

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 140 (2014)
Heft: 19: Viaducs de Chillon

Artikel: 2400 m³ de BFUP sur un pont autoroutier
Autor: Mühlberg, Hartmut / Cuennet, Stéphane / Brühwiler, Eugen
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-515964>

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: 16.01.2026

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



2400 M³ DE BFUP SUR UN PONT AUTOROUTIER

Le chantier de réfection des viaducs de Chillon, en cours sur l'autoroute A9, se caractérise par la mise en place de BFUP sur une échelle jamais atteinte au monde, puisque le renforcement de la dalle de roulement avec quelque 40 mm de ce matériau ultra-performant correspond à un volume total de plus de 2400 m³ sur une surface de plus de 50000 m².

*Hartmut Mühlberg, Stéphane Cuennet, Eugen Brühwiler,
Bernard Houriet, Frédéric Boudry et Blaise Fleury*

Un béton affaibli par la RAG

Initialement, les travaux d'entretien des dalles de roulement des viaducs ouverts à la circulation en 1969 devaient se faire avec des matériaux traditionnels. Cependant, au cours de travaux d'hydro-démolition effectués en 2012 sur la partie inférieure des caissons latéraux, il est apparu que le béton en place était victime de la RAG (lire encadré) bien qu'aucun signe apparent (faïencage de surface) caractéristique de ce phénomène n'ait été détecté lors de la phase d'examen de l'ouvrage. En effet, les granulats du Léman ou de l'embouchure du Rhône utilisés pour les bétons des viaducs sont caractérisés par une phase d'initiation et de transition très lente (plusieurs décennies). Par contre, en phase de développement, le phénomène se traduit au cours du temps par une forte accélération de la réduction des propriétés mécaniques du béton, notamment de sa résistance à la compression, à la traction et de son module E. Les résultats d'essai placent le béton des viaducs de Chillon parmi les plus réactifs en comparaison avec les valeurs expérimentales des ouvrages suisses.

Les vérifications détaillées de la sécurité structurale effectuées pour le projet initial d'entretien des dalles avaient montré que les sections les plus sollicitées à l'effort tranchant – celles situées à proximité des âmes du caisson – étaient juste suffisantes par rapport à la sécurité structurale requise, pour autant qu'on puisse compter sur un béton en place présentant des propriétés ne diminuant pas dans le temps. Selon les prédictions, le béton, qui correspond dans son état actuel à la classe C60/75, n'équivaldrait dans 30 ans plus qu'à la classe C40/50 et serait insuffisant pour garantir la sécurité structurale. Compte tenu de cette situation, des investigations supplémentaires ont été menées afin d'évaluer les bétons de la dalle de roulement. Elles ont abouti à la conclusion que, bien que le béton ne soit visuellement pas encore altéré, le phénomène de la RAG est en phase de transition pour la dalle avec le risque d'un développement accéléré des dégradations pouvant engendrer une forte diminution de ses propriétés. Partant de ce constat, il devenait évident pour l'OFROU que la solution initiale n'était plus adéquate et qu'il convenait de lui trouver une alternative.

Le BFUP s'impose

Trois variantes ont alors été envisagées. Au début, la possibilité d'obtenir une résistance plus élevée à l'effort tranchant des sections en accroissant l'épaisseur de la dalle avec du béton armé a été évaluée. Cette solution a toutefois rapidement été abandonnée, puisqu'elle se traduisait par une augmentation importante du poids propre que les viaducs ne seraient en mesure de reprendre qu'avec un lourd et coûteux renforcement de la structure primaire. La deuxième variante étudiée consistait à renforcer les dalles avec des lamelles en fibres de carbone collées sur les faces tendues (supérieures et inférieures) de la dalle de roulement. Elle a aussi été vite écartée car, si l'ajout de lamelles de fibres comme armature extérieure permet d'améliorer le comportement à la flexion des dalles, de telles lamelles n'influencent que peu leur principal point faible : la résistance à l'effort tranchant.

