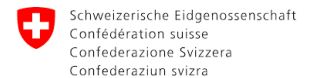


la reproduction des images issues de cette présentation est libre de droits uniquement pour de courtes citations à usage scientifique, de recherche ou pédagogique

# JOURNÉE TECHNIQUE :

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

**Le point en France : référentiel et expérience partagée**  
François Toutlemonde – Université Gustave Eiffel



Office fédéral des routes OFROU

**IMGC**

# Le référentiel normatif

**Note:** Le calcul des structures en BFUP constituées de BFUP avec fibres non-métalliques doit être considéré à ce stade comme non-traditionnel.

## NF EN 13369

actualisation BFUP dans avant-propos F

Règles communes aux produits préfabriqués



Révision des normes de produits

Normes de produits préfabriqués spécifiques

**NF P 18-710** complément national à l'Eurocode 2 publiée F/EN en 2016

Norme de conception: Calcul des structures en BFUP (BFUP à fibres d'acier) (en lien avec EN 1992)

**NF P 18-470** norme autoportante équivalente à l'EN 206 (même sommaire) publiée F/EN en 2016

### Norme de produit : BFUP

(spécification, performance, production et conformité)

Type S : BFUP pour les structures

Type A ou Z : BFUP pour les éléments non-structuraux ou architectoniques

*Premix*  
sans *Premix*

*Préfabrication foraine*  
*Préfabrication en usine*

*Centrale de chantier*  
*BPE*

T  
E  
S  
T  
S

Annexes à  
NF P 18-470

Approbation technique au cas par cas

Conception des éléments en BFUP non structuraux

**NF P 18-451** complément national à NF EN 13670/CN Publiée F/EN en 2018

Norme d'exécution: applicable à l'exécution des structures en BFUP et à celle des éléments en BFUP non-structuraux ou architectoniques

# Le référentiel normatif

## NF P18-710 (calcul)

Ne couvre que les BFUP-S

## Fascicule 65 du CCTG

Pas à jour (cite reco. AFGC 2013)

**BFUP projeté** non couvert

fck (MPa)	non-fragile fibres métalliques	non-fragile autres fibres	éventuellement fragile
150 à 250	UHPFRC – <i>BFUP</i> type S	UHPFRC – <i>BFUP</i> type A	UHPC ? <i>BUHP</i> ?
130 à moins de 150	UHPFRC – <i>BFUP</i> type Z		
moins de 130	VHPFRC or HPFRCC ? <i>BTHP FM</i> ?	VHPFRC or HPFRCC ? <i>BTHP FO</i> ?	VHPC ? <i>BTHP</i> ?

**Pas de norme spécifique « réparation avec BFUP »**

**MAIS**

## NF P 18-710 Annexe V

§ V.1 Maîtrise des effets combinés de chargement et de déformations imposées, § V.4 Calcul de structures mixtes comprenant du BFUP

## NF P 18-451

§ 8.2.4 Programme de bétonnage, § 8.4.1.1 Contrôle avant mise en œuvre, § 8.7 Bétonnage des structures mixtes, § 9 Mise en œuvre des éléments préfabriqués

Le cas du BFUP employé en réparation se déduit des dispositions des structures mixtes

# Spécification du BFUP (NF P18-470)

Propriétés minimales et exigences spécifiées

## Socle minimal

Résistance en compression BFUP  $f_{ck} \geq 130 \text{ MPa}$  BFUP-S  $f_{ck} \geq 150 \text{ MPa}$

Résistance en traction  $f_{ctk,el} \geq 6,0 \text{ MPa}$  et non-fragilité (écrouissant en flexion)

Porosité à l'eau à 90 jours  $\leq 9,0 \%$  ;  $D_{Cl-90j} \leq 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  ;  $K_{gaz\ 90j} \leq 9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$

$D_{sup} \leq 10 \text{ mm}$  ; densité 2200 à 2800  $\text{kg}/\text{m}^3$  ;

Facteurs d'orientation  $K_{local} \leq 2,5$  et  $K_{global} \leq 2,0$

## Carte d'identité (exigences de base)

**consistance et durée pratique d'utilisation** ; teneur en air ;

résistance caractéristique en compression (à 28 jours pour les BFUP de type STT et TT1,

avant et après traitement thermique post-prise pour les BFUP de type TT2 et TT1+2) ;

contrainte maximale et valeurs décrivant le comportement caractéristique en traction ;

