



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral des routes

N09 Viaduc de Chillon

Solution innovante en relation avec la RAG



Plan de la présentation

Objectif : présentation du déroulement du projet du point de vue du spécialiste ouvrage d'art de l'OFROU

- 1. Quelques caractéristiques de l'ouvrage**
2. Historique des études
- 3. Diagnostic relatif à la RAG (AAR)**
4. Evaluation de la nécessité d'intervention
- 5. Objectifs de l'intervention**
6. Variantes de mesures de réhabilitation
- 7. Solution proposée**
8. Développement de la solution BFUP
- 9. Conclusions**



1. Quelques caractéristiques de l'ouvrage

N09 (*Entre Montreux et Villeneuve – VD*)

Ouvrages jumelés d'une longueur de 2,1 km surplombant le château de Chillon (surface des tabliers : 50'000 m²)



*Le Château de Chillon, Gustave Courbet, 1877
huile sur toile 86x100 cm - Musée Courbet, Ornans*

***Les viaducs sont inscrits comme bien
culturel d'importance nationale***

***Parole d'artiste : lettre à James Whistler, le
14.02. 1877***

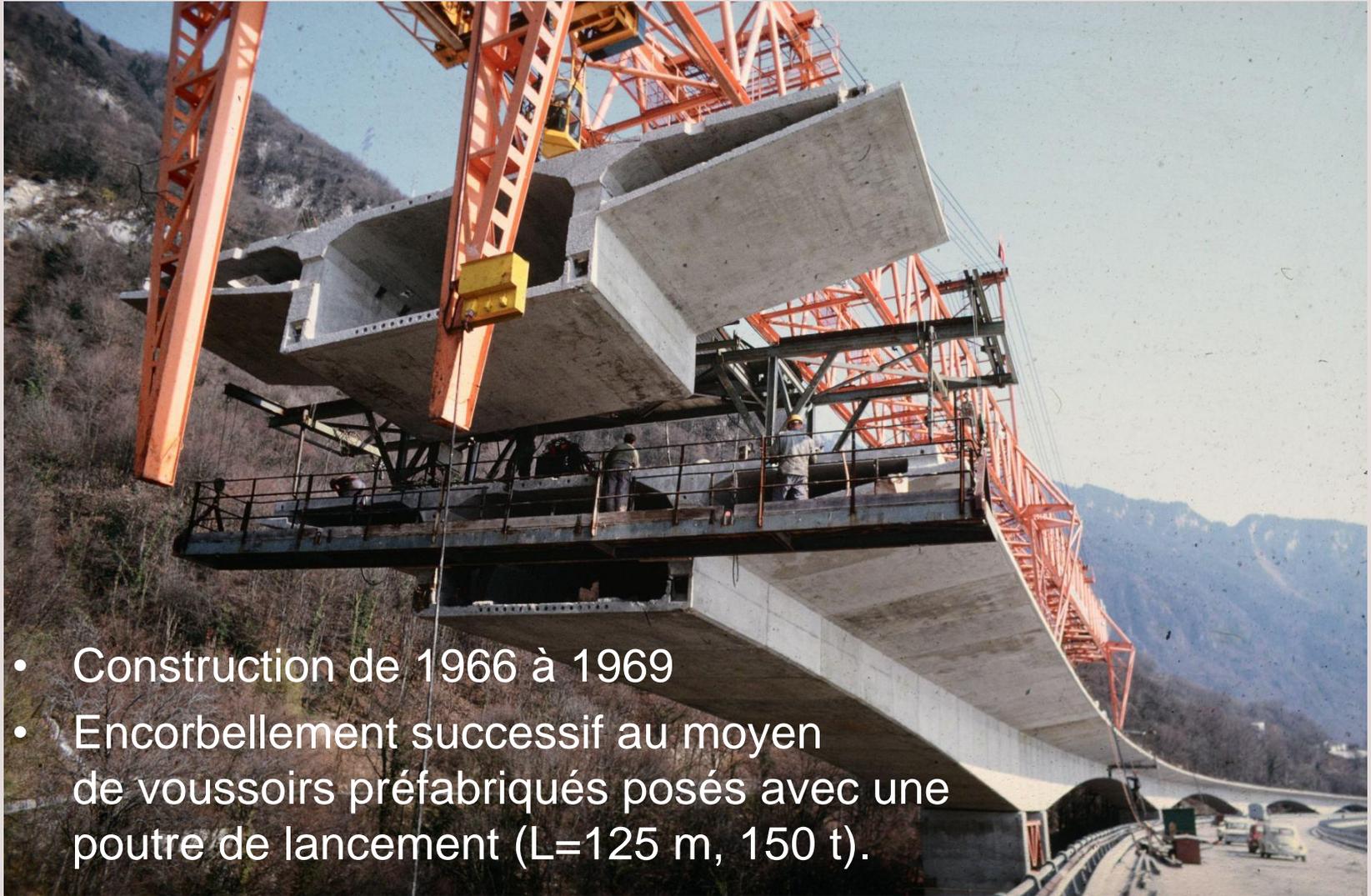
*...Je suis ici dans un pays charmant, le plus beau
du monde entier, sur le Lac du Léman, bordé de
montagnes gigantesques*

(et des magnifiques viaducs de Chillon)

*C'est ici que l'espace vous plairait, car d'un
côté il y a la mer et son horizon, ...*



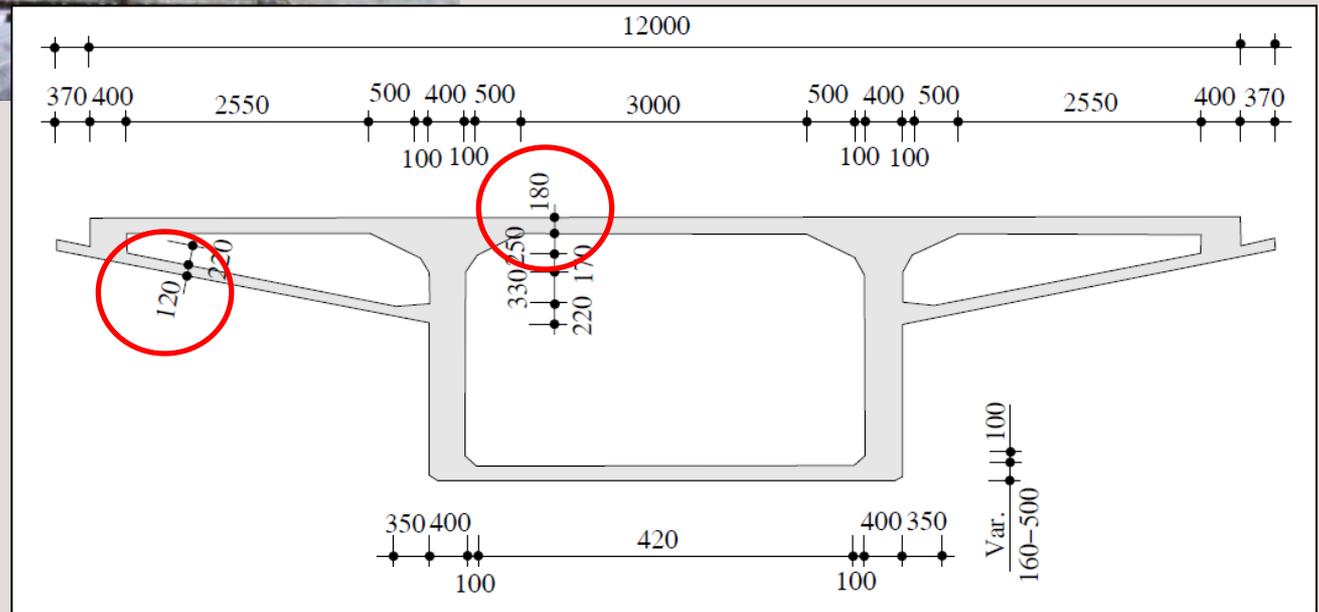
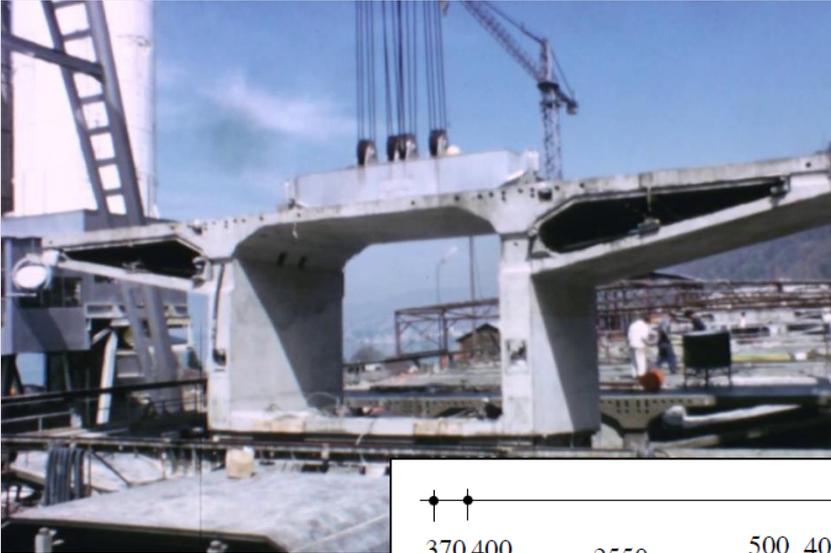
1. Quelques caractéristiques de l'ouvrage



- Construction de 1966 à 1969
- Encorbellement successif au moyen de voussoirs préfabriqués posés avec une poutre de lancement (L=125 m, 150 t).



