

RECOMMANDATIONS : BIEN PRESCRIRE LES BÉTONS

LES BFUP : BÉTONS FIBRÉS À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES

Pour la prescription d'ouvrages ou éléments en BFUP, par référence à la norme NF P18-470 §6, le prescripteur du matériau doit spécifier dans le CCTP :

- La conformité du BFUP à la norme NF P 18-470
- La classe de résistance à la compression (sur la base d'une résistance caractéristique sur cylindres comprise entre 130 et 250 MPa)
- La classe associée au type de fibres : Type M ou Type A
- La classe de consistance : Ca / Cv /Ct, si cette dernière n'est pas spécifiée par valeur cible
- La classe de traitement thermique : STT / TT1 / TT2 / TT1+2
- La classe de comportement en traction : T1, T2 ou T3
- La courbe de comportement en traction, pouvant être définie de façon simplifiée par la valeur caractéristique de la limite d'élasticité en traction (mini 6 MPa), la résistance post-fissuration et l'ouverture de fissure associée
- Le jeu de facteurs d'orientation Klocal / Kglobal.
- Les classes d'exposition pour chaque partie d'ouvrage.
- La durée d'utilisation de projet.

Si nécessaire :

- La classe de résistance à l'abrasion : RM1 / RM2 / RM3
- Toutes autres caractéristiques adaptées au projet, comme précisé au §6.3 de la NF P18-470 : retrait, résistance au feu...

Pour l'application du fascicule 65, en cas d'utilisation de BFUP, la référence aux recommandations de l'AFGC (2013) est à remplacer par une référence au corpus normatif actualisé : NF P18-710 pour les règles de conception, NF P18-470 pour la spécification du matériau et sa conformité, et NF P18-451 pour l'exécution.

- Le choix d'un BFUP se fait selon des critères de performances mécaniques, d'ouvrabilité (ce qui nécessite d'anticiper la méthode de mise en œuvre), d'esthétique et de durabilité.
- Les propriétés des BFUP définies dans la norme matériau (NF P 18-470) sont pour partie issues des caractéristiques nécessaires à la justification de l'ouvrage par application de la norme calcul (NF P 18-710).
- Si le projet correspond à un usage structurel du BFUP justifié par application de la norme NF P18-710, le BFUP doit être un BFUP-S (BFUP de type M dont la résistance caractéristique à la compression est au moins de 150 MPa).
- Les propriétés de durabilité sont induites par les choix de la DUP et des classes d'exposition (cf. Tableau 6 de la norme NF P18-470, §5.3.3).
- Selon les projets, certaines exigences complémentaires, définies au paragraphe 6.3 de la norme NF P 18-470, peuvent faire l'objet d'une prescription particulière.

LES BFUP DANS LE CONTEXTE NORMATIF

Les BFUP relèvent de 3 normes relatives au Matériau, au dimensionnement et à l'exécution.

La norme NF P 18-470 (Bétons - Bétons fibrés à ultra hautes performances - Spécification, performance, production et conformité – Juillet 2016) donne les informations nécessaires à la prescription du matériau BFUP pour des structures et éléments de structure préfabriqués, pour des structures et éléments de structures coulés en place, pour des parties d'ouvrage rapportées par coulage en place (connexions, revêtements, réparations...) et pour des éléments non-structuraux ou architectoniques.

La norme NF P 18-710 (Complément national à l'Eurocode 2 - Calcul des structures en béton : règles spécifiques pour les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP)) fournit les règles de conception des structures en BFUP (pour les BFUP-S).

La norme NF P 18-451 (Exécution des structures en béton – règles spécifiques pour les BFUP) complète et adapte la norme NF EN 13670/CN (NF EN 13369 dans le cas des produits et éléments préfabriqués).

CLASSIFICATION DES BFUP

Les BFUP peuvent être classés selon différents critères liés à leurs performances mécaniques ou de durabilité pour en faciliter la spécification. Les paragraphes ci-après détaillent chacune de ces classifications.

CLASSES ASSOCIÉES AU TYPE DE FIBRES

Les BFUP peuvent être classés selon la nature des fibres qui contribuent à assurer leur caractère écrouissant :

- **Les BFUP sont de Type M** (Métalliques) lorsqu'il s'agit de fibres métalliques
- **Les BFUP sont de Type A** (Autres) lorsqu'il s'agit d'autres fibres, en particulier les fibres organiques.

