

CONCEPTION DES PONTS EN BÉTONS FIBRÉS À HAUTE ET ULTRA HAUTE PERFORMANCE

Shadi Braike
Étudiant à la maîtrise

Bruno Massicotte
Professeur titulaire

Jean-Philippe Charron
Professeur adjoint

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

RÉSUMÉ : Le dimensionnement de poutres en béton précontraint est principalement gouverné par des critères relatifs au comportement en traction du béton. Les bétons renforcés de fibre à haute performance (BFHP) et à ultra haute performance (BFUP) présentent des résistances mécaniques très élevées et des ouvertures de fissures plus fines en comparaison au béton conventionnel. L'utilisation de ces matériaux dans les poutres précontraintes permet de hausser les niveaux de contraintes admissibles en compression et en traction. Ainsi le dimensionnement des ponts peut être optimisé davantage sans compromettre la capacité portante et la durabilité des ouvrages.

Cet article propose de nouveaux critères de conception adaptés pour l'utilisation de béton fibré (BRF) dans les poutres précontraintes. Pour démontrer l'intérêt de ces nouveaux matériaux, les poutres d'un pont de référence de 2 travées ont été dimensionnées avec 4 classes de béton : un béton à haute performance (BHP), deux bétons fibrés à haute performance (BFHP) et un béton fibré à ultra haute performance (BFUP). Des poutres standardisées de type NEBT ont été sélectionnées. Les paramètres étudiés pour l'optimisation du dimensionnement sont le nombre de torons de précontrainte, la taille de la section NEBT et le nombre de poutres du pont. L'analyse est basée uniquement sur le comportement flexionnel des poutres. Les résultats démontrent que l'utilisation des BFHP et des BFUP permet de réduire significativement la taille des poutres NEBT ainsi que le nombre de poutres requises pour supporter les cas de charges appliqués sur le pont.

INTRODUCTION

Bien que l'usage de béton renforcé de fibres (BRF) soit de plus en plus répandu dans différentes applications, sa combinaison avec des torons de précontrainte demeure limitée. Pour un BRF conventionnel, l'apport des fibres est relativement faible mis à part un meilleur comportement post-fissuration en traction [1]. Cependant, de nouvelles classes de bétons fibrés (BFHP et BFUP) présentent à la fois une résistance à la compression améliorée ainsi qu'un comportement écrouissant et adoucissant remarquables en traction. Ces propriétés les rendent particulièrement intéressantes pour la conception d'applications en béton précontraint. En effet, les éléments de structures peuvent être optimisés pour prendre avantage des propriétés supérieures de ces nouveaux bétons. L'objectif de cet article est d'initier un processus d'optimisation pour les poutres précontraintes préfabriquées utilisées dans la conception des ponts afin d'obtenir des dimensionnements économiques et durables. Les classes de BRF sélectionnées dans l'étude présentent une faible perméabilité à l'eau à l'état fissuré, ceci a donc permis d'envisager l'usage de précontrainte partielle sans conséquence néfaste pour la durabilité des poutres.

Cet article compare la performance d'un pont dimensionné avec 4 classes de béton différentes : un BHP-50MPa, un BFHP-50MPa, un BFHP-90MPa et un BFUP-150MPa contenant respectivement 0, 1, 1.25 et 6 % de fibres métalliques (proportion volumique). La comparaison

est réalisée pour un pont de référence de 2 travées comprenant une dalle de béton mise en place sur 6 poutres précontraintes de type NEBT. Les paramètres considérés dans cette étude concernent uniquement l'optimisation des poutres NEBT; soit le nombre de torons ainsi que la taille et le nombre de poutres. La résistance flexionnelle de chaque dimensionnement est utilisée comme base de comparaison et a été déterminée avec le logiciel AIS [2].

PROCÉDURE D'ANALYSE

Géométrie du pont

Le pont de référence utilisé pour la comparaison des dimensionnements est basé sur un pont existant conçu avec des poutres NEBT selon les recommandations du *Code canadien sur le calcul des ponts routiers CSA-S6* [3]. Le dimensionnement original du pont, illustré aux figures 1 et 2, comprend une dalle de 200 mm et 6 poutres NEBT fabriquées avec un BHP-50.

