deuxième série
correspondantes à une flèche à mi-portée de 0.5 mm

CFRP	Phase 1		Phase 2	
	Pentes des tangentes (kN / mm)	Gain dû à l'ajout du CFRP (%)	Pentes des tangentes (kN / mm)	Gain dû à l'ajout du CFRP (%)
0 C	103.54	--	62.50	--
1 C	109.90	6.14	62.66	0.26
2 C	103.22	-0.31	69.30	10.88

Vers la fin du chargement, les poutres renforcées à l'aide de CFRP de la deuxième phase maintiennent mieux leurs raideurs en comparaison à la poutre témoin sans renforcement.

5.3.3 Raideur de la Troisième série (PÉ-S0)

L'examen des courbes de la première série (Figure 5-3) et l'analyse du tableau XV, qui résume les pentes des tangentes des courbes de la troisième série correspondantes à une flèche à mi-portée de 0.5 mm, révèle qu'au début du chargement les courbes des poutres renforcées à l'aide de CFRP de la première phase se confondent avec la courbe de la poutre témoin. À l'opposé, dans la deuxième phase, on observe un gain en raideur dû à l'ajout du CFRP. Ce gain croît d'avantage avec l'ajout de la deuxième couche.

Tableau XV

Pentes des tangentes des courbes de la troisième série
correspondantes à une flèche à mi-portée de 0.5 mm

CFRP	Phase 1		Phase 2	
	Pentes des tangentes (kN / mm)	Gain dû à l'ajout du CFRP (%)	Pentes des tangentes (kN / mm)	Gain dû à l'ajout du CFRP (%)
0 C	52.12	--	27.08	--
1 C	51.90	-0.42	31.98	18.09
2 C	53.36	2.38	33.24	22.75

5.3.4 Raideur de la Quatrième série (PÉ-S1)

L'examen des courbes de la quatrième série (Figure 5-4) révèle que les courbes des poutres renforcées à l'aide de CFRP de la première phase se confondent avec la courbe de la poutre témoin, comme le démontre le tableau XVI, qui résume les pentes des tangentes des courbes correspondantes à une flèche de 0.5 mm. Cette constatation reste valable jusqu'à la fin du chargement. Cependant, dans la deuxième phase, on observe que l'ajout du CFRP a eu une légère influence sur la raideur des poutres.

Tableau XVI

Pentes des tangentes des courbes de la quatrième série
correspondant à une flèche à mi-portée de 0.5 mm

CFRP	Phase 1		Phase 2	
	Pentes des tangentes (kN / mm)	Gain dû à l'ajout du CFRP (%)	Pentes des tangentes (kN / mm)	Gain dû à l'ajout du CFRP (%)
0 C	43.82	--	27.28	--
1 C	43.70	-0.27	28.94	6.09
2 C	46.48	6.07	31.64	15.98

5.4 L'influence de l'effet d'échelle sur la raideur

En général, l'ajout de la deuxième couche de CFRP, ou de son équivalent dans le cas de poutres de taille réduite, n'a pas eu une influence significative sur la pente des courbes. On peut donc dire, autant pour les poutres de la première phase que pour les poutres de la deuxième phase, que l'ajout de la deuxième couche de CFRP n'a que peu d'influence sur la raideur des poutres.

En traçant les lignes de la raideur sécante des poutres nous avons constaté que, pour la même poutre (même taille et renforcement en cisaillement à l'aide d'étriers), la raideur sécante sous charge maximale reste pratiquement constante quelque soit le niveau de renforcement en cisaillement à l'aide de CFRP (0C, 1C et 2C). La raideur sécante est définie ici comme la droite qui passe dans l'origine des axes et le point correspondant à l'effort tranchant maximal atteint. Seule la poutre réduite de la troisième série présente une perte de raideur sécante à l'ajout du CFRP. Pour illustrer ce constat, on présente à la figure 5-5 les courbes des figures 5-1 à 5-4 avec la ligne qui représente la raideur sécante des poutres témoins (non renforcée en CFRP). En plus, on présente dans le tableau XVII les valeurs des raideurs sécantes sous charges maximales des vingt-quatre poutres

ainsi que les rapports (en pourcentage) entre la raideur sécante de chacune des poutres de la première phase (régulières) par rapport à la raideur sécante de la poutre de la deuxième phase (réduite) correspondante.

