

JOURNÉE TECHNIQUE :

Les BFUP en réhabilitation d'ouvrages de génie civil

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des RN suisses

Ana Spasojevic – Office fédéral des routes, Suisse

PIARC France
ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE
COMITÉ FRANÇAIS

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral des routes OFROU

IMGC

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Contenu de la présentation

- Introduction: le BFUP à l'OFROU – pourquoi et comment ?
- Evolution de l'application du BFUP à travers d'exemples : exécution et essais
- Projets de remplacements des passages supérieures par des ouvrages en BFUP

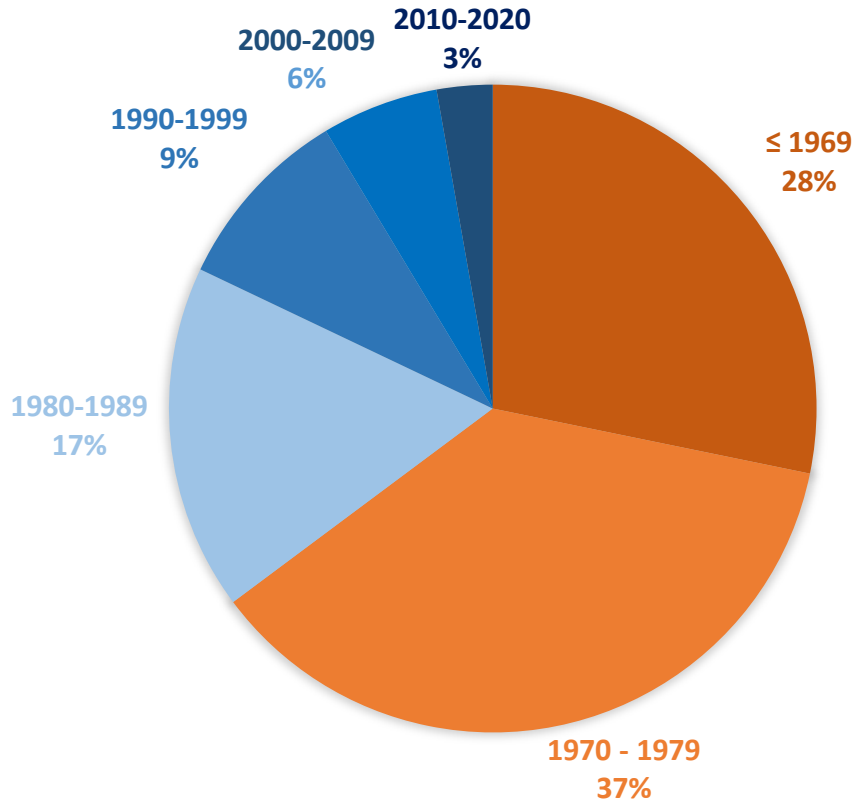
Introduction: quelques chiffres concernant les RN suisses

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Ponts des RN suisses

- **Environ 4'350 ouvrages d'art (ponts, PS, PI, passages à faune) pour 2254,5 km de routes**
- **91 % construits avant les années 2000**

RÉPARTITION DE TOUS LES PONTS PAR DÉCENNIE

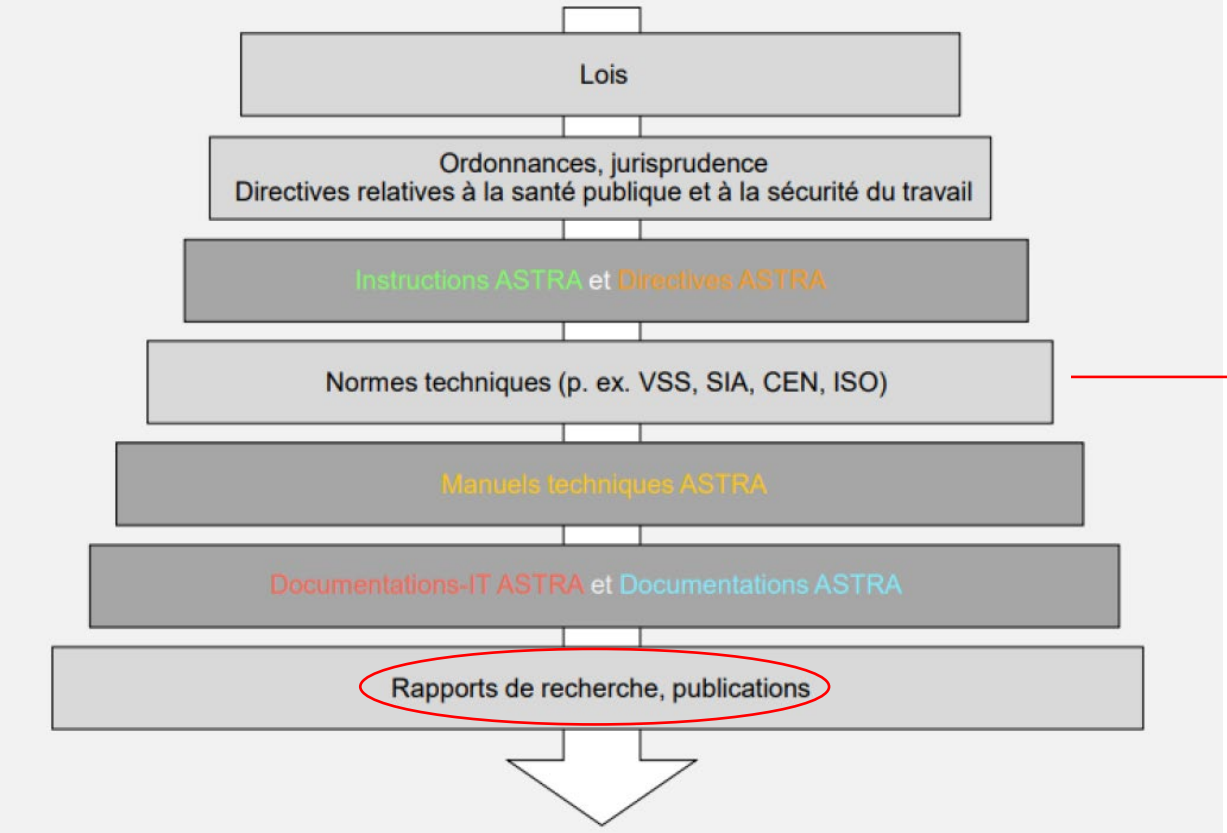


Extrait de la base de donnée KUBA (Etat 2022)

Introduction: Développements théoriques et pratiques du BFUP en suisse

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Standards suisses et le BFUP



sia

SIA 2052:2016 Construction

SNR Schweizer Regel Règle Suisse Regola Svizzera 592052

Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung

Calcestruzzo fibrorinforzato ad altissime prestazioni (CFAP) – Materiali, dimensionamento ed esecuzione

Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) – Materials, design and execution

Béton fibré ultra-performant (BFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution

2052

C Merci de prendre connaissance du correctif dans l' annexe.

Introduction: Développements théoriques et pratiques du BFUP en suisse

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Rapports de recherche

AGB 631 (2008)

AGB 644 (2010)

AGB 675 (2016)

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances aux ponts

Anwendungen von Ultra-Hochleistung Faserbeton im Brückenbau

Structural applications of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete to bridges

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire de Construction en Béton (IS-BETON)
Dr A. Spasojevic
Dr O. Burdet
Prof. Dr A. Muttoni

Projet de recherche AGB 2000/555 sur demande du Groupe de travail Recherche en matière de ponts (AGB)

Décembre 2008 631

Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton

Béton fibré ultra-performant pour augmenter l'efficacité de la maintenance des ouvrages d'art en béton armé

Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete for increasing efficiency of the maintenance of reinforced concrete road structures

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages (MCS)
E. Brühwiler, Prof. Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH/SIA
E. Denarié, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. EPFL/SIA
C. Oesterlee, dipl. Bauing. TU

Forschungsauftrag AGB 2005/004 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

Januar 2010 644

Fatigue of bridge deck slabs in reinforced concrete strengthened with UHPFRC

Ermüdung von Fahrbahnplatten aus Stahlbeton verstärkt mit UHFB

Fatigue de dalles de roulement en béton armé renforcées avec du BFUP

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL
Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des Ouvrages
Prof. Dr. E. Brühwiler
Dr. T. Makita

Forschungsprojekt AGB 2008/005 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

Februar 2016 675

Introduction: Développements théoriques et pratiques du BFUP en suisse

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Impact des résultats de la recherche



Art. 03 de la SIA 260 *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses*, Art. 04 de la SIA 262 *Construction en béton*, Art. 03 du CT SIA 2052 *BFUP*, etc. permettent la dérogation suivante :

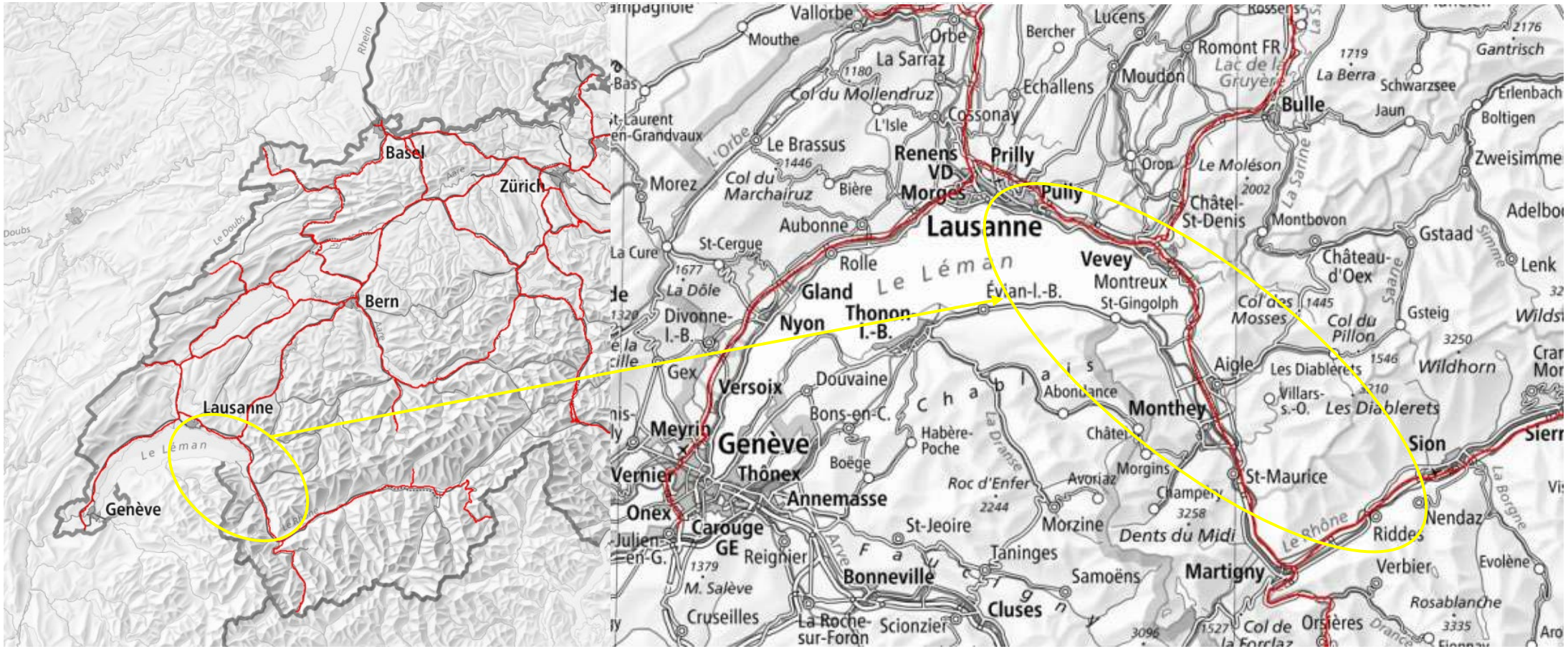
0.3 Dérogations

0.3.1 Des dérogations à la présente norme sont admissibles, si elles sont suffisamment justifiées par des théories ou par des essais, ou si de nouveaux développements ou de nouvelles connaissances dans le domaine en question permettent une telle démarche.

0.3.2 Les dérogations à la norme seront clairement mentionnées et dûment justifiées dans les documents de construction.

Introduction: Contraintes des projet de réhabilitation

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses



Introduction: Contraintes des projet de réhabilitation

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Exigences des projets, contraintes techniques et environnementales des sites: exemples d'interventions sur les ouvrages de la RN 09



Les solutions proposées doivent **répondre** aux mieux aux **conditions spécifiques** de chaque projet, en respectant la **proportionnalité** des mesures.

L'étude et l'analyse des variantes d'interventions sont un outil privilégié de l'OFROU.