L'énoncé des carences des deux premières variantes (poids propre excessif et déficit de résistance à l'effort tranchant) suffit à cerner les avantages de la troisième,



Réaction Alcalis-Granulats (RAG)

Depuis près de 25 ans, la réaction alcalis-granulats (RAG) est observée en Suisse sur de nombreux ouvrages en béton exposés à l'humidité, comme c'est le cas des viaducs de Chillon. La RAG est une réaction chimique entre certains granulats siliceux et les alcalins actifs dans la pâte de ciment qui a lieu en présence d'eau. Cette réaction conduit à un gonflement du béton engendrant des fissures, d'abord sous forme de faïencage puis de grande ouverture en réseau. Cette fissuration peut entraîner à terme une réduction importante des performances mécaniques du béton. Ce phénomène connu depuis les années 1940 n'est pas encore entièrement élucidé, et les recherches se poursuivent afin de mieux comprendre le comportement d'éléments de structure atteints par la RAG pour y apporter des mesures de remise en état ou de protection efficaces.

La RAG est en général un phénomène lent, et la plupart des dégâts sur les ouvrages ne sont apparus que 20 à 40 ans après leur construction. Cependant, dans certains cas, d'importants dégâts de RAG ont été constatés seulement quelques années après la construction. Le développement de la RAG requiert la présence d'eau (taux d'humidité d'au moins 70 à 80 % HR). Elle est accentuée par les variations thermiques, les cycles de gels/dégels et les sollicitations mécaniques. Les éléments massifs exposés à l'humidité – barrages, murs de soutènement, portails de tunnel, fondations ou bordures de pont – sont particulièrement vulnérables à la RAG.

Le traitement des ouvrages atteints par la RAG dépend du stade d'évolution du phénomène et du type d'ouvrage. Les interventions actuellement appliquées vont d'une imprégnation hydrofuge des surfaces exposées aux intempéries (afin de limiter l'apport d'eau) à un remplacement des éléments d'ouvrage touchés.

Etant donné que la majorité des granulats en Suisse sont potentiellement alcali-réactifs, il importe d'adapter la recette du béton pour les nouvelles constructions, en particulier la composition du liant (ciment et additions) et éventuellement de prendre des mesures constructives, lors de la planification d'éléments en béton présentant un risque de RAG. Le Cahier Technique SIA 2042 « Prévention de la réaction alcalis-granulats (RAG) des ouvrages en béton » a été publié en 2012 pour donner des directives afin de limiter les risques dus à la RAG sur les nouvelles constructions en béton.

basée sur la mise en place de BFUP : pour une masse volumique similaire à celle d'un béton, ce nouveau matériau offre des propriétés de module et de résistance (notamment à la traction) bien supérieures, ce qui lui permet de pouvoir travailler en couche mince. Des recherches et développements menés à l'EPFL depuis 15 ans ont démontré l'important potentiel d'amélioration de la résistance à la flexion, à l'effort tranchant et à la fatigue d'une dalle en béton armé par la pose d'une couche de BFUP qui, en plus d'être plus étanche, permet de créer une section mixte. Cette solution était envisageable, car le support était encore relativement sain malgré la RAG. Un report de l'intervention aurait pu conduire à une impossibilité de renforcer l'ouvrage.

Pour vérifier le renforcement, des essais de rupture sur des éléments représentatifs de la dalle ont été effectués à l'Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, sous la direction du professeur Daia Zwicky de l'Institut des Technologies de l'Environnement Construit¹. Ces essais ont montré que le renforcement d'un élément de dalle en béton armé au moyen d'une couche de BFUP armé permet d'obtenir une augmentation de la résistance ultime de plus de 50 %, le maintien d'un comportement structural ductile de l'élément renforcé et des modes de rupture flexionnels lorsque la résistance ultime est atteinte.

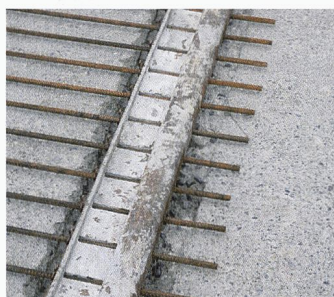
Dimensionnement du renforcement

La charge routière admise pour le dimensionnement du renforcement est le modèle de charge 1 de la norme SIA 261 qui est utilisé pour le dimensionnement de nouvelles structures. Cette exigence a été imposée étant donné la structure des viaducs et en se référant à l'article 0.1.5 de la norme SIA 269 pour les structures existantes.

