



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

---

## *Info-flash du STRRES*

*Jeudi 18 avril 2019*

Sébastien BOUTEILLE, CETU



NOTRE TALENT  
DÉFIE LE TEMPS



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET SOLIDAIRE

Centre d'Études des Tunnels

[www.cetu.developpement-durable.gouv.fr](http://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 »



Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET SOLIDAIRE

# 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

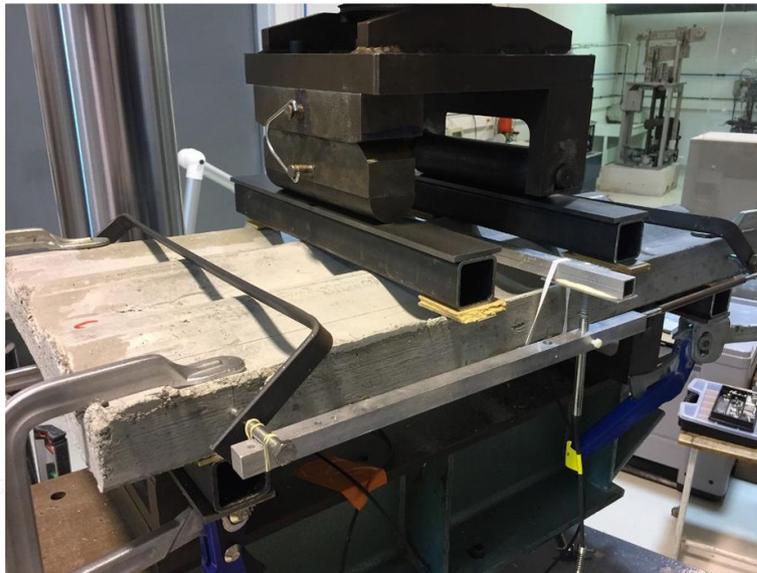
## 2 – Validations au travers du cadre d'expérimentation

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

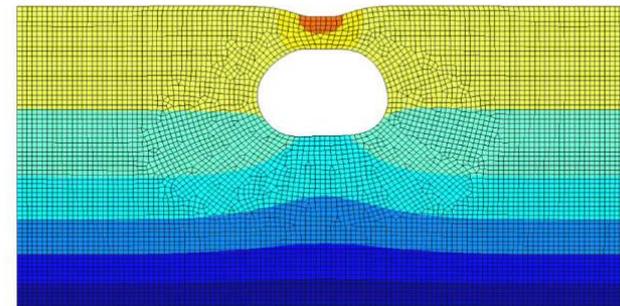
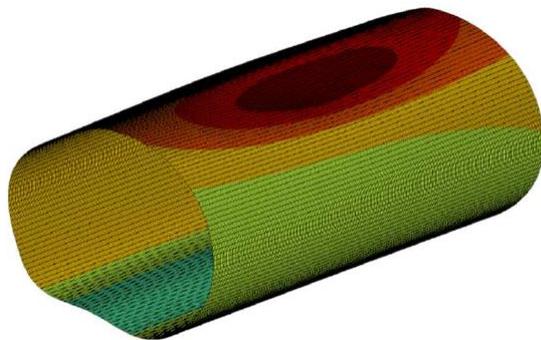
A retenir pour les applications travaux

