

JOURNÉE TECHNIQUE :

Les BFUP en réhabilitation d'ouvrages de génie civil

Séquence académique: Trois chapitres choisis

Eugen Brühwiler – EPFL Lausanne Suisse

PIARC France
ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE
COMITÉ FRANÇAIS

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

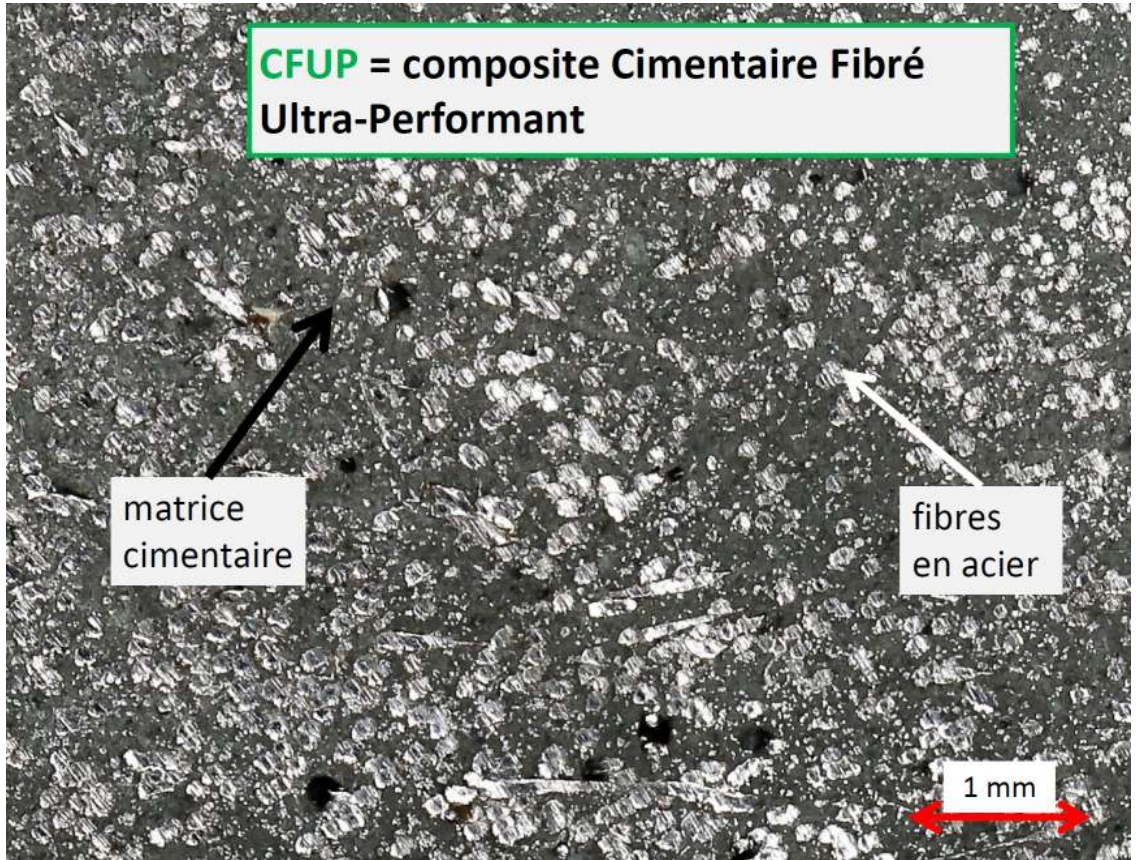
Office fédéral des routes OFROU

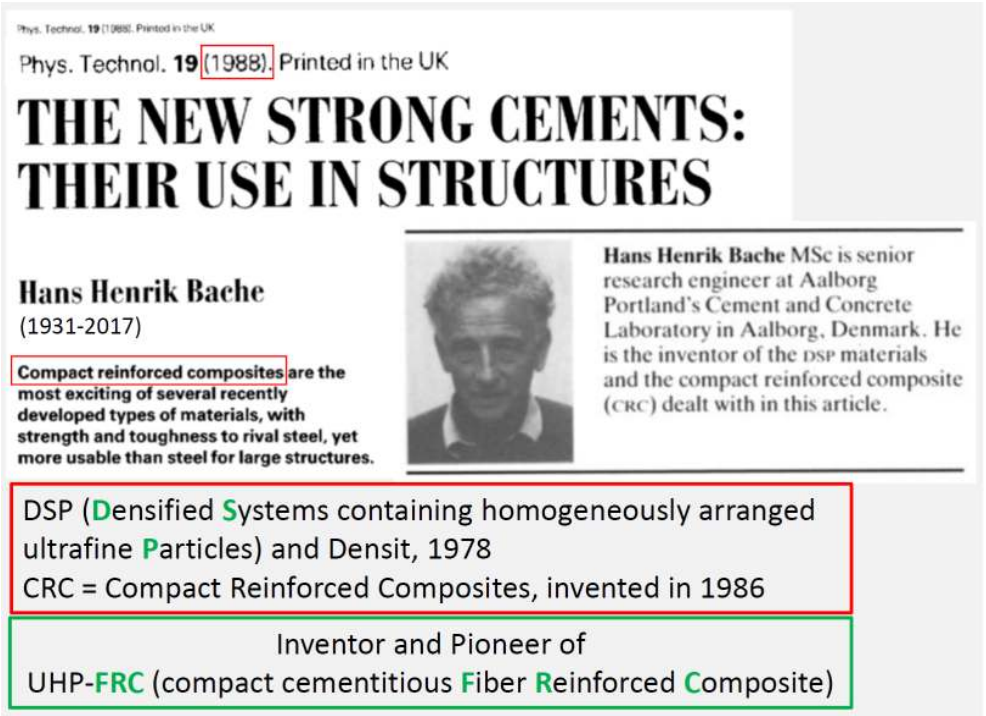
IMGC

Table des matières

1. Étanchéité de dalles de pont améliorées au moyen du CFUP
2. Contrôle de qualité: essais sur éprouvettes et magnétoscopie
3. Ouvrages d'art en CFUP armé précontraint

Conclusion sur l'impact environnemental du CFUP




Phys. Technol. **19** (1988). Printed in the UK

THE NEW STRONG CEMENTS: THEIR USE IN STRUCTURES

Hans Henrik Bache
(1931-2017)

Compact reinforced composites are the most exciting of several recently developed types of materials, with strength and toughness to rival steel, yet more usable than steel for large structures.

