



Ductal



Foreva BFUP-S/Ductal®

La réparation des buses métalliques autrement

Julien DERIMAY, LafargeHolcim

Bertrand PETIT, Freyssinet

Nantes, 4 Octobre 2018

- **I - Aux origines de l'innovation:**

La formulation d'un BFUP qui tient la pente, ne coule pas mais se pompe.

- **II - Du laboratoire au chantier:**

Le développement d'une chaîne de production de BFUP malaxé, pompé, projeté pour applications structurelles.

- **III - Evaluation et expérimentation:**

Point d'avancement sur le projet IDRRIM 2016 de régénération des buses métalliques par coque BFUP 2% FM projeté

- **IV - Nouveaux développements:**

BFUP 3,25% FM projeté et autres applications envisageables



I - Aux origines de l'innovation

Les BFUP au services des ouvrages

Désormais encadrés par les normes NF P18-470 et NF P18-710, les BFUP peuvent être appliqués plus facilement sur les ouvrages.

1.1 – Ductal®: Une gamme de BFUP

Une matrice
cimentaire
optimisée

Un ratio
Eau/Ciment
réduit

Des fibres
métalliques

Homogénéité

Porosité

Ductilité

Performances
Mécaniques

Compression: 130 MPa

Traction: 6 MPa

Propriétés
de Durabilité

Porosité à l'eau < 6%

Perméa. aux gaz $9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$

Péné. Chlorures $5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$

Cycle Gel/Degel 100%



Par la matrice cimentaire optimisée et par la présence de fibres, le matériau n'est fragile ni en compression ni en flexion. Les BFUP peuvent être considérés comme armé: ils contiennent près de 150kg/m³ de fibres

1.2 – Un matériau reconnu



- Recommandations AFGC – Juin 2013
- **Normes Françaises BFUP**
 - **NFP18-710: Dimensionnement**
 - **NFP18-470: Matériau**
 - A venir: Norme Exécution (NF P18-451)
- Cahier Technique Suisse **SIA2052**
- **Le coefficient K**
- Cartes Identités Matériaux
 - Caractéristiques mécaniques
 - Propriétés de durabilité

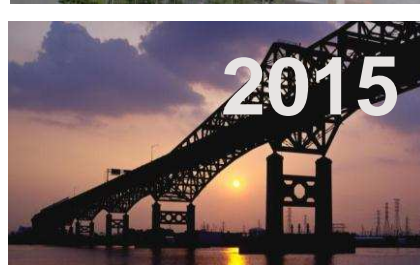
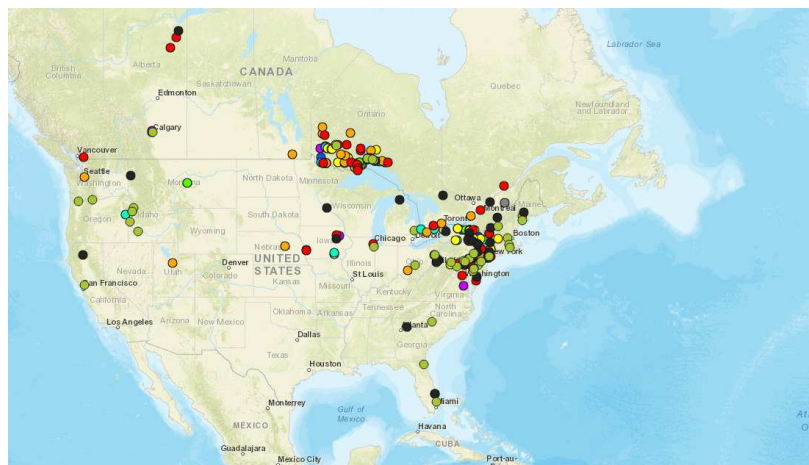
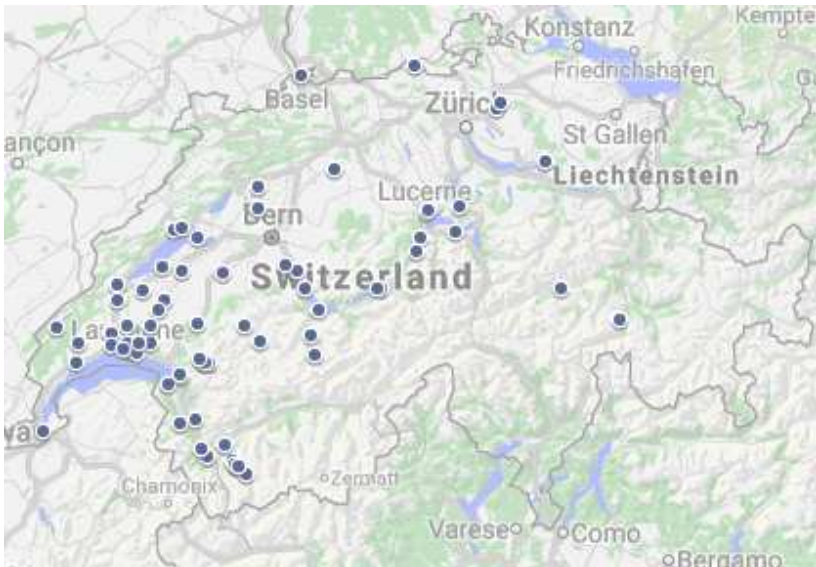
• **Selon la norme NF P18-470**

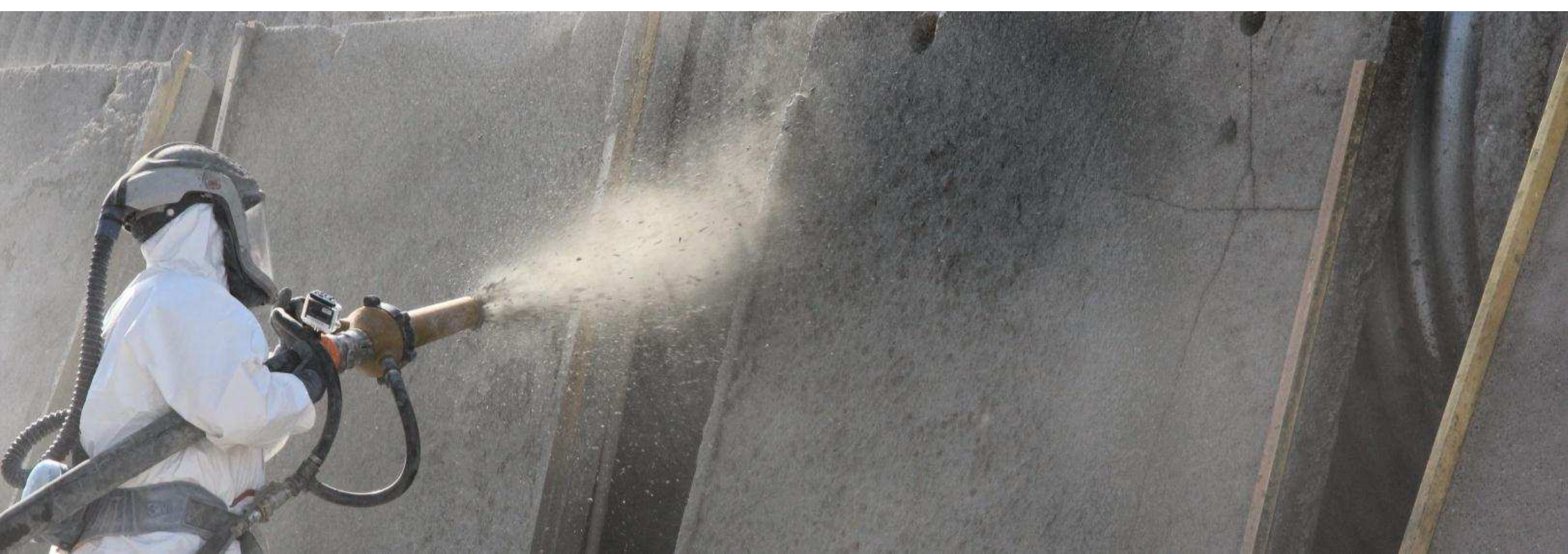
- Critères minimaux:
 - Compression: **130 MPa** caractéristique
 - Traction: **6 MPa** caractéristique (+T1)
 - Porosité à l'eau < 6%
 - Diffusion des chlorures: $5 \cdot 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$
 - Perméabilité aux gaz: $9 \cdot 10^{-19} \text{m}^2$
 - La consistance: Ca/Cv/Ct

