



Informations actuelles sur les routes en béton et l'infrastructure routière

update 3/14

Réhabilitation et renforcement efficaces d'ouvrages d'infrastructure au moyen de bétons fibrés ultra-performants (BFUP)

On parvient à réhabiliter et à renforcer efficacement des ouvrages en béton en appliquant une couche relativement mince de BFUP. Leur résistance peut être augmentée sans augmenter les charges permanentes de l'ouvrage. Les applications de cette technologie innovante montrent que celle-ci est économiquement avantageuse et suffisamment maîtrisée pour remplacer les méthodes utilisées jusqu'ici pour la réhabilitation et le renforcement d'ouvrages en béton.

Réhabilitation et renforcement efficaces d'ouvrages d'infrastructure au moyen de bétons fibrés ultra-performants (BFUP)

La tâche la plus importante de la construction moderne en béton consiste à développer de nouvelles méthodes et technologies assurant la durabilité et l'amélioration d'ouvrages existants, de manière à prolonger leur durée de service ou à leur permettre de résister à des charges plus importantes.

De tout temps, de nouveaux matériaux ont permis des progrès dans les constructions conçues par les ingénieurs. Durant les deux dernières décennies, a été développée une nouvelle série de matériaux de construction composites à base de ciment, renforcés de fibres et présentant des propriétés nettement améliorées : les bétons fibrés ultra-performants (BFUP).

C'est à ce type de matériau que l'on recourt de plus en plus aujourd'hui pour la réhabilitation et le renforcement d'ouvrages d'infrastructure ne répondant plus aux exigences actuelles, ou carrément endommagés, tels que ponts, dalles de roulement et bordures. On parvient ainsi à satisfaire aussi bien les exigences statiques des constructions que la durabilité qu'ils doivent présenter; mais on prend aussi en compte les intérêts des propriétaires d'ouvrage, qui tiennent à optimiser leurs frais d'entretien sans imposer aux utilisateurs trop d'entraves au trafic.

Qu'est-ce que le BFUP et quand l'emploie-t-on?

Le BFUP est constitué d'une matrice liée par du ciment, comprenant des composants fins réactifs supplémentaires et du sable de quartz dont les grains atteignent un diamètre de 1 mm. Cette matrice est renforcée de fibres courtes hautement concentrées, d'une longueur maximale de 15 mm. Elles sont en général en acier, n'ont qu'une épaisseur de 0,2 mm et représentent au moins 3 % du volume. L'ensemble du mélange est d'une compacité très élevée grâce à une optimisation de la courbe granulatoire. Le rapport eau/ciment ne dépassant pas 0,20, l'eau de gâchage du BFUP est intégralement absorbée par l'hydratation du ciment; le matériau ne subit donc pratiquement aucune dessiccation avec formation de pores capillaires interconnectés. Il en résulte qu'une pénétration d'eau venant de l'extérieur ne se produira que de manière négligeable et que les mécanismes d'endommagement du béton résultant d'habitude d'une telle pénétration ne se produisent pas.

Un cas d'application important du BFUP se présente lorsqu'il s'agit d'améliorer l'état d'ouvrages existants en béton armé dont certaines parties sont spécialement exposées à être endommagées. La mise en œuvre de BFUP permet alors souvent d'améliorer la durabilité et de renforcer la capacité portante de telles constructions. C'est ce qui se fait en Suisse depuis 2004. Les applications réalisées jusqu'ici peuvent être classées en trois groupes (avec ou sans incorporation d'armatures dans le béton, dans la direction principale de portance), soit :

- 1) fonction de protection sur des surfaces horizontales
- 2) fonction de protection sur des surfaces verticales
- 3) fonction porteuse et de protection pour des dalles et des structures entières.



Fig. 1 Coupe microscopique d'une zone de contact entre un béton ordinaire et un BFUP. La différence entre les deux matériaux est bien visible (dimension des granulats, armature de fibres, compacité)

Le produit BFUP

Holcim (Suisse) SA a désormais mis sur le marché deux produits de ce type, soit pour des applications verticales et pour des applications en pente. Tous deux, dotés de propriétés mécaniques équivalentes, sont offerts en tant que systèmes contrôlés et certifiés CE pour des applications des plus variées. Ils se présentent sous la forme d'un prémix industriel, auquel on ajoute des fibres d'acier et des fluidifiants, qui sont soit conditionnés en sacs, soit livrés en « big bags », suivant les quantités en cause.

