

UTILISATION DE BÉTONS FIBRÉS ULTRA PERFORMANTS POUR LA RÉHABILITATION D'OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ

Jean-Philippe Charron Professeur adjoint, Ecole Polytechnique de Montréal (Canada)
Katrin Habel Post-doctorante, Université de Toronto (Canada)
Emmanuel Denarié Chercheur associé, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse)
Eugen Brühwiler Professeur, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse)

RÉSUMÉ : Les progrès dans le développement des matériaux de construction ont toujours fait évoluer l'ingénierie en structures. La mise au point des bétons fibrés ultra performants (BFUP) n'y fait pas exception. De fait, les caractéristiques remarquables de ces bétons permettent d'envisager la conception d'éléments de structure novateurs et le développement de nouvelles méthodes de réhabilitation des structures en béton armé existantes. Des campagnes d'essais de perméabilité à l'eau ont été réalisées afin d'évaluer la déformation et l'ouverture de fissure admissibles dans les BFUP en service pour garantir une excellente durabilité. L'apport structural des BFUP pour la construction d'éléments de structure composites a également été évalué au moyen d'essais de flexion sur poutres. Cet article résume les principaux résultats de ces travaux et confirme le potentiel d'utilisation des BFUP pour la conception et la réhabilitation d'ouvrages en béton armé.

INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie, de nombreux projets de recherche ont été consacrés à l'amélioration du comportement déformationnel des matériaux cimentaires en incorporant des fibres métalliques. Ceci a donné lieu à un nouveau type de matériau appelé béton fibré ultra performants (BFUP). Le BFUP fournit à l'ingénieur civil une combinaison de propriétés unique ; soit une très faible perméabilité au gaz et aux liquides [1,2], des propriétés mécaniques hors pair, un comportement en traction écrouissant comparable à celui des métaux ductiles ainsi qu'un excellent comportement rhéologique à l'état frais [3,4,5].

Jusqu'à présent, les BFUP ont été utilisés principalement pour la conception de nouvelles structures telles que des passerelles piétonnières conçues à partir d'éléments préfabriqués [6,7]. Or, les BFUP sont également adaptés pour la réhabilitation d'ouvrages en béton armé. Le concept de réhabilitation consiste à remplacer le béton détérioré par du BFUP dans les zones d'expositions mécaniques et environnementales sévères. L'objectif est d'exploiter les propriétés du BFUP où son apport permet une amélioration notable du comportement mécanique et de la durabilité des structures. Pour un tablier de pont exposé au contact direct et aux éclaboussures d'eau contenant les chlorures des sels de déverglaçage, les zones d'exposition environnementales sévères sont la face supérieure de la dalle de roulement ainsi que les bordures et les parapets (figure 1). La dalle de roulement du pont peut également être soumise à des sollicitations mécaniques plus élevées lorsque les charges de trafic sont augmentées (accroissement du poids des camions admissibles ou ajout de voies de circulation). La résistance de la dalle peut alors être augmentée par l'utilisation de BFUP sans modifier significativement le poids propre de la structure. Le renforcement des autres éléments porteurs (poutres maîtresses, piles, fondations) peut ainsi parfois être évité. L'usage du BFUP est également envisageable pour la conception de nouvelles structures composites construites avec du béton armé et du BFUP.

Depuis trois ans, des travaux ont été effectués à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne afin d'évaluer l'amélioration de la durabilité et de la capacité portante d'éléments de structure en béton armé réhabilités avec du BFUP. Un résumé des principaux résultats des travaux est présenté dans cet article qui a été publié au Congrès de l'ACI Section du Québec et de l'Est de l'Ontario à Sherbrooke en 2004.

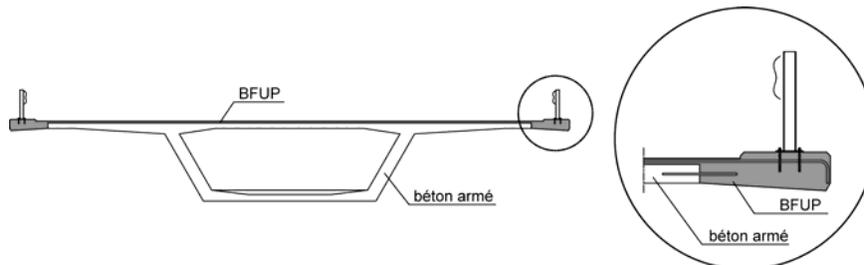


Figure 1 : Concept pour la construction et la réhabilitation de ponts avec du BFUP

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Les travaux de recherche ont été réalisés avec une formulation de BFUP [4] fabriquée à partir d'un ciment à haute teneur en silicates (CEM I 52.5), de fumée de silice produite par précipitation, de sable de Fontainebleau et d'un volume de 6 % de fibres métalliques de 10 mm (tableau 1). Le BFUP étudié possède un rapport eau/liant de 0,14 et un rapport eau/ciment de 0,18. Le matériau n'a subi aucun traitement thermique et a présenté les caractéristiques mécaniques suivantes à 28 jours : $f_c = 168$ MPa, $f_t = 11$ MPa et $E = 48$ GPa.