Hans Henrik Bache MSc is senior research engineer at Aalborg Portland's Cement and Concrete Laboratory in Aalborg, Denmark. He is the inventor of the DSP materials and the compact reinforced composite (CRC) dealt with in this article.

DSP (**D**ensified **S**ystems containing homogeneously arranged ultrafine **P**articles) and Densit, 1978
CRC = Compact Reinforced Composites, invented in 1986

Inventor and Pioneer of
UHP-**FRC** (compact cementitious **F**iber **R**einforced **C**omposite)


1. Étanchéité de dalles de pont améliorées au moyen CFUP armé

CFUP : étanchéité intrinsèque à l'eau

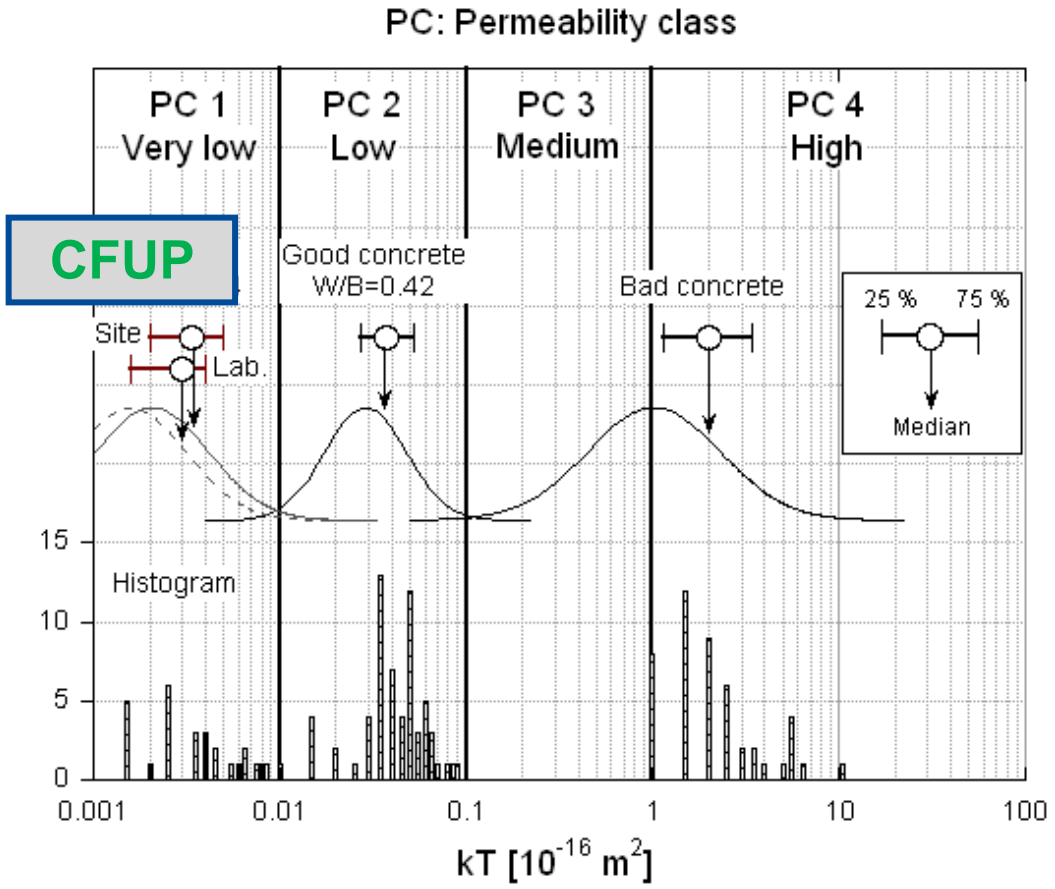


barrière

- La compacité complète optimisé des matrices des **CFUP**s empêche l'infiltration de l'eau ou de vapeur.
- Comme l'eau de gâchage est complètement consommée lors du durcissement du **CFUP**, les pores capillaires communicants sont très limités.

