

Dalles de pont renforcées par le CFUP

Eugen Brühwiler,
Prof. Dr ing. dipl. ETH/SIA/IABSE
EPFL Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Journée JERI, 12 novembre 2019



Dalles de pont renforcées par le CFUP

- CFUP = Composite Cimentaire Fibré Ultra-Performant
- Performances du CFUP
- Amélioration de dalles de pont au moyen du CFUP armé
- CFUP et routes



BFUP / CFUP = Composite Cimentaire Fibré Ultra-Performant (CFUP)

Compacité optimisée
des particules

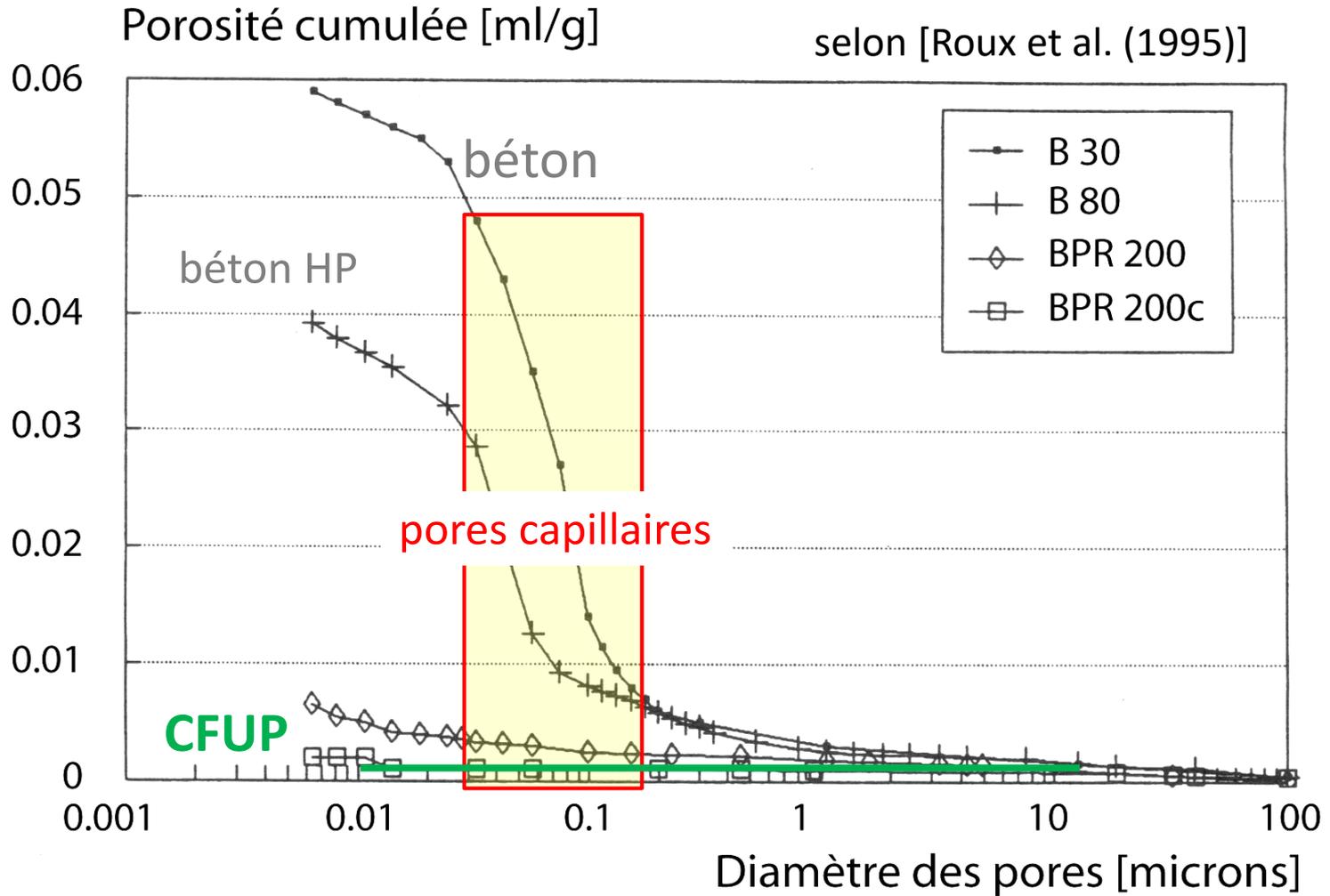
Matrice cim.:
 $C = 800 \text{ kg/m}^3$
 $E/C=0.15$
 $d_{max} < 1\text{mm}$

- eau de gâchage entièrement utilisée pour l'hydratation du ciment
- aucune évaporation d'eau après la cure (5 jours)
- pas de pores capillaires communicant
- étanche aux liquides (eau + chlorures)
- haute résistance à l'abrasion

