

# JOURNÉE TECHNIQUE :

## Les BFUP en réhabilitation d'ouvrages de génie civil



 Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Office fédéral des routes OFROU

# IMGC



# Ordre du jour

## 01. INTRODUCTION

---

## 02. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART

- A. Viaducs A36 Clerval APRR
- B. A6 Pont d'Ouche
- C. Routes nationales suisses
- D. Échanges

////////////////// PAUSE //////////////////

## 03. RENFORCEMENT BUSE MÉTALLIQUE

- A. Cofiroute
- B. Échanges

## 04. RÉPARATION ET RENFORCEMENT OUVRAGES

- A. Pont Ilassac
- B. VIPP
- C. Routes nationales suisses
- D. Échanges

## 05. EXTENSION ET TRANSFORMATION / MODERNISATION OUVRAGE

- A. Ponts sur le Lavapeson
- B. La Paudeze
- C. Échanges

Dr. Philippe MENÉTREY

## 06. PROTECTION RSI - RAG

- A. Pont de Bourgogne CD 71
- B. Échanges

## 07. TABLE RONDE

---

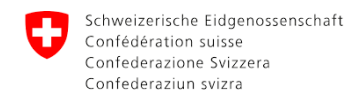
## 08. CONCLUSION

////////////////// DÉJEUNER //////////////////

# JOURNÉE TECHNIQUE :

## Les BFUP en réhabilitation d'ouvrages de génie civil

BFUP Projeté appliqué aux réparations de buses métalliques  
Nicolas BARDOU – Directeur Technique Maitrise d'Ouvrage Cofiroute



Office fédéral des routes OFROU

IMGC

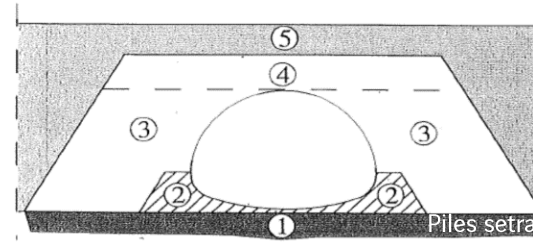
# SOMMAIRE

- 1 – L'enjeu de la gestion des buses métalliques
- 2 – Les principales solutions existantes
- 3 – Une solution innovante : le BFUP projeté
- 4 – Chantier de l'autoroutes A10
- 5 – L'avenir de la technique

# 1 - les buses métalliques sous routes et autoroutes

**Définition** : ouvrage d'art composite constitué d'une structure métallique flexible dans un remblai compacté

- Diamètre >2m
- hydraulique (majorité) ou non



**Période faste** : 1970-1985

**Avantages** :

- Simplicité de conception
- Rapidité de mise en œuvre
- Ouvrage économique (à la construction)
- Accepte déformations + charges de remblai élevées (flexibilité longitudinale)

# 1 - Défaillance : inconvénients des buses métalliques enterrées

## Constat :

- Implantation dans environnements défavorables (zones humides, sols agressifs, transport d'éléments solides)
- Dégradation en zone de marnage et en radier
- Corrosion côté remblai
- Patrimoine vieillissant (35-40 ans, soit durée de vie réelle des buses)
- Ouvrage à défaillance brutale

# 1 - Le patrimoine des buses autoroutières en France et chez Vinci Autoroutes

En France (*estimation*)

