

Neuvième édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Lausanne, Suisse
28-29 août 2008

ANALYSE STRUCTURALE D'UN PONT COMPOSE DE BFUP ET DE BETON ARME

C. Oesterlee, H. Sadouki, E. Brühwiler
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, (EPFL) Suisse

RESUME : Aujourd'hui, le béton armé est le matériau de construction le plus utilisé. Il possède une performance satisfaisante dans la plupart des applications, cependant il présente un manque de durabilité sous des conditions sévères, en particulier dans le cas des structures existantes construites il y a plusieurs décades qui peuvent présenter des dégâts importants. L'utilisation des bétons fibrés ultra-performants (BFUP) dans des éléments composés pour augmenter la durabilité est une option prometteuse, vu le potentiel extraordinaire de ces matériaux. Dans ce type d'applications le retrait des couches protectrices en BFUP entravé par le béton existant joue un rôle important.

Une section transversale d'un pont conceptuel, composé de béton armé et de BFUP, a été analysée numériquement. Deux paramètres principaux, la résistance en traction ainsi que la capacité d'écroutissage ont été variés. L'analyse montre l'importance de l'écroutissage du BFUP, l'influence de sa résistance en traction sur la réponse structurale dans des conditions de retrait entravé (déformation imposée), ainsi que sous l'effet des charges de trafic (force imposée). Les résultats obtenus valident l'utilisation de couches minces en BFUP pour l'augmentation de la durabilité des ouvrages en béton.

1 INTRODUCTION

Les bétons fibrés ultra-performants (BFUP) constituent une classe de composites cimentaires écroutissants – adoucissants présentant une performance extraordinaire de ses propriétés mécaniques et de sa durabilité. Le haut dosage de fibres et la quantité élevée de poudres réactives font augmenter le prix de ces matériaux par rapport à un béton normal et les rendent inappropriés pour des éléments de construction massifs de grand volume.

L'utilisation devient effective seulement si la conception exploite au maximum plusieurs des propriétés remarquables du BFUP, notamment sa résistance élevée en traction et en compression, son comportement écroutissant et adoucissant ainsi que sa basse perméabilité à l'eau et aux substances agressives. Ceci exige des approches innovatrices de conception et de construction menant à des éléments structuraux composés de différents types de béton. Au même moment cette approche apporte une solution à un des plus grands problèmes des ouvrages en béton armé: la durabilité. L'application du BFUP pour consolider localement les zones les plus sollicitées d'une structure, contribue à l'amélioration de sa durabilité et de sa capacité de portance. Cet article montre les résultats d'une analyse par éléments finis d'un pont conceptuel composé d'une substructure en béton armé avec une couche mince en BFUP (Figure 1) [1].

Au delà de sa contribution à la capacité de portance, la couche de BFUP remplace la membrane d'étanchéité conventionnelle. En conséquence, elle doit rester imperméable à l'état de service et ce, pendant toute la durée de vie de l'ouvrage garantissant ainsi la protection de la structure en béton armé sous-jacente. L'analyse présente se limitera à l'état de service de la structure.

