

# CONCEPTION DES DALLES DES TABLIERS DE PONTS CONTINUS EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉ DE FIBRES

**Kathleen Moffatt**  
Associée de recherche

**Bruno Massicotte**  
Professeur titulaire

École Polytechnique de Montréal  
C.P. 6079, Succursale Centre-Ville  
Montréal (Québec)  
H3C 3A7

**RÉSUMÉ :** Depuis 1998, cinq ponts incorporant des dalles en béton renforcé de fibres d'acier (BRFA) ont été construits au Québec. On a observé dans certains des ponts où seulement une portion de la dalle était en BRFA que les parties contenant uniquement des armatures conventionnelles étaient fortement fissurées alors que les portions contenant du BRFA ne l'étaient pas. Il a été conclu que l'origine de ces fissures étaient dues au retrait et autres variations volumétriques différentielles. Cet article décrit les critères et hypothèses utilisés pour la conception d'un tablier de pont où les armatures transversales et longitudinales ont été optimisées en prenant en considération la contribution structurale des fibres. L'article porte en particulier sur la comparaison du comportement en service d'une dalle renforcée de manière conventionnelle avec celui d'une dalle dans laquelle l'utilisation d'un BRFA à  $80 \text{ kg/m}^3$  a permis de réduire l'armature conventionnelle. Le comportement longitudinal d'un pont continu avec et sans la présence des fibres est présenté et illustré par la comparaison entre la prédiction des ouvertures de fissures et les observations en chantier. Le rôle des fibres pour limiter l'ouverture des fissures dans le cas de variations volumétriques différentielles est décrit. L'article termine par des recommandations visant à améliorer le comportement en service des ouvrages.

## PHILOSOPHIE DE CONCEPTION

Le rôle premier des ouvrages étant évidemment de résister aux charges leur étant appliquées, la plupart des règles intégrées dans les codes de conception ainsi que la majorité des efforts de recherche dans le domaine des structures sont tournées vers la résistance structurale. Cette approche a permis au cours du dernier siècle de concevoir des structures fiables et rencontrant les exigences globales de la société en terme de sécurité, sauf pour certaines régions en ce qui concerne la résistance aux séismes de forte amplitude. En contrepartie, on note que les codes de conception accordent peu de place aux aspects liés au comportement en service des ouvrages, et encore moins à leur durabilité. De fait, de nombreux ouvrages existants nécessitent aujourd'hui des réparations coûteuses et même, dans certains cas, un remplacement complet.

Heureusement, la durabilité des infrastructures en béton est devenue un sujet d'étude majeur depuis les vingt dernières années. Ainsi, d'importants efforts de recherche ont été dédiés à l'amélioration de la durabilité des bétons soumis à des environnements agressifs. Ces études ont mené, par exemple, à l'emploi de plus en plus fréquent d'armatures recouvertes d'époxy, galvanisées ou en FRP afin de réduire ou éliminer les problèmes liés à la corrosion. Malgré tout, le béton demeure un matériau perméable et sujet à la fissuration, ce qui rend inévitable sa détérioration à plus ou moins long terme. Cependant, de nombreux programmes de recherche ont montré que l'utilisation de bétons renforcés de fibres d'acier (BRFA) permet de mieux contrôler l'ouverture des fissures. Ce type de béton, lorsque utilisé en combinaison avec d'autres

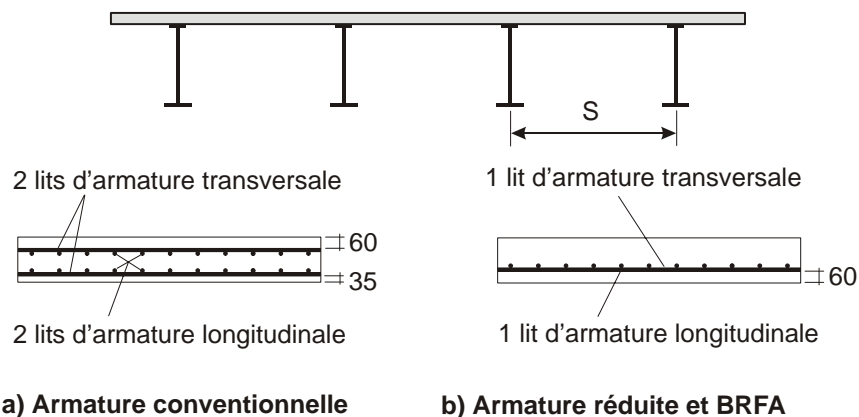
techniques de protection, contribue à améliorer de façon significative la durée de vie des infrastructures exposées à des conditions environnementales difficiles. Cet article illustre la contribution pouvant être apportée par le BRFA dans la conception de dalles de tablier de pont.