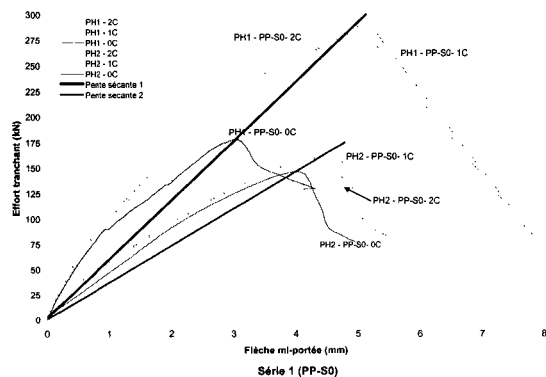


Fig. 5-5 (a)

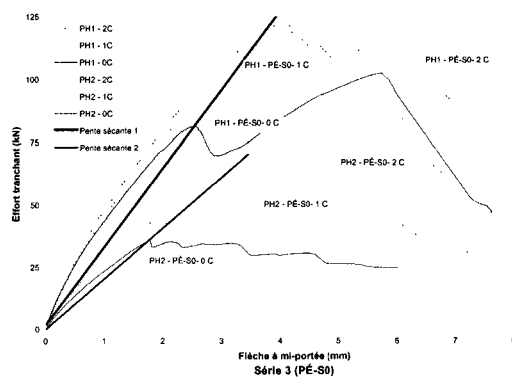


Fig. 5-5 (c)

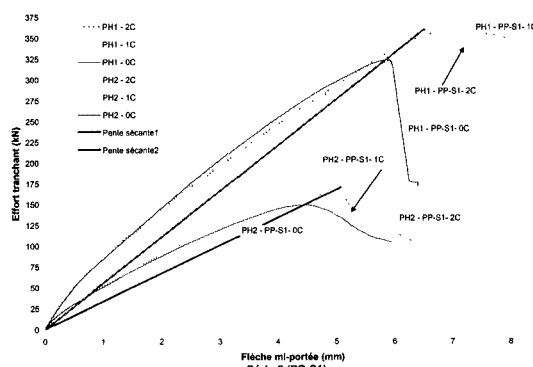


Fig. 5-5 (b)

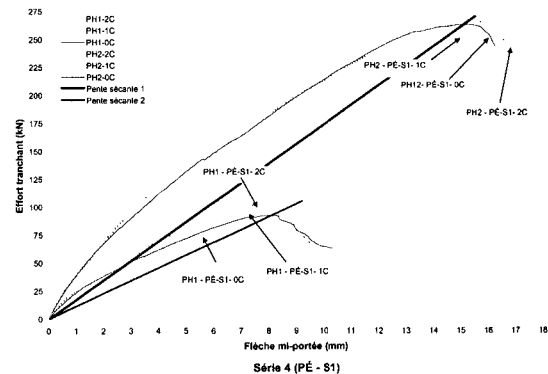


Fig. 5-5 (d)

Figure 5-5 Illustration de la raideur sécante des quatre séries : (a) série 1, (b) série 2, (c) série 3 et (d) série 4

Tableau XVII

Raideurs sécantes sous charges maximales

		À la charge maximale						Ratio de raideur phase 1 / phase 2 %
		Phase 1 (poutres régulières)			Phase 2 (poutres réduites)			
		Flèche à mi- portée (mm)	Vmax (kN)	Raideur sécante (kN / mm)	Flèche à mi- portée (mm)	Vmax (kN)	Raideur sécante (kN / mm)	
Poutres profondes	Série 1	3.03	178.2	58.81	3.99	146.4	36.69	160.3
	(sans étriers)	5.20	285.5	54.90	4.54	161.8	35.64	154.1
		4.89	289.0	59.10	4.46	160.2	35.92	164.5
	Série 2	5.85	323.5	55.30	4.45	149.4	33.58	164.7
	(avec étriers)	7.17	355.5	49.58	4.620	162.1	35.09	141.3
		6.82	357.8	52.46	4.66	166.4	35.70	146.9
Poutres élancées	Série 3	2.54	81.2	31.97	1.77	35.9	20.28	157.6
	(sans étriers)	4.09	120.0	29.34	4.68	59.1	12.63	232.3
		3.97	121.7	30.65	4.67	68.2	14.60	209.9
	Série 4	15.15	262.8	17.35	8.10	92.5	11.42	151.9
	(avec étriers)	14.37	255.0	17.75	7.90	95.3	12.06	147.2
		15.33	267.2	17.43	8.61	104.6	12.15	143.5

Le rapport entre la raideur sécante de la première phase à celle de la deuxième phase est supérieur à 100 % (i.e., 143 % à 232 %), ce qui démontre que les poutres de taille régulière sont plus raides que les poutres de taille réduite.

