

702140



Ministère des Transports du Québec
Direction des structures

CHAIRE DE RECHERCHE DU CRSNG SUR LE RENFORCEMENT EN MATÉRIAUX COMPOSITES POUR LES STRUCTURES EN BÉTON

Contrat : 1220-99-BD02

RENFORCEMENT DE LA DALLE DU TABLIER À L'AIDE DE L'ARMATURE EN MATÉRIAUX COMPOSITES À BASE DE FIBRES DE CARBONE ISOROD

COMPLÈMENT D'INFORMATION AU RAPPORT FINAL



Préparé par

E. El-Salakawy, C. Kassem, et B. Benmokrane
ISIS-Sherbrooke, Département de Génie Civil, Faculté de Génie
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1
Tél. : (819) 821-7758
Fax. : (819) 821-7974
E-mail: bbenmokrane@andrew.sca.usherb.ca



CANQ
US
217
V.2



ISIS CANADA

The canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures
Le réseau canadien de Centres d'excellence sur les innovations en structures avec système de détection intégré

Mars 2002 © Benmokrane et al.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
930, CHEMIN SAINTE-FOY
6^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC)
G1S 4X9

Préambule

Dans le cadre du contrat de recherche 1220-99-BD02 entre le ministère des Transports du Québec et l'Université de Sherbrooke, des armatures en matériaux composites à base de polymères renforcés de fibres de carbone ou de fibres de verre (PRFC ou PRFV) ont été évaluées en laboratoire pour leur utilisation dans les dalles en béton des tabliers de ponts. Ces armatures portent le nom commercial ISOROD et sont produites par la compagnie Pultrall Inc./ADS Le Groupe Composite Inc. (Thetford Mines, Québec).

Le présent document constitue un complément d'information au Rapport final "*Renforcement de la dalle du tablier à l'aide de l'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone Isorod*" [1] remis au ministère des Transports du Québec (Direction des Structures) en Juillet 2001 dans le cadre du contrat de recherche 1220-99-BD02.

Ce complément d'information porte sur les résultats d'essai de flexion à quatre points sous charge statique effectués sur six dalles unidirectionnelles (3100mm x 1000mm x 200mm) en béton. La configuration de l'armature des dalles (lit inférieur et lit supérieur) a été choisie pour simuler différentes configurations d'armature en matériaux composites et en acier pour les dalles de tablier de ponts en béton. Ainsi pour les six dalles, nous avons opté pour un même lit d'armature supérieur (sens longitudinal et sens transversal) qui est constitué d'armature en matériaux composite à base de fibres de verre. Pour le lit d'armature inférieur, nous avons maintenu l'armature en matériaux composite à base de fibres de verre également dans le sens transversal, alors que dans le sens longitudinal (direction principale en traction) nous avons utilisé de l'armature conventionnelle en acier (1 dalle), de l'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone (2 dalles) et de l'armature en matériaux composites à base de fibres de verre (3 dalles). La dalle en béton armé avec de l'armature conventionnelle en acier constitue la dalle de référence (dalle témoin) pour l'analyse des résultats.

Le nouveau code canadien sur le calcul des ponts routiers [2] introduit une nouvelle section (Section 16) qui traite des éléments structuraux de ponts en béton armé avec de l'armature (passive ou précontrainte) en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone et d'aramide. Le rapport de renforcement que nous avons utilisé pour la dalle de référence (dalle en béton armé avec

de l'armature en acier) correspond à une valeur de 0,57% (10M @ 112 mm) ce qui est supérieure à la valeur minimum requise par le Code (0,3%) (Art 8.18.4.2 du code canadien sur le calcul des ponts routiers [2]). Pour les dalles renforcées avec des barres en matériaux composite, le choix des rapports de renforcement a pris en compte les recommandations de divers auteurs qui ont travaillé sur le renforcement des dalles de tabliers de ponts avec des barres en matériaux composites [3]. Ainsi pour l'armature en matériaux composites à fibre de verre, le rapport de renforcement choisi correspond à 0,89% (No16 @ 150 mm), 1,78% (2No16 @ 150 mm) et 2,75% (3No16 @ 150 mm); pour l'armature à base de fibres de carbone, deux rapports de renforcement ont été considérés, soit : 0,4% (No10 @ 112 mm) et 0,8% (2No10 @ 112 mm).

Les résultats obtenus sur ces six dalles sont présentés dans ce rapport en termes de déflexion, capacité ultime, déformation de l'armature et du béton, fissuration, mode de rupture et largeur des fissures.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2 OBJECTIFS DU PROJET.....	1
3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	1
3.1 Dalles d'essais.....	1
3.2. Propriétés des matériaux utilisés pour les dalles.....	3
3.3. Instrumentation des dalles.....	3
3.4. Montage expérimental et procédure d'essai de flexion sur les dalles	3
4. RÉSULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSION.....	4
4.1. Mode de rupture et capacité ultime des dalles	4
4.2 Déflexion des dalles sous chargement	4
4.3. Largeur de fissure	5
4.4. Déformation dans l'armature et le béton	6
4.5. Évaluation de la déformabilité des dalles	7
CONCLUSION ET RECOMMANDATION	7
REMERCIEMENTS.....	8
REFERENCES	8

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Dimensions et configuration de renforcement pour les dalles	13
Figure 2. Position des jauges de déformation	14
Figure 3. Position des jauges de déformation sur la surface supérieure du béton	15
Figure 4. Vue schématique du montage expérimental.....	15
Figure 5. Photo du montage expérimental	16
Figure 6. LVDT pour la mesure de la déflexion et de la largeur de fissure.....	16
Figure 7. Mode de rupture type en cisaillement des dalles.....	17
Figure 8. Charge-déflexion pour la dalle en acier et les 3 dalles avec armature en fibres de verre...18	
Figure 9. Effet du type d'armature et du rapport de renforcement sur la relation charge-déflexion..18	
Figure 10. Charge-Largeur des fissures pour la dalle en acier et les 3 dalles avec armature en fibres de verre.....	19
Figure 11. Effet du type d'armature et du rapport de renforcement sur la largeur des fissures	19
Figure 12. Charge-Déformation pour la dalle en acier et les 3 dalles avec armature en fibres de verre	20
Figure 13. Effet du type d'armature et du rapport de renforcement sur les déformations mesurées ..	20

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Type et disposition de l'armature utilisée pour les six dalles.....	10
Tableau 2. Détails de l'armature des dalles (armature inférieure dans le sens longitudinal).....	11
Tableau 3. Propriétés des barres d'armature	11
Tableau 4. Sommaire des résultats des essais.....	12

1. INTRODUCTION

Les tabliers de ponts en béton armé sont parmi les structures les plus exposées aux conditions favorisant la corrosion de l'armature d'acier, la fissuration de l'asphalte et l'éclatement du béton. La corrosion est le premier facteur réduisant la durée de vie de l'ouvrage et engendrant des coûts de réparations très grands.

Afin d'éliminer la source du problème, qui est la corrosion, l'utilisation d'armature à béton en matériaux composites à base de polymères renforcés de fibres (PRF) est envisagée.

2 OBJECTIFS DU PROJET.

- 1) Évaluer et comparer la performance des barres d'armatures en matériaux composites par rapport à celles conventionnelles en acier.
- 2) Évaluer la performance de l'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone (PRFC) du type ISOROD en tant qu'armature inférieure pour les dalles de tabliers de ponts.
- 3) Évaluer la performance de l'armature en matériaux composites à base de fibres de verre (PRFV) du type ISOROD en tant qu'armature inférieure pour les dalles de tabliers de ponts.
- 4) Comparer le comportement sous charges des deux types d'armatures à celui de l'armature conventionnelle en acier à l'aide d'essais de flexion sur des dalles en béton unidirectionnelles.