## PROJETS DE RECHERCHE SUR TABLIERS DE PONT AVEC BRFA

### Pratiques de conception passées et présentes

Les tabliers des ponts sont les éléments les plus vulnérables des ponts ainsi que les plus coûteux à réparer. Plus de 80% des 8500 ponts du Québec ont été construits dans la période des années 1960 et 1970. Le tablier de la grande majorité de ces ouvrages nécessite des travaux importants de réfection ou de remplacement. L'utilisation de béton à haute performance, d'armatures galvanisées, de recouvrements de plus grande épaisseur et d'une membrane imperméable sous le pavage devrait apporter une durabilité accrue aux nouvelles constructions. Cependant, malgré toutes ces précautions, les dalles sont appelées à fissurer sous l'action répétée des sollicitations structurales et des charges induites par le passage des véhicules lourds. De plus, les bétons à haute performance et les recouvrements plus épais sont plus sujets à la fissuration tandis que les membranes imperméables ne sont pas toujours efficaces et se détériorent avec le temps.

La méthode de conception traditionnelle des dalles de pont utilisée au Canada mène à une teneur totale en armature de l'ordre de 2 à 2.5%, distribuée sur 4 lits (Figure 1a). Quoiqu'une telle quantité d'acier soit excessive pour la résistance aux surcharges routières, elle n'a pas permis dans plusieurs cas d'assurer une durabilité satisfaisante aux ouvrages. Conséquemment, plusieurs ponts souffrent de problèmes reliés à la fatigue induite par les surcharges routières. Malgré cela, les codes de conception des ponts modernes (CSA, 2000) permettent de construire de nouveaux tabliers ne contenant que 1.2% d'armature conventionnelle, répartie sur 4 lits. Un tel volume est comparable à ce qui est utilisé en Europe (Toutlemonde et Ranc, 2001).



**Figure 1 – Options de ferrailage pour une dalle de pont typique**

L'expérience acquise sur la détérioration des tabliers conçus selon les méthodes antérieures ainsi que les hauts coûts associés à leur remplacement justifient pleinement les besoins de recourir à de

nouvelles approches de conception. C'est dans ce contexte que le ministère des Transports du Québec a investi depuis 1996 dans un long programme de recherche visant à améliorer les techniques de conception des tabliers afin d'en accroître la durabilité. Le concept étudié consiste à réduire les quantités d'armature et de compenser par l'emploi de BRFA à fort dosage en fibres. Ce système est applicable autant dans les cas de constructions neuves que pour les remplacements de dalles.

### **Programme de recherche**

Dans le cadre du projet de recherche, trois dalles de tablier contenant des BRFA ont été fabriquées au Québec au cours des années 1998 et 1999. Ces constructions s'inscrivaient au terme d'un programme de recherche intensif mené à l'École Polytechnique de Montréal au cours duquel plus de 40 spécimens de grandes dimensions représentatifs de dalles de ponts ont été testés selon diverses configurations simulant les conditions de chargement actuelles. Des recherches parallèles ont permis de développer une méthode analytique et un logiciel de calcul (Massicotte et al, 2000) ainsi qu'une méthode de conception pratique et simple d'application (Moffatt, 2001). Cette méthode de conception, basée sur les principes du calcul aux états limites, est applicable à toutes les membrures contenant des BRFA et sujettes à des efforts de flexion (Massicotte, 2003). Le programme de recherche s'est achevé en 2002 avec la construction d'une dalle de tablier sur poutres existantes dans laquelle la teneur en armature conventionnelle était optimisée en considérant la contribution structurale des fibres. Le tableau 1 présente le sommaire des activités expérimentales réalisées dans le cadre de ce programme de recherche.

