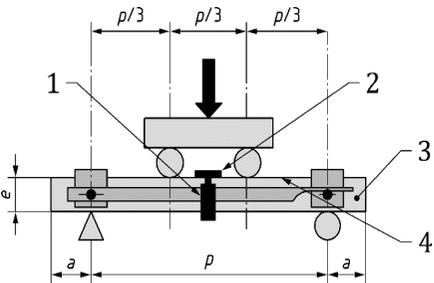


# BFUP : quel référentiel ?

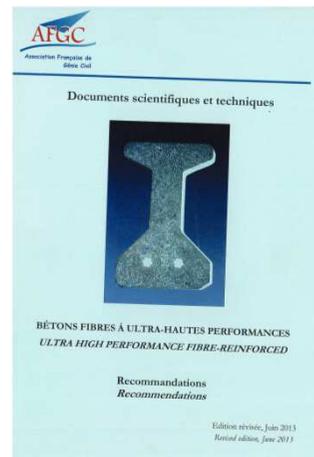
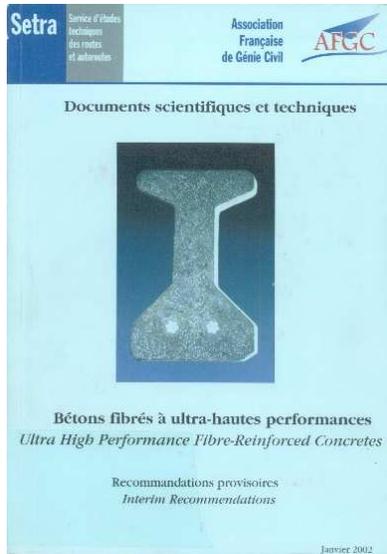


François TOUTLEMONDE  
 IFSTAR Matériaux et Structures  
 Président du chapitre ACI de Paris

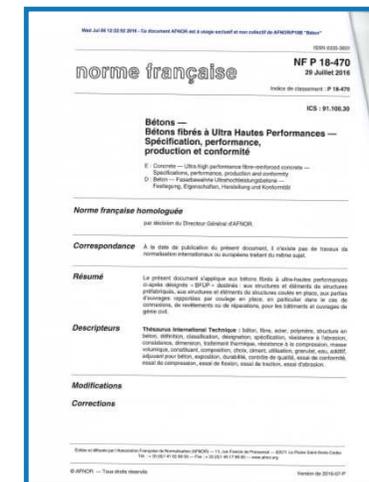
Journée technique AFGC Grand Ouest  
 Remise à niveau des ponts de Thouaré  
 29 juin 2017

# Historique

- 1997 poutrelles de Cattenom : cahier des charges EDF
- 2002 recommandations provisoires AFGC-Sétra, notamment basées sur la réalisation des OA de Bourg-lès-Valence
- 2013 recommandations révisées AFGC, notamment appliquées pour la réalisation de l'anneau de N.-D. de Lorette
- Nombreuses ATEX
- 2014 la révision du fascicule 65 (non encore publiée) mentionne les recommandations AFGC 2013
- 2016 publication de NF P18-710 et NF P18-470



François TOUTLEMONDE



# La démarche de normalisation : pourquoi ?



- Décision de lancement d'une démarche de normalisation des BFUP au niveau français : **début 2013**
- Représentation de toutes les parties prenantes : entreprises – maîtres d'ouvrages publics – industrie des matériaux – préfabrication – fournisseurs – bureau d'études et de contrôle
- Bénéfices attendus
  - Acceptation facilitée des solutions BFUP (**confiance des MOA**)
  - Règles clarifiées (**contrats**) pour la conception, **assurabilité** facilitée
  - Clarification du consensus technique issu des Recommandations AFGC et **consolidation de l'expérience** acquise sur 20 ans de conception et réalisation avec du BFUP
  - **Discussions facilitées et mieux étayées au niveau international**