• **Selon la norme NF P18-710:**

- Critères minimaux: BFUP-S
 - Compression: **150 MPa** caractéristique
 - Traction: **6 MPa** caractéristique (+T1)
 - Emploi de fibres métalliques (Type M)
 - Propriétés de durabilité

1.3 Avec de nombreuses références





Foreva® par Freyssinet
Une gamme de solutions pour la réparation

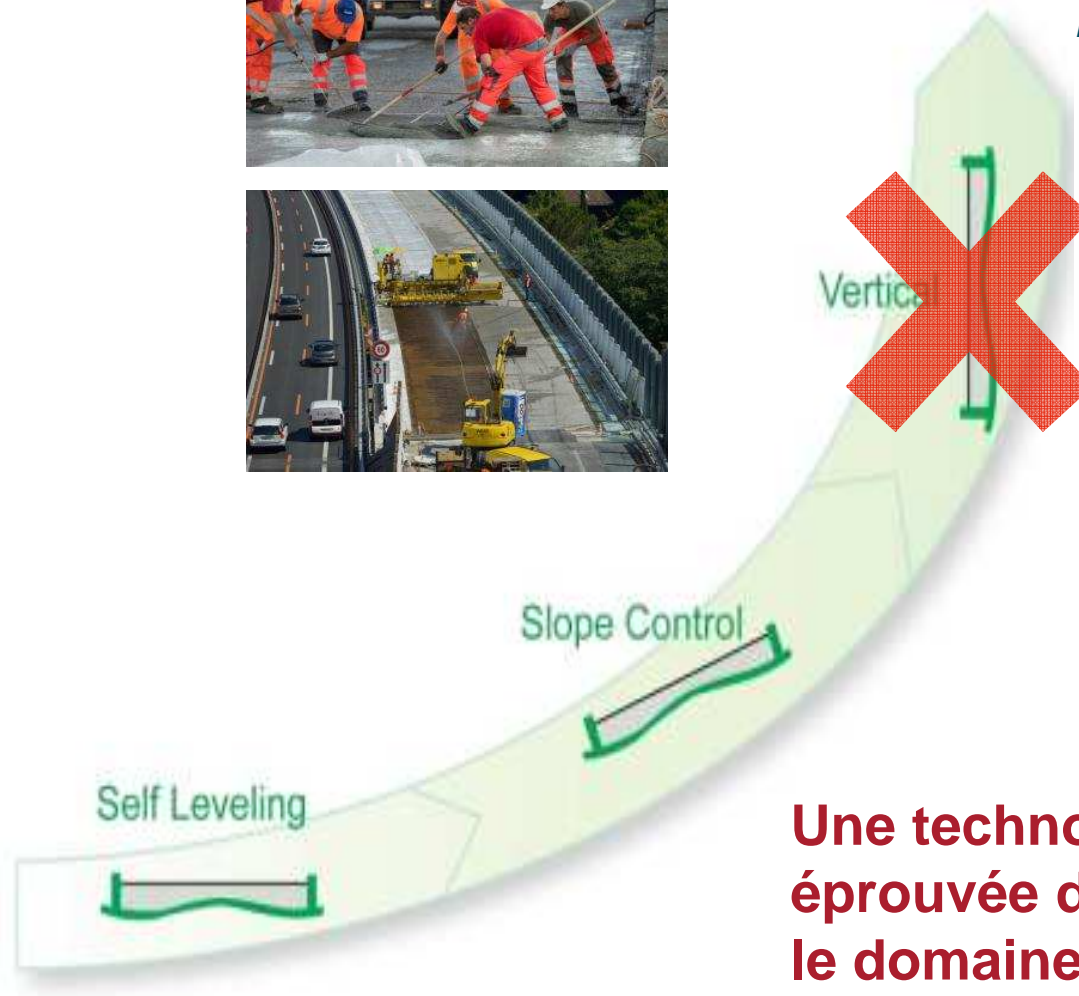
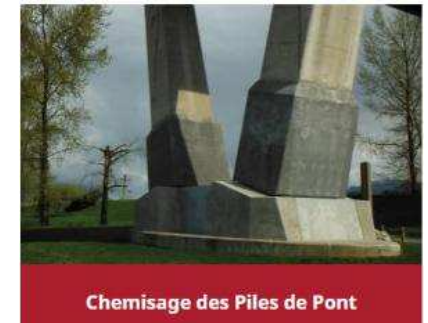