Une équipe compétente offre ses conseils aux concepteurs et entrepreneurs pour la production et la mise en place de BFUP et fournit des directives de dosage adaptées à chaque projet. La production se fait soit sur place dans un malaxeur à mortier, soit, si les quantités sont importantes, dans une centrale à béton.

Ci-après sont présentés plusieurs réhabilitations/renforcements de ponts au moyen de BFUP.

Application de couches d'étanchéité pour ponceaux et passages inférieurs

Dans son rapport sur la conception et la réalisation de couches d'étanchéité sur tabliers de ponts au moyen de BFUP, Clemens Bühlmann, du bureau d'ingénieurs Gmeiner AG, considère que l'on parvient ainsi à une durée de service théorique de 100 ans. Le renouvellement de la couche d'étanchéité après 50 ans – usuel pour les couches de bitume de polymères – n'est dès lors plus nécessaire. On évite ainsi des travaux d'entretien coûteux et réduisant souvent de manière critique la disponibilité des voies d'infrastructure.

Les éléments porteurs, constitués de murs de pierres naturelles, sont protégés à long terme des eaux de surface par la couche d'étanchéité et le processus de dégradation de ces ouvrages peut être sensiblement ralenti. Les mesures de réhabilitation à envisager pour l'avenir seront ainsi sensiblement retardées. L'investissement supplémentaire à consentir – soit 100 à 150 CHF/m² de surface du pont – par rapport à des systèmes d'étanchéité usuels, apparaît comme rentable, compte tenu d'une durée théorique de service de 100 ans.

Maître d'ouvrage

Chemins de fer fédéraux CFF
Infrastructure / Développement et Management des projets
Zentralstrasse 1, 6002 Lucerne

Auteur du projet

Gmeiner AG Ingenieurbüro für Hoch- und Tiefbau
Schlösslirain 3, 6006 Lucerne

Exécution

Immensee-Arth-Goldau, 2012/2013: C. Vanoli AG
Karrengasse 2014, Marti AG

Produit

BFUP Holcim 707, BFUP Holcim 710
Épaisseur de la couche 30mm



Fig. 2 Protection du BFUP contre le soleil, immédiatement après la mise en place, au moyen d'un couvert



Fig. 3 Mise en place de ballast, puis de rails sur traverses, sur une couche d'étanchéité de BFUP. A gauche : coffrage négatif pour une couche de BFUP en bordure

Réhabilitation d'ouvrages, NO1, Effretikon-Ohringen, Pont sur la Töss, Winterthour Réhabilitation du parapet (2014/2015)

L'examen de ce parapet, construit il y a 20 ans, a révélé une détérioration sous forme de fissures en réseau, avec présence de chlorures provenant d'éclaboussures et de brouillard salin.

Les concentrations de chlorures mesurées rendent probable une corrosion de l'armature et une détérioration de la structure du béton. Parmi les mesures envisagées par le consortium IG Winti Tössbrücke (c/o Bänziger & Partner AG), c'est un reprofilage du parapet en béton au moyen de BFUP qui fut retenu. Les travaux planifiés pour 2014 et 2015 comportent l'enlèvement par hydro-démolition – jusqu'à la première couche d'armatures – du béton proche de la surface, contaminé de chlorures suivi de la mise en place d'une couche de protection de BFUP d'une épaisseur d'env. 40 mm.

La réhabilitation au moyen de BFUP est exécutée en deux étapes se succédant immédiatement, soit : coulage d'un BFUP fluide dans le coffrage, puis application, sur le couronnement, d'un BFUP thixotrope, adapté aux couches minces en pente. Cette dernière opération se révèle difficile, car le trafic passant sur la voie toute proche engendre des secousses jusque sur la voie fermée au trafic. Bien que le BFUP thixotrope puisse en principe être appliqué sur des éléments présentant une pente de 6 %, ici une intervention manuelle exigeante, par l'entrepreneur, se révéla nécessaire dès que la pente atteignait 2 %.

Maître d'ouvrage

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU,
Filiale Infrastructures Winterthour

Auteur du projet

IG Winti Tössbrücke c/o Bänziger & Partner AG
Grubenstrasse 35; 8045 Zurich

Exécution

Walo Bertschinger AG
Infrastrukturbau; Postfach 1155; 8021 Zurich

Produit

BFUP Holcim 707, BFUP Holcim 710,
Épaisseur de la couche 30 à 40 mm



Fig. 4 Coffrage pour la couche de protection



Fig. 5 Parapet réhabilité au moyen d'une couche de BFUP



Fig. 6 Coup d'œil sur le revêtement gravillonné

Restauration du Pont du « Val Tschiel » près de Donat (GR) en 2013

Le pont sur le vallon appelé « Val Tschiel » près de Donat est l'un des premiers ponts à arc raidi, un système porteur développé par l'ingénieur Robert Maillart. Il fut mis en service en 1924; aujourd'hui, il n'est plus ouvert qu'au trafic lent. En 2013, il fut réhabilité selon les principes applicables à la

conservation des monuments historiques, en respectant le mieux possible la substance originale de l'ouvrage, de même que sa silhouette. Les travaux ont consisté à poser sur le tablier une couche de 30 mm de BFUP, sur laquelle on a répandu du gravillon, ce qui a constitué un revêtement antidérapant directement utilisable.

