Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 137 (2011)
Heft: 12: Béton mon amour

Artikel: Béton fibré ultra performant pour la maintenance, un nouvel élan
Autor: Denarié, Emmanuel / Kazemi-Kamyab, Hadi / Brühwiler, Eugen
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-154201

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 17.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Emmanuel Denarié, Hadi Kazemi-Kamyab, Eugen Brühwiler, Bassem Haddad et Sébastien Nendaz

Béton fibré ultra performant pour la maintenance, un nouvel **élan**

BÉTON

Produits désormais avec des composants majoritairement locaux, les bétons fibrés ultra performants (BFUP) continuent, sous l'impulsion du Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages (MCS) de l'EPFL, leur chemin initié en 2004 pour simplifier et écourter les chantiers de maintenance. La Suisse romande est pionnière dans ce domaine, comme le montrent deux applications récentes près de Genève et dans les Préalpes vaudoises.

Les BFUP sont caractérisés par une matrice ultra compacte très peu perméable [1][1], une résistance à la compression de l'ordre de 150 à 200 MPa, une résistance à la traction supérieure à 10 MPa, et pour certains, un comportement écrouissant en traction [2] (points 1 à 2 sur la fig. 2) grâce à leur armature formée d'un réseau dense de fibres métalliques courtes (10 à 20 mm) (fig. 1).

Un potentiel énorme

Grâce à leurs propriétés exceptionnelles, seuls ou combinés avec des barres d'armature, les BFUP sont très efficaces en maintenance pour protéger et renforcer les structures en béton armé dans les zones critiques soumises à un environnement agressif (classes d'exposition XD2b, XD3) et à des sollicitations mécaniques importantes (fig. 3) [3]. On peut distinguer (fig. 4) : des couches de protection (P), avec 25 à 30 mm de BFUP, et des couches de renforcement (R), avec 40 à 50 mm de BFUP armé. Les sections composées ainsi obtenues sont compactes et le renforcement n'entraîne pas d'augmentation du poids propre [3].

Cette nouvelle technique de construction est particulièrement adaptée aux ponts mais aussi aux galeries, tunnels ou murs de soutènement, ainsi que pour renforcer des dalles de bâtiments existants.

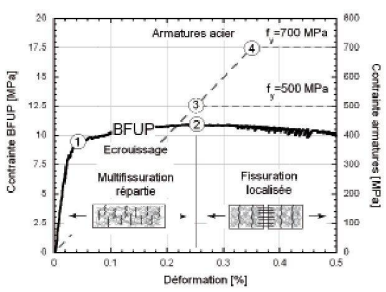
Les BFUP agissent comme barrière à la pénétration des liquides et des gaz et neutralisent à la racine tous les phénomènes de détérioration du béton armé (SIA 269/2, tableau 5 [5]). L'application d'une étanchéité collée devient donc superflue.

Le délai d'attente entre la pose du BFUP et celle de l'enrobé bitumineux n'est que de huit jours (cure humide de sept jours du BFUP). La durée des chantiers se trouve donc très fortement raccourcie avec cette technique.

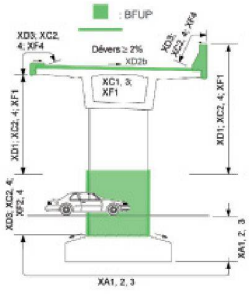
Les essais réalisés au Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) de l'EPFL en 2004 et 2010 [6] ont permis de déterminer le système de couche d'accrochage et d'enrobé le mieux adapté pour la pose sur une surface de BFUP brute. Ce système déjà appliqué en 2004 s'avère durable comme on peut le constater sur le pont sur la Morges [2], où, après sept années d'utilisation, la couche d'enrobés ne présente aucun désordre apparent.

[1] Les chiffres entre crochets renvoient aux références bibliographiques en fin d'article.

1



2



3

Fig. 1 : Surface de rupture de BFUP et fibrage apparent (Photo Alain Herzog)

Fig. 2 : Comportement en traction uniaxiale de BFUP et comparaison avec des aciers B500 et B700 [3]

Fig. 3 : Concept d'application de BFUP sur les ouvrages, adapté d'après [4]

Fig. 4 : Applications possibles de BFUP pour la protection (P : 25 à 30 mm de BFUP) ou le renforcement (R : 40 à 50 mm de BFUP armé par une série de barres de diamètre réduit)

Fig. 5 : Vue en plan du P.I. du Creux de Genthod avec les étapes de travaux

Fig. 6 : Vue d'ensemble des travaux d'application de BFUP sur la dalle de roulement du P.I. du Creux de Genthod (1ère étape)

Le pont sur la Morges, premier ouvrage remis en état avec des BFUP en 2004 est régulièrement suivi. Les mesures réalisées sur des carottes prélevées en 2007 dans les parties exposées de l'ouvrage ont confirmé l'absence totale de pénétration de chlorures dans le BFUP, après trois ans d'exposition.