Ductal® par LafargeHolcim
Une gamme de BFUP au services des ouvrages

1.4 Les origines de l'innovation: Les limites rhéologiques



Ductal® coulé en place
→ **Coffrage**



**Une technologie maîtrisée et
éprouvée depuis 25 ans dans
le domaine du Génie Civil**

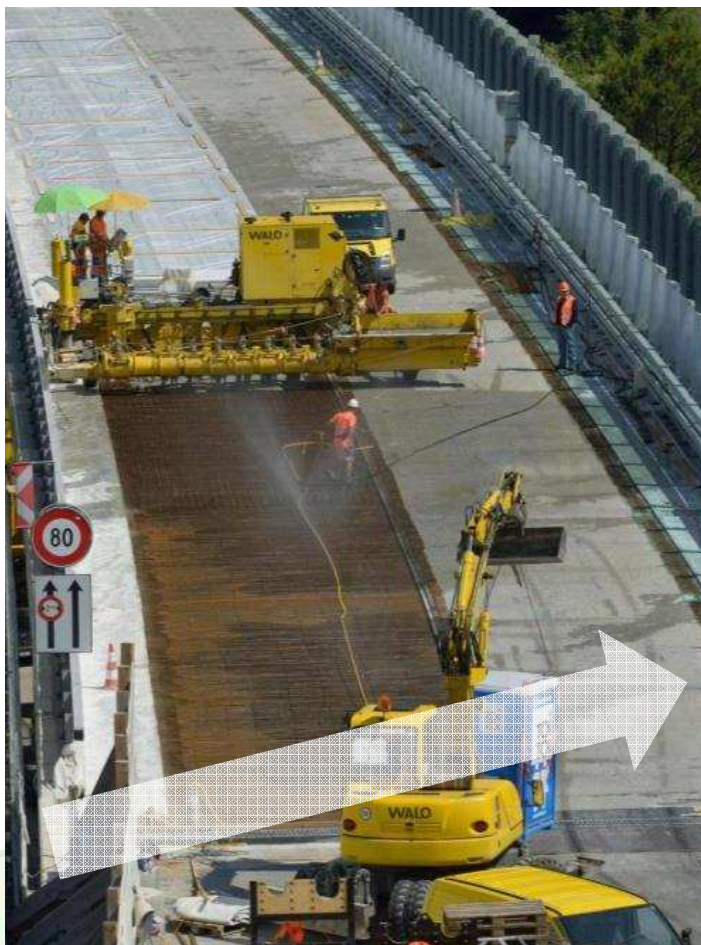
Innovant?



Maitrise de la rhéologie



Auto nivelant



Thixotrope



Tenir la pente

Ne pas couler

Sans coffrage

Pompable

Projeté

D'un BFUP auto-nivelant à un BFUP Projeté



Mai 2016

- Premiers essais de projection
- Contrôle de la Rhéologie
- Utilisation d'un robot
- Projection en diamètre 76



Novembre 2017

➤ Validation

- De la formule
- De la Rhéologie
- Des essais de contrôle
- Du procédé BFUP-S



D'un BFUP auto-nivelant à un BFUP Projeté

Nous bénéficions du référentiel normatif français spécifique au BFUP, **bien que non applicable au BFUP projeté.**

- NF P 18 470 - 2016 : Bétons - Bétons fibrés à Ultra Hautes Performances - Spécification, performance, production et conformité
- NF P 18 710 - 2016: Complément national à l'Eurocode 2 - Calcul des structures en béton : règles spécifiques pour les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP)

1^{er} Objectif

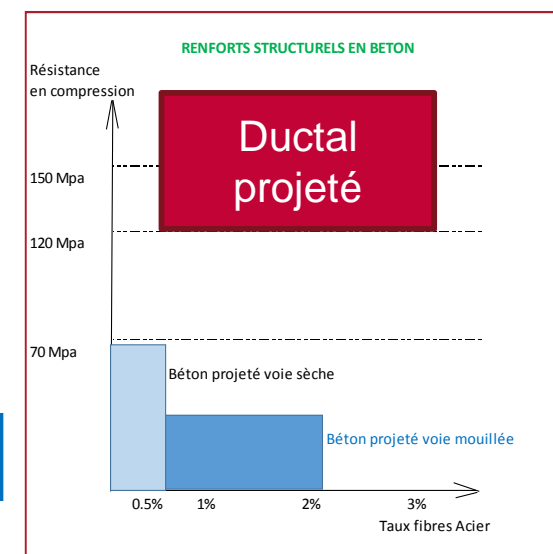
- Vérifier que le BFUP-S répond aux exigences de la norme NFP 18 470



- $f_{ck} \geq 130 \text{ Mpa}$
- Plus de 2% de fibres en volume



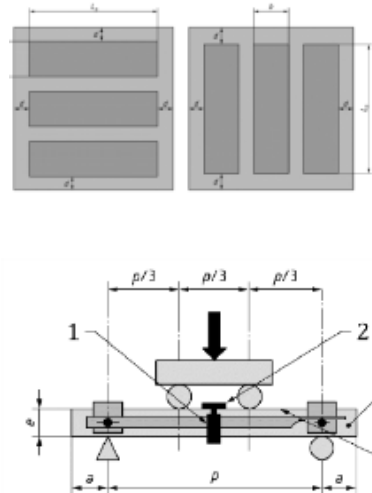
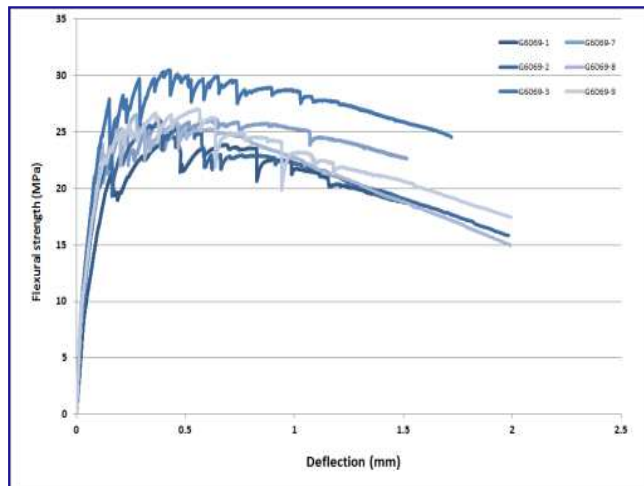
$150 \text{ MPa} \geq f_{ck} \geq 130 \text{ MPa}$



Orientation & distribution des fibres métalliques

Essais mécaniques

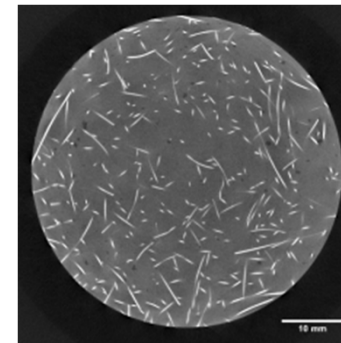
Essais de flexion sur prismes 7x7x28 cm, selon les 2 directions X et Y



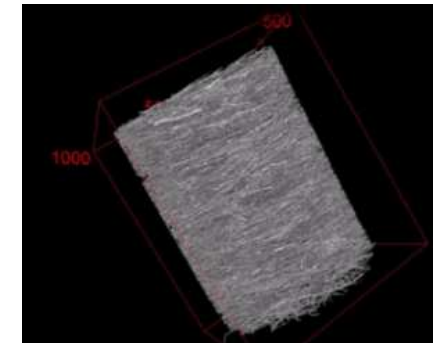
Valeur caractéristique de la limite d'élasticité en traction $f_{ctk,el} > 6 \text{ MPa}$