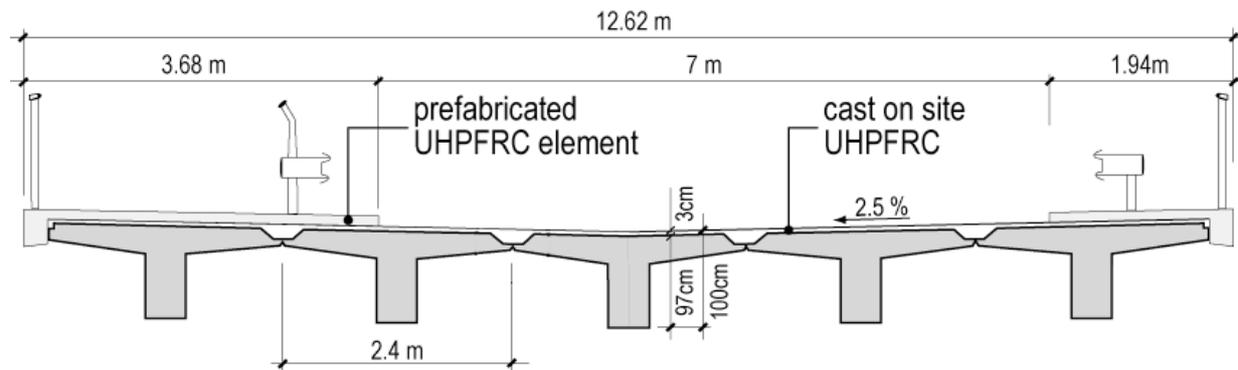


Figure 1: Coupe transversale du pont composé [1]

2 MODELISATION CONSTITUTIVE DU BFUP

2.1 Exigences

Le BFUP conçu pour cette application répond aux exigences suivantes:

- Haute résistance à la compression et à la traction
- Comportement écrouissant et adoucissant en traction
- Perméabilité extrêmement basse
- Autocompactibilité du béton frais et résistance à une pente de 3%
- Faible variabilité des propriétés mécaniques

Plus de détails sur le dit BFUP peuvent être trouvés dans [2, 3, 5].

2.2 Comportement en traction

La résistance en traction élevée ainsi que le comportement écrouissant et adoucissant sont les caractéristiques fondamentales du BFUP. Son comportement en traction uniaxial a été déterminé en utilisant des éprouvettes de type dogbone (éprouvettes cintrées). Les résultats de plusieurs tests ont été moyennés (Figure 2a) et transformés en une loi constitutive du comportement en traction (Figure 2b). Les paramètres de cette loi ont été introduits dans le logiciel d'éléments finis.

2.3 Comportement viscoélastique

Le retrait élevé du BFUP (retrait endogène) induit des autocontraintes dans un élément composé dont l'intensité varie en fonction du degré d'enravage. Le retrait libre séchant atteint des valeurs de $590 \mu\text{m/m}$ après un an, les $2/3$ de cette valeur étant atteints dans les 35 jours [2]. Ces contraintes imposées sont équilibrées en partie par la capacité de fluage et de relaxation en fonction du temps. Le dosage élevé de fibres (9%) empêche la formation des microfissures de la matrice et apporte une grande déformabilité. Les deux effets sont indispensables pour le propre fonctionnement de la couche de BFUP. Les données introduites dans l'analyse par éléments finis ont été déduites des tests en laboratoire analysant l'évolution des propriétés mécaniques et physiques en fonction de la maturité du BFUP [2, 3, 5].

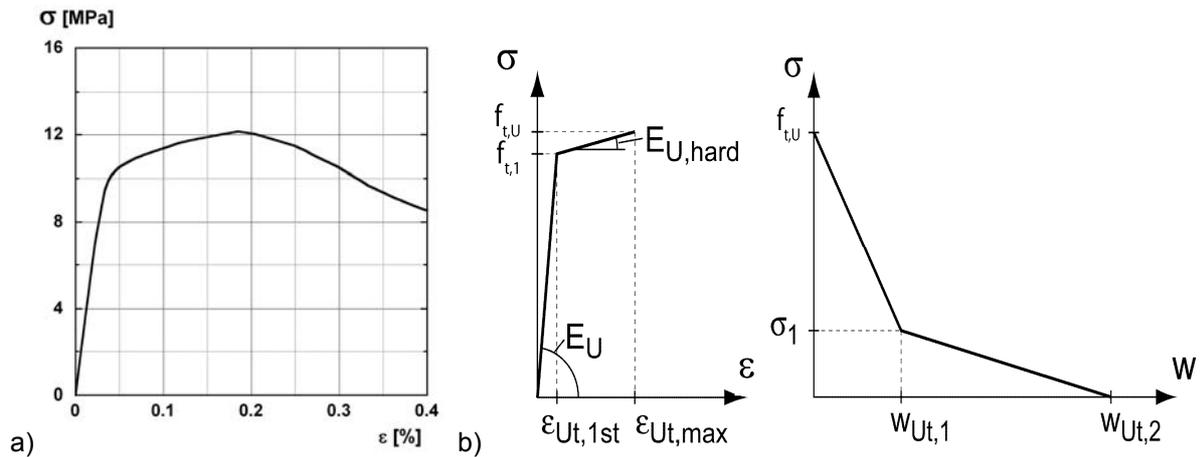


Figure 2: a) Diagramme contrainte-déformation expérimental [3] et b) loi constitutive en traction déduite pour l'analyse par éléments finis