Maître d'ouvrage

Commune de Donat, Geschäftsstelle Naturpark Beverin

Auteur du projet

Conzett Bronzini Gartmann AG
Bahnhofstrasse 3, 7000 Coire

Exécution

Walo Bertschinger AG
Raschärenstrasse 21, 7000 Coire

Produit

BFUP Holcim 710
Épaisseur de la couche 30 mm



Fig. 7 Le pont après sa réhabilitation en douceur

Renforcement et réhabilitation d'un pont à Montbovon (2013)

Ce pont-poutre centenaire à plusieurs travées, en béton armé, franchissant la Sarine, présente une longueur totale de 50 m. Il a été renforcé pour une nouvelle durée de service de 70 ans. Comme on ne disposait pas de données fiables sur le taux d'armatures dans les sections, sa résistance a été très sensiblement augmentée par une précontrainte rectiligne extérieure, combinée avec une couche de 40 mm de BFUP armé; on a ainsi pu répondre à toutes les sollicitations éventuelles du trafic routier, même en cas de transports exceptionnels. Les travaux ont pu être planifiés de manière que cette voie – un important accès - n'a dû être fermée que durant cinq jours. Ainsi renforcé, le pont offre les mêmes performances que s'il était neuf, tandis que les coûts d'intervention (1940 CHF/m² de surface du tablier) n'ont atteint que la moitié du coût estimé d'un nouvel ouvrage, avec la consommation additionnelle de matériaux que celui-ci aurait entraînée.

Maître d'ouvrage

Groupe e SA, Granges-Paccot

Auteur du projet

sd ingénierie fribourg SA, Fribourg

Exécution

Implenia, Fribourg

Produit

BFUP Holcim 710

Épaisseur de la couche 40 mm



Fig. 8 Coup d'œil sur le pont de Montbovon durant les travaux de renforcement



Fig. 9 Détail d'exécution



Fig. 10 Vue sur le viaduc de Moudon



Fig. 11 Coup d'œil sous les bordures réhabilitées

Réhabilitation d'un viaduc routier à Moudon VD (2014)

Long de 200 m et large de 12,5 m, ce pont est constitué d'un tablier précontraint massif. Celui-ci avait été endommagé sous l'effet de la corrosion des armatures et ses bordures devaient être remplacées. En été 2014, on a posé sur cette dalle au total 114 m³ de BFUP pour en assurer l'étanchéité et la renforcer localement, ainsi que pour encastrement des nouvelles bordures dans le tablier.

Maître d'ouvrage

Canton de Vaud, Service des Routes, Lausanne

Auteur du projet

sd ingénierie Lausanne, Lausanne

Exécution

Marti SA, Lausanne

Produit

BFUP Holcim 710

Épaisseur de la couche 30 mm

Transformation et renforcement de la « Jupiterbrücke » à Berne (2014)

Dans la région de Berne, sur la route nationale A9, on a récemment transformé les bandes d'arrêt d'urgence en voies ouvertes au trafic. On a saisi cette occasion pour renforcer le pont franchissant cette autoroute et affecté au trafic routier comme au tram. Le tablier massif en béton précontraint, comportant une poutre Gerber suspendue, a été remplacé par une structure en cadre monolithique, dans laquelle on a supprimé les deux articulations Gerber. Le BFUP armé qui a été appliqué à cette occasion a servi à reprendre les moments de flexion négatifs dans la zone des piles et à étancher la surface de l'ensemble de l'ouvrage. Les travaux ont été exécutés en été 2014. Pour remplir les espaces laissés par le remplacement des articulations Gerber, on y a coulé un BFUP fluide. Sur le tablier, on a posé un BFHP convenant à un ou-

vrage en pente, avec une épaisseur atteignant 80 mm dans les zones fortement armées. Là également, le résultat fut favorable, malgré la pente caractérisant l'ouvrage. Sur la couche de BFUP propre à renforcer et à étancher le pont, on a appliqué au rouleau un tapis bitumineux.