fibres en acier
>3%-vol. fibers

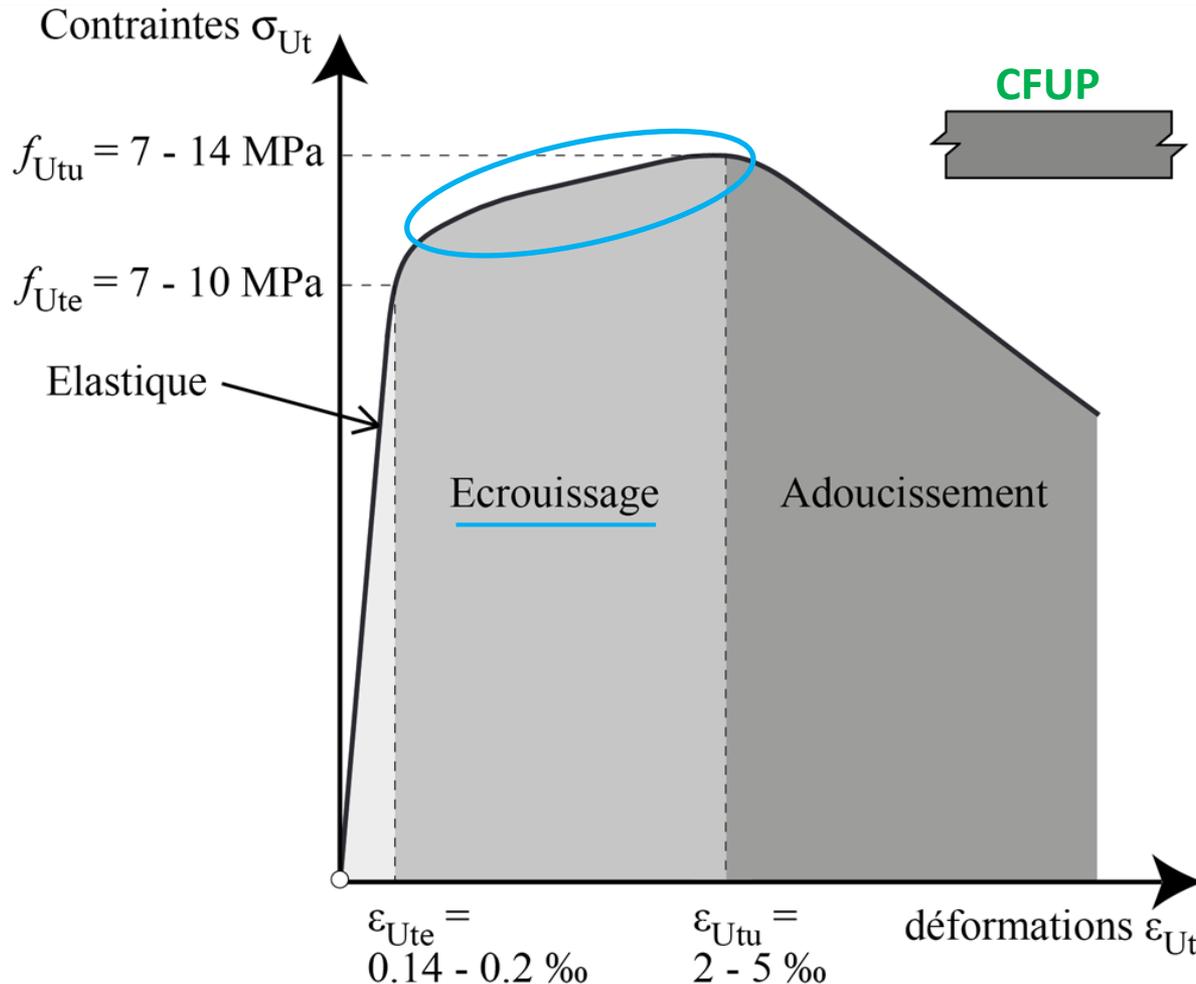
10mm

Durabilité du CFUP: Porosité



CFUP : propriétés mécaniques

comportement à la traction



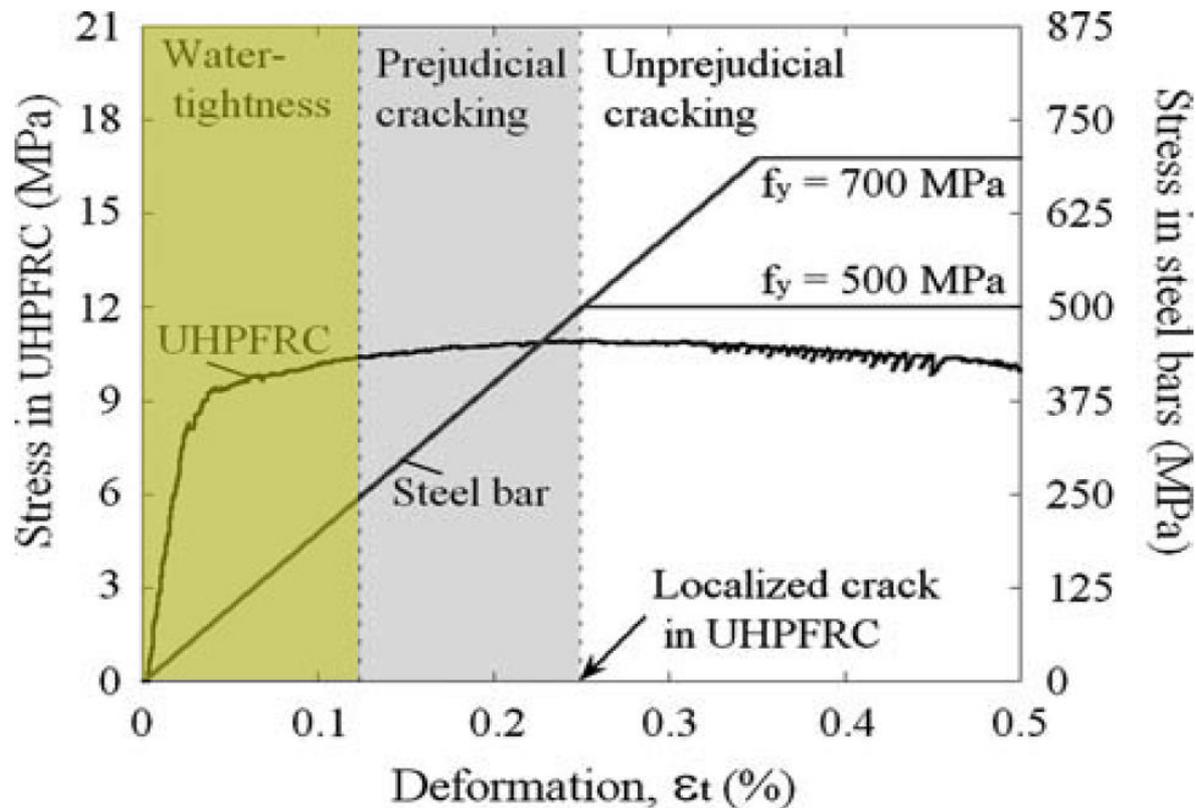
écrouissage → étanche à l'eau et sans fissure (à l'état de service)
→ **CFUP** Sorte UA / UB

Comportement à la compression:
élastique / peu de déformation
résistance 150 à 200 MPa

Module d'élasticité:
45 à 50 GPa

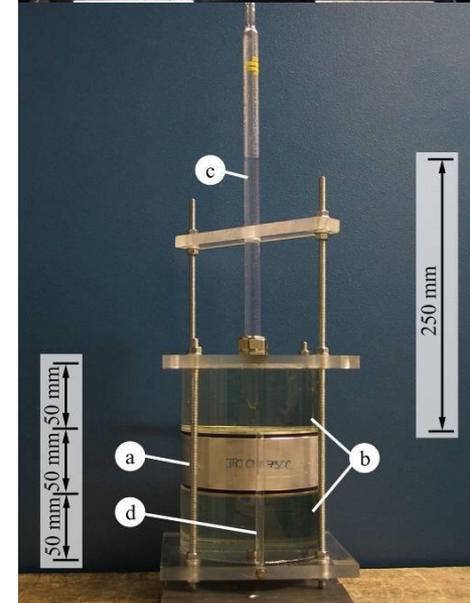
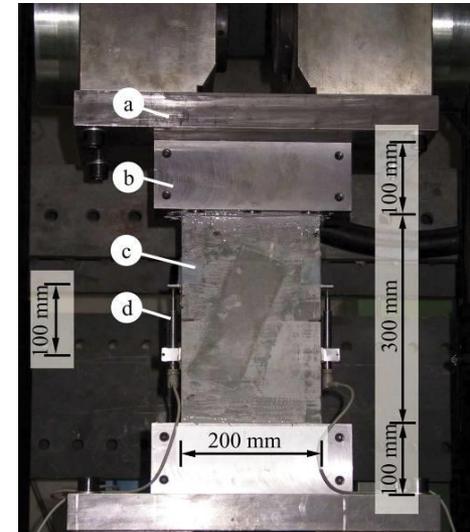
Perméabilité à l'eau du **CFUP** écouissant sous traction

[Charron, Denarié, Brühwiler, 2006] :