➔ *Les essais de «durabilité-béton» effectués sur des **CFUP**s ne peuvent que fournir les meilleurs résultats… si l'éprouvette est correctement confectionnée !*

CFUP : étanchéité intrinsèque à l'eau



SIA_2052 absorption capillaire: $45\ \mathrm{g/m^2}.\sqrt{h}$ (exigence)

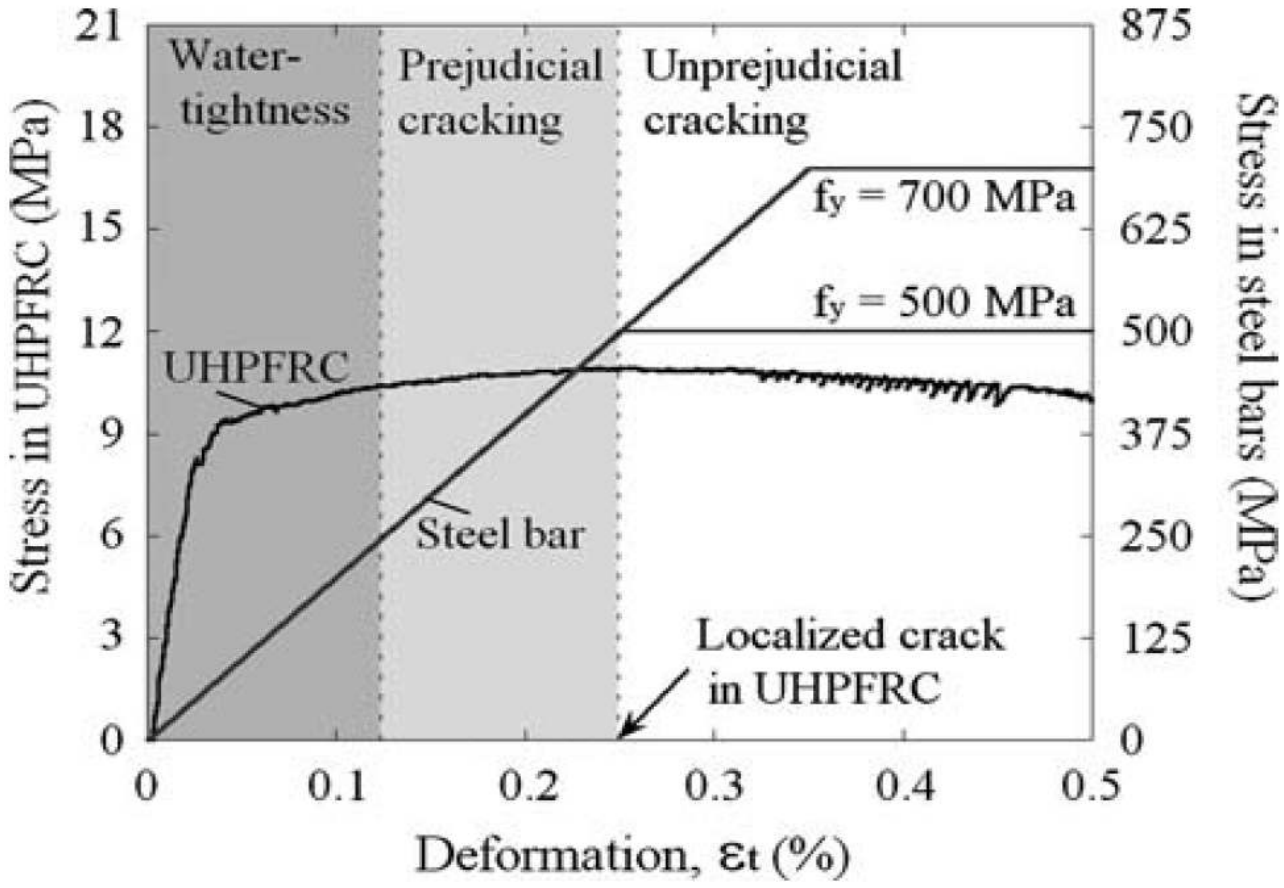
CFUP écrouissant: étanchéité et absence de fissures à l'état de service

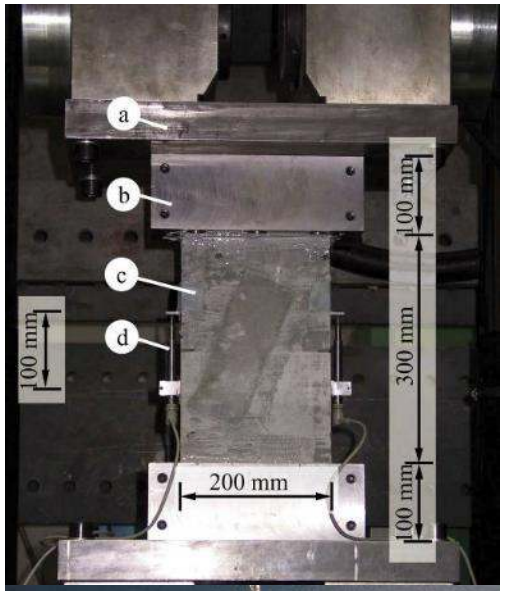
2004: essai de perméabilité à l'air Torrent sur dalle de pont étanchée au moyen du **CFUP**