### **Dalles de tablier en BRFA avec armatures conventionnelles réduites**

Des analyses effectuées par Cao et al (1996) ont montré que lorsque l'on tient compte de la flexibilité des poutres, les moments transversaux négatifs dans la zone au-dessus des poutres sont moindres que ceux calculés d'après les méthodes conventionnelles de conception. Cette réduction peut également être attribuée à une migration bidirectionnelle des efforts vers les poutres s'effectuant selon un angle de dispersion plus grand que celui assumé de façon traditionnelle (Moffatt, 2001; Assi, 2002). Sur la base de ces observations, il a été suggéré de réduire et peut-être même éliminer l'armature supérieure. Ces études confirment également que l'armature inférieure est essentielle afin d'assurer une performance structurale adéquate de la dalle ainsi que pour garantir l'intégrité structurale lors d'un bris majeur. Conséquemment, l'option retenue, illustrée à la figure 1b, consiste à disposer deux rangs simples d'armature, situés approximativement au tiers inférieur de la dalle et de compenser par l'emploi d'un BRFA à fort dosage en fibres.

Plusieurs projets de recherche effectués par Dzeletovic (1998), Bélanger (2000), Moffatt (2001) et Bastien (2002) ont été menés afin de valider la possibilité de concevoir les dalles de pont selon ce nouveau concept. Ces études montrent qu'avec une teneur en fibres de  $80 \text{ kg/m}^3$ , les performances en service, en fatigue et à l'ultime des dalles surpassent celles obtenues en suivant les règles de conception conventionnelles.

**Tableau 1** - Sommaire des essais de caractérisation des matériaux et des essais structuraux réalisés à l'École Polytechnique dans le cadre du projet de recherche

Étude	Description des essais	Nombre d'essais
Dzeletovic (1998)	Béton 40 MPa, fibres à crochets 60x0.8 mm à 60, 80 et 100 kg/m <sup>3</sup>	
	- Flexion sur primes RILEM	9
	- Flexion sur prismes ASTM	9
	- Traction directe	18
	- Dalles en BRFA armé, statique	9
	- Dalles en BRFA non armé, statique	3
Bélangier (2000)	BHP 50 MPa, fibres à crochets 60x0.75 mm à 80 kg/m <sup>3</sup>	
	- Flexion sur primes RILEM	6
	- Traction directe	23
	- Dalles en BHP armé, statique et fatigue	6
	- Dalles en BRFA armé, statique et fatigue	8
	BHP 50 MPa, fibres droites à bouts aplatis 50x1.0 mm à 80 kg/m <sup>3</sup>	
	- Flexion sur primes RILEM	6
	- Traction directe	6
	- Dalle en BRFA armé, statique	1
Dakpo (2000)	BHP 50 MPa, fibres à crochets 60x0.75 mm à 80 kg/m <sup>3</sup> - Flexion sur primes RILEM en milieu corrosif	42
Moffatt (2001)	Béton 40 MPa, fibres à crochets 60x0.8 mm à 60, 80 et 100 kg/m <sup>3</sup>	
	- Traction directe sur spécimens structuraux en BF armé	9
	- Traction directe sur spécimens en béton armé	3
	- Retrait restreint sur prismes	7
Bastien (2002)	BHP 50 MPa, fibres à crochets 60x0.75 mm à 80 kg/m <sup>3</sup>	
	- Flexion sur primes RILEM	18
	- Traction directe	38
	- Flexion sur prismes entaillés de grande dimension	16
	- Flexion sur dalles en BRFA armé, statique	10
Nolet (2002)	Béton 35 MPa, fibres à crochets 60x0.75 mm à 50 kg/m <sup>3</sup>	
	- Flexion sur dalles de grande taille non armées et entaillées	3
	- Flexion sur dalles de pont en BF armé, statique et fatigue	4
	Béton 35 MPa	
	- Flexion sur dalles de pont en BF armé, statique et fatigue	4

De façon alternative, Nolet (2002) a étudié expérimentalement le cas d'une dalle conçue avec une quantité usuelle d'armature conventionnelle et comportant 50 kg/m<sup>3</sup> de fibres d'acier. Ces travaux démontrent clairement que la performance et la longévité des dalles renforcées de façon traditionnelle est grandement affectée par la perte d'adhérence des armatures associée à la fissuration due aux chargements répétitifs. Les études expérimentales indiquent que les dalles de BRFA présentent une amélioration importante au niveau des performances en service et de la résistance à la fatigue, ne montrant aucun signe de détérioration sous des niveaux de charge atteignant jusqu'à deux fois ceux utilisés pour les dalles sans fibres. Ce concept a donc été retenu

dans le cadre d'une réfection majeure effectuée en 2002 sur un pont supportant des charges routières importantes.