Comme expliqué plus haut, les propriétés du béton existant admises pour les calculs tiennent compte de la dégradation due à la RAG et sont celles d'un béton C40/50. Pour le BFUP, la sorte UA définie selon le Cahier Technique SIA 2052 (consultation) a été exigée : une résistance moyenne à la traction supérieure à 7 N/mm² et une déformation d'écroutissement moyenne du BFUP supérieure à 1‰ lorsque la résistance à la traction est atteinte.

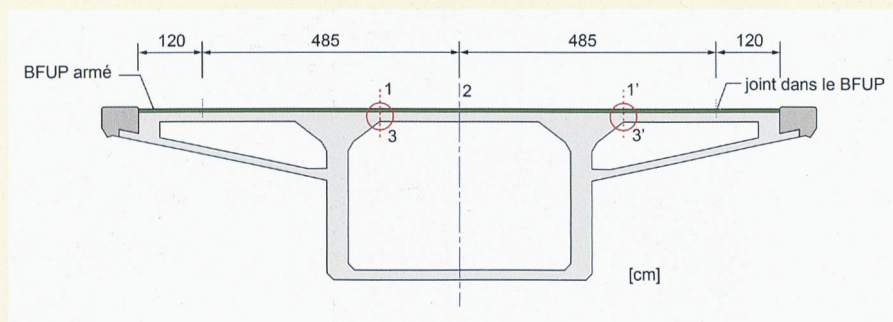
L'ajout d'une couche de 40 mm de BFUP a fait passer l'épaisseur de la dalle de roulement de 180 à 220 mm. L'augmentation de poids a pu être compensée par une réduction de l'épaisseur du revêtement de 100 à 75 mm, qui fait que les charges permanentes ne sont que peu modifiées. Les joints longitudinaux entre les quatre étapes de BFUP sont situés où les moments transversaux sont positifs, c'est-à-dire lorsque le BFUP est en compression. L'augmentation de résistance due à la couche de BFUP armé a été calculée en appliquant les modèles de résistance selon le Cahier Technique SIA 2052 (consultation).

Les dalles en porte-à-faux de la structure des viaducs de Chillon sont « caissonnées » par des voiles inférieures inclinés d'une épaisseur de 12 cm. Compte tenu de leur faible hauteur, de 30 à 60 cm, l'espace sous les porte-à-faux n'est pas visitable, mais les quelques ouvertures de contrôle ont permis de constater que l'armature inférieure est parfois corrodée, ce qui est le résultat du dysfonctionnement de nombreuses pipettes de drainage de l'enrobé.

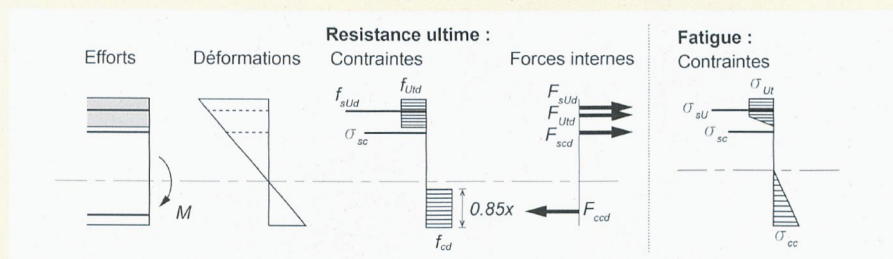


1 Prof. Daia Zwicky - EIA Fribourg - Rapport AGP 36'549 de nov. 2013
Essais sur dalles « Chillon » renforcées au BFUP armé

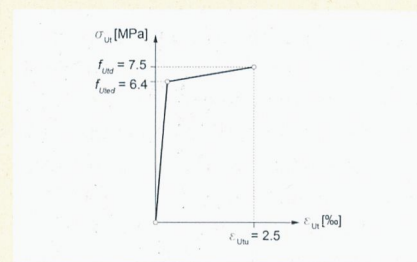
RÉSISTANCE DE LA DALLE RENFORCÉE AVEC DU BFUP ARMÉ



