

Béton fibré ultra performant: première application en réhabilitation

Autor(en): **Denarié, Emmanuel / Wuest, John / Putallaz, Jean-Christophe**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tracés : bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **131 (2005)**

Heft 17: **Béton**

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-99405>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Béton Fibré Ultra Performant : première application en réhabilitation

GÉNIE CIVIL

Des structures composites alliant Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) et béton armé permettent d'envisager des durabilités allant au-delà de 100 ans, et d'éviter ainsi des interventions répétées sur les ouvrages. Le MCS-EPFL effectue des travaux de recherche et développement sur l'application des BFUP pour la conservation des ouvrages et présente ici la première application réalisée en 2004 pour la réhabilitation d'un pont dans le canton du Valais.

Selon la taille de l'ouvrage et l'ampleur des travaux, la durée totale des perturbations du trafic dues à des interventions pendant l'exploitation d'un ouvrage peut atteindre plusieurs années (fig. 1, stratégie B, zones ombrées), avec des conséquences importantes en termes de coûts - directs et indirects pour les utilisateurs - et d'impact environnemental. A l'opposé, une stratégie du type A, tendant à la fois vers une diminution du temps des travaux de réhabilitation et une augmentation de leur durabilité à toute la durée de service, est clairement préférable [1]¹.

Bétons Fibrés Ultra Performants

Les BFUP (voir encadré) sont des matériaux cimentaires caractérisés par une matrice ultra compacte très peu perméable [2], une résistance à la traction élevée (> 10 MPa) et un comportement écouissant en traction. Ces propriétés en font des candidats idéaux pour « durcir » les structures en

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article

béton armé dans les zones critiques soumises à un environnement agressif - sels de déverglaçage - et à des sollicitations mécaniques importantes.

Le faible rapport eau/liant des BFUP (0,130 à 0,160) empêche l'hydratation complète d'une grande partie du ciment (environ 70 %), donnant au matériau un caractère hydrophile et une forte capacité d'auto cicatrisation de microfissures en présence d'eau [3]. Malgré ce faible rapport eau/liant, les BFUP peuvent être rendus autocompactants à l'état frais par l'augmentation de la quantité de pâte liante. Dans le cadre de cette recherche, la famille de BFUP *CEMTECmultiscale*®, développée au LCPC de Paris [4], a été utilisée et optimisée pour la réhabilitation.

Paradoxalement, le module d'élasticité relativement élevé des BFUP (en moyenne 50 000 MPa contre 35 000 MPa pour des bétons typiques de structures existantes) n'est pas un désavantage pour la réhabilitation. Premièrement, ce haut module est largement compensé par l'augmentation de la résistance à la traction (10 MPa pour la matrice du BFUP et 14 MPa pour le composite contre 3 MPa pour un béton normal). Deuxièmement, le BFUP présente un domaine d'écrouissage dont l'étendue dépasse plusieurs fois celle de sa déformation élastique de première fissuration, ce qui lui assure une capacité de déformation largement supérieure à celle des bétons normaux. Enfin, les BFUP ont un comportement viscoélastique similaire à celui des bétons normaux [5], de sorte que le développement des contraintes au jeune âge - retrait empêché - reste modéré.

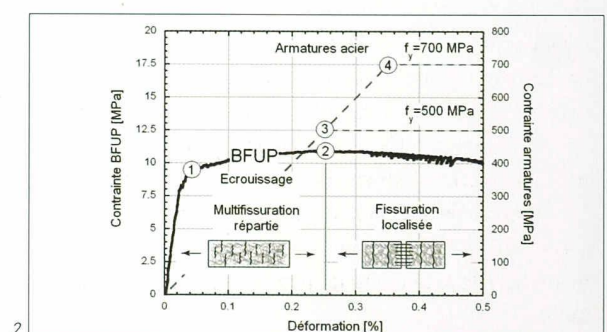
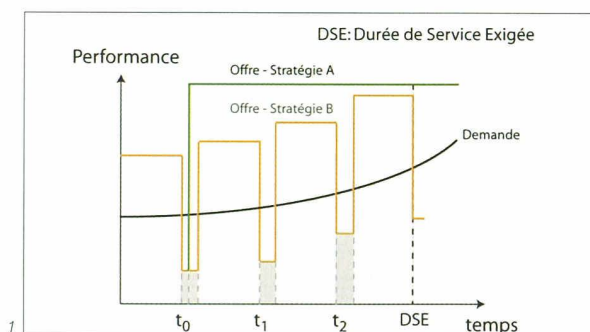