Il est à noter que les résultats décrits dans ce rapport peuvent également être utilisés pour la conception de l'armature transversale du lit supérieur des dalles de tabliers de ponts en béton (moment négatif au dessus des poutres).

3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Dalles d'essais

Six dalles unidirectionnelles (3100mm de longueur x 1000mm de largeur x 200mm d'épaisseur) en béton ont été construites et testées. La configuration de l'armature des dalles (lit inférieur et lit supérieur) a été choisie pour simuler différentes configurations d'armature en matériaux composites et en acier pour les dalles de tablier de ponts en béton, comme décrit en haut dans les objectifs du projet de recherche. Ainsi pour les six dalles, nous avons opté pour un même lit d'armature supérieur (sens longitudinal et sens transversal) qui est constitué d'armature en matériaux composite à base de fibres de verre ISOROD (PRFV). Pour le lit d'armature inférieur, nous avons maintenu l'armature en

matériaux composite à base de fibres de verre (PRFV) également dans le sens transversal, alors que dans le sens longitudinal (direction principale en traction) nous avons utilisé de l'armature conventionnelle en acier (1 dalle), de l'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone ISOROD (PRFC) (2 dalles) et de l'armature en matériaux composites à base de fibres de verre (PRFV) (3 dalles). La dalle en béton armé avec de l'armature conventionnelle en acier constitue la dalle de référence (dalle témoin). Ces configurations d'armature pour les lits supérieur et inférieur, que nous venons de décrire pour les six dalles, sont présentées dans le tableau 1 et à la figure 1. Ce tableau et cette figure montrent aussi la grosseur des barres ainsi que l'espacement en les barres utilisés.

Le rapport de renforcement que nous avons utilisé pour la dalle de référence (dalle en béton armé avec de l'armature en acier) correspond à une valeur de 0,57% (10M @ 112 mm) ce qui est supérieure à la valeur minimum requise par le Code (0,3%) (Art 8.18.4.2 du code canadien sur le calcul des ponts routiers [2]). Pour les dalles renforcées avec des barres en matériaux composite, le choix des rapports de renforcement a pris en compte les recommandations de divers auteurs qui ont travaillé sur le renforcement des dalles de tabliers de ponts avec des barres en matériaux composites [3]. Ainsi pour l'armature en matériaux composites à fibre de verre, le rapport de renforcement choisi correspond à 0,89% (No16 @ 150 mm)- valeur correspondant au rapport de renforcement dit balancé-, 1,78% (2No16 @ 150 mm) et 2,75% (3No16 @ 150 mm); pour l'armature à base de fibres de carbone, deux rapports de renforcement ont été considérés, soit : 0,4% (No10 @ 112 mm)- valeur correspondant au rapport de renforcement balancé- et 0,8% (2No10 @ 112 mm)- Voir Tableau 2-.

Le calcul des rapports de renforcement pour les six dalles a été fait conformément à l'article 8.18.4.2.(a) du Code canadien sur le calcul des ponts routiers [2] en tenant compte du centre de gravité de l'assemblage d'armature du lit (armature transversale et armature longitudinale). L'enrobage inférieure des dalles de 30 mm a été choisi conformément à l'article 8.11.2.2 (Tableau 8.11.2.2). L'épaisseur des dalles de 200 mm a été considérée conformément à l'article 8.18.2 du même Code.

Les six dalles ont été testées après une période de mûrissement du béton correspondant à 28 jours..

3.2. Propriétés des matériaux utilisés pour les dalles

Les dalles ont été construites en utilisant un béton conventionnel pour les dalles de tabliers de ponts (béton Type V, MTQ) avec une résistance à la compression moyenne de 40 MPa à 28 jours. La résistance à la compression du béton a été déterminée en utilisant des cylindres de 150 mm x 300 mm.

Les propriétés des barres ISOROD en PRFV et en PRFC et des barres en acier utilisées pour le renforcement des dalles sont présentées dans le Tableau 3.

3.3. Instrumentation des dalles

Des jauges de déformation à résistance électrique de 5-millimètre de long et des jauges de 60-millimètre de long ont été employées pour mesurer des déformations en traction dans les barres d'armature et les déformations en compression dans le béton, respectivement. Pour chaque dalle, un total de 8 jauges de déformation à résistance électrique ont été employés pour mesurer les déformations des barres du lit inférieur et des barres du lit supérieur comme montré à la Figure 2. En plus, les déformations du béton ont été mesurées sur la surface supérieure en compression et sur la face latérale de la dalle dans deux endroits situés à la mi-portée et au quart de la portée de la dalle comme indiqué à la Figure 3. La déflexion à mi-portée de la dalle a été mesurée en utilisant deux LVDT attachés à chaque côté de la dalle. Aussi, deux LVDT de grande précision (0.001 millimètres) ont été installés aux positions des premières fissures pour mesurer la largeur des fissures en fonction de la charge appliquée sur la dalle. La figure 6 montre la disposition des LVDT. Un système d'acquisition de données piloté par un ordinateur a été utilisé pour enregistrer les lectures des jauges de déformations, des LVDT, et de la cellule de charge. Enfin pendant le chargement des dalles, nous avons suivi le réseau de fissuration en le marquant sur un coté de la dalle.

3.4. Montage expérimental et procédure d'essai de flexion sur les dalles

Les dalles ont été testées en flexion quatre points (chargement en ligne sur toute la largeur de la dalle) sur une portée entre appuis simples de 2500 mm, comme représenté schématiquement à la figure 4. La charge a été appliquée à un taux de chargement de 2.0 mm/min. Les figures 5 et 6

montrent des vues du dispositif expérimental, incluant l'instrumentation à l'aide de LVDT pour la mesure de la déflexion de la dalle et de la largeur de fissures.

4. RÉSULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSION

Le tableau 4 donne un sommaire des résultats des essais de flexion effectués sur les six dalles. On y retrouve notamment le moment à la rupture, les déflexions, les largeurs de fissures, et les déformations dans l'armature et le béton au moment de service (M_{ser}) et à la rupture, le facteur de déformabilité (facteur J) ainsi que le mode de rupture.

La valeur du moment de service (M_{ser}) a été considérée égale à 45 kN.m pour les six dalles testées; cette valeur correspond à 50% du moment ultime de la dalle de référence (dalle S-ST1 armée avec de l'armature en acier).

4.1. Mode de rupture et capacité ultime des dalles

Toutes les dalles testées se sont rompues en cisaillement à l'exception de la dalle S-ST1 armée avec de l'armature en acier, qui quant à elle, s'est rompue par compression du béton après plastification de l'armature en acier. La figure 7 montre une vue du mode de rupture des dalles.

Ce mode de rupture en cisaillement pour les dalles renforcées avec des barres en matériaux composites est dû aux charges élevées atteintes par ces dalles et qui ont dépassé la résistance au cisaillement de celles-ci. On peut voir dans le tableau 4 que les déformations à la fois du béton et de l'armature atteintes à l'état ultime pour les dalles renforcées avec les armatures en PRF demeurent très inférieures aux déformations ultimes des matériaux utilisés (béton et armature). Même avec ce mode de rupture en cisaillement, on peut voir que les moments atteints à l'état ultime pour les dalles S-C1 et S-C2B (dalles armées avec de l'armature en fibres de carbone, PRFC) sont augmentées de 55% et de 86% comparativement à celle de la dalle de référence en acier. Pour les dalles S-G1, S-G2B et S-G3B (dalles armées avec de l'armature en fibres de verre, PRFV), l'augmentation correspond à 26%, 81% et 87%, respectivement.