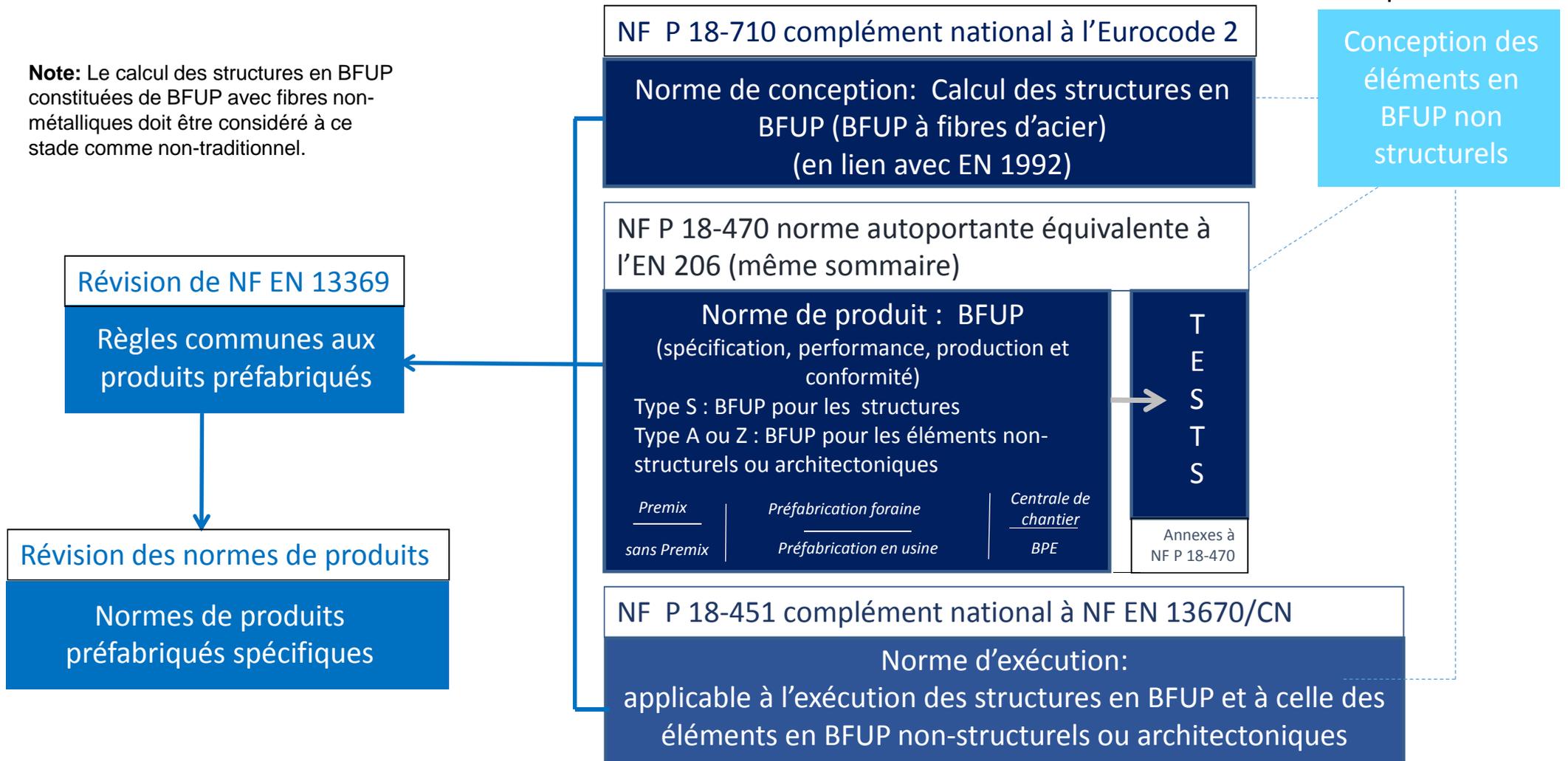


# Architecture de la normalisation française des BFUP

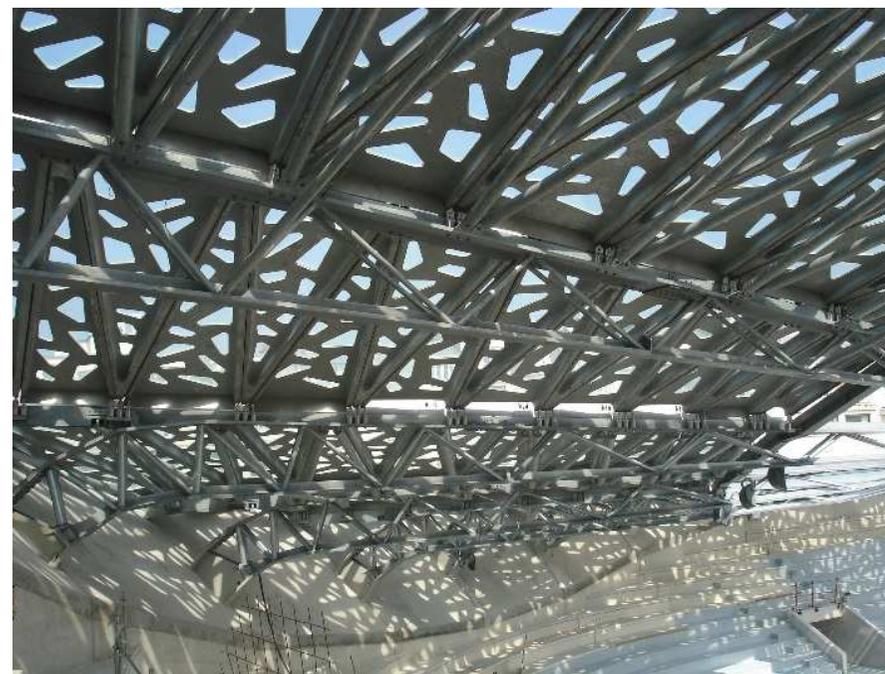
**Note:** Le calcul des structures en BFUP constituées de BFUP avec fibres non-métalliques doit être considéré à ce stade comme non-traditionnel.

Approbation technique au cas par cas

Conception des éléments en BFUP non structurels



- **NF P 18-710** préparée au sein du comité BNTRA CN EC2 (groupe miroir du TC 250 SC2)  
Complément national à l'Eurocode 2 (parties 1-1 et 1-2, ponts + calcul sismique)  
Première réunion avril 2014  
Enquête publique fructueuse, approbation pour publication 13 novembre 2015  
**Publiée 9 avril 2016 – Version anglaise octobre 2016**
- **NF P 18-470** préparée au sein de la commission AFNOR P18 B (groupe miroir du TC 104 SC1)  
Norme autoportante équivalente à la NF EN 206/CN  
**Même sommaire que EN 206** + annexes pour adapter les essais  
Première réunion juillet 2013  
Approbation pour publication 7 octobre 2015  