Evolution d'application : réhabilitation des viaducs de Chillon

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

1ère utilisation « à grande échelle » pour l'assainissement et le renforcement



Viaducs de Chillon, RN 09:

- 2 viaducs construits entre 1966 et 69
- Longueur 2'100 m et 2'120 m
- Trafic ~ 65'000 v/j

Intervention 2012-2015:

- Assainissement du tablier en utilisant du BFUP (~ 2'300 m^3)
- Remplacement des bordures et sdr
- Sécurisation parasismique
- Sécurisation des piles et fondations

Ingénieurs civils:

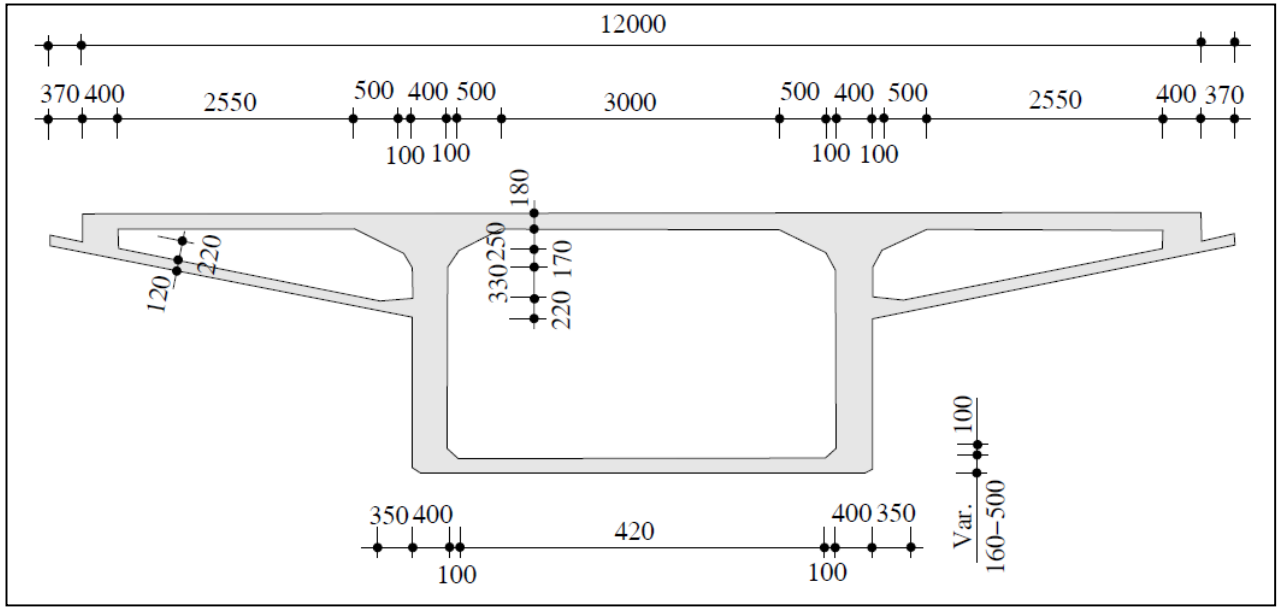
- Monod-Piguet + Associés Ingénieurs Conseils SA, Lausanne

Evolution d’application : réhabilitation des viaducs de Chillon

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Concept du tablier, problématiques spécifiques



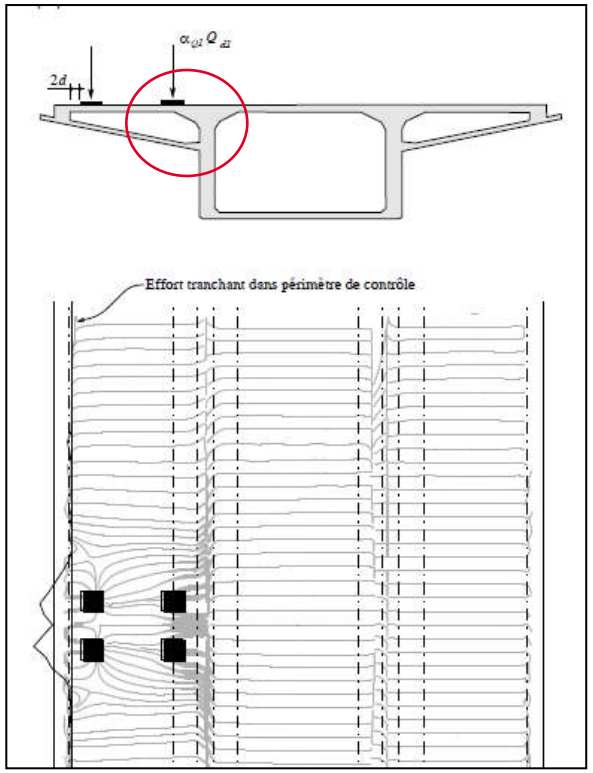


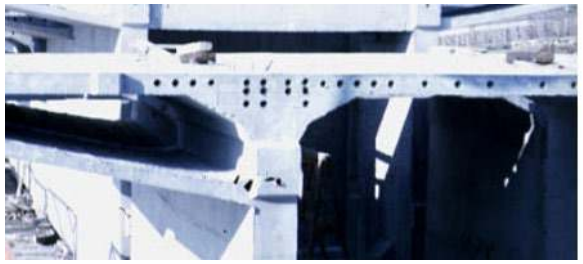
Evolution d'application : réhabilitation des viaducs de Chillon

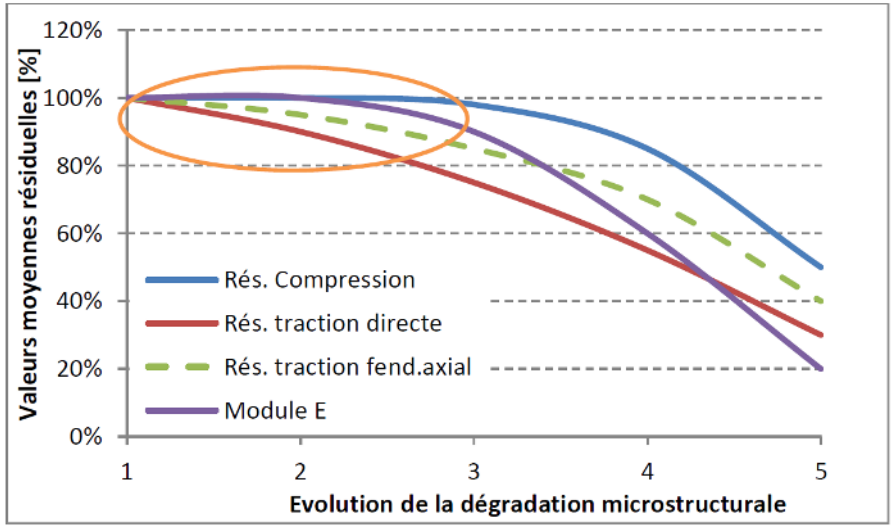
BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Pathologies particulières du béton du tablier : RAG









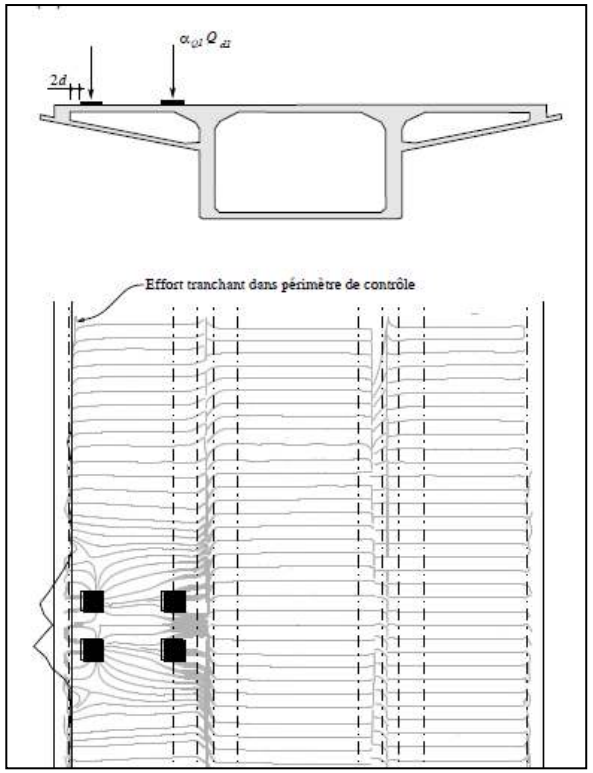
Extrais de [1] et [2]

Evolution d'application : réhabilitation des viaducs de Chillon

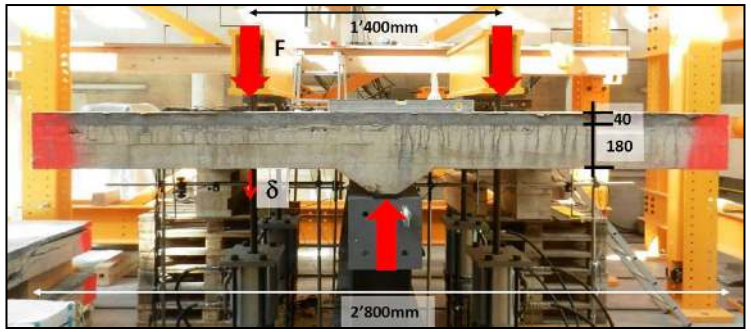
BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Intervention: protection et renforcement de la dalle

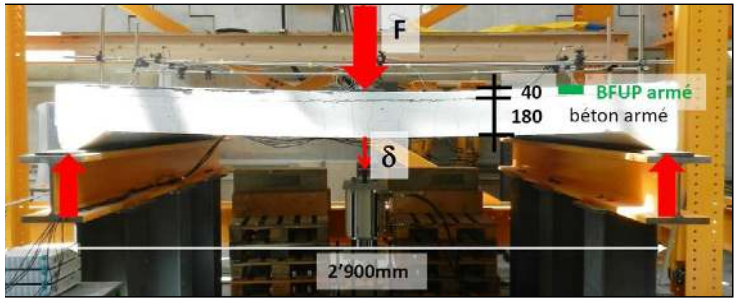
Utilisation du BFUP? Séries d'essais pour confirmer le concept d'utilisation du BFUP



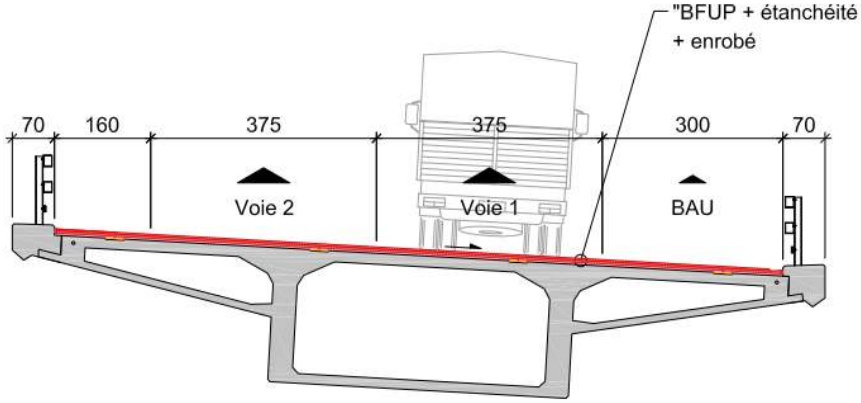
Extrais de [1] , [2] et [3]



Dispositif de la série des tests A



Dispositif de la série des tests B



Bétonnage d'une couche en BFUP armé :

- Arm. transversale, ép. BFUP 40mm
- Arm. transversale et longitudinale pour les zone sur les piles, ép. BFUP 50 mm

Evolution d'application : réhabilitation des viaducs de Chillon

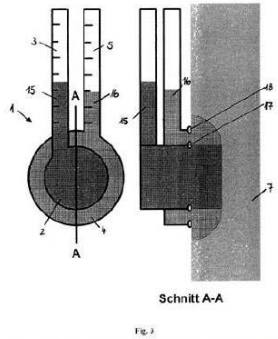
BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Intervention: protection et renforcement de la dalle

Utilisation du BFUP comme étanchéité ? Séries d'essais sur l'étanchéité des joints de travail

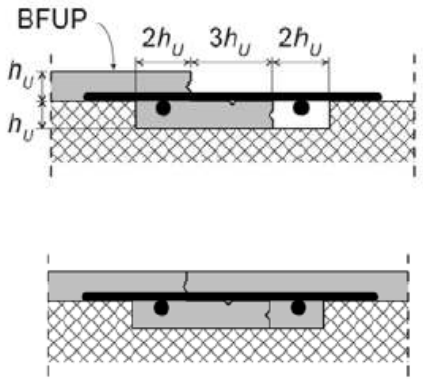


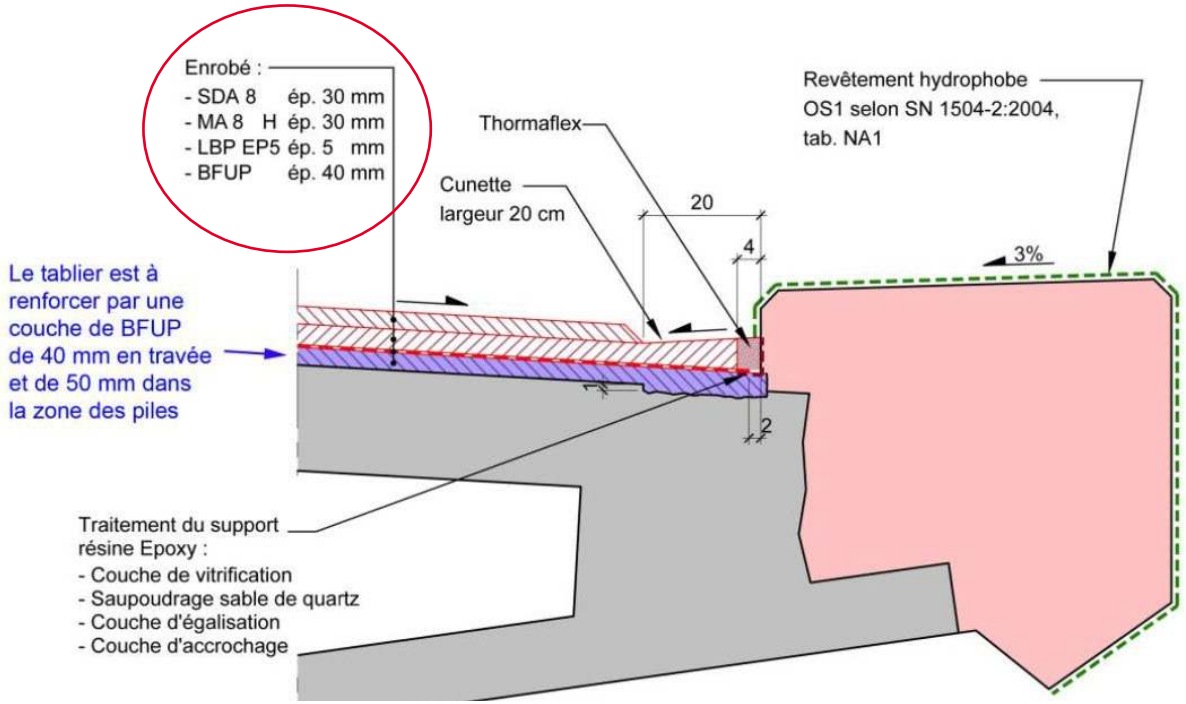
Tube Karstens aveca une chambre
Sources : www.tqc.eu