Fig. 1 : Stratégies de gestion de l'offre et de la demande du trafic routier

Fig. 2 : Comportement en traction uniaxiale et comparaison avec des aciers B500 et B700

Fig. 3 : Surface de rupture en traction d'une éprouvette de BFUP (Photo A. Herzog)



3

Les Bétons Fibrés Ultra Performants en quelques mots

Les fibres constituent l'armature du BFUP, avec deux effets déterminants sur le comportement en traction exceptionnel de ce matériau, à savoir un écoulement significatif et une ductilité à la rupture comparable à celle d'un métal.

Dans un premier temps, la reprise progressive par les fibres des efforts libérés par la fissuration de la matrice cimentaire du BFUP lui assure un comportement écoulement qui se traduit par une augmentation de l'effort supporté pour un déplacement imposé (effet d'armature minimale identique à celui du béton armé). Dans cette phase, le BFUP ne présente pas de fissure localisée (fig. 2, points 1 à 2).

Une fois le comportement écoulement épuisé, la fissure localisée qui se forme est cousue par les fibres. L'arrachement graduel des fibres se traduit par une dissipation d'énergie environ cinq fois plus élevée que celle d'un béton fibré usuel, comparable à celle d'un métal.

La combinaison de différents types de fibres (micro et macro fibres) constitue un composite multi-échelle avec un comportement optimal de microfissuration graduelle.

La résistance à la traction élevée de la matrice du BFUP (de 8 à 11 MPa selon le rapport eau/liant) impose des conditions très précises sur le choix du fibrage (élancement et dosage), afin d'obtenir un comportement écoulement significatif en traction uniaxiale tout en conservant une ouvrabilité suffisante à l'état frais.

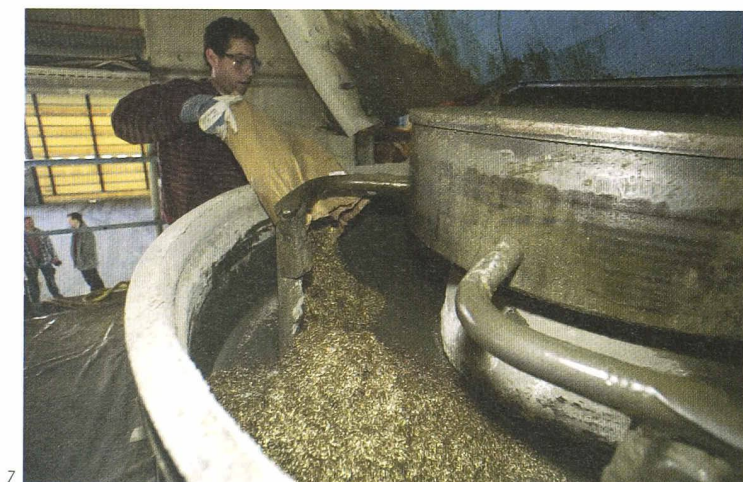
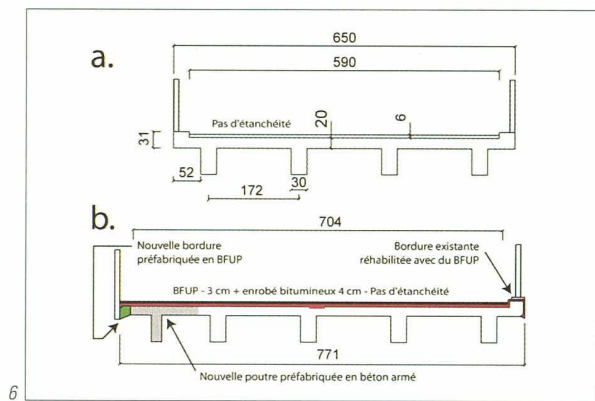
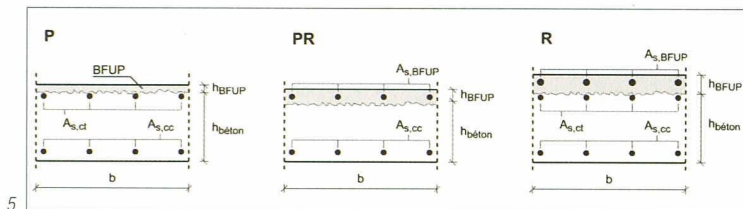
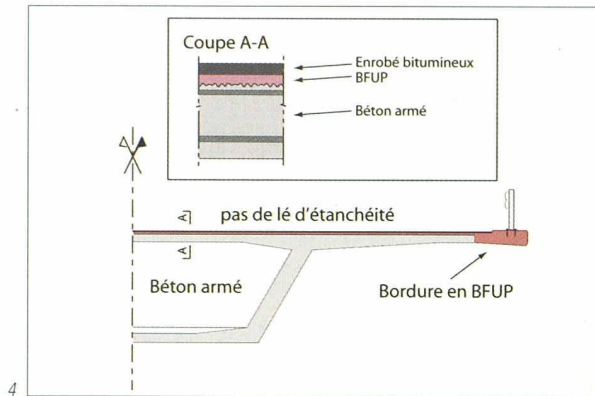
Le dosage élevé en fibres des BFUP (environ 100 x plus de fibres individuelles qu'un béton fibré usuel) a des conséquences sur la recette de leur matrice. Pour une même ouvrabilité, l'ajout de fibres supplémentaires est accompagné d'une augmentation de la quantité de pâte liante et d'une diminution des granulats inertes, comme pour des bétons autocompactants.