4.2 Déflexion des dalles sous chargement

Les figures 8 et 9 présentent la déflexion à mi-portée en fonction de la charge totale expérimentale appliquée pour les 6 dalles testées. Pour la dalle S-ST1 renforcée en acier (figure 8), la courbe

charge- déflexion est tri-linéaire avec un plateau de plastification. Pour les autres dalles renforcées avec des barres en PRF (figures 8 et 9), la courbe charge- déflexion est bilinéaire. La première partie des courbes allant jusqu'au moment de fissuration (approximativement $M_{fis} = 25 \text{ KN.m}$; $P_{fis} = 50 \text{ KN}$) représente le comportement de la dalle non-fissurée utilisant l'inertie brute de la section transversale, alors que la deuxième partie représente la dalle fissurée avec l'inertie réduite. Le moment de fissuration théorique correspond à 24 KN.m , ce qui analogue au moment de fissuration expérimentale (25 KN.m) observé pour les 6 dalles testées.

Les résultats du tableau 4 montrent qu'au niveau correspondant à la charge de service ($M_{ser} = 45 \text{ KN.m}$; $P_{ser} = 90 \text{ KN}$), le rapport de la déflexion mesurée pour les dalles S-C1 et S-C2B renforcées avec des barres en fibres de carbone (PRFC) sur la déflexion de la dalle de référence renforcée en acier est de 1,7 et 1,07, respectivement. Pour les dalles S-G1, S-G2B et S-G3B renforcées avec des barres en fibres de verre (PRFV), ce rapport est de 1,7, 1,3 et 1,0, respectivement.

Les figures 8 et 9, illustrant les courbes charge-déflexion, permettent les observations suivantes :

1. La rigidité flexionnelle des dalles armées avec de l'armature en matériaux composites (dalles S-G1, S-G2B et S-G3B renforcées avec des barres en fibres de verre (PRFV) et dalles S-C1 et S-C2B renforcées avec des barres en fibres de carbone (PRFC)) augmentent avec l'augmentation du rapport de renforcement, et ce comme on s'y attendait.
2. Les dalles S-G3B (fibres de verre) et S-C1 (fibres de carbone) ont des rigidités flexionnelles analogues à celle montrée par la dalle de référence en acier (avant plastification de l'acier).

4.3. Largeur de fissure

Les figures 10 et 11 montrent les variations de la largeur de fissure en fonction de la charge appliquée pour les 6 dalles testées. Ces figures montrent que la charge correspondant à la fissuration initiale est d'environ 50 KN pour toutes les dalles testées ; ce qui résulte en un moment de fissuration de 25 KN.m . Par ailleurs, ces figures montrent que la largeur de fissure augmente de façon linéaire en fonction de la charge. Ce résultat obtenu aussi bien pour la dalle en acier que pour les dalles armées d'armatures en PRF est conforme avec ce qu'on a obtenu pour les variations des déformations de traction sur les armatures en fonction de la charge (variations linéaires comme illustré sur les figures 12 et 13).

Le tableau 4 donne les largeurs de fissures expérimentales à la charge de service ($M_{ser} = 45 \text{ kN.m}$ qui correspond à 50% du moment ultime de la dalle en acier). On peut noter que le rapport de la largeur de fissure mesurée pour les dalles S-G1, S-G2B et S-G3B renforcées avec des barres en PRFV sur la largeur de fissure mesurée sur la dalle S-ST1 renforcée en acier est de 2,06, 1,35 et 1,12, respectivement. Pour les dalles S-C1 et S-C2B renforcées avec des barres en PRFC, ce rapport est de 1,53 et 1,06, respectivement. Si on augmente le rapport de renforcement en PRF de 100%, on peut voir des résultats du tableau 4 que la largeur de fissure correspondant à la charge de service diminue de 31% pour les dalles renforcées en PRFC (dalles S-C1 et S-C2B) et de 34% pour les dalles renforcées en PRFV (dalles S-G1 et S-G2B).

Enfin, les figures 10 et 11, illustrant les courbes charge-largeur de fissure, permettent les observations suivantes :

1. La largeur de fissure diminue avec l'augmentation du rapport de renforcement, comme le montrent la figure 10 pour les dalles en béton armé avec de l'armature en PRFV, et la figure 11 pour les dalles en béton armé avec de l'armature en PRFC.
2. La variation de la largeur de fissure en fonction de la charge pour la dalle S-C2B est quasiment analogue à celle obtenue pour la dalle de référence en acier. Ce comportement est aussi observé dans une moindre mesure pour la dalle S-G3B.

4.4. Déformation dans l'armature et le béton

Les figures 12 et 13 présentent les déformations de l'armature et du béton en fonction de la charge totale expérimentale appliquée. On peut voir que les courbes dans le cas des dalles renforcées avec des barres en PRF sont linéaires. La dalle S-ST1 (dalle de référence) présente un comportement typique avec plastification de l'acier engendrant des grandes déformations dans l'armature, ce qui augmente la déformation en compression du béton et cause son écrasement et par conséquent la rupture de la dalle. Dans le cas des dalles renforcées avec des barres en PRF, on peut voir du tableau 4 que la déformation à la rupture, que se soit pour l'armature ou le béton, reste inférieure à la valeur ultime du matériau malgré un niveau de charge élevé. Cependant, cette charge élevée a dépassé la capacité de résistance en cisaillement de la dalle et causé sa rupture (les 5 dalles armées avec des PRF).

4.5. Évaluation de la déformabilité des dalles

Le calcul de la déformabilité des dalles a été réalisé en déterminant le facteur de performance globale J comme défini dans l'article 16.8.1 du Code [2] :

$$J = \frac{M_{ult}}{M_c} \times \frac{\Psi_{ult}}{\Psi_c}$$

M_{ult} étant le moment de rupture de la section, M_c le moment correspondant à une déformation maximale du béton par compression dans la section de 0,001, Ψ_{ult} la courbure à M_{ult} et Ψ_c la courbure à M_c .

Le tableau 4 donne les valeurs du facteur de performance globale J pour toutes les 5 dalles en béton armé avec de l'armature en matériaux composites.. On peut voir que ces valeurs sont toutes au-dessus de la limite exigée par le Code [2] qui est de 4 pour les sections rectangulaires.

CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Les résultats d'essais de chargement statique effectués sur 6 dalles jusqu'à rupture ont été présentés dans ce rapport. Les 6 dalles en béton testées sont des dalles unidirectionnelles (3100mm de longueur x 1000mm de largeur x 200mm d'épaisseur) et comprennent une dalle de référence (armée avec de l'armature en acier), 2 dalles armées avec de l'armature en matériaux composites à base de fibre de carbone et 3 dalles armées avec de l'armature en matériaux composites à base de fibre de verre. Les paramètres de l'étude comprennent le type d'armature (acier, carbone et verre) et le rapport de renforcement pour l'armature en matériaux composites. La configuration de l'armature dans les dalles a été choisie pour représenter celle utilisée pour les dalles de tabliers de ponts en béton. Les résultats de cette étude permettent les observations suivantes :

- 1. Les dalles en béton armé avec de l'armature en matériaux composites (carbone et verre) ont présenté, comme on s'y attendait, des capacités ultimes très supérieures à celle de la dalle armée avec de l'acier (dalle de référence).
- 2. La rigidité flexionnelle des dalles armées avec de l'armature en matériaux composites (dalles S-G1, S-G2B et S-G3B renforcées avec des barres en fibres de verre (PRFV) et dalles S-C1 et S-C2B renforcées avec des barres en fibres de carbone (PRFC)) augmentent avec l'augmentation du rapport de renforcement.