2.4 Variabilité de propriétés mécaniques

L'orientation et la distribution non-uniforme des fibres, dépendantes du malaxage, de la méthode de bétonnage et des coffrages, est une propriété inhérente du BFUP [3]. Ceci a été considéré dans l'analyse par éléments finis en faisant varier l'ampleur de la résistance en traction et la capacité d'écroutissage (Figure 3a et b).

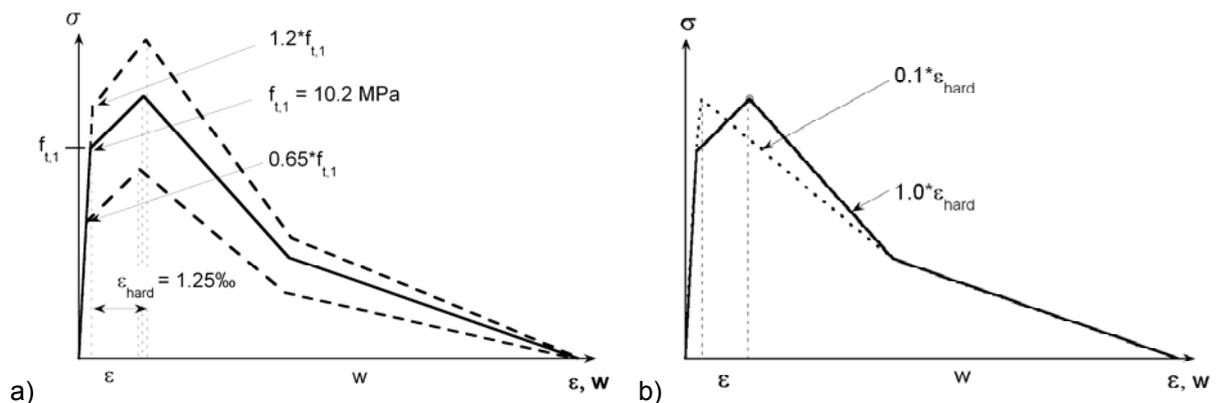


Figure 3: Variation de a) résistance en traction f_t et b) capacité d'écroutissage ϵ_{hard}

La résistance en traction, définie comme limite élastique du matériau, a été modifiée à 65% et 120% de la valeur de référence $f_{t,1}=10.2$ MPa (Figure 3a). Tandis que la capacité d'écroutissage, définie par la déformation entre $f_{t,1}$ et la résistance ultime $f_{t,U}$ a été modifiée entre 10% et 100% de la valeur de référence $\epsilon_{hard} = \epsilon_{Ut,max}-\epsilon_{Ut,1st}=1.25\text{‰}$, (Figure 3b). La résistance ultime $f_{t,U}$ est admise comme évoluant selon un facteur constant de $1.25 \cdot f_{t,1}$ relative à la limite élastique.

3 ANALYSE PAR ELEMENTS FINIS

3.1 Description d'outil de calcul numérique

L'analyse par éléments finis a été effectuée avec FEMASSE MLS [4]. Cet outil permet d'exécuter des analyses complexes considérant le couplage des propriétés thermiques, hydriques, chimiques et mécaniques en fonction de l'âge du matériau.

Dans le dit modèle la déformation en direction de l'axe z (sens longitudinal du pont) n'était pas restreinte. La couche de BFUP a été appliquée au béton inerte, protégée pendant 7 jours et ensuite exposée aux conditions d'environnement décrites à l'aide de valeurs constantes à une température de 20°C. L'analyse numérique démarre au moment du coulage du BFUP (temps 0). L'analyse structurale peut être considérée comme représentative pour les observations concernant la variation de contraintes et de propriétés mécaniques en fonction de l'âge dans l'élément structural donné.