Maître d'ouvrage

ASTRA Filiale de Thoune

Auteur du projet

Hartenbach & Wenger AG, Egelgasse 70, 3006 Berne

Exécution

Frutiger AG, Abt. Tiefbau, Frutigenstrasse 37, 3601 Thoune

Produit

BFUP Holcim 710, Holcim 707

Épaisseur de la couche entre 30 et 80 mm



Fig. 12 Vue sur la moitié de la route prête à être recouverte de BFUP



Fig. 13 Vue sur la moitié de l'autoroute, après sa transformation, sous le pont franchissant cette route nationale



Fig. 14 Mise en place mécanique du BFUP au moyen d'une finisseuse adaptée spécialement à ce travail

Renforcement des viaducs de Chillon au moyen de BFUP armé (2014)

En 2004 a eu lieu la première pose de BFUP sur un pont routier; cet ouvrage-là, de dix mètres seulement, franchit la Morge, une rivière proche de Sion. Dix ans plus tard, on a accompli un grand pas en passant, sur les viaducs de Chillon (A9), de la mise en œuvre manuelle à l'application mécanique, ce qui a donné une nouvelle dimension à l'utilisation du BFUP.

Le béton de ces viaducs se trouve au début d'un processus de dégradation sous l'effet de la réaction alcalis-granulats. Pour remédier à la baisse de résistance attendue du béton, le tablier du viaduc aval, long de 2,1 km, a été renforcé par une couche de BFUP armé d'une épaisseur de 40 mm, respectivement 50 mm. On a ainsi augmenté la portance transversale ultime du tablier, quant à la résistance à la flexion, aux efforts tranchants et à la fatigue des matériaux, et augmenté la rigidité et la résistance à la flexion du tablier dans le sens longitudi-

nal. De plus on a étanché la dalle de roulement en béton armé au moyen de cette couche de BFUP.

Pour ce premier viaduc, les 1240 m³ de BFUP nécessaires ont été produits dans une centrale installée sur le chantier et mis en place en cinq semaines seulement, au moyen d'une machine spécialement développée pour ce travail. La cadence atteint jusqu'à 80 m³/jour et le coût total fut de 230 CHF/m² de surface du pont. Le second viaduc sera renforcé de la même manière en 2015.

Maître d'ouvrage

ASTRA Filiale Estavayer

Auteurs du projet

Monod Piguet & Associés Ingénieurs Conseils SA, Lausanne

Exécution

Walo Bertschinger SA

Produit

Ductal, Épaisseur de la couche 40 mm

Perspectives

Les applications brièvement décrites ci-dessus montrent qu'en appliquant une couche relativement mince de BFUP on parvient à réhabiliter et à renforcer efficacement des ouvrages en béton : leur résistance peut être augmentée sans augmenter notablement leurs charges permanentes. Les applications de cette technologie innovante, réalisées maintenant sur chantier depuis dix ans, montrent que celle-ci est économiquement avantageuse et suffisamment maîtrisée pour remplacer les méthodes utilisées jusqu'ici pour la réhabilitation et le renforcement d'ouvrages en béton.

L'application de la technologie BFUP étant destinée à s'étendre largement, un groupe de travail de la Commission d'accompagnement SIA 262 est en train de rédiger un cahier technique « SIA 2052 : BFUP – matériaux, dimensionnement, exécution », dont la publication est prévue pour 2015.

Cette technologie a été exportée à l'étranger, notamment en France, Allemagne, Autriche, Canada et Chine. Près de Sapporo, au Japon, un pont routier long de 120 m a été renforcé au moyen de BFUP en octobre 2014.

Littérature

- [1] E. Brühwiler, E. Denarié, Stahl-UHFB – Stahlbeton Verbundbauweise zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauteilen mit Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB), Beton- und Stahlbetonbau 108, Heft 4, 2013, p. 216-226
- [2] Cahier technique SIA 2052 Béton fibré ultra-performant (UHFB) – Matériaux, dimensionnement et exécution. Projet final après mise en consultation, nov. 2014
- [3] Bericht zu Pilotversuch, Abdichtung mittels UHFB, Januar 2011, Gmeiner AG Luzern

Composition des BFUP utilisés dans les projets susmentionnés (Exception : projet viaduc de Chillon)

