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

PIARC France
ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE
COMITÉ FRANÇAIS

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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)

Approbation technique au cas par cas

Conception des éléments en BFUP non structurels

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-structurels 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

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-structurels ou architectoniques

PIARC France

Office fédéral des routes OFROU

IMGC

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 – *BFUP* **type S**	UHPFRC – *BFUP* **type A**	UHPC ? *BUHP ?*
130 à moins de 150	UHPFRC – *BFUP* **type Z**		
moins de 130	VHPFRC or HPFRCC ? *BTHP **FM** ?*	VHPFRC or HPFRCC ? *BTHP **FO** ?*	VHPC ? *BTHP ?*

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

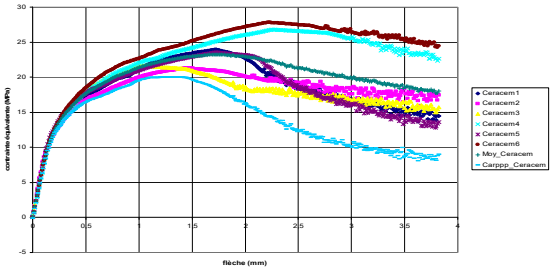
Résistance en compression BFUP $f_{ck} \geq 130$ MPa BFUP-S $f_{ck} \geq 150$ MPa

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

Porosité à l'eau à 90 jours ≤ 9,0 % ; $D_{Cl-\ 90\ j} \leq 0{,}5.10^{-12}$ m²/s ; $K_{gaz\ 90\ j} \leq 9.10^{-19}$ m²

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

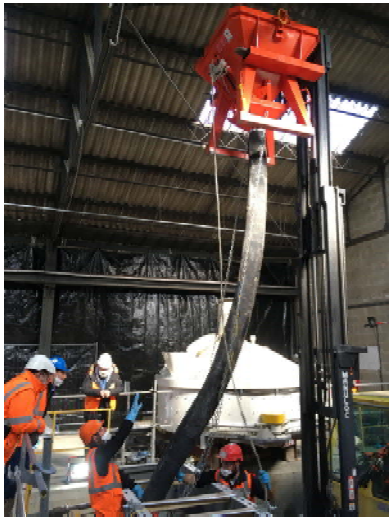
→ Anticiper la faisabilité de la mise en œuvre par une pré-étude ou des références ?

→ 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)

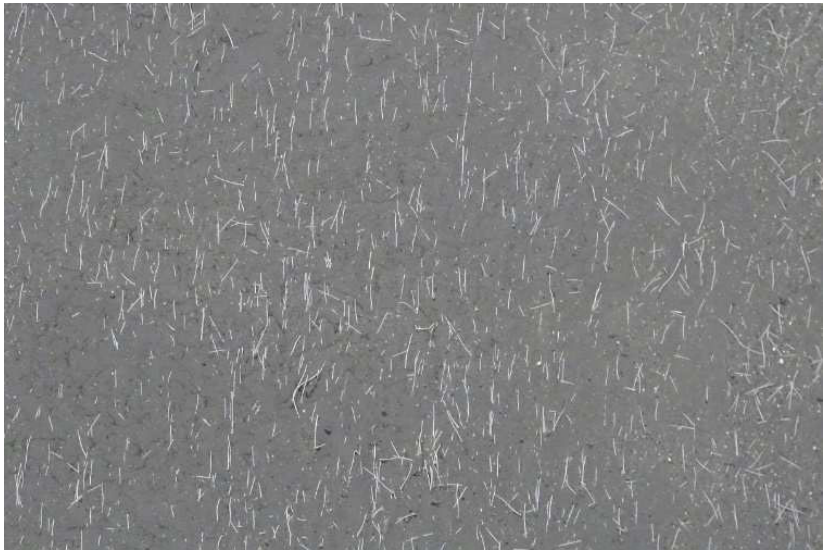


Clauses contractuelles types

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

Elargissement 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





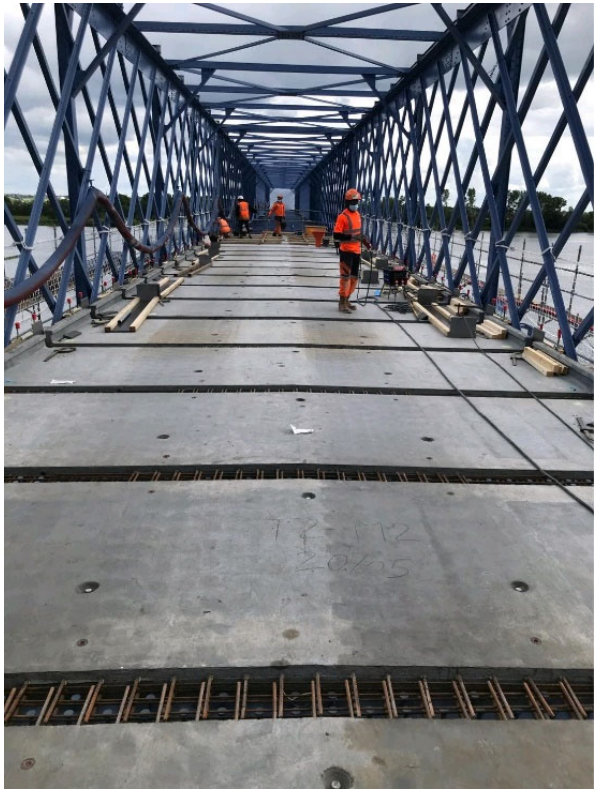
Moisage – blocs coulés en place : Le Mans



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** ?