### Étude de cas

La performance des dalles de tablier en BRFA conçues selon l'un ou l'autre des deux concepts présentés précédemment (avec ou sans optimisation de l'armature conventionnelle) est illustrée ci-après pour le cas de la réfection du viaduc St-Antoine. La voie routière du pont comporte 5 poutres de béton préfabriquées espacées de 2.3 m c/c (figure 2). La dalle originale a été remplacée en 2002 par une dalle de 200 mm d'épaisseur en BRFA à fort dosage avec armatures sur le lit inférieur seulement (figure 1b). La structure d'origine présentait deux portées simples de 28 m chacune. Pour des questions de durabilité, ces dernières furent cependant rendues continues lors de la réfection en éliminant le joint d'expansion à la pile centrale.

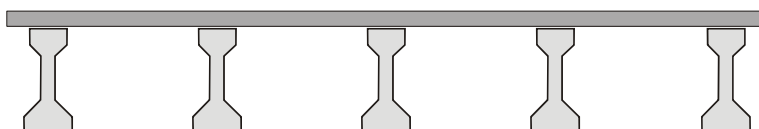


Figure 2 – Vue en coupe du pont

Pour ce projet, un béton à haute performance de 50 MPa contenant 80 kg/m<sup>3</sup> de fibres à crochets de 60 mm de longueur et 0.75 mm de diamètre a été développé en ajustant le rapport sable sur agrégats de façon à obtenir une grande ouvrabilité du béton frais. Le choix du mélange s'est fait à partir des propriétés mécaniques et des performances structurales observées sur des mélanges semblables testés en traction directe lors de recherches précédentes. Une courbe caractéristique de la contrainte post-fissuration vs ouverture de fissure a d'abord été dérivée en se basant sur la résistance moyenne et l'écart-type de plusieurs essais sur des BRFA similaires. Une courbe de traction directe simplifiée mais conservatrice a été retenue pour faire la conception (figure 3).