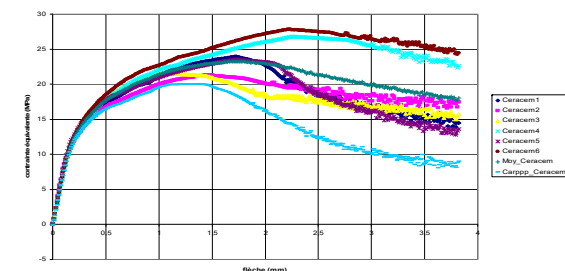
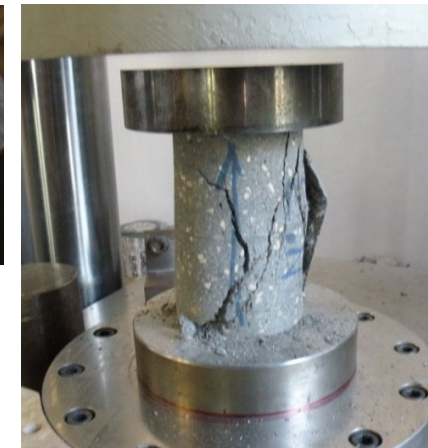
**classe de comportement en traction**, par référence à un **emploi donné** associé à un procédé de mise en œuvre et à un coefficient K ;

module d'Young ; masse volumique ; coefficient de dilatation thermique ;

porosité à l'eau, mesurée à 90 jours ; coefficient de diffusion apparent des ions chlore ;

perméabilité aux gaz ;

amplitude du **retrait** total



# Spécification du BFUP (NF P18-470)

Exigences complémentaires

## Carte d'identité (propriétés complémentaires)

contrainte maximale et valeurs décrivant le **comportement caractéristique en traction**, et classe de comportement en traction (**par référence à d'autres emplois donnés**, notamment d'épaisseurs différentes, associés aux procédés de mise en œuvre adoptés et aux coefficients K obtenus) ;

caractéristiques liées au **retrait** et au **fluage** ;

classe correspondant à la réaction au feu, éventuelles données caractérisant la résistance à l'instabilité thermique, paramètres associés au calcul de résistance au feu

résistance à l'**abrasion** ;

résistance moyenne à la compression ;

contrainte maximale moyenne post-fissuration ;

caractéristiques décrivant le comportement à haute vitesse de sollicitation

## Valeurs indicatives pour une première approche de conception

NF P18-710 Annexe T

A ce jour matériaux mieux connus, valeurs de référence pour plusieurs BFUP et modes opératoires documentés... Mais matériaux plus variés !





## Remarques sur le référentiel BFUP

Dans la perspective de son utilisation en réhabilitation OA

### Flexibilité du corpus pour tous types d'ouvrages

Mais **domaine de validité** NF P18-710 limité au domaine des BFUP-S où l'ensemble des règles a été vérifié

### Spécification performantielle

Pas explicitement de teneur minimum en fibres

### Performance d'étanchéité non couverte

Pas d'exigence sur le matériau (**T2 ou T3** seraient à recommander, selon présence ou non d'armatures conventionnelles en plus)

Pas d'exigence au titre du projet (**limite de déformation** en service ?) ni des dispositions constructives (**détails** des reprises par exemple)

### Difficulté de vérifier Dc / Dc+

En particulier pour un **fort taux de fibres**

### Importance critique des spécifications d'exécution

Programmes de malaxage / de bétonnage parties intégrantes de la conformité



# Remarques sur l'application du référentiel BFUP

Dans la perspective de son utilisation en réhabilitation OA

## Schéma normatif (3 documents) au lieu d'un guide unique (recommandations AFGC)

Plus conforme à la séparation des responsabilités des acteurs

Mais « déplacement » : l'utilisateur du BFUP frais intervient dans la conformité du matériau

## Criticité de l'étape convenance

Influence confirmée des moyens de production pour un même prémix (réglage séquence et durée de malaxage, ajustement de l'eau, adjuvantation, entraînement d'air / dégazage)

Durée des essais de caractérisation en flexion et durabilité

Adaptation parfois nécessaire des moyens de mise en place et détails de reprise

→ Anticiper la faisabilité de la mise en œuvre par une pré-étude ou des références ?

→ Exiger des détails dès le stade de l'offre

→ Connaissances / références des différents intervenants ?