5.5 Analyse des flèches

Afin d'évaluer l'influence de l'effet d'échelle sur les flèches de poutres nous avons dressé quatre tableaux, soit un par série. Ces tableaux (XVIII, XIX, XX et XXI) présentent les valeurs de la flèche à mi-portée, sous la charge maximale et à la rupture pour les poutres des deux phases avec les divers taux de renforcement en CFRP. Le rapport α (tel que $\frac{L}{\alpha} = flèche \Rightarrow \alpha = \frac{L}{Flèche}$), les variations en pourcentage des valeurs des flèches dues à l'ajout du CFRP ainsi que le rapport des flèches entre les deux poutres d'un même couplet y sont également présentées. Une comparaison entre ces rapports de flèches ainsi que l'examen des courbes des figures 5-1 à 5-4 permet d'identifier l'effet d'échelle sur la flèche et d'évaluer son ampleur pour chacune des séries.

5.5.1 Flèches de la Première série (PP-S0)

On constate, à la comparaison des deux poutres témoins (sans CFRP) de cette série (Figure 5-1 et Tableau XVIII), que la flèche de la poutre réduite est plus grande que la flèche de la poutre régulière, aussi bien sous charge maximale qu'à la rupture. Dans les poutres renforcées à l'aide de CFRP, le phénomène est inversé et les poutres de tailles régulières montrent une flèche plus grande que les poutres réduites.

Tableau XVIII

Flèches à mi-portée - Première série

CFRP	Sous charge maximale							À la rupture						
	Phase 1 $L_a^a = 3111$ mm			Phase 2 $L_a^a = 1582$ mm			Ph. 1 / Ph. 2 ^d (%)	Phase 1 $L_a^a = 3111$ mm			Phase 2 $L_a^a = 1582$ mm			Ph. 1 / Ph 2 ^d (%)
	Flèche	α^b	Δ^c	Flèche	α^b	Δ^c		Flèche	α^b	Δ^c	Flèche	α^b	Δ^c	
	(mm)		%	(mm)		%		(mm)		%	(mm)		%	
0 C	3.03	1027	--	3.99	396	--	76	4.42	704	--	4.96	319	--	89
1 C	5.2	598	72	4.54	348	14	115	7.85	396	78	5.58	284	13	141
2 C	4.89	636	61	4.46	355	12	110	7.81	398	77	5.36	295	8	146

Le renforcement des poutres à l'aide de CFRP a permis une augmentation de la flèche. Cette augmentation est plus importante dans les poutres de la première phase que dans les poutres de la deuxième phase (70 % versus 12 %).

5.5.2 Flèches de la Deuxième série (PP-S1)

L'analyse des flèches de cette série indique que les poutres réduites de cette série n'affichent pas de variation en flèche suite à l'ajout du CFRP. Les poutres de taille régulière affichent une augmentation en flèche de l'ordre de 20 % (Tableau XIX). Aussi, le rapport entre les flèches (poutres régulières versus réduites) affiche une légère augmentation en cas de renforcement.

^a Longueur entre les appuis

^b Rapport entre la longueur et la flèche

^c Variation de la flèche due au renfort CFRP

^d Rapport entre les flèches des deux phases (phase1 / phase 2)

Tableau XIX

Flèches à mi-portée - Deuxième série

CFRP	Sous charge maximale							À la rupture						
	Phase 1 $L_a^a = 3111$ mm			Phase 2 $L_a^a = 1582$ mm			Ph. 1 / Ph. 2 ^d (%)	Phase 1 $L_a^a = 3111$ mm			Phase 2 $L_a^a = 1582$ mm			Ph. 1 / Ph 2 ^d (%)
	Flèche	α^b	Δ^c	Flèche	α^b	Δ^c		Flèche	α^b	Δ^c	Flèche	α^b	Δ^c	
	(mm)		%	(mm)		%		(mm)		%	(mm)		%	
0 C	5.85	532	--	4.45	356	--	131	6.41	485	--	5.94	266	--	108
1 C	7.17	434	23	4.62	342	4	155	7.66	406	20	5.28	300	-11	145
2 C	6.82	456	17	4.66	339	5	146	7.19	433	12	6.30	251	6	114