Cellule Karstens avec chambre double (surfaces verticales)
www.data.epo.org







Evolution d’application : réhabilitation des viaducs de Chillon

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Une machine inédite



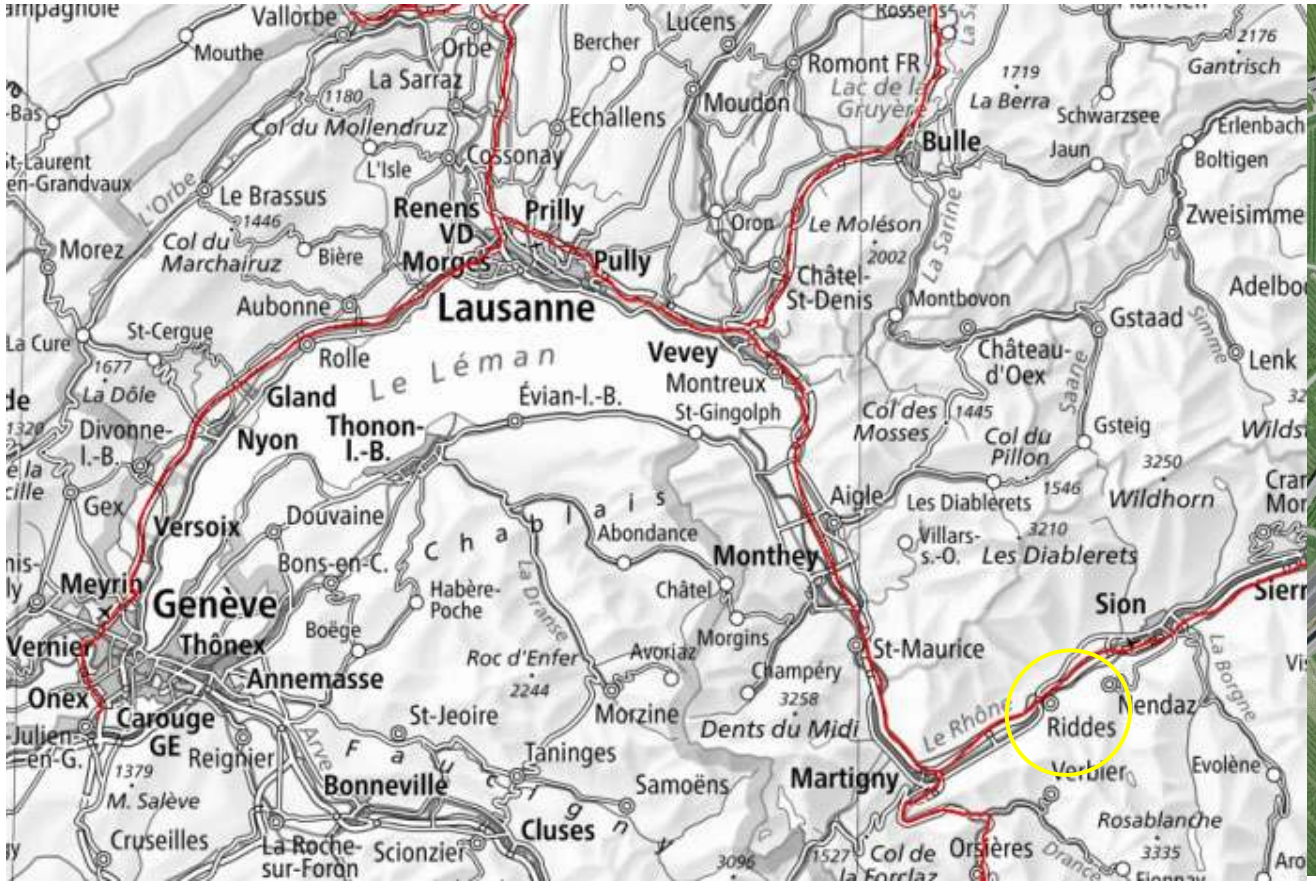


Photos: Opan concept, Monod Piguet

Evolution d'application : réhabilitation des viaducs de Riddes

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

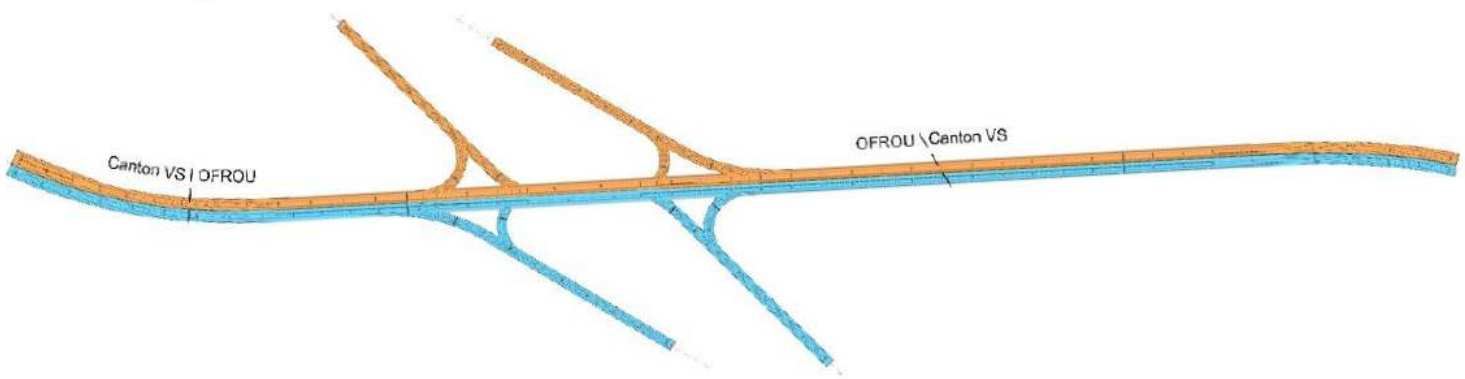
Situation



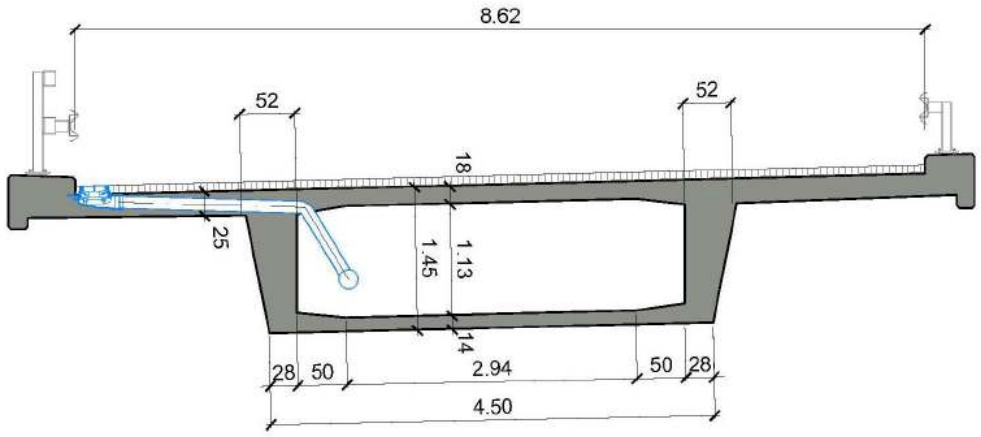


Evolution d'application : réhabilitation des viaducs de Riddes

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses



Géométrie des caissons du viaduc principal



Viaducs de Riddes, RN 09:

- 2 viaducs mis en service en 1976
- Longueur 2 x 1'250 m

+ 4 x 200 m de bretelles

Intervention 2021-2022:

- Renforcement et étanchéité du tablier en utilisant du BFUP (~ 1'100 m^3)
- Renforcement par précontrainte extérieure uniquement sur 3 travées

Ingénieurs civils:

- INGPHI SA, Lausanne

Evolution d’application : réhabilitation des viaducs de Riddes

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Pathologies du béton, qualité d’injection de la précontrainte:



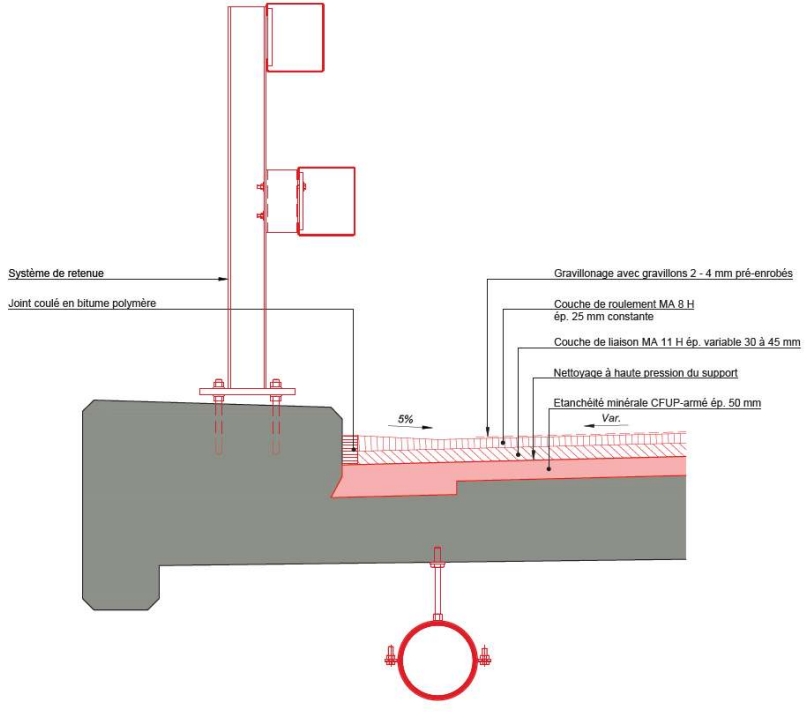


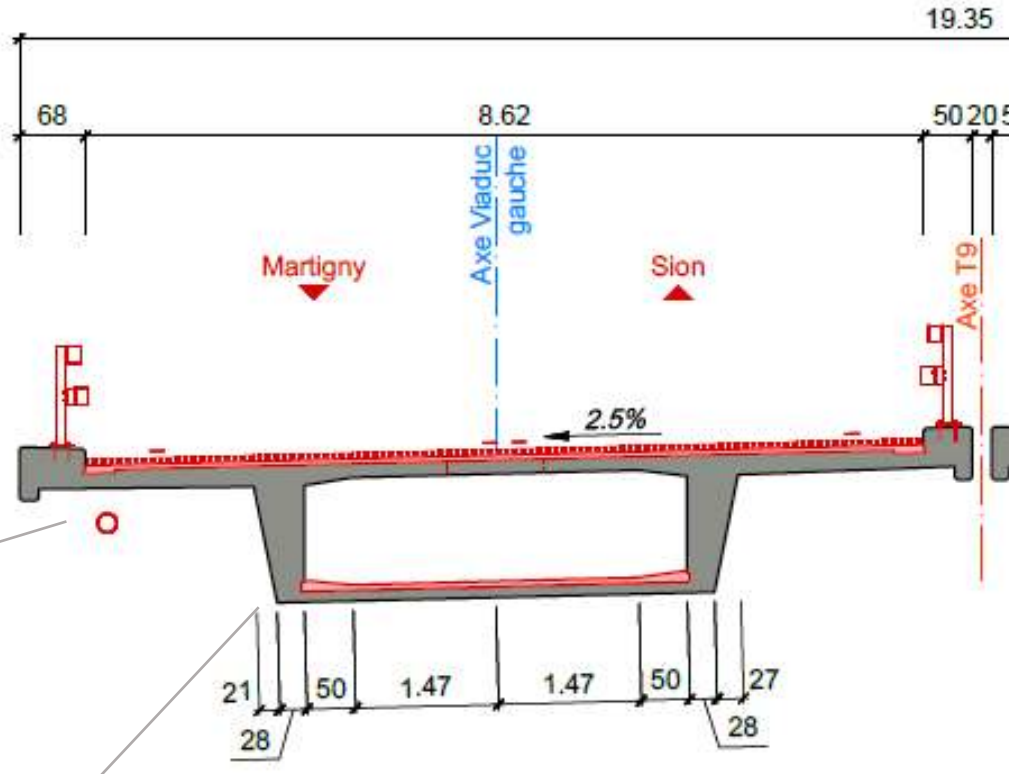

État de la dalle de roulement, des âmes et de la dalle inférieure, photos: INGPHI

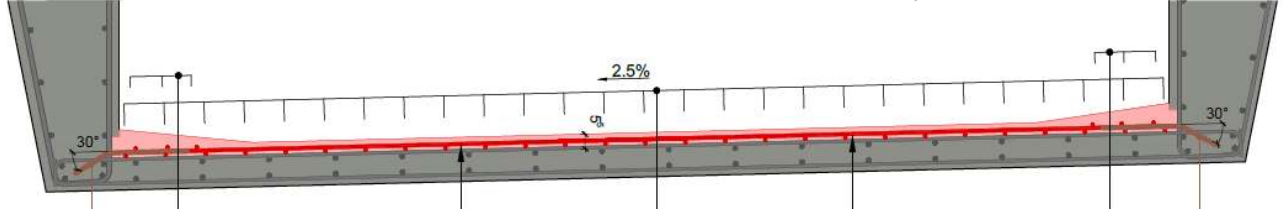
Evolution d'application : réhabilitation des viaducs de Riddes

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Intervention : renforcement et étanchéité en BFUP







Evolution d'application : réhabilitation des viaducs de Riddes

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Nouvelle question:

Pose de l'asphalte coulé sur la couche de BFUP - nécessité d'une couche d'accrochage?