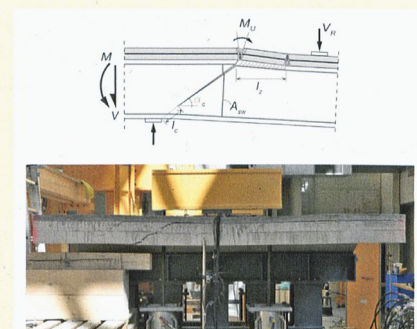
A Viaduc de Chillon avec la dalle de roulement renforcée au moyen du BFUP armé avec indication de la largeur des étapes de coulage du BFUP



C Analyse de la section composée en flexion simple (BFUP sollicité en traction)



B Loi de comportement à la traction du BFUP (valeurs de dimensionnement)



D Mode de rupture par effort tranchant d'un élément composé BFUP-béton

Caractéristiques du renforcement au BFUP: Une couche de BFUP d'une épaisseur de 40 mm contenant des barres d'armature (diam. 12 mm, esp. 100 mm) disposées dans le sens porteur principal transversal renforce la dalle de roulement existante en béton armé. L'emploi de barres d'armature dans le BFUP, ainsi appelé BFUP armé, s'est avéré efficace pour accroître la résistance ultime et la rigidité. L'élément composé BFUP armé-béton agit comme système multicouche (fig. A).

L'avantage du BFUP réside dans sa résistance relativement élevée permettant de travailler en couche mince. De manière fondamentale, la couche en BFUP (ou en un autre matériau) en connexion par adhérence avec une dalle en béton armé apporte :

- une meilleure diffusion dans la dalle des charges concentrées;
- une hauteur statique plus élevée qui accroît la résistance ultime de la dalle renforcée.

Le comportement élasto-plastique en traction du BFUP est explicitement pris en compte (fig. B), et le BFUP atteint sa résistance maximale f_{Uld} lorsque l'acier entre en écoulement. Toutefois, comparé à l'acier d'armature passive, le BFUP dispose d'une capacité de déformation plus limitée. Lors de la formation de rotules plastiques, on pourra admettre une contrainte en traction de $\sigma_{Uld} = 0.9 \cdot f_{Uld}$ dans le BFUP pour une déformation allant jusqu'à $3 \cdot \epsilon_{Uld}$. Au-delà de cette déformation, les forces de traction dans le BFUP armé sont reprises exclusivement par l'acier d'armature passive.

Les éléments composés BFUP-béton montrent à l'état de service un comportement monolithique sans affaiblissement à l'interface BFUP-béton. Ce comportement monolithique subsiste lorsque la résistance ultime est atteinte et en régime post-pic jusqu'à de grandes déformations. En conséquence, la résistance ultime est calculée pour une section monolithique, avec des modèles de résistance basés sur la théorie de la plasticité.

Hypothèses de calcul: Dans ce qui suit, la loi de comportement à la traction présentée à la figure B a été admise pour le BFUP. Les valeurs de résistance de la dalle renforcée au moyen de BFUP armé ont été calculées en admettant une résistance à la compression du béton représentative d'un béton qui sera affaibli par la RAG. La résistance de l'élément composé est comparée avec l'élément en béton armé (sans renforcement) en admettant la résistance actuelle du béton qui correspond à la classe C60/75.

Résistance à la flexion: La résistance ultime en flexion simple a été déterminée à l'aide du modèle de la figure C valable pour des moments négatifs (BFUP armé en traction). Ce modèle est une extension du modèle de base pour le béton armé pour le cas d'un système multicouche. Grâce au renforcement, la résistance ultime en flexion est augmentée de 73 % en flexion négative (BFUP armé en traction, sections 1 et 1' sur la figure A) et de 33 % en flexion positive (BFUP armé en compression, section 2 sur la figure A).