Fig. 4 : Concept d'application de BFUP pour le « durcissement » local des superstructures de ponts

Fig. 5 : Variantes d'application de BFUP, avec ou sans armatures, pour la protection ou le renforcement [5]

Fig. 6 : Coupes transversales de l'ouvrage avant (a) et après (b) la réhabilitation et l'élargissement (dimensions en cm, longueur totale de l'ouvrage : 10 m)

Fig. 7 : Fabrication du BFUP en centrale (ajout des macrofibres d'acier) dans un malaxeur standard (Photo A. Herzog)



Les BFUP écrouissants sont donc parfaitement adaptés pour être combinés au béton armé dans des structures existantes ou neuves, en suivant des stratégies de type A.

Concept

Les propriétés du BFUP permettent d'éviter certaines étapes critiques du processus de construction, telles que le compactage par vibration et l'application de lés d'étanchéité. Le processus devient plus simple, plus rapide et plus robuste.

Un concept d'application de BFUP pour la conservation des ouvrages existants est présenté à la figure 3 [6, 7]. Un « manteau d'hiver » est appliqué sur la superstructure de l'ouvrage, dans les zones de sollicitations mécaniques et environnementales sévères.

Cette nouvelle technique de construction est particulièrement adaptée aux ponts, mais peut également s'appliquer à des galeries, des tunnels ou des murs de soutènement. La combinaison des propriétés de protection et de déformabilité des BFUP avec des barres d'armature à haute limite d'élasticité constitue une méthode simple et efficace pour augmenter la rigidité et la capacité portante en cas de nécessité. Les sections ainsi obtenues sont compactes et le renforcement n'entraîne pas d'augmentation du poids propre [5, 6, 7].

La figure 5 illustre des applications possibles du BFUP, avec ou sans armatures, pour la protection (P), la protection et le remplacement de barres d'armatures corrodées (PR) ou le renforcement (R).

Depuis 1999, de nombreux travaux réalisés au MCS-EPFL sur le plan expérimental, théorique et numérique ont permis de valider ces concepts et variantes d'application pour différentes géométries et conditions aux limites, avec des degrés d'entrave différents [5, 8, 9].

Première application

Concept d'intervention

Le pont routier sur la Morge, à Châteauneuf/Conthey, près de Sion dans le canton du Valais, a été réhabilité et élargi en utilisant des Bétons Fibrés Ultra Performants de la famille CEMTECmultiscale® appliqués pour la première fois en coulage sur place [10].

L'ouvrage, d'une portée de 10 m et âgé d'environ 50 ans, présentait d'importants dégâts dus à la corrosion sur les bordures amont et aval. En automne 2004, la totalité de sa surface a été améliorée en trois étapes (fig. 6).

- Dans un premier temps, la bordure aval a été remplacée par une nouvelle bordure préfabriquée en BFUP, de

Fig. 8 : Vue d'ensemble des travaux d'application de BFUP sur la dalle de roulement

Fig. 9 : Mise en place du BFUP

Fig. 10 : Le BFUP, à la fois autocompactant et thixotropique, est travaillé avec des outils standards

(Photos A. Herzog)

géométrie compacte, liée à une nouvelle poutre en béton armé, permettant ainsi d'élargir l'ouvrage.