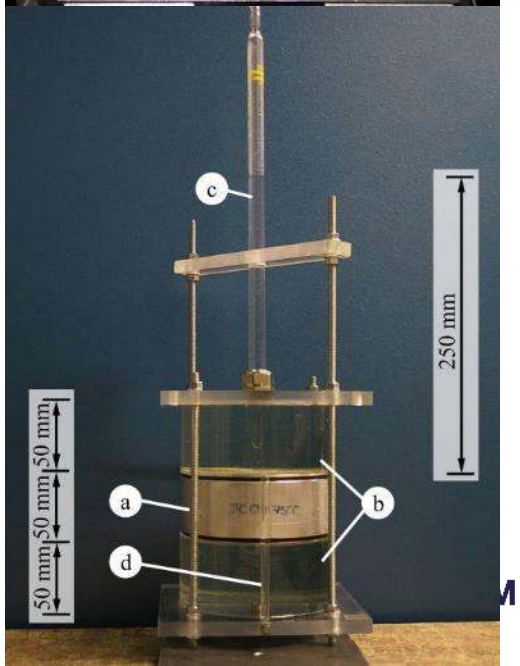


Perméabilité à l'eau des CFUP écrouissants sous traction

[Charron, Denarié, Brühwiler, 2006] :



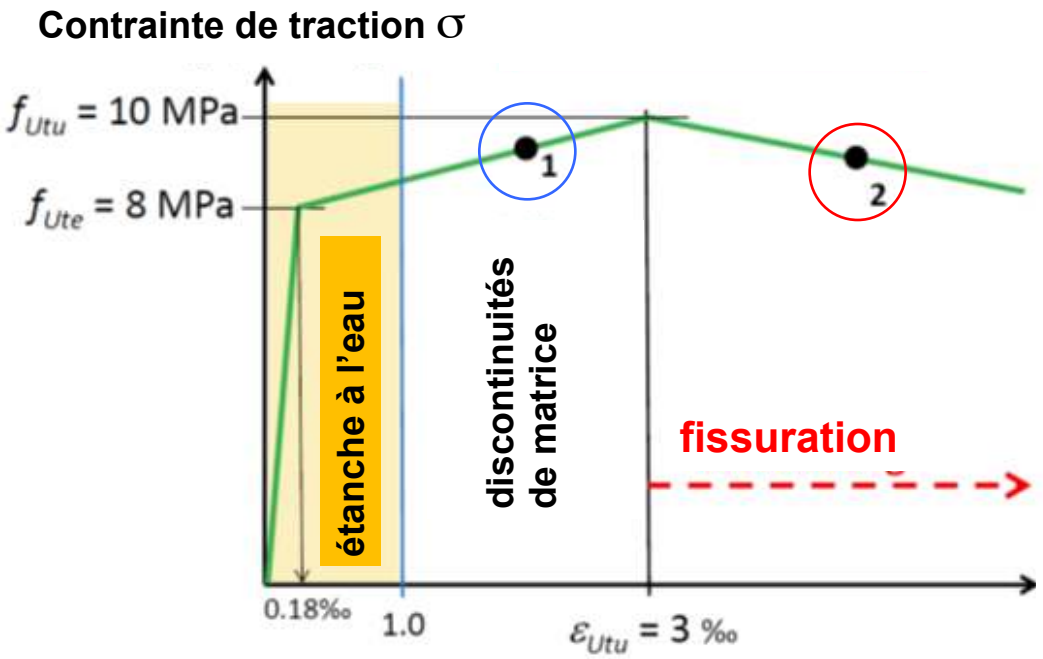


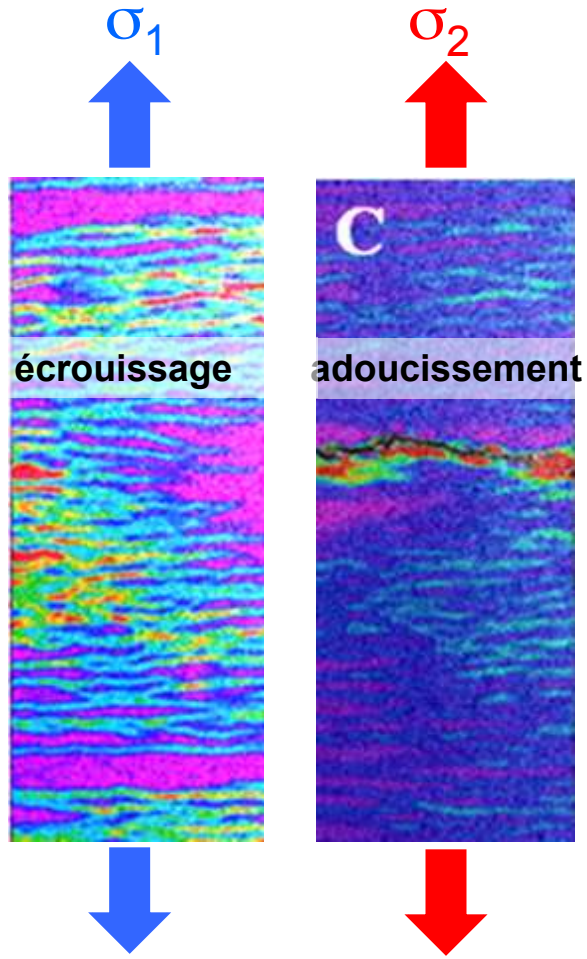


➔ *étanche à l'eau jusqu'à une déformation de 1,3‰*

➔ *sans fissure jusqu'à environ 2.5‰*

CFUP Sorte UA / UB : comportement à la traction avec écrouissage

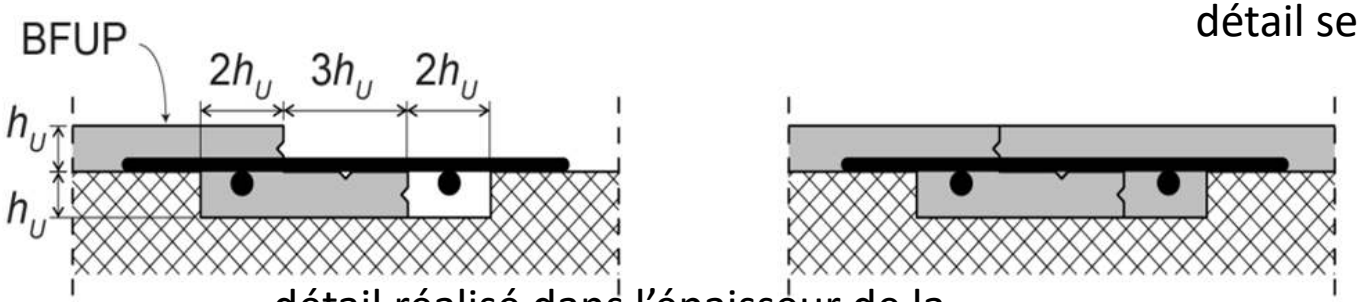




- étanche à l'eau jusqu'à 1.0‰ de déformation
- comportement écrouissant pour la reprise d'auto-contraintes dues aux déformations entravées d'éléments mixte CFUP – béton

Couche de CFUP: Joint de travail – étanchéité à l'eau sous effort de traction

détail selon CT SIA 2052



détail réalisé dans l'épaisseur de la couche de CFUP si h_U > 45mm



Validation de l'étanchéité à l'eau du joint (essais LMC-EPFL, janvier 2015):

Poutre mixte CFUP – béton armé fléchie; CFUP et détail sollicités à la traction:

Résultats:

➔ étanche à l'eau à l'état limite de service

➔ La couche de CFUP atteint sa résistance avant que le joint perd son étanchéité.

PIARC France

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
Office fédéral des routes OFROU

IMGC

CFUP-age d'une dalle de roulement d'un pont routier