Résistance à l'effort tranchant: La couche en BFUP armé combinée au béton armé apporte un confinement de la zone sollicitée pour retarder la formation de la fissure critique d'effort tranchant dans le béton. Lors des essais, la ruine par effort tranchant s'est produite seulement pour des géométries spécifiques et particulièrement défavorables. Dans les cas de rupture par effort tranchant, une zone d'adoucissement du béton se forme sous l'interface BFUP-béton, appelée DFI (Délamination causée par une Fissuration Intermédiaire du béton), permettant ainsi la formation d'un mode de rupture spécifique au système composé (fig. D). La résistance à l'effort tranchant est augmentée par la semelle tendue en BFUP armé qui forme deux rotules plastique au-dessus de la zone de DFI. Dans le présent cas, les caractéristiques géométriques et les propriétés mécaniques des matériaux sont telles qu'une rupture par effort tranchant ne peut se produire et c'est la résistance à la flexion qui est déterminante.

Toutefois, pour le cas d'une hypothétique rupture à l'effort tranchant, une résistance ultime de 238 kN/m' a été calculée pour les sections 3 et 3' de la figure A sur la base d'un modèle de résistance développé dans [1] en admettant les propriétés du béton affaibli par la RAG. Ceci représente une résistance 20 % plus élevée que la résistance à l'effort tranchant de la dalle en béton armé avec le béton actuel C70/60.

Résistance à la fatigue: Les contraintes en section dues aux charges de fatigue sont calculées pour un comportement élastique (fig. C). Dans le présent cas, le renforcement par la couche en BFUP amène une réduction des contraintes dans les barres d'armature dues aux charges de fatigue jusqu'à un niveau inférieur à la limite de fatigue d'une barre d'armature droite, à savoir $\Delta \sigma_{sUd} = 116 \text{ MPa}$. La contrainte de traction correspondante dans le BFUP reste ainsi inférieure à sa limite de fatigue [2]. En conséquence, tout endommagement dû à la fatigue est écarté.

Maléna Bastien-Masse, Hartmut Mühlberg, Bernard Houriet et Eugen Brühwiler

[1] T. Noshiravani, *Structural Response of R-UHPFRC – RC Composite Members Subjected to Combined Bending and Shear*, Thèse EPFL N° 5246, 2012.

[2] E. Brühwiler, E. Denarié, T. Makita, M. Bastien-Masse, *Comportement à la fatigue des dalles de roulement en béton armé renforcées avec du béton fibré ultra-performant*, Journée d'étude OFROU « Nouveaux acquis de la recherche sur les ponts » du 13 mars 2014. Documentation SIA D0247, Société des ingénieurs et architectes suisses SIA Zurich, pp. 85-92.



Suivi des BFUP sur le chantier

Les essais et procédures de contrôle du béton n'étant pas adaptés au BFUP, l'assurance qualité a été principalement basée sur les indications de l'annexe B du Cahier Technique SIA 2052 (projet de consultation). Cette procédure a cependant dû être adaptée aux spécificités du BFUP mis en œuvre sur les viaducs de Chillon, en particulier les cadences et volumes de bétonnage exceptionnels, la consistance thixotrope du BFUP et sa vibration. Le plan de contrôle ainsi élaboré consistait en une vérification sur quatre niveaux :

- Essais initiaux, effectués par le fournisseur du BFUP, qui permettent de déclarer les propriétés mécaniques et de durabilité du produit.
- Essai de convenance, effectué sur le chantier par l'entreprise. Celui-ci consistait en la réalisation d'une planche d'essai d'environ 10 m³ de BFUP, mis en place dans les conditions identiques à celle de l'ouvrage, en particulier la largeur de l'étape et la pente du support. Il avait pour principaux objectifs de vérifier le fonctionnement de la centrale, d'optimiser la consistance du BFUP et de vérifier que la finisseuse munie de vibreurs permettait d'obtenir un BFUP en place, sans défaut ni discontinuité du fibrage.
- Essais de qualité : Contrôle du producteur du BFUP, en l'occurrence ici l'entreprise car il s'agit d'une production foraine. Chaque gâchée de BFUP a fait l'objet d'un protocole de charge indiquant les quantités effectives des composants, les températures de l'air et du BFUP frais, ainsi que la puissance de malaxage. La consistance a été contrôlée manuellement à chaque étape. Les propriétés mécaniques ont été contrôlées régulièrement par des essais de compression sur cubes de 100 mm d'arête et des essais de flexion 4 points selon la procédure de l'annexe D du cahier technique 2052. L'expérience a cependant montré que la consistance raide du BFUP rendait particulièrement difficile la confection d'éprouvettes représentatives du matériau en place. Il a donc été décidé de produire une série d'éprouvettes directement avec la finisseuse. L'adhérence au support a été contrôlée pratiquement à chaque étape par des essais d'arrachement. La durabilité du BFUP a été vérifiée par des essais de perméabilité à l'air (essais Torrent selon l'Annexe E de la norme SIA 262), de capillarité et d'imperméabilité selon CT SIA 2052. Notons que les essais Torrent ont été effectués non seulement dans les zones courantes, mais également au droit des joints de travail.
- L'intervention ponctuelle d'un laboratoire indépendant, mandaté directement par le propriétaire d'ouvrage, a permis de vérifier les résultats obtenus par l'entreprise dans le cadre de son contrôle qualité.