➔ étanche à l'eau jusqu'à une déformation de 1,3‰

➔ sans fissure jusqu'à environ 2.5‰



Règlementation :

s i a

SIA 2052:2016 Construction



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 (UHPRFC) –
Materials, design and execution

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

2052

Numéro de référence
SNR 592052:2016 fr

Valable dès: 2016-03-01

Éditeur
Société suisse des ingénieurs
et des architectes
Case postale, CH-8027 Zurich

Nombre de pages: 48

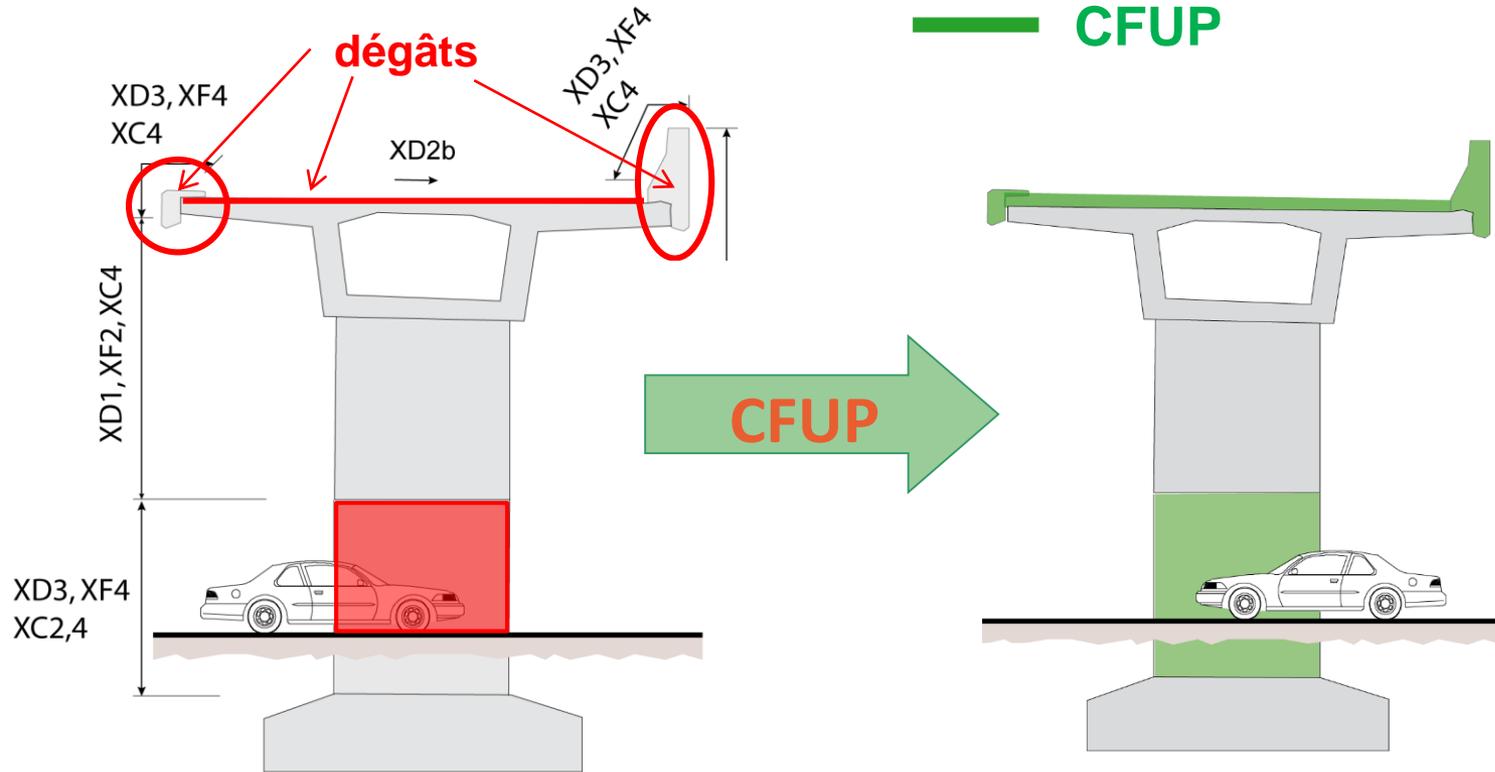
Copyright © 2016 by SIA Zurich

Groupe de prix: 30

TABLE DES MATIÈRES

	Page
AVANT-PROPOS	4
0 DOMAINE D'APPLICATION	5
0.1 Délimitation	5
0.2 Références normatives	5
0.3 Dérogations	6
1 Terminologie	7
1.1 Termes techniques	7
1.2 Notations	8
2 Principes	12
2.1 Généralités	12
2.2 Construction en BFUP	12
2.3 Construction mixte BFUP-béton	13
2.4 Analyse structurale et dimensionnement	13
2.5 Durabilité	14
2.6 Assurance de la qualité	14
3 Matériaux	15
3.1 Composition du BFUP	15
3.2 Propriétés du BFUP	15
3.3 Propriétés du BFUP armé	18
4 Analyse structurale et dimensionnement	19
4.1 Principes	19
4.2 Coefficients	19
4.3 Eléments de structure en BFUP	19
4.4 Eléments mixtes BFUP-béton	21
5 Dispositions constructives	25
5.1 Principes	25
5.2 Disposition de l'armature	25
5.3 Eléments préfabriqués en BFUP et assemblages d'éléments	25
5.4 Eléments mixtes BFUP-béton	25
6 Exécution	27
6.1 Fabrication du BFUP	27
6.2 Mise en place et cure du BFUP	27
6.3 Essais	28
6.4 Propriétés de surface du BFUP	28
6.5 Sécurité du travail	28
Annexe A Propriétés des BFUP	30
Annexe B Assurance de la qualité	31
Annexe C Essais sur BFUP	33
Annexe D Essai de comportement à la traction	37
Annexe E Essai de traction par flexion	34
Annexe F Index des termes techniques	42

Concept de renforcement (1999) : *améliorer le béton armé !*

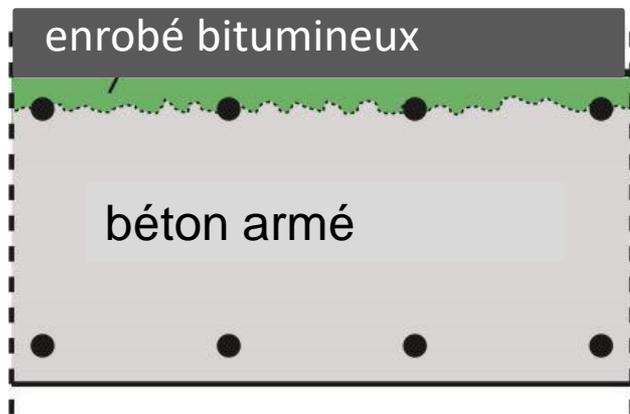


une couche de **CFUP** armé – étanche à l'eau – pour :