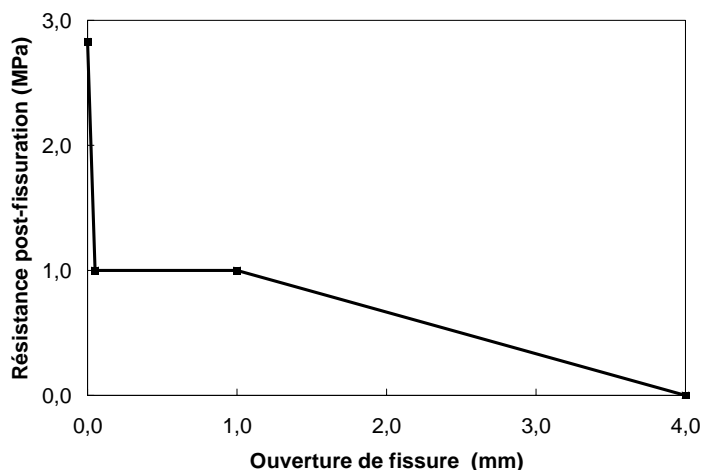


Figure 3 – Courbe de traction directe simplifiée utilisée

## COMPORTEMENT EN FLEXION DANS LA DIRECTION TRANSVERSALE

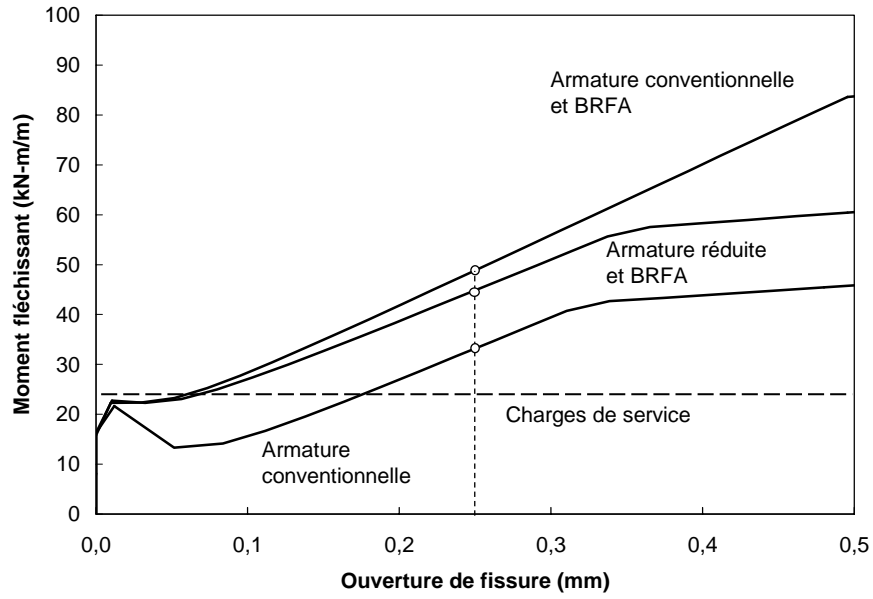
Pour des raisons de durabilité, la fissuration des structures en béton situées dans des environnements agressifs doit être limitée, même lorsque des armatures résistantes à la corrosion sont employées. On montre aux figures 4 et 5 la courbe moment – ouverture de fissure de la dalle du pont St-Antoine. Trois cas sont illustrés. Le cas no 1 consiste en un renforcement conventionnel (figure 1a) comportant des barres No 15 espacées à 300 mm c/c (0.33%) sur chacun des quatre lits. Le cas no 2 correspond au concept proposé ne comportant que 2 lits d'armature avec BRFA (figure 1b). Finalement, le cas no 3 combine l'emploi d'un BRFA avec un arrangement d'armature conventionnel. On présente au tableau 2 la performance de chacun de ces trois cas en service, en fatigue et à l'ultime.

**Tableau 2 – Rapports des moments atteints sur les moments requis**

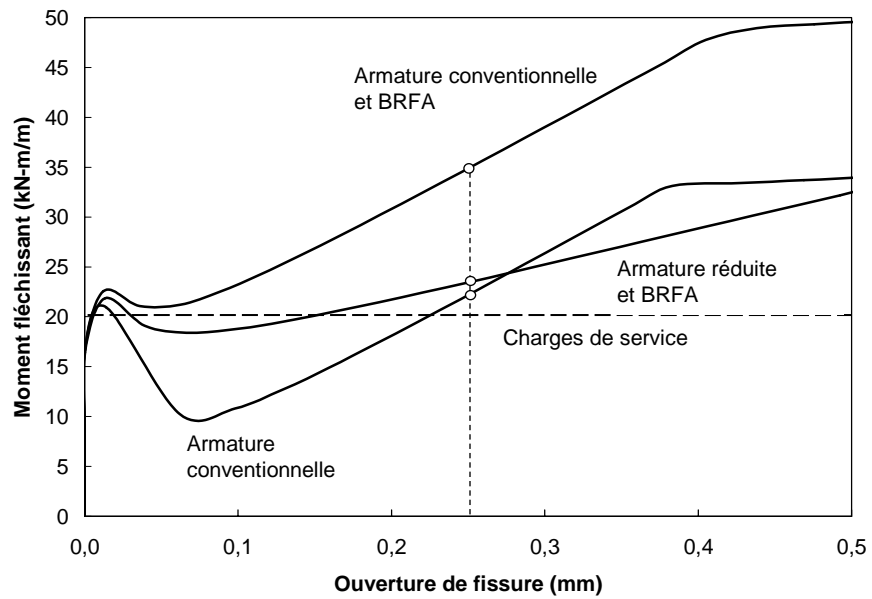
État limite	Cas	Moment de flexion positif (kN-m/m)	Moment de flexion négatif (kN-m/m)
Ouverture de fissure maximale de 0.25 mm	1: AC	2.35	1.80
	2: AR+F	2.13	1.15
	3:AC+F	2.83	2.35
Variation de contrainte en fatigue de l'armature 125 MPa	1: AC	1.43	1.39
	2: AR+F	1.90	1.67
	3:AC+F	2.10	2.11
Moment de flexion ultime majoré	1: AC	2.88	2.03
	2: AR+F	2.12	1.39
	3:AC+F	2.88	2.32

