



Retour d'expérience sur le renforcement de buses métalliques par BFUP projeté

Info-flash du STRRES

Jeudi 18 avril 2019

Sébastien BOUTEILLE, CETU



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

Centre d'Études des Tunnels

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr



Retour d'expérience sur le renforcement de buses métalliques par BFUP projeté

Lauréat de l'appel à projets 2016 du CIRR : Régénération et renforcement de tunnels, voûtes, buses métalliques et galeries par coque ultra mince en BFUP projeté (FREYSSINET - Lafarge Holcim)

Présentation en mai 2018 de la partie cadre expérimental, info-flash du STRRES «Le BFUP en renforcement structurel du génie civil »



Sommaire

- 1 - Comment projeter un BFUP ?
- 2 - Validations au travers du cadre d'expérimentation
- 3 - Chantier expérimental dans le cadre du projet innovation
- 4 - Bilan du chantier expérimental
- 5 - Perspectives

1 – Comment projeter un BFUP ?



→ Formule adaptée sans activateur
Conservation des fibres (2 à 3,25% en volume)
Compromis : viscosité \Leftrightarrow cisaillement



→ Malaxeur planétaire à moteur hydraulique
Vérification de la contrainte de cisaillement

→ Pompe à piston adaptée, flexibles à raccords sertis
Grande longueur : tuyauterie métallique rectiligne



→ Buse de projection modifiée
Compresseur puissant

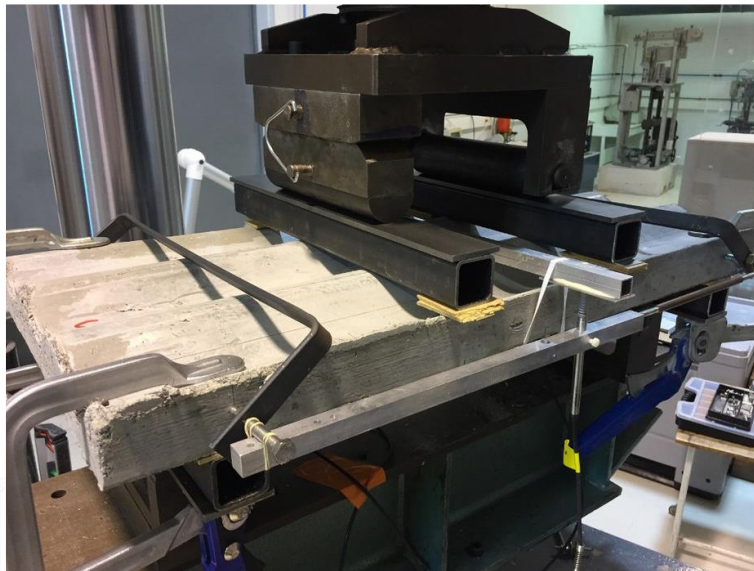
2 – Validations au travers du cadre d'expérimentation

Caractérisation selon NF P 18-470 (*applicable au BFUP coulée*)

$$f_{ck} = 130 \text{ Mpa}, f_{ctkel} = 6 \text{ Mpa}$$

Justification selon NF P 18-710 (*applicable au BFUP FM et $f_{ck} > 150 \text{ MPa}$*)

Essais expérimentaux



12 corps d'épreuve surface ondulée



Chargement élément témoin

2 – Validations au travers du cadre d'expérimentation

Justification du comportement de l'ouvrage par différentes modélisations

Calcul anneau comprimé

Modèle hyperstatique linéaire, coque = EF 3D linéaire ou non linéaire

Modèle EF 2D élasto-plastique modélisation explicite du sol

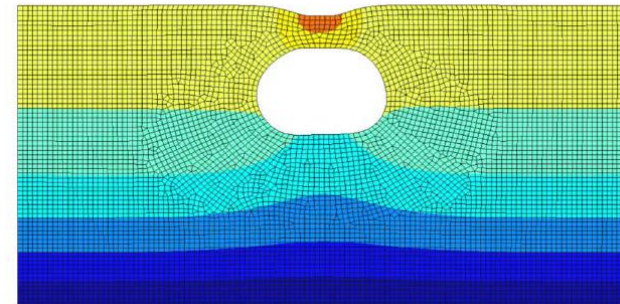
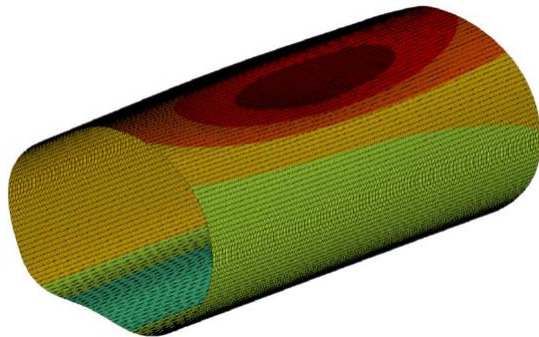
A retenir pour les applications travaux