5.5.3 Flèches de la Troisième série (PÉ-S0)

L'examen de la figure 5-1 montre que les poutres renforcées de la première phase (taille régulière) affichent sous charge maximale une flèche plus petite que la flèche des poutres de la deuxième phase (taille réduite). À l'opposé, dans le couplet des poutres témoins, c'est-à-dire non renforcées, la poutre de taille régulière affiche une flèche à mi-portée plus élevée que la flèche de la poutre de taille réduite.

^a Longueur entre les appuis^b Rapport entre la longueur et la flèche^c Variation de la flèche due au renfort CFRP^d Rapport entre les flèches des deux phases (phase1 / phase 2)

Tableau XX

Flèches à mi-portée -Troisième série

CFRP	Sous charge maximale							À la rupture						
	Phase 1 $L_a^a = 3111$ mm			Phase 2 $L_a^a = 1582$ mm			Ph. 1 / Ph. 2 ^d (%)	Phase 1 $L_a^a = 3111$ mm			Phase 2 $L_a^a = 1582$ mm			Ph. 1 / Ph 2 ^d (%)
	Flèche	α^b	Δ^c	Flèche	α^b	Δ^c		Flèche	α^b	Δ^c	Flèche	α^b	Δ^c	
	(mm)		%	(mm)		%		(mm)		%	(mm)		%	
0 C	2.54	1225	--	1.77	894	--	144	7.62	408	--	6.02	263	--	127
1 C	4.09	761	61	4.68	338	164	87	6.95	448	-9	7.48	211	24	93
2 C	3.97	784	56	4.67	339	164	85	8.23	378	8	6.16	257	2	134

Sous la charge maximale, avec l'ajout du CFRP, les poutres de la première phase affichent une augmentation de la flèche de 60 % dans la première phase et de 164 % dans la deuxième phase (Tableau XX). Ces augmentations sont relativement élevées si on les compare avec les augmentations observées dans d'autres séries.

À la rupture, les poutres de taille régulière affichent des flèches légèrement plus grandes que les flèches des poutres de taille réduite.

^a Longueur entre les appuis

^b Rapport entre la longueur et la flèche

^c Variation de la flèche due au renfort CFRP

^d Rapport entre les flèches des deux phases (phase1 / phase 2)

5.5.4 Flèches de la Quatrième série (PÉ-S1)

Tableau XXI

Flèches à mi-portée - Quatrième série

CFRP	Sous charge maximale							À la rupture						
	Phase 1 $L_a^a = 3111$ mm			Phase 2 $L_a^a = 1582$ mm			Ph. 1 / Ph. 2 ^d (%)	Phase 1 $L_a^a = 3111$ mm			Phase 2 $L_a^a = 1582$ mm			Ph. 1 / Ph 2 ^d (%)
	Flèche	α^b	Δ^c	Flèche	α^b	Δ^c		Flèche	α^b	Δ^c	Flèche	α^b	Δ^c	
	(mm)		%	(mm)		%		(mm)		%	(mm)		%	
0 C	15.2	205	--	8.10	195	--	187	16.3	191	--	10.3	154	--	158
1 C	14.4	216	-5	7.90	200	-2	182	15.1	206	-7	9.88	160	-4	153
2 C	15.3	203	1	8.61	184	6	178	17.6	177	8	9.62	164	-7	183

Contrairement à la série précédente, cette série ne présente pas de variation de flèche suite au renforcement. Le rapport entre les flèches des poutres de la première phase et de la deuxième phase, qu'elles soient renforcées ou non, reste quasi constant (Tableau XXI).

5.6 L'influence de l'effet d'échelle sur les flèches

L'examen des figures 5-1 à 5-4 permet de constater qu'en général les mêmes tendances de variation de flèche sont observées, sous la charge maximale et à la fin de l'essai. Par

^a Longueur entre les appuis

^b Rapport entre la longueur et la flèche

^c Variation de la flèche due au renfort CFRP

^d Rapport entre les flèches des deux phases (phase1 / phase 2)

ailleurs, pour les quatre séries, l'ajout de la deuxième couche de CFRP ou de son équivalent n'a pas eu une influence significative sur les valeurs de la flèche.