Contrôle de l'étanchéité de la couche de protection en CFUP



2004 2014

Pas de signe d'un processus d'endommagment

- ✓ Étanchéité de la couche de CFUP: inchangé
- ✓ Quantité de chlorures: très fable, premiers mm
- ✓ Résistance à l'arrachement : > 1.5 MPa (rupture dans le béton de support)

intrados laissé intentionnellement à l'état corrodé: *pas d'évolution de la corrosion d'armature !*

2. Contrôle de la qualité d'exécution: essais sur éprouvettes

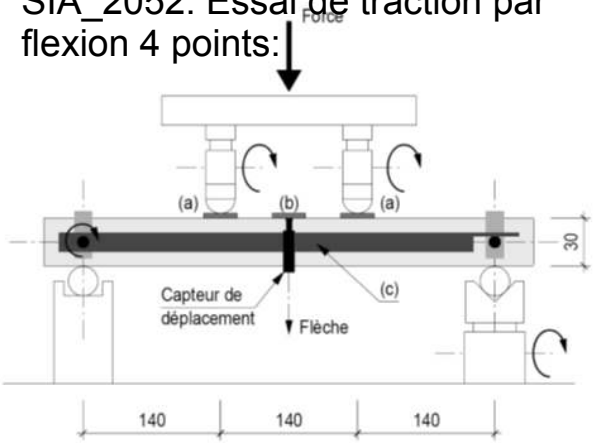
Problématique des essais de «matériau» sur éprouvettes:

- pas d'acceptance internationale entre diverses méthodes d'essai CFUP.
- Le résultat dépend de la qualité de la confection des éprouvettes et de l'exécution de l'essai. Il n'est pas toujours représentatif du matériau.
- Les essais de traction par flexion et traction direct sont (trop) discriminants: la section la plus faible (souvent à cause d'un défaut de fabrication) détermine le résultat… et donc, une moyenne ou un fractile 5% calculés de ces résultats n'est pas représentatif pour le comportement du CFUP montrant une importante capacité de redistribution !
- Les résultats d'essai après 28 (ou 14) jours arrivent beaucoup trop tard sur le chantier. Il n'est plus possible de corriger une exécution CFUP !