Propriétés des matériaux

Le tableau 1 présente les caractéristiques des 4 classes de béton considérées dans l'étude comparative. Les deux bétons de 50 MPa (BHP-50 et BFHP-50) possèdent une composition similaire mise à part un contenu en sable légèrement plus élevé pour le béton fibré [4]. Le BFHP-90 est produit avec des granulats de 10 mm et une teneur en ciment supérieure en comparaison au BHP-50 [5]. Le BFUP-150 est obtenu avec de fortes teneurs en ciment et fumée de silice de même que des granulats de diamètre inférieur à 0,5 mm [6]. Ces bétons contiennent des fibres métalliques car leur module élastique élevé limite efficacement l'ouverture des fissures dans le béton durci. La figure 3 illustre les courbes contrainte-déformation en compression des 4 classes de bétons, tandis que la figure 4 montre les courbes contrainte-déformation et contrainte-ouverture de fissures en traction.

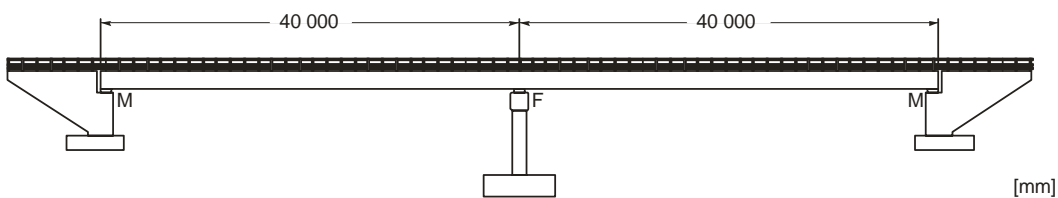


Figure 1 - Vue en élévation du pont

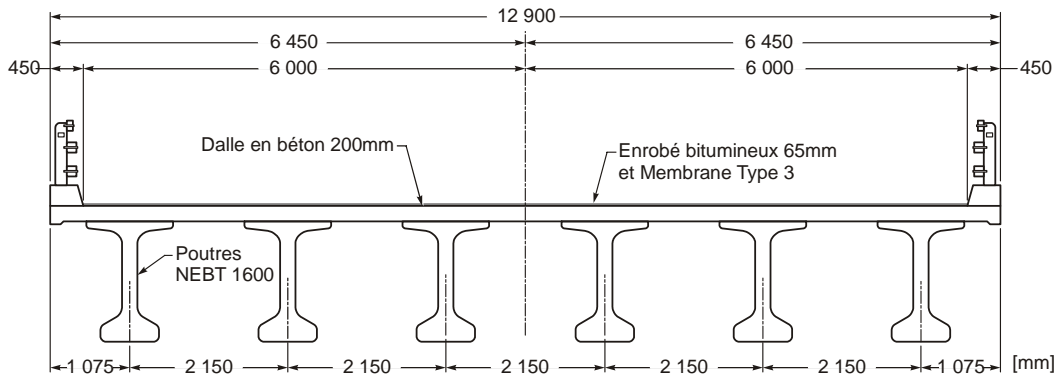


Figure 2 - Section transversale du pont

Tableau 1 - Identification et propriétés des classes de béton

Classes de béton	f'_c (MPa)	f'_t (MPa)	E_c (GPa)	Fibres (kg/m ³ – longueur et diamètre)	Réf.
HPC50	50	3,0	31,2	NA	[4]
HPFRC50	50	3,0	31,2	80 – 60×0,75 mm avec crochet	[4]
HPFRC90	90	4,0	42,0	100 – 30×0,5 mm avec crochet	[5]
UHFRC150	150	10,9	48,0	470 – 10×0,1 mm droite	[6]