Il est à relever que les résultats des essais d'adhérence du BFUP au support ont montré des valeurs nettement supérieures aux contraintes maximales calculées. Les plans de rupture sont situés généralement dans le béton du support. Ceci résulte du soin apporté au support, des caractéristiques du BFUP frais ainsi que de sa mise en place mécanisée.



6



7

6 Le balai de répartition du BFUP avant sa vibration
(Photo Jacques Perret)

7 Coulage du béton devant la machine de pose

Afin d'améliorer le comportement transversal et d'augmenter la résistance de la dalle de roulement, une armature transversale a systématiquement été ajoutée dans le BFUP. Le comportement transversal a été confirmé par des essais sur les éléments représentatifs et par un calcul tridimensionnel par éléments finis qui a montré que les zones critiques se trouvent directement à côté des âmes, respectivement des bordures du tablier. Le comportement longitudinal de la structure a été analysé par un calcul à l'aide d'un modèle barres, qui a démontré que la sécurité structurale des doubles portiques isostatiques constituant les travées était légèrement déficitaire. Pour y remédier, une armature longitudinale passive a également été placée dans la couche de BFUP alors épaissie à 50 mm au-dessus des piles sur environ 25 % de la longueur des travées. Cette mesure, combinée avec le renforcement des dalles inférieures des tabliers dans la zone des piles, améliore considérablement la capacité flexionnelle et la ductilité des sections.

En résumé, la mince couche de BFUP armée disposée sur l'ensemble de la surface des tabliers permet de :

- renforcer la dalle de roulement à la flexion, à l'effort tranchant, au poinçonnement et à la fatigue;
- renforcer le système longitudinal global;
- limiter le développement des déformations futures;
- empêcher l'apport d'eau dans le support contaminé par la RAG.

Fluide et ferme ? Thixotrope

Si le choix de la variante en BFUP s'est vite imposé, il constituait un important défi pour l'entreprise. La Suisse dispose aujourd'hui d'un recul non négligeable de dix ans jalonnés par plus de 25 projets avec des BFUP pour le renforcement de dalles de ponts et bâtiments; mais leur utilisation s'est à ce jour faite à une échelle relativement restreinte, avec une quantité maximale de 110 m³ qui pouvait être mise en place à la main. Dans le cas présent, ce sont quelque 1200 m³ de BFUP, pour une surface de 25 400 m², qui ont été coulés du 25 juillet au 3 septembre 2014 sur le premier des deux viaducs. La pose s'est ainsi déroulée dans un laps de temps nettement inférieur à la

période de deux mois initialement prévue, une performance qui n'a été possible que par la mécanisation des moyens de mise en œuvre.

Pour cela, l'entreprise a fabriqué une machine capable de répartir les 40 mm de BFUP sur la dalle de roulement préalablement traitée au jet d'eau à haute pression. Rapidement, il est apparu que le développement de cette machine ne pouvait se faire sans tenir compte des spécificités du BFUP frais qui serait utilisé. A cet égard, pour être bien mis en place et adhérer correctement au support, le BFUP frais doit disposer d'une certaine fluidité. Toutefois, dans le cas présent et compte tenu de la géométrie des viaducs, la surface de la dalle de roulement présente des pentes maximales pouvant atteindre 7 %. Avec pour conséquence qu'un matériau manquant de fermeté risquerait de s'écouler et de ne pas respecter les épaisseurs imposées.