Tableau 1 : Formulation du BFUP

Constituents	Quantité (kg/m ³)
Ciment - CEM I 52.5	1051
Fumée de silice	273
Sable ($d_{max} = 0,5$ mm)	733
Fibres métalliques ($l/d = 50$)	468
Eau	165
Superplastifiant	35
Teneur en air représentant 4 % du volume total	

Une utilisation efficace des propriétés du BFUP pour la conception et la réhabilitation de structure requiert la détermination de la déformation admissible dans le matériau qui garantit une perméabilité adéquate. Cet aspect a été étudié en réalisant des essais de perméabilité à l'eau sur des spécimens de BFUP préalablement endommagés en traction uniaxiale. Par ailleurs, l'estimation de l'apport structural du BFUP dans les éléments composites conçus avec du béton armé et du BFUP a été effectuée au moyen d'essais de flexion sur poutres.

ESSAI DE PERMÉABILITÉ

Des spécimens de BFUP (plaques de 5 x 20 x 50 cm³) ont été endommagés à l'aide d'un dispositif de traction uniaxial installé sur une presse universelle de grande rigidité (figure 2a) [8]. Les spécimens ont été entaillés à mi-longueur pour initier le développement de la fissuration à l'intérieur de la zone de mesure de 10 cm de 2 capteurs inductifs (type LVDT). Lorsqu'un spécimen atteignait la déformation en traction préalablement définie, il était déchargé et retiré du dispositif de traction. Par la suite, une carotte de 10 cm de diamètre était extraite de la zone de mesure des déformations du spécimen et soumise à un essai de perméabilité.

La perméabilité au liquide du BFUP fissuré a été estimée à l'aide de cellules de perméabilité (figure 2b) [9]. Une cellule comprend deux réservoirs de plexiglas disposés sur les surfaces supérieure et inférieure d'une carotte de béton préalablement collée à l'intérieur d'un anneau en aluminium. Des tiges filetées et des écrous solidarisent l'ensemble et des joints de caoutchouc assurent l'étanchéité de la cellule. Le réservoir supérieur est relié à une pipette graduée. Celle-ci permet d'imposer une charge de liquide (25 cm) et de mesurer le débit traversant le spécimen. Le liquide atteignant le réservoir inférieur peut s'échapper par un petit tube en plexiglas. En posant l'hypothèse que le spécimen de BFUP est saturé, l'effet de la gravité sur la colonne de liquide est le principal mécanisme responsable de la pénétration du liquide dans le spécimen. La quantité de liquide qui s'infiltre avec le temps est mesurée par la chute du ménisque dans la pipette. Périodiquement le niveau du ménisque est ajusté afin de conserver une charge de liquide constante durant l'essai de perméabilité. La limite de détection de la cellule correspond approximativement à un coefficient de perméabilité de 1×10^{-10} cm/s. Les cellules de perméabilité ont été utilisées pour étudier la perméabilité à l'eau et au glycol de même que la capacité d'absorption du BFUP [10]. Les résultats présentés dans cet article concernent uniquement la perméabilité à l'eau.