Logiciel AIS

Le logiciel AIS (Analyse Inélastique des Sections) [2] utilisé dans cet article a été développé pour prédire l'évolution de la réponse moment-courbure de tous types d'éléments de structure fléchis (dalle et poutre en béton armé et précontraint, poutre en acier, etc.) au cours de leur séquence de construction. Le logiciel permet également de reproduire un endommagement partiel, tels que des pertes de béton ou de torons causées par la corrosion ou un impact, de même que la réparation et le renforcement d'un ouvrage à l'aide de précontrainte externe et de PRF [7]. La section des éléments de structure, les propriétés des matériaux (linéaire ou non) et la séquence de chargement sont définies dans des modules spécifiques par l'utilisateur, ensuite une intégration par tranche est réalisée numériquement pour déterminer la réponse moment-courbure. Le logiciel est basé sur les hypothèses suivantes :

- Les sections planes demeurent planes sous le chargement;
- Les contraintes locales dépendent de la courbe contrainte-déformation de chaque matériau;
- La compatibilité des déformations est supposée entre les matériaux.

Le logiciel peut prendre en considération le raidissement en traction du béton si requis. Lorsque le raidissement du béton est considéré, on obtient la réponse flexionnelle globale de l'élément de structure; tandis que le cas contraire est utile pour évaluer le comportement local lorsque l'ouverture de fissure ainsi que les contraintes dans les armatures ou les torons sont requises. Pour les fins de cette étude, l'évaluation du comportement local était nécessaire.

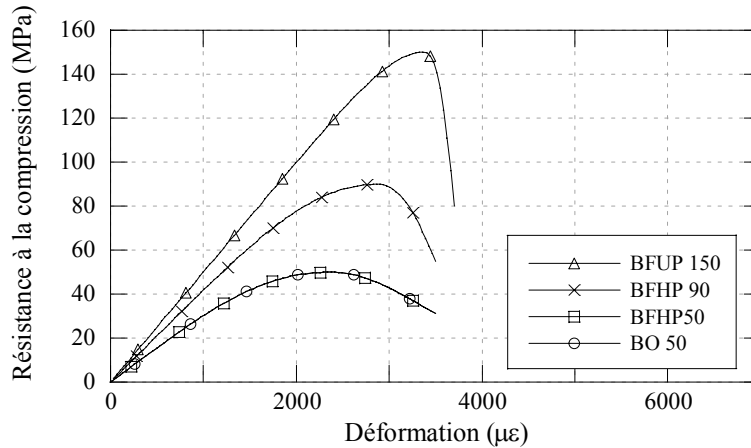


Figure 3 - Courbe contrainte-déformation des classes de bétons à l'étude

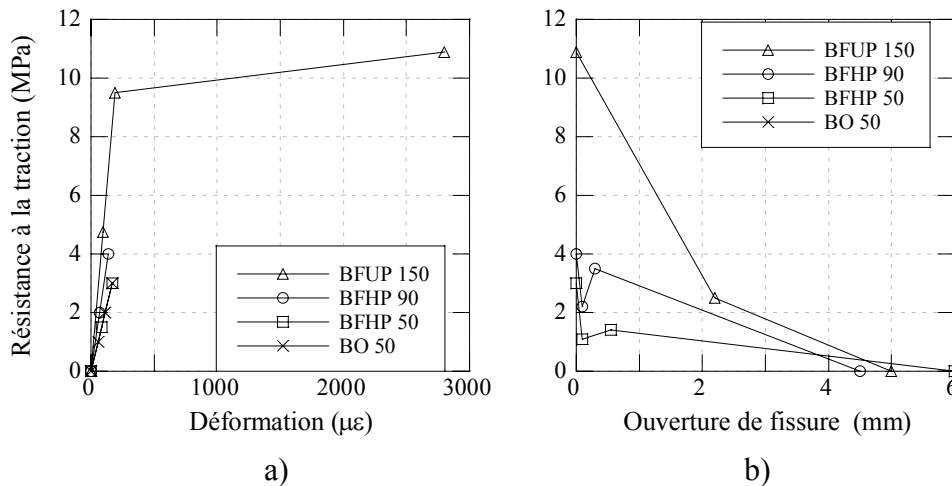


Figure 4 – Comportement en traction des classes de bétons à l'étude
 a) avant la localisation de la fissuration, b) après la localisation de la fissuration