1. Quelques caractéristiques de l'ouvrage





2. Historique des études

Dates	Etudes
Juin 2011	Approbation du projet d'intervention.
Avril 2012	Début des travaux d'assainissement.
Juin 2012	Planches d'essai de mortier de ragréage. Adhérence insuffisante. Premières suspicions de RAG sous les voiles inclinés (rupture dans granulats).
Eté 2012 	Lancement de la campagne d'investigations RAG du tablier des ponts avec suivi par commission « RAG ».
Eté 2012 – Automne 2013	Etudes et rapports RAG – BFUP
Printemps 2014	Mise au point de la solution BFUP, Planches d'essais BFUP, étanchéité, essai détail de joint au laboratoire EPFL
Eté 2014	Pose du BFUP de manière industrielle sur le tablier Lac (25'000 m ²)



3. Diagnostic relatif à la RAG

Rappel : définition réaction alcalis-granulats (RAG)



- **Mécanisme de dégradation** des ouvrages en béton reconnu en Suisse depuis environ 25 ans.
- Réaction chimique entre le granulats réactif et les alcalins actifs dans la solution interstitielle du béton.
- **Formation de gels silicatés** plus ou moins **expansifs** avec augmentation volumique pouvant conduire à la dégradation complète du béton.
- Forte dépendance à l'**humidité** du béton.
(En dessous d'un taux d'humidité de 70 à 80 % HR, la réaction n'a pas lieu ou est fortement atténuée.)



3. Diagnostic relatif à la RAG

Cinétique de la réaction

- Granulats du Léman ou de l'embouchure du Rhône: RAG avec une **évolution très lente**.

On peut admettre, que pendant les premières 5 à 15 années un béton réactif exposé à un milieu humide ne montre pas de signes de dégradation à l'échelle micro- ou macroscopique.

- Après cette phase d'initiation et de transition, la vitesse d'avancement de la réaction d'un béton réactif dépend principalement de l'humidité et de la température du béton ainsi que de l'amplitude des fluctuations de ces paramètres.

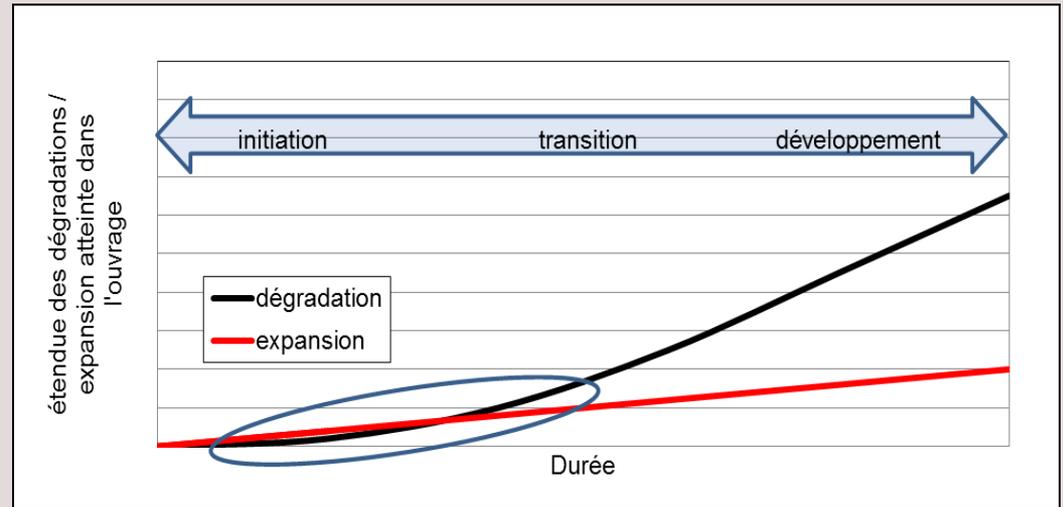




3. Diagnostic relatif à la RAG

Cas du viaduc de Chillon

- Réaction en phase d'initiation, voire de transition (dalle du tablier).

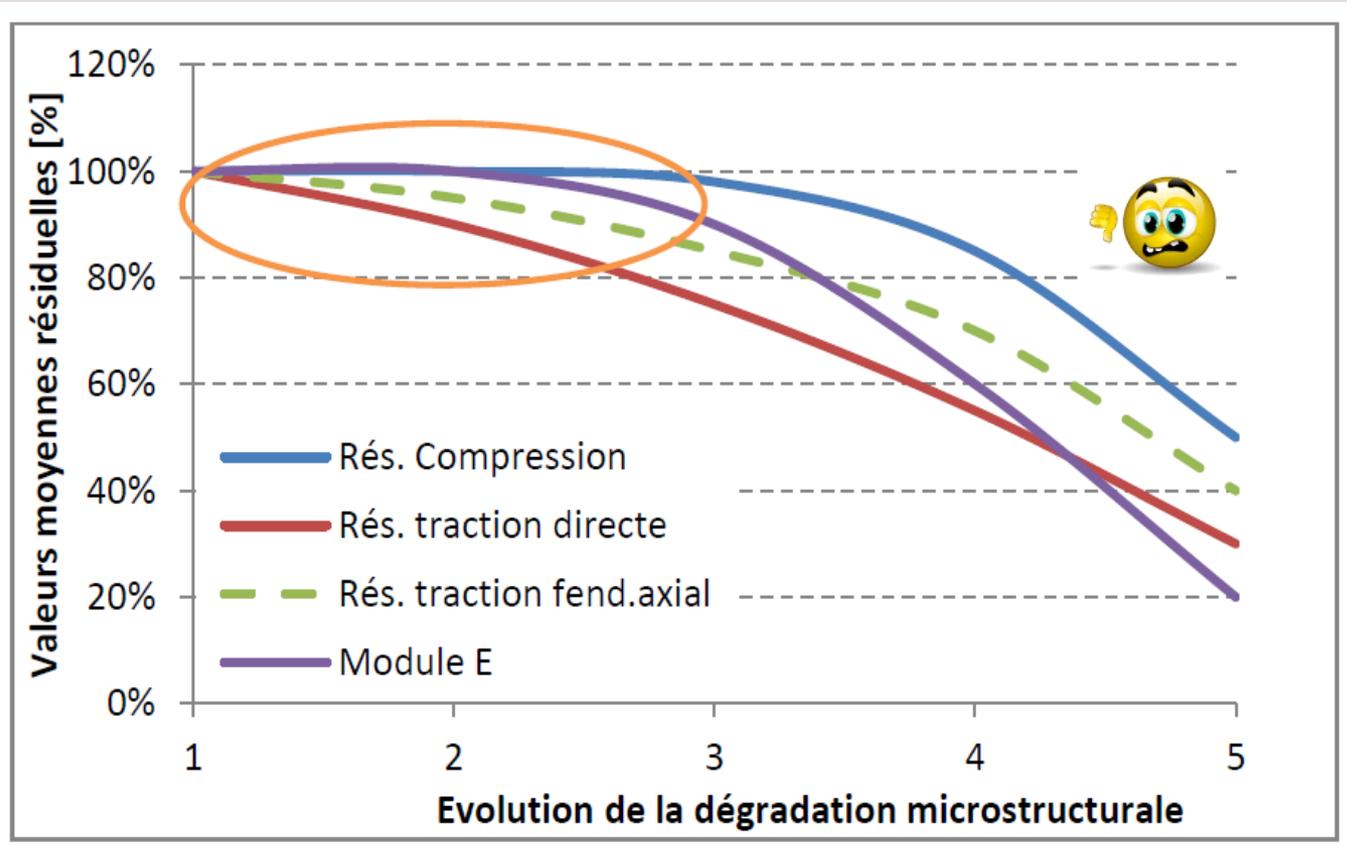


- Béton caractérisé comme **le plus réactif connu en Suisse.**
- **Facteurs aggravants** pour la poursuite du développement : sollicitations mécaniques (dynamiques), variations thermiques, orientation préférentielle de la fissuration.