- 3. Les dalles S-G3B (fibres de verre 3No16 @ 150 mm) et S-C2B (fibres de carbone 2No10 @ 112 mm) ont des rigidités flexionnelles analogues à celle montrée par la dalle de référence en acier (10M @ 112 mm).
- 4. La variation de la largeur de fissure en fonction de la charge pour la dalle S-C2B (carbone) est analogue à celle obtenue pour la dalle de référence en acier. Ce comportement est aussi observé, dans une moindre mesure, pour la dalle S-G3B (verre).
- 5. Les valeurs du facteur de performance globale J obtenues pour les 5 dalles en béton armé avec de l'armature en matériaux composites sont toutes au-dessus de la limite exigée par le Code pour le calcul des ponts routiers.

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude, nous recommandons d'utiliser, pour l'armature transversale en matériaux composites à base de fibre de carbone positionnée dans le lit inférieur de dalles de tabliers de ponts en béton, un rapport de renforcement d'une valeur comprise entre 0,4 et 0,8%. Cette recommandation est valable pour de l'armature en matériaux composites à base de fibre de carbone de module d'élasticité au moins égal à 110 Gpa.

Cette recommandation rejoint d'ailleurs celle émise par d'autres auteurs qui ont effectué des études sur des dalles de tabliers de ponts en béton armé avec de l'armature en matériaux composites[3].

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le ministère des Transports du Québec (Direction des Structures), la compagnie Pultrall Inc. (Thetford Mines, Québec) et le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG).

REFERENCES

- [1] C. Kassem, A. Laoubi, B. Tighiouart., Masmoudi, R., Benmokrane, B. ``Renforcement de la dalle du tablier à l'aide de l'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone Isorod``, Rapport final (phases 1 et 2) soumis au ministère des Transports du Québec, juillet 2001, Contrat 1220-99-BD02, 36p.

- [2] CAN/CSA-S6-00 (2000). "Canadian Highway Bridge Design Code," CHBDC, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada, 734p..
- [3] Hassan T., Rizkalla S., Abdelrahman A., and Tadros G., " Design Recommendations for Bridge Deck Slabs Reinforced by Fiber Reinforced Polymers", Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymers Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-4, ACI-SP-188, 1999, Baltimore, USA, pp.313-323.

Tableau 1. Type et disposition de l'armature utilisée pour les six dalles

Dalle	Lit d'armature supérieur		Lit d'armature inférieur		Simulation de dalle de tablier de pont (Armature transversale)
	Sens longitudinal	Sens transversal	Sens longitudinal*	Sens transversal	
S-ST1	#13 @ 150 mm (Verre)	#13 @ 136 mm (Verre)	10M @ 112 mm (Acier)	#13 @ 136 mm (Verre)	Acier (inférieure et supérieure)
S-C1	#13 @ 150 mm (Verre)	#13 @ 136 mm (Verre)	#10 @ 112 mm (Carbone)	#13 @ 136 mm (Verre)	Carbone (inférieure et supérieure)
S-C2B	#13 @ 150 mm (Verre)	#13 @ 136 mm (Verre)	2#10 @ 112 mm (Carbone)	#13 @ 136 mm (Verre)	Carbone (inférieure et supérieure)
S-G1	#13 @ 150 mm (Verre)	#13 @ 136 mm (Verre)	#16 @ 150 mm (Verre)	#13 @ 136 mm (Verre)	Verre (inférieure et supérieure)
S-G2B	#13 @ 150 mm (Verre)	#13 @ 136 mm (Verre)	2#16 @ 150 mm (Verre)	#13 @ 136 mm (Verre)	Verre (inférieure et supérieure)
S-G3B	#13 @ 150 mm (Verre)	#13 @ 136 mm (Verre)	3#16 @ 150 mm (Verre)	#13 @ 136 mm (Verre)	Verre (inférieure et supérieure)

* A noter que l'armature inférieure (sens longitudinal) se trouve dans la direction principale des dalles unidirectionnelles sous chargement de flexion.

Tableau 2. Détails de l'armature des dalles (armature inférieure dans le sens longitudinal)

Dalle		Rapport de renforcement ρ_{act} (%)	ρ_{act}/ρ_b (%)	Configuration de l'armature	Section totale de l'armature pour la dalle (mm ²)	Rigidité totale (ExA)	Rigidité relative (EA_{prf}/EA_{ac}) _{ie)r}
Acier	S-ST1	0.57	0.12	10M@112mm ●	900	180x10 ³	1.00
Carbone	S-C1	0.4	1.0	No.10@112mm ●	639	73x10 ³	0.40
	S-C2B	0.8	2.0	2 No.10@112mm ●●	1278	146x10 ³	0.81
Verre	S-G1	0.89	1.0	No.16@150mm ●	1386	54x10 ³	0.30
	S-G2B	1.78	2.0	2 No.16@150mm ●●	2772	108x10 ³	0.60
	S-G3B	2.75	3.0	3 No.16@150mm ●●●	4158	162x10 ³	0.90

Tableau 3. Propriétés des barres d'armature

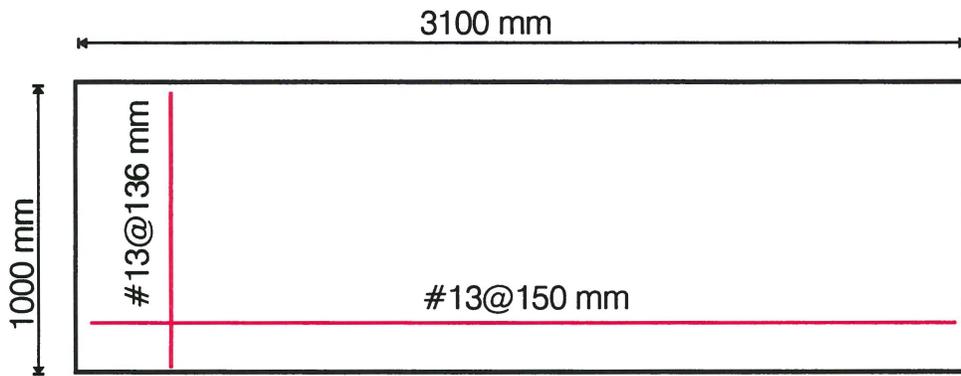
Type d'armature	Diamètre de l'armature (mm)	Section de la barre (mm ²)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction f_u (MPa)	Déformation ultime (%)
Carbone	9.50	71	114	1506	1.20
Verre	15.90	198	39	535	1.40
Acier	11.30	100	200	$f_y = 400$	$\epsilon_y = 0.2$