Les poutres renforcées avec des étriers (séries 2 et 4) ne sont pas influencées par l'effet d'échelle puisque les rapports entre les flèches des poutres régulières et les flèches des poutres de taille réduite restent pratiquement constants.

Les poutres sans étriers des séries 1 et 3 montrent deux tendances opposées. Alors que le rapport des flèches des poutres de la première phase par rapport aux flèches des poutres de la deuxième phase augmente grâce au renforcement en CFRP dans la première série, il baisse dans la troisième série.

5.7 Analyse du mode de rupture

L'observation des essais en laboratoire montre que toutes les poutres ont subi une rupture en cisaillement comme prévu par le design. Ceci est confirmé par l'examen des figures 5-1 à 5-4.

L'examen de chacune des figures montre que les allures des courbes d'un même couplet, qui ne se distinguent que par la taille, se ressemblent en général. Il n'y a donc pas, en ce qui concerne le mode de rupture, d'influence de l'effet d'échelle. Ceci est vrai dans les quatre séries considérées dans cette étude.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La présente étude a trait à l'effet d'échelle sur le comportement des poutres en béton armé renforcées à l'aide de MCA. Les objectifs de l'étude sont :

- (a) Faire une revue de la littérature reliée à l'effet d'échelle;
- (b) Entreprendre une investigation expérimentale;
- (c) Évaluer l'effet d'échelle sur la base des résultats expérimentaux.

L'étude comporte d'une part un volet théorique incluant une revue bibliographique et d'autre part une étude expérimentale impliquant des essais sur poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de MCA.

L'étude a permis de dégager les conclusions suivantes :

- La rupture en cisaillement de toutes les poutres indique (i) le succès du design qui visait ce mode de rupture et non une rupture par flexion, (ii) la bonne adhésion entre le béton et le composite, puisque aucune des poutres n'a subi une rupture par décollement et (iii) que l'effet d'échelle n'influence pas le mode de rupture, puisque les poutres régulières et les poutres réduites ont rompu selon le même mode de rupture.
- Le rapport entre la raideur sécante des poutres régulières et celle des poutres réduites des quatre séries varie entre 143 % à 232 %. Ceci indique que l'effet d'échelle influence la raideur des poutres renforcées à l'aide de feuilles en CFRP collées en surface en forme de "U", au même titre que les poutres sans renfort.
- Dans les quatre séries l'ajout de la deuxième couche de CFRP, ou de son équivalent dans les poutres réduites, n'a pas eu un effet significatif sur le comportement des poutres. Ce résultat confirme les conclusions de Chaallal et coll. (2002).

- Dans les poutres renforcées à l'aide d'étriers (séries 2 et 4), le renforcement à l'aide de CFRP n'a pas eu une influence significative sur le comportement des poutres contenant des étriers, qu'elles soient profondes ou élancées.
- Dans les poutres non renforcées à l'aide d'étriers (séries 1 et 3), l'ajout du CFRP comme renfort en cisaillement, a augmenté, en général, les performances des poutres, en terme de résistance en cisaillement. Dans la première série (poutres profondes) on observe que ces gains (en pourcentage) sont plus élevés dans les poutres de taille régulière que dans les poutres de taille réduite. Par contre dans la troisième série (poutres élancées), les poutres de taille réduite affichent des gains (en pourcentage) plus élevés que ceux des poutres de taille régulière.

Donc, pour ces poutres sans étriers, les conclusions déduites à partir d'essais effectués sur des spécimens de taille réduite sont conservatrices si elles concernent les poutres profondes (série 1) et non sécuritaires si elles concernent les poutres élancées (série 3).

Cependant, malgré que nos observations sont incontestables sur l'existence de l'effet d'échelle dans les poutres sans armatures transversales, des investigations supplémentaires pourraient être envisagées afin d'évaluer son ampleur avec plus de précision. D'autre part, afin de lever certaines limitations et d'étendre les champs d'application de cette étude à des poutres représentatives de celles du bâti existant, il est recommandé d'effectuer des essais sur des poutres réalisées avec du béton plus maigre que le béton utilisé dans cette étude et armées avec un faible taux d'armature transversale.