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



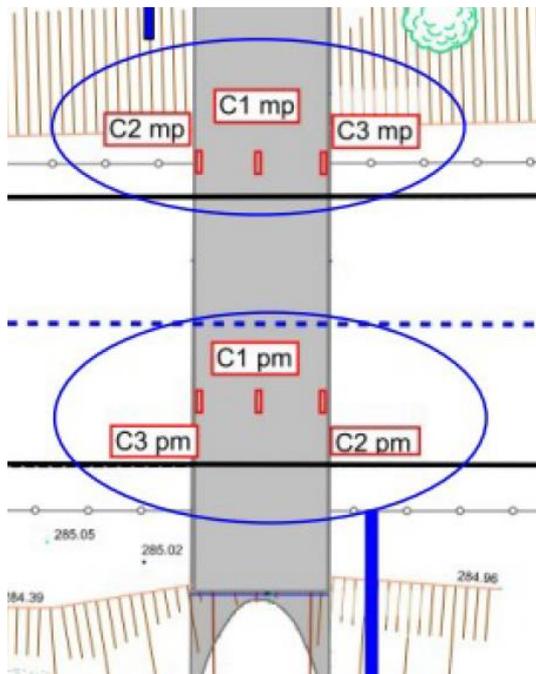
Corrosion sans déformation excessive (IQOA 3)

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  $\mu\text{m}$   
Max = 40  $\mu\text{m}$

Vitesses transversales piedroit /2

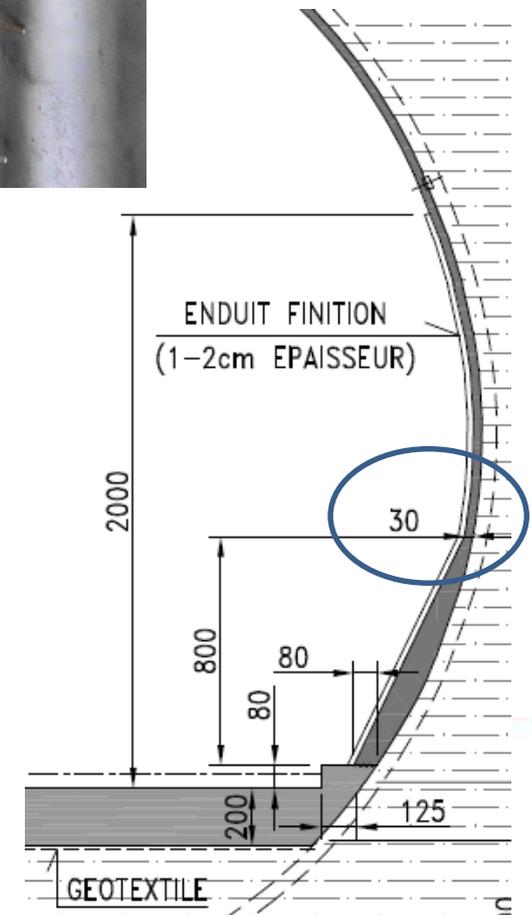
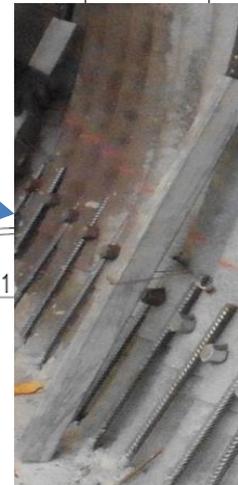
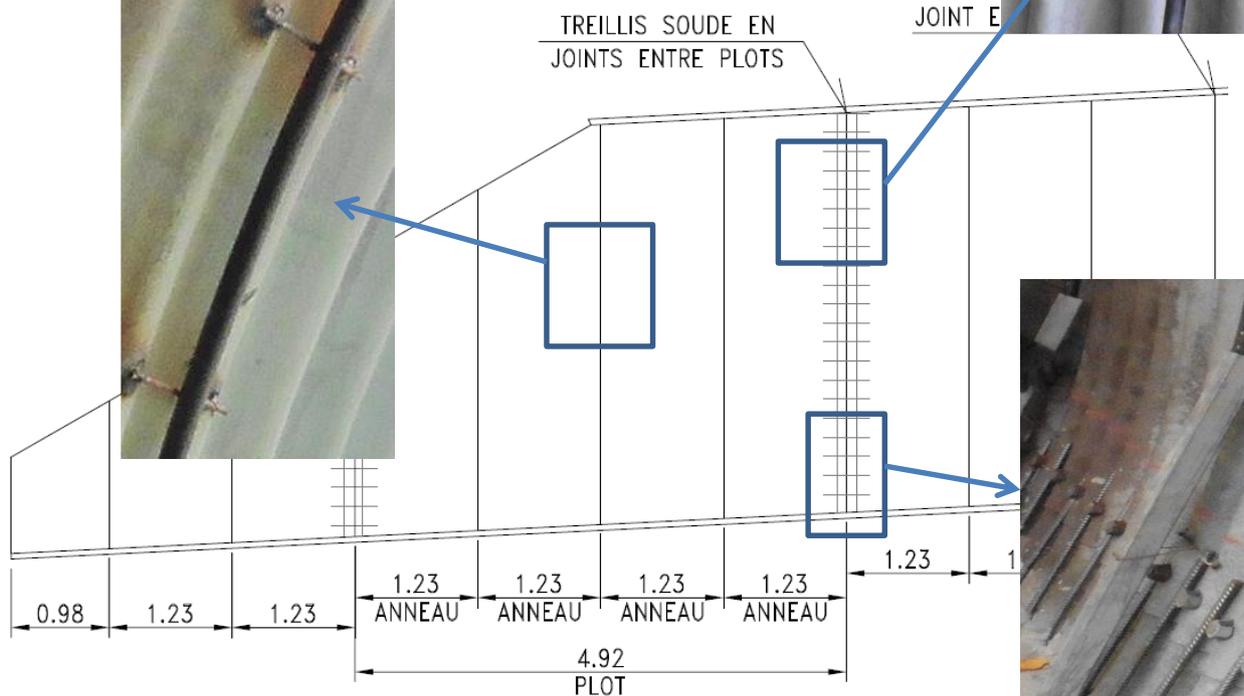
Base de référence