3.2 Modèle de la coupe transversale

Le modèle représente une coupe transversale typique du pont, proche à l'appui, avec cinq poutres en T (préfabriquées) en béton précontraint et la couche de BFUP (Figure 5). Les faces inférieures des poutres sont bloquées dans le sens vertical et horizontal pour réduire au minimum la déformabilité flexionnelle et augmenter au maximum le degré d'entrave. Les charges sont distribuées latéralement par le BFUP, qui relie les sommiers le long des joints longitudinaux. L'épaisseur de la couche est augmentée pour ces joints de 3 cm à 15 cm. En général le comportement viscoélastique des poutres T est avantageux pour le développement des contraintes dans le BFUP, car le degré d'entrave est ainsi réduit d'une manière indirecte. Cet effet n'a pas été considéré lors de l'analyse.

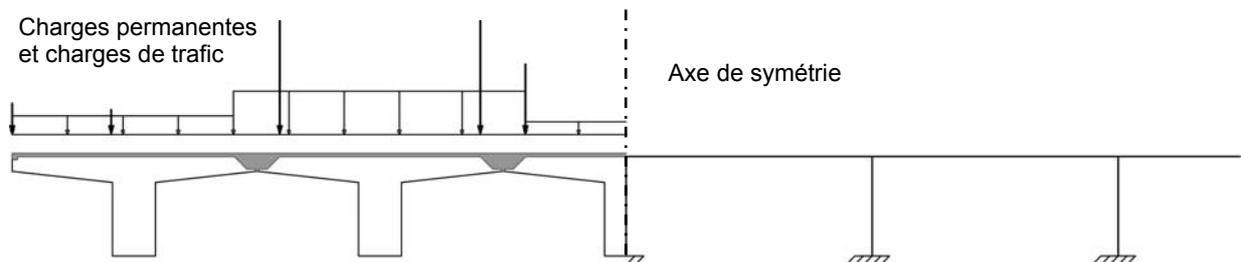


Figure 5: Coupe transversale du pont avec la couche de BFUP, charges exemplaires et système statique

3.3 Actions

Les actions suivantes ont été considérées:

- Charge permanente à cause du poids propre de la structure et de la couche de BFUP
- Charge permanente à cause du poids propre des éléments non porteurs (bordures, barrières, enrobé bitumineux) appliquées après 28 jours
- Charge de trafic à l'état d'aptitude au service avec deux voies de circulation selon EC 1 [6], positionnée à l'endroit le plus défavorable pour l'état de contraintes dans la couche de BFUP dans le sens transversal

Toutes les charges externes sont surimposées au fur et à mesure de l'évolution continue des propriétés mécaniques et physiques du BFUP : comme le module d'élasticité, la résistance à la traction et à la compression, le retrait et la viscoélasticité.

4 RESULTATS

Les résultats de la simulation numérique sont présentés en utilisant un point de référence typique affichant les contraintes les plus élevées.

4.1 Retrait entravé

Le retrait entravé représente le cas de charge auquel la couche de BFUP est soumise depuis le coulage. Une grande partie de la capacité de résistance du matériau est consommée par ce phénomène. Le retrait peut être considéré comme un processus en contrôle en déformation, de ce fait, c'est la capacité de déformation du BFUP qui répond principalement à ce cas de charge (Figure 6). La valeur absolue de la résistance en traction n'est pas de première importance dans le cas présent. Dépendant du niveau de l'évolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge, le retrait empêché génère des autocontraintes qui atteignent presque la résistance élastique en traction $f_{t,1}$. Et ce, même avant que les actions externes n'agissent sur la structure. Si la couche de BFUP est sollicitée par son retrait entravé au-dessus de sa limite élastique, elle entre dans le domaine écrouissant, ce qui lui amène une capacité de déformation importante. L'augmentation de contrainte à ce niveau sera très faible. Donc, le comportement écrouissant apporte un potentiel de réduction de contraintes essentiel à la réponse structurale de la couche en BFUP, empêchant ainsi la formation d'une microfissure localisée et garantissant la conservation de la basse perméabilité du matériau.