Tableau 4. Sommaire des résultats des essais

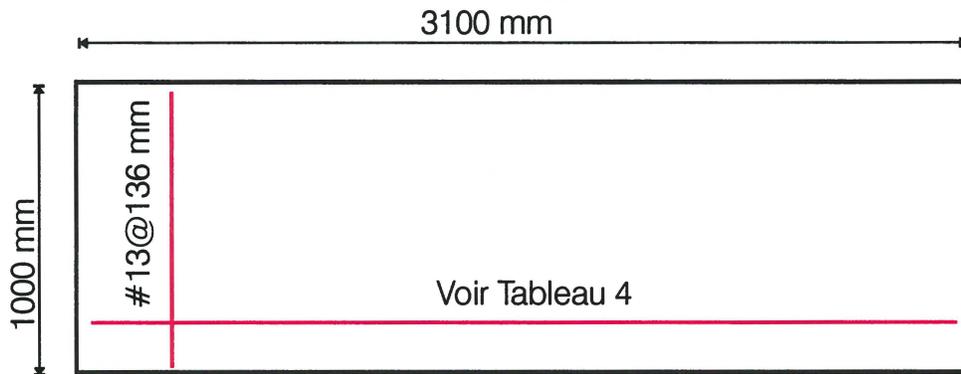
Dalle	Moment de fissuration Expérimental (KN.m)	Moment à la rupture (KN.m)	déflexion max. (mm)		Largeur de fissure (mm)		Déformation max de l'armature ($\mu\epsilon$)		Déformation max dans le béton ($\mu\epsilon$)		Facteur de performa nce globale J	Mode de rupture**
			Service *	rupture	Service *	rupture	Service *	rupture	Service *	failure		
S-ST1	24	90	6.9	70.3	0.17	3.10	1840	11932	583	3268	N/A	Y
S-C1	24	140	11.8	57.5	0.26	1.37	2170	10602	623	2600	5.19	S
S-C2B	24	167	7.4	41.0	0.18	0.85	1370	6907	604	2266	6.00	S
S-G1	25	113	11.7	52.9	0.35	1.36	3120	12031	821	2518	6.95	S
S-G2B	25	163	9.1	51.7	0.23	1.33	1980	10430	663	2428	6.95	S
S-G3B	25	168	7.0	38.9	0.19	1.09	1690	8046	585	2547	6.61	S

* Le moment de service est 45 kN.m qui correspond à 50% du moment ultime de la dalle en acier

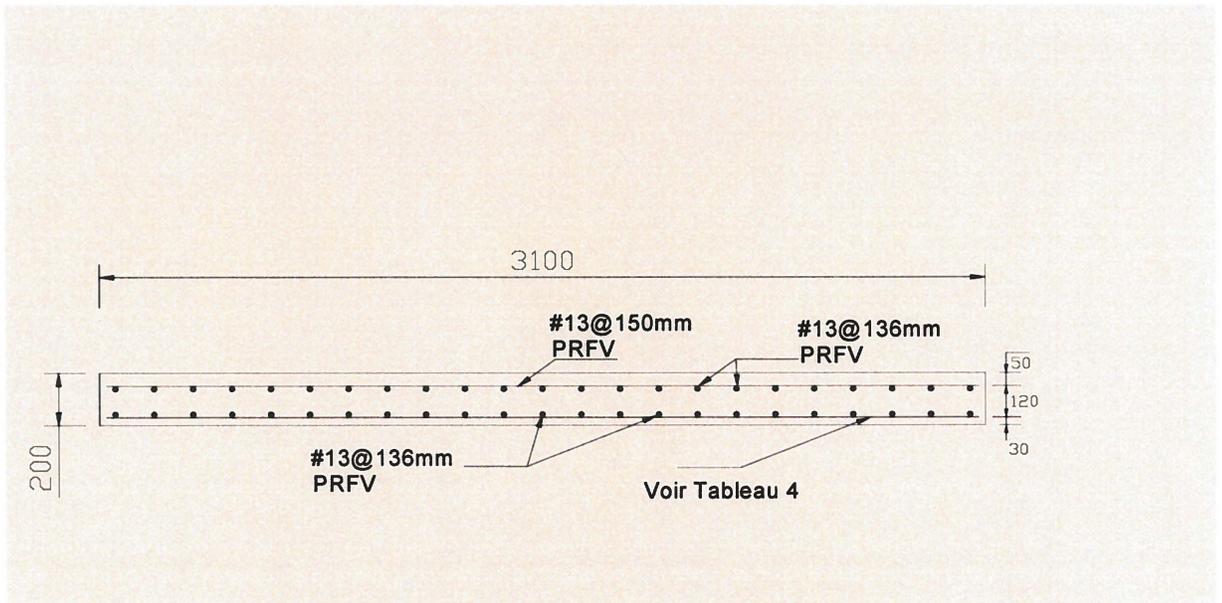
** S = rupture en cisaillement, Y = Plastification de l'acier



(a) Armature de la nappe supérieure

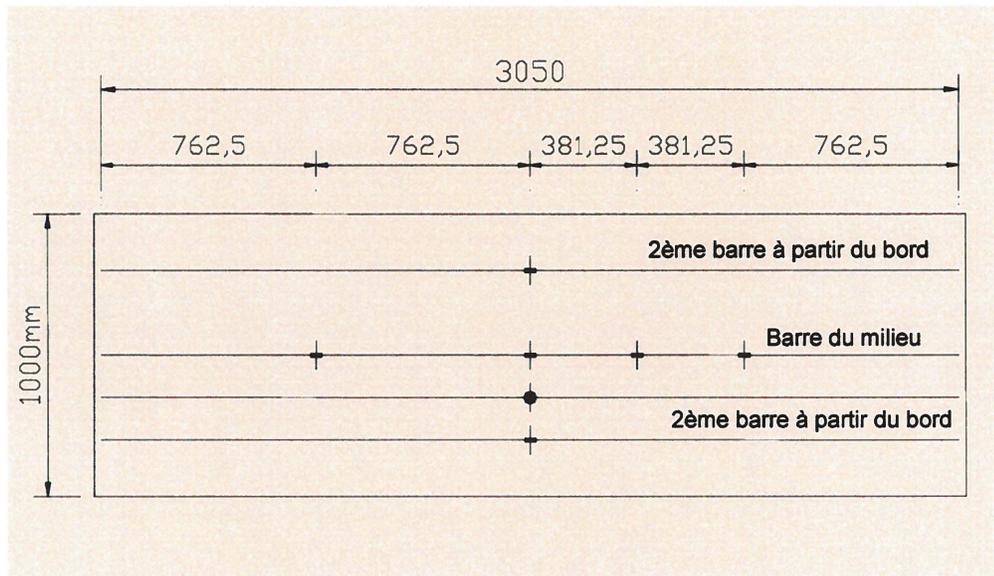


(b) Armature de la nappe inférieure



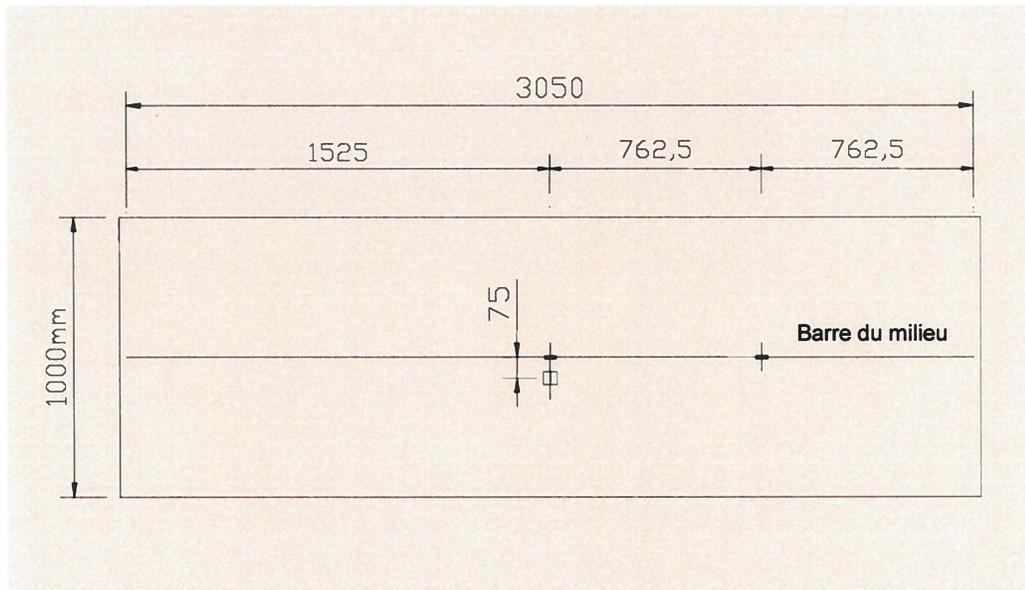
(c) Section de la dalle dans la direction principale