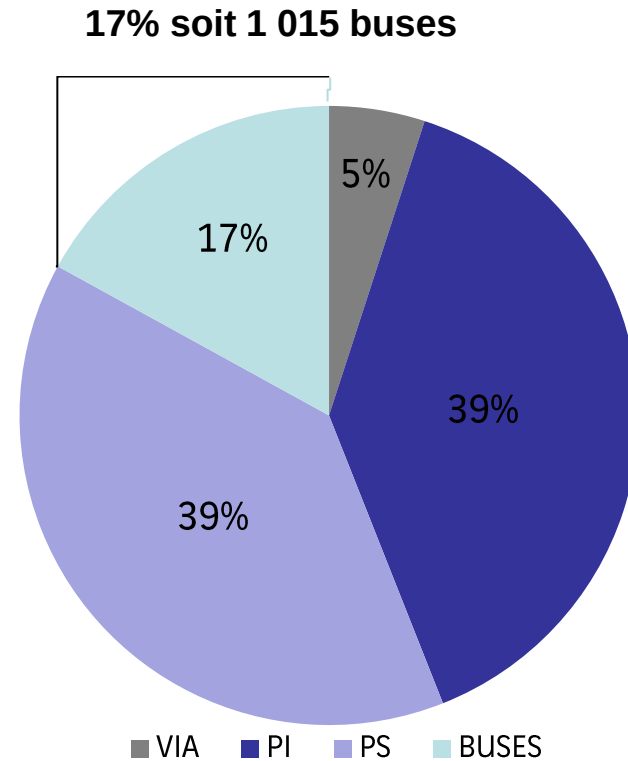
**1 103 000 km de routes**

**266 000 ponts**

**20 000 ponts autoroutiers dont  
plus de 15 % de buses  
métalliques (3 000)**

**100 % des ouvrages > 20 ans**

**35 % des ouvrages > 35 ans**



Répartition des ouvrages d'art  
chez Vinci Autoroutes

# 1 - COFIROUTE : Un plan de gestion dédié

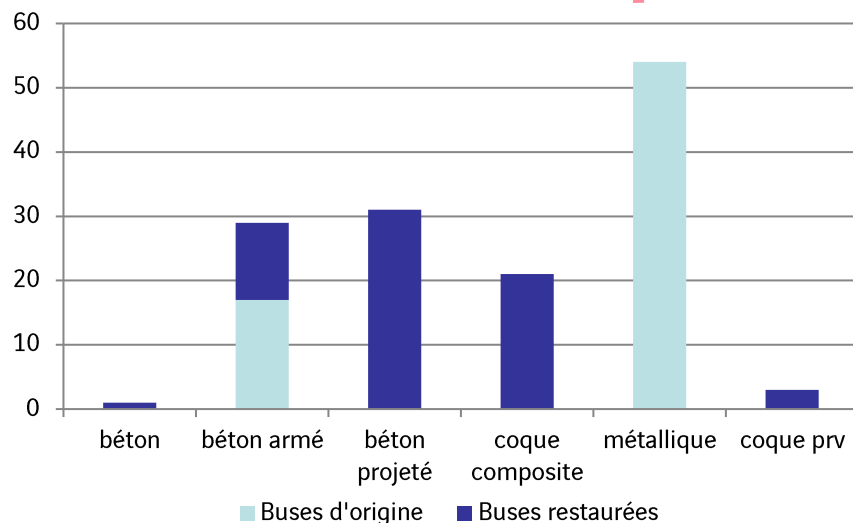
## Réseau COFIROUTE

**136 buses**

**1 buse tous les 8 km**

**50% de buses déjà remplacées**

**40% de buses métalliques**



Cartographie des buses  
métalliques COFIROUTE



### ANNEXE 4 : RECAPITULATIF DES DONNEES D'OUVRAGES

| N° OA           | PR      | Centre | Indice COFIROUTE | IQDA (VS) | IQDA INGENIA | IR | Faible | Modéré | Fort | 47 | Technique de renforcement | Prix travaux | Échelle | [0-5ans] | [5-10ans] | [10-20ans] |
|-----------------|---------|--------|------------------|-----------|--------------|----|--------|--------|------|----|---------------------------|--------------|---------|----------|-----------|------------|
| A10P012615      | 8+593   | 1      | Pontbierard      | 8,30      | 2            | 2  | 10     |        |      |    |                           | 337 000 €    |         |          |           | X          |
| A10P01378A      | 374800  | 4      | Pontbierard      | 8,33      | 46           | 46 | 46     |        |      |    |                           | 460 000 €    | X       |          |           |            |
| A10P01378B      | 374800  | 4      | Pontbierard      | 8,38      | 46           | 46 | 46     |        |      |    |                           | 472 000 €    | X       |          |           |            |
| A10P013558      | 106+228 | 2      | Orléans          | 6,62      | 20           | 20 | 11     |        |      |    |                           | 403 000 €    |         | X        |           |            |
| A10P015559      | 155+924 | 4      | Blois            | 9,47      | 2            | 2  | 9      |        |      |    |                           | 274 000 €    |         |          | X         |            |
| A10P015794      | 179+402 | 4      | Blois            | 9,05      | 3            | 3  | 33     |        |      |    |                           | 713 000 €    |         |          | X         |            |
| A10P015794      | 179+402 | 4      | Blois            | 8,88      | 2            | 2  | 6      |        |      |    |                           | 210 000 €    |         | X        |           |            |
| A10P015794      | 182+400 | 4      | Blois            | 6,33      | 20           | 20 | 7      |        |      |    |                           | 266 000 €    |         | X        |           |            |
| A10P02400A      | 340+065 | 6      | Chambray         | 9,28      | 46           | 46 | 46     |        |      |    |                           | 633 000 €    | X       |          |           |            |
| A10P02400B      | 340+065 | 6      | Chambray         | 8,55      | 46           | 46 | 46     |        |      |    |                           | 631 000 €    | X       |          |           |            |
| A10P02401       | 240+175 | 6      | Chambray         | 9,29      | 2            | 2  | 20     |        |      |    |                           | 615 000 €    |         | X        |           |            |
| A10P02474       | 247+478 | 8      | Châtelleraut     | 9,57      | 1            | 1  | 22     |        |      |    |                           | 453 000 €    |         |          | X         |            |