- Le béton de la face supérieure de la dalle de roulement, contaminé par les chlorures, a ensuite été remplacé par 3 cm de BFUP ; les travaux ont été exécutés en deux étapes: le 22 octobre sur la demi-chaussée aval et le 5 novembre sur la demi-chaussée amont.
- Enfin, le béton de surface de la bordure amont a été remplacé par 3 cm en moyenne de BFUP, le 9 novembre.

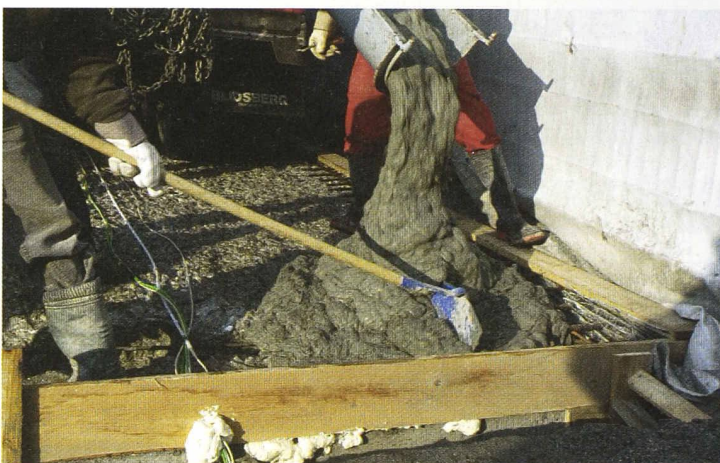
Un joint longitudinal de bétonnage, avec armatures de continuité et profil en escalier, a été conçu pour garantir la transmission des efforts de traction entre les deux étapes de BFUP sur la dalle de roulement, éviter la fissuration traversante et assurer la continuité de la fonction protectrice du BFUP.



8

Composition des BFUP

Deux recettes de BFUP type *CEMTECMultiscale®* ont été utilisées. Elles ont les mêmes composants (ciment CEM I 52.5R - dosé entre 1410 et 1430 kg/m³, microsiline, sable de quartz $D_{max} < 0,5 \text{ mm}$) et un rapport microsiline/ciment constant (0,26), mais des rapports eau/liant différents (0,131 et 0,125). Le renforcement de la matrice ultra compacte est obtenu par un mélange de microfibrilles de laine d'acier (longueur 1 mm) et de macrofibrilles d'acier droites (longueur 10 mm, élanement 50). Le dosage total en fibres de 706 kg/m³ (9 % du volume) fournit l'armature minimale qui garantit un comportement écrouissant, compte tenu de la haute résistance à la traction de la matrice du BFUP. Des essais préliminaires, réalisés sur un plan incliné à 2,5 % avec un substrat rugueux, ont montré que le mélange avec le rapport eau/liant le plus bas, supportait une pente de 2,5 % tout en restant autocompactant. Si cette propriété n'a pas été nécessaire dans le cas présent - la surface du béton de substrat après fraisage de l'enrobé bitumineux était quasiment horizontale -, elle est en revanche essentielle pour de futures applications du BFUP pour l'amélioration d'ouvrages neufs ou existants.



9

Mise en œuvre des BFUP

Les BFUP ont été préparés à la centrale dans un malaxeur standard à axe vertical, d'une capacité de 500 litres (fig. 7). Pour chaque étape de construction, deux ou trois gâchées de 300 litres ont été produites consécutivement, stockées dans un camion malaxeur, puis transportées sur le chantier. Le matériau a été déversé directement depuis le camion malaxeur et mis en place sur la surface de béton hydrodémolie sans vibration (fig. 8 à 10). Le BFUP s'est avéré facile à



10

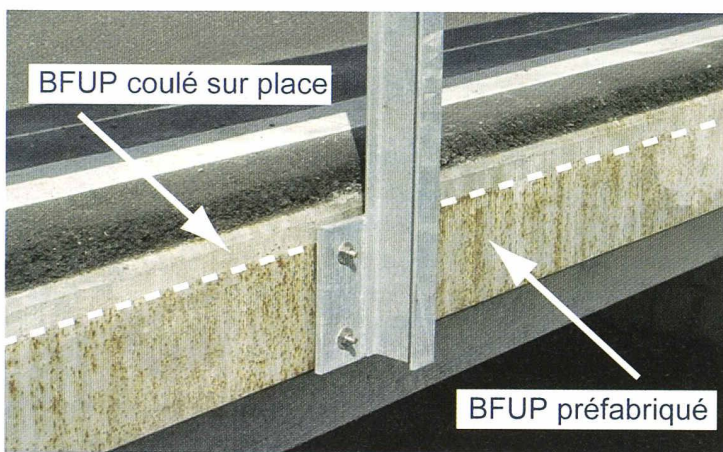
Fig. 11 : Vue de l'ouvrage après l'intervention (Photo E. Denarié)