Figure 1. Dimensions et configuration de renforcement pour les dalles



(a) Armature de la nappe inférieure

- ✚ Jauge de déformation (5 mm)
- Capteur à fibre optique sur l'armature
- Capteur à fibre optique sur l'armature
- ⊕ Jauge de déformation (60 mm)



(b) Armature de la nappe supérieure

Figure 2. Position des jauges de déformation

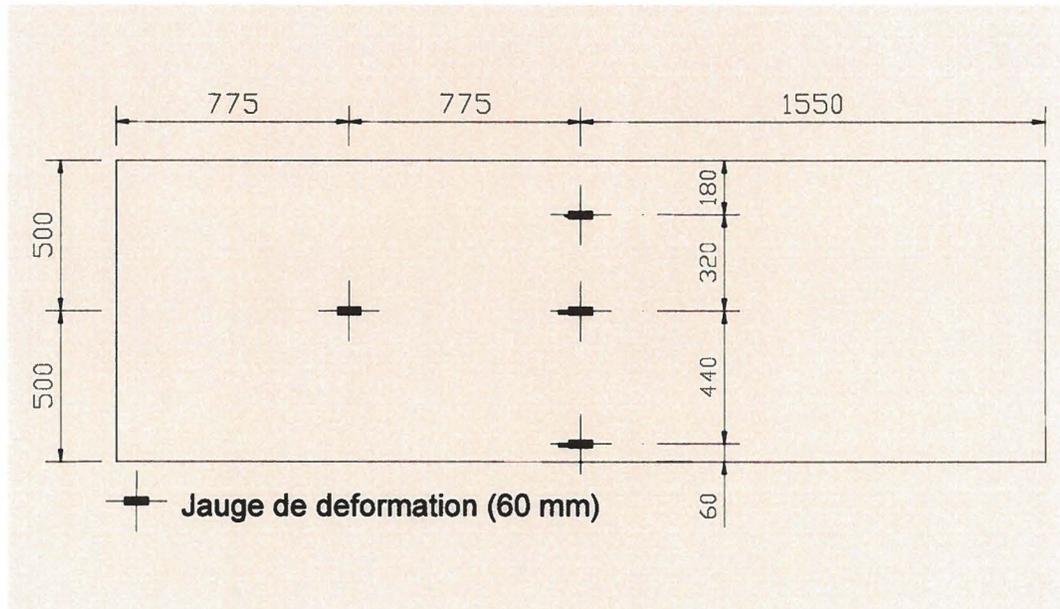


Figure 3. Position des jauges de déformation sur la surface supérieure du béton

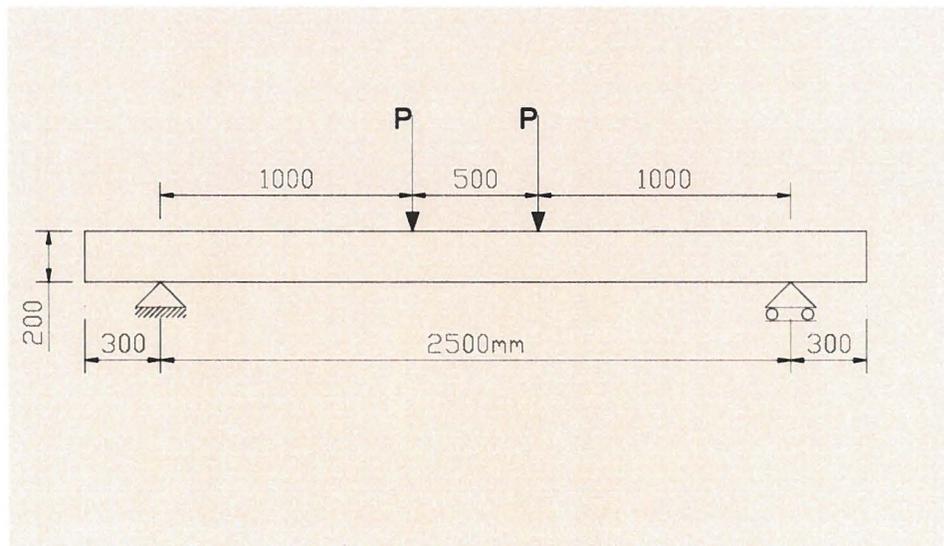


Figure 4. Vue schématique du montage expérimental

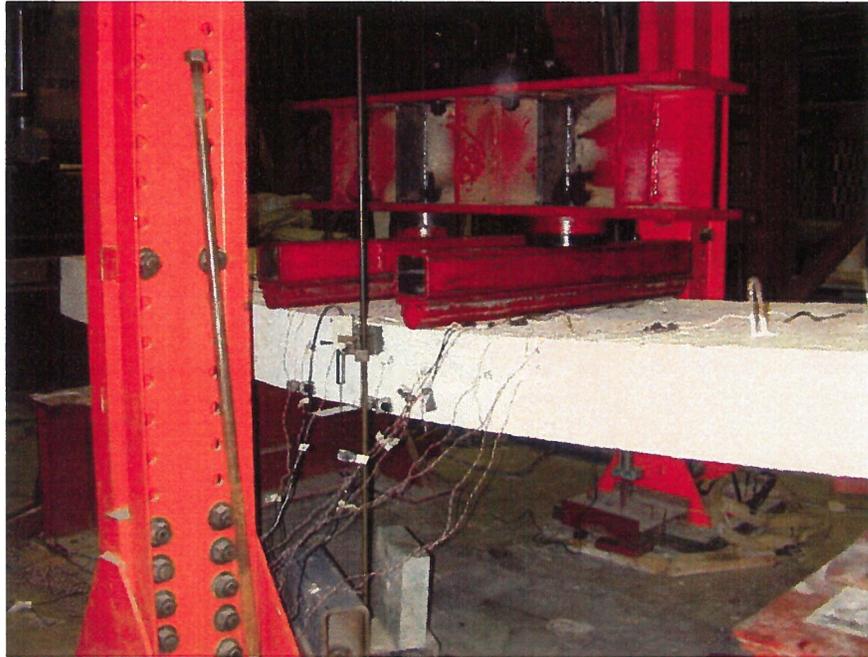
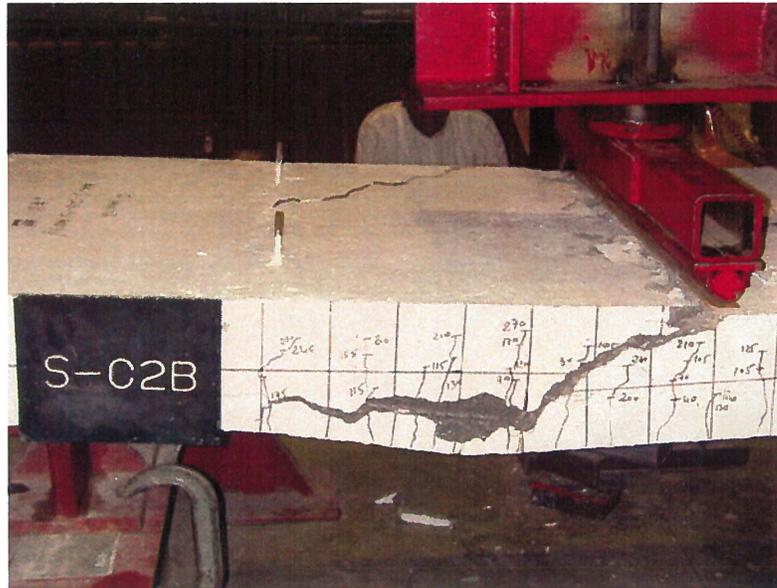