AC: Armature conventionnelle; AR+F: Armature réduite et BRFA; AC+F: Armature conventionnelle et BRFA

Les résultats indiquent clairement que le concept couvert par le cas no 2 (armatures réduites et BRFA) rencontre tous les critères en service, de fatigue et de résistance. De plus, bien que contenant moins d'armature, ce concept surpasse la méthode de conception conventionnelle en ce qui concerne la résistance à la fatigue. Sachant que la détérioration des dalles de pont due à la fatigue est un problème majeur en Amérique du Nord (Nolet, 2002) tout comme en Europe (Toutlemonde et Ranc, 2001), il devient donc intéressant de considérer l'utilisation du BRFA, ce dernier aidant certainement à améliorer la résistance à la fatigue des dalles. Cette augmentation a d'ailleurs été observée par Nolet (2002). Pour les ponts devant résister à des charges routières importantes, la solution alliant l'emploi de BRFA avec l'armature conventionnelle est la solution idéale, particulièrement en ce qui concerne la fatigue et la fissuration.



**Figure 4 – Courbe moment – ouverture de fissure en flexion positive**



**Figure 5 – Courbe moment – ouverture de fissure en flexion négative**

## COMPORTEMENT DANS LA DIRECTION LONGITUDINALE

### Comportement structural

Les déformations volumétriques différentielles du béton sont la source de fissuration. Les principales causes des changements volumétriques sont: le refroidissement du béton après hydratation ainsi que les retraits endogènes et de séchage. Les déformations associées à ces phénomènes génèrent des contraintes lorsqu'elles sont empêchées. Dans les constructions mixtes telles que le remplacement d'une dalle sur des poutres existantes, les rigidités axiale et en flexion des poutres retiennent les mouvements du tablier, ce qui provoque des efforts de traction dans la dalle. Dans un pont continu, la courbure ainsi induite crée des moments de flexion du même ordre de grandeur que ceux produits par les charges vives.

### Prédiction de la réponse structurale du cas à l'étude

De façon générale, on estime les déformations de retrait de séchage et endogène d'un béton haute performance à environ  $200 \mu\epsilon$  ( $200 \times 10^{-6}$ ) chacune tandis qu'un refroidissement après hydratation de  $25^\circ\text{C}$  doit être considéré. Comme montré à la figure 6, ces variations de déformations produisent de fortes contraintes de traction dans les tabliers de pont. À la culée, la contrainte moyenne est du même ordre de grandeur que la résistance à la fissuration, soit environ 3.9 MPa. Cette valeur est multipliée par un facteur de 3.5 à la pile centrale. Le fluage et la fissuration réduisent toutefois les contraintes induites par les déformations volumétriques. En incluant l'effet du fluage, les calculs permettent d'obtenir des contraintes moyennes de 10 MPa à la pile, ce qui correspond à 2.5 fois la résistance à la traction.