Déformations de la buse à renforcer

Connaissance des caractéristiques du sol en place

Épaisseur de la couverture (influence des charges d'exploitation)

Modèle EF 2D perd la vérification de la diffusion



3 - Chantier expérimental

“Buse à bétail” sur la RN70 (RCEA) – MOA DIRCE



Buse circulaire : 3,65 m
Longueur : 30,30 m (18,70
Profil en long 5,5% (N-S)
Couverture : 1,25 à 1,50 m

Buse ARMCO – 6 plaques par
section transversale
Distance entre onde 150 mm
Profondeur d'onde 50 mm



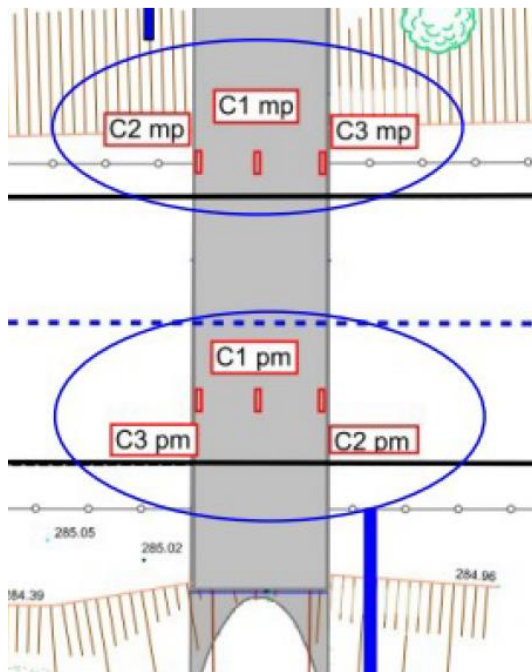
Corrosion sans déformation excessive (IQOA 3)

Travaux de renforcement : 01/10/18 (1,5 mois)

3 - Chantier expérimental

Phase préparatoire

- 1 – Sondage géotechnique
- 2 – Analyse vibratoire (couverture faible)