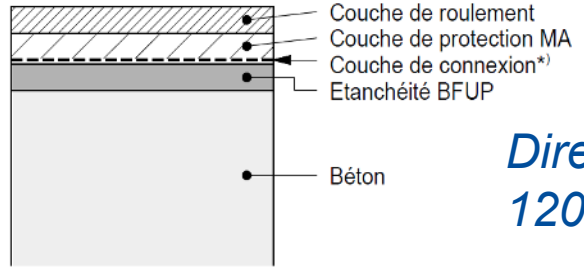


Fig. 6 : Système d'étanchéité BFUP pour projets et applications pilotes

Directive ASTRA 12004 C05







Préparation de la surface et essais d'adhérence MA - BFUP

Evolution d'application : réhabilitation des viaducs de Riddes

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Résumé

Länge der Brücke:	2 × 1.250 m + 4 × 200 m (Zubringer) = 3.300 m
Inbetriebnahme:	1976
Gesamtfläche des Bauwerks:	33.000 m^2
UHFB-Fläche:	~ 22.000 m^2
Bauzeit:	Februar 2021 bis Frühjahr 2022
Kosten:	23,5 Mio. CHF ohne MwSt.
Kostenverteilung:	65 % Schweizerische Eidgenossenschaft, 35 % Kanton Wallis

Extrait de [4]

Evolution d'application : élargissement des ponts sur la Paudèze, RN 09

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Eléments en BFUP pour renforcement en cas d'élargissement des dalles



Photo: Yves André

Ponts sur la Paudèze, RN 09:
- 2 ponts construits entre 1971 et 74
- Longueur 404 m et 422 m
- Trafic ~ 65'000 v/j

Intervention 2012-2020:
- Voir la présentation de l'ingénieur civil P. Menétrey, INGPHI SA

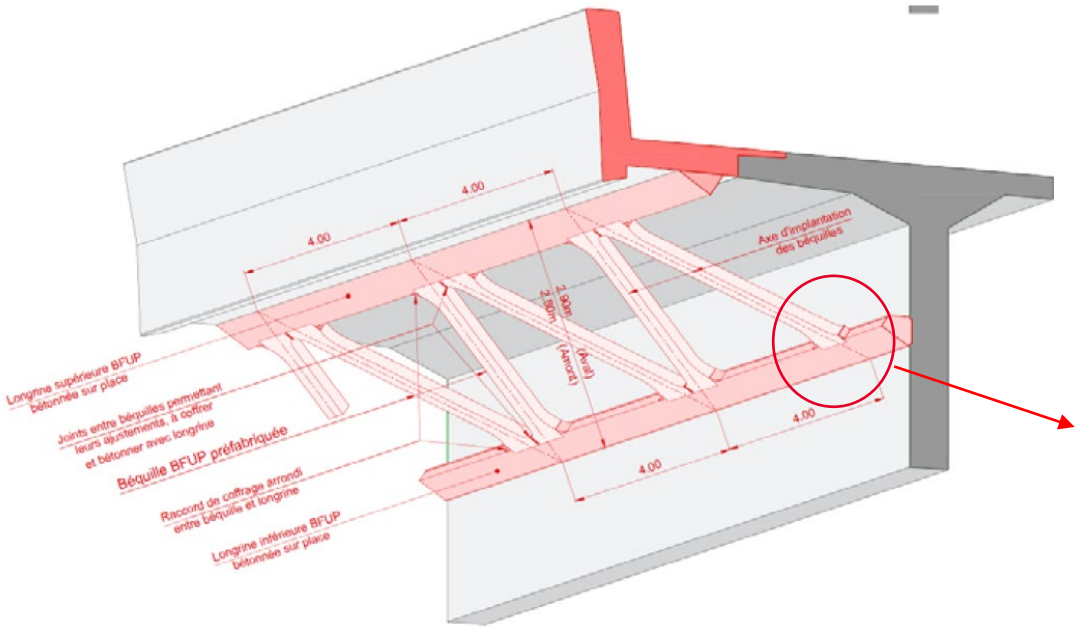
Ingénieurs civils:
- INGPHI SA, Lausanne

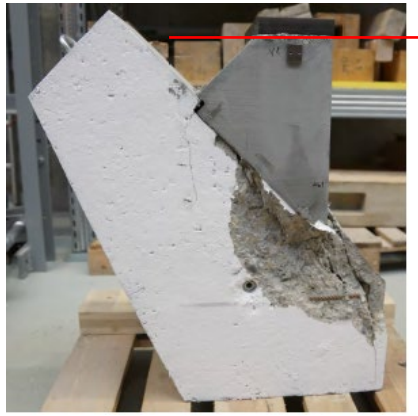
Evolution d'application : élargissement des ponts sur la Paudèze

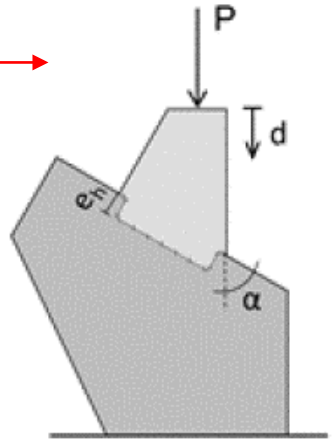
BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Béquilles en BFUP : Comportement des béquilles et des détails de connexion

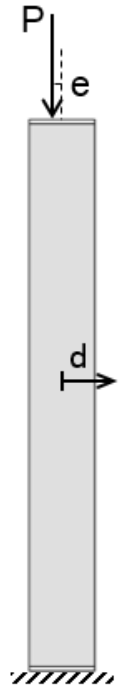
Etudes expérimentales, plusieurs séries d'essais









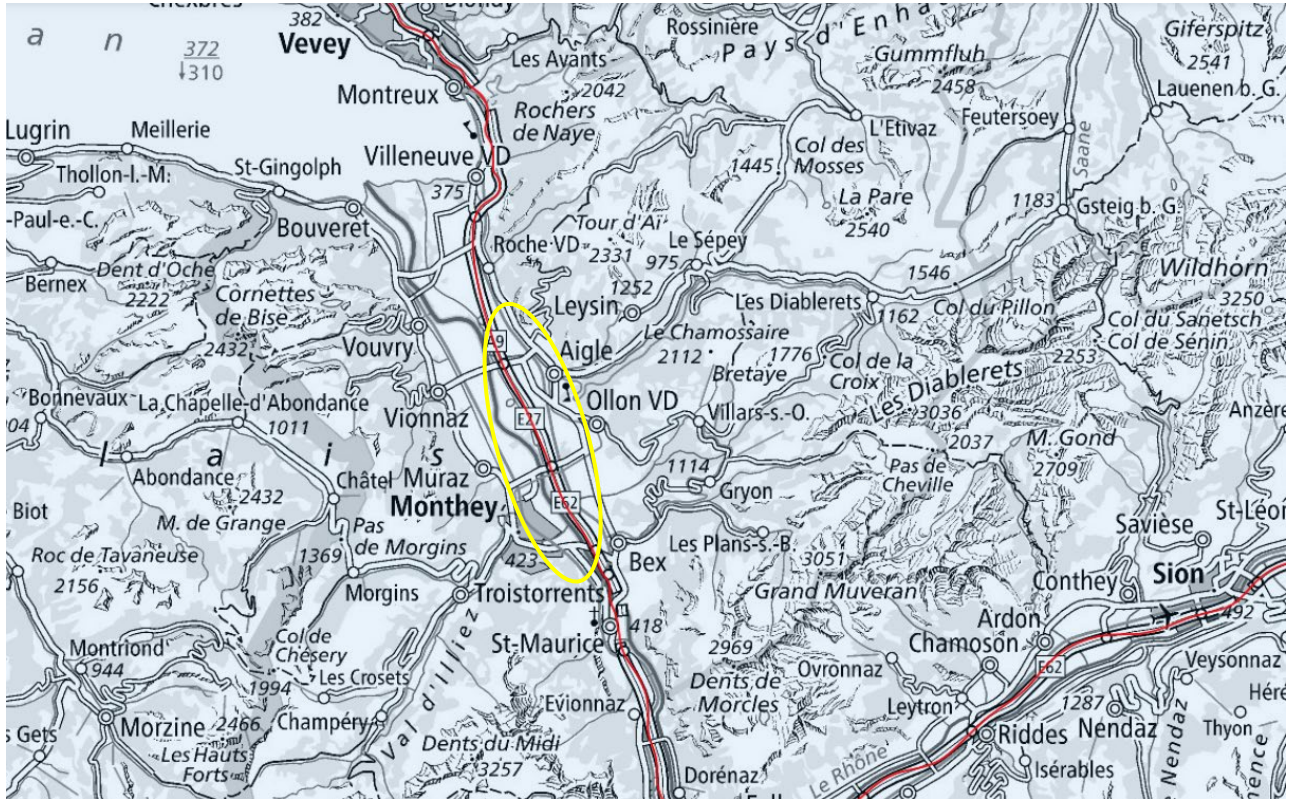


Extraits de [5] et [6]

Evolution d'application : pont jonction d'Aigle, ponts sur la Grande Eau

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Plusieurs ouvrages sur le secteur Roche – Bex, RN 09, sont en cours d'assainissement en utilisant du BFUP pour la construction des bordures ou la remise en état du béton



Ponts et PS :

- Longueur de 37 m à 64 m
- Construction entre 1972 et 1978
- Trafic ~ 50'000 v/j

Interventions 2021-2023:

- Remise en état du béton et reconstruction des bordures en BFUP
- Clavage des joints de chaussée

Ingénieurs civils:

- Sollertia, Monthey

Evolution d’application : pont de la jonction d’Aigle

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Pathologies du béton

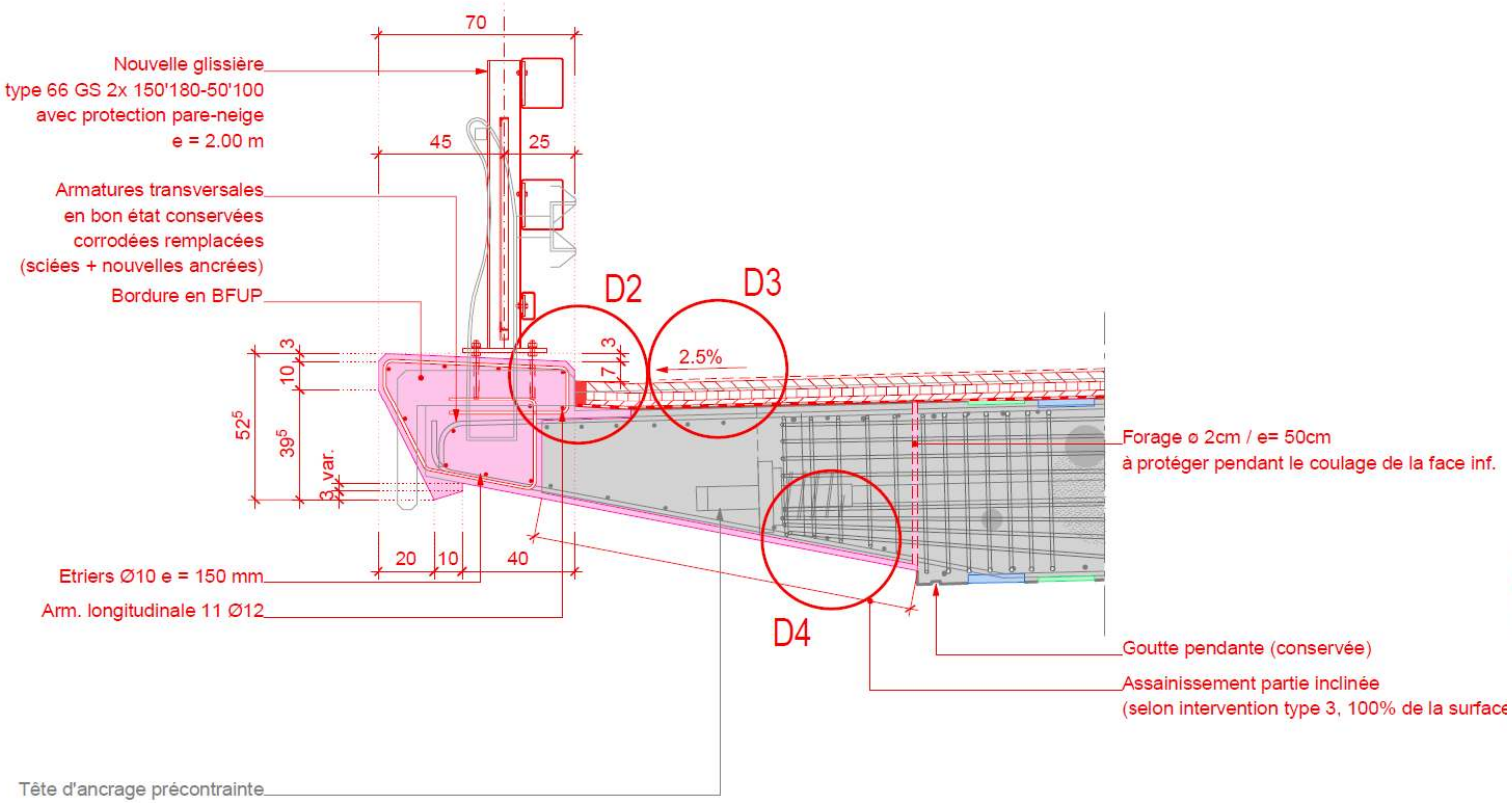


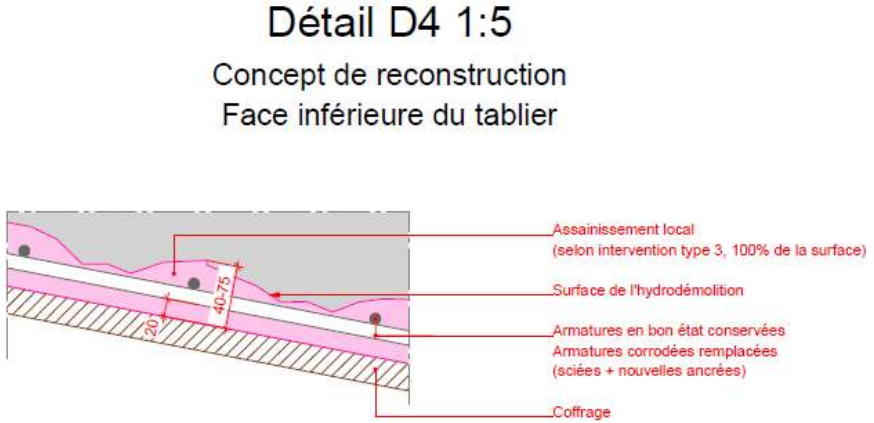


Evolution d’application : pont de la jonction d’Aigle

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Principes et particularités d’intervention





Evolution d’application : pont de la jonction d’Aigle

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Planche d’essais





Photos: Sollertia

Evolution d’application : pont de la jonction d’Aigle

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Qualité des surfaces apparentes: bordure et sous-face





Photos: Sollertia

Evolution d’application : ponts sur la Grande Eau

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Bétonnage sous trafic



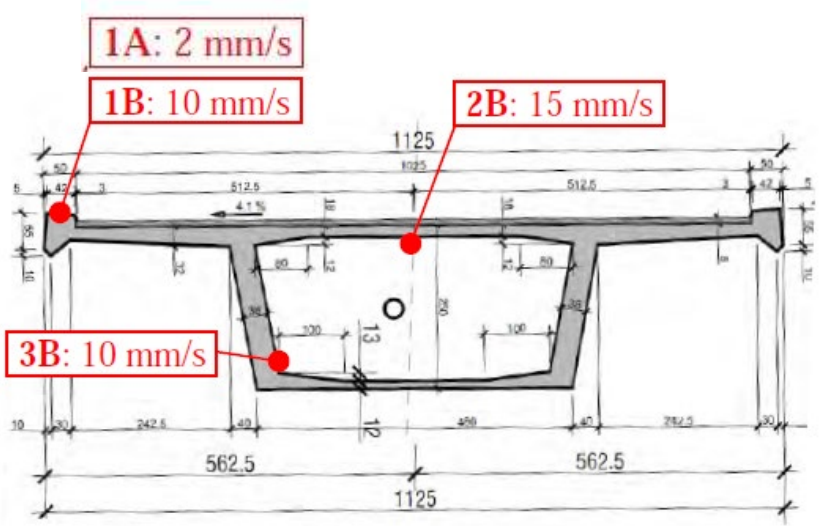
Photo: Sollertia

Evolution d'application : bétonnage sous l'influence du trafic

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

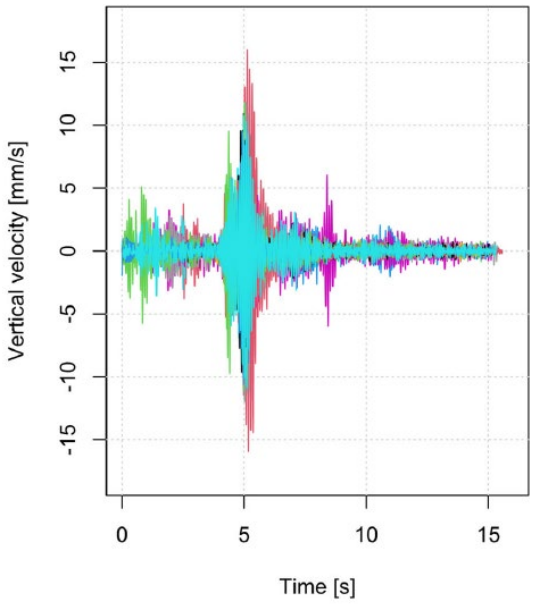
Réponses obtenu dans le cadre d'autres projets:

- Viaduc Fornaci, RN 02 : essais d'adhérence béton - BFUP soumis à des vibrations au jeune âge; confirmation de la qualité d'interface *in situ* par des méthodes non-destructives
- Pont Grenz, RN 02 : essais de tenue en pente du la surface en BFUP soumise à des vibrations au jeune âge



Viaduc Fornaci : mesures de vibration
A - travée, B - sur appuis

Extrait de [7]



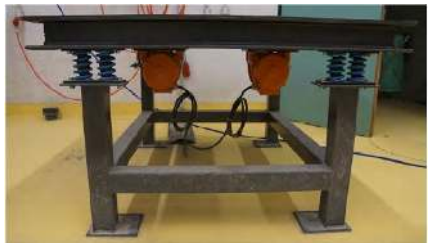
Extrait de [8]

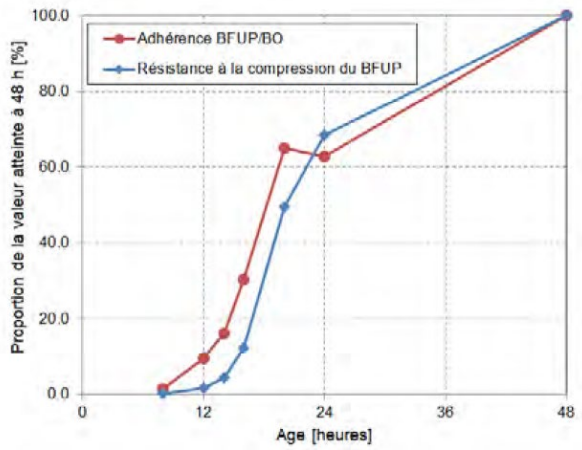
Grenzbrüke :Profils de vitesse enregistrés sur le tablier lors de chocs (13 évènements superposés)

Evolution d'application : bétonnage sous l'influence du trafic

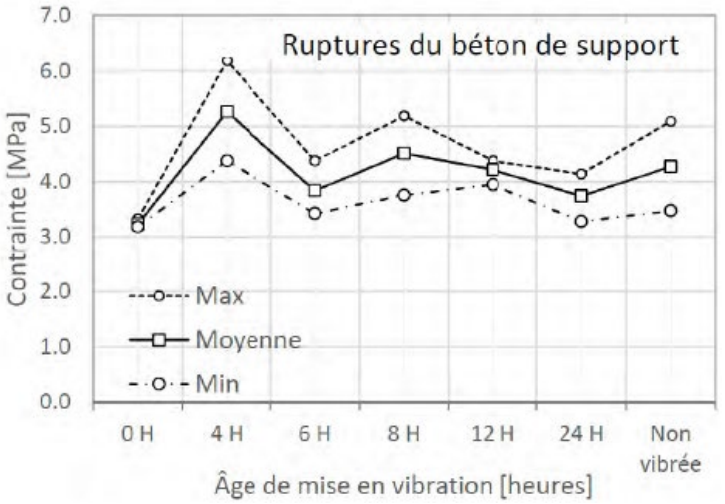
BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Essais d'adhérence béton - BFUP soumis à des vibrations au jeune âge, [7]

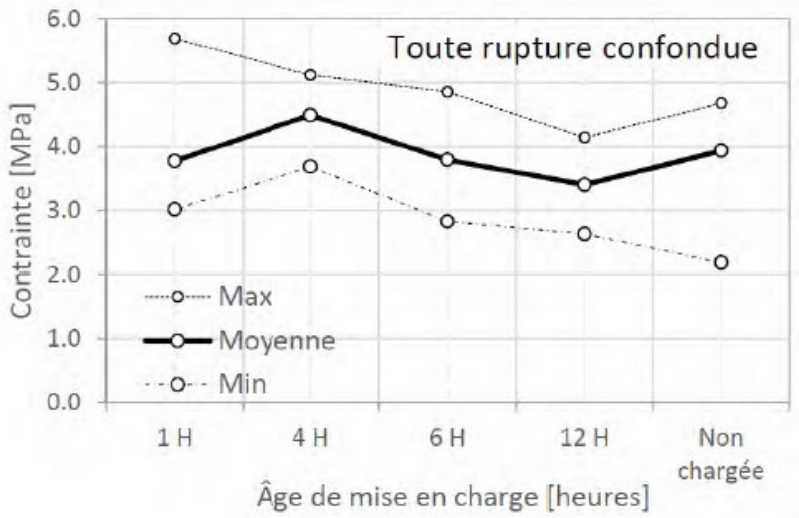




Evolution de la résistance à la compression du BFUP et de l'adhérence BFUP/BO



Echantillons soumis à des vibrations

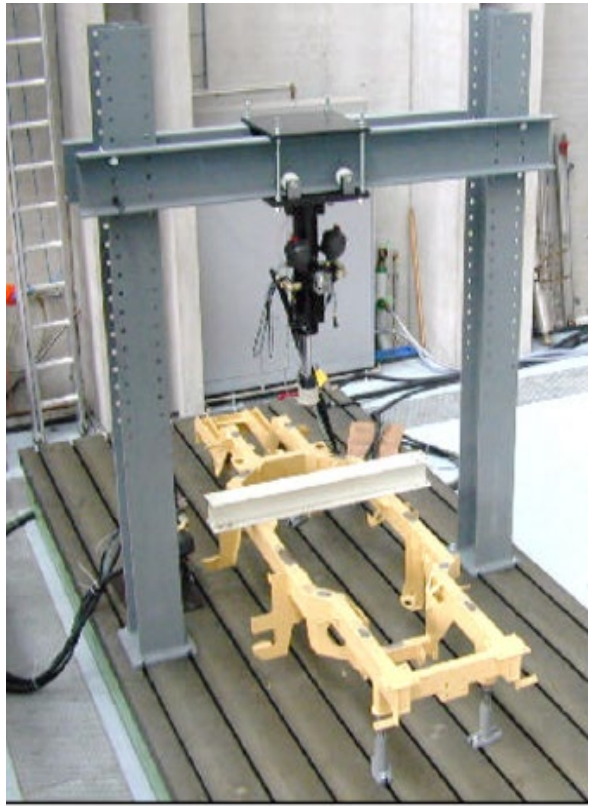


Echantillons soumis à une force cyclique

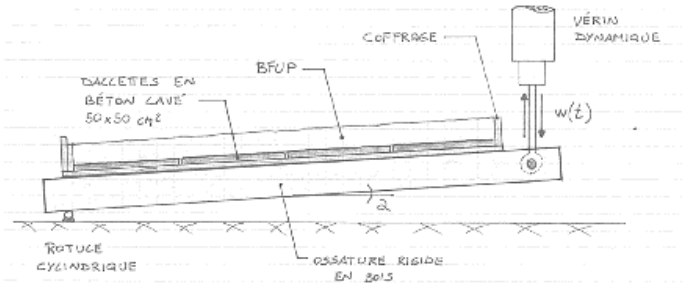
Evolution d’application : bétonnage sous l’influence du trafic

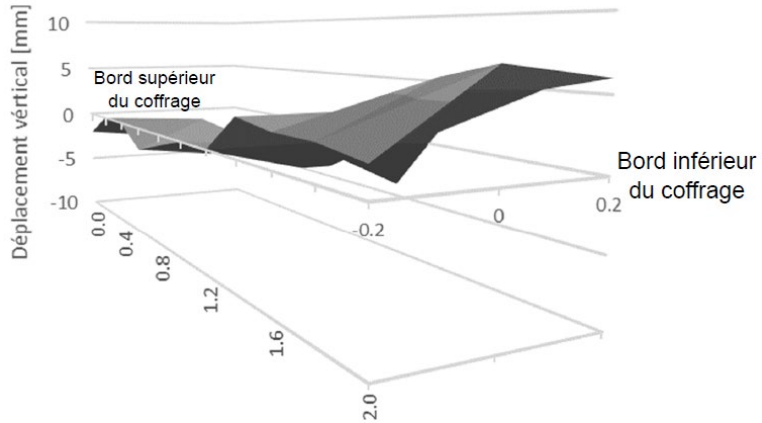
BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