Analyse Tomographique

Carottes de BFUP-S perpendiculaires à la plaque



Section 2D (x,y) en plan



Reconstruction tomographique en 3D

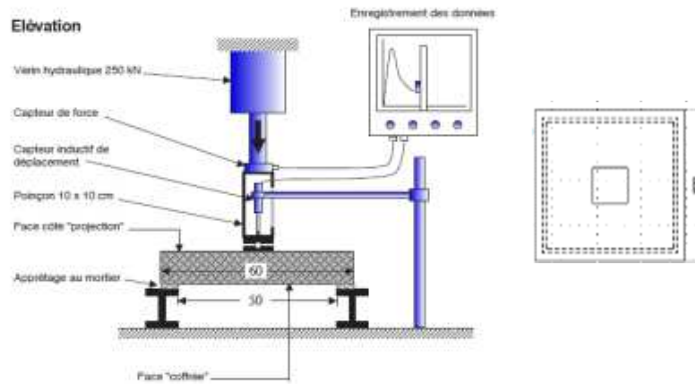
Les fibres sont orientées de manière isotropique en 2D, dans le plan perpendiculaire à la projection

Pas d'orientation préférentielle des fibres → 2D

D'un BFUP auto-nivelant à un BFUP Projeté

Energie d'absorption

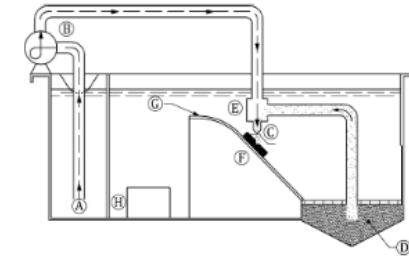
Norme EN 14 488-5
Représente la capacité d'absorption d'énergie induit par le choc de corps durs



	Epaisseur	Fibres métalliques	
		2.0%	3.3%
Energie absorption (Joule)	10 cm	3810	4570
	5 cm	1430	1780
	3cm	670	660

Résistance à l'abrasion hydraulique

- Objective: Represents abrasion due to water carrying alluvial aggregates
- Standard NF P 18 470 – Annex I



- $I = V / V_0$
- V = volume of the footprint in UHPC after test
- V0 = volume of the footprint in glass after test

	Fibres métalliques	
	2.0%	3.3%
I - Index de résistance à l'abrasion	0.7	0.5

I < 1 correspond à un matériau très résistant à l'abrasion



Ductal[®]

BFUP-S
Foreva
Ductal[®] inside by Freyssinet

II – Du Laboratoire au chantier

Le développement d'une chaîne de production de BFUP malaxé, pompé, projeté pour applications structurelles.

Les enjeux et le cahier des charges

- Fluide visqueux à seuil de cisaillement
- Taux de fibres métalliques: 2% à 3,25%
- Taux de pertes de matériaux < 10%
- Températures ambiantes: +5°C à +35°C
- Distance de la pompe au point de projection > 60m
- Projection au sol, en parement et au plafond
- Orientation 2D isotropes des fibres métalliques
- Finition réglée ou talochée



Adaptation des Moyens de production

L'analyse des différents postes de travail montre que le malaxage est le goulot d'étranglement

(fabrication de grande gâchée > 0,6m³)

Prémélange sec fabriqué en usine, conditionné en big bag avec housse de protection

Les pales et la puissance du malaxeur planétaire ont été optimisées pour mélanger un fluide à haut seuil de cisaillement

Avant et après ajout de l'adjuvant, le contrôle de production intègre la vérification du seuil de cisaillement (avant incorporation des fibres métalliques). *Critères Freyssinet.*

Après incorporation des fibres métalliques et malaxage, l'étalement du mélange fibré est vérifié par cône DIN et table à choc



Adaptation des Moyens de production

- Equipements et paramètres de pompage (pompe, réducteurs, conduits, pression, débit) doivent permettre de transporter sur plus de 60 m un fluide très particulier:
 - **haut seuil de cisaillement,**
 - **forte densité de fibres métalliques,**
 - **sensibilité à l'élévation de température,**
 - **avec risque**
 - **de formation d'oursins**
 - **d'essorage.**



Adaptation des Moyens de production

- La surface est soit
 - **laissée brute de projection,**
 - **réglée avec fibres apparentes,**
 - **réglée et talochée.**
- La finition est faite dès que possible après la fin de la projection;
- Le produit de cure est appliqué immédiatement après



Valeurs obtenues lors des essais avec du matériel de chantier

- Résistance en compression à 28 jours (sur carotte 7x14 cm)
 - Valeur caractéristique obtenue en essai \geq **150 MPa**
 - Module d'Young en compression: **40 GPa**
- Limite élastique de traction à 28 jours (sur prisme)
 - Valeur caractéristique obtenue en essai \geq **6,0 MPa**
- Résistance post-fissuration en traction à 28 jours (sur prisme entaillé)
 - Valeur caractéristique obtenue en essai \geq **7,5 MPa**
- Durabilité (valeur de la carte d'identité matériau)
 - Porosité accessible à l'eau / NF P 18-459 : **7,7%**
 - Perméabilité aux gaz / XP P 18-463, avec adaptations possibles apportées par l'Annexe A (NF P 18-470): **< 9 10⁻¹⁹ m²**
 - Mesure du coefficient de diffusion apparent des ions chlorures: **<0.5 10⁻¹² m²/s**
 - Tenue au gel-dégel / NF P 18-424 : **Pas d'altération**
 - Abrasion hydraulique / CNR : **0,7**

D'un BFUP auto-nivelant à un BFUP Projeté



Une carte d'identité du matériau et du procédé

Essais sur produit Durci à 28 j		% Fibres
<i>Carte d'identité du BFUP-S utilisée pour le dimensionnement</i>		2.00%
Valeur caractéristique obtenue en essai f_{ck} sur carottes 1 x 14 cm	MPa	130
<i>class of compressive strength</i>	MPa	130 /145
Limite élastique de traction sur prisme $f_{ct,el}$	MPa	6.0
Classe de comportement en traction		T1
Valeur caractéristique de la résistance post-fissuration f_{ctk}	MPa	6.0
Valeur moyenne de la résistance post-fissuration f_{ctkm}	MPa	6.5
Module d'Young en compression E_{cm}	GPa	40



Ductal[®]