3. Diagnostic relatif à la RAG

Incidence de la RAG sur les caractéristiques mécaniques





3. Diagnostic relatif à la RAG

Recommandation selon rapport «Diagnostic relatif à la RAG» :

- Pas d'obligation de remplacement de l'ouvrage.
- Des mesures de renforcement doivent être envisagées et constituent une option adéquate pour la remise en état durable des viaducs.



Nécessité d'une réhabilitation de l'ouvrage à court terme afin de bénéficier d'un support encore relativement sain



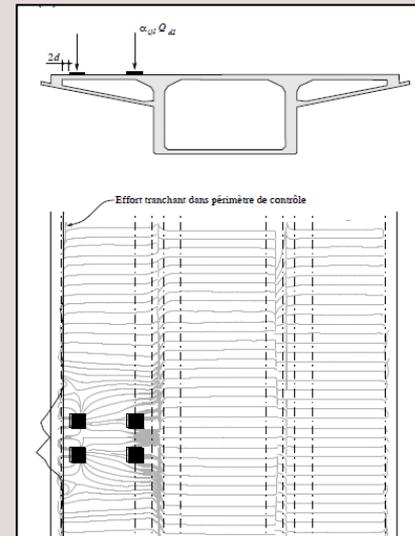
4. Evaluation de la nécessité d'intervention

Etat existant :

Degrés de conformité

$n = R_d / E_d$ proches de 1.0

Analyses non linéaires nécessaires pour la dalle de roulement
(Expert: Muttoni + Fernández SA)



- + étude expérimentale à l'EPFL pour déterminer l'influence de la présence des câbles dans la dalle précontrainte.





5. Objectifs de l'intervention

Selon Prof. Dr. E. Brühwiler :

L'objectif est **d'adoucir les effets néfastes** et de **maintenir des conditions favorables** pour un faible développement de la RAG.

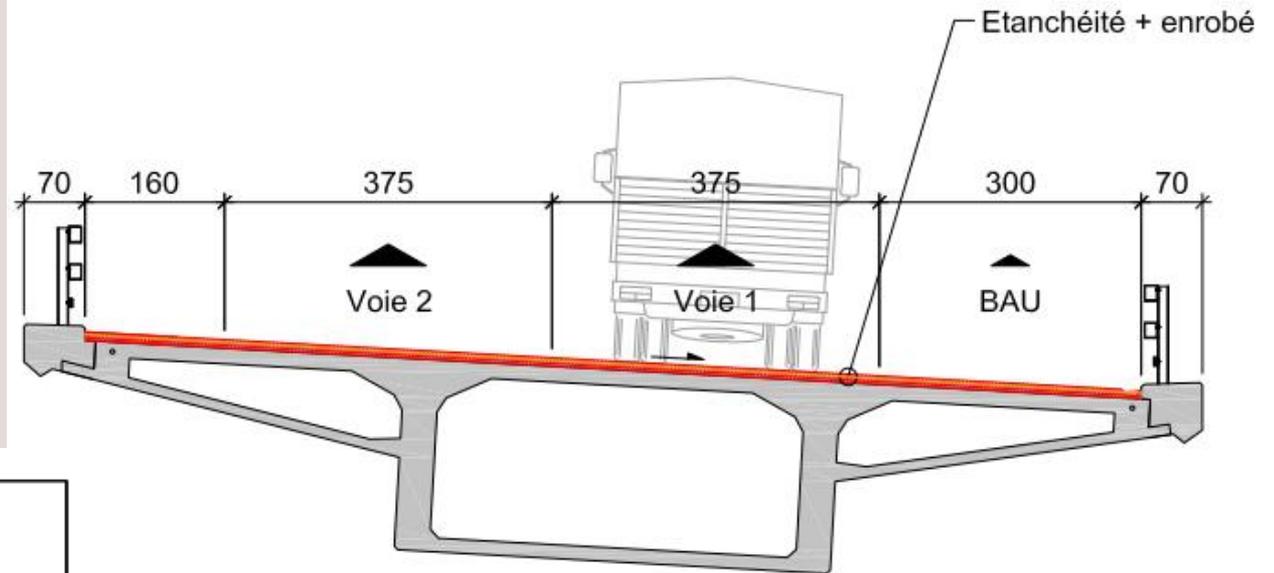
Le but est de **renforcer** la dalle de roulement afin de :

- *Supprimer toute possibilité d'apport d'eau dans le béton ;*
- *Diminuer l'amplitude des contraintes par une augmentation de la rigidité de la dalle ;*
- *Augmenter la résistance ultime ;*
- *Limiter les flèches du tablier dans le sens longitudinal.*



6. Variantes de mesures de réhabilitation

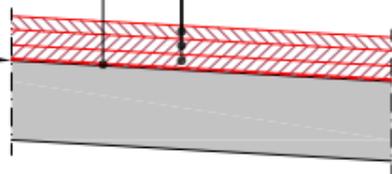
Mesure M11 Réhabilitation selon projet d'intervention (solution standard OFROU)