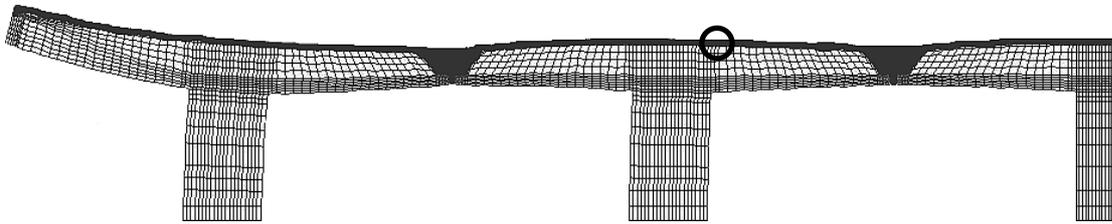


Figure 6: Déformation (hors échelle) due au retrait du BFUP (sans actions externes) et position du point de référence

4.2 Charges permanentes et charges de trafic

Les charges permanentes et les charges de trafic sont appliquées 28 jours (672 heures) après le coulage de BFUP. Elles représentent un cas de charge contrôlé. Dès l'application des charges, la couche de BFUP subit une augmentation immédiate d'une contrainte qui s'additionne aux contraintes générées par le retrait entravé. La Figure 7 montre l'évolution temporelle de la contrainte et de la résistance du BFUP jusqu'à 42 jours (1000 heures) pour trois niveaux de résistance différents. Les courbes inférieures en ligne discontinue montrent l'évolution de la résistance élastique $f_{t,1}$. Tandis que les courbes supérieures en ligne discontinue représentent l'évolution de la résistance ultime $f_{t,U}$. Les courbes en ligne continue donnent l'évolution de la contrainte au point de référence. Dans ces figures, l'âge de l'application des actions externes est indiqué par une ligne discontinue verticale.

- Pour $f_{t,1}=0.65*f_{t,1,ref}$ (Figure 7a), les contraintes dues au retrait entravé atteignent la limite élastique bien avant que les charges externes ne soient appliquées. Leur application crée une réponse inélastique dans le domaine écrouissant. La déformabilité importante du domaine écrouissant retient le niveau de contrainte à un niveau très proche de la limite élastique du matériau. En outre, le retrait continu n'augmente pas les contraintes d'une manière remarquable. L'évolution des contraintes suit de près l'évolution de la résistance élastique en traction.
- Pour $f_{t,1,ref}$ (Figure 7b) l'augmentation des contraintes due aux actions externes à 28 jours est équilibrée en partie par la réponse élastique et par l'écrouissage du BFUP. Le comportement global est de nouveau similaire au premier cas. Une fois que le niveau de contrainte dépasse la limite élastique, l'augmentation suivante est faible.
- Pour $f_{t,1}=1.2*f_{t,1,ref}$ (Figure 7c) les charges externes créent une réponse purement élastique de la couche en BFUP. Ces charges engendrent une augmentation de la contrainte en traction d'environ 3 MPa au point de référence. L'augmentation de contrainte subséquente est due à l'évolution du retrait jusqu'à ce que cette contrainte atteigne la limite élastique. Dès cet

instant, comme dans les cas précédents, l'évolution des contraintes suit de près l'évolution de la résistance élastique en traction.