Depuis cette première en 2004, dix chantiers ont été réalisés avec succès selon ce concept d'intervention : neuf sur des ouvrages d'art ou bâtiments en Suisse (VS, AG, GE, GR, VD, LU, ZH), et un sur un pont en Slovénie [3, 7].

Deux applications récentes en Suisse romande

Passage inférieur du Creux de Genthod

Cet ouvrage est situé entre Bellevue et Versoix (RC 8), dans le canton de Genève et jouxte la voie CFF. Il s'agit d'un pont dalle biais de 10,6 m de portée et 20 m de largeur, avec deux voies de circulation. Le trafic très soutenu sur cette route au bord du lac (21 000 véhicules par jour en 2009) impose de réduire au minimum la durée des travaux de maintenance et les nuisances associées. Dans cette perspective, dans le cadre du projet d'intervention réalisé en automne 2010, le maître d'ouvrage a opté pour une solution de remise en état de la face supérieure de la dalle de roulement avec du BFUP (fig. 5).

La chape de 3 cm existante a été rabotée et 4 cm de béton ont été retirés par hydrodémolition de la face supérieure de la dalle de roulement et du trottoir coté Creux de Genthod. Une couche de 30 mm de BFUP a ensuite été appliquée sur les armatures rendues apparentes, suivie de 4 cm d'enrobé bitumineux. La position des barres d'armature, à proximité de la surface de la chaussée existante, était telle que seule une solution d'épaisseur minimale BFUP plus enrobé bitumineux permettait de réaliser les travaux sans reprofiler la chaussée (fig. 6) en évitant ainsi de longs et coûteux travaux sur la route en béton adjacente au pont.

Ouvrages de la route du col des Mosses

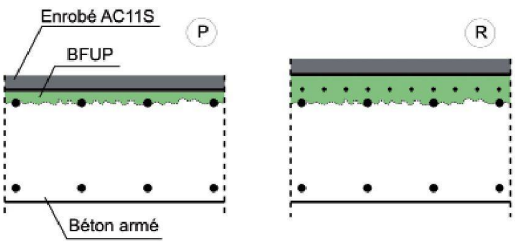
Dans le cadre des travaux de mise en conformité, initiés en 2006, pour le trafic 40 tonnes, des ouvrages (multiples estacades ou ponts) sur la route menant d'Aigle au col des Mosses (VD) doivent être remis en état ou renforcés. Ces interventions se dérouleront jusqu'en 2012. La configuration particulière de la route et le trafic important imposent de réaliser cette succession de chantiers de la manière la plus rapide et la plus durable possible. Par ailleurs, les pentes combinées (longitudinales et transversales) de la chaussée peuvent atteindre sur certains ouvrages 12 %. Des conditions inhabituelles qui ont décidé le maître d'ouvrage à exploiter le potentiel des BFUP. Quatre ouvrages, deux estacades et deux ponts voûte en maçonnerie de 4 m de portée (fig. 7), ont été remis en état au printemps 2011 à l'aide d'une couche de protection de 25 mm de BFUP appliquée sur la face supérieure de la dalle de roulement des ouvrages, pour un volume total de 9 m^3 de BFUP appliqué.

6

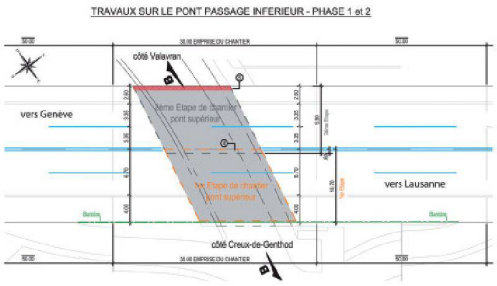
Formulation des BFUP

Les BFUP ont été réalisés en suivant les mêmes concepts de formulation de la matrice que ceux appliqués avec succès lors du chantier du pont de Log cezsoški en Slovénie [7], mais avec des composants disponibles sur le marché Suisse.

La composition des BFUP a été optimisée pour la tenue à la pente du support entre 5 et 10 % [8]. En masse, les quantités de ciment et de filler calcaire étaient égales, entre



4



5

7

8

9

10

11

12

625 et 635 kg/m^3 selon les recettes. La matrice choisie, économe en clinker, est donc moins coûteuse et plus favorable vis-à-vis de l'ouvrabilité et de l'environnement. Le dosage en fibres d'acier d'élancement 62,5 valait 4,5 % Vol. soit 353 kg/m^3, pour un très bon compromis entre l'efficacité mécanique obtenue et la facilité de mise en œuvre des fibres.