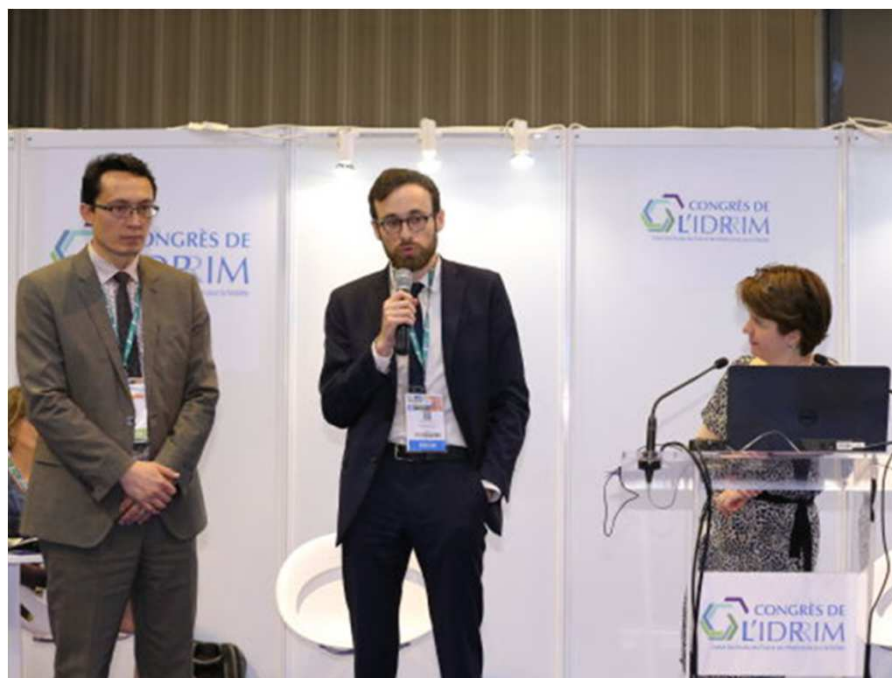


III – L'évaluation et experimentation

Le développement d'une chaîne de production de BFUP malaxé, pompé, projeté pour applications structurelles.

Projet d'innovation 2016

Lauréat de l'appel à projets 2016 : Régénération et renforcement de tunnels, voûtes, buses métalliques et galeries par coque ultra mince en BFUP projeté



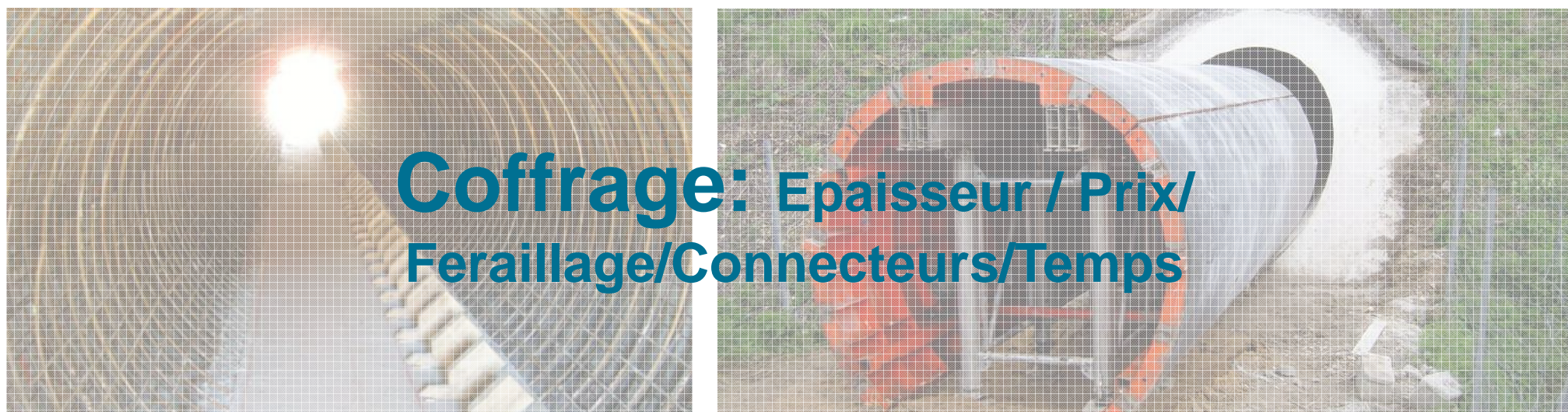
Projet Piloté par:



Avec le concours de:



Pourquoi les buses métalliques?



Pourquoi les buses métalliques?

Origine du projet

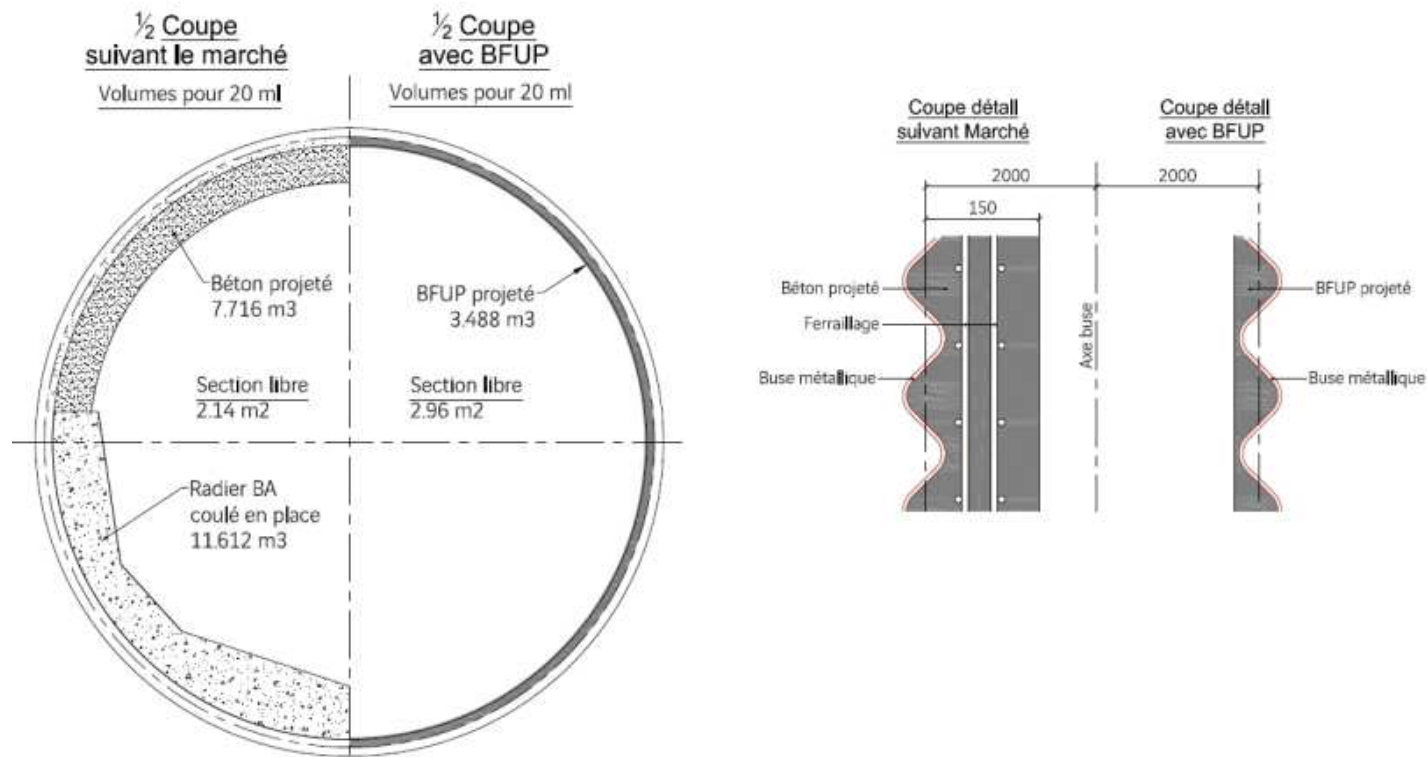


- Les buses de diamètre $> 2\text{m}$ représente 10% du patrimoine des ouvrages d'art du réseau national.
- 60% d'entre elles sont des buses hydrauliques, donc particulièrement exposés aux risques de corrosion et d'érosion.
- Près de la moitié d'entre elle ont plus de 35 ans, la durée de vie estimée pour les anciennes buses.