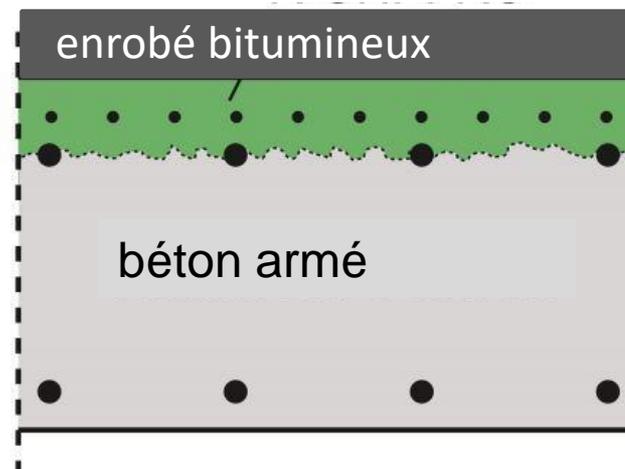
- ➔ *améliorer la durabilité*
- ➔ *augmenter la résistance (rigidité, M, V, fatigue)*
- ➔ *simplifier et accélérer l'intervention*

Concept de renforcement de la dalle de pont (1999) : *améliorer le béton armé !*

CFUP : fonction de protection
 $t_u = 20$ to 30 mm



CFUP armé : fonctions de résistance et protection ($t_u = 45$ à 90 mm) + barres d'armatures



Remplir plusieurs fonctions avec 1 couche de **CFUP**:

- 1) augmenter la résistance à la flexion et à l'effort tranchant
- 2) augmenter la rigidité pour réduire les contraintes de fatigue
- 3) servir de couche d'étanchéité robuste

→ économique: 250 à 400 CHF / m² de dalle; peu d'entretien

Amélioration de structures en béton armé au moyen du **CFUP**: *ajouter de la plus-value !*



MO: Canton du Valais

Exécution sur
chantier:

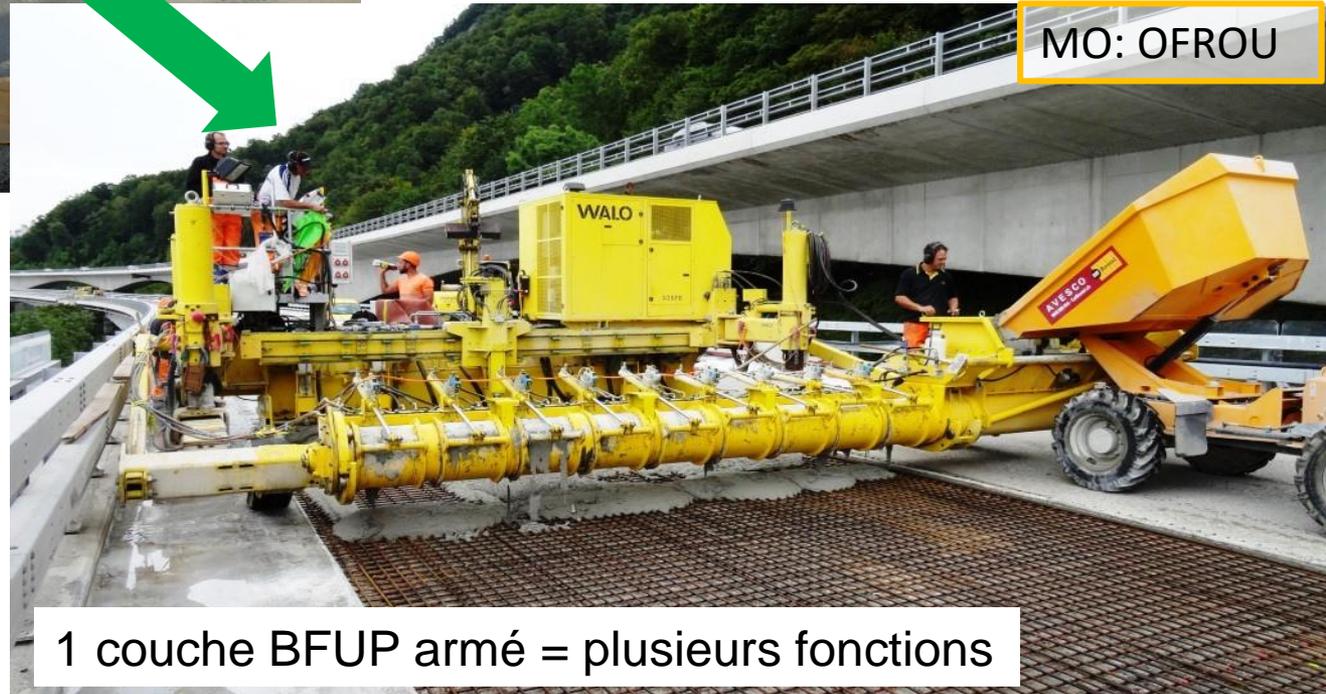
➔ technologie

➔ logistique

Applications :

Pont sur la Morge, Sion, 2004 ...