Le rapport eau/(ciment + filler calcaire) du BFUP CM34_35 pour le P.I. Creux de Genthod valait 0,170. Pour les ouvrages de la route du col des Mosses, ce rapport valait 0,175, avec 6 litres d'eau par m^3 en plus que pour celui utilisé pour le P.I. Creux de Genthod. Toutefois, la différence de puissance des malaxeurs entre les deux chantiers et également la taille de gâchées trois fois plus faible pour les ouvrages de la route du col des Mosses conduisent à un BFUP CM34_30 plus thixotrope et qui supporte le coulage sur des pentes jusqu'à 12 %, contrairement au mélange CM34_35 utilisé sur le P.I. du Creux de Genthod et qui est adapté à des pentes jusqu'à 5 %. Ceci illustre bien l'interaction prépondérante entre recette de BFUP, séquence de malaxage, malaxeur et taille de gâchée pour conduire à une ouvrabilité donnée. Une planche d'essai réalisée au début de chaque chantier a permis d'affiner les recettes de BFUP en fonction du rendement du malaxeur et des conditions météorologiques.

Bilan des chantiers

Dans l'optique de simplifier la mise en œuvre et si possible de réduire les coûts, le BFUP a été produit sur le chantier pour les deux applications présentées.

P.I. Creux de Genthod

Une centrale de chantier munie d'un silo pour le ciment a été utilisée. Le malaxeur à axe vertical de type SIPE TTM 800E avait une capacité nominale de 500 litres de béton. Des gâchées entre 283 et 340 litres de BFUP ont pu être réalisées avec une durée de malaxage de 12 à 14 minutes par gâchée. La cadence de production et de pose du BFUP était en moyenne de 1 m^3 par heure, (fig. 5 et 8). Le BFUP a suivi sans difficultés la pente de 5 % du tablier, avec trafic adjacent, et le profil complexe imposé par les nombreuses barres d'armature (fig. 9).

Le pont a été entièrement rouvert au trafic le 14 décembre 2010, 71 jours après le début des travaux. Au niveau économique, le coût de la solution de remise en état de la chaussée avec BFUP, couche d'accrochage et enrobé bitumineux est de 400 francs par m^2. L'économie de temps réalisée avec le BFUP et sa robustesse ont permis de terminer le chantier au début de l'hiver précoce 2010 (début décembre), ce qui aurait été impossible s'il avait fallu reprofiler la chaussée. Les coûts totaux

Fig. 7 : Vue des chantiers des ponts sur le ruisseau des Farettes

Fig. 8 : Mise en place du BFUP lors de la deuxième étape, avec trafic adjacent au P.I. du Creux de Genthod

Fig. 9 : Détail avec les armatures apparentes (P.I. Creux de Genthod)

Fig. 10 : Fabrication du BFUP avec le malaxeur de chantier

Fig. 11 : Mise en place du BFUP, pont sur le ruisseau des Farettes 1, pentes combinées 10 %

Fig. 12 : Lissage du BFUP à l'aide de la pelle à neige, pont sur le ruisseau des Farettes 1, pentes combinées 10,4 %

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs.)

du chantier ont été diminués d'un tiers par rapport à une solution traditionnelle, nécessitant le reprofilage de la chaussée.

Ouvrages de la route du col des Mosses

Un malaxeur de type Condecta TTM 300 avec une capacité de 200 litres de béton fini a été utilisé. Compte tenu de la capacité de la cuve du malaxeur, du foisonnement des poudres utilisées pour les BFUP et de la puissance nécessaire lors du changement de consistance des BFUP, le volume qui a été réalisé avec ce malaxeur était de 94 litres (fig. 10). La durée totale de mélange avec ce malaxeur était de 20 à 22 minutes. En moyenne, deux à trois gâchées de BFUP ont été produites et placées par heure (fig. 11). La même recette de BFUP CM34_30 a pu être appliquée sur des pentes du support entre 4 et 12 %, ce qui constitue une première mondiale pour ce type de matériaux (fig. 12). La durée des interventions a pu être réduite au minimum entre la pose du BFUP et, huit jours après, la pose de l'enrobé et la réouverture au trafic.

Les essais de traction réalisés sur des carottes BFUP/béton prélevées sur les ouvrages ont donné une contrainte moyenne d'adhérence de 2,46 MPa avec ruptures majoritairement dans le béton de support (exigence de 2 MPa pour classe R4 selon EN 1504-3). Ceci confirme l'excellente adhérence du BFUP sur le béton. L'analyse économique des chantiers est en cours mais la solution BFUP s'avère déjà nettement plus avantageuse que les méthodes traditionnelles avec reprofilages et étanchéités collées.