Les bénéfices attendus d'une nouvelle solution **Foreva** ^{BFUP-S} **Ductal**[®]

Origine du projet

- Bénéfices d'une solution de renforcement en BFUP projeté: préserver le gabarit, le fil d'eau, prolonger la durée de vie de plus de 50 ans et réduire les délais de réalisation
- Une solution économique en dépit d'un matériau onéreux.



Les essais spécifiques de validation

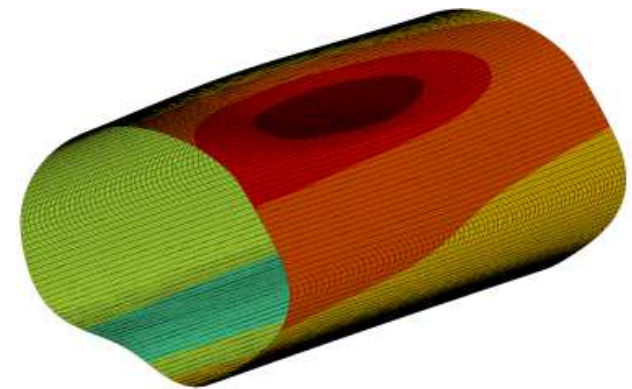
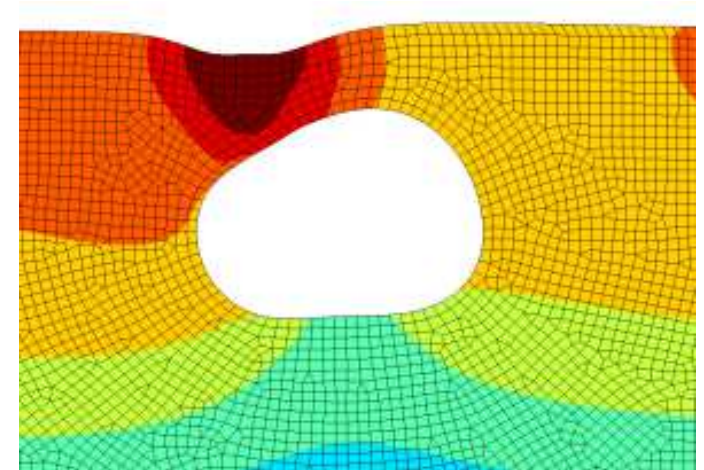
Les essais de validation du procédé

Essais en flexion 4 points sur prismes ondulés issus de corps d'épreuve réalisés par projection: avec ondulations vers le haut, ondulations vers le bas et avec ondulations orientées transversalement, selon protocole et interprétation IFSTTAR.



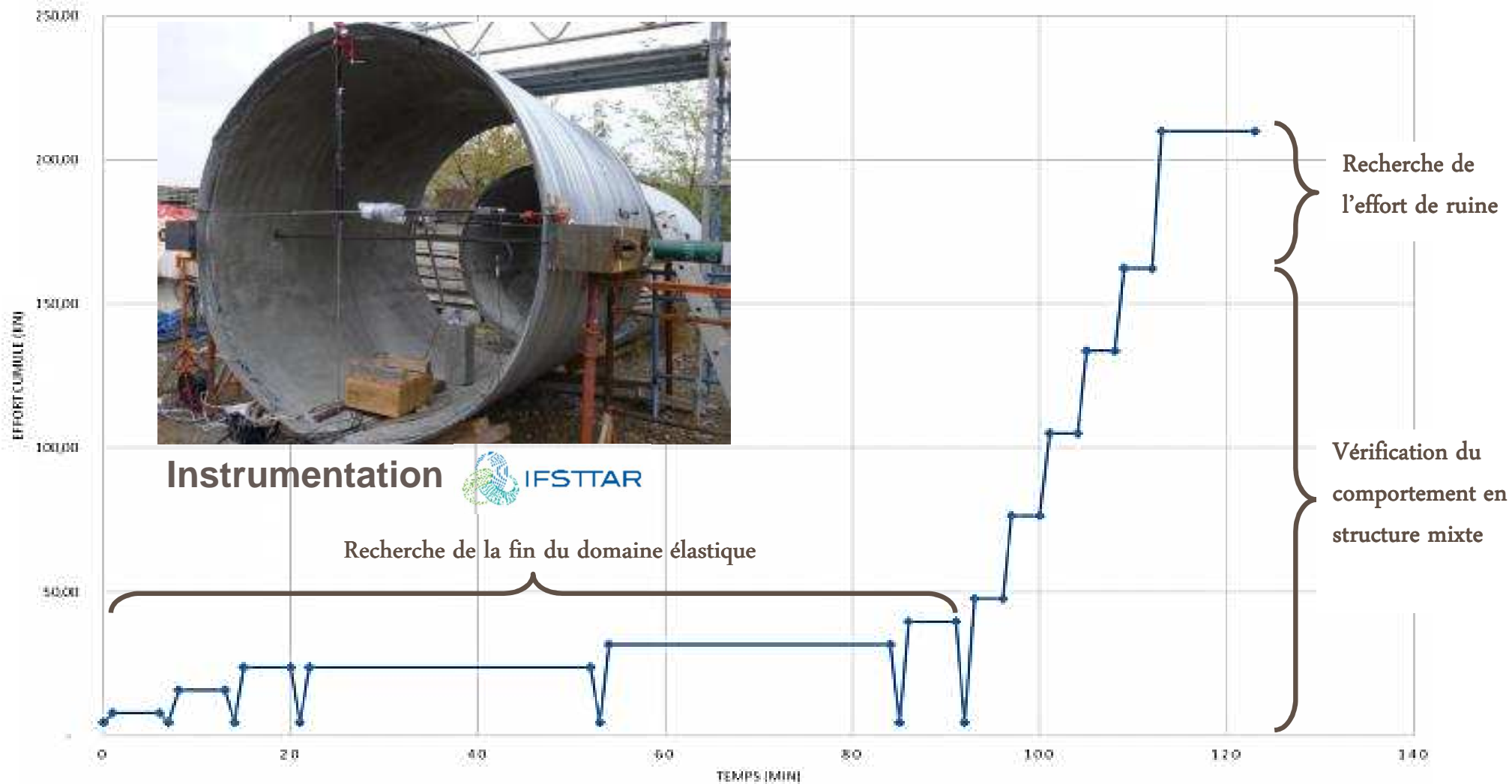
Développement de modèles de calcul en collaboration étroite avec le CETU et l'IFSTTAR