Critères de conception et hypothèses d'analyse

Le critère de conception prépondérant de cette étude est relié au niveau de déformation ou de fissuration admissible en conditions de service (ELUT) pour chaque classe de béton à la fibre inférieure des poutres NEBT. Le tableau 2 présente les critères sélectionnés. Les limites choisies pour le BHP-50 sont celles exigées par le code *CSA-S6-00* [3] et le Manuel de conception des structures du Ministère des Transports du Québec [8] : aucune contrainte de traction n'est permise sous les charges permanentes tandis qu'aucune fissuration n'est tolérée sous les charges vives en conditions de service. Pour les BFHP-50 et BFHP-90, aucune contrainte de traction n'est tolérée sous les charges mortes et la fissuration est acceptée sous les charges vives en conditions de service (précontrainte partielle). Cette dernière hypothèse suppose que les fissures de flexion demeurent fermées sous les charges mortes lorsque les charges de trafic sont nulles. Par ailleurs, le BFUP-150 ne présente aucune fissure localisée avant l'atteinte d'une déformation en traction de 0.25 % (figure 3). Avant d'atteindre ce niveau de déformation, la perméabilité à l'eau du

matériau est très faible puisque que seules des microfissures avec une ouverture inférieure à 10 microns sont présentes [9]. En conséquence, les contraintes de traction sont permises dans le domaine élastique sous les charges permanentes et 75 % de la déformation pré-pic est acceptée sous les charges vives en conditions de service. Tous les autres critères de conception spécifiés dans le code *CSA-S6-00* [3] ont également été vérifiés : contrainte de traction et de compression aux fibres inférieures et supérieures des poutres, contrainte de compression admissible (états limites d'utilisation – ELUT), flèche et variation de contrainte dans les torons dans les sections de béton fissuré sous les charges cycliques induites par les véhicules (états limites de fatigue – ELF), et la capacité portante (états limites ultimes).

Tableau 2 – Critères de dimensionnement

Cas de chargement	Critères	BHP50	BFHP50	BFHPC90	BFUP150
D	Contrainte de traction	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 9.5 MPa domaine élast.
D+L	Contrainte de traction	$\leq 0.4\sqrt{f'_c}$	Fissuration adoucissement	Fissuration adoucissement	Déformation écrouissage
	Ouverture de fissure ou déformation	Non permise	$w \leq 0.15$ mm	$w \leq 0.15$ mm	$\varepsilon_f \leq 1875$ $\mu\epsilon$
Fatigue	Contrainte dans les câbles	N.A.		$\Delta\sigma \leq 125$ MPa	

Note : Contraintes de traction positives.

Pour les conditions impliquant la fissuration du béton (ELUT et ELF), des hypothèses sont requises pour relier une ouverture de fissure à un niveau de déformation. Les relations suivantes ont été utilisées :

$$w = L_r \varepsilon \quad (1)$$

où ε est la déformation dans la couche à une position donnée et L_r est la longueur de référence évaluée avec :

$$L_r = \min \begin{cases} \text{espacement des étriers} = 200 \text{ mm} \\ s_m \\ h/2 \end{cases} \quad (2)$$

Dans cette équation s_m représente l'espacement moyen des fissures et h la hauteur de la section. L'espacement des fissures a été déterminé selon la méthode proposée par Moffatt [10] dans laquelle la valeur prescrite par le CEB-FIB [11] est modifiée pour considérer la présence des fibres :

$$s_m = s_{CEB} \cdot (1 - \gamma_f) = \left[50 + \kappa_1 \kappa_2 \frac{d_b}{4\rho_r} \right] \cdot \left(1 - \frac{f_{tf}}{f'_t} \right) \quad (3)$$

où les paramètres dans la première partie de l'équation sont associés à la section en béton [11], tandis que la seconde partie prend en considération la contribution des fibres en réduisant l'ouverture de fissure. Le paramètre f_{ff} est la résistance en traction post-pic du béton fibré, des valeurs de 2,1 et 2,2 MPa ont été utilisées pour les BFHP-50 et BFHP-90 respectivement.