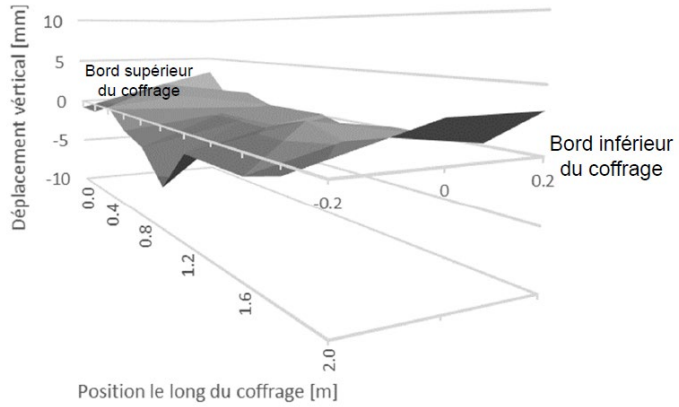
Essais de tenue en pente du BFUP soumis à des vibrations au jeune âge, [8]











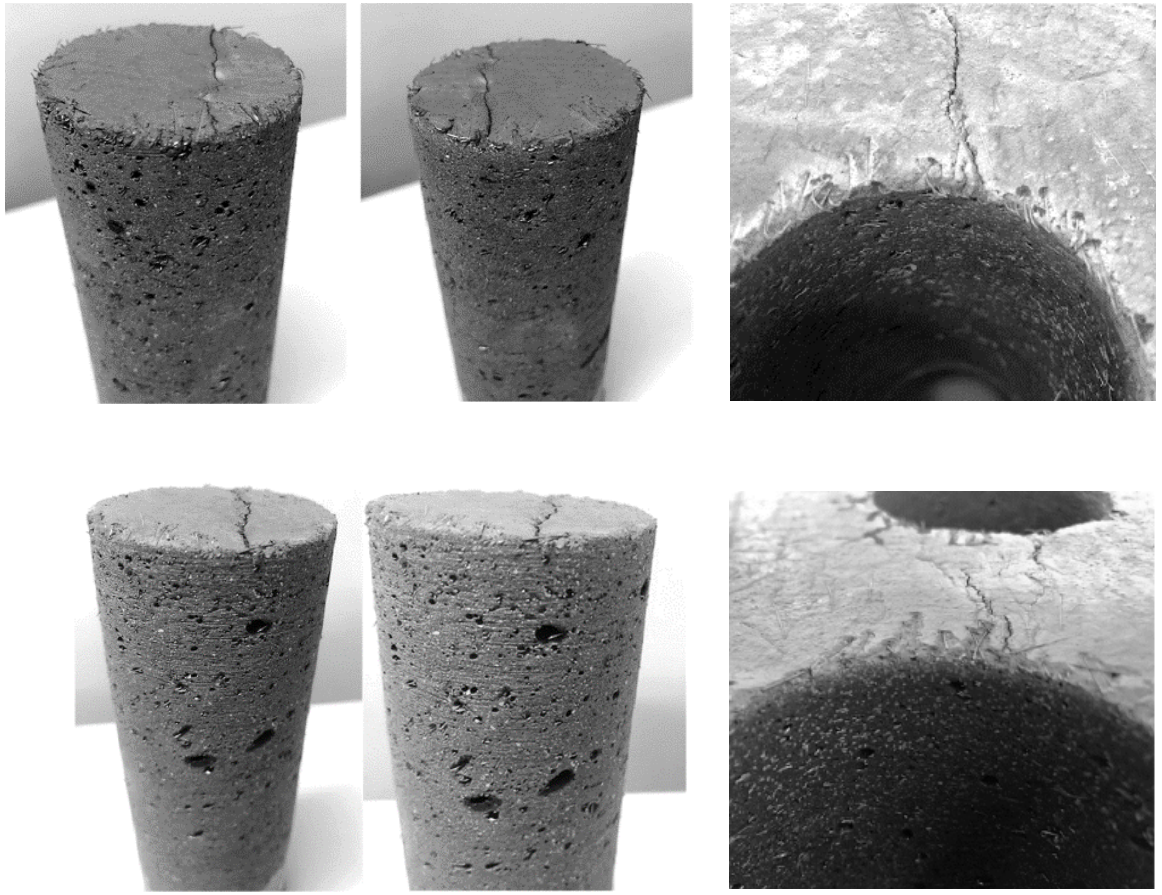
Evolution d’application : bétonnage sous l’influence du trafic

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Essais de tenue en pente du BFUP soumis à des vibrations au jeune âge:

fissuration superficielle





Photos de [8]

Evolution d’application : essais préliminaires

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Importance des essais préliminaires

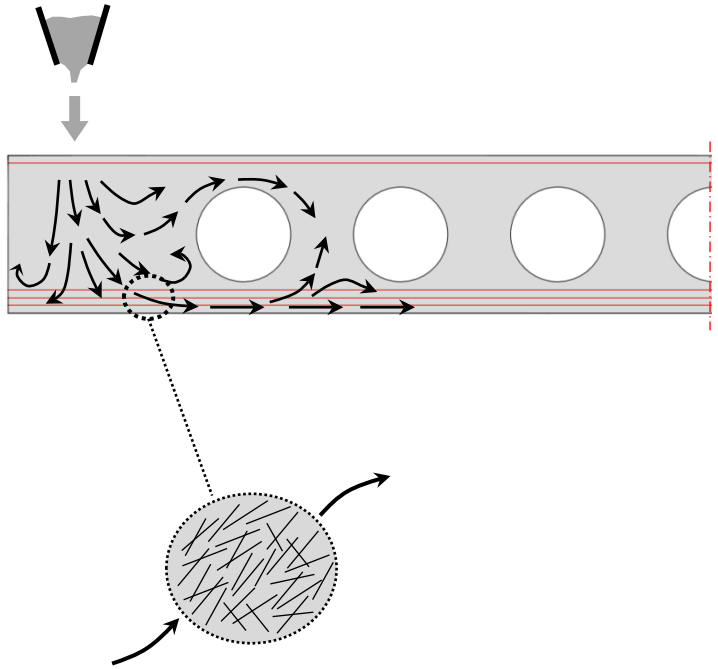


Photos: G. Garcia Mora, OFROU

Evolution d'application : essais préliminaires

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Mise en œuvre : assurer les propriétés mécaniques qui caractérisent le matériaux dans les éléments de structure



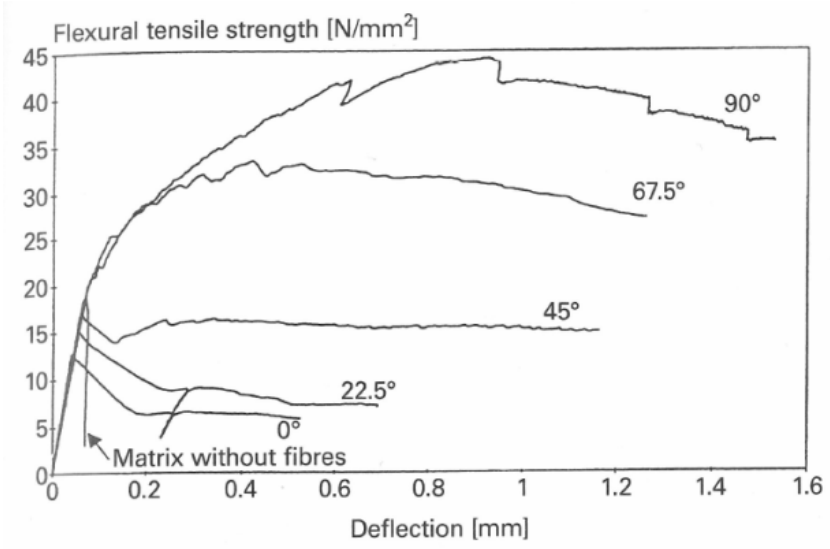
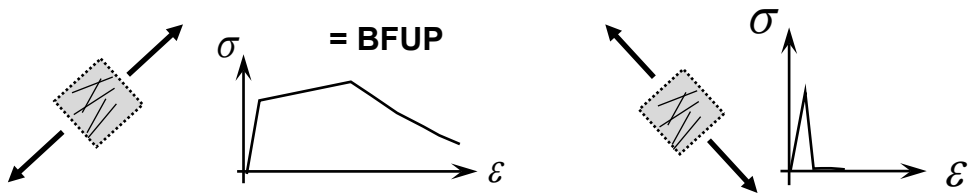


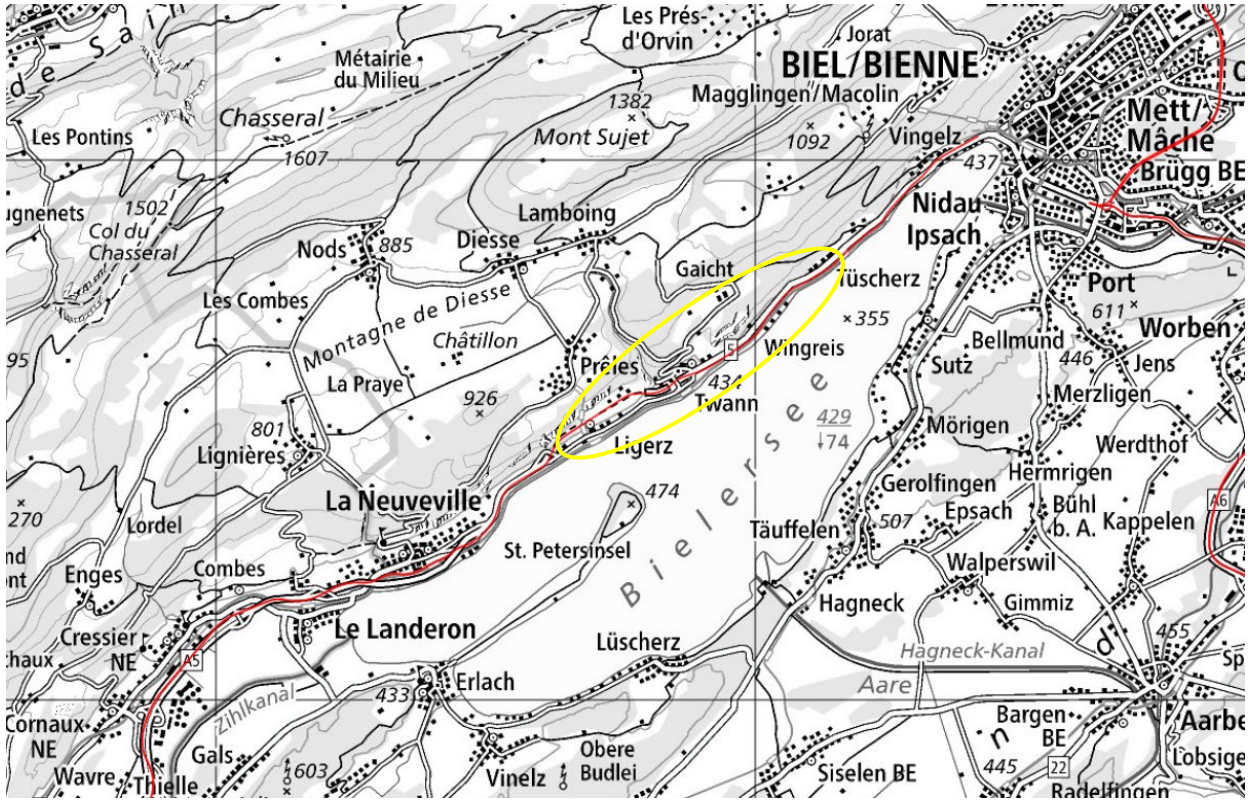
Diagramme de la Thèse de F. Baby



Evolution d'application : ouvrages sur la RN 05, La Neuveville - Bienne

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Plusieurs ouvrages sur la RN 05, secteur La Neuveville - Bienne, sont en cours d'assainissement en utilisant du BFUP pour la remise en état et le renforcement des éléments de structure



Ponts, estacades, PI :

- Longueur de 15 m à 370 m
- Construction entre 1970 et 1974
- Trafic ~ 50'000 v/j

Interventions 2021-2024:

- Remise en état du béton et renforcements

Ingénieurs civils:

- Stucky – Gruner

Evolution d’application : ouvrages sur la RN 05, La Neuveville - Bienne

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Ouvrages sur la RN 05: conditions du site, pont NB 72



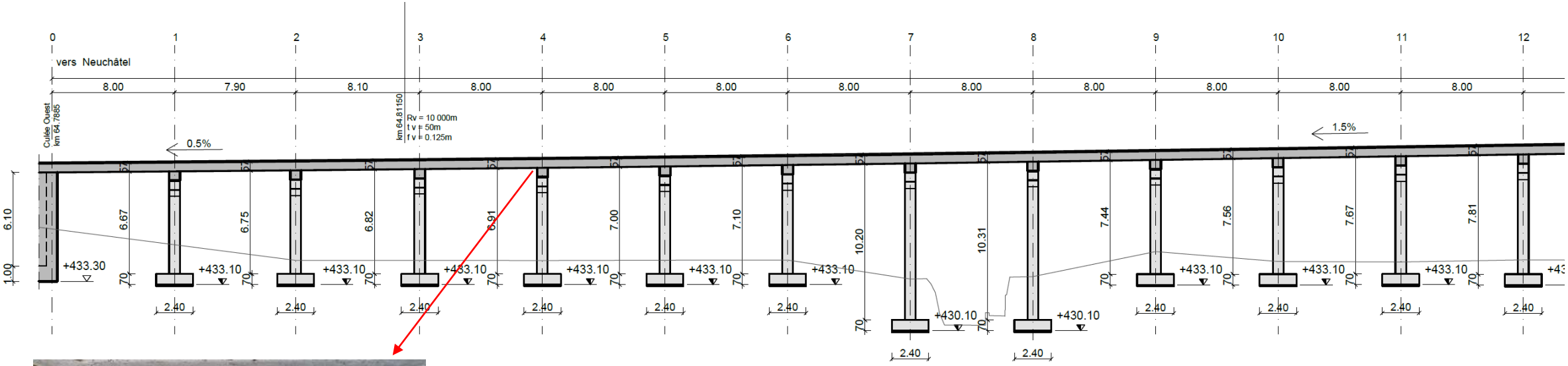


Photos: Stucky – Gruner

Evolution d’application : NB 72, RN 05

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Multitude des joints – perte d’étanchéité, exposition aux chlorures des entretoises et des piles