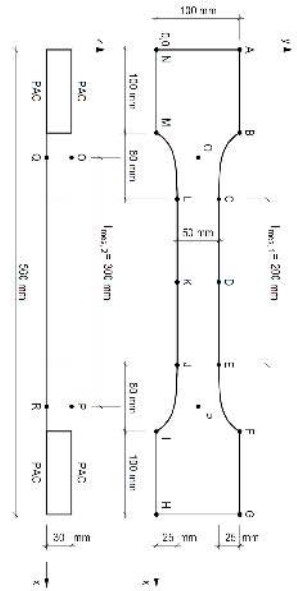
➔ *Essais sur éprouvettes sont inutiles pour contrôler la qualité lors de l'exécution !*

➔ *Alternative: **protocoles de charges à chaque confection et fourniture de CFUP frais**… et **essai de magnétoscopie***

SIA_2052: Essai de traction par flexion 4 points:



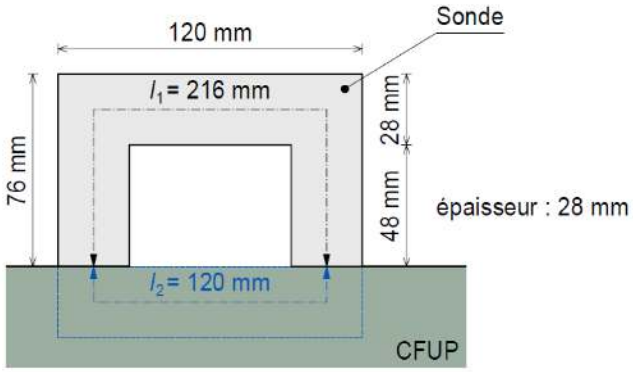
SIA_2052: Essai de traction direct:



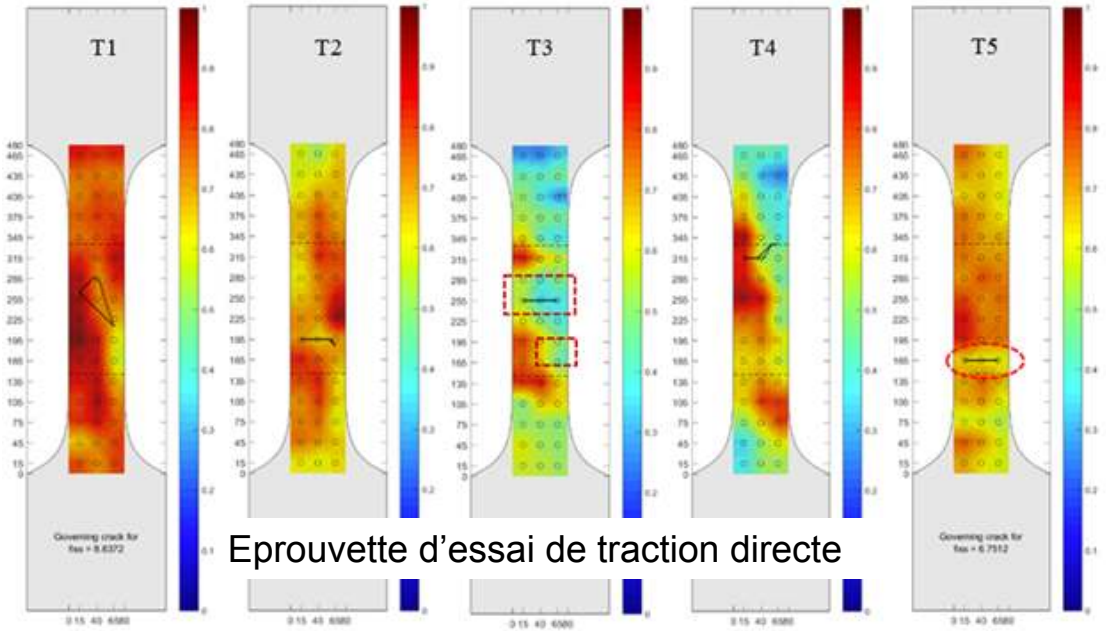
2. Contrôle de la qualité d'exécution: essais de magnétoscopie

- ➔ Méthode <u>non-destructive</u> pour déterminer la teneur et l'orientation des fibres en acier dans un CFUP d'une structure (p.ex. sur la surface d'une couche de CFUP ou d'éléments en CFUP) sur la base de la conductivité électromagnétique des fibres d'acier.
- ➔ Profondeur de mesure = environ 30 mm
- ➔ L'essai peut être effectué déjà 20 heures après le coulage.
- ➔ Des grandes surfaces peuvent être mesurées en peu de temps.