Note : Seuls les BFUP de Type M sont couverts par la norme NF P 18-710.

CLASSES DE RÉSISTANCE A LA COMPRESSION

Le BFUP doit notamment être prescrit en fonction de sa résistance en compression par référence à sa résistance caractéristique à 28 jours f_{ck-cyl} mesurée sur cylindres de dimensions nominales 110 mm/220 mm, communément appelés « 11/22 ».

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres	Résistance caractéristique minimale indicative sur cubes
	f_{ck-cyl} [MPa]	$f_{ck-cube}$ [MPa]
BFUP 130/145	130	145
BFUP 150/165	150	165
BFUP 175/190	175	190
BFUP 200/215	200	215
BFUP 225/240	225	240
BFUP 250/265	250	265

Tableau 5 de la norme NF P18-470

Note 1 : Les BFUP de type M dont la résistance caractéristique à la compression est au moins de 150 MPa sont notés BFUP-S. Le calcul des structures en BFUP-S est couvert par la norme NF P 18-710.

Note 2 : Les BFUP de Type M dont la résistance est comprise entre 130 MPa et 150 MPa sont notés BFUP-Z.

CLASSES DE COMPORTEMENT EN TRACTION

Les BFUP couverts par la norme NF P18-470 doivent satisfaire a minima ces deux conditions :

- Avoir une valeur caractéristique de la limite d'élasticité en traction à 28 jours $f_{ctk,el}$ supérieure à 6,0 MPa.
- Avoir un comportement suffisamment écrouissant en flexion et doivent vérifier l'inégalité suivante :

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

Où :

- $w_{0,3} = 0,3$ mm
- $f_{ctm,el}$ est la valeur moyenne de la limite d'élasticité en traction, en MPa
- $\sigma(w)$ est la contrainte caractéristique post-fissuration en fonction de l'ouverture de fissure w , en MPa.

La classe de comportement en traction du BFUP doit être prescrite selon les besoins du projet :

- Le BFUP est de **classe T1** (adoucissant en traction directe) lorsque $f_{ctf}/1,25 < f_{ct,el}$ aussi bien pour la courbe moyenne que pour la courbe caractéristique, soit :
 $f_{ctfm}/1,25 < f_{ctm,el}$ et $f_{ctfk}/1,25 < f_{ctk,el}$.
- Le BFUP est de **classe T2** (peu écrouissant) lorsque $f_{ctf}/1,25 \geq f_{ct,el}$ pour la courbe moyenne et que $f_{ctf}/1,25 < f_{ct,el}$ pour la courbe caractéristique, soit :
 $f_{ctfm}/1,25 = f_{ctm,el}$ et $f_{ctfk}/1,25 < f_{ctk,el}$.

- Le BFUP est de **classe T3** (très écrouissant) lorsque $f_{ctf}/1,25 \geq f_{ct,el}$ aussi bien pour la courbe moyenne que pour la courbe caractéristique, soit :
 $f_{ctfm}/1,25 = f_{ctm,el}$ et $f_{ctfk}/1,25 \geq f_{ctk,el}$.

Note : La norme détaille les essais et leur analyse qui permettent de déterminer ces classes de comportement.

CLASSES DE CONSISTANCE

La consistance du BFUP est spécifiée de préférence avec une valeur cible et une marge, pour un des essais de caractérisation prévus. A défaut et notamment aux premières étapes d'un projet, la consistance du BFUP peut être prescrite en utilisant l'une des trois classes de consistance suivantes, en fonction notamment des moyens et méthodes prévus pour le transport et la mise en place du matériau :

- **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
- **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
- **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 (**thixotrope**).

CLASSES DE TRAITEMENT THERMIQUE

Selon les besoins liés à une opération, le prescripteur définit une des quatre classes de traitement thermique à appliquer au matériau :

- **STT** : **Sans Traitement Thermique**.
- **TT1** : Eléments BFUP sur lesquels est appliqué un étuvage qui vise à accélérer le début de prise.
- **TT2** : Eléments BFUP subissant un traitement thermique à température élevée quelques heures après la prise.
- **TT1+2** : Eléments BFUP sur lesquels sont appliqués les traitements thermiques 1 et 2 de manière successive.

Les conditions d'applications de ces traitements thermiques sont détaillées dans le paragraphe 4.4.2 de la norme NF P18-470.