**Publiée 6 juillet 2016 – Version anglaise novembre 2016**
- **NF P 18-451** préparée par BNTEC P 18 E (gr. miroir du TC 104 SC2)  
Complément national à la NF EN 13670/CN  
Première réunion novembre 2015  
Projet pour enquête en cours de **discussion finale**
- **NF EN 13369** en cours de **révision**

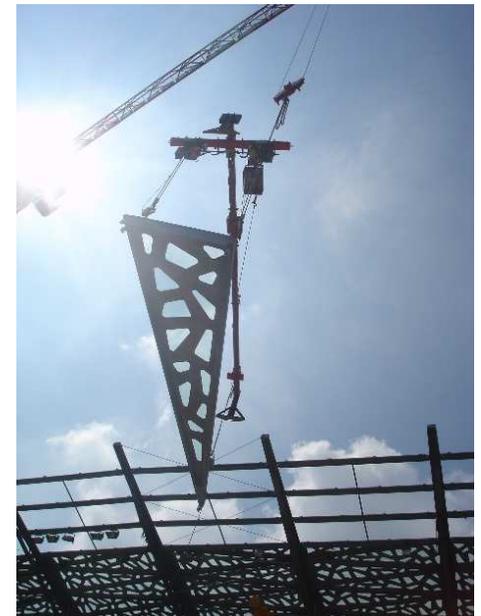
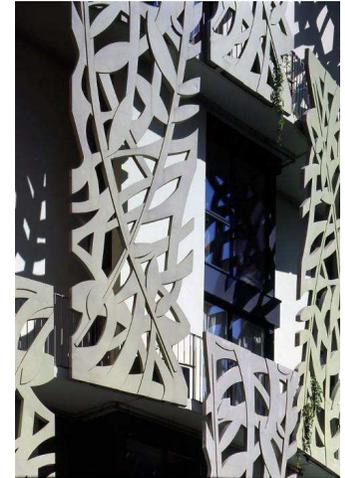


# Focus sur quelques points majeurs de la NF P 18-470

L'élaboration de la norme a conduit à des adaptations formelles importantes par rapport aux Recommandations AFGC

## Définitions

- **BFUP**
  - $f_{ck} \geq 130 \text{ MPa}$
  - résistance en traction post-fissuration importante
- **Pré-mélange** de constituants (+ producteur de)
  - Mélange homogène de constituants, de composition déterminée et constante, réalisé en usine, destiné à la production de BFUP, et mis sur le marché accompagné d'une carte d'identité
- Carte d'identité
- Epreuve d'étude / épreuve de convenance