Ces exigences contradictoires quant à la consistance du BFUP frais ont conduit à développer, à la demande de l'entreprise, trois recettes de BFUP thixotrope² qui soient adaptées aux conditions de mise en place (température de pose, pente liée aux dévers longitudinaux et transversaux).

Une machine inédite

A partir du moment où la variante en BFUP a été retenue pour le renforcement des dalles, il était évident que la pose de 2400 m³ de BFUP passait impérativement par des moyens mécanisés. Riche de son expérience dans la mise au point de machines devant remplir des conditions inédites, l'entreprise a décidé de concevoir une machine capable de poser de grandes quantités de BFUP tout en respectant les exigences élevées du propriétaire d'ouvrage et de ses experts quant à la qualité et la précision de la pose.

De nombreuses questions se sont alors posées : comment maîtriser la fabrication et la pose du nouveau matériau ? Comment guider la machine ? Comment assurer la qualité et la précision de pose ? Quel rendement journalier peut-on atteindre ?

² Chim. phys. Se dit des gels qui sont liquéfiables par agitation et régénérés par le repos (Larousse). La thixotropie est obtenue par l'ajout d'adjuvants dans le mélange du BFUP.

WALO

Walo Bertschinger

Z.I. Le Marais
Case postale 39
1312 Eclépens

Tél. 021 / 695 21 50
Fax 021 / 695 21 51

Votre partenaire pour toutes les constructions !

- Routes
- Bâtiments
- Génie civil
- Travaux souterrains
- Sols industriels
- Revêtements décoratifs
- Voies ferrées
- Sols sportifs
- Constructions de digues
- Décharges contrôlées
- Assainissement de béton
- Asphalte coulé



8 Pose de l'étanchéité et du MA sur le BFUP
(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs.)

Conçue à partir du châssis d'une finisseuse utilisée pour bétonner les dalles de l'aéroport de Zurich, la machine de pose a été testée et a subi de nombreux adaptations et développements. Au final, elle possède une poutre de pose de largeur modulable, équipée d'une puissante rampe de vibrateurs. Le réglage du niveau de pose est asservi et la machine corrige en temps réel l'assiette de pose dans toutes les directions. Alimenté en BFUP par des *dumpers* de 1.1 m³, un répartiteur fonctionnant avec une vis sans fin et des trappes dispose le mélange devant la machine sur la largeur de la bande de pose qui, selon les besoins, varie de 120 cm à 600 cm (fig. 7). La répartition du BFUP est affinée par une sorte de balai, juste avant sa mise en place définitive à l'aide de la poutre de pose et de ses puissants vibrateurs (fig. 6). La cure, d'une durée de cinq jours, débute immédiatement après la mise en place du BFUP et consiste en une application d'un film plastique. En ce qui concerne les cadences de bétonnage, sachant que la machine de pose devait avancer à une vitesse minimale de 60 cm/minute, il suffisait d'adapter la largeur de pose à la capacité de production de BFUP.

Fabrication in situ

Parallèlement à la mise au point de la machine, l'entreprise a aussi étudié les moyens de produire du BFUP pour garantir les exigences et les rendements souhaités. Selon le programme des travaux, il fallait poser 1200 m³ ou plus de 25 000 m² de BFUP en moins de six semaines, soit en moyenne 40 m³ par jour. Diverses difficultés liées à la production du BFUP avaient été mises en évidence lors des essais réalisés en 2013 pour la mise au point de

la machine : ouvrabilité, rendement lors de la fabrication, moyens de transport du BFUP et conditions météorologiques allaient forcément influencer la logistique à mettre en œuvre. Pour y remédier, l'entreprise a choisi d'installer une centrale de production de BFUP in situ, directement sur la chaussée de l'autoroute A9. Un choix qui présente de nombreux avantages puisqu'il permet notamment de diminuer les délais de transport et d'apporter la souplesse nécessaire à la coordination entre la machine de pose et la centrale de production.