Fig. 12 : Vue de la bordure aval avec la coloration superficielle due à la corrosion des fibres d'acier affleurantes (Photo E. Denarié)

(Sauf mention, tous les documents ont été fournis par les auteurs)



11



12

Partenaires du projet

Ce projet a été réalisé avec le soutien financier du Secrétariat d'état à l'Éducation et la recherche (SER) et de la communauté Européenne, dans le cadre du projet européen SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructures).

Le soutien du Département des Travaux Publics, Services des Routes et Cours d'Eau, du canton du Valais, a permis la réalisation de la première application de BFUP.

Les principaux partenaires étaient les suivants :

- Maître d'ouvrage : Département des Travaux Publics du canton du Valais, Sion, Suisse, Service des routes et Cours d'eau, Section du Valais central/Sion, Loris Chittaro - Chef de section, Christian Pernet - Ingénieur
- Concept et conseil : Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des Ouvrages, MCS-EPFL, Lausanne, Suisse
- Conseil pour la formulation des BFUP : Dr. P. Rossi, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, France
- Ingénieur : PRA Ingénieurs Conseils SA, Sion, Suisse
- Production des Matériaux : Proz Frères SA, Sion/Riddes/Genève, Suisse
- Entrepreneur : Evéquo SA, Conthey, Suisse

produire et à mettre en place avec des outils standards tout en étant très robuste et capable de s'adapter aux incertitudes du chantier.

Suivant l'application préalable d'une émulsion, l'enrobé bitumineux a été posé sur la surface du BFUP après huit jours de cure humide de ce dernier. La voie de circulation a été rouverte au trafic le jour suivant. Le pont élargi a été entièrement restitué au trafic un mois après le début des travaux.

Propriétés des BFUP

Des essais de perméabilité à l'air selon Torrent [11] ont confirmé la perméabilité extrêmement basse du matériau coulé sur l'ouvrage ($kT=0,004 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ en moyenne comparés à $0,05-0,15 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ pour de bons bétons).

A 28 jours, la résistance à la compression et le module d'élasticité des BFUP valaient respectivement 182 et 46800 MPa. Des essais de traction uniaxiale ont été réalisés à 28 jours en laboratoire, sur des éprouvettes coulées directement sur le chantier. Comme prévu, les propriétés mesurées se sont avérées remarquables avec une résistance à la traction de 14 MPa et une déformation en fin d'écroutissage de 1,5%.

Coûts et suivi de l'ouvrage

L'analyse des coûts de construction a montré que la réhabilitation et l'élargissement de l'ouvrage avec du BFUP, mais sans lés d'étanchéité, se sont révélés environ 12 % plus coûteux qu'une variante traditionnelle (mortier de réhabilitation et lé d'étanchéité). La durée d'un chantier traditionnel aurait été cependant sensiblement supérieure, en raison des délais d'attente pour le séchage du mortier avant la pose de l'étanchéité, des délais nécessaires pour éviter le cloquage (temps usuel jusqu'à quatre semaines). Par ailleurs, la taille relativement modeste du chantier et son caractère de prototype font que les coûts de construction du BFUP constituent des bornes supérieures. Pour de plus grands chantiers et avec une optimisation de la technique (matériaux et fabrication), on peut s'attendre à une réduction d'environ 30 % des coûts de production et de mise en place du BFUP. Le coût de la variante BFUP ne serait alors pas supérieur à celui d'une variante traditionnelle, ce qui, compte tenu de ses autres

avantages, rendrait cette nouvelle technique particulièrement concurrentielle et attractive.

Après un premier hiver, une inspection de l'ouvrage a montré, comme attendu, la présence de traces de corrosion superficielles sur les surfaces exposées de BFUP, avec des différences marquées selon le type de coffrage et le mode de compactage utilisés (fig. 11 et 12). Bien qu'il ne s'agisse que d'une préoccupation d'ordre esthétique, il est souhaitable de réduire au minimum ces traces superficielles et des travaux de recherche sont actuellement en cours dans ce domaine.