Les moments de flexion positifs dans les poutres du pont ont été calculés selon la méthode simplifiée du code *CSA-S6-00* [3]. Toutes les étapes de la séquence de construction pour ce type de structures composites préfabriquées et précontraintes ont été considérées dans l'analyse. Les effets du retrait et du fluage ont été évalués selon les recommandations de la PCA [12] et supposés équivalents pour toutes les classes de béton.

OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT DU PONT

Dimensionnement original

Comme analyse préliminaire, le comportement des poutres NEBT conçues avec les 4 familles de béton est comparé au tableau 3 sans optimisation (i.e. en considérant 6 poutres NEBT de 1600 mm de hauteur avec 48 torons). Les premières lignes du tableau décrivent les caractéristiques des poutres, tandis que les lignes suivantes fournissent la résistance flexionnelle ainsi que les résultats pour chacun des critères de conception. L'analyse des résultats montre que les contraintes sont similaires en conditions de service (ELUT) dans tous les cas, car tous les matériaux demeurent élastiques sans atteindre la fissuration. Toutefois, la résistance flexionnelle ultime augmente de 2, 5 et 15 % avec l'utilisation respective du BFHP-50, BFHP-90 et du BFUP-150. La figure 5 illustre également l'augmentation significative de la rigidité de la poutre conçue en BFUP-150. De fait, le module élastique de 48 GPa du BFUP réduit la flèche de la poutre pour un même niveau de chargement.

Tableau 3 - Poutres NEBT-1600 avec 48 torons

Caractéristiques		BHP 50 MPa	BFHP 50 MPa	BFHP 90 MPa	BFUP 150 MPa
Poutre	Section	NEBT 1600	NEBT 1600	NEBT 1600	NEBT 1600
	Nombre de poutres	6	6	6	6
	Nombre de torons (140mm ²)	48	48	48	48
Critères conception	Résistance en flexion (kN-m)	17941	18282	18746	20712
	D: Déform. fibre inf. ($\mu\epsilon$)	-280	-280	-210	-179
	D+L: Ouverture fissure – déformation	w = 0 mm	w = 0 mm	w = 0 mm	$\epsilon = -12 \mu\epsilon$
	$\Delta\sigma$ câbles (MPa)	32	32	27	23
	Paramètre dominant	Contrainte de traction D+L	NA	NA	NA
Cause de la rupture	Compression dans la dalle	Compression dans la dalle	Compression dans la dalle	Compression dans la dalle	

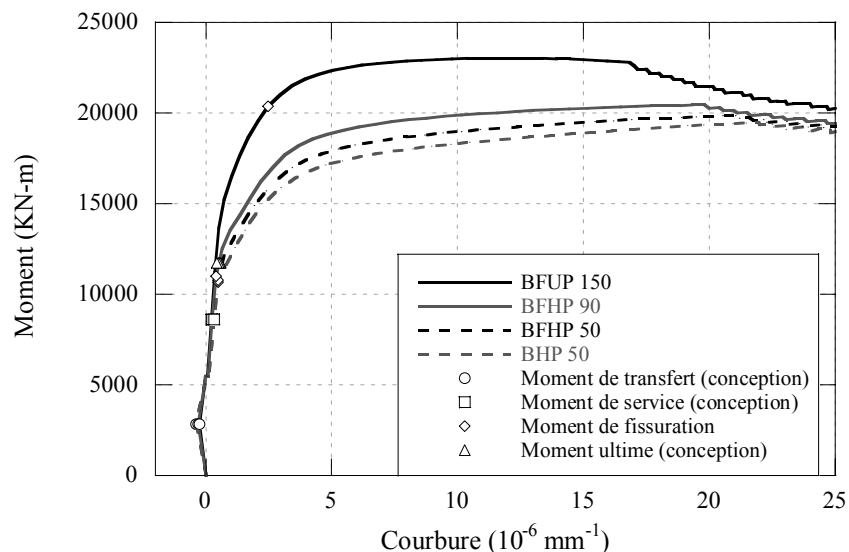


Figure 5 - Comportement en flexion pour le dimensionnement original

Optimisation du nombre de torons

La réduction du nombre de torons dans les poutres est le premier paramètre étudié pour l'optimisation du dimensionnement. Les critères de conception proposés permettent la fissuration dans les BFHP-50 et BFHP-90 et une déformation dans le domaine écrouissant du BFUP. Le tableau 4 résume les résultats de l'optimisation.