Dans un premier temps, il était prévu de réaliser des étapes de bétonnage comprises entre 60 et 80 m³ tous les deux jours. En chiffres, produire 80 m³ de BFUP signifie de ravitailler, puis de stocker sur le chantier quelque 160 t de sable de quartz (grain maximal de 1 mm) et de Premix (mélange de poudres, y compris le ciment) à quoi il faut ajouter près de 22 t de fibres d'acier (longueur : 14 mm, diamètre 0.2 mm). Seul un ravitaillement en vrac des différents composants du BFUP était réaliste. Au final, la centrale de production est donc constituée de silos de stockage pour le sable de quartz et le Premix, d'un chargeur-doseur pour les fibres métalliques et de deux malaxeurs à mortier d'une capacité de 2.5 m³ chacun.

Système étanchéité-revêtement

Bien que le BFUP soit étanche à l'eau, il a été décidé de mettre en place une étanchéité en bitume polymère PBD (épaisseur 5 mm) sur toute la surface. Elle a pour but de garantir l'adhérence entre le MA-H et le BFUP. Elle assure aussi une étanchéité totale au droit des joints de travail du BFUP et évite ainsi tout apport même local

d'eau susceptible d'activer le développement de la RAG. Elle permet en outre de limiter l'épaisseur du BFUP, puisque le PBD assure la protection des armatures dont l'enrobage théorique est localement insuffisant : une surépaisseur de 1 cm de BFUP engendre un surcoût bien supérieur à la mise en œuvre d'une étanchéité. Pour lutter contre le bruit, un enrobé bitumineux SDA 8 classe A d'une épaisseur de 30 mm sert de couche de roulement.

Efficacité d'une nouvelle technologie

Grâce à une préparation détaillée, le renforcement de la dalle de roulement des viaducs de Chillon au moyen du BFUP armé a été réalisé avec succès dans le court délai imparti et sans difficulté notable. Cette intervention a fait l'objet d'un grand engagement de la part de tous les intervenants et d'un véritable plaisir sur le plan professionnel, rendu possible par l'excellente collaboration qui a régné tout au long de l'étude et du chantier.

Le coût des travaux BFUP se monte à 230 francs/m² de surface de roulement, ce qui est économique au regard des exigences. L'appel à cette nouvelle technologie a écarté des options beaucoup plus onéreuses et disproportionnées, allant d'une remise en état très lourde à un remplacement des viaducs. Par cette intervention douce au moyen du BFUP, la valeur culturelle des viaducs de Chillon pour l'ingénierie des ponts est préservée.

En plus des inspections quinquennales, l'application du BFUP sur les viaducs de Chillon fera l'objet d'un plan de

surveillance spécifique pour s'assurer du bon comportement de l'ouvrage à long terme (BFUP et RAG).

Cette première application à grande échelle valide l'utilisation du BFUP pour le renforcement d'éléments en béton armé. Cette technologie, issue de l'EPFL, suscite également un grand intérêt à l'étranger puisque des projets sont en cours, notamment en France, Allemagne, Canada, Chine et Japon, où un pont-route d'une longueur de 120 m est actuellement amélioré au moyen du BFUP.

Hartmut Mühlberg est ingénieur civil REG A et chef de projet au sein du bureau Monod Pigué & Associés IC SA à Lausanne.

Stéphane Cuennet est ingénieur civil HES et travaille à l'OFROU comme spécialiste technique Ouvrages d'art au sein de la centrale à Ittigen.

Eugen Brühwiler est dr ingénieur civil ETH. Il est professeur à l'EPFL où il dirige le Laboratoire de maintenance, construction et sécurité des ouvrages existants (MCS-EPFL), expert pour le projet de renforcement en BFUP.

Bernard Houriet est dr ingénieur civil EPF, chef de projets et directeur du bureau GVH à Tramelan, expert du MO pour le comportement structural et l'exécution des interventions.

Frédéric Boudry est ingénieur civil ETS et travaille comme chef de chantier au sein de l'entreprise de construction WALO SA à Eclépens.

Blaise Fleury est ingénieur civil EPFL au sein du bureau OPAN concept à Neuchâtel, expert du MO pour la réalisation du BFUP.

Votre expert en génie civil et en travaux publics spécialisés.

Excavations, Pieux, Ancrages,
Constructions hydrauliques.

jms-risi.ch



JMS RISI AG

Rapperswil-Jona: +41 55 286 14 55, Baar: +41 41 766 99 33, Sion: +41 27 322 63 60, info@jms-risi.ch