SIA_2052: Essai de magnétoscopie:



Carte de teneur et orientation de fibres, obtenue par magnétoscopie:



Eprouvette d'essai de traction directe

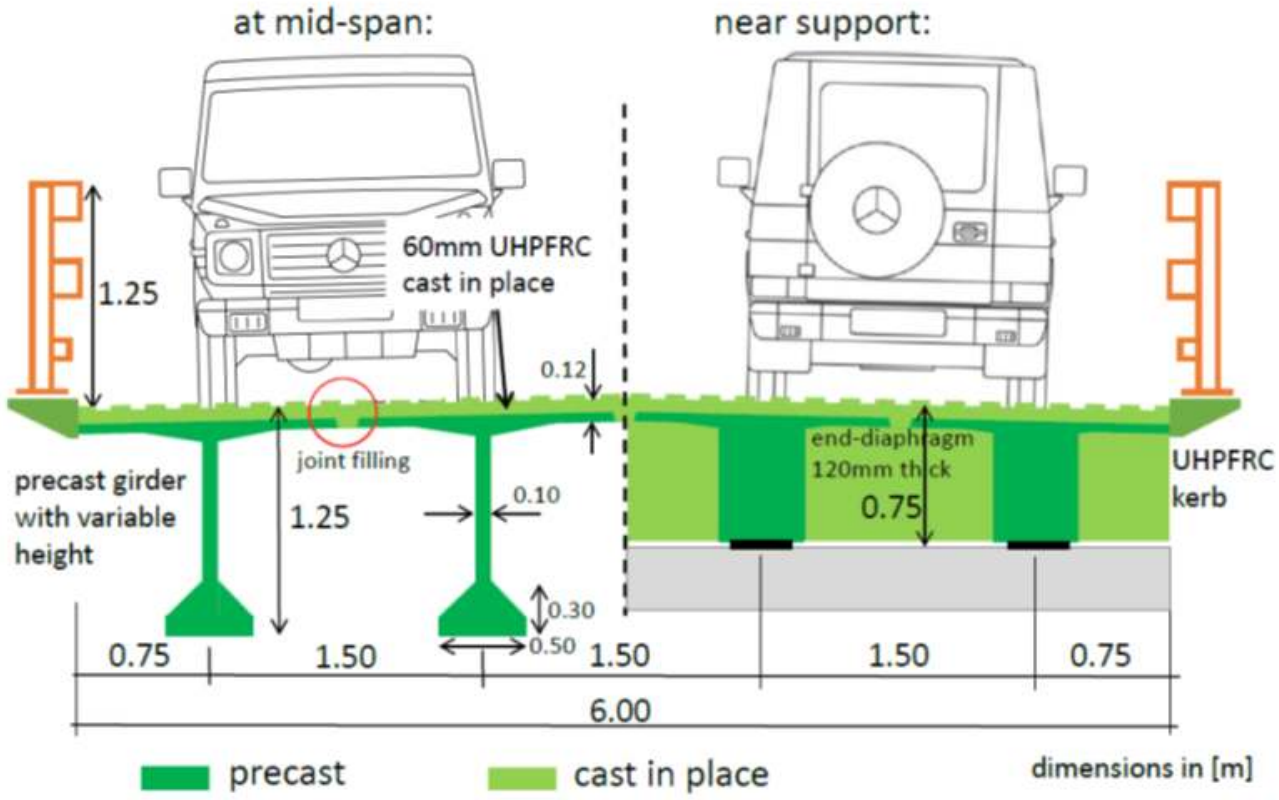


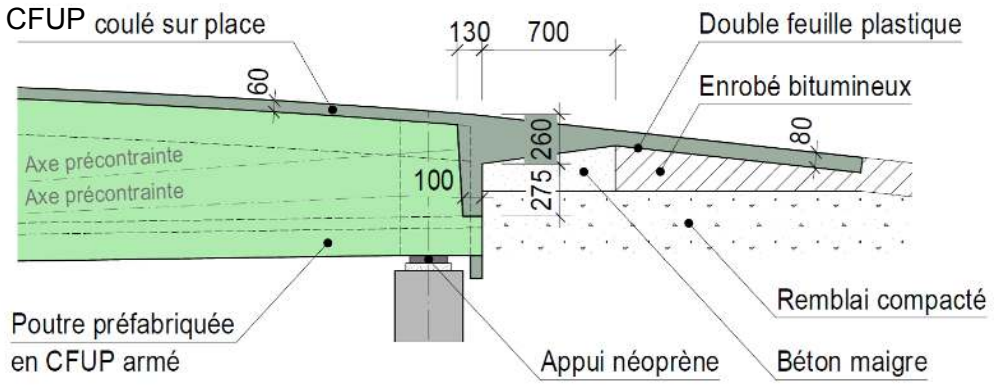


3. Conception, dimensionnement et construction de nouvelles structures en CFUP armé précontraint



Conception et construction d'un pont-route en CFUP armé précontraint





Caractéristiques :

- Superstructure avec hauteur variable (=> gabarit hydraulique, niveaux des routes adjacentes)
- 4 poutres préfabriquées (espacement optimisé par rapport au modèle de charge de la norme)
- Poutres de bord avec bordure de dimensions réduites
- CFUP coulé in-situ pour claver les poutres préfa et pour créer und structure monolithique
- Dalle de transition tirée au-delà de la culée
- Surface CFUP carrossable (saupoudrage de sable de quartz)
- Construction accélérée

PIARC France

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
Office fédéral des routes OFROU