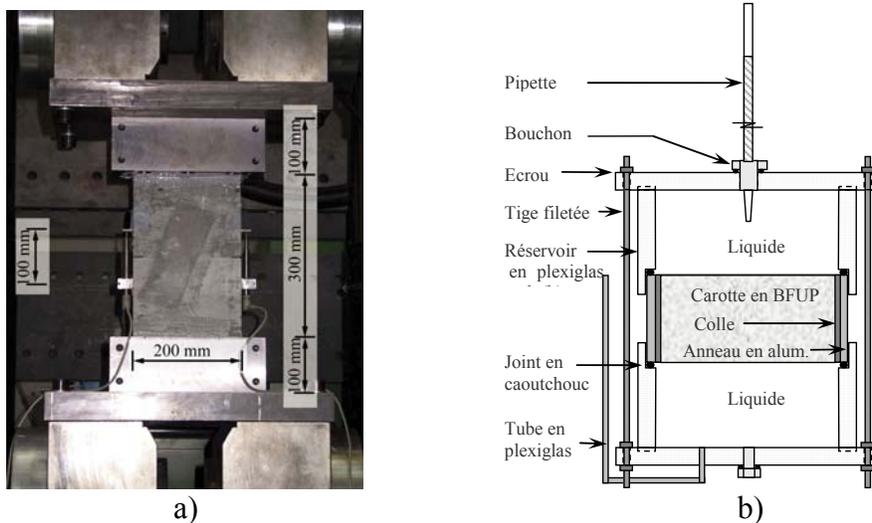


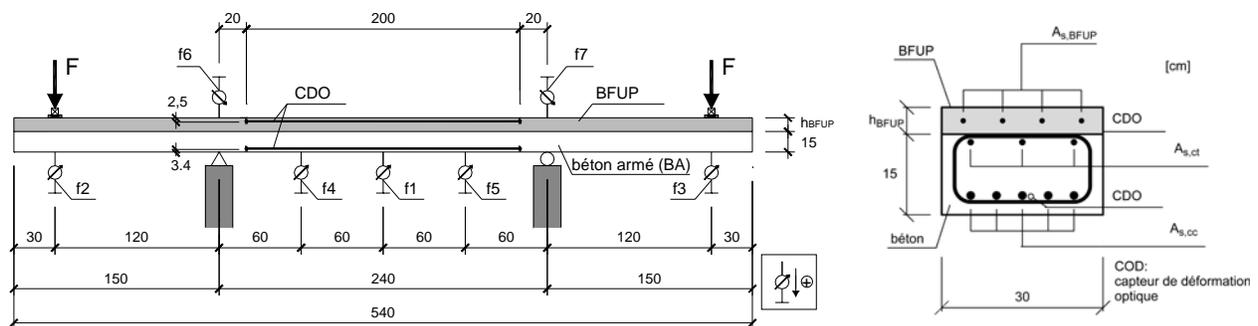
Figure 2 : Dispositifs utilisés pour l'étude de la perméabilité du BFUP
a) essai d'endommagement en traction uniaxial, b) essai de perméabilité

ESSAI DE FLEXION SUR POUTRE COMPOSITE

Des poutres composites, formées d'un substrat en béton armé et d'une couche de BFUP, ont été testées en flexion 4 points (figure 3) [8]. La couche supérieure en BFUP, dont les propriétés mécaniques ont été décrites précédemment, a été sollicitée de manière à observer son comportement en traction sous une sollicitation monotone en flexion, avec un moment constant sur la partie centrale entre les appuis de la poutre. Le béton utilisé pour la fabrication des substrats avait une composition conventionnelle, soit un rapport eau/ciment égal à 0,40 et des granulats d'un diamètre maximal de 16 mm. Les caractéristiques mécaniques du béton à 28 jours sont les suivantes: $f_c = 51$ MPa, $f_t = 3,4$ MPa et $E = 38$ GPa.

La surface du substrat en béton armé a été préparée par hydrodémolition avant la mise en place de la couche de BFUP afin de reproduire les procédés d'une intervention sur un ouvrage. Au moment des essais de flexion, l'âge du substrat en béton armé variait entre 8 et 15 mois et celui de la couche de BFUP était de 90 jours. Les paramètres étudiés pour ces essais étaient l'épaisseur de la couche de BFUP ($h_{BFUP} = 3, 5$ et 10 cm) et la présence d'armature passive dans le BFUP ($\rho_{s, BFUP} = 0$ et $2,1$ %). La dénomination des poutres est la suivante : SA3 correspond à un poutre avec une réparation de 3 cm en BFUP sans armature; A5 représente une poutre comprenant une couche de 5 cm de BFUP avec armature.

Les essais de rupture ont été pilotés en imposant la vitesse de déplacement de l'un des deux vérins à $0,4$ mm/min. La force exercée par les deux vérins était identique au cours des essais. Les flèches f_1 à f_7 ont été mesurées à l'aide de capteurs inductifs (figure 3); la flèche effective au centre de la portée de la poutre a été évaluée avec la formule suivante : $f = f_1 + \frac{1}{2} \cdot (f_6 + f_7)$. Les déformations internes ont été mesurées avec des capteurs de déformation optiques (CDO) localisés dans la travée centrale de la poutre. Des jauges de type oméga (Ω) ont été disposées à la surface supérieure de la poutre afin de mesurer l'ouverture des fissures principales. L'ouverture des fissures a également été déterminée à l'aide d'une loupe micrométrique pendant les essais. Seuls les résultats obtenus avec les capteurs inductifs et la loupe micrométrique seront discutés dans cet article. Les autres résultats sont décrits en détail dans [8].



a) configuration de l'essai, b) section transversale des poutres

Figure 3 : Essai de rupture en flexion 4 points sur poutre composite

RÉSULTATS ET DISCUSSION

ESSAI DE PERMÉABILITÉ

La courbe contrainte-déformation d'un spécimen de BFUP ayant subi un essai de traction uniaxial complet est illustrée en gris à la figure 4a. Après une phase de déformation linéaire-élastique, le BFUP présente une phase d'écrouissage pendant laquelle des microfissures et des macrofissures se développent. Cette phase se prolonge jusqu'à une déformation de 0,25 % où la résistance ultime est atteinte. Ensuite, une fissure localisée apparaît et la phase d'adoucissement débute. A titre de comparaison, une fissure localisée apparaît dans un béton conventionnel pour une déformation en traction de 0,03 %. Les courbes tracées en noir à la figure 4a illustrent le comportement des plaques de BFUP endommagées en traction uniaxial. Pour ces essais, les plaques ont été déchargées lorsqu'elles ont atteint les niveaux de déformation en traction prédéfinis; soit 0,13 - 0,25 - 0,50 - 0,75 et 1,00 %. La déformation résiduelle obtenue pour chacun des essais après déchargement est indiquée pour chaque courbe et caractérise l'endommagement effectif induit dans les spécimens (microfissures, macrofissures et fissure localisée le cas échéant). L'ouverture maximale des fissures a été mesurée à l'aide d'une loupe micrométrique sur les spécimens de BFUP à l'état déchargé. Les données recueillies pour les différentes conditions d'essais sont résumées au tableau 2.