Enrobé :
- AC MR 8 ép. 30 mm
- MA 11 H ép. 35 mm
- MA 11 H ép. 30 mm

Etanchéité
Lés en bitume-polymère
PBD, EP 5 MA

Résine Epoxy

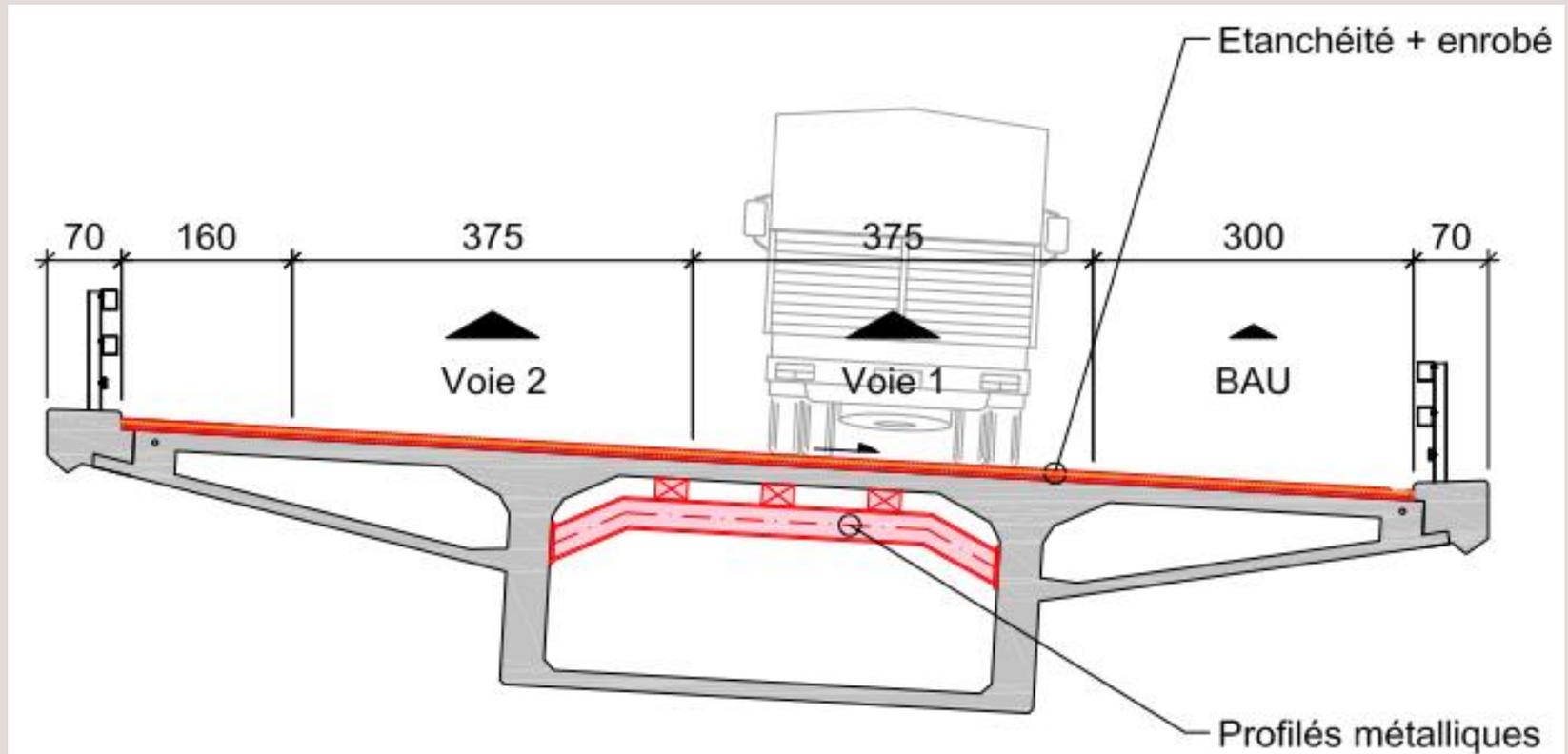


**Problème : seulement
fonction d'étanchéité**



6. Variantes de mesures de réhabilitation

Mesure M12 Profilés métalliques ou lamelles collées

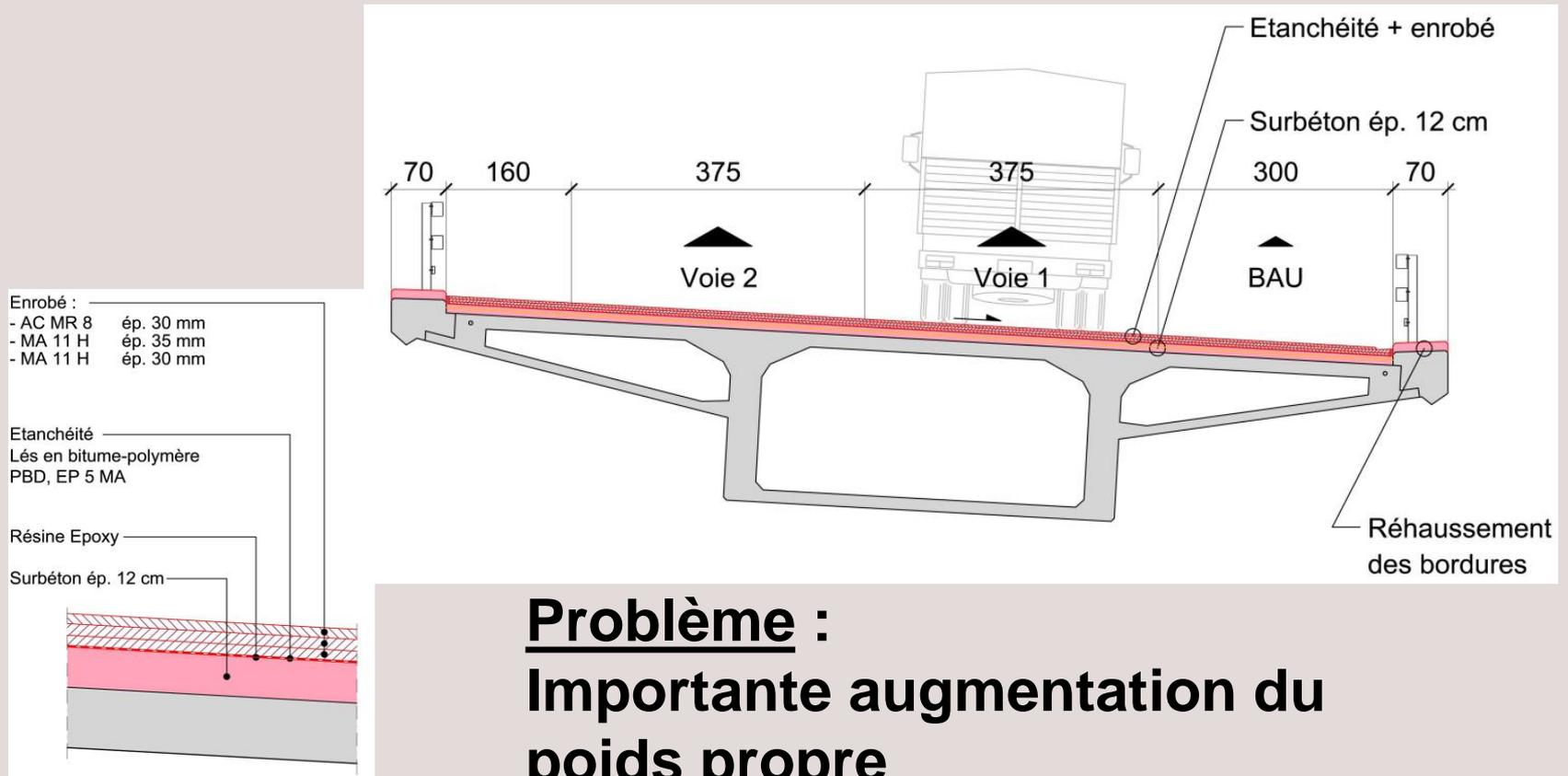


Problème : consoles non renforcées !!!



6. Variantes de mesures de réhabilitation

Mesure M13 Sur-béton traditionnel

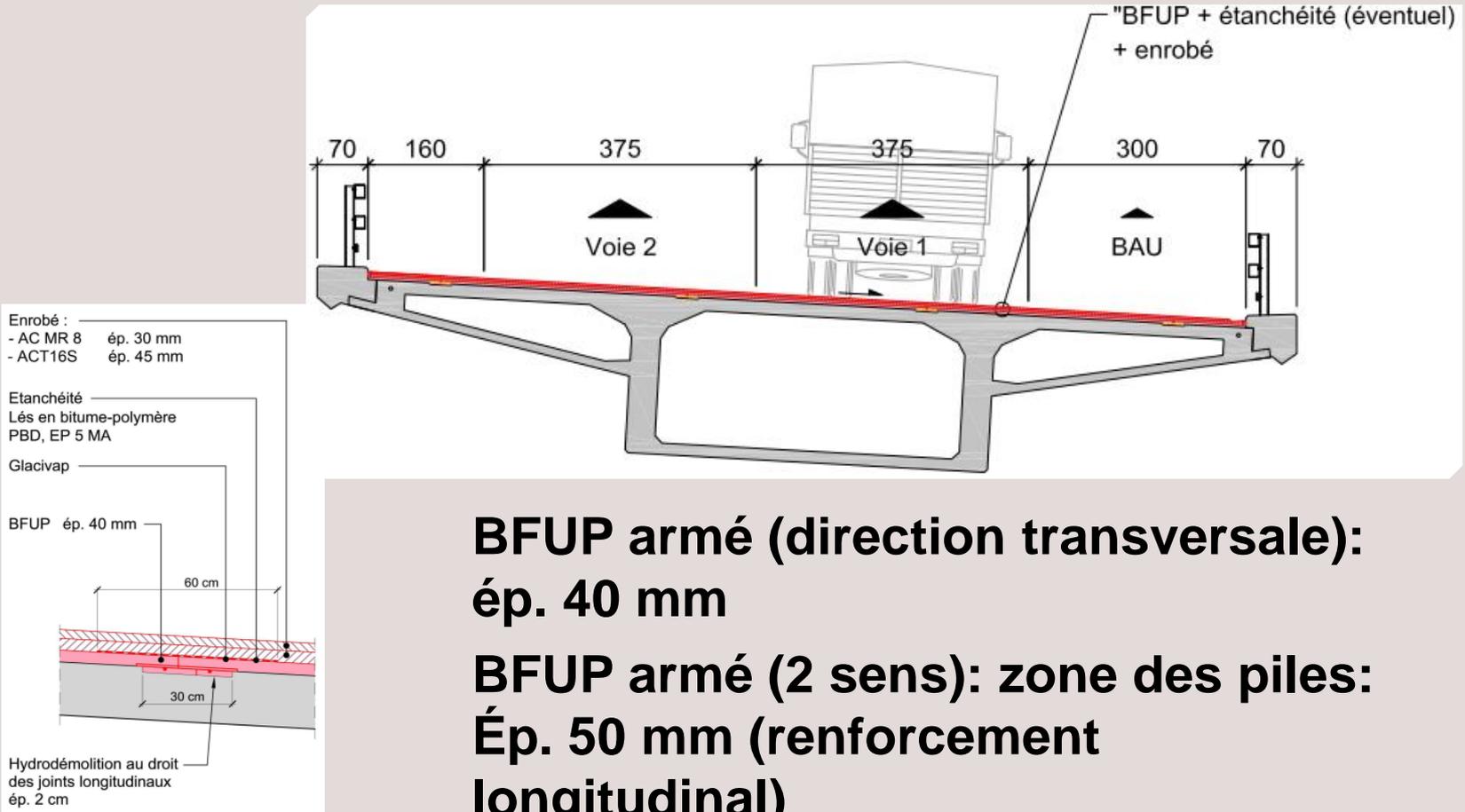


Problème :
Importante augmentation du poids propre



6. Variantes de mesures de réhabilitation

Mesure M14 Renforcement au moyen d'un BFUP



**BFUP armé (direction transversale):
ép. 40 mm**

**BFUP armé (2 sens): zone des piles:
Ép. 50 mm (renforcement
longitudinal)**



7. Solution proposée

Les bénéfices suivants sont attendus :