Résultats de mesures en voûte
Moyenne fréquence < 20 Hz

Moyenne vitesse < 0,3 mm/s
Vitesse max = 1,2 mm/s

Déplacement moyen < 15 μm
Max = 40 μm

Vitesses transversales piedroit /2

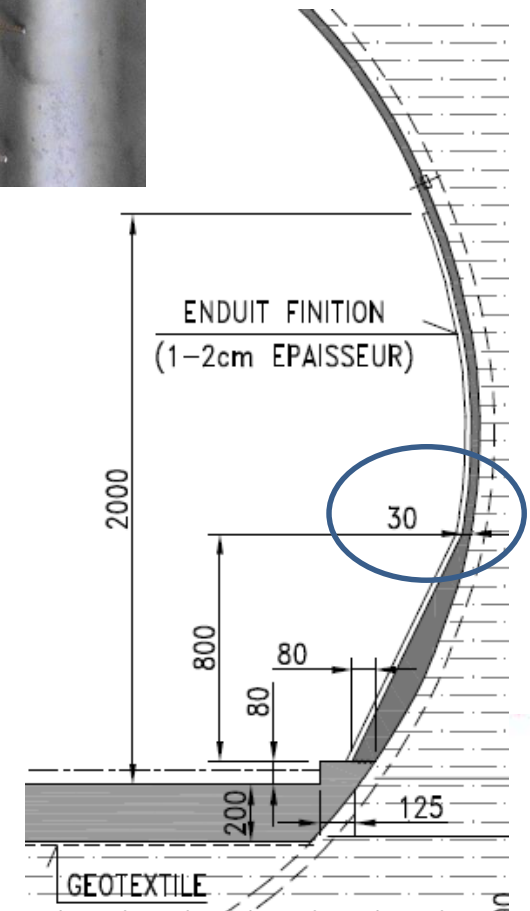
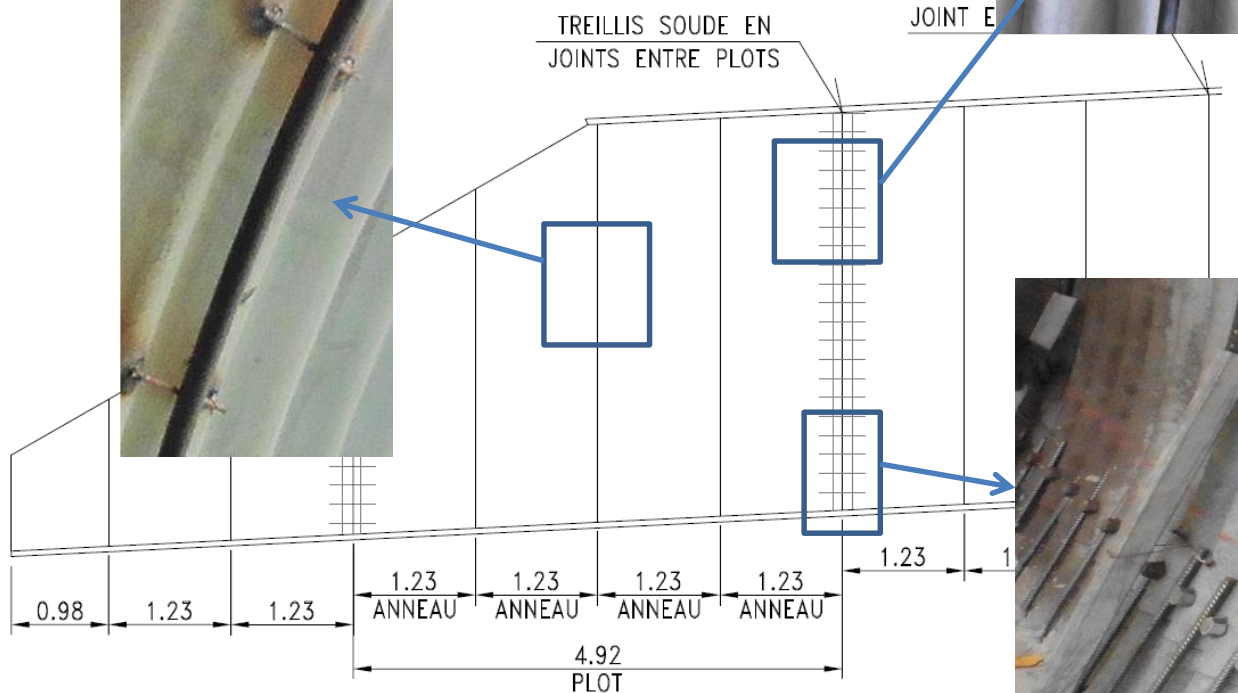
Base de référence