BIBLIOGRAPHIE

ACI Committee 318 (1999). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318-95)*. Detroit: American Concrete Institute.

ACI Committee 446 (1991). *Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determination of Material Properties*. Detroit: American Concrete Institute.

ASCE-ACI committee 445 (1998). Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete. *Journal of Structural Engineering / December 1998*, 1375-1417.

Bazant, Z.P. (1997). Fracturing Truss Model: Size Effect in Shear Failure of Reinforced Concrete. *Journal of Engineering Mechanics / December 1997*, 1276-1288.

Bazant, Z.P., Kim, J.K. (1984). Size Effects in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams. *ACI Journal / September-October 1984*, 456-468.

Beeby, A.W., Narayanan R.S. (1995). *Designers' Handbook to Eurocode 2*. London: Thomas Telford.

Bousselham, A. (2005). *Renforcement en cisaillement des poutres en béton armé à l'aide de MCA*. Thèse de doctorat, Département de génie de la construction, École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal, Canada, (soutenance prévu en janvier 2005).

Bousselham, A., Chaallal, O. (2004). Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer: Assessment of Influencing Parameters and Required Research. *ACI Structural Journal / Mars-April 2004*, 219-227.

Canadian Portland Cement Association (1995). *Concrete Design Handbook*. Norme CSA-CAN-A23.3, Second Edition. Canada.

Chaallal, O., Shahawy, Hassan, M. (2002). Performance of Reinforced Concrete T-Girders Strengthened in Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Fabric. *ACI Structural Journal / May-June 2002*, 335-343.

Deniaud, C., Cheng, J. J.R. (2001a). Shear Behavior of Reinforced Concrete T-Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Sheets. *ACI structural journal / May-June 2001*, 386-394.

Deniaud, C., Cheng, J. J.R. (2001b). Review of Shear Design Methods for Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fibre Reinforced Polymer Sheets. *Canadian Journal of Civil Engineering* / April 2001, 271-281.

Institut de recherche en construction. *Guide technique nationale des infrastructures municipales. Des solutions pour les infrastructures municipales canadiennes*. [En ligne]. <http://www.irc.nrc-cnrc.gc.ca/filltext/prac/nrcc42540f.pdf> (Consultée le 22 avril 2003).

Karihaloo, B.L., Abdalla, H.M., Xiao, Q.Z. (2003). Size Effect in Concrete Beams. *Engineering Fracture Mechanics* / May 2003, 979-993.

Khalifa, A., Nanni, A. (2000). Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams Using CFRP Composites. *Cement & Concrete Composite* / June 2000, 165-174.

Kotsovos, M.D., Pavlovic, M.N. (1997). Size Effects in Structural Concrete: A Numerical Experiment. *Computers & Structures* / July-August 1997, 285-295.

Li, V.C., Lin, Z., Matsumoto, T. (1998). Influence of Fiber Bridging on Structural Size-Effect. *International Journal of Solids and Structures* / November 1998, 4223-4238.

MacGregor, J.G., Bartlett, F.M. (2000). *Reinforced Concrete, Mechanics and Design* (1st Canadian ed.). Scarborough: Prentice Hall Canada Inc.

Planas, J., Bažant, Z.P., Jirasek, M. (2001). Reinterpretation of Karihaloo's Size Effect Analysis for Notched Quasibrittle Structures. *International Journal of Fracture* / September 2001, 17-28.

Réseaux de centres d'excellence. *Rapport annuel RCE 1996-1997. Des solutions canadiennes à la crise mondiale de l'infrastructure* [En ligne]. http://www.nce.gc.ca/pubs/reports/9697/ann96-97-7d_f.htm (Consulté le 22 avril 2003).

Sener, S., Begimgil, M., Belgin, C. (2002). Size Effect on Failure of Concrete Beams with and without Steel Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering* / September-October 2002, 436-440.

Triantafillou, T.C. (1998). Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites. *ACI Structural Journal* / Mars-April 1998, 107-115.

Triantafillou, T.C., Antonopoulos P.C. (2000). Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP. *Journal of Composite for Construction* / November 2000, 198-205.

Zararis, P.D., Papadakis, G.C. (2001). Diagonal Shear Failure and Size Effect in RC Beams without Web Reinforcement. *ACI Structural Journal* / July 2001, 733-742.