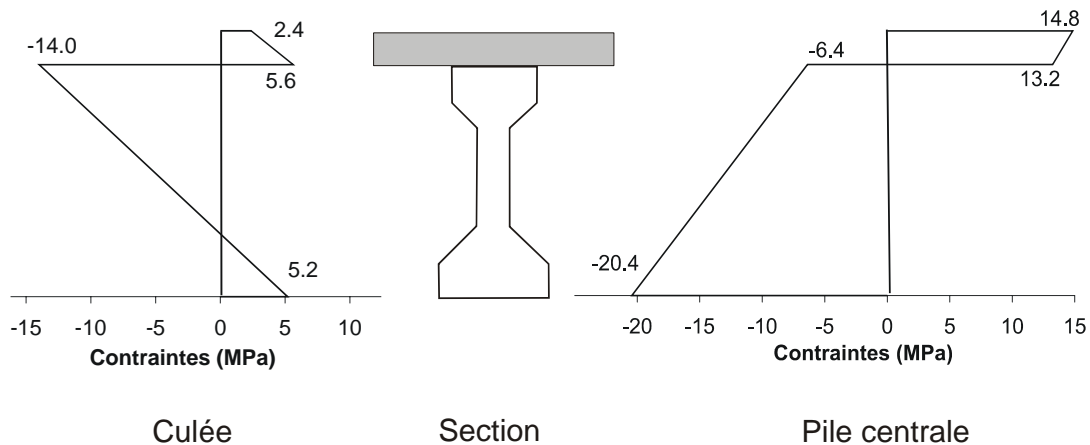


Figure 6 – Contraintes élastiques après construction de l'ouvrage



## Espacement et ouverture des fissures

Une méthode de prédiction de l'espacement des fissures a été présentée par Moffatt (2001). Le développement de cette méthode s'inspire du CEB-FIP (1993). Elle indique que l'espacement des fissures dans un béton avec fibres,  $s_{mf}$ , est donné par :

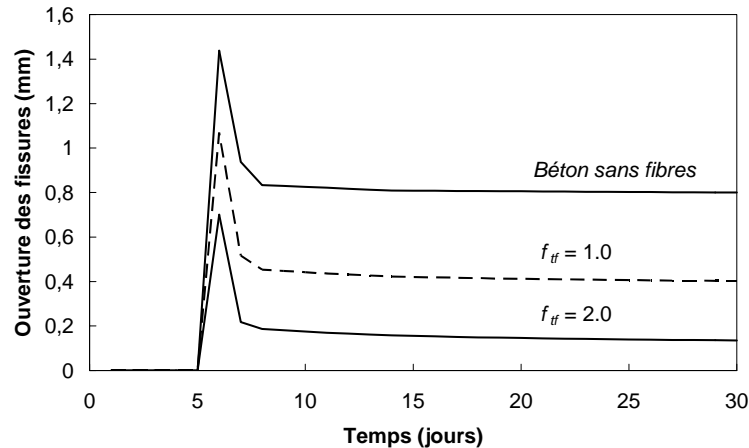
$$s_{mf} = s_{m0} \left( 1 - f_{tf} / f_{cr} \right) \quad (1)$$

dans laquelle  $s_{m0}$  est l'espacement des fissures d'un béton sans fibres tandis que  $f_{tf}$  est la résistance post-fissuration en traction du BRFA. En combinant cette équation avec le modèle de raidissement en traction présenté par Massicotte et al (1990), on peut alors calculer l'ouverture des fissures. Ce modèle a été introduit dans un logiciel qui permet de simuler l'évolution dans le temps d'une membrure élastique retenue partiellement et sujette à des variations volumétriques dues au retrait et au fluage. La courbe typique du temps vs ouverture des fissures obtenue pour le pont St-Antoine est montrée à la figure 7. Il est intéressant de constater que dans le cas d'une restriction partielle des mouvements, les fissures initiales se referment en partie suite au relâchement soudain des déformations internes. Le tableau 3 présente les résultats d'une étude paramétrique qui montre la contribution des fibres à l'ouverture des fissures.

**Tableau 3 – Ouverture de fissure provoquée par les variations volumétriques**

Type de ferrailage	Résistance résiduelle (MPa)	Espacement des fissures (mm) - Eq. 1	Ouverture de fissure initiale (mm)	Ouverture de fissure finale (mm)
Armatures conventionnelles	NA	1780	1.44	0.80
Armatures réduites et BRFA	1.0 MPa	1325	1.08	0.40
	2.0 MPa	867	0.70	0.14

Ces résultats montrent la double contribution des fibres dans un BRFA. Tout d'abord, l'espacement des fibres, et par le fait même l'ouverture des fissures, sont réduites. La capacité des fibres à refermer les fissures lors de la relaxation des contraintes internes ajoute une contribution supplémentaire. Dans le cas du pont St-Antoine, la plus faible valeur mesurée de la contrainte post-fissuration était de 2.5 MPa. Ceci correspond à un espacement des fissures de l'ordre de 640 mm. Tel que prédit par les analyses, l'observation du patron de fissuration 8 mois après la construction a montré un espacement des fissures d'environ 500 mm dans la région de la pile centrale, et une fissuration quasi-inexistante dans le secteur des culées.