Cas le plus défavorable de l'IN1226 : $F < 5\text{Hz} \Rightarrow$ seuil 2 mm/s

3 - Chantier expérimental

Phasage

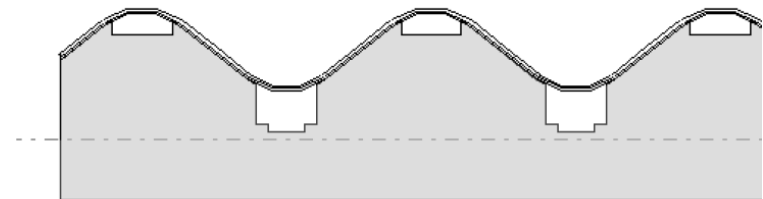
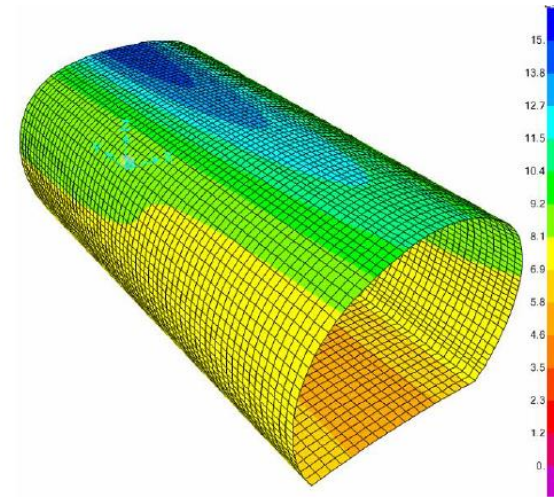
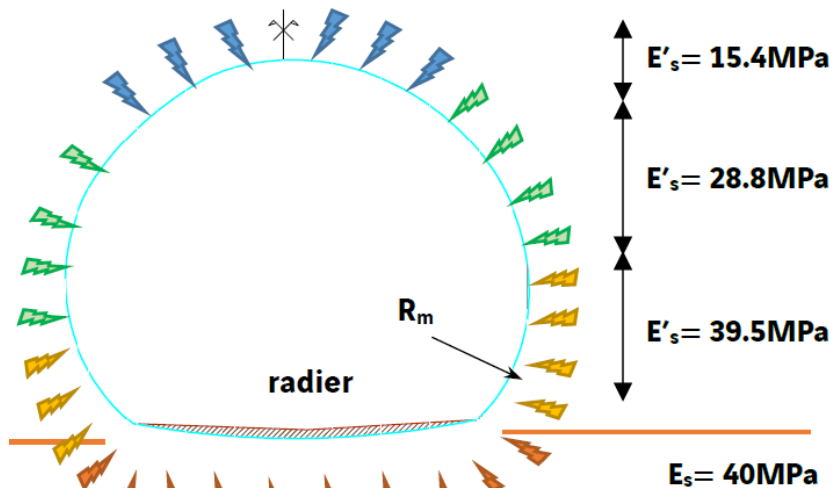
- 0 – Hydrosablage de la buse
- 1 - Radier en BA
- 2 - Coque BFUP : 1 plot = 4 anneaux/jour
Réalisation en 2 passes



3 - Chantier expérimental

Justification

Modèle 3D avec E_s issu des sondages
 Vérification des sections de BFUP hors boulonnage



3 - Chantier expérimental

Mise en place des postes de travail

Une équipe dédiée :

malaxage – pompage - projection

Un atelier avec surélévation du malaxeur



3 - Chantier expérimental

Résultats d'essais

Relevé des épaisseurs (6 lignes de mesures valides) :

valeurs moyennes sur une ligne de mesure > 31,5 mm

valeurs individuelles locales > 25 mm (6 mesures sur 60 < 30 mm)

Dosage en fibres : résultats conformes > 160 kg/m³

Compression, exemple de résultats

1j 59 MPa - **2j** 93 MPa - **7j** 125 MPa - **14j** 155 MPa - **28j** 143 MPa

Valeurs à 28j comprises entre 143 et 172 MPa

Essais de flexion 4 pts : $f_{ct,el} = 7,43 \text{ MPa} > 6,3 \text{ MPa}$

Essais de flexion 3 pts : $\sigma_{moy \text{ équivalent}} = 21,6 \text{ MPa} > 20,9 \text{ MPa}$

3 - Chantier expérimental

Les améliorations en cours de chantier

Pesée systématique et précise des approvisionnements

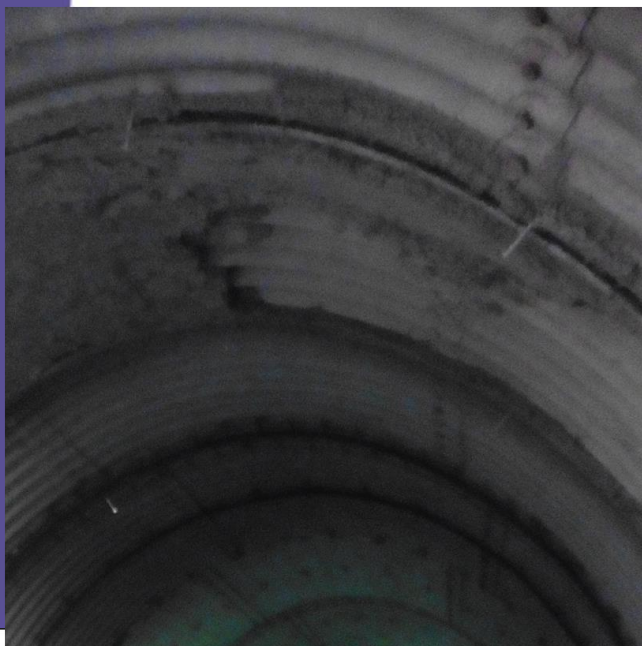
Un atelier avec plateforme surélevée du malaxeur