| A10P02476       | 247+621 | 8      | Châtelleraut     | 8,36      | 1            | 1  | 18     |        |      |    |                           | 566 000 €    |         |          | X         |            |
| A10P02534       | 253+390 | 8      | Châtelleraut     | 6,69      | 20           | 20 | 25     |        |      |    |                           | 646 000 €    | X       |          |           |            |
| A10P02538/23815 | 254+915 | 8      | Châtelleraut     | 8,81      | 1            | 1  | 12     |        |      |    |                           | 254 000 €    |         | X        |           |            |
| A10P02685       | 268+499 | 8      | Châtelleraut     | 8,43      | 1            | 1  | 20     |        |      |    |                           | 263 000 €    |         |          | X         |            |
| A10P02747A      | 274+658 | 8      | Châtelleraut     | 8,45      | 2            | 2  | 20     |        |      |    |                           | 727 000 €    |         | X        |           |            |
| A10P02747B      | 274+664 | 8      | Châtelleraut     | 8,62      | 2            | 2  | 20     |        |      |    |                           | 727 000 €    |         | X        |           |            |
| A10P031815/318  | 208+540 | 8      | Châtelleraut     | 9,54      | 2            | 2  | 15     |        |      |    |                           | 492 000 €    |         |          | X         |            |
| A11P014815      | 51+440  | 1      | Pontbierard      | 9,97      | 2            | 2  | 9      |        |      |    |                           | 373 000 €    |         |          | X         |            |
| A11P01747       | 74+727  | 3      | Thivars          | 6,69      | 2            | 2  | 23     |        |      |    |                           | 410 000 €    |         | X        |           |            |
| A11P01935       | 101+558 | 5      | La Ferté-Bernard | 6,57      | 2            | 2  | 21     |        |      |    |                           | 391 000 €    |         |          | X         |            |
| A11P01972       | 109+203 | 5      | La Ferté-Bernard | 7,29      | 2            | 2  | 21     |        |      |    |                           | 798 000 €    |         | X        |           |            |
| A11P060815/28B  | 115+666 | 5      | La Ferté-Bernard | 8,48      | 2            | 2  | 7      |        |      |    |                           | 413 000 €    |         |          | X         |            |
| A11P01205       | 120+575 | 5      | La Ferté-Bernard | 9,63      | 2            | 2  | 21     |        |      |    |                           | 723 000 €    |         |          | X         |            |
| A11P04285       | 288+268 | 5      | La Ferté-Bernard | 8,40      | 46           | 46 | 46     |        |      |    |                           | 643 000 €    | X       |          |           |            |
| A11P04379       | 388+065 | 5      | La Ferté-Bernard | 8,24      | 2            | 2  | 25     |        |      |    |                           | 994 000 €    |         | X        |           |            |
| A11P04380       | 388+065 | 5      | La Ferté-Bernard | 8,19      | 2            | 2  | 21     |        |      |    |                           | 402 000 €    |         | X        |           |            |
| A11P04603       | 360+762 | 5      | La Ferté-Bernard | 8,15      | 46           | 46 | 46     |        |      |    |                           | 1 038 000 €  | X       |          |           |            |