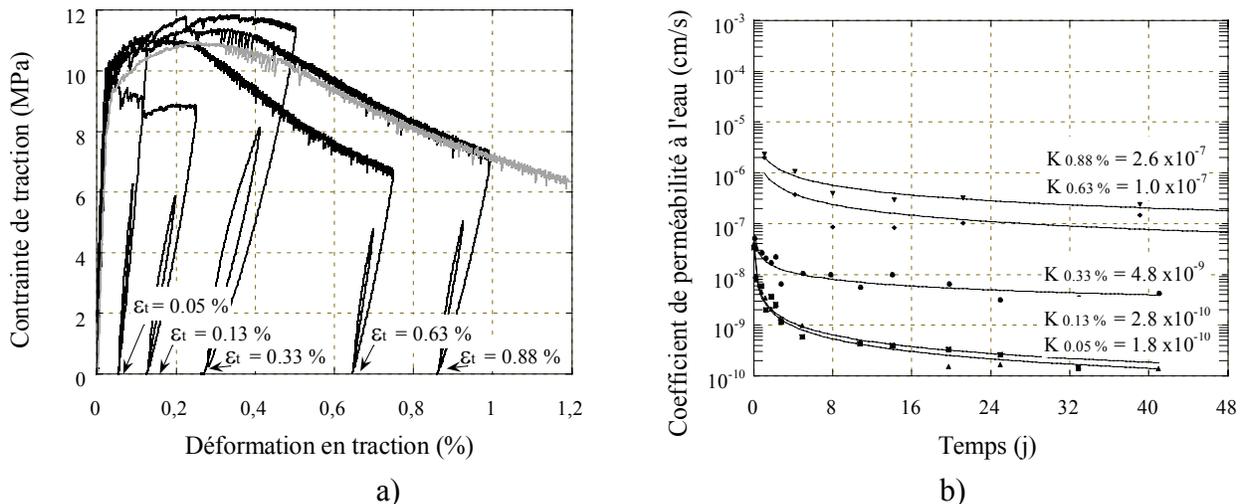


Figure 4 : Résultats de la campagne d'essais de perméabilité

- a) diagrammes contrainte-déformation des essais d'endommagement,
b) courbes de perméabilité à l'eau sur spécimen déchargé

L'évolution de la perméabilité à l'eau des carottes prélevées sur les spécimens de BFUP endommagé est montrée à la figure 4b. Pour chacune des conditions d'essais, la courbe moyenne obtenue sur trois spécimens est donnée. La forme des courbes indique un comportement non-linéaire au cours des 14 premiers jours de l'essai de perméabilité. Ce phénomène est dû à l'absorption d'eau dans les pores partiellement saturés du matériau. Par la suite, le flux d'eau traversant le BFUP se stabilise. Le coefficient de perméabilité est calculé lorsque le régime

stationnaire est atteint, c'est à dire après 30 jours d'essai. Les résultats indiquent que la perméabilité augmente progressivement avec le niveau de déformation résiduelle induit à l'intérieur du BFUP. Il importe de souligner que le coefficient de perméabilité à l'eau demeure inférieure à 5×10^{-9} cm/s pour des spécimens présentant une déformation en traction résiduelle considérable, soit jusqu'à 0,33 %. Un tel coefficient de perméabilité est équivalent à celui d'un béton de rapport eau/ciment égal à 0,41 à l'état intact et n'ayant subi aucune sollicitation [11]. L'étanchéité à l'eau du BFUP malgré un endommagement important est associée à son volume élevé de fibres métalliques qui permet le développement d'une fissuration diffuse dans le BFUP et limite très efficacement l'ouverture des fissures. De fait, des fissures d'une ouverture maximale de 90 μm sont observées dans le BFUP présentant une déformation résiduelle de 0,33 % (tableau 2). Pour fin de comparaison, la rupture complète en traction uniaxiale d'un béton conventionnel survient pour une ouverture de fissure de l'ordre de 200 μm , ce qui correspond à un allongement moyen de l'ordre de 0,2 % sur une base de mesure de 100 mm.