3 - Chantier expérimental

Les améliorations en cours chantier

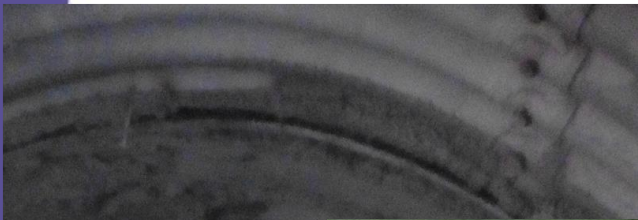
Maintien du BFUP projeté en voute



3 - Chantier expérimental

Les améliorations en cours de chantier

Maintien du BFUP projeté en voute -> mise en place d'un treillis en voûte
Mise en place de joints de plot systématiques



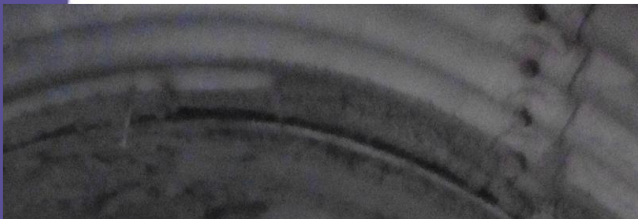
3 - Chantier expérimental

Les améliorations en cours de chantier

Maintien du BFUP projeté en voute -> mise en place d'un treillis en voûte

Mise en place de joints de plot systématiques

Difficulté de reprise en cas de non réalisation continue



4 – Bilan du chantier expérimental

Un renforcement structurel aux objectifs atteints

Réalisation d'une coque mince en BFUP projeté

Justifications structurelles complètes et validées

Une équipe dédiée qui s'approprie le procédé

Méthodes de contrôles opérationnelles



Un procédé encore innovant

Chaîne de production « fragile » - Rendement à optimiser

Maitrise des épaisseurs

Sensibilité aux conditions environnementales

Essais de validations surfaces de reprise > 24h

Méthodologie d'application aux buses hydrauliques (sans radier)

5 – Perspectives

Développements techniques potentiels

- Essais de flexion 3 points sur une dalle qui aurait été bétonné en 2 fois pour vérifier les possibilités de rechargement ou de reprise de bétonnage dans l'épaisseur du renforcement
- Caractériser la montée en compression au jeune âge
- Essai avec activateur (pour travaux SNCF) type RIG 3MPa / 3heures
- Essai de tenue au feu (avec CSTB) : exigences ISO 120 (pour réparations structurelles RATP...)
- Ouvrages maritimes : pénétration des chlorures, zones de marnage

Chantiers en cours ou futurs

- Buse sur A10 Briis sur Forges (Cofiroute) en fin de réalisation - *Cerema Blois*
- Buse sur A64 Tarbes (ASF) - prévue été/automne *Cerema Toulouse*
- Potentiel chantier expérimental avec une buse hydraulique sans radier (méthodologie de réalisation spécifique, fonctionnement étanche)

Merci

Questions??



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Contacts

Freyssinet, Rueil-Malmaison,
bertrand.petit@freyssinet.com ;
alain.huynh@freyssinet.com ;
francois.teply@freyssinet.com ;

Ductal® - LafargeHolcim,
sebastien.bernardi@lafargeholcim.com ;
julien.derimay@lafargeholcim.com ;
laurence.trucy@lafargeholcim.com ;

CETU Bron

catherine.larive@developpement-durable.gouv.fr ;
sebastien.bouteille@developpement-durable.gouv.fr ;
david.chamoley@developpement-durable.gouv.fr ;

IFSTTAR, Champs-sur-Marne,
pierre.marchand@ifsttar.fr ;

DIR CE / SIR de Lyon

julien.cabut@developpement-durable.gouv.fr ;
eric2.guyot@developpement-durable.gouv.fr ;

CEREMA DTER CE / DLA Autun
benoit.clement@cerema.fr ;
Raphael.Maupou@cerema.fr ;