Prêts pour l'application

La technologie des BFUP coulés sur chantier, appliquée à la maintenance des ouvrages routiers ou ferroviaires a connu de grands progrès depuis la première application réalisée en 2004, et se répand à l'initiative de la Suisse romande.

Il est désormais possible de produire des BFUP économes en clinker, à partir de composants majoritairement locaux, utilisables dans les conditions de température et de pentes de support les plus extrêmes.

Les deux applications les plus récentes réalisées en Suisse Romande (remise en état du P.I. Creux de Genthod et maintenance des ouvrages de la route du col des Mosses) ont montré le grand intérêt de cette méthode de construction pour réduire les coûts de manière très importante et limiter au minimum les perturbations des chantiers.

Emmanuel Denarié, dr sc. techn., ing. civ. dipl. EPFL/SIA
Hadi Kazemi-Kamyab, ing. civ., Ma. Sc.
Eugen Brühwiler, prof. dr sc. techn., ing. civ. dipl. ETHZ/SIA
Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages,MCS-ENAC-EPFL, CH–1015 Lausanne

Bassem Haddad, ing. civ. dipl. EPF
Département des Constructions et des Technologies de l'Information (DCTI) – République et Canton de Genève – Office du génie civil
Direction des ponts et chaussées
Place de la Taconnerie 7, CH – 1811 Genève

Sébastien Nendaz, ing. civ. Reg A
Etat de Vaud – Département des Infrastructures DINF
Service des routes
Place de la Riponne 10, CH – 1014 Lausanne

Références

[1] Roux, N., Andrade, C., Sanjuan, M.A., (1995), *Etude expérimentale sur la durabilité des bétons de poudres réactives*, 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.

[2] Denarié, E., Wuest J. Putallaz, J.C., Brühwiler, E., (2005), *Béton Fibré Ultra Performant : première application en réhabilitation, Bulletin technique de la Suisse Romande, TRACÉS* 17, 7 septembre 2005, pp. 6-11

[3] Brühwiler E., Denarié E., (2008), *Rehabilitation of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete*, UHPC-2008 : The Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, March 05 - 07, 2008, Kassel, Germany

[4] OFROU (2005), *Elaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales*, Directive OFROU, Office Fédéral des Routes, Berne, Suisse, http://www.astra.admin.ch

[5] SIA 269/2, (2011), *Maintenance des structures porteuses – Structures en béton*, Norme Suisse SIA, ref. SN 505269/2:2011 fr.

[6] Pittet M., (2010), *Evaluation en laboratoire de divers traitements de l'interface BFUP / AC 11 S*, rapport d'étude, LAVOC-EPFL

[7] Denarié E., Habert G., Šajna A., (2009), *Recommendations for the use of UHPFRC in composite structural members – rehabilitation Log cezsoški bridge*, Deliverable ARCHES D14, http://arches.fehrl.org

[8] Denarié E., (2010), *Essais de qualification de bétons fibrés ultra performants (BFUP) pour fortes pentes, Série 1 (essais entre 5 et 16 jours), Série 2 (essais à 28 jours et plus)*, Rapport n° MCS 10.05 – 2, MCS, EPFL

Composants des BFUP

CEM II (A-M) D-LL 52.5 N (VIGIER – CT 180)
Filler calcaire (HOLCIM-La Sarraz), de granulométrie proche de celle du ciment
Fumée de Silice BASF grise 971 U (non densifiée)
Sable de quartz fin (MN30, 0.1-0.5 mm)
Superfluidifiant BASF GLENIUM SKY 561
Thixotropant SIKA Stellmittel T (pour la tenue à la pente)
Fibres acier droites BEKAERT OL 10/0.16 (longueur 10 mm, diamètre 0.16 mm)

Couche d'accrochage et enrobés

La couche d'accrochage sur les BFUP était composée d'un primer CTW HK dosé à 60 g/m² et d'une émulsion de bitume polymère CTW Webacid HCP avec 120 g/m² de liant résiduel. A Genève, l'enrobé AC 11 S été réalisé avec un bitume modifié aux polymères (type CH-E pour sollicitations élevées) et une faible teneur en vides pour maximiser la surface d'accrochage sur le BFUP. Les granulats étaient 100 % concassés à arêtes vives et le filler rigidifiant, [8]. Pour les ouvrages de la route du col des Mosses, le liant était le même mais la taille des granulats a été adaptée en fonction de l'épaisseur des couches. L'enrobé était posé sur l'émulsion bitumineuse et le primer appliqués après au minimum sept jours de cure humide du BFUP.