Tableau 2 : Résultats des essais d'endommagement sur spécimens de BFUP

Déform. maximale sous charge (%)	Déform. résiduelle après déchargement (%)	Ouverture de fissure maximale après déchargement (μm)
0,13	0,05	15
0,25	0,13	35
0,50	0,33	90
0,75	0,63	330
1,00	0,88	520

Considérant les résultats de perméabilité, le BFUP peut être considéré étanche à la pénétration de l'eau lorsque des fissures d'une ouverture inférieure à 90 μm sont présentes dans le matériau. Ce postulat est conforté par le fait que le BFUP possède aussi une grande capacité à cicatrifier ses fissures et à réduire sa perméabilité au cours du temps grâce à son interaction avec l'eau [10]. En effet, même après plusieurs mois voire des années d'hydratation, une large proportion du ciment présent dans le BFUP est encore non-hydraté. La pénétration d'eau dans le matériau a pour effet de poursuivre l'hydratation des grains de ciment à la surface des fissures et à l'intérieur de la matrice cimentaire, favorisant en conséquence une diminution de la perméabilité et une amélioration des propriétés mécaniques du BFUP dans le temps. Ce dernier phénomène a d'ailleurs été observé sur des plaques en BFUP endommagées par des essais de fatigue et ensuite immergées dans une eau chlorée [5]. Suite à ce conditionnement, les plaques de BFUP endommagées ont affiché une résistance à la flexion supérieure à celle des spécimens témoins n'ayant subi aucun endommagement.

ESSAI DE FLEXION SUR POUTRES COMPOSITES

La figure 5 montre les diagrammes force-flèche des poutres composites testées pour chacune des conditions d'essais. La courbe moyenne obtenue pour trois spécimens est présentée. La simulation du comportement du substrat en béton armé avant l'intervention ($h \cdot b = 17 \cdot 30$ cm) et celui de poutres en béton armé (de dimensions identiques aux poutres composites) sont

représentés par des courbes pointillées. Ces courbes pointillées ont été calculées avec un modèle analytique adapté pour l'analyse d'éléments en béton armé soumis à la flexion. Le substrat en béton armé de même que les poutres de référence A5 et A10 en béton armé montrent une forte diminution de la rigidité peu après la fissuration du béton. Lorsqu'une fissure localisée apparaît à une flèche de 1,5 mm, la force transmise par le béton diminue fortement à cause de sa faible énergie de rupture. Les barres d'armature reprennent alors l'effort de traction.

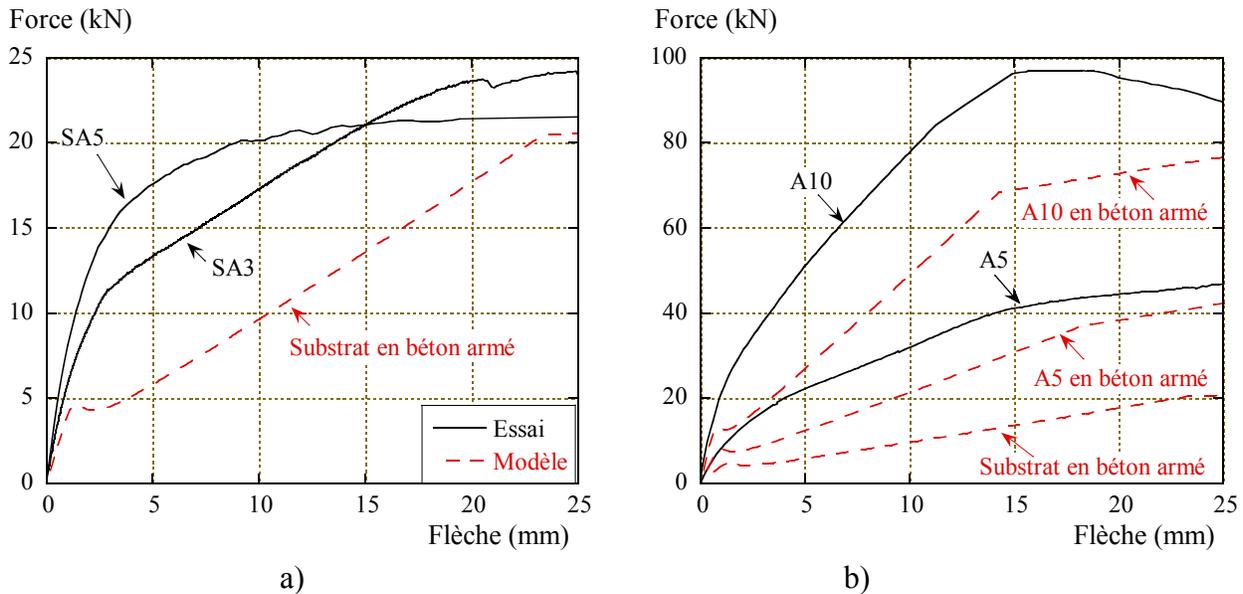


Figure 5 : Diagrammes force-flèche des poutres composites pendant les essais de flexion
a) courbe moyenne des poutres SA3 et SA5,
b) courbe moyenne des poutres A5 et A10