Prémix	Sacs de 25 kg	
Fluidifiant	3-4% Masse	
Teneur en fibres métalliques	3-4% Masse	
Rapport eau/ciment équivalent	0.18-0.19	
Propriétés mécaniques		
Résistance à la compression sur cube	100 × 100 × 100 mm	140 +/- 10 N/mm ²
Résistance à la compression sur prisme	40 × 40 × 160 mm	180 +/- 10 N/mm ²
Résistance à la traction (directe)	500 × 300 × 30 mm	≥ 7-10 N/mm ²
Résistance à la traction par flexion	40 × 40 × 160 mm	40 +/- 10 N/mm ²
Module d'élasticité		40 000 +/- 10 000 N/mm ²
Propriétés relatives à la durabilité		
Perméabilité à l'air		très faible
Absorption capillaire (coefficient d'absorption)	kg/m ² h ^{0.5}	0.05
Résistance aux chlorures		très élevée
Profondeur moyenne de carbonatation	après 56 jours ∞ 1% CO ₂	< 0,1 mm
Résistance au gel et au sel de déverglaçage		très élevée
Abrasion	Selon Böhme	6.5 cm ³ / 50 cm ²
Résistance aux sulfates	‰	-0.12

Groupement d'intérêts des routes en béton

cemsuisse

Association suisse de l'industrie
du ciment

Marktgasse 53, 3011 Berne

Téléphone 031 327 97 97

Fax 031 327 97 70

info@cemsuisse.ch

www.cemsuisse.ch

BEVBE

Beratung und Expertisen für
Verkehrsflächen in Beton

Herenholzweg 5, 8906 Bonstetten

Téléphone 044 700 14 02

Fax 044 700 14 03

werner@bevbe.ch

www.bevbe.ch

Grisoni-Zaugg SA

Rue de la Condémine 60

Case postale 2162, 1630 Bulle 2

Téléphone 026 913 12 55

Fax 026 912 74 54

info@grisoni-zaugg.ch

www.grisoni-zaugg.ch

Holcim (Schweiz) AG

Hagenholzstrasse 83, 8050 Zurich

Téléphone 058 850 62 15

Fax 058 850 62 16

betonstrassen@holcim.com

www.holcim.ch

Holcim (Suisse) SA

1312 Eclépens

Téléphone 058 850 91 11

Fax 058 850 92 95

chausseebeton@holcim.com

www.holcim.ch

Implenia Bau AG

Infra Ost Tiefbau

Binzmühlestrasse 11, 8008 Zurich

Téléphone 044 307 90 90

Fax 044 307 93 94

daniel.hardegger@implenia.com

www.implenia-bau.com

Jura-Cement-Fabriken AG

Talstrasse 13, 5103 Wildegg

Téléphone 062 887 76 66

Fax 062 887 76 69

info@juracement.ch

www.juracement.ch

Juracime SA Fabrique de ciment

2087 Cornaux

Téléphone 032 758 02 02

Fax 032 758 02 82

info@juracime.ch

www.juracement.ch

KIBAG Bauleistungen AG

Strassen- und Tiefbau

Müllheimerstrasse 4

8554 Müllheim-Wigoltingen

Téléphone 052 762 61 11

Fax 052 762 61 14

p.althaus@kibag.ch

www.kibag.ch

Specogna Bau AG

Lindenstrasse 23, 8302 Kloten

Téléphone 044 800 10 60

Fax 044 800 10 80

spc@specogna.ch

www.specogna.ch

Synaxis AG Zürich

(autrefois Wolf, Kropf & Partner AG)

Thurgauerstrasse 56, 8050 Zurich

Téléphone 044 316 67 86

Fax 044 316 67 99

c.bianchi@synaxis.ch

www.synaxis.ch

Toggenburger AG

Schlossackerstrasse 20

8404 Winterthur

Téléphone 052 244 13 03

Fax 052 244 12 24

info@toggenburger.ch

www.toggenburger.ch

Ciments Vigier SA

Zone industrielle Rondchâtel

2603 Péry

Téléphone 032 485 03 00

Fax 032 485 03 32

info@vigier-ciment.ch

www.vigier-ciment.ch

Walo Bertschinger AG

Case postale 7534, 8023 Zurich

Téléphone 044 745 23 11

Fax 044 745 23 65

kurt.glanzmann@walo.ch

www.walo.ch

BETONSUISSE

BETONSUISSE Marketing AG

Marktgasse 53, CH-3011 Berne

Téléphone +41 (0)31 327 97 87, Fax +41 (0)31 327 97 70

info@betonsuisse.ch, www.betonsuisse.ch

vdz.

VDZ, Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Tannenstraße 2, D-40476 Düsseldorf

www.vdz-online.de

beton

Gruppe Betonmarketing Österreich

Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H.

Reisnerstraße 53, A-1030 Vienne

Téléphone +43 (0) 1 714 66 85-0, www.zement.at