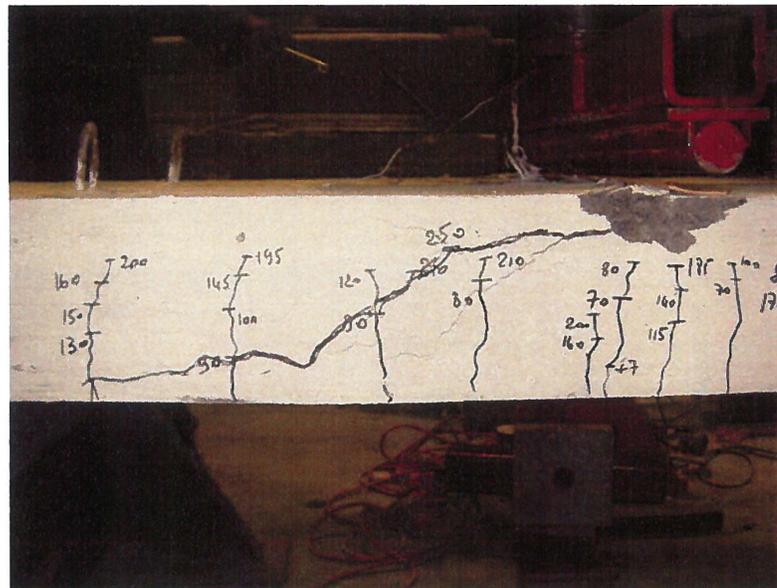
Figure 5. Photo du montage expérimental



Figure 6. LVDT pour la mesure de la déflexion et de la largeur de fissure



(a) Rupture de la dalle S-C2B



(b) Rupture de la dalle S-G3B

Figure 7. Mode de rupture type en cisaillement des dalles

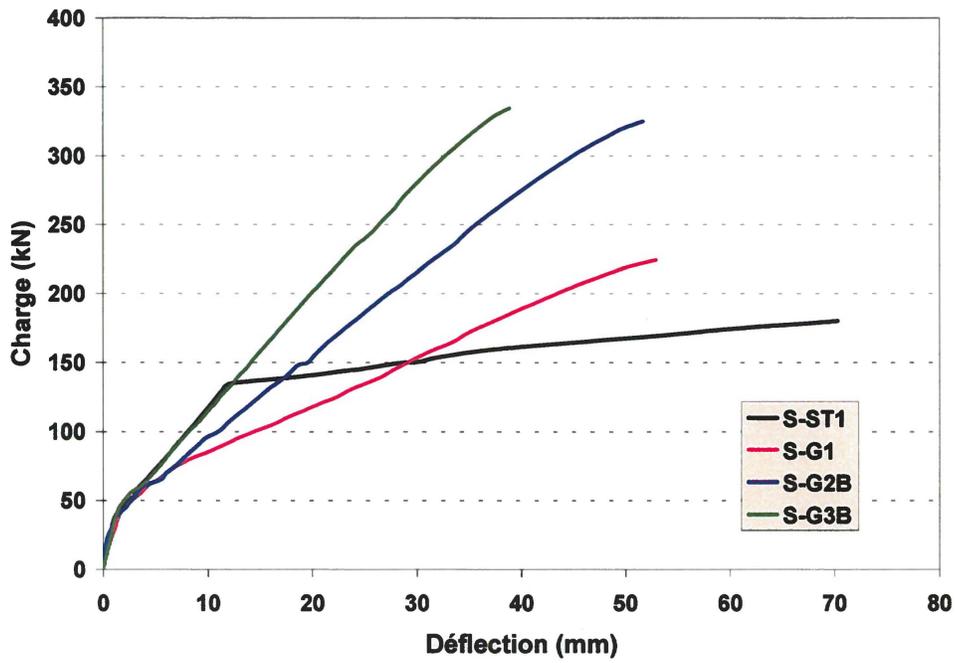


Figure 8. Charge-déflexion pour la dalle en acier et les 3 dalles avec armature en fibres de verre

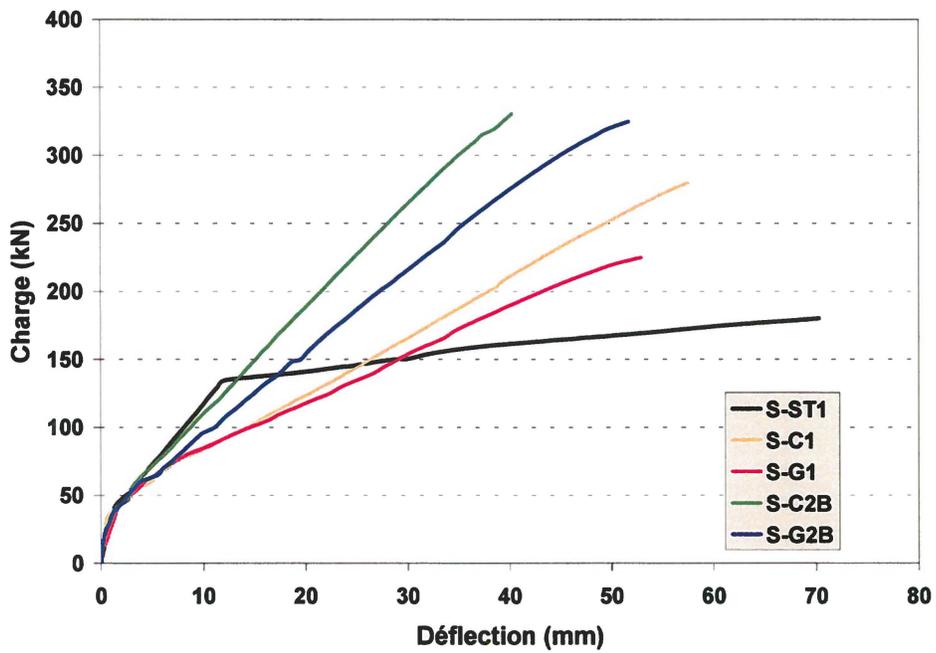


Figure 9. Effet du type d'armature et du rapport de renforcement sur la relation charge-déflexion

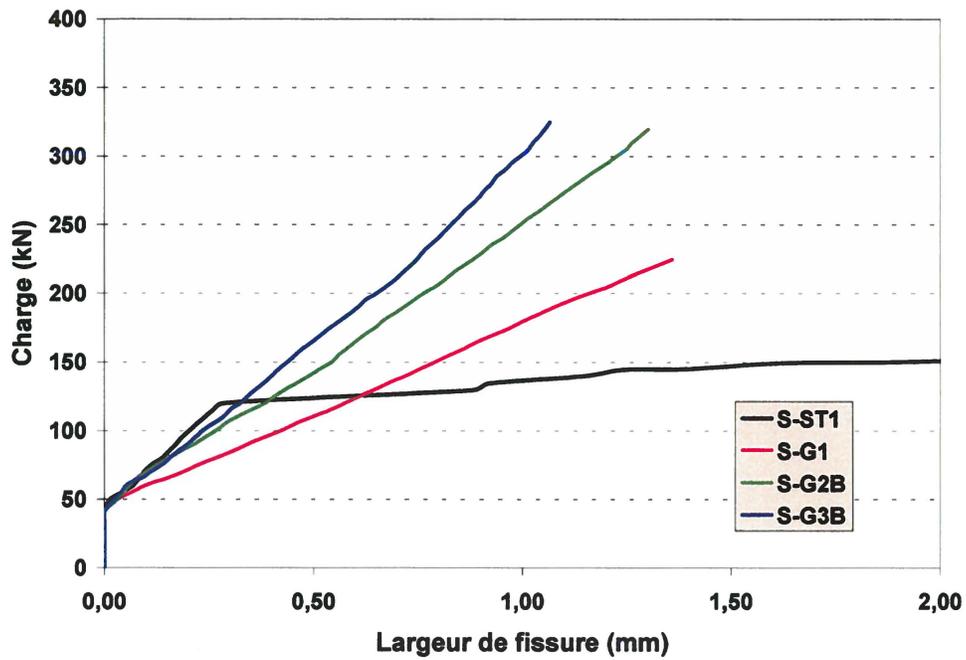


Figure 10. Charge-Largeur des fissures pour la dalle en acier et les 3 dalles avec armature en fibres de verre