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

# 3 - Chantier expérimental

## Phasage

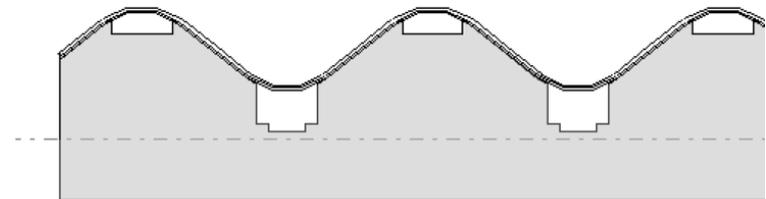
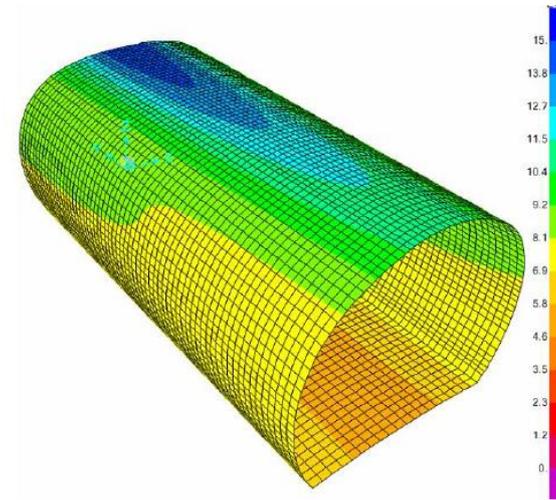
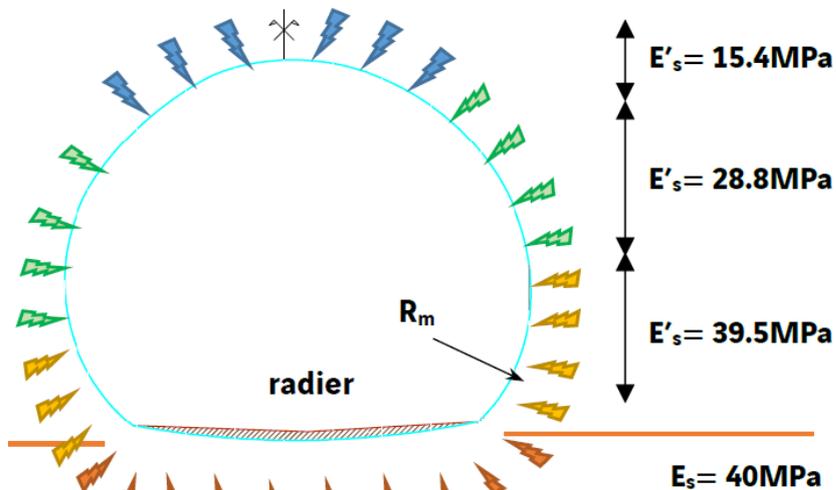
- 0 – Hydrosablage de la buse
- 1 - Radier en BA
- 2 - Coque BFUP : 1 plot = 4 anneaux/jour  
Réalisation en 2 passes