# Type et designation

fonction du type de fibres contribuant à la non-fragilité

- BFUP de type **M**

(fibres métalliques conformes à NF EN 14 889-1)

- $f_{ck} \geq 150 \text{ MPa}$       **BFUP de type S**  
BFUP utilisables pour calcul selon NF P 18-710
- $130 \text{ MPa} \leq f_{ck} < 150 \text{ MPa}$       **BFUP de type Z**

- BFUP de type **A**

(fibres PVA conformes à NF EN 14 889-2)

- Autres fibres : étude / avis technique spécifique



# Classes

## Résistance en compression

Classes basées sur une détermination de référence  $f_{ck-cyl}$  sur cylindres 11-22

- Autres tests acceptables moyennant calibration d'un coefficient de passage (spécifique à chaque BFUP).
- Niveaux de résistance intermédiaires autorisés (arrondis à 5 MPa)



Classe de résistance en compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres $f_{ck-cyl}$ (MPa)	Résistance caractéristique minimale indicative sur cubes $f_{ck-cube}$ (MPa)
<b>BFUP 130/145</b>	130	145
<b>BFUP 150/165</b>	150	165
<b>BFUP 175/190</b>	175	190
<b>BFUP 200/215</b>	200	215
<b>BFUP 225/240</b>	225	240
<b>BFUP 250/265</b>	250	265



# Classes et exigences minimales

## Comportement en traction

- $f_{ctk,el} \geq 6,0 \text{ MPa}$

- Comportement post-fissuration **écrouissant en flexion** vérifiant pour  $w_{lim} = 0,3 \text{ mm}$

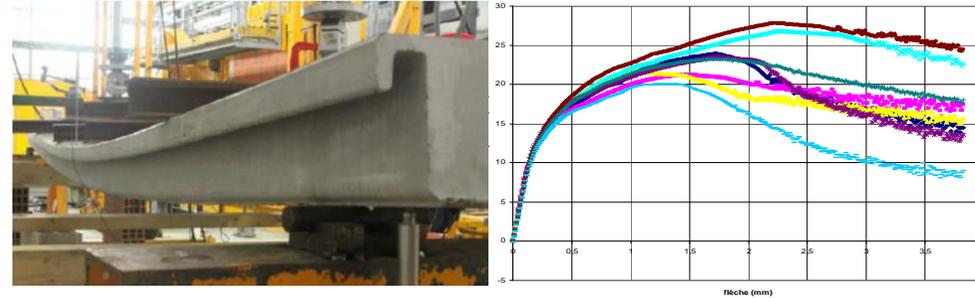
$$\frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \frac{\sigma(w)}{1,25} dw \geq \max(0,4 f_{ctm,el}; 3 \text{ MPa})$$

- Classes:

- T1 (adoucissant en traction directe)  $f_{ctfm}/1,25 < f_{ctm,el}$  et  $f_{ctfk}/1,25 < f_{ctk,el}$
- T2 (peu écrouissant)  $f_{ctfm}/1,25 \geq f_{ctm,el}$  et  $f_{ctfk}/1,25 < f_{ctk,el}$
- T3 (très écrouissant)  $f_{ctfm}/1,25 \geq f_{ctm,el}$  et  $f_{ctfk}/1,25 \geq f_{ctk,el}$

- **Spécification (3 points):**

- Courbe de réponse  $\sigma(w)$  ou  $\sigma(\epsilon)$ , à comparer à l'estimation expérimentale de la courbe caractéristique sur prismes moulés,
- Classe (T1, T2 ou T3),
- Jeu de facteurs d'orientation  $K_{global}$  et  $K_{local}$  dans les directions pertinentes



# Classes

## Consistance



- Détermination basée sur la valeur d'étalement obtenue par l'un des 3 essais : cône d'Abrams, cône ASTM (sans chocs) ou essai à la table à chocs
- Normalement valeur cible associée à DPU (par ¼ h)
- Sinon, spécification par **classe de consistance** (également associée à DPU) :
  - a) **Ca : BFUP susceptible d'être autoplaçant**, c'est-à-dire généralement susceptible d'être mis en place sans vibration ni aide mécanique à l'écoulement ;
  - b) **Cv : BFUP visqueux**, c'est-à-dire généralement susceptible d'être mis en place sans vibration mais qui nécessite une aide mécanique à l'écoulement ;
  - c) **Ct : BFUP à seuil**, c'est-à-dire généralement susceptible de s'écouler sous l'effet d'un cisaillement dynamique mais dont la surface libre au repos est susceptible de tenir une pente.
- Essai déterminé d'un commun accord entre prescripteur, utilisateur et fournisseur du BFUP
- Pour les classes Ct, aptitude à la mise en œuvre à assurer dans les conditions du projet, caractérisée par une performance mesurée selon un mode opératoire faisant l'objet d'un accord entre le producteur, le prescripteur et l'utilisateur.