## 2 - Solution 1 : le tubage

|                                             | +                                                                                                                                           | -                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tubage<br><i>tubes</i><br><i>composites</i> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Rapidité d'exécution</li><li>- Qualité de la finition</li><li>- Etanchéité de la conduite</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Coût (diamètre &gt; 2m)</li><li>- Réduction du gabarit hydraulique et réhausse du fil d'eau</li><li>- Dégagement nécessaire à la mise en œuvre</li><li>- Non adaptée aux grands diamètres (max 4.00m)</li></ul> |



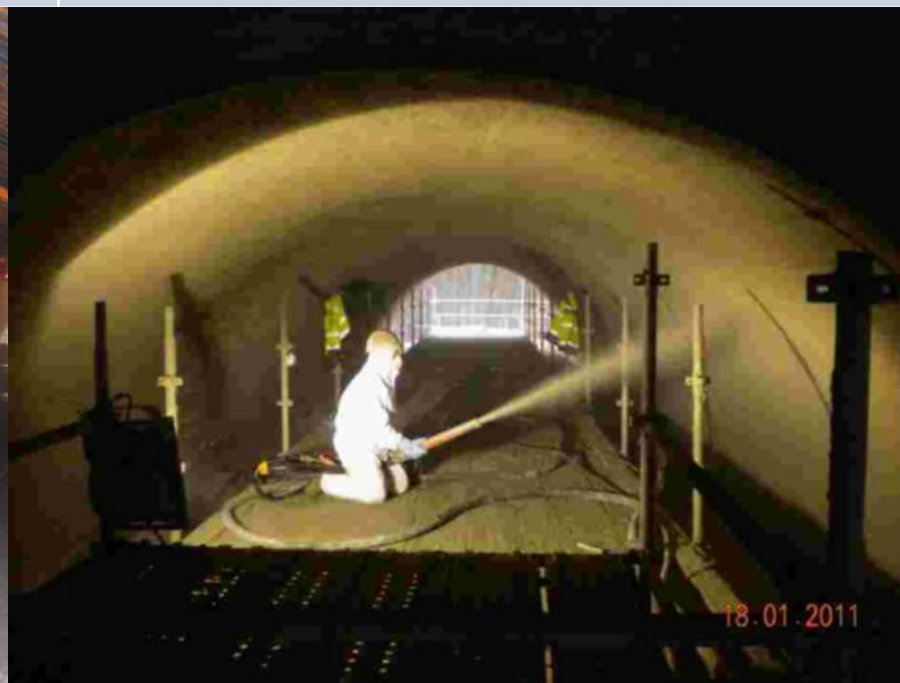
## 2 - Solution 2 : le béton coffré, coulé en place

|                                | +                                                                                                                                                                        | -                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coffrage<br><i>béton coulé</i> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Technique traditionnelle</li><li>- Renforcement possible (épaisseur modulable)</li><li>- Pas de limitation de diamètre</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Outils de coffrage</li><li>- Coût</li><li>- Délai de réalisation (<i>pas toujours compatible avec les contraintes environnementales ou loi sur l'eau.</i>)</li></ul> |



## 2 - Solution 3 : le béton projeté, coulé en place

|                                    | +                                                                                                                                              | -                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Projection<br><i>béton projeté</i> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Peu de réduction du gabarit hydraulique</li><li>- Pas d'augmentation de la côte du fil d'eau</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Impact environnemental notable (projection de poussière, rebonds de matière)</li><li>- Ouverture minimale nécessaire (diam &gt;2m)</li></ul> |