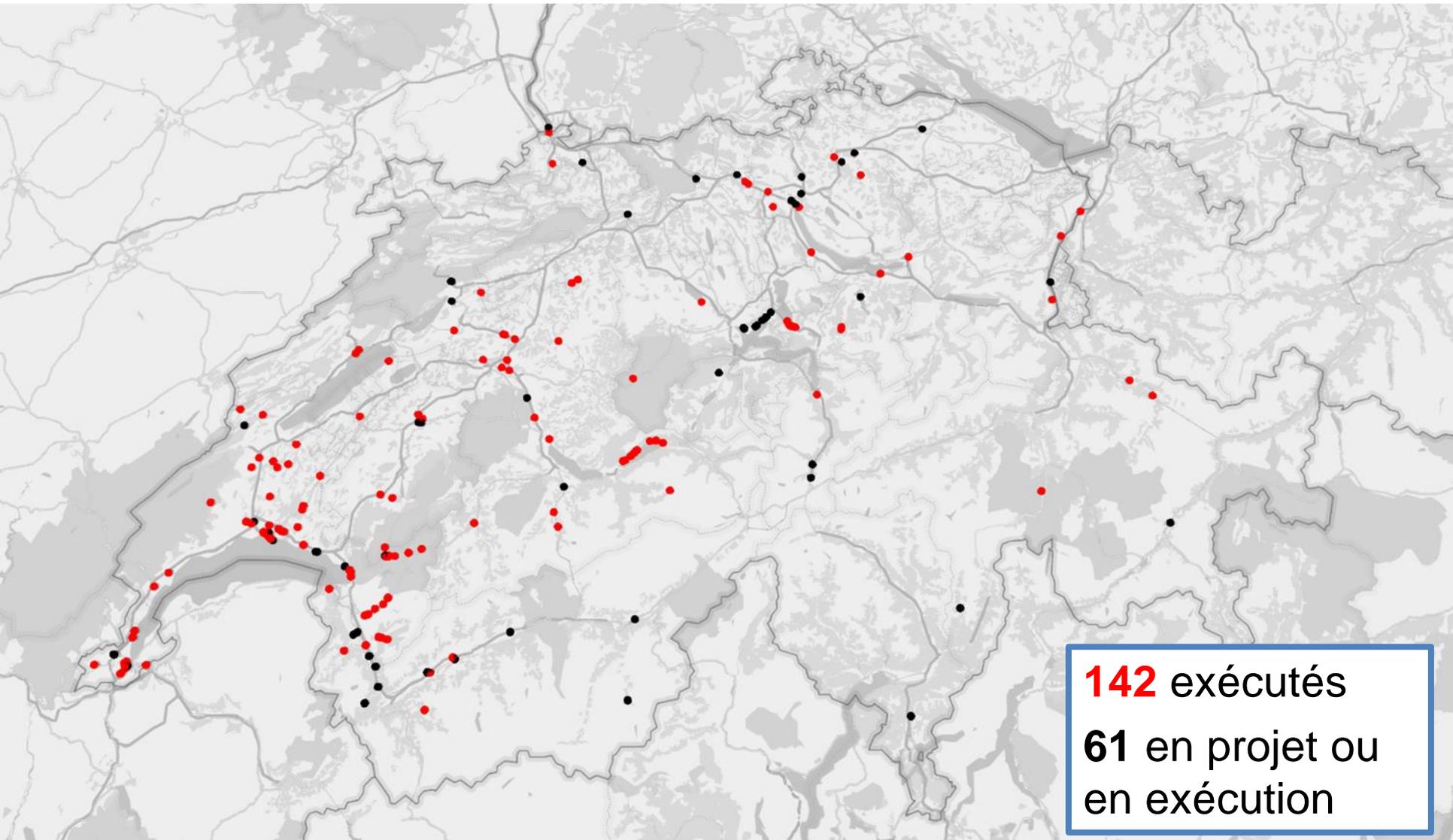
... Viaducs de Chillon, 2014/15



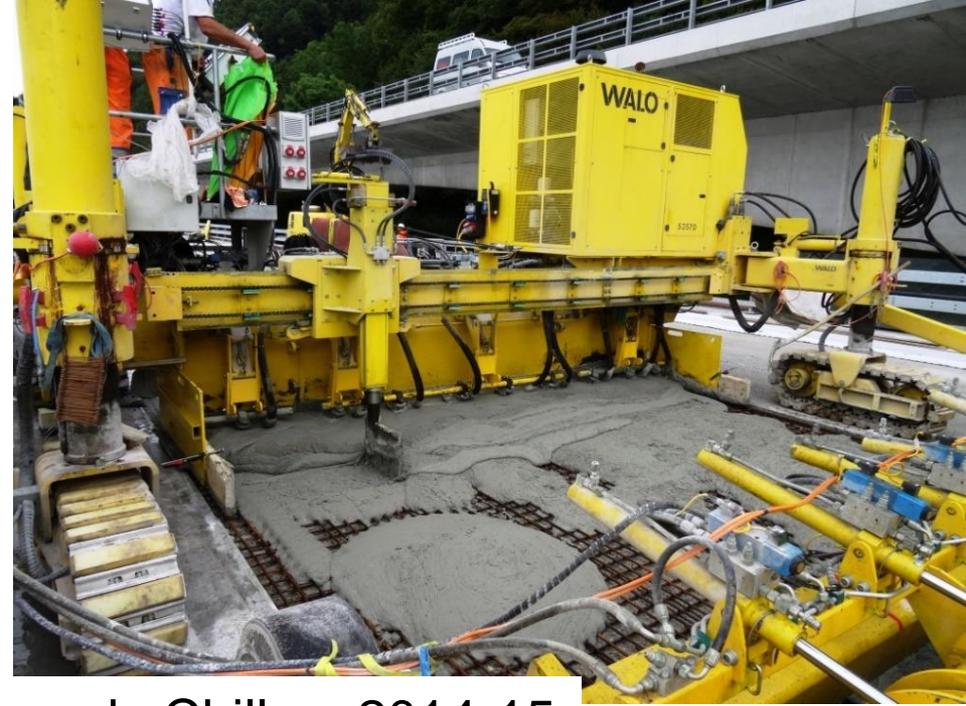
MO: OFROU

1 couche BFUP armé = plusieurs fonctions

Applications CFUP en Suisse: état octobre 2019



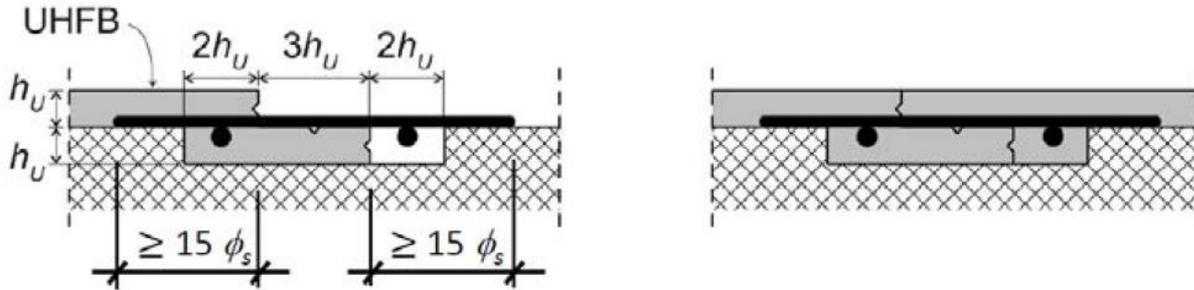
environ 2/3 = dalles de ponts-routes, ponts ferroviaires et passerelles



Renforcement des Viaducs de Chillon, 2014-15

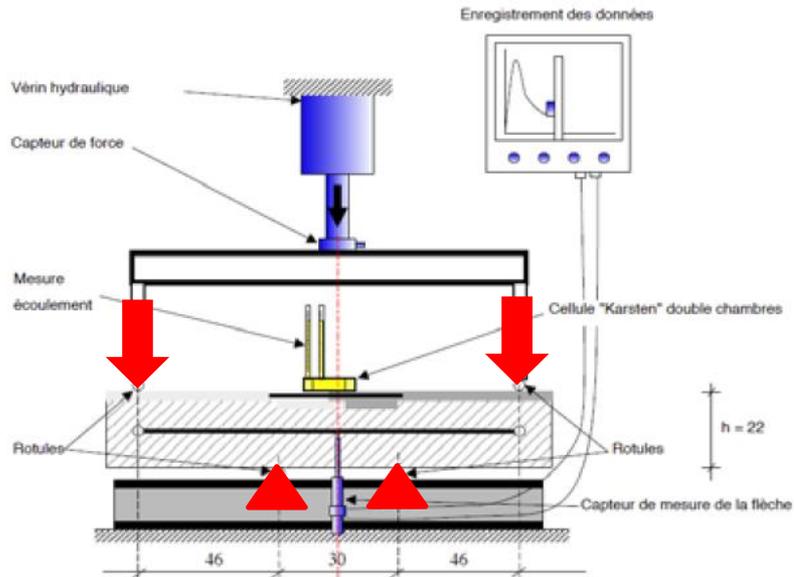


Joint de travail en CFUP: étanchéité



Etanchéité à l'eau vérifiée à l'aide d'essais:

➔ Le détail est étanche sous sollicitation de traction



Amélioration du Pont de Bramois (2017/18)

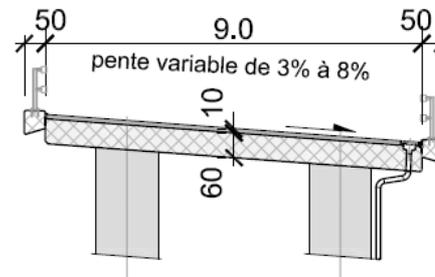
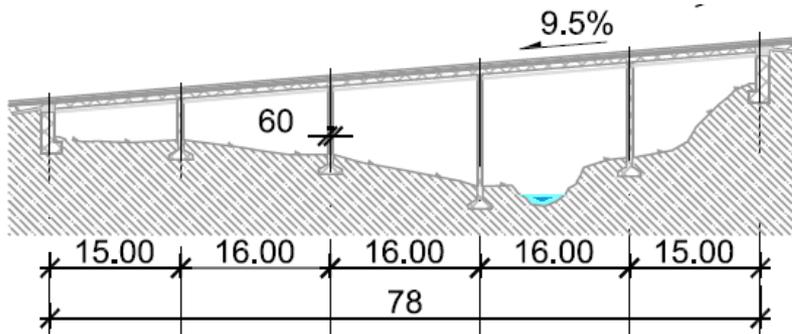
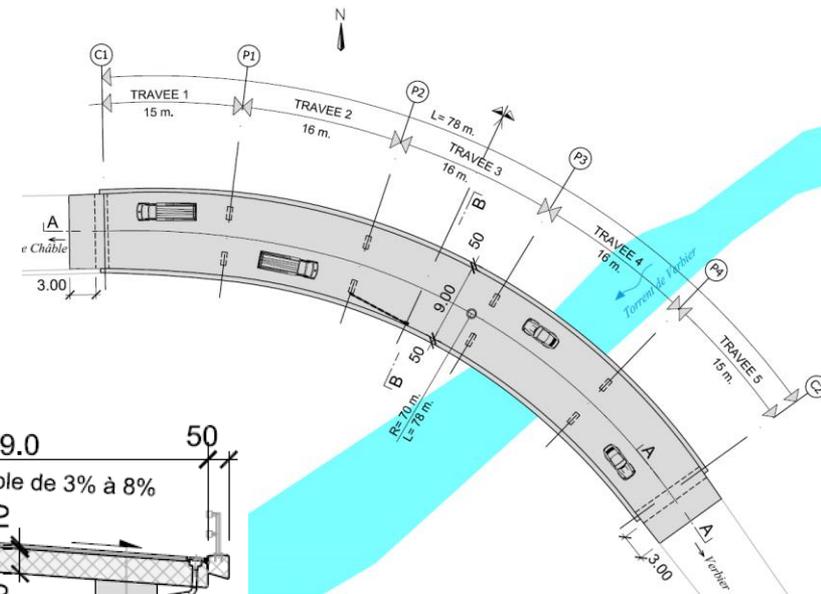
→ **CFUP armé** : renforcement structurel et étanchéité



Pont-dalle massive en béton armé, (1969) longueur: 78m

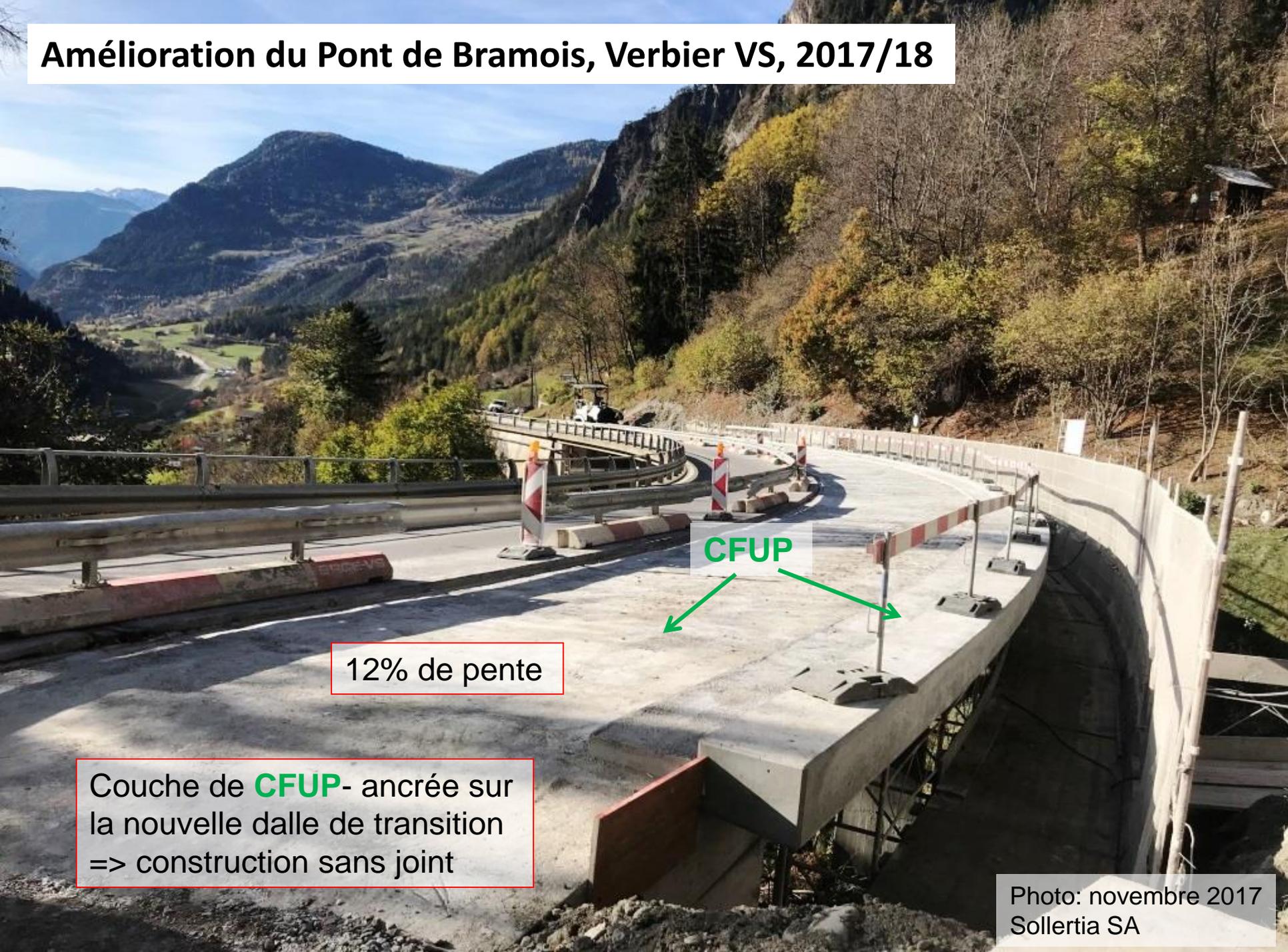
Manque de résistance (1) à la flexion et (2) à l'effort tranchant