- Une étude exhaustive:
 - (a) Analyse par un modèle 3D linéaire du BFUP et modèle de sol simplifié
 - (b) Analyse par un modèle 3D non linéaire du BFUP et modèle de sol simplifié
 - (c) Analyse par un modèle 2D non linéaire du BFUP et du sol en déformation plane
- Méthodes de justification retenue:
 - Cas courants: méthode (a)
 - Cas spéciaux: pour une faible hauteur de couverture et/ou un faible module de sol: méthodes (b) voire (c)



Une épreuve de chargement à l'échelle 1

PROTOCOLE DE CHARGEMENT DE LA BUSE



Une épreuve de chargement à l'échelle 1

Avant chargement

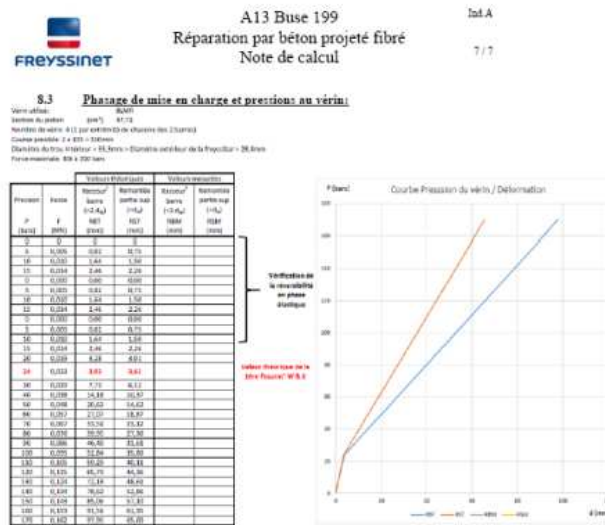
Après chargement



Une épreuve de chargement à l'échelle 1

Exploitation des résultats conjointement avec le CETU et l'IFSTTAR

En fin de domaine élastique



En fin de chargement



Les limites élastiques horizontales et verticales au maximum de la charge ont été conformes aux valeurs calculées avec un modèle simplifié

Domaine d'emploi de cette solution



- **Couverture:**

Si la hauteur de remblai est inférieure à 1,4 m, une étude spécifique permettra d'évaluer la faisabilité technique en fonction des voies portées .

- **Défauts locaux de courbure:**

Les formes en « ogive » sont acceptables. les formes en « poire » sont à proscrire. les inversions locales de courbure doivent être reprises avant renforcement.

- **Module de sol:**

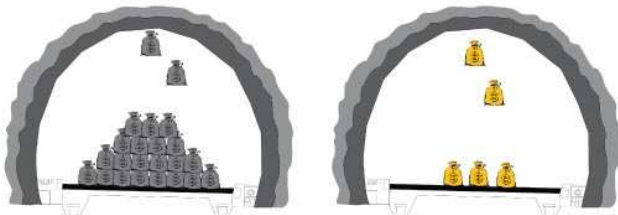
Le module de sol doit être supérieure à 20 MPa.

- **Ouverture:**

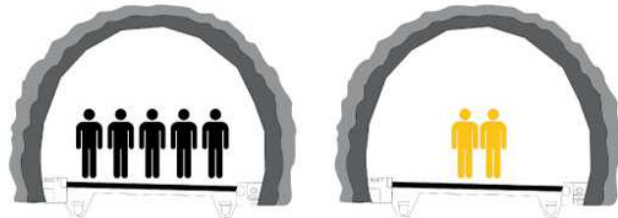
L'ouverture minimum doit être environ de 2 m pour permettre la projection dans de bonnes conditions de réalisation. L'épaisseur de la coque en BFUP est aussi fonction de l'élançement de la buse.

- *Pour les buses hydrauliques, dévier le cours d'eau pendant la phase travaux*

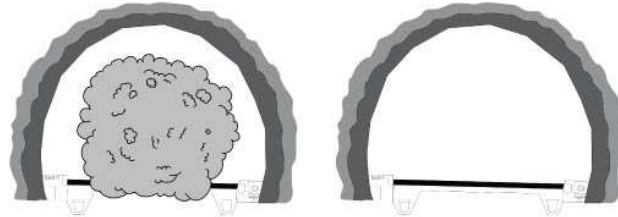
Rappel des atouts de la solutions



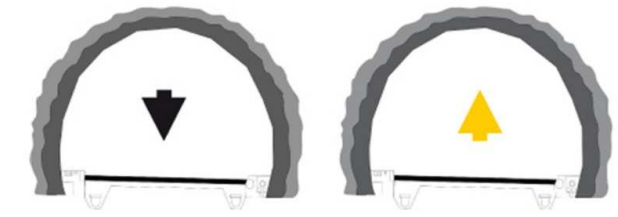
Moins de rebond



Moins de personnes



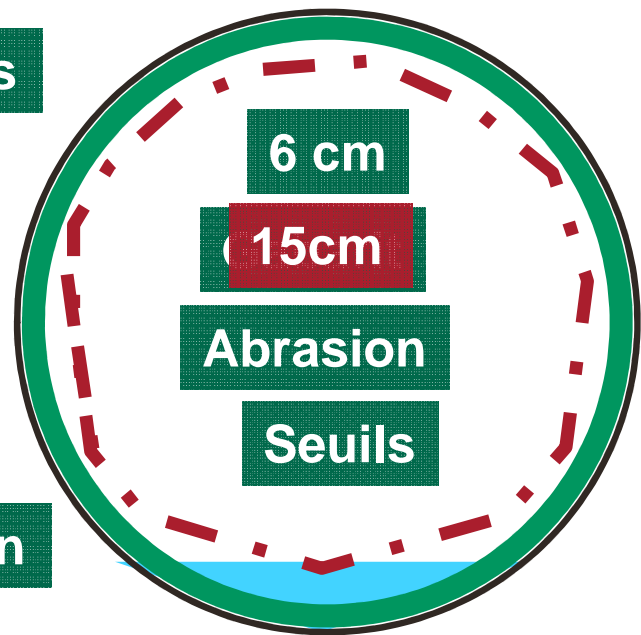
Pas de poussière



Une bonne adhésion

Moins de matière

Le BFUP Projeté pour les buses métalliques
Est une réponse entière



Un premier chantier experimental



FREYSSINET
SUSTAINABLE TECHNOLOGY

NOTE D'HYPOTHESES & MODELISATION

**REPARATION BUSE
METAL PR25+42 PAR
BFUP PROJETE**

FRANCE FREYSSINET

Ref. : E18-003-A1-NCF-001
Révision : C
19 Septembre 2018

FREYSSINET INTERNATIONAL & Cie - DÉPARTEMENT TECHNIQUE
280, avenue Napoléon Bonaparte
92500 RUEIL - MAILLIMONEN
Tel. : +33 1 47 76 42 62