# 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/m<sup>3</sup>

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

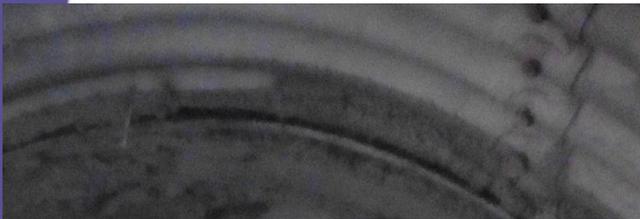
Maintien du BFUP projeté en voute



## 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



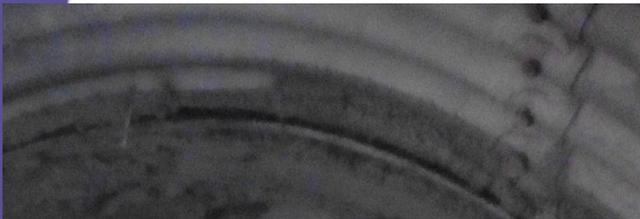
## 3 - Chantier expérimental

### 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](mailto:bertrand.petit@freyssinet.com) ;  
[alain.huynh@freyssinet.com](mailto:alain.huynh@freyssinet.com) ;  
[francois.teply@freyssinet.com](mailto:francois.teply@freyssinet.com) ;

Ductal® - LafargeHolcim,  
[sebastien.bernardi@lafargeholcim.com](mailto:sebastien.bernardi@lafargeholcim.com) ;  
[julien.derimay@lafargeholcim.com](mailto:julien.derimay@lafargeholcim.com) ;  
[laurence.trucy@lafargeholcim.com](mailto:laurence.trucy@lafargeholcim.com) ;

## CETU Bron

[catherine.larive@developpement-durable.gouv.fr](mailto:catherine.larive@developpement-durable.gouv.fr) ;  
[sebastien.bouteille@developpement-durable.gouv.fr](mailto:sebastien.bouteille@developpement-durable.gouv.fr) ;  
[david.chamoley@developpement-durable.gouv.fr](mailto:david.chamoley@developpement-durable.gouv.fr) ;

IFSTTAR, Champs-sur-Marne,  
[pierre.marchand@ifsttar.fr](mailto:pierre.marchand@ifsttar.fr) ;

## DIR CE / SIR de Lyon

[julien.cabut@developpement-durable.gouv.fr](mailto:julien.cabut@developpement-durable.gouv.fr) ;  
[eric2.guyot@developpement-durable.gouv.fr](mailto:eric2.guyot@developpement-durable.gouv.fr) ;

CEREMA DTER CE / DLA Autun  
[benoit.clement@cerema.fr](mailto:benoit.clement@cerema.fr) ;  
[Raphael.Maupou@cerema.fr](mailto:Raphael.Maupou@cerema.fr) ;