- Étanchéité : la couche de BFUP est imperméable à l'eau et aux chlorures (Attention: partiellement étanche au droit des joints de travail – étanchement nécessaire) ;
- Comportement structural de la dalle : augmentation de la rigidité de la dalle, diminution significative des contraintes ;
- Comportement structural global : la couche en BFUP contribue à rigidifier le tablier et à réduire ses déformations ;
- Résistance ultime : augmentation très importante de la résistance ultime (flexion, effort tranchant, fatigue) ;
- Intervention limitée : renforcement sens longitudinal évité ;
- Exécution : potentiel d'un chantier d'une durée relativement courte;
- Moment opportun : béton du support encore sain



7. Solution proposée

Le BFUP n'est ni un béton ni un acier mais un matériau composite produit à partir de ciment, de grains de quartz de max. 1 mm, de fumée de silice, d'eau, d'adjuvants et de fibres généralement en acier d'une longueur max. de 15 mm

Comparaison : béton ordinaire et BFUP

Composants	Béton ordinaire	BFUP
Ciment Portland (kg/m ³)	300-375	700-1000
Fumée de silice (kg/m ³)	-	200-300
Dmax (mm)	16-32	0.5-7
Superfluidifiant (kg/m ³)	0-4	10-40
Eau (l/m ³)	160-190	110-200
E/C	0.40-0.60	< 0.24
E/L	-	< 0.22
Fibres (métalliques) (kg/m ³)	-	> 150



7. Solution proposée

Valeurs typiques (moyennes) de BFUP Courants

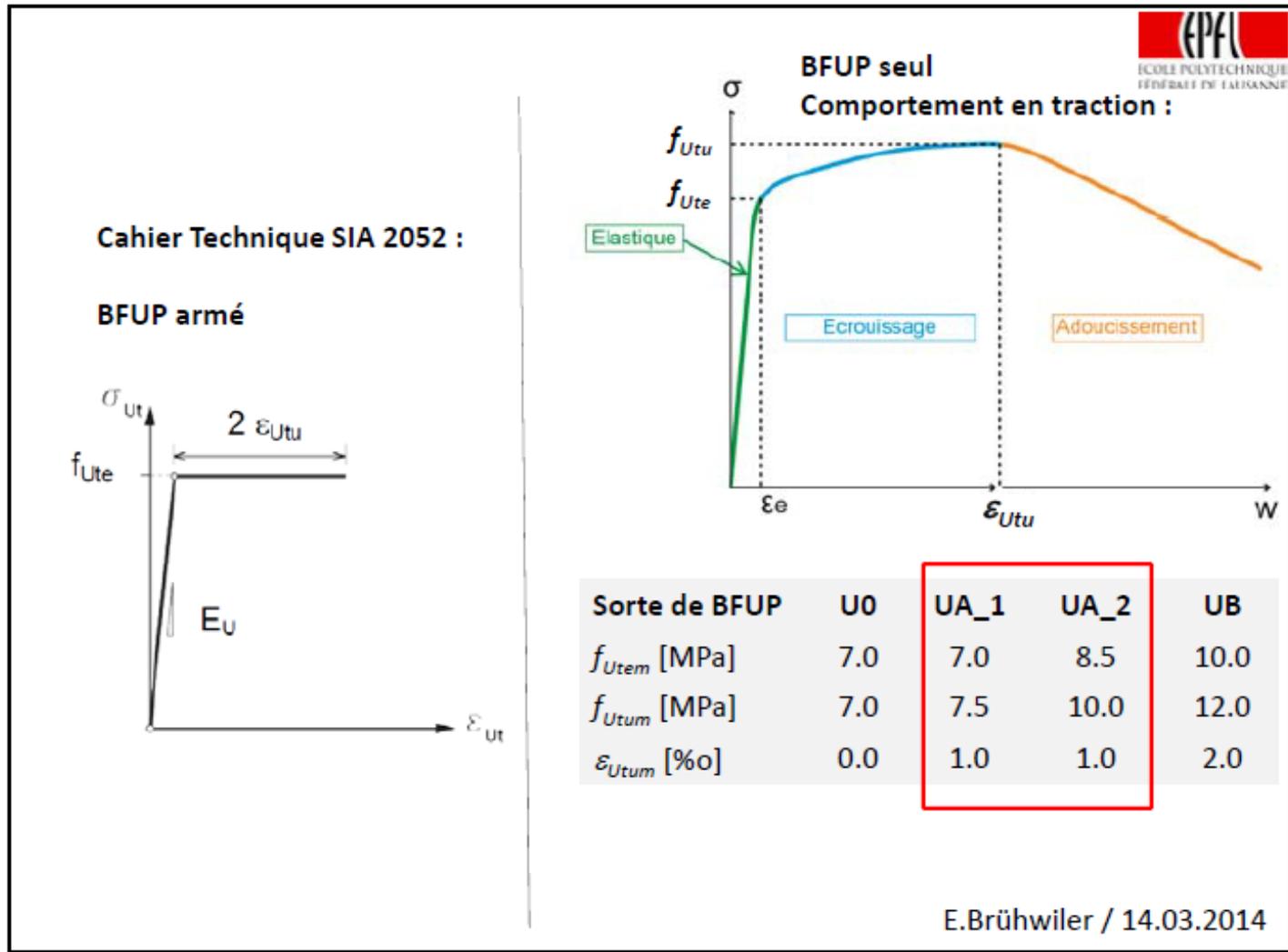
selon annexe A du cahier technique SIA 2052

“ Béton fibré ultra-performant (BFUP) : Matériaux, dimensionnement et exécution ”
en consultation jusqu'au 13.06.14

Propriété	Désignation	Valeur typique (à l'âge de 28 jours)
Module d'élasticité (traction / compression)	E_{Um}	45 – 65 GPa
Coefficient de Poisson	ν_u	0.2
Résistance à la compression	f_{Ucm}	120 – 200 MPa
Limite élastique de la résistance à la traction	f_{Utem}	7 – 12 MPa
Résistance à la traction	f_{Utm}	7 – 15 MPa
Ecrouissage (traction)	ε_{Utm}	0 – 3,5 ‰
Energie spécifique de rupture	G_{FU}	15 - 25 kJ/m ²
Ouverture maximale des fissures	$w_{Ur,max}$	1/2 de la longueur maximale des fibres
Coefficient de dilatation thermique	α_U	10 ⁻⁵ / °C
Valeur finale du retrait	ε_{Usoc}	0,6 – 1,0 ‰
Coefficient final de fluage	φ_{Uoc}	sans traitement thermique : 1,5 ($t_0 = 7$ jours); 0,8 - 1,0 ($t_0 = 28$ jours) avec traitement thermique : 0,2 - 0,4
Masse volumique du BFUP durci	ρ_U	2300 à 2700 kg/m ³ selon le type de fibres et leur dosage



7. Solution proposée





7. Solution proposée

Validation de la méthode de renforcement en BFUP :

Des éléments d'essais sans et avec BFUP (dalle entre les âmes et dalle au-dessus des âmes) ont été confectionnés à l'échelle 1:1 et sollicités jusqu'à la rupture en laboratoire. Ces essais ont démontré :

- *Une importante augmentation de la résistance ultime > **50% à 70%** avec l'apport du BFUP;*
- *Le maintien d'un comportement structural ductile de l'élément renforcé ;*
- *Des modes de rupture flexionnels lorsque la résistance ultime est atteinte.*