NOTE DE CALCUL



MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

Direction interdépartementale des Routes
Centre-Est

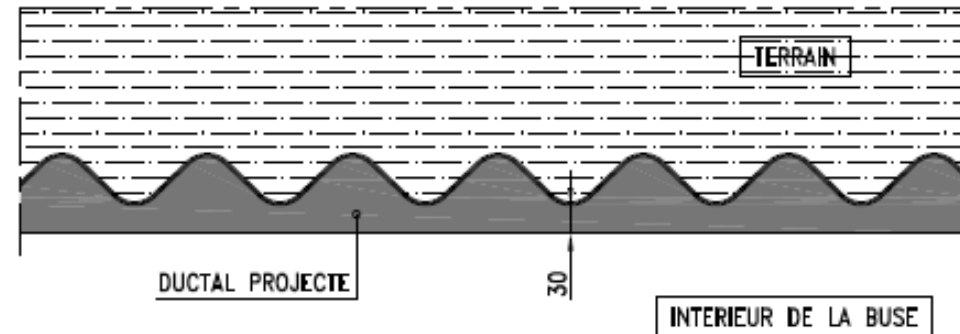
Service Ingénierie Routière de Lyon
Pôle Ouvrages d'Art

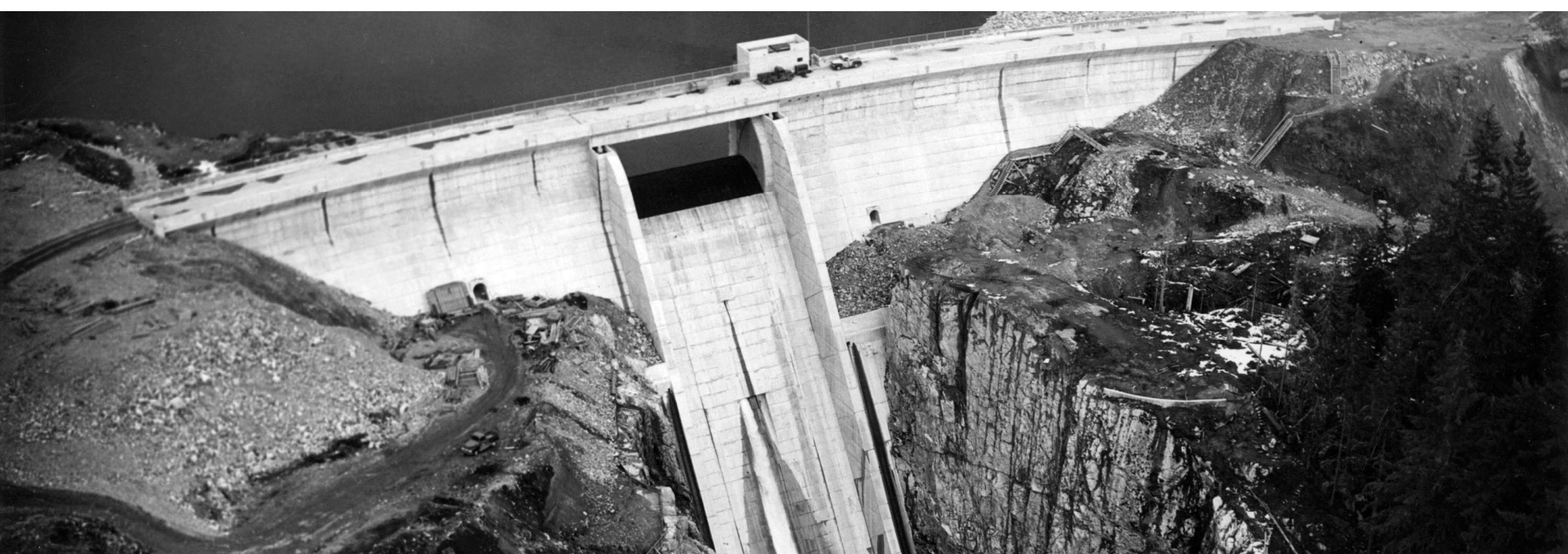
**RN70 – Renforcement de la buse à bétail du PR
25+042 par BFUP projeté**
Réparation des tabliers

Note d'Observation n°1

SECTION C-C (RENFORCE)

ECHELLE 1/5
(COTATIONS EN mm)





IV – Perspectives

Pourquoi projeté du BFUP?



Un matériaux répondant aux exigences de la réparation et au renforcement des structures grâce à ses caractéristiques exceptionnelles

- Résistance mécanique > 130 MPa
- Matériau étanche → air occlus < 1 %
- Matériau assurant une protection dans un environnement agressif
 - Résistance à la pénétration des chlorures
 - Forte résistance à l'abrasion

Un procédé qui permet

- de s'affranchir
 - Des coffrages
 - De la pose d'armatures
- de mettre en œuvre du béton
 - En milieu d'accès difficile
 - Avec des moyens adaptés

Un procédé économique dans son ensemble

Premiers essais à 3.25% de Fibres



- Résistance en compression moyenne à 28 j : 180 à 200 MPa
- Résistance caractéristique en post-fissuration à 28 j : 9 à 12 MPa

Applications en Tunnels routiers et ferroviaires

- Développement d'un Mix avec garantie de Tenue au feu
- Développement d'un Mix RIG

Applications en Zone Maritime

- Essais de tenue du BFUP-S en zone de marnage
- Contrôle de la migration des ions Chlorure en milieu maritime

Pourquoi projeté du BFUP?



Chevêtres



Piles soumises aux chlorures



Fuites d'eau d'un réservoir



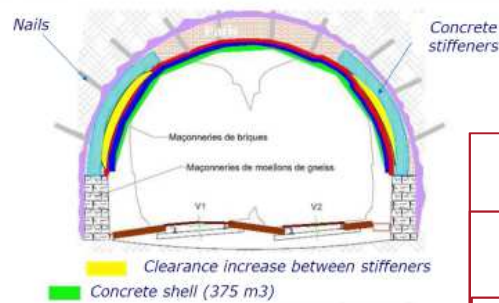
Station de pompage



Réparation après incendie



Déversoirs de barrages



Tunnels

- Etanchéité de la voûte
- Mise au gabarit
- Renfort des Piedroits



Ductal®

Merci pour votre attention

Freyssinet, Rueil-Malmaison, France, bertrand.petit@freyssinet.com

Freyssinet, Rueil-Malmaison, France, alain.huynh@freyssinet.com

Freyssinet, Rueil-Malmaison, France, francois.teply@freyssinet.com

Ductal® - LafargeHolcim, Paris, France, sebastien.bernardi@lafargeholcim.com

LafargeHolcim R&D Center, St Quentin Fallavier, France, laurence.trucy@lafargeholcim.com

Ductal® - LafargeHolcim, Paris, France, julien.derimay@lafargeholcim.com