→ Laboratoires qualifiés en petit nombre

→ Délais contractuels à adapter (anticiper le risque d'une itération nécessaire)

## Clauses contractuelles types

En préparation (groupe de travail Cerema (Petra))

Nombre d'essais : excessif ?



## Exemple de point de vigilance : le lien consistance – mise en œuvre - propriétés



**Ferme : // sens finisseuse**



**Fluide : isotrope 2D**

D'où l'exigence accrue de **régularité** de consistance  
(pas seulement pour économiser les efforts physiques de l'équipe)



## Le référentiel BFUP en France et l'expérience sous-jacente

### Périmètre « historique » (cf. AFGC 2002)

BPR, BSI prémix disponibles depuis 25 ans

Usages multiples ayant rendu possible la validation des méthodes de calcul

Dosage en fibres métalliques typique = 2%, fck typique 180 MPa

### Élargissement de l'expérience

Matériaux : BCV, Cemtec, élargissement des gammes notamment Ductal FO, BSI anti-feu...

Optimisation des formes et élancements : poutres ITE, caissons, sections amincies (Pi, dalle nervurée), poteaux arborescents, treillis, résilles

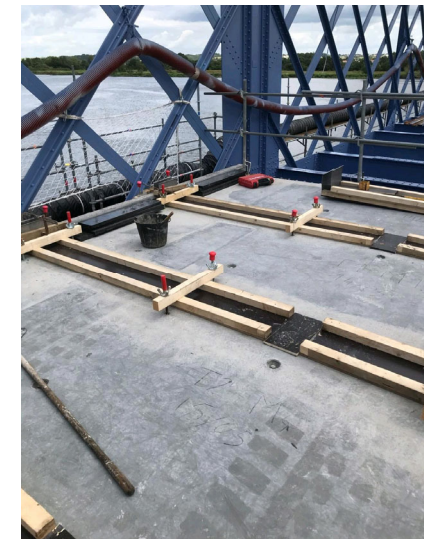
Développement du marché : composants de bâtiment (façade, couverture, auvents...)

### Prise de conscience progressive en France de l'intérêt du BFUP en réparation / réhabilitation – pas seulement OA

Projet européen **SAMARIS, 2004** – participation française limitée à P. Rossi, LCPC

Thierry Thibaux, **Marseille 2009** – revêtements anti-abrasion, restructuration de bâtiments (immeuble rue Volney, parking Espace Méditerranée à Perpignan), renforcement pont sur l'Huisne au Mans

**Flash-info STRRES, 2018** – exemples complémentaires : tabliers métalliques (Orthodalle®), expérience US joints de clavage, expérience CH revêtements de tabliers béton, précontrainte additionnelle Hammersmith Flyover, Thouaré s/ Loire, coques de protection



# Acquis à la veille des expériences récentes d'APRR

Points marquants

## Expérience « ponts » principalement avec usage d'éléments préfabriqués

Pont Pinel (élargissement par pont à poutres ITE)

Orthodalle® - pont d'Illzach (dalles préfabriquées connectées à un platelage orthotrope)

Thouaré / Mauves sur Loire (substitution de voûtains par dalles préfabriquées connectées à une charpente)

Hammersmith Flyover (Blocs d'ancrage préfabriqués)

## À l'exception du renforcement du pont sur l'Huisne au Mans et des ouvrages Hydrauliques

*(Traumatisme originel des clavages BFUP à Bourg-lès-Valence)*

## Avantages potentiels reconnus des réhabilitations avec BFUP

Optimisation des **masses rapportées** (performance)

Réduction des **délais** d'intervention (préfabrication, durcissement rapide)

**Efficacité** des opérations sur site (clavage de taille réduite si éléments préfabriqués, rhéologie potentiellement autoplaçante si coulé en place)

Durabilité (si qualité d'exécution)