Poutres composites avec du BFUP non armé

La contribution du BFUP au comportement flexionnel des poutres composites se traduit par une résistance plus élevée qui subsiste jusqu'à ce qu'une flèche de 20 mm soit atteinte (figure 5a). Une fissuration répartie se développe dans le BFUP jusqu'à une flèche d'environ 4 mm. Ces fissures ont alors une ouverture d'environ 50 μm et leur espacement varie entre 70 et 150 mm. Ensuite, une ou plusieurs fissures localisées se forment et s'ouvrent progressivement à la surface supérieure des poutres. A une flèche de 15 mm, les fissures localisées atteignent l'interface et une délamination se produit. L'ouverture de la fissure localisée devient telle que la force transmise par le BFUP est négligeable et le comportement de la poutre est gouverné par la section en béton armé (substrat). La force maximale supportée par les poutres composites à l'état ultime est équivalente à celle du substrat en béton armé. Le gain en rigidité et en résistance apporté par le BFUP est significatif jusqu'à une flèche de 20 mm.

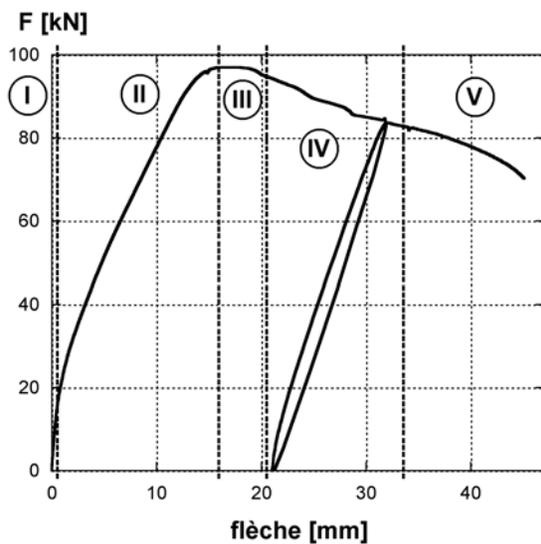
Poutres composites avec du BFUP armé

La présence d'armature passive tendue dans la couche de BFUP ($A_{s,BFUP}$) augmente nettement la capacité portante des poutres composites (figure 5b). La force maximale supportée par les poutres

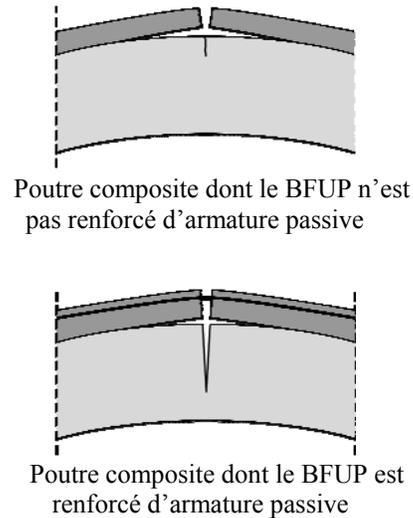
composites A5 et A10 est fortement augmentée par rapport à des poutres de mêmes dimensions en béton armé. L'armature contribue aussi au développement d'une meilleure répartition de la fissuration. Les fissures visibles à la surface des poutres sont espacées de 20 à 50 mm lorsque la phase de fissuration répartie se termine. Les fissures sont donc trois fois plus rapprochées que celles observées sur les poutres SA3 et SA5. Ensuite, les fissures localisées apparaissent progressivement pour une flèche supérieure à 15 mm, comparativement à une flèche d'environ 4 mm pour les poutres dont le BFUP de contient pas armature. Au moment de la localisation de la fissuration, les déformations mesurées sur la face tendue en BFUP à l'aide des capteurs de déformation optiques internes sont trois fois plus élevées que pour les poutres sans armature.

Mode de rupture des poutres composites

Le comportement à la rupture de l'ensemble des poutres composites testées peut être subdivisé en 5 phases tel qu'illustré à la figure 6 pour la poutre composite A10.



a)



Poutre composite dont le BFUP n'est pas renforcé d'armature passive

Poutre composite dont le BFUP est renforcé d'armature passive

b)

Figure 6 : Comportement en flexion des poutres composites en béton armé et BFUP

a) schéma de principe illustré avec la poutre composite A10, b) modes de rupture

Phase I : Au début de l'essai de rupture en flexion, les poutres présentent un comportement linéaire élastique jusqu'à ce que le seuil de fissuration de la matrice du BFUP soit atteint.

Phase II : Des fissures réparties avec une ouverture inférieure à 50 μm se développent dans le BFUP. Grâce aux fibres métalliques, la sollicitation est transmise à travers les fissures et les contraintes dans le BFUP continuent à augmenter (phase d'écroutissement du matériau). Selon le degré d'entrave généré par les barres d'armature et le substrat dans le BFUP, la création de la fissuration répartie se poursuit jusqu'à une flèche d'environ 4 mm pour les poutres SA3 et SA5, et de 15 mm pour les poutres A5 et A10.