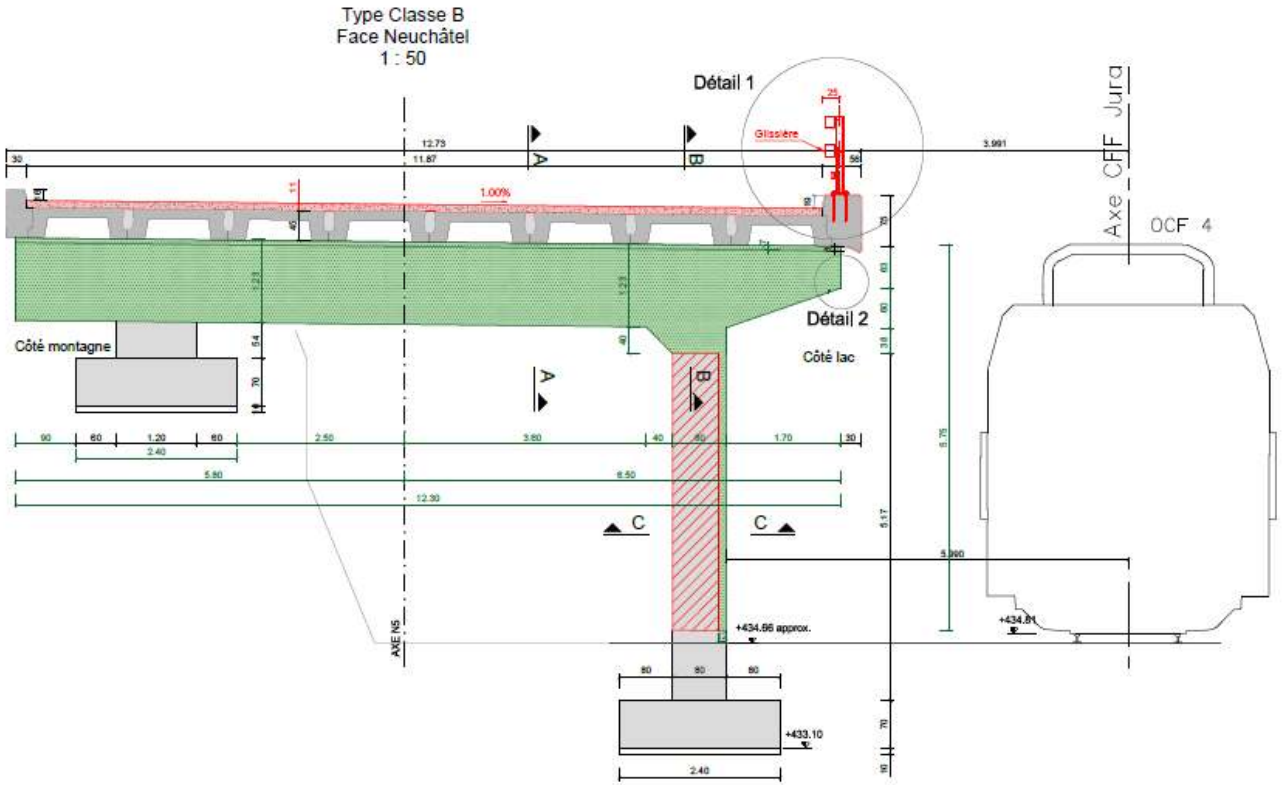




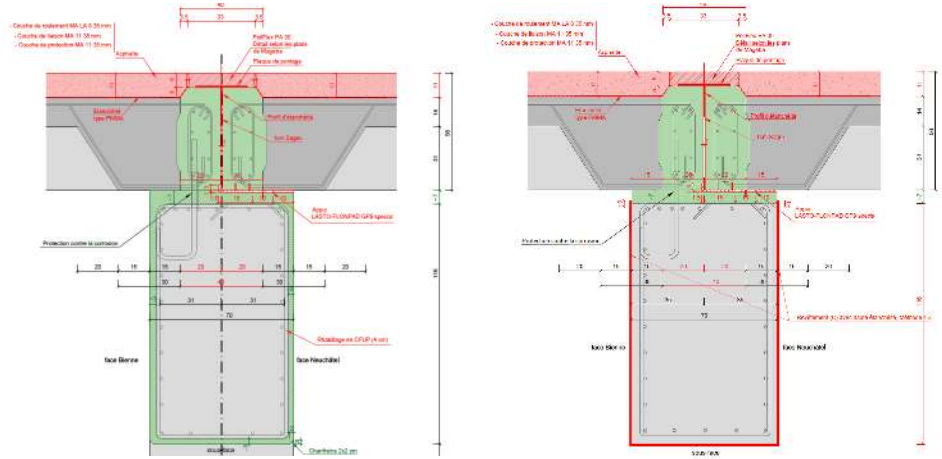
Evolution d’application : NB 72, RN 05

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Coupe transversale: principe d’assainissement en BFUP (en vert)



Détail de l’entretoise et du joint: principes d’assainissement en BFUP

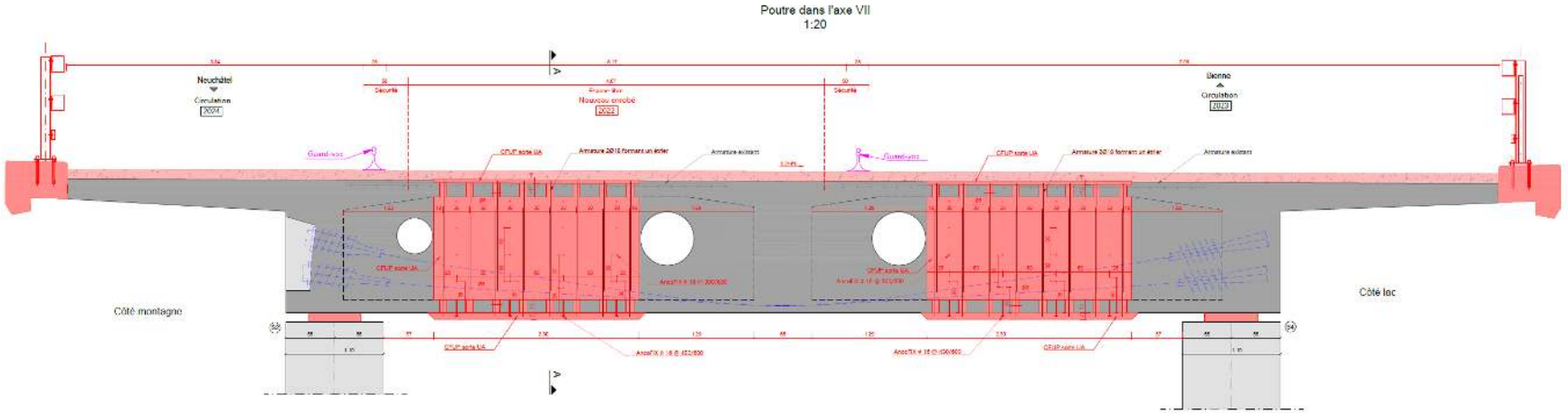


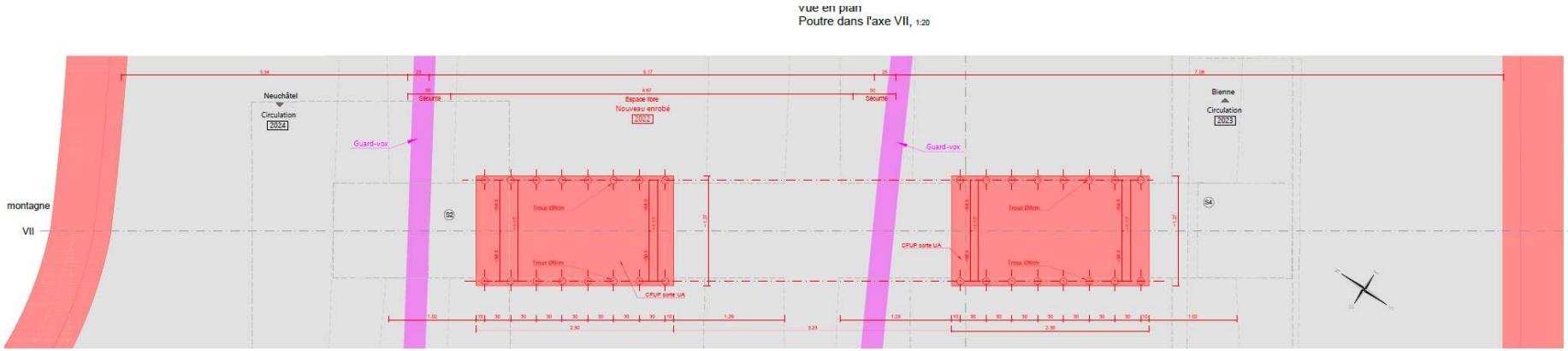


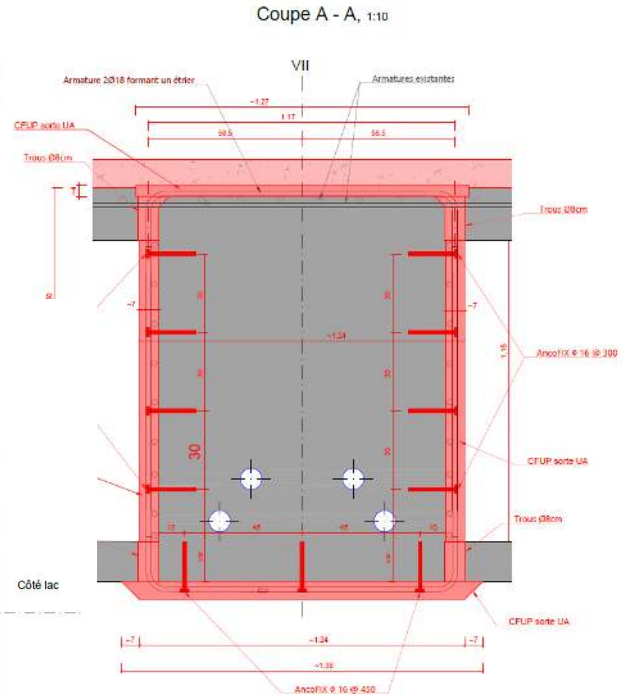
Evolution d’application : NB 73, RN 05

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Renforcement d’une entretoise à l’effort tranchant







Evolution d’application : NB 73, RN 05

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Renforcement d’une entretoise à l’effort tranchant





Photos: Stucky – Gruner

Evolution d’application : bétonnage de voûtes des tunnels?

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Utilisation du BFUP dans les tunnels?

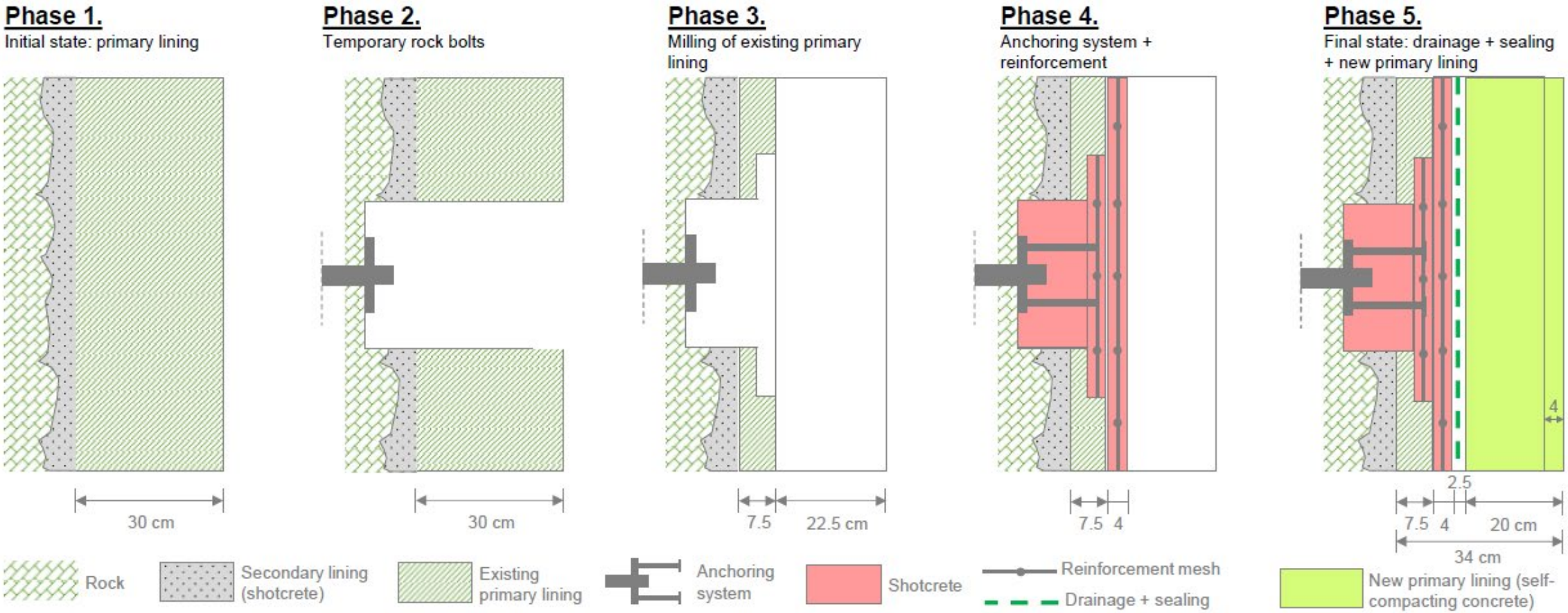


Photo: Patrice Schreyer

Evolution d'application : bétonnage de voûtes des tunnels?