Tableau 4 - Optimisation du nombre de tendons avec des poutres NEBT 1600

Caractéristiques		BHP 50 MPa	BFHP 50 MPa	BFHP 90 MPa	BFUP 150 MPa
Poutre	Section	NEBT 1600	NEBT 1600	NEBT 1600	NEBT 1600
	Nombre de poutres	6	6	6	6
	Nombre de torons (140mm ²)	44	36	34	20
Critères conception	Résistance en flexion (kN-m)	16633	14327	14035	11047
	D: Déform. fibre inf. (μ ϵ)	-132	-17	-1	166
	D+L: Ouverture fissure – déformation	w = 0 mm	w = 0,019 mm	w = 0,011 mm	$\epsilon = 426 \mu\epsilon$
	$\Delta\sigma$ câbles (MPa)	34	35	27	30
	Paramètre dominant	Contrainte de traction D+L	Contrainte de traction D	Contrainte de traction D	Résistance en flexion
Cause de la rupture		Compression dans la dalle	Rupture dans les câbles	Rupture dans les câbles	Rupture dans les câbles

On observe qu'il est possible de réduire de 20 % le nombre de torons dans les poutres conçues en BFHP-50 et BFUP-90, ce résultat est principalement dû au comportement post-pic adoucissant des matériaux en traction. La différence du nombre de torons entre les deux BFHP est négligeable car le critère de conception dominant est la contrainte de traction causée par les

charges permanentes, or les matériaux présentent presque la même résistance à la traction. Étant donné le comportement écrouissant du BFUP-150, le dimensionnement associé à ce matériau permet d'éliminer 55 % des torons. Ceci induit une réduction de la résistance flexionnelle de la poutre, mais celle-ci respecte quand même tous les critères de conception. Enfin tous les poutres présentent une ductilité comparable à l'ultime.

Optimisation de la section des poutres NEBT

Le second paramètre d'optimisation est la réduction de la taille des poutres NEBT tout en conservant le nombre original de poutres pour le pont (6). Le tableau 5 présente les résultats.

L'utilisation de poutres de section plus petite réduit leur résistance flexionnelle mais diminue aussi l'intensité des moments flexionnels à supporter (allègement de poids). La diminution de profondeur de la section NEBT avec le BHP-50 et le BFHP-50 s'est avérée impossible. Cependant la profondeur de la poutre NEBT a été réduite de 25 et 38 % avec le BFHP-90 et le BFUP-150 respectivement. Il importe de mentionner qu'une section de plus faible profondeur est plus flexible et présente une plus grande flèche, ces aspects n'ont cependant pas été traités dans l'analyse comparative. Enfin toutes les poutres NEBT possèdent une excellente ductilité à la rupture.

Table 5 - Optimisation de la section des poutres NEBT

Caractéristiques		BHP 50 MPa	BFHP 50 MPa	BFHP 90 MPa	BFUP 150 MPa
Poutre	Section	NEBT 1600	NEBT 1600	NEBT 1200	NEBT 1000
	Nombre de poutres	6	6	6	6
	Nombre de torons (140mm ²)	44	36	46	40
Critères conception	Résistance en flexion (kN-m)	16633	14327	13229	10812
	D: Déform. fibre inf. (µε)	-132	-17	-10	191
	D+L: Ouverture fissure – déformation	w = 0 mm	w = 0,019 mm	w = 0,02 mm	ε = 762 µε
	Δσ câbles (MPa)	34	35	39	65
	Paramètre dominant	Contrainte de traction D+L	Contrainte de traction D	Contrainte de traction D	Résistance en flexion
	Cause de la rupture	Compression dans la dalle	Rupture dans les câbles	Compression dans la dalle	Compression dans la dalle

Optimisation du nombre de poutres

Le dernier paramètre de l'optimisation est la réduction du nombre de poutres NEBT requises pour le pont. Il importe de souligner qu'une augmentation de l'espacement des poutres en béton fibré a pour effet de hausser les moments flexionnels de conception (D et D+L) en comparaison aux poutres de référence fabriquées en BHP. La profondeur minimale des poutres déterminée à la section précédente (tableau 5) a été utilisée comme point de départ pour cette analyse. Les dimensionnements finaux obtenus pour les 4 classes de béton avec le nombre minimal de poutres et la section optimale sont résumés au tableau 6 et à la figure 6.