Phase III : Une ou quelques fissures localisées apparaissent à la surface supérieure des poutres. Elles se développent à partir de fissures existantes.

Phase IV : Lorsque les fissures localisées atteignent l'interface de réparation, elles continuent d'abord leur progression verticalement dans le substrat en béton armé. Peu après, une fissuration horizontale à l'interface peut être observée. Cette fissuration devient importante pour les poutres dont la couche de BFUP ne contient pas d'armature (SA3, SA5) et une délamination se produit. Les fissures localisées qui se développent dans les poutres qui contiennent des armatures dans la couche de BFUP (A5, A10) poursuivent leur progression verticale dans le substrat en béton armé et initie simultanément une fissuration horizontale à l'interface de réparation. La délamination est cependant plus faible pour ces poutres.

Phase V : La rupture de la poutre composite se produit par un écrasement en compression de la fibre inférieure du substrat en béton armé. Lorsque l'épaisseur de la couche de BFUP est importante par rapport à la hauteur totale de la poutre composite (A10), une rupture des barres d'armature en traction peut survenir.

SYNTHÈSE DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ ET DE RUPTURE

En conditions de service, une poutre est sollicitée dans les phases I et II du comportement flexionnel décrit à la figure 6. D'une part, les essais de rupture en flexion démontrent que pour ce domaine de sollicitation, les poutres composites en béton armé et BFUP possèdent une rigidité plus élevée qu'une poutre de mêmes dimensions conçue exclusivement en béton armé (figure 5). Pour une flèche en portée centrale comparable, la capacité portante de la poutre composite est donc supérieure à celle d'une poutre en béton. Ces deux caractéristiques illustrent la contribution structurale que peut apporter l'utilisation du BFUP. D'autre part, les fissures réparties observées sur la face tendue du BFUP des poutres composites présentent une ouverture inférieure à 50 μm en conditions de service. Or les essais de perméabilité permettent d'affirmer que la pénétration de l'eau dans le BFUP endommagé et présentant des fissures d'une ouverture inférieures à 90 μm est remarquablement faible. Le coefficient de perméabilité est tel qu'il peut garantir l'étanchéité d'une surface en BFUP soumise à une déformation en traction résiduelle de l'ordre de 0,33 % (figure 4 et tableau 2). L'usage de ce matériau dans les zones d'un ouvrage exposées à des conditions environnementales sévères permet de fournir une excellente protection contre la pénétration de l'eau et des chlorures qui initient le phénomène de corrosion des armatures. Ainsi, les éléments de structure conçus en béton armé et BFUP devraient atteindre leur durée de vie utile sans nécessiter d'intervention de maintenance.

PROJET PILOTE

Compte tenu des résultats obtenus lors des campagnes expérimentales, un projet pilote d'utilisation du BFUP pour la réhabilitation du Pont sur la Morge a été réalisé récemment sous la direction du Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Le Pont sur la Morge est situé dans les Alpes Suisses et soumis à un salage hivernal intensif. La figure 7 présente la section transversale de l'ouvrage avant et après l'intervention. Ce projet pilote a permis de tester avec succès: (1) l'élargissement de l'ouvrage à l'aide d'une poutre en béton armé préfabriquée munie d'une bordure en BFUP également préfabriquée, (2) l'application d'une couche de 3 cm de BFUP sur l'ensemble de la chaussée en remplacement du béton d'enrobage contaminé par les chlorures, (3) le recouvrement de la bordure amont à l'aide d'une couche protectrice de BFUP de 3 cm.

Les travaux de réhabilitation ont pu être exécutés sans difficulté avec les équipements de chantier usuels. La fabrication du BFUP a été réalisée à une centrale de production de béton et le transport du matériau de la centrale au chantier a été effectué par camion malaxeur. Cette première expérience d'application de BFUP coulé en place s'est avérée simple et rapide. En effet, la facilité de mise en oeuvre du BFUP autocompactant et les étapes de construction qu'il permet d'éviter (telle que la pose d'une étanchéité) ont permis d'accélérer l'exécution des travaux de réhabilitation. Les résultats des contrôles de qualité effectués sur le BFUP durci mis en place sur l'ouvrage ont confirmés la très faible perméabilité à l'air du matériau.