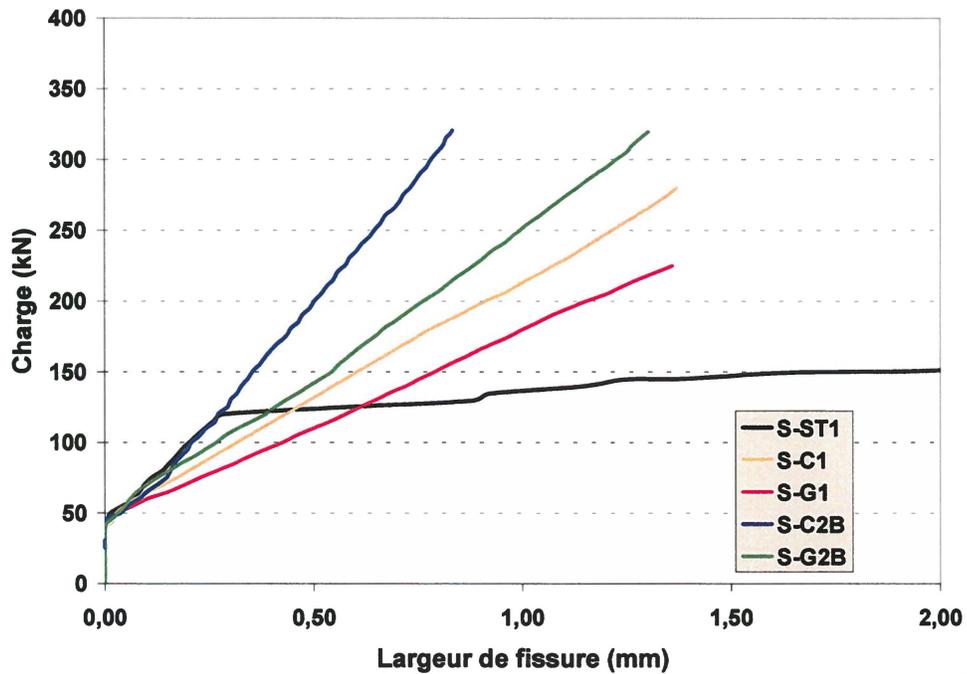


Figure 11. Effet du type d'armature et du rapport de renforcement sur la largeur des fissures

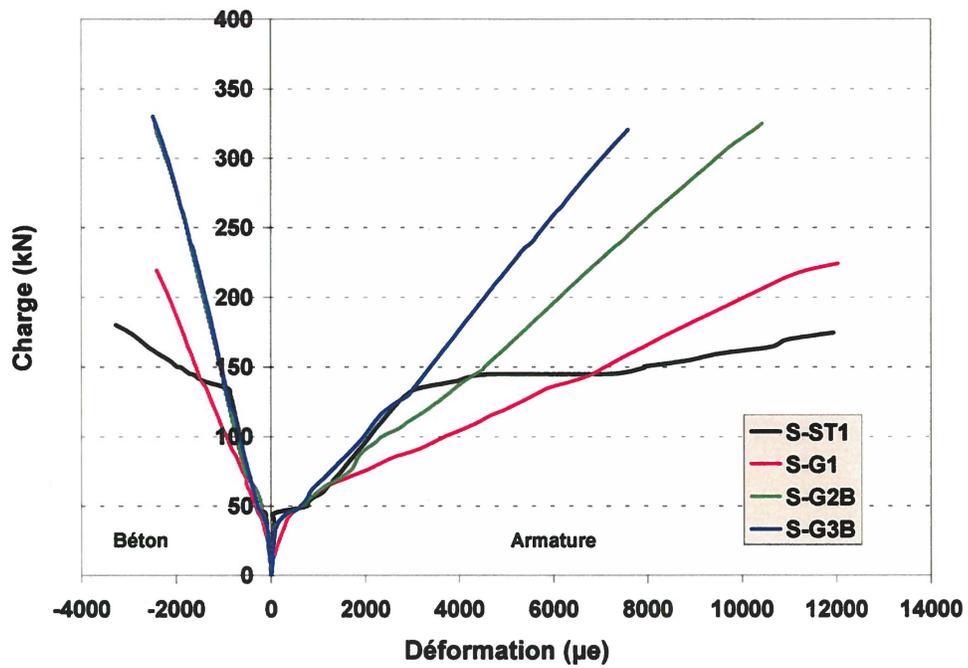


Figure 12. Charge-Déformation pour la dalle en acier et les 3 dalles avec armature en fibres de verre

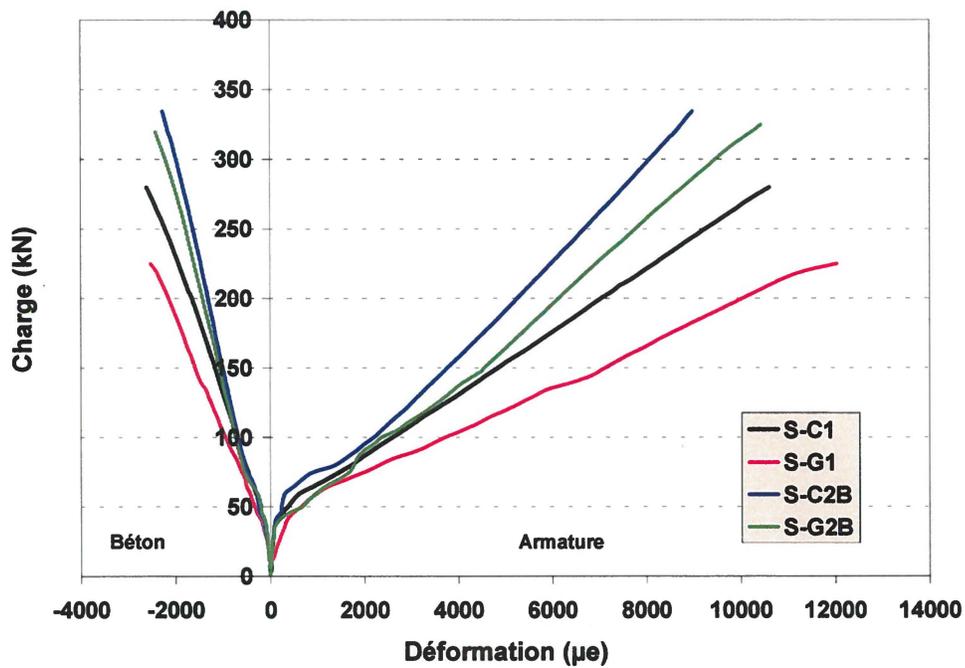


Figure 13. Effet du type d'armature et du rapport de renforcement sur les déformations mesurées

MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 184 868