Une technique prête pour l'application

L'application des BFUP pour la conservation d'ouvrages en béton permet de simplifier les travaux, tout en augmentant sensiblement la durabilité et les performances mécaniques (rigidité et résistance) et en réduisant le nombre des interventions pendant la durée de service. Ce concept a été validé par de nombreux essais en laboratoire sur des éléments composites et dans des configurations correspondant à différentes applications pratiques.

La première application de ce concept dans des conditions de chantier réelles a prouvé que la technologie des BFUP coulés sur place est maintenant mûre pour son application à la réhabilitation d'ouvrages. En outre, la durée des travaux et les perturbations du trafic ont pu être largement réduites, à la plus grande satisfaction du maître d'ouvrage.

Malgré le caractère de prototype du chantier et sa taille modeste, les coûts de construction de la technique proposée n'étaient pas significativement plus élevés que ceux des techniques traditionnelles et des recherches aux fins d'optimisation permettront à coup sûr de rendre cette technique encore plus compétitive.

Emmanuel Denarié, dr. sc. tech., ing. civil dipl. EPFL/SIA
John Wuest, ing. civil dipl. EPFL

Eugen Brühwiler, prof., dr. sc. tech., ing. civil dipl. ETHZ/SIA
Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages
MCS-ENAC-EPFL, CH - 1015 Lausanne

Jean-Christophe Putallaz, ing. civil dipl. ETHZ/SIA
Département des Travaux Publics
Service des Routes et Cours d'Eau
Canton du Valais, CH - 1950 Sion

Références bibliographiques

- [1] DENARIÉ E. 2005. Structural rehabilitations with Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRFC), Keynote lecture for International Conference on Concrete repair, rehabilitation and retrofitting - ICCRRR 2005, 21-23, November 2005, Cape Town, South Africa.
- [2] ROUX, N., ANDRADE, C., SANJUAN, M.A. 1995. Etude Expérimentale sur la durabilité des Bétons de Poudres Réactives. in *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (ITBTP)*, Les Bétons de Poudres Réactives (BPR) à Ultra Haute Résistance (200 à 800 MPa), 532, Série Béton 320: 133-141.
- [3] CHARRON J-P., DENARIÉ E., BRÜHWILER E. 2004. Permeability of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete under high stresses, RILEM Symposium, *Advances in Concrete through Science and Engineering*, March 22-24 2004, Evanston, USA, CD-ROM.
- [4] ROSSI, P., PARANT, E., LAURENCE, O., FAKRI, P., ARCA, A. 2002. Comportement mécanique d'un nouveau composite cimentaire à écouissage positif. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 238: 25-38.
- [5] HABEL K. 2004. Structural Behaviour of Elements Combining Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes and Reinforced Concrete, thèse, No. 3036, école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse.
- [6] BRÜHWILER, E., DENARIÉ, E., HABEL, K. 2005. Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete for advanced rehabilitation of bridges. Proceedings Fib symposium « Keep Concrete Attractive », Budapest, Hungary, 23 to 25 may 2005, Eds G.L. Balasz & A. Borosnyoi, 951-956.
- [7] HABEL K., DENARIÉ E., BRÜHWILER E. 2005. Bauteile aus ultrahochleistungsfähigem Faserbeton und traditionellem Stahlbeton: Eine innovative Lösung zur Instandsetzung und Veränderung bestehender Betonbauten. *Beton- und Stahlbetonbau*, Band 100, Heft 2, Februar 2005, 124-131.
- [8] HABEL K. 2004. Structural behaviour of elements combining Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRFC) and Reinforced Concrete, rapport d'essais MCS 99.04, MCS-EPFL.
- [9] SAMARIS D18b. 2005. Report on laboratory testing of UHPRFC, part b. in European project 5th FWP / SAMARIS - Sustainable and Advanced Materials for Road Infra-structures - WP 14: HPRFC, <http://samaris.zag.si/>.
- [10] SAMARIS D22, 2005 Report on tests of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete in field trials, Primary Deliverable N° D22, Project SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures), Workpackage 14.
- [11] Norme SIA 262/1. 2003. Construction en béton - Spécifications complémentaires: Perméabilité à l'air dans les structures, Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes (SIA), Zürich, 2003.