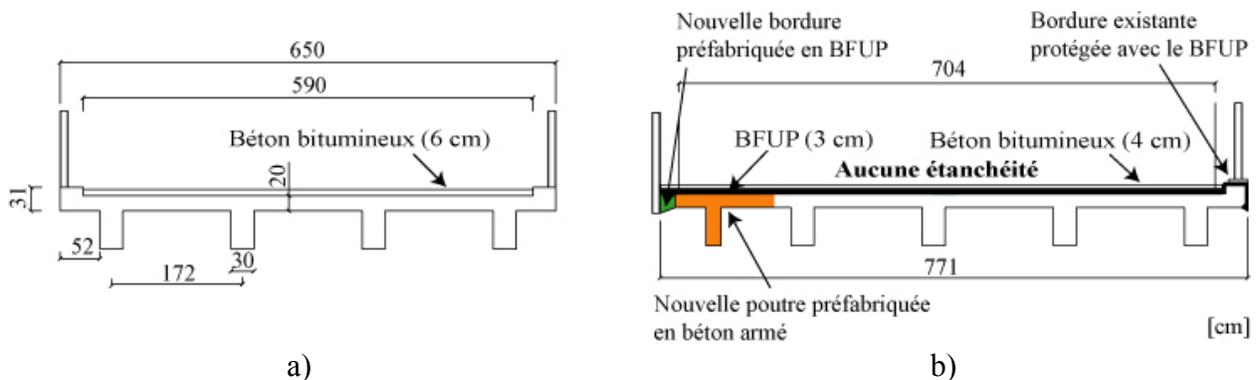


Figure 7 : Réhabilitation du Pont de la Morge localisé dans les Alpes Suisses
 a) section du pont avant l'intervention, b) section du pont après l'intervention

CONCLUSION

Les propriétés mécaniques et la perméabilité exceptionnelles des bétons fibrés ultra performants (BFUP), même lorsqu'ils sont soumis à un niveau d'endommagement important, illustrent clairement le potentiel d'utilisation du matériau pour la conception et la réhabilitation d'ouvrages en béton armé. Selon les besoins, l'usage du BFUP peut augmenter la rigidité et la capacité portante d'un ouvrage proportionnellement à l'épaisseur de la couche de réparation, et/ou assurer une excellente protection contre la pénétration de l'eau et des agents agressifs qu'elle contient. Les structures composites conçues en béton armé et BFUP possèdent les caractéristiques requises pour présenter une durabilité prolongée permettant d'atteindre leur durée de vie utile sans nécessiter d'intervention de maintenance. Un projet pilote de réhabilitation d'un tablier de pont

effectué récemment en Suisse a prouvé que la production et la mise en place du BFUP en conditions in situ est réalisable à l'aide de techniques simples et adaptées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Office Fédéral Suisse de l'Education et de la Science (OFES) pour son soutien financier dans le cadre du projet Européen SAMARIS (Sustainable and Advanced MAterials for Road InfrastructureS) et le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT).

RÉFÉRENCES

- [1] MATTE, V., RICHEL, C., MORANVILLE, M., TORRENTI, J.-M., (1998) *Characterization of Reactive Powder Concrete as a candidate for storage of nuclear wastes*, International symposium on high-performance and reactive powder concretes, Edité par P.-C. Aitcin et Y. Delagrave, Sherbrooke, Canada, pp. 75-88.
- [2] VERNET, C., LUKASIK, J., PRAT, E., (1998) *Nanostructure, porosity, permeability, and diffusivity of Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, International symposium on high-performance and reactive powder concretes, Edité par P.-C. Aitcin et Y. Delagrave, Sherbrooke, Canada, pp. 17-35.
- [3] ORANGE, G., ACKER, P., VERNET, C., (2000) *A new generation of UHP concrete : Ductal damage resistance and micromechanical analysis*, Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium (BEFIB 2000), Edité par P. Rossi et G. Chanvillard, Paris, France, pp. 101-111.
- [4] ROSSI, P., PARANT, E., LAURENCE, O., FAKRI, P., ARCA, A., (2002) *Comportement mécanique d'un nouveau composite cimentaire à écrouissage positif*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 238, pp. 25-38.
- [5] PARANT, E., (2003) *Mécanismes d'endommagement et comportements mécaniques d'un composite cimentaire fibré multi-échelles sous sollicitations sévères: fatigue, choc, corrosion*, Thèse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, France, 245 pages.
- [6] AÏTCIN, P.C., LACHEMI, M., ADELIN, R., RICHARD, P., (1998) *The Sherbrooke reactive powder concrete footbridge*, Structural Engineering International IIABSE, vol. 8, n°. 2, pp. 140-144.
- [7] BEHLOUL, M., LEE, K.C., (2003) *Ductal Seonyu footbridge*, Structural Concrete, vol. 4, n°. 4, pp. 195-201.
- [8] HABEL, K., (2004) *Structural behavior of composite elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPRFC) and reinforced concrete*, Thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 195 pages.

- [9] CHARRON, J.-P., DENARIÉ, E., BRÜHWILER, E., (2004) *Permeability of UHPFRC under high stresses*, RILEM International Symposium Advances in Concrete through Science and Engineering, Edité par S. Shaw, D. Lange, N. Banthia and J. Weiss, Evanston, Etats-Unis, pp. 1-12.
- [10] CHARRON, J.-P., DENARIÉ, E., BRÜHWILER, E., (2004) *Transport properties of a ultra high performance fibre reinforced concrete in cracking state*, Submitted to Cement and Concrete Research.
- [11] WANG, K., JANSEN, D. C., SHAH S. P., KARR, A. F., (1997) *Permeability study of cracked concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 27, n°. 3, pp. 433-439.