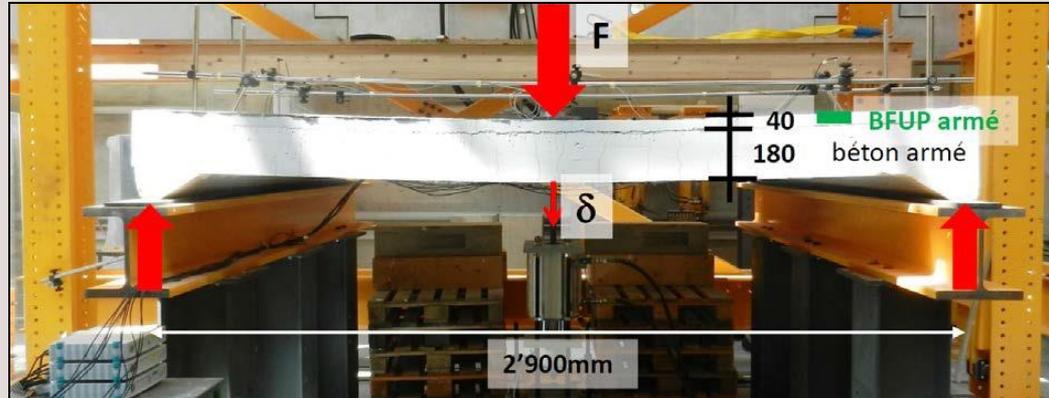


7. Solution proposée

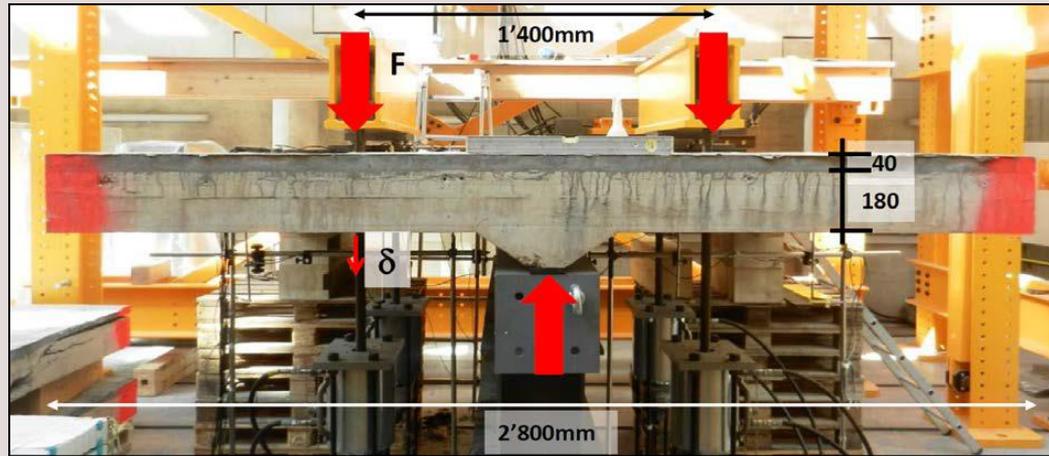
Extrait du rapport

« *Renforcement BFUP: Validation par essais de rupture* »

- **Série A**



- **Série B**

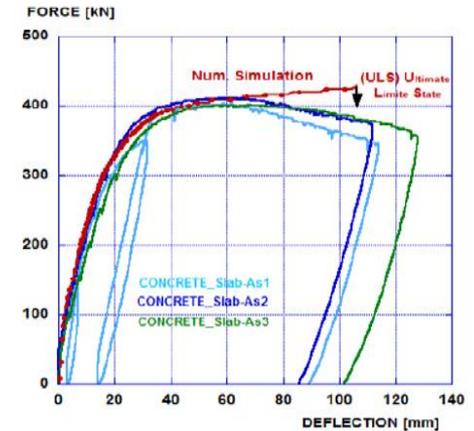
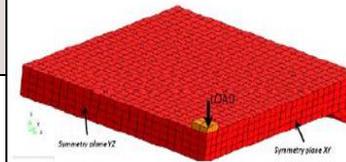




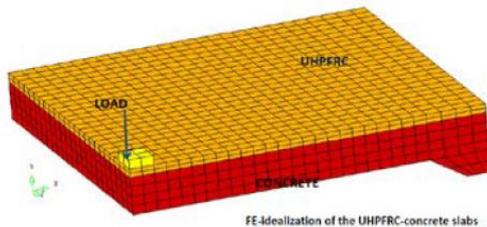
7. Solution proposée

- **Série A**
(Essais et simulation numérique EPFL)

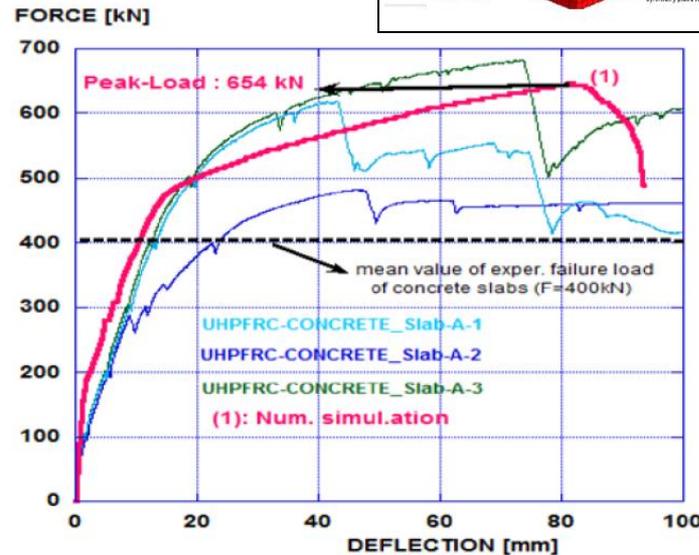
Élément de référence (béton armé) :



Élément renforcé en construction composé BFUP armé - béton armé :



FE-idealization of the UHPFRC-concrete slabs





7. Solution proposée

Confirmation de la faisabilité



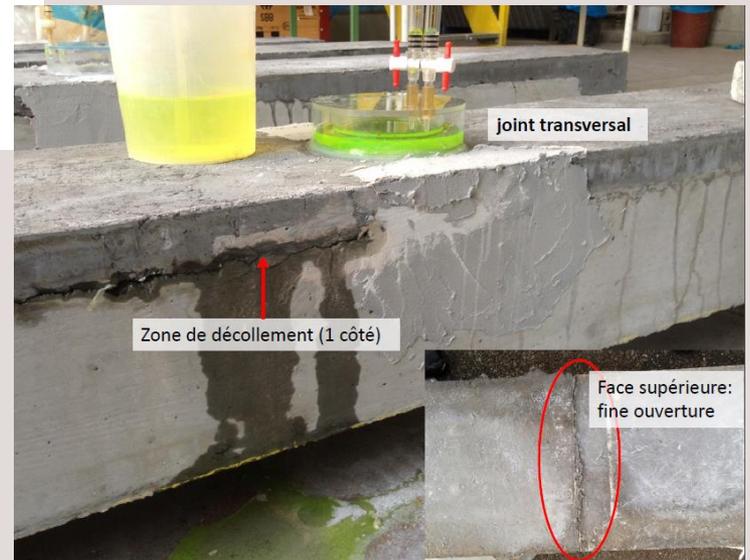
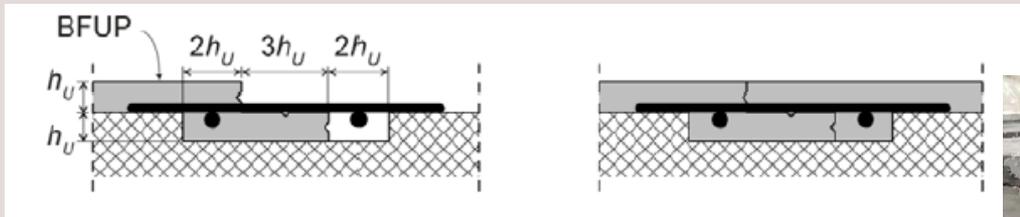
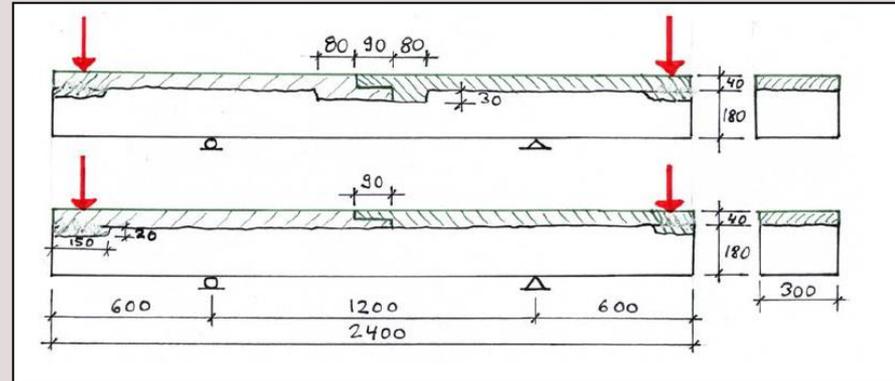
Des essais de mise en place du BFUP de façon automatisée avec une finisseuse ont été réalisés avec succès.