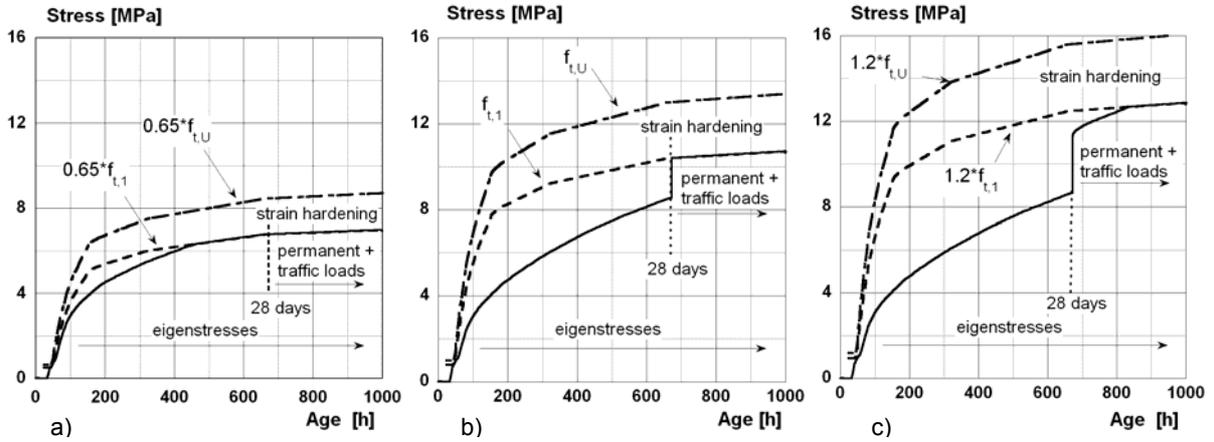


Figure 7: Evolution temporelle de contrainte et de résistance pour a) $0.65 \cdot f_{t,1}$; b) $1 \cdot f_{t,1}$ et c) $1.2 \cdot f_{t,1}$

Tous les cas montrent qu'une fois le matériau dépasse sa limite de résistance élastique, les charges externes et le retrait continu ne créent pas d'augmentation importante des contraintes. La redistribution des charges et la capacité de déformation améliorée grâce au comportement écouissant ainsi que la perte de rigidité, empêchent une augmentation des contraintes dans la couche de BFUP. En conséquence, il est peu probable que la résistance en traction ultime $f_{t,U}$ du BFUP soit atteinte. Ainsi la couche de BFUP reste au stade initial de la multifissuration sans développer de macrofissures localisées. Le matériau n'entre guère dans le domaine écouissant tout en gardant sa basse perméabilité. Il n'est pas soumis à l'adoucissement pendant la période considérée de 1000 heures.

Une simulation réalisée à titre d'exemple, comprenant des charges de trafic multipliées par un facteur trois, montre que le seuil de contrainte entre d'une manière importante dans le domaine écouissant, à condition que le niveau de charge soit suffisamment élevé (Figure 8a). Puis les contraintes évoluent en parallèle au développement de la résistance en traction mais à un niveau plus élevé. Le BFUP semble avoir une bonne capacité de résistance à la macrofissuration localisée dans une configuration comme décrit précédemment, même si sa résistance en traction élastique est dépassée.

Dans le cas où la capacité d'écouissage est réduite de manière importante, la couche de BFUP entre alors fortement dans le domaine écouissant (Figure 8b). Les deux courbes indiquées montrent l'évolution temporelle de la contrainte au point de référence pour deux matériaux avec $0.1 \cdot \epsilon_{hard,ref}$ (courbe supérieure, carrés) et leur capacité d'écouissage complète (courbe inférieure, disques).