# Classes

## Traitement thermique



- **STT** sans traitement thermique
- **TT1** accélération de l'hydratation (avant prise)
  - On doit vérifier  $f_{cm} (TT1) \geq 88\% f_{cm} (STT 20^{\circ}C)$
  - Effet significatif si  $f_{cm} (TT1) > 107\% f_{cm} (STT 20^{\circ}C)$   
ou si  $f_{cm} (TT1) < 93\% f_{cm} (STT 20^{\circ}C)$
- **TT2** après prise, température élevée (de l'ordre de  $90^{\circ}C$ ) et HR supérieure à 90% pendant quelques dizaines d'heures
- **TT1+2** si successivement TT1 puis TT2
- Propriétés des BFUP durcis (y compris % feu):
  - à **28 jours** pour STT et TT1
  - **après le traitement post-prise** pour TT2 et TT1+2

# Classes et exigences minimales :

## Durabilité et résistance aux transferts

- Exigences « de base »
  - porosité à l'eau à 90 jours  $\leq 9,0 \%$  (NF P 18-459)
  - $D_{Cl-90j} \leq 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  (XP P 18-462 adaptée A.1)
  - $K_{g\text{az } 90j} \leq 9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  (XP P 18-463 adaptée A.2.1)
- Classes de durabilité potentielle améliorée
  - $D_{p+}$  porosité à l'eau à 90 jours  $\leq 6,0 \%$  (NF P 18-459)
  - $D_{c+}$   $D_{Cl-90j} \leq 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  (XP P 18-462 adaptée A.1)
  - $D_{g+}$   $K_{g\text{az } 90j} \leq 1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  (XP P 18-463 adaptée A.2.2)



# Exigences de durabilité associées à la spécification des classes



- **DUP 50 ans**

Seuils de base sauf XA2, XA3 (en sus, exigences liant) et XH3 (en sus, performance LPC66 prévention RSI)

- **DUP 100 ans**

Seuils de base sauf XS3, XD3 (Dp+ et Dc+), XF4 (Dp+, Dc+ et Dg+), XA2, XA3 (Dc+ et exigences liant) XH2 (performance LPC66 prévention RSI) et XH3 (Dp+ et performance LPC66 prévention RSI)

- **DUP 150 ans**

Pour projets exceptionnels où DUP > 100 ans

En général Dp+, Dc+ et Dg+

# Résistance au feu

## comportement du BFUP à haute température

- **Détermination des données** pour justification selon NF P 18-710
  - Forfaitaire conforme NF EN 1992-1-2 et NA pour l'évolution avec la température de la masse volumique, de la chaleur spécifique et de la conductivité thermique
  - A baser sur des essais à chaud selon recommandations RILEM (épreuve d'étude ou carte d'identité) pour l'évolution de la résistance en compression, du module d'Young, de la dilatation thermique et du comportement en traction
- Maîtrise du **risque d'éclatement** (propriété pas intrinsèque au matériau) selon NF P 18-710 (essai représentatif)



# Retrait et fluage

## identification des caractéristiques / spécification



Distinguer plusieurs aspects:

- **Développement précoce** du retrait endogène, faible amplitude du retrait de séchage et du fluage de dessiccation dès que le BFUP est suffisamment hydraté :
  - Point d'attention en exécution; retrait et fluage de **dessiccation négligés après traitement TT2**
- Modalités conventionnelles de détermination de l'amplitude de retrait total, qui fait le cas échéant partie de la care d'identité et peut constituer une exigence spécifiée
  - Depuis la prise jusqu'à 90 jours, à 20°C et 50 % RH
- Détermination des expressions de calcul du fluage et du retrait, lorsque la **norme de calcul NF P 18-710** s'applique
  - **Calibration** analogue à celle de la méthode de l'annexe B de l'EN 1992-2; possibilité de spécifier les valeurs
- Maîtrise des effets des déformations différées, éventuellement sans calcul
  - Tests possibles selon un mode opératoire à convenir, par exemple **pour assurer la géométrie et la stabilité dimensionnelle** de produits préfabriqués; ces tests sont obligatoires pour les éléments précontraints