CLASSES LIÉES AUX CONDITIONS D'ENVIRONNEMENT

Une fois les classes d'exposition définies conformément à la norme NF EN 206/CN pour chaque partie d'ouvrage en BFUP et la Durée d'Utilisation de Projet (DUP) imposée par le prescripteur, des propriétés de durabilité des BFUP sont induites selon le tableau en Annexe. Ces propriétés possèdent des seuils de base et des seuils de durabilité améliorée.

Les trois seuils de base des critères minimaux de durabilité que doivent satisfaire les BFUP sont :

- **La porosité à l'eau à 90 jours qui doit être :**
Inférieure ou égale à 9% (Norme NF P18-549)
- **Le coefficient de diffusion des ions chlorures à 90 jours qui doit être :**
Inférieur ou égal à $0,5 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ (Norme XP P18-462 et NF P18-470 Annexe A (A.1))
- **La perméabilité apparente aux gaz à 90 jours qui doit être :**
Inférieure ou égale à $9 \cdot 10^{-19} \text{m}^2$ (Norme XP P18-463 et NF P18-470 Annexe A (A.2.2))

Note : Bien que dits « de base », ces valeurs positionnent les BFUP dans la gamme des matériaux cimentaires à durabilité potentielle très élevée pour les classes d'exposition XC, XS, XD et XF au sens du guide AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages ».

D'autres seuils ont été définis afin de caractériser des BFUP offrant des performances supérieures selon les trois critères précédemment cités. Ces propriétés de durabilité potentielle améliorée sont requises pour répondre à des environnements particuliers.

Un BFUP peut alors appartenir à l'une ou plusieurs des classes suivantes :

Dp+ : Si la porosité à l'eau à 90 jours est inférieure ou égale à 6%

Dc+ : Si le coefficient de diffusion des chlorures à 90 jours est inférieur ou égale à $0,1 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$

Dg+ : Si la perméabilité apparente aux gaz à 90 jours est inférieure ou égale à $1 \cdot 10^{-19} \text{m}^2$

Note : Les environnements et durée d'utilisation prévue au projet où les propriétés de durabilité améliorée s'imposent sont rappelées dans le tableau en Annexe.

CLASSES LIÉES A L'ABRASION HYDRAULIQUE

Certains ouvrages en béton peuvent être exposés à une abrasion plus ou moins importante. Elle peut être mécanique ou hydraulique. L'exposition à l'abrasion mécanique est définie dans l'Eurocode 2-1-1 Partie 4.4.1.2 (13) par trois classes **XM1, XM2, et XM3**. L'exposition à l'abrasion hydraulique, est définie selon les 3 mêmes classes mais est laissée à l'appréciation du prescripteur par la norme NF P 18-710 en fonction du niveau d'agressivité de la houle, des courants, des fluides circulant dans ou autour de l'ouvrage, des frottements et de la présence de sédiments ou matériaux abrasifs en suspension.

Pour répondre à ces environnements de classe XM, les BFUP peuvent être spécifiés par référence à l'une des classes de résistance à l'abrasion hydraulique :

- **Classe RM1 :**
 $1 \leq \text{Indice d'abrasion} < 1,5$ (matériau résistant à l'abrasion « hydraulique »)
- **Classe RM2 :**
 $0,7 \leq \text{Indice d'abrasion} < 1$ (matériau très résistant à l'abrasion « hydraulique »)
- **Classe RM3 :**
 $\text{Indice d'abrasion} < 0,7$ (matériau ultra-résistant à l'abrasion « hydraulique »)

Selon la classe retenue, on pourra se dispenser le cas échéant de l'épaisseur sacrificielle d'enrobage (NF P18-710 §4.4.1.2 (13)).

Note : Le principe du test dit « CNR » (Compagnie Nationale du Rhône) est décrit en annexe I de la norme NF P 18-470.

CLASSES EN FONCTION DE LA DIMENSION MAXIMALE DES GRANULATS

Lorsque le BFUP est classé selon la dimension maximale des granulats, la classification doit se faire à partir de la dimension nominale supérieure du plus gros granulat présent dans le BFUP (D_{sup}) conformément à la norme NF EN 12620+A1. **D_{sup} est inférieur ou égal à 10 mm.**

ANNEXE – TABLEAU SYNTHÉTIQUE DES PROPRIÉTÉS DE DURABILITÉ À PRESCRIRE EN FONCTION DES CLASSES D