IMGC

montage



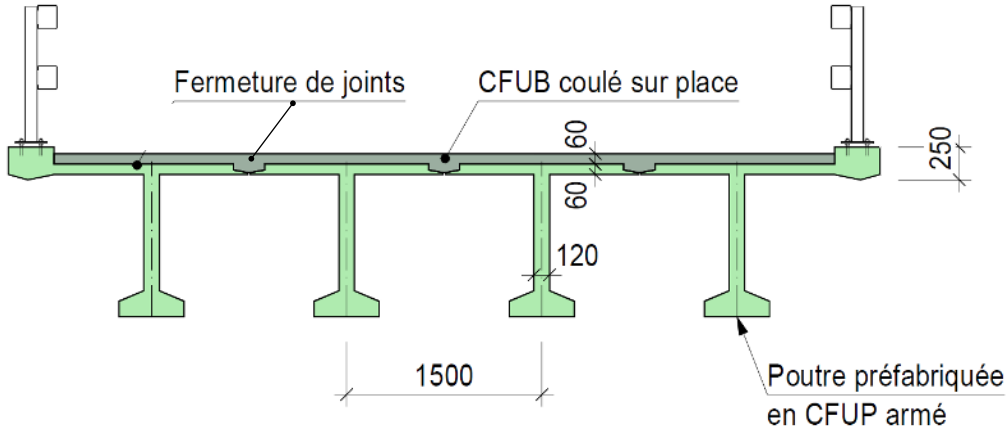
préfabrication



Photos Walo + Holcim



CFUP coulé in-situ



PIARC France

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral des routes OFROU

IMGC





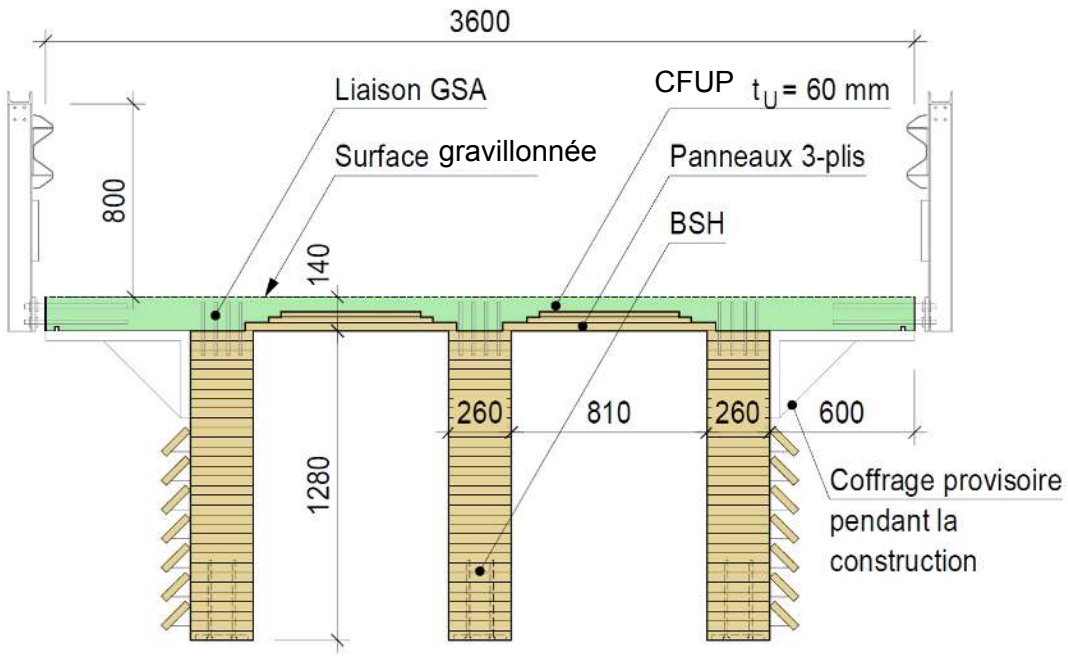




Photos: E.Brühwiler 20 July 2021

Fruttlibrücke (2020): pont-route mixte en **bois** – **CFUP**

Projet: Edgar Kälin, ingénieur, Einsiedeln



faible impact environnemental (presque CO_2-neutre)



PIARC France

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral des routes OFROU

IMGC

Impact environnemental du CFUP: *approche système*

Matériau de construction **CFUP** : forte teneur en ciment et acier

➔ *impact environnemental important par kg de matériau !*

Cependant: les plus petites quantités possibles de **CFUP** sont utilisées pour :

➢ renforcer les **structures existantes** pour leur utilisation future et éviter l'approche actuelle « démolition - reconstruction »

➢ construire de **nouvelles structures légères** permettant une faible consommation de matériaux ainsi qu'une faible utilisation d'énergie pendant le processus de construction rapide

conduisant à un *faible impact environnemental global*, par ex. par m^2 de surface utile, et de faibles besoins d'entretien.

Réutilisation du CFUP: 1) **Ré-emploi** d'éléments en CFUP; 2) **Recyclage**: CFUP peut être broyé pour obtenir des agrégats et décomposé en ses composants (poudres et fibres) par fragmentation électrodynamique

Documentation OFROU – CFUP



Table des matières:

1. Introduction
2. Propriétés de matériau du CFUP et du CFUP armé
3. Principes du dimensionnement
4. Eléments mixtes CFUP-béton pour le renforcement et l'étanchement des éléments en béton armé
5. Principes de la conception d'ouvrages d'art en CFUP armé précontraint
6. Exécution et assurance de qualité
7. Développement durable

à paraitre: fin 2022

PIARC France

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
Office fédéral des routes OFROU

IMGC