# Classes

## Résistance à l'abrasion « hydraulique »

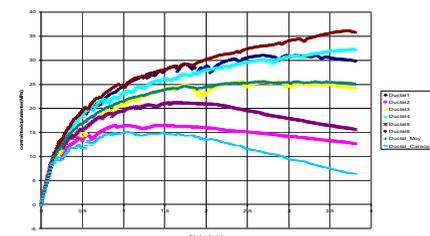
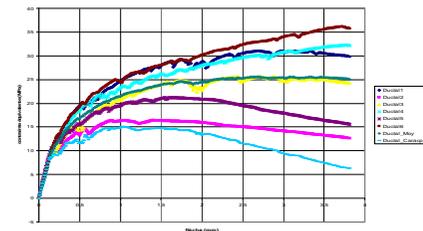


- Sévérité de l'exposition classée par référence à l'EC2 repris par NF P 18-710: XM1, XM2 ou XM3
- Classes de performance basée sur l'indice d'abrasion (essai annexe I) : RM1, RM2 ou RM3
- Exigences permettant de se dispenser d'une épaisseur sacrificielle :
  - XM1 → RM1, RM2 ou RM3 → indice d'abrasion < 1,5
  - XM2 → RM2 ou RM3 → indice d'abrasion < 1,0
  - XM3 → RM3 → indice d'abrasion < 0,7
- En cas d'abrasion « sèche » (frottement, usure sans présence de fluide), essai de performance à définir



# Epreuve d'étude

- La NF P 18-470 précise que le BFUP est un béton “à **propriétés spécifiées**”. Le choix du matériau BFUP pour atteindre ces exigences derive de l'expérience documentée dans la carte d'identité d'un matériau BFUP, ou est validée par les résultats d'une épreuve d'étude. La NF P 18-470 en donne les **critères d'acceptation**.
- L'épreuve d'étude est réalisée par le **producteur de BFUP** ou sous sa responsabilité.
- Vérification que la formule nominale atteint les performances + robustesse
  - **Formule nominale**, avec ou sans constituant pré-mélangé (NB : **tolérance  $\pm 2\%$** )
  - Deux gâchées **dérivées : solide et liquide**
- L'épreuve d'étude fixe aussi
  - Les **principes de malaxage**
  - Le **traitement thermique** TT2, TT1+2 ou TT1 si effet significatif
- Le cas échéant, la carte d'identité se substitue en tout ou partie aux résultats de l'épreuve d'étude



# Epreuve de convenance

- Elle permet de vérifier que les performances requises sont effectivement atteintes dans les conditions de production spécifiques du projet.
- Elle est réalisée par le producteur de BFUP et l'utilisateur de sorte que le prescripteur puisse valider le choix du BFUP en tenant compte de la mise en œuvre
- Elle permet de fixer:
  - Le protocole de **malaxage**
  - La procédure de **transport**
  - Le protocole de **mise en œuvre, finition et cure** (atteinte de 30% de fck)
  - Le protocole de **TT1** éventuel (effet limité à moins de 7% de fck)
- Elle doit comprendre la réalisation d'un **élément témoin** représentatif, fabriqué sous la responsabilité de l'utilisateur du BFUP, pour vérifier l'atteinte des performances requises
- En particulier, les **facteurs d'orientation K** sont déterminés selon l'annexe F
  - Les critères d'acceptation doivent être satisfaits vis-à-vis des valeurs de K spécifiées
  - $1,0 \leq K_{\text{local}} \leq 2,5$  et  $1,0 \leq K_{\text{global}} \leq 2,0$



# Etapes et responsabilités relatives à l'évaluation de conformité

- Conformité du **pré-mélange**, le cas échéant
  - Par le **producteur du pré-mélange** (annexe G)
- Evaluation initiale en **épreuve d'étude**
  - Par le **producteur du BFUP**, acceptation par le prescripteur
- Evaluation initiale en **épreuve de convenance**
  - Par le **producteur et l'utilisateur**, acceptation par le MOE
- Evaluation et déclaration en phase de **production**
  - Par le **producteur** (BFUP frais et conformité potentielle des propriétés du BFUP durci)
  - Par l'**utilisateur** (conformité aux protocoles de mise en place, cure et traitement et propriétés finales)