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Motivation: une intervention traditionnelle, utilisant du SCC, *versus* …

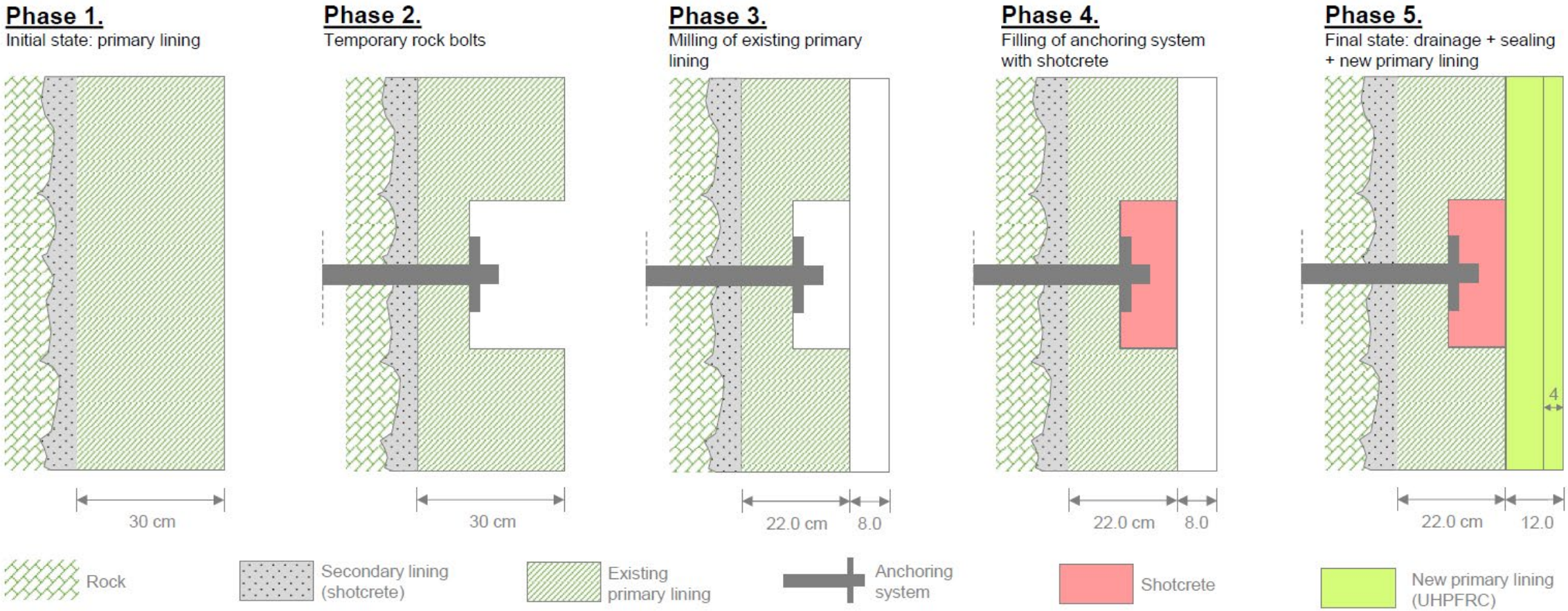


Extrait du [9]

Evolution d'application : bétonnage de voûtes des tunnels?

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

…*versus* une intervention utilisant du BFUP: avantages, difficultés, défis



Extrait du [9]

Evolution d’application : bétonnage de voûtes des tunnels?

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

Portail en BFUP du Tunnel 5, RN 16 : Essais d’utilisation du BFUP pompé dans un coffrage sous voûte existante

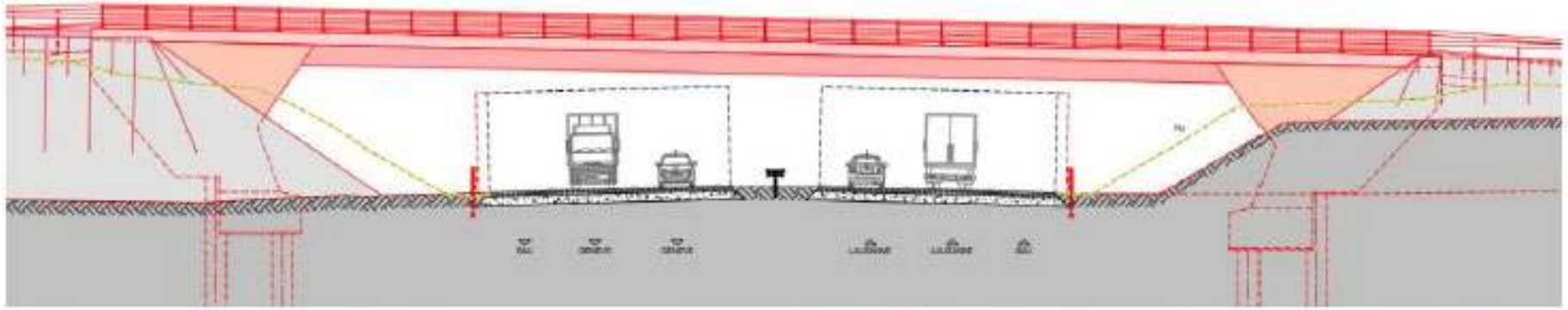


Extrait du [9]

Remplacement des passages supérieures sur la RN 01

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

PS sur la RN 01 Genève – Lausanne: projet de remplacement des PS par des ouvrages en BFUP





6 PS

- Ponts à culées intégrales
- Portées 42m à 38 m
- construction dès '23

Ingénieurs civils:

- Pour la phase concours en MEP, bureau **Sollertia**
- Pour les phases projet d'ouvrage et exécution, bureau **IUB Engineering**

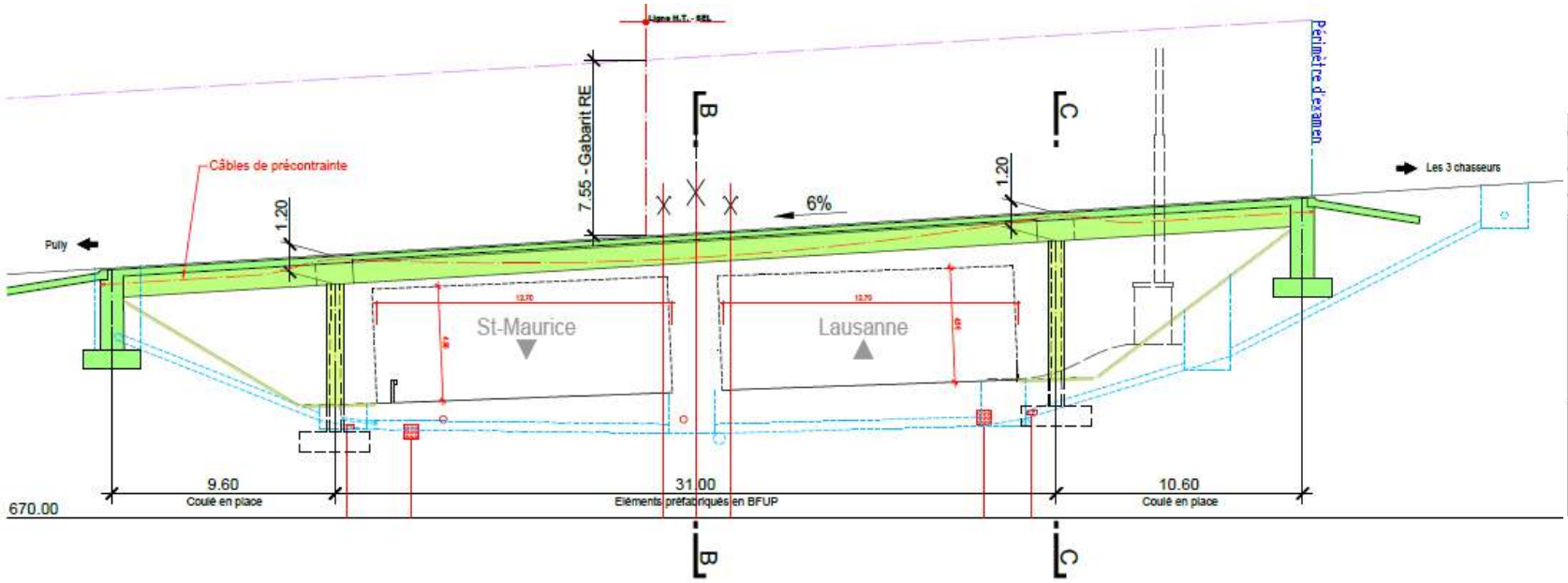
Images : IUB Engineering, selon le concept du Comamala Ismail Architectes et Sollertia Ingenerie civile (MEP)

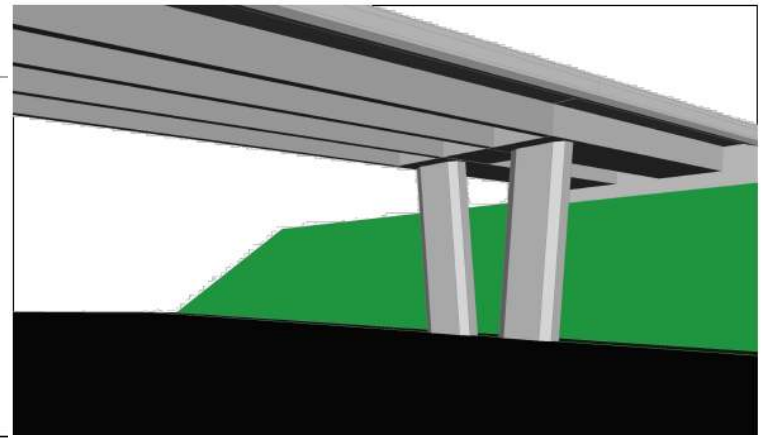
Remplacement d’un passage supérieure sur la RN 09

BFUP en réhabilitation des ouvrages d’art des routes nationales suisses

PS sur la N09: le BFUP utilisé pour les poutres de la travée centrale et la dalle;

Construction 2024; Ingénieurs civils: GVH La Chaux-de-Fonds





Plan et image: GVH ingénieurs civils

Conclusion

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

Depuis plus de dix ans, l'OFROU montre un **intérêt vif** pour l'utilisation du BFUP dans le cadre de l'assainissement, du renforcement ou des nouvelles constructions.

L'utilisation du BFUP est particulièrement avantageuse dans le domaine **des ouvrages d'art**, car elle permet de **valoriser les caractéristiques mécaniques et la durabilité** du matériau dans des conditions environnementales sévères.

L'utilisation de plus en plus répandue du BFUP ces dernières années a permis un meilleur contrôle d'exécution *in situ.*

L'expérience acquise permet aujourd'hui une meilleure **anticipation et maîtrise des projets**.

L'OFROU prévoit des **nouveaux projets** en BFUP et reste ouvert à des **nouvelles applications**, avec les suivis et la prudence nécessaires pour garantir la sécurité et pérennité de ces ouvrages.

Références

BFUP en réhabilitation des ouvrages d'art des routes nationales suisses

[1] *Viaducs de Chillon – Dalle de roulement: Renforcement au moyen du BFUP armé – Validation par des essais de rupture*, Rapport, E. Brühwiler, EPF Lausanne, novembre 2013

[2] *A9 - Viaducs de Chillon - Diagnostic relatif à la réaction alcali-granulats du béton (RAG),* Rapport : P.Kronenberg, J-G. Hammerschlag, Ch. Merz, B. Houriet, novembre 2013

[3] *2400 m³ de BFUP sur un pont autoroutier,* H. Mühlberg, S. Cuennet, E. Brühwiler, B. Houriet, F. Boudry, B. Fleury, Tracés 19, 2014

[4] *Instandsetzung des Riddes-Viadukts*, J-M. Waeber, S. Cuennet, 22 Symposium «Brückenbau», Leipzig 2022

[5] *Renforcement de tablier de ponts à l'aide de béquilles en BFUP*, L. Moreillon, P. Ménetrey, M. Bastien Messe, Journée d'étude BFUP- concevoir, dimensionner, construire, Fribourg, 2019

[6] *Ponts de la Paudèze,* Rapports d'essais, P. J. Camacho del Reino, D. Redaelli, heia Fribourg, 2018

[7[*Etude expérimentale de l'influence du trafic routier sur l'adhérence BFUP/béton*, D. Redaelli, B. Fleury, D. Stroligo, Journée d'étude BFUP concevoir, dimensionner, construire, Fribourg, 2019

[8] *Grenzbrücke Basel, Essais préliminaires de vibration de BFUP frais*, Rapport, D. Redaelli, J. Kuster, J.Moix, heia Fribourg, 2022

[9] *FEDRO's Tunnel Renovation Method : Renovation of a non-reinforced primary lining using night shifts while keeping all traffic lanes open during the day*, G. Balbi, WTC 2022 Copenhagen 2022