### 3 – Solution innovante : la coque BFUP projeté mince

#### Caractéristiques :

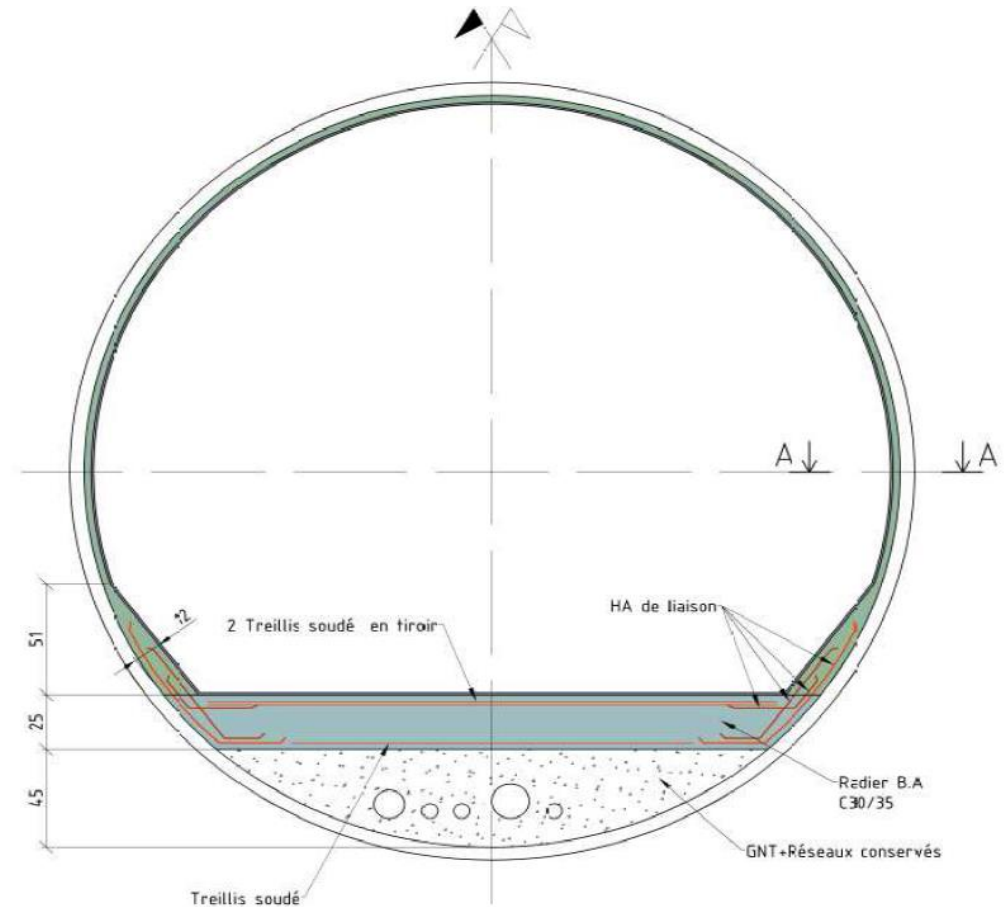
- Famille des BFUP coulés : résistance et durabilité
- Innovation : technique d'application
- Chemisage intégral interne « semi-rigide » (épaisseur 6cm, raideur analogue à l'existant)

#### Avantages :

- Rapidité de mise en œuvre
- Respect du gabarit (faible épaisseur projetée)
- Pas de modification du cour d'eau
- Moindres impacts environnementaux

#### Conditions :

- Ouverture de 2m minimum
- Remblai technique de bonne qualité
- Défauts limités et localisés d'inversion de courbure (réparation préalable)



### 3 - BFUP projeté : l'innovation

- Épaisseur à l'équilibre rhéologie/structure (seuil d'écoulement élevé + épaisseur minimale)
- Aucun adjuvant raidisseur
- Charges permanentes + surcharge d'exploitation
- Composite BFUP/sol
- Alignement optimisé des fibres