# Adaptation des procédures d'essais et des méthodes d'analyse des résultats

- Annexe A : Résistance aux transferts
  - Coefficient de diffusion des ions chlorures
  - Mesure de perméabilité apparente aux gaz
- Annexe C : Essai de compression
- Annexe D : Flexion sur prismes et méthode d'exploitation
- Annexe E : Flexion sur plaques minces et exploitation
- Annexe F : Facteurs d'orientation K
- Annexe I : Abrasion hydraulique



Clauses essentiellement basées sur les Recommandations AFGC (2013) mais les alternatives et variantes ont été éliminées et les méthodes simplifiées si possible

# NF P 18-710 : Les grands principes

- Statut de complément national à NF EN 1992

permet de conserver la démarche et le cadre des Eurocodes (nombreuses clauses « inchangées »)

le format de l'Eurocode (déjà adopté dans le document AFGC révisé de 2013) clarifie la méthodologie : hypothèses de l'analyse structurale, maîtrise de la fissuration à l'ELS, règles générales de non-fragilité



- Sur la base du chapitre 2 des Recommandations AFGC (révision 2013)

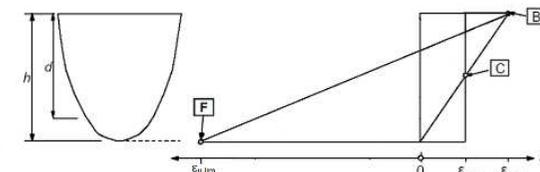
- Prise en compte de la capacité du BFUP en traction, y compris après fissuration: coefficient partiel  $\gamma_{cf}$

- Distribution des fibres et orientation prises en compte par les facteurs d'orientation K

- Enrobages réduits de par la résistance des BFUP aux transferts, mais exigence de mise en œuvre  $c \geq 1.5 L_f$

- Calcul ELU en flexion suivant le diagramme des déformations admissibles (pivots)

- Calcul à l'effort tranchant supposant des contributions additives du BFUP tendu (fibres) et des armatures transversales (le cas échéant)

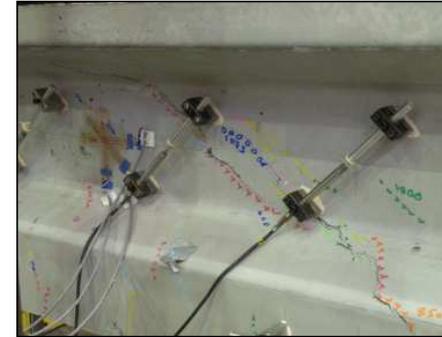


- B** - limite de déformation relative du BFUP en compression
- C** - limite de déformation relative du BFUP en compression pure
- F** - limite de déformation relative au BFUP en traction



## NF P 18-710 : Clauses nouvelles ou de formalisation améliorée

- Interaction avec les dispositions de NF P18-470 pour l'identification des propriétés de calcul du matériau (classes de calcul T1\*, T2\* ou T3\* pour le comportement en traction)
- Conditions de vérification du flambement / instabilité élastique clarifiées, tenant compte de la contribution du BFUP tendu
- Conditions d'acceptation de justifications par analyse non-linéaire avancée (annexe V)
- Clauses de vérification en fatigue, exclusion explicite des cas où le risque de rupture en fatigue est improbable
- Explicitation des vérifications de cisaillement, torsion et poinçonnement, avec une meilleure distinction des cas du BFUP non-armé, armé, précontraint, et clauses plus complètes et précises pour le cas des charges concentrées.
- Fourniture d'un jeu explicite de coefficients partiels dans le cas des actions accidentelles
- Annexe R normative pour la vérification au feu, critique pour l'application sûre des BFUP en bâtiment et en tunnels – fondée sur les méthodes de NF EN 1992-1-2 à l'exclusion des règles simplifiées



# NF P 18-710 : Nouvelles clauses pour la justification au séisme

## Annexe U normative

- Pour satisfaire à l'exigence réglementaire nationale d'application de l'Eurocode 8 dans le cas des bâtiments, il était nécessaire de préciser la prise en compte de cette exigence dans le cas des éléments en BFUP.

## Principales dispositions de l'annexe U

- **Coefficients partiels** associés aux vérifications sismiques pour le matériau : 1,2 pour le BFUP tendu, 1,3 pour le BFUP comprimé.
- Il est admis que les éléments sont justifiés si leur comportement reste **élastique**, en tenant compte de leur inertie "non-fissurée" et d'un coefficient d'amortissement de 2 %, et que les effets des actions sismiques restent inférieurs au moment ultime / effort normal résistant.
- Lorsqu'une **demande de ductilité** est requise, elle doit être vérifiée expérimentalement. Pour cette vérification, le composant représentatif doit être soumis à au moins 5 cycles de chargement jusqu'au déplacement ultime requis, et la chute de capacité portante correspondant à l'atteinte de ce déplacement au 5ème cycle doit rester inférieure à 20 % de la charge maximale.