(Développement d'un prototype par Walo Bertschinger SA)



8. Développement de la solution BFUP

Etanchéité des joints (essais à l'EPFL)



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

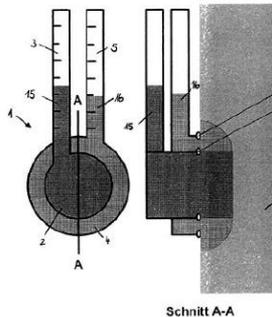


Fig. 3

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



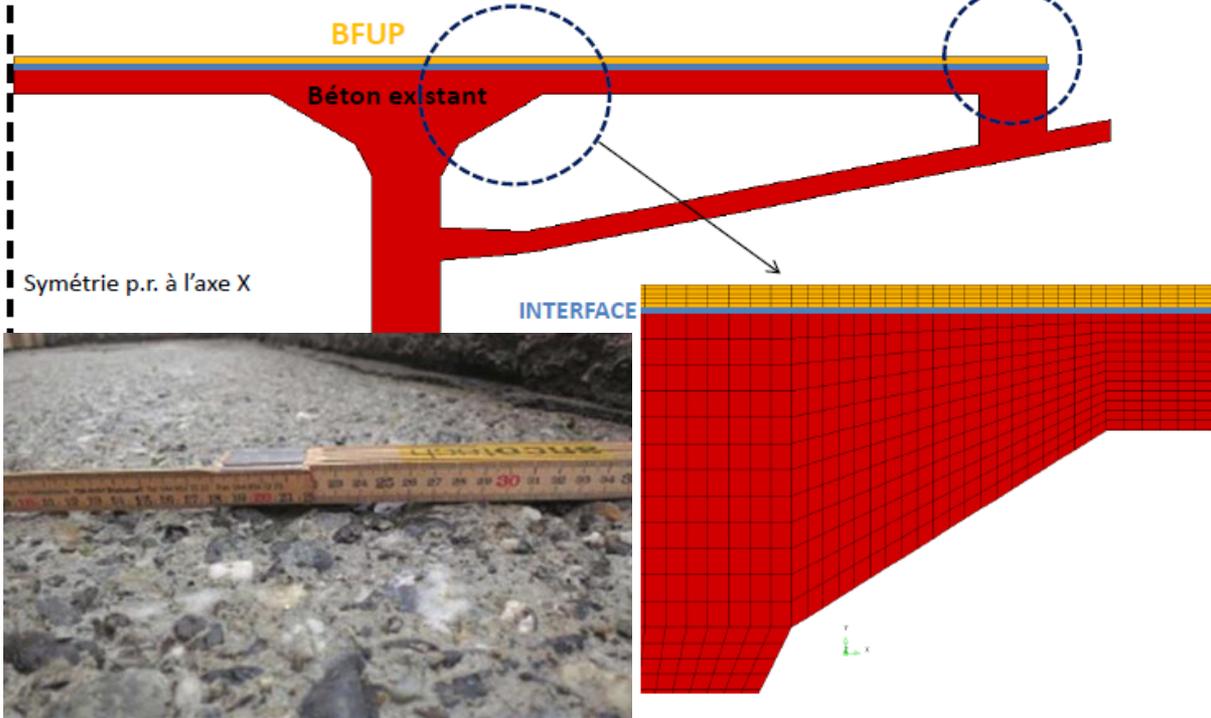
8. Développement de la solution BFUP

Cisaillement dans la zone d'interface BFUP et béton

 EPFL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Modélisation numérique : autocontraintes dans le système composite

Objectifs: 1) déterminer l'état de contrainte (de traction) dans la couche de BFUP et en fonction de la sorte de BFUP; 2) contrainte de cisaillement à la zone d'ancrage