+



### 3 - Comparaison des solutions : les avancées possibles avec le BFUP projeté

|                                    | +                                                                                                                                                                                                         | -                                                                                                                                                                                                                        | Emissions GES en TCO2eq pour 490m2 |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Tubage<br><i>tubes composites</i>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rapidité d'exécution</li> <li>- Qualité de la finition</li> <li>- Etanchéité de la conduite</li> </ul>                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût (diamètre &gt; 2m)</li> <li>- Réduction du gabarit hydraulique</li> <li>- Dégagement nécessaire à la mise en œuvre</li> </ul>                                              | - 231 TCO2eq                       |
| Coffrage<br><i>béton coulé</i>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Technique traditionnelle</li> <li>- Renforcement possible (épaisseur modulable)</li> </ul>                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Outils de coffrage</li> <li>- Coût</li> <li>- Délai de réalisation</li> </ul>                                                                                                   |                                    |
| Projection<br><i>béton projeté</i> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Peu de réduction du gabarit hydraulique</li> <li>- Pas d'augmentation du fil d'eau</li> </ul>                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Impact environnemental notable (projection de poussière, rebonds de matière)</li> <li>- Ouverture minimale nécessaire (diam &gt;2m)</li> </ul>                                  | - 107 TCO2eq                       |
| Coque mince<br><i>BFUP projeté</i> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coûts de construction et de maintenance</li> <li>- Rapidité de mise en œuvre</li> <li>- Respect du gabarit</li> <li>- Pas d'augmentation du fil d'eau</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Remblai technique de bonne qualité</li> <li>- Pas de déformation majeure du support (ou réparation préalable)</li> <li>- Ouverture minimale nécessaire (diam &gt;2m)</li> </ul> | - 91TCO2eq                         |

### 3 - Etapes du processus technologique

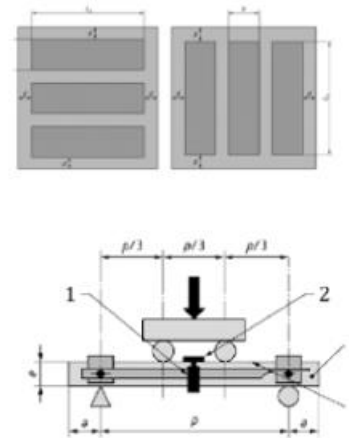
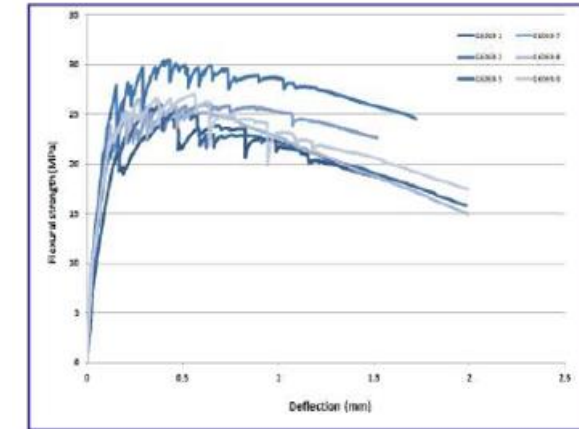
#### Etapes de validation de la technologie :

- R&D –
  - Formulation du matériaux : comportements attendues (Adhérence, limitation de la perte par rebond, ...)
  - Définition des méthodes et outils (buse de projection, malaxeurs, centrales, pompage , orientation des lances, maîtrise de l'orientation des fibres, ...)

Avant chargement

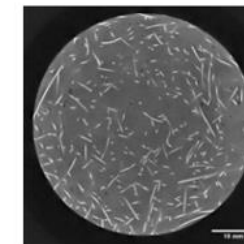


Après chargement

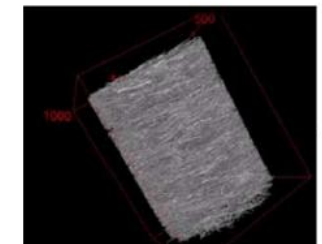


#### Analyse Tomographique

#### Carottes de BFUP-S perpendiculaires à la plaque



Section 2D (x,y) en plan



Reconstruction tomographique en 3D

### 3 - Processus expérimental pour la validation du procédé

Avec le concours du CETU et de l'UGE :