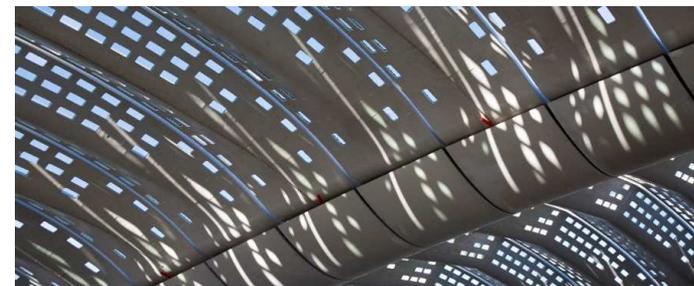
# PR NF P 18-451 : principales dispositions

## Complément à la norme d'exécution NF EN 13670/CN

- **La classe d'exécution 2** est la classe minimale de référence (contrôle obligatoire – pas seulement auto-contrôle – de toutes les opérations de bétonnage importantes).
- Compatibilité recherchée avec la préfabrication (NF EN 13369)
- Validité conservée des clauses existantes relatives aux armatures, à la précontrainte, à l'assemblage des éléments préfabriqués etc.

## Principales additions ou modifications spécifiques

- Indications complémentaires sur les **coffrages** : étanchéité, prévention des déformations gênées, contrôle de la géométrie, prévention du bullage, facilitation de la mise en place du BFUP...
- Contenu du **programme de bétonnage** et indications sur sa validation : absence de vibration interne, prévention des reprises non traitées, cas de la mise en place par temps chaud ou par temps froid...
- Cure, traitement thermique, accompagnement du refroidissement
- Coulage du BFUP au contact d'autres matériaux
- **Tolérances géométriques**



# Etat des lieux pour l'information détaillée

- **NF P 18-470 (matériau)**

<http://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p18-470/betons-betons-fibres-a-ultra-hautes-performances-specification-performance-production-et-conformite-/article/866839/fa063353>

Versions Française et Anglaise disponibles

- **NF P 18-710 (conception)**

<http://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p18-710/complement-national-a-l-eurocode-2-calcul-des-structures-en-beton-regles-specifiques-pour-les-betons-fibres-a-ultra-hautes-p/article/856913/fa063075>

Versions Française et Anglaise disponibles

- **NF P 18-451 (exécution)**

Projet complet pour mise à l'enquête attendu fin 2017

- **Présentation et retour d'expérience en confrontation au niveau international à l'occasion du symposium AFGC-ACI-*fib*-RILEM à Montpellier (FR),**

**UHPFRC 2017**      **October 2-4, 2017**

[www.afgc.asso.fr/UHPFRC2017/](http://www.afgc.asso.fr/UHPFRC2017/)



François TOUTLEMONDE



# Quelques réflexions au-delà des normes

- **Tous les BFUP ne se « valent » pas** : la liste des caractéristiques utiles pour le projet (nécessitant une spécification) est plus longue qu'en béton ordinaire (cf. NF P18-470 section 6 « spécification du BFUP »)
  - utilité de la **carte d'identité** (gain de temps)
  - attention dans le cas de variantes
  - **interaction matériau / projet** encore plus critique que dans des variantes BO / BHP (incidence économique, concurrence et méthodes)
- **Un BFUP n'est pas seulement un prémix ou une formule**
  - importance de **l'épreuve de convenance** pour valider le programme de bétonnage / les traitements / atteinte des facteurs K
  - **responsabilités combinées** de l'utilisateur et du fournisseur
- **Le « savoir-faire BFUP »** concerne a minima
  - le fournisseur de prémix (le cas échéant), le producteur du BFUP frais (rarement BPE « classique »)
  - l'utilisateur du BFUP frais (préfabricant ou entreprise), l'entité qui assemble les éléments en BFUP, le cas échéant
  - le bureau d'études, le bureau de contrôle, les laboratoires, le prescripteur ou maître d'œuvre

**Situations organisationnelles et contractuelles diverses** pour un résultat technique qui doit être du niveau attendu et explicité par le client final...