Symétrie p.r. à l'axe X

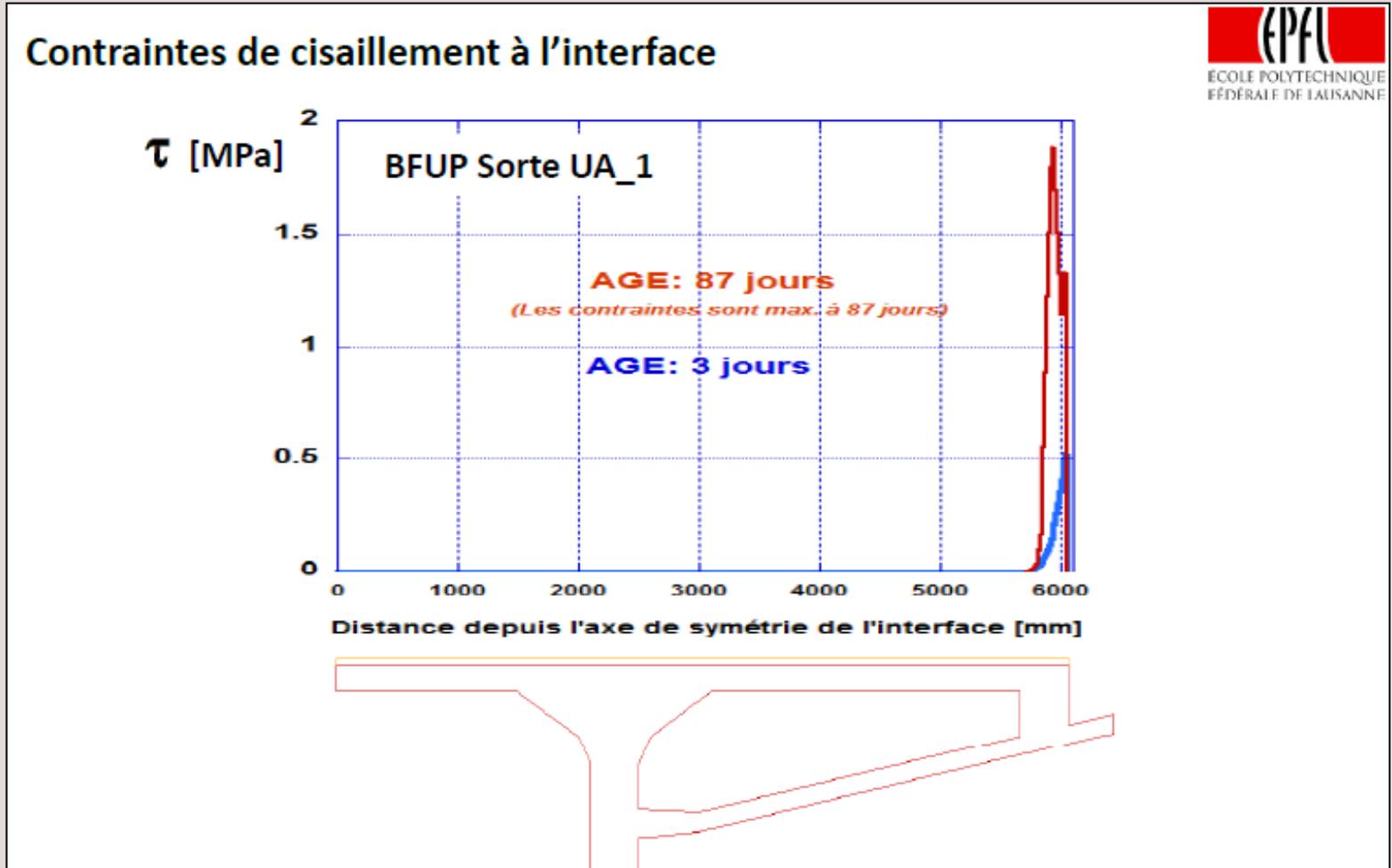
INTERFACE



E.Brühwiler / 14.02.2014

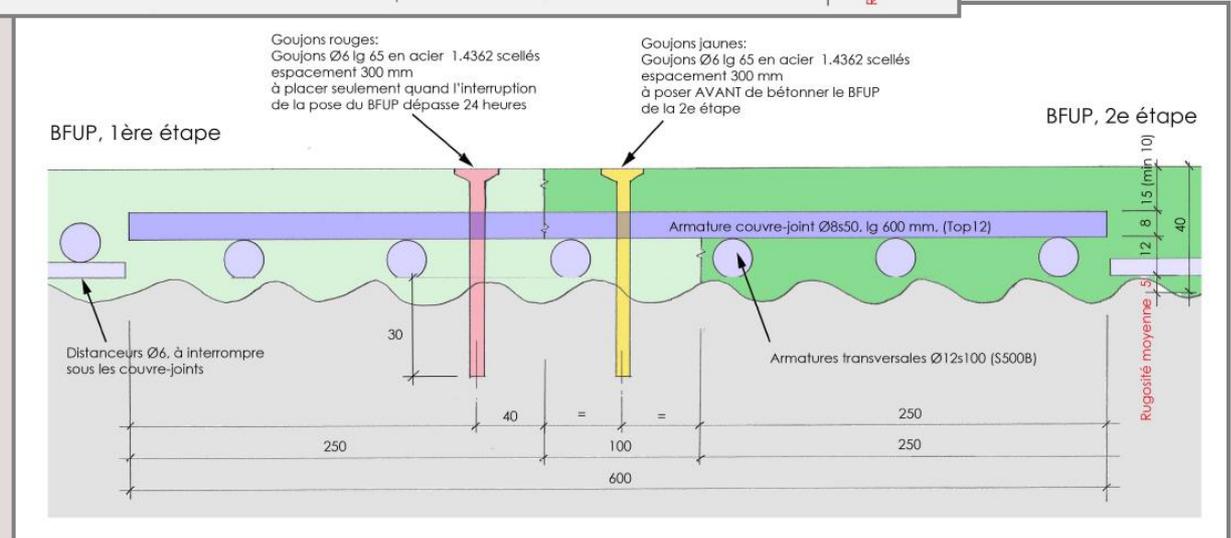
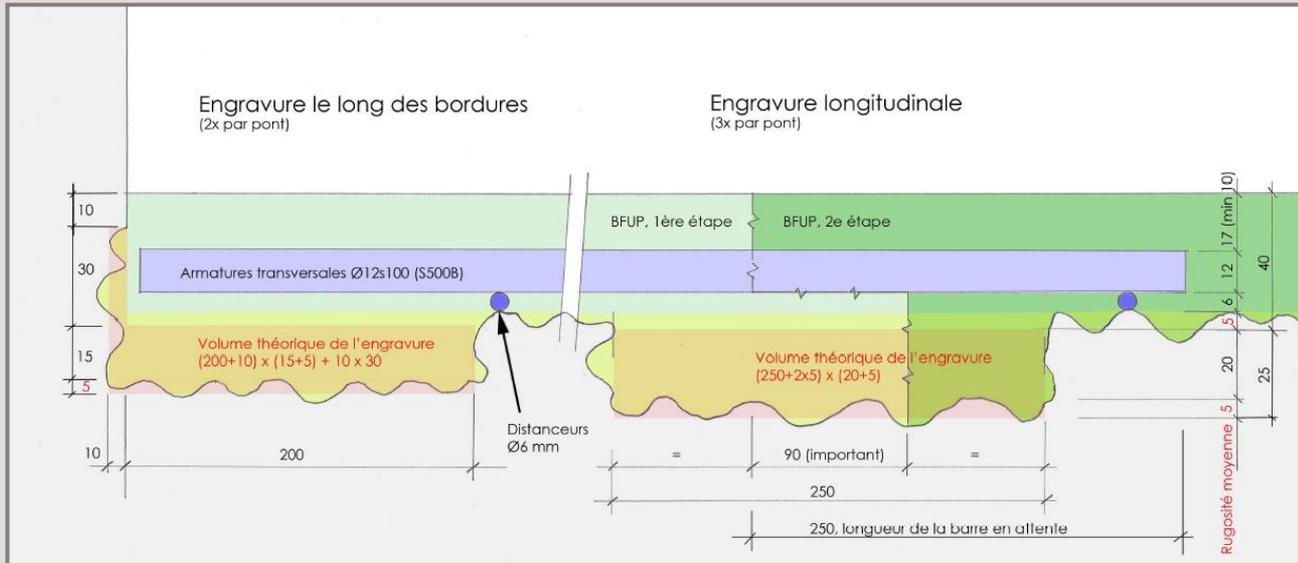


8. Développement de la solution BFUP





8. Développement de la solution BFUP





8. Développement de la solution BFUP

Pourquoi un PBD ?

- **Étanchéité totale au droit des joints de travail du BFUP** (éviter tout apport d'eau pouvant activer le développement de la RAG).
- **Garantir l'adhérence du MA-H au support BFUP.** (Eviter une solution flottante avec des risques de circulation d'eau).
- **Limiter les épaisseurs de BFUP** pour des raisons économiques : le PBD assure une protection des armatures dont l'enrobage théorique est localement insuffisant (Une surépaisseur de 1 cm de BFUP engendre un surcoût nettement supérieur à la mise en œuvre d'une étanchéité).



8. Développement de la solution BFUP

Quelques aspects logistiques !!!

BFUP : 50'000 m², soit 2290 m³

- *Fibres métalliques (env. 3%) : env. 540 t*
- *Fumée de silice: 500-750 t*
- *Ciment : 2200-2500 t*

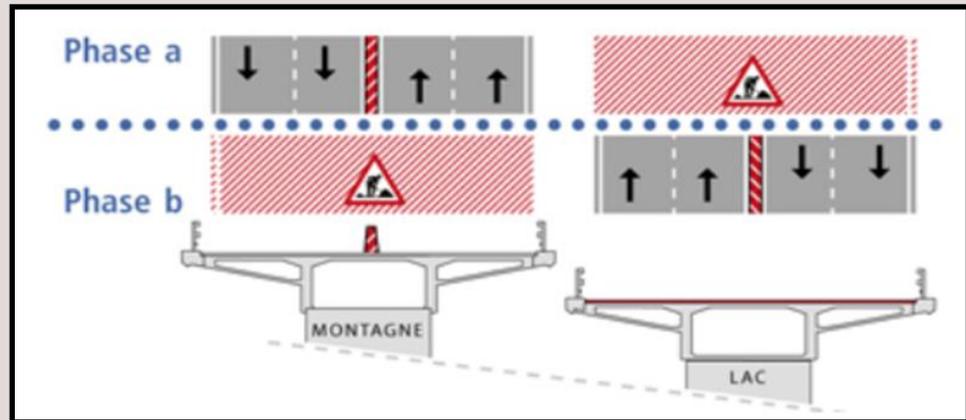
Etapas jusqu'à 50 m³/j centrale in situ



Planning :

Phase a : 2014

Phase b : 2015





8. Développement de la solution BFUP





9. Conclusions

- ❖ **Important changement en cours de réalisation** nécessitant un retour en phase de projet.
- ❖ **Intense collaboration d'équipe** (*MO + BAMO – auteur du projet – expert(s) – entreprise – direction des travaux*).
- ❖ **Délais très courts** pour développer une solution innovante encore jamais mise en application pour un ouvrage de cette envergure (1^{ère} mondiale).



- **Co-Auteurs rapport «Diagnostic relatif à la RAG» :**
Dr P. Kronenberg, Dr J.-G. Hammerschlag, Dr Ch. Merz et Dr B. Houriet, 20.11.2013
- **Co-Auteurs rapport «RAG - Proposition de mesures de réhabilitation» :**
Dr B. Houriet et H. Muehlberg, 28.11.2013
- **Auteur rapport Laboratoire « Renf. BFUP - Validation par essais de rupture » :**
Prof. Dr. E. Brühwiler, 20.11.2013
(Sur la base des essais sur dalles réalisés à l'EIA Fribourg: Prof. Dr. Daia Zwicky)
- **Auteur note de recommandation «Intervention pour garantir la résistance et la durabilité du tablier » :**
Prof. Dr. E. Brühwiler, 20.11.2013
- **Rapport « Revêtement du viaduc de Chillon – Interface BFUP – revêtement »**
Prof. A.-G. Dumont, 20.05.2014



*Aucun de nous ne sait ce que nous savons tous,
ensemble »*

• Euripide, dramaturge

Merci pour votre attention