#### Caractérisation du matériau

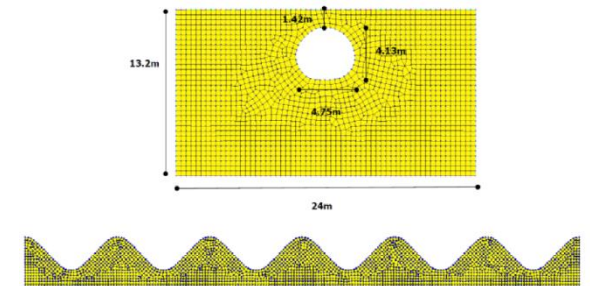
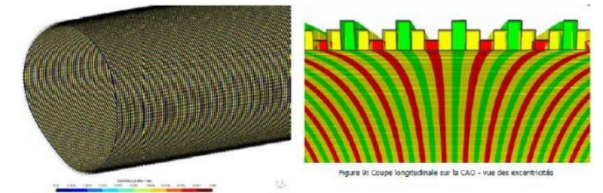
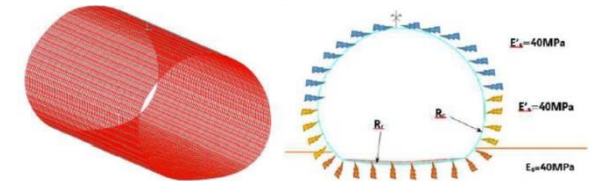
- Epreuves d'études et de convenance
- Planches tests : référence à la norme française

#### Modèles de calcul :

- Approche simplifiée (cas grandes hauteurs de couverture : théorie de l'anneau comprimé)
- Approche linéaire (cas courant : modélisation 3D et ressorts de sol)
- Approche non-linéaire (cas spéciaux : modélisation explicite du sol + prise en compte du comportement non-linéaire du matériau BFUP)

#### Validation à échelle 1 des modèles :

- Épreuve de chargement (buse métallique neuve, longueur 3m → jusqu'à l'état de ruine)
- Ouvrage expérimental (buse agricole diamètre 3,65m, longueur 18m) pour phasage et exécution par anneaux successifs de 1m de long



### 3 - Etapes du processus technologique

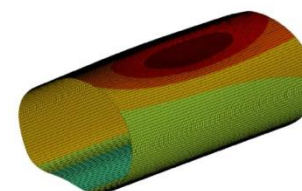
#### Caractéristiques du BFUP Projeté :

- Module d'élasticité en compression  
 $E_{cm} = 40 \text{ GPa}$
- Masse volumique comprise  
entre 2300 et 2800 Kg/m<sup>3</sup>
- Résistance caractéristique en compression  
 $f_{ck} \geq 130 \text{ Mpa}$
- Résistance caractéristique en traction  
 $f_{ctk.el} \geq 6 \text{ Mpa}$
- Valeur caractéristique de la résistance post-fissuration  
 $f_{ctfk/K} \geq 5,0 \text{ Mpa}$
- Classe de résistance à l'abrasion  
Indice CNR  $\geq 0,7 \rightarrow$  classe RM2
- Vérifié par 2 normes françaises relatives aux BFUP  
(2016) basées sur les recommandations françaises  
de l'AFGC (2013) + 15 ans d'expérience

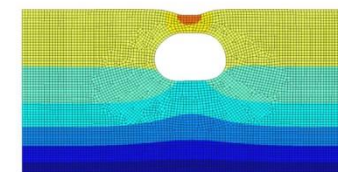


## 4 - Renforcement BFUP projeté de la buse A10-PI-6/BIS

|                               |                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Diamètre de la buse           | 3,70 m                              |
| Longueur de la buse           | 47,10 m                             |
| Hauteur du remblai            | 1,20 m                              |
| Forme de l'extrémité          | Sifflet                             |
| Amplitude des ondes           | 0,17 m                              |
| Profondeur des ondes          | 0,06 m                              |
| Positionnement des boulons    | Par galvanisation et par revêtement |
| Biais                         | En flanc d'onde                     |
| Alignement                    | 100 grades                          |
| Pente longitudinale           | Droit                               |
| Talus                         | Environ 0,8%                        |
| Épaisseur de la buse          | 3/2                                 |
| Dernière inspection détaillée | 2,5mm (-0,1 ; +0,3)                 |
| IQA 2014                      | 2                                   |