**Figure 7 – Prédiction de l'ouverture de fissure**

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les analyses et les observations sur le terrain ont confirmé que les dalles de ponts incorporant des fibres d'acier en dosage suffisant présentent une durabilité accrue. La capacité des fibres à réduire l'ouverture des fissures dans les directions longitudinales et transversales permet de rencontrer les exigences des codes même avec une quantité d'armature réduite. Pour les structures continues sujettes au retrait et aux variations volumétriques différentielles entre la dalle et les poutres, les analyses et les observations sur les structures ont clairement démontré que l'armature conventionnelle, même utilisée en grande quantité, n'a pu empêcher la formation de fissures importantes alors que les dalles contenant des fibres d'acier en dosage suffisant ont présenté des comportements nettement supérieurs.

Les essais et les analyses ont confirmé les observations sur le chantier à l'effet que les dalles contenant uniquement des armatures conventionnelles soumises à des chargement répétés ont présentés des comportement inadéquats en fatigue. Les études ont démontré que les dalles contenant des fibres d'acier en quantité suffisante, même en présence d'armature conventionnelle réduite, ont offert des niveaux de performance nettement supérieurs, tant au niveau des contraintes dans les armatures que pour la détérioration du béton.

Finalement, sur la base des observations et diverses conclusions du programme de recherche, l'utilisation des fibres est grandement recommandée pour tous les remplacements de dalles de ponts sur de poutres existantes et pour la construction des nouvelles structures où un trafic de camions important est anticipé.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le CRSNG, le FQRNT (anciennement le fonds FCAR), et le ministère des Transports du Québec pour leur support financier, ainsi que la contribution en nature des entreprises Bekaert, Lafarge, Demix, et Euclid. Finalement les auteurs tiennent à

remercier pour leur support le personnel technique et les assistants de recherche du laboratoire de Structures de l'École Polytechnique de Montréal.

## RÉFÉRENCES

- ASSI, R. 2002. "Conception des dalles de pont". Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- BASTIEN, D. 2002. "Conception des dalles de pont en béton de fibre d'acier". Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- BÉLANGER, A. 2000. 'Conception des dalles de ponts avec armature réduite et béton de fibres d'acier'. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- CAO, L. , ALLEN, J.H., SHING, P.B., WOODHAM, D. 1996. 'Behavior of RC bridge decks with flexible girders. Journal of Structural Engineering, 122, 1, 11-19.
- CEB-FIP (1993). *CEB-FIP Model Code 1990*. Thomas Telford, London.
- CSA, 2000. 'CSA/S6-00 – Code canadien sur le calcul des ponts routiers'. Association canadienne de normalisation, Mississauga, Ontario, Canada.
- DAKPO, J. 2000. 'Effets de la corrosion sur la résistance en flexion du béton renforcé de fibres métalliques'. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- DZELETOVIC, N. 1998. 'Propriétés des dalles de ponts avec béton fibré'. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- MASSICOTTE, B., ELWI, A.E., MACGREGOR, J.G. 1990. 'Tension stiffening model for planar reinforced concrete members'. ASCE J. Str. Eng., 116, 11, 3039-3058.
- MASSICOTTE, B., BÉLANGER, A., MOFFATT, K. 2000. 'Analysis and design of SFRC bridge decks', Proceeding of the Fifth RILEM Symposium of Fibre-Reinforced Concrete, Lyon, France, September 13-15 2000, pp.119-128.
- MASSICOTTE, B. 2003. 'Design of FRC members in flexure: application to a building floor'. In Dimensionamento de Estruturas de Betão Feforçado com fibras de aço, Ed. Barros, Rossi, Massicotte, Universidade do Minho, Portugal, pp. 4.1-4.17.
- MOFFATT, K. 2001. 'Analyse de dalles de pont avec armature réduite et béton de fibres métalliques'. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- NOLET, S. 2002. 'Comportement des dalles de pont fortement sollicitées par les surcharges routières' Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- TOUTLEMONDE, F., RANC, G. 2001. 'Fatigue tests of cracked reinforced concrete slabs for estimating the service life of composite bridge decks'. Revue française de génie civil. Vol. 5, No. 4, pp. 483-494.