Pour résister aux moments flexionnels de conception plus élevés, le nombre de torons dans les poutres en béton fibré a été augmenté. Les dimensionnements proposés pour le BFHP-90 et le BFUP-150 comprennent 4 poutres, soit 2 de moins que le pont de référence. Ces dimensionnements sont optimisés au maximum puisque le nombre de torons admissibles dans les sections NEBT a été atteint (~60). Les résultats de cette dernière phase d'optimisation présentent un grand intérêt, car un nombre réduit de poutres permet de diminuer considérablement les coûts de construction en termes de matériaux, d'appareils d'appui et de temps d'installation.

Table 6 - Optimisation du nombre de poutres avec la section NEBT optimisée

Caractéristiques		BHP 50 MPa	BFHP 50 MPa	BFHP 90 MPa	BFUP 150 MPa
Poutre	Section	NEBT 1600	NEBT 1600	NEBT 1200	NEBT 1000
	Nombre de poutres	6	5	4	4
	Nombre de torons (140mm ²)	44	42	60	58
Critères conception	Résistance en flexion (kN-m)	16633	16717	17153	14788
	D: Déform. fibre inf. (μ ϵ)	-132	-53	-8	177
	D+L: Ouverture fissure – déformation	w = 0 mm	w = 0,017 mm	w = 0,042 mm	ϵ = 962 μ ϵ
	$\Delta\sigma$ câbles (MPa)	34	39	49	67
	Paramètre dominant	Contrainte de traction D+L	Compression fibre sup.	Contrainte de traction D	Résistance en flexion
	Cause de la rupture	Compression dans la dalle	Rupture dans les câbles	Compression dans la dalle	Compression dans la dalle

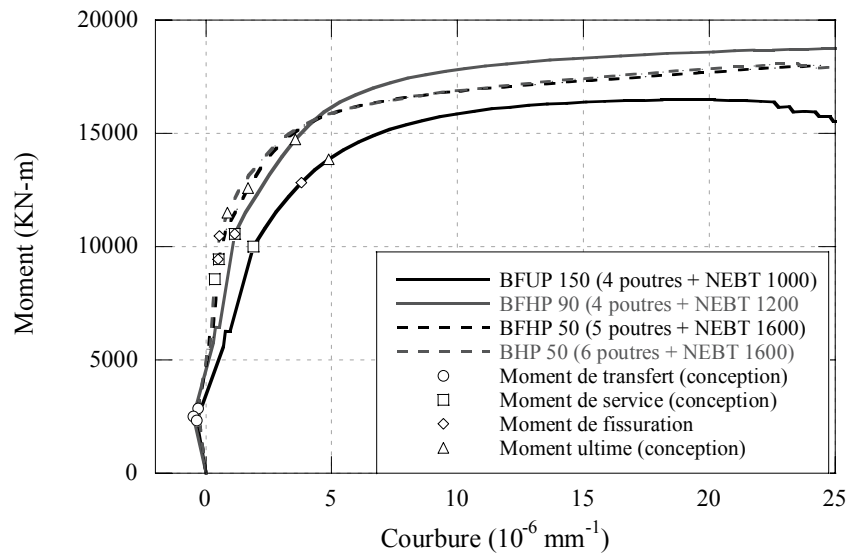


Figure 6 - Comportement en flexion pour l'optimisation du nombre de poutre

CONCLUSION

L'utilisation de béton fibré permet d'adopter de nouveaux critères de conception pour les poutres de pont en béton précontraint et offre ainsi l'opportunité d'optimiser davantage les dimensionnements. D'une part, les poutres en BFHP peuvent être conçues avec une précontrainte partielle en acceptant de fines fissures en conditions de service (ELUT) qui ont un impact très limité sur la durabilité en environnements sévères. D'autre part, le BFUP ne présente aucune fissure localisée en conditions de service et présente donc une perméabilité à l'eau très faible qui est inférieure à celle d'un BHP intact [9].