Modèle 3D avec ressorts de sol - Déformation de la buse montrant la diffusion longitudinale



Modèle 2D avec modélisation explicite du sol - Déformations montrant l'interaction buse/sol

## 4 - Mise en œuvre et suivi du comportement par le maitre d'ouvrage

### Etudes de conception

- Reconnaissances géotechniques
- Calcul et dimensionnement

### Travaux

- Radier
- Projection
- Enduit de finition

### Suivi du comportement

- Rapproché pendant le chantier
- Pendant 10 ans

### Enjeux

- Pérennité
- Exploitabilité



## 4 - Améliorations apportées suite aux retours d'expérience

- Création d'une formule « temps chaud » pour améliorer la rhéologie et les caractéristiques
- Validation de la projection au sol
- Finition lissée pour optimiser le débit admissible des ouvrages



## 5 - Autres cas d'usage du BFUP Projeté

### Possibilités d'usage :

- Renforcement des structures en béton
- Réhabilitation des ouvrages maritimes
- Réfection des ouvrages hydrauliques
- Chemisage des tunnels

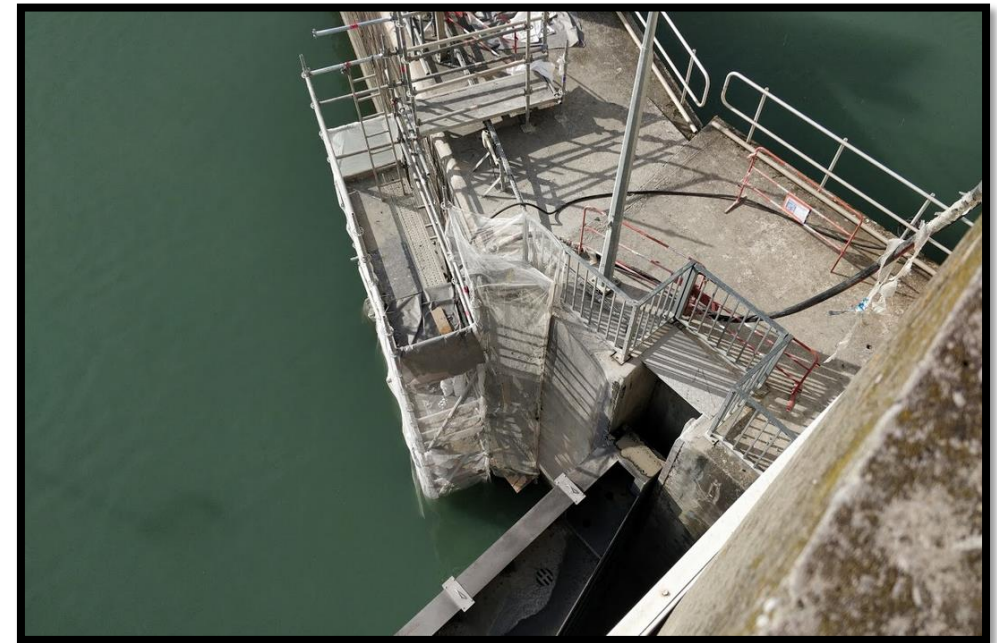


### Industrialisation de la technique :

- Centrale de malaxage
- Traitement de l'eau
- Pompage

# Conclusions

- Problème : patrimoine de buses métalliques est vieillissant
- Solution : Il existe déjà quelques solutions, mais là, solution très intéressante : coque mince BFUP projeté
- Avantages : Mise en œuvre prometteuse (rapide et économique)
- Perspectives : Diversité des usages, industrialisation du process





## → 02. SÉQUENCE ACADÉMIQUE

# ÉCHANGES