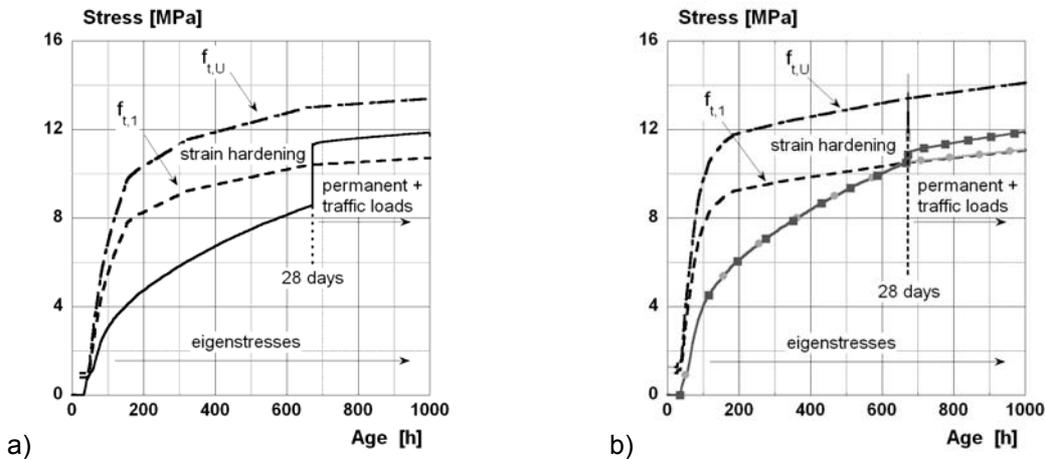


Figure 8: a) Evolution temporelle de contrainte et résistance pour $1.0 \cdot f_{t,1}$ et charges externes multipliées par trois; b) influence de ϵ_{hard} sur le niveau de contrainte pour $\epsilon_{hard} = 0.1 \cdot \epsilon_{hard,ref}$

4.3 Aptitude au service et étanchéité à l'eau

Charron et al. [7] ont montré que pour un BFUP, requérant les exigences présentées dans le chapitre 2.1, sa perméabilité à l'eau reste basse ($K_w \text{ equiv.} < 2 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$) jusqu'à une déformation imposée de 1.3%. Ce seuil de déformation correspond à une ouverture de fissure cumulée égale à 0.13 mm, en comparaison elle est de 0.05 mm pour un béton normal.

Au vu des résultats numériques, nous observons que pour chaque niveau de résistance en traction dans la couche de BFUP, les contraintes entrent peu dans le domaine d'écroutissage. Le concept proposé de mettre une couche imperméable et étanche est de ce fait validé.

5 CONCLUSIONS

L'analyse structurale d'un pont composé de béton armé et de BFUP à l'état de service a été effectuée. La réponse structurale de la couche en BFUP sous le chargement combiné du retrait entravé et des charges de trafic a été examinée. Les résultats détaillés montrent que:

- Le retrait entravé et les charges externes peuvent créer des contraintes, qui sont proches de la résistance élastique en traction de la couche en BFUP de l'élément composé, ceci avec un degré d'entrave élevé. Dans un deuxième temps, les contraintes évoluent à proximité de la résistance élastique.
- L'évolution des contraintes appliquées dans le domaine écroutissant ne dépend pas du niveau de résistance élastique en traction. La perte de rigidité de la couche de BFUP lorsqu'elle entre dans le domaine d'écroutissage apporte une détente et une redistribution de contrainte.
- Le risque de fissuration transversal de la couche en BFUP dans la structure présentée est faible, dû à sa déformabilité élevée et sa rigidité réduite dans le domaine d'écroutissage.
- Le comportement écroutissant est essentiel pour le type d'application présenté. Il permet de maintenir la basse perméabilité du BFUP afin de garantir sa fonction de couche d'étanchéité.

6 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Brühwiler, E., Fehling, E., Bunje, K., Pelke, E. 2007., Design of an innovative composite road bridge combining reinforced concrete with Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. Proceedings, *IABSE Symposium "Improving Infrastructure Worldwide"*, Weimar, September 2007.
- [2] Kamen A. (2007) Comportement au jeune âge et différé d'un BFUP écroutissant sous les effets thermomécaniques. Doctoral thesis n° 3827, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), Switzerland.
- [3] Wuest J. (2007) Comportement structural des bétons de fibres ultra performant en traction dans des éléments composés. Doctoral thesis in press, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), Switzerland.
- [4] Roelfstra P. E., Salet A. M., Kuiks J. E. (1994) Defining and application of stress-analysis-based temperature difference limits to prevent early-age cracking in concrete structures. Proceedings n°25 of the *International RILEM Symposium: Thermal cracking in concrete at early age*, pp. 273-280. Munich, Germany.
- [5] Habel, K. (2004) Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete. Doctoral thesis n° 3036, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), Switzerland.
- [6] Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003
- [7] Charron, J.-P., Denarié, E., Brühwiler, E. (2007) Permeability of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes (UHPFRC) under high stresses. *Materials and Structures*, 40, n°3, pp 269-277