Cet article présente la comparaison du comportement flexionnel de poutres NEBT conçues avec 4 classes de béton. Les principales conclusions de l'étude sont les suivantes :

- Pour une même taille de poutre, le nombre de torons requis diminue de 20 et 55 % avec l'utilisation de BFHP-90 et BFUP-150 respectivement;
- La profondeur des poutres NEBT peut être réduite de 1600 à 1200 mm avec le BFHP-90 et jusqu'à 1000 mm avec le BFUP-150;
- Pour les poutres avec une taille optimisée, il a été possible de surcroit de diminuer le nombre de poutres du pont de 6 à 4 avec le BFHP-90 et le BFUP-150;
- Le BFHP-90 constitue le matériau le plus efficace pour la conception du pont de référence étant donné qu'il permet une réduction significative de la profondeur et du nombre de poutres avec un impact limité sur les coûts de fabrication;
- Le module d'élasticité élevé du BFHP-90 et du BFUP-150 mène à une diminution de la déformation élastique initiale lors de l'application de la précontrainte et une réduction de la déformation de fluage. Conséquemment les pertes de précontrainte diminuent et l'application de la précontrainte devient plus efficace.

Les bétons fibrés apportent des avantages supplémentaires aux éléments de structure précontraints. La présence des fibres métalliques augmente la résistance en cisaillement d'interface, ce qui réduit la longueur d'ancrage des torons. Le comportement adoucissant des bétons fibrés fournit aussi aux éléments de structure des résistances en flexion et en cisaillement supérieures [1,7]. Ces matériaux présentent également une résistance accrue aux impacts, or il s'agit de cas de charge qui surviennent fréquemment pour les poutres de pont. Finalement la présence des fibres métalliques améliore substantiellement la rigidité et la durabilité après la fissuration des matériaux.

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada.

RÉFÉRENCES

- [1] NAAMAN, A.E. and Reinhardt, H.W. 1996. 'High performance fibre reinforced cement composites 2 (HPFRCC 2)'. Proceedings of the Second International RILEM Workshop, Ann Arbor, USA, June 11-14 1995, pp.292-329
- [2] MASSICOTTE, B., BÉDARD, S. PICARD, A. 2001. 'Étude du renforcement passif d'une poutre en béton précontraint, Phase 1 : Étude théorique'. Rapport EPM/CGS-2001-04, École Polytechnique de Montréal, Canada.
- [3] CSA, 2000. 'CSA/S6-00 – Code canadien sur le calcul des ponts routiers'. Association canadienne de normalisation, Mississauga, Ontario, Canada.
- [4] BASTIEN, D. 2004. 'Utilisation structurale du béton fibré pour la conception des dalles de ponts'. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- [5] CASANOVA, P. 1995. 'Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure'. Thèse de doctorat, Laboratoires des ponts et chaussées, France.
- [6] HABEL, K. 2004. 'Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete'. Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.
- [7] Folcher, D. 2002. 'Étude du renforcement passif d'une poutre en béton précontraint'. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- [8] MTQ, 2003. 'Manuel de conception des structures'. Ministère des transports du Québec, Québec.
- [9] CHARRON, J.-P., DENARIÉ, E., BRÜHWILER, E. 2006. 'Permeability of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes (UHPFRC) under high stresses'. Accepté dans la revue Materials and Structures.
- [10] MOFFATT, K. 2001. 'Analyse de dalles de pont avec armature réduite et béton de fibres métalliques'. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- [11] CEB-FIB. 1993. 'CEB-FIB MODEL CODE 1990'. Thomas Thelford, London.
- [12] PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA), 1969. 'Design of continuous highway bridges with precast, prestressed concrete girders'. USA.