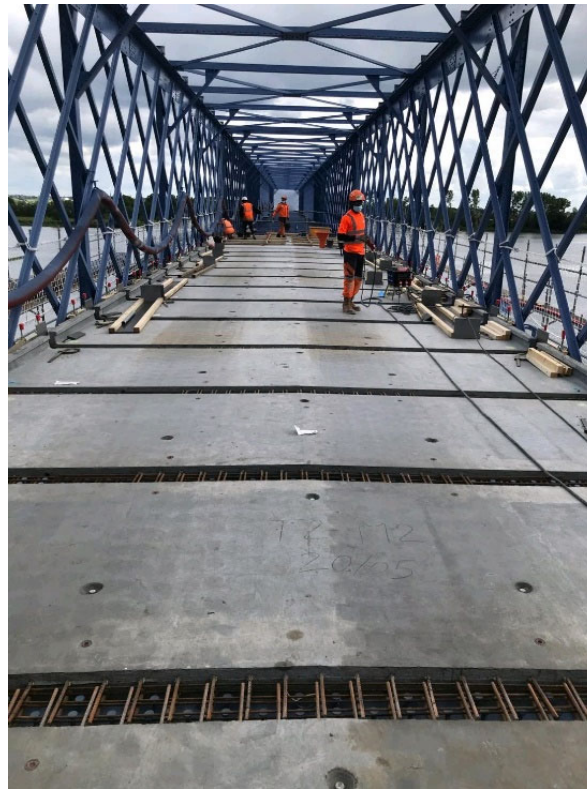
Rigidité (haut module) et faible fluage







# Illustration méthodes / logistique



**Moisage – blocs coulés en place : Le Mans**



**Blocs préfabriqués : Londres**

**Dalles préfabriquées : Illzach, Thouaré, Mauves s/ Loire**



# Rappel de conclusions présentées au STRRES en 2018

Pour identifier les acquis récents

## Points d'attention spécifique : méthodes

**Connexion** d'éléments préfabriqués légers : fixations et tolérance % existant

Mise en oeuvre in situ : coulage gravitaire, injection, projection, étalement au finisher... effet sur **l'orientation des fibres** et gestion du retrait gêné

Modalités de spécification, convenance et contrôle à adapter (par rapport à une réparation « classique » pour tenir compte des effets de la mise en oeuvre)

Performance d'étanchéité à qualifier ?

## Conditions de bonne application

Pertinence par rapport à d'autres méthodes éventuelles (tenue au feu, formes éventuellement complexes, rigidité et capacité en compression, intervention possible sous eau)

## Intégration matériau / calcul / méthodes

Coût matériau moins déterminant que méthodes et délais

## Organisation contractuelle et maîtrise des risques ?





# Acquis ... et questions rencontrées récemment

Du bon projet à la preuve de succès

## Etanchéité intrinsèque non documentée

Seul cas non revêtu du viaduc de la Chabotte, contrôle difficile sur pièce et non encore réalisé sur élément témoin. Or besoin de démonstration à défaut de garantie

## La logistique de la fabrication sur chantier

Effets amplifiés de la régularité / **variabilité du prémix** (cf. NF P18-470 annexe G) : incidence sur demande en eau (attention à l'organisation)

**Sensibilité thermique** et conséquences : difficulté de l'anticipation en étude et même convenance ; stockage des adjuvants à soigner, ajustement de l'adjuvantation et/ou de la séquence de malaxage et logigramme décisionnel ; cadre strict du fascicule 65 et de la norme (différent de la préfabrication avec certaines usines climatisées)

Anticipation des **cadences** en lien avec l'objectif d'une alimentation la plus continue possible du poste de mise en place (différent de la préfabrication où 1 gâchée = 1 pièce si possible) : dimensionnement de la capacité de malaxage

**Précision et traçabilité** attendues de l'outil de production (attention aux prototypes !) Incidence avérée des **moyens de production et de mise en œuvre** sur les performances : la CI ne suffit pas !



## En guise de conclusion, quelques convictions issues du REX récent

pour stimuler les discussions de ce jour

### L'opération de réhabilitation avec BFUP est souvent efficace dans sa conception :

l'enjeu de progrès pour fiabiliser cette solution est dans l'**exécution**

connaissance et application de NF P18-451 ; anticipation des méthodes et moyens logistiques, cohérence avec la spécification de rhéologie ; adéquation du niveau de contrôle sur BFUP frais et durci et efficacité préventive ; cohérence matériau – méthodes - calcul

**Intérêt aujourd'hui d'un partage d'expérience sincère...**

### L'organisation contractuelle doit valoriser un niveau de préparation / anticipation effectif suffisant, notamment en termes de méthodes

Jugement des **offres**, **délais** suffisants entre convenance et premiers travaux, **contrôle** interne / externe / extérieur et points d'arrêt pour assurer régularité de consistance, homogénéité et absence de ruptures d'alimentation

### Importance avérée de la formation / conscience des personnels d'exécution

Intérêt de dispositions de **qualification** ?