Dégâts de corrosion d'armature



MO: Canton du Valais

Amélioration du Pont de Bramois, Verbier VS, 2017/18



12% de pente

Couche de **CFUP**- ancrée sur la nouvelle dalle de transition
=> construction sans joint

Photo: novembre 2017
Sollertia SA



Couche de CFUP recouvrant la bordure, après 1 hiver



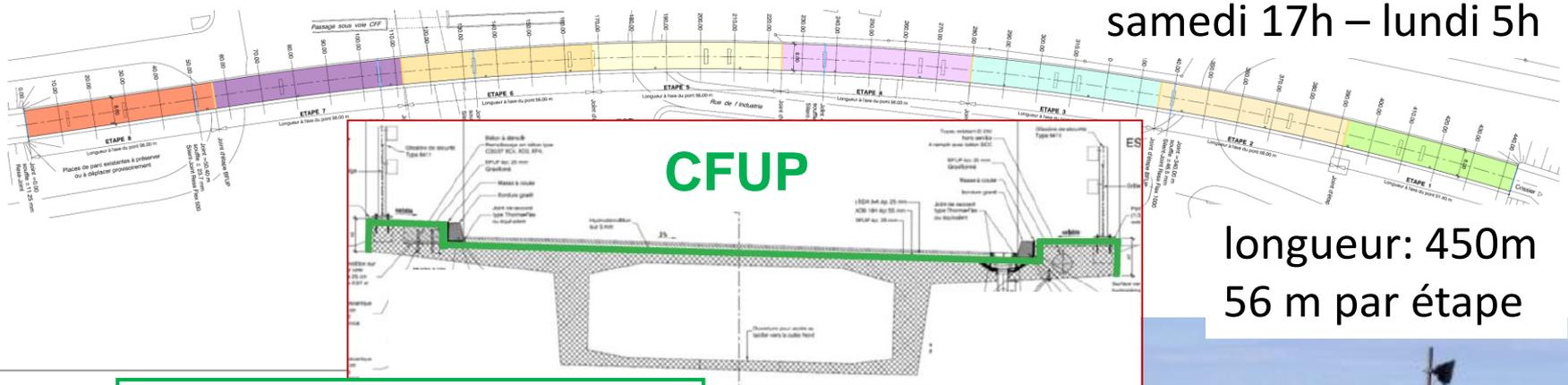
Photos: 6 août 2018



transition continue de la chaussée

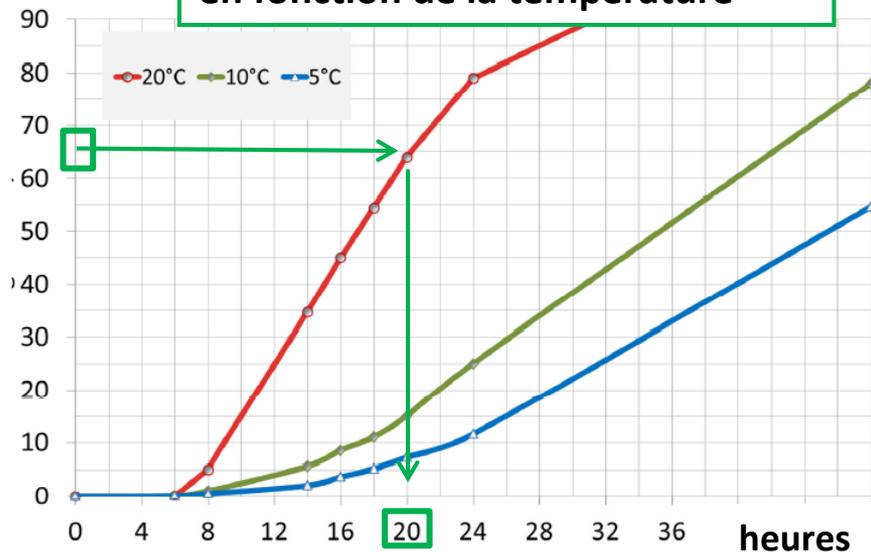
Amélioration du Viaduc de Cudrex, Bussigny VD (2016)

Concept: intervention **accélérée** en 8 étapes de 36 heures



f_{Uc} [MPa]

Évolution de la résistance du CFUP en fonction de la température





bordure enrobée
de **CFUP**



pose de
gravillons

Amélioration du Viaduc de Cudrex (2016)

intervention **accélérée** en 8 étapes de 36 hours



Remise en état
des bordures
avec du **CFUP**

surface carrossable en **CFUP**

Revêtement enlevé;
avant l'hydrodémolition

Bordure
enrobée de
CFUP

Coûts : **CFUP**age de la dalle de roulement (y compris hydro-démolition) + autres travaux (piliers, appareils d'appui, joints de dilatation) = **20%** du coût d'un projet de remplacement hypothétique

Amélioration de 3 viaducs d'autoroute près de Arth-Goldau SZ

(longueur totale = 1'000m)

Concept d'intervention :

3: remplacement des bordures

1: renforcement au **CFUP armé**:
 $h_U = 100\text{mm}$, $\phi_{SU} = 20\text{mm} @ 100\text{mm}$, 2 nappes

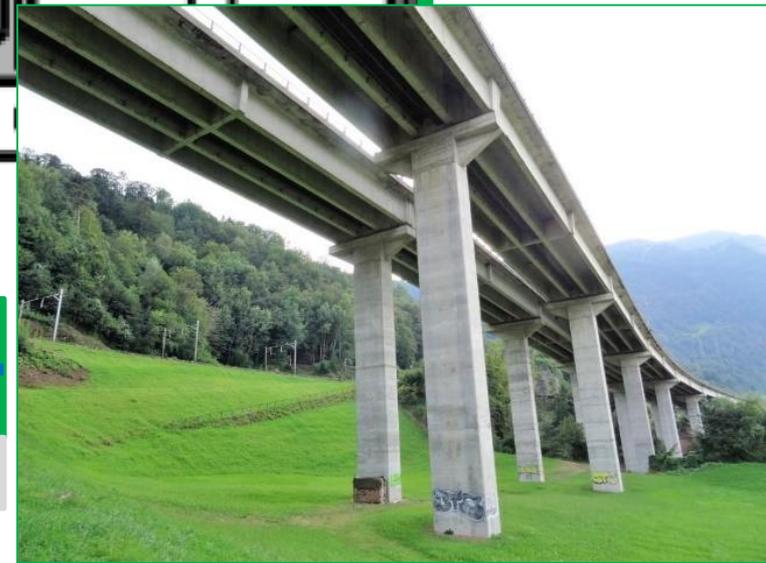
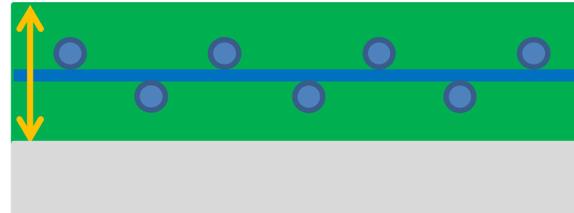
revêtement: 6cm d'asphalte

$h_c = 2400$

2: remise en état localisée des âmes/talons des poutres au **UHFB**

MO: OFROU

100



12 July 2018



Photo: keystone A.Wey

13. Mai 2019

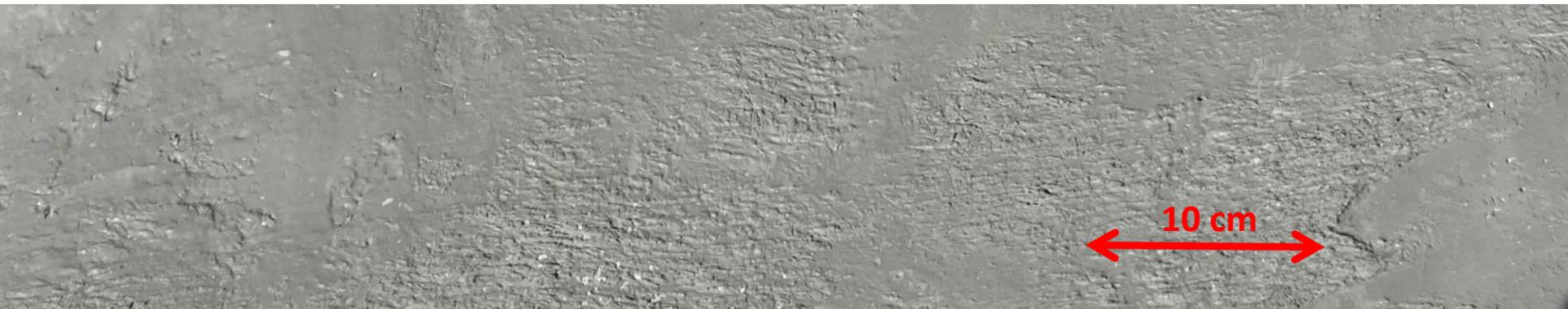


Adhérence entre **CFUP** et asphalte (coulé, compacté)

Essais de convenance depuis 2004 à l'EPFL par le LAVOC – Laboratoire des Voies de Circulation (Prof. A.-G. Dumont): validation de plusieurs systèmes avec/sans „primer“ d'adhérence.

Résistance à l'adhérence = 1.5 MPa de l'asphalte coulé sur le CFUP

Préparation de la surface CFUP: lavage à haute pression donne une micro-rugosité favorable.



Rheinbrücke Kriessern SG – Mäder (A), 10. Sept. 2019

MO: Canton de St-Gall
et Vorarlberg (A)





Rheinbrücke Kriessern SG – Mäder (A), 10. Sept. 2019



«Exportation» à l'étranger: Japon, Chine, Europe, USA, ...



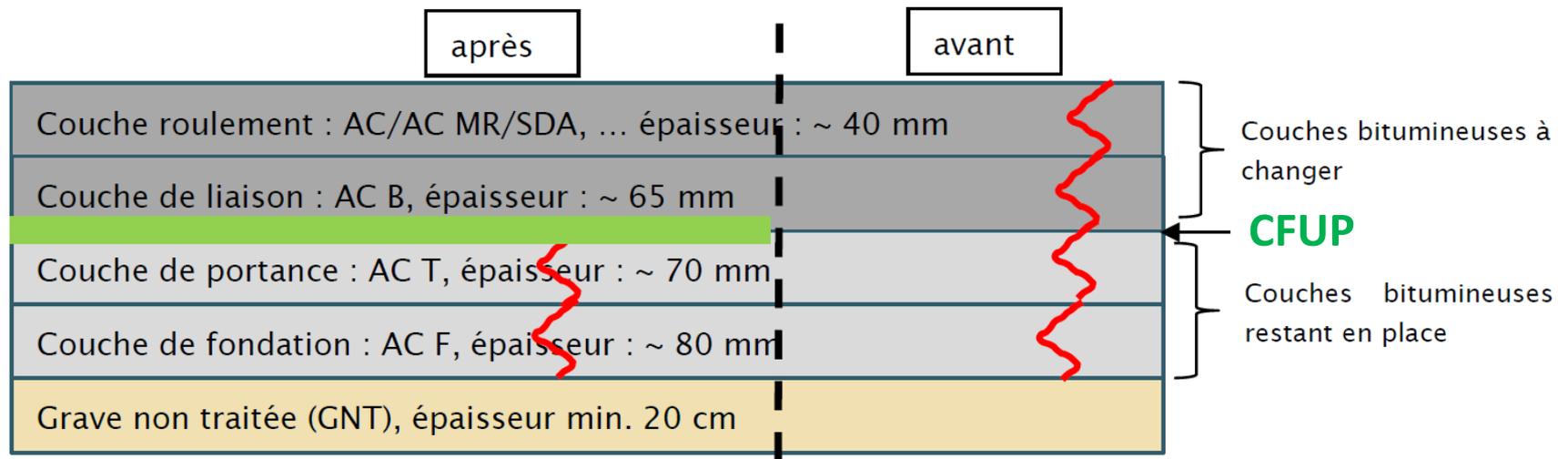
Surface carrossable
en CFUP:



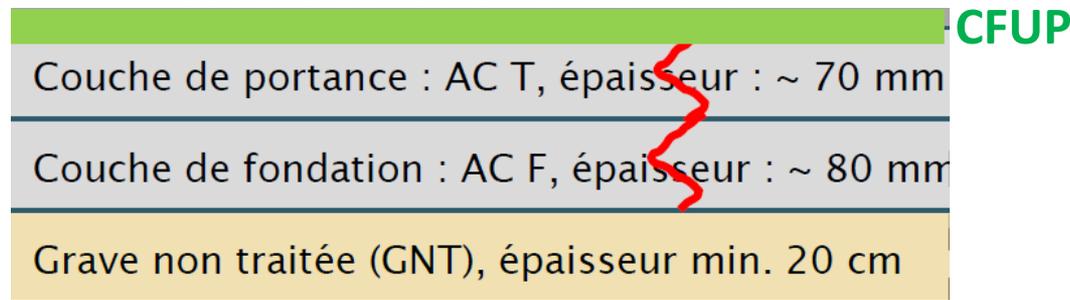
CFUPage (40mm) de la dalle du
Pont sur le Joe Brook River à
Hortonville, Etat de New York, USA,
4 juin 2019

Projet de recherche Innosuisse: Utilisation de BFUP pour le renforcement des chaussées et lutte contre la remontée de fissures

Fachhochschule Bern (Prof. N. Bueche) et EPFL



Couche de roulement en **CFUP**



Dalles de pont renforcées par le **CFUP** – Conclusions

- Technologie **CFUP** pour améliorer les ponts
- Le **CFUP** n'est pas un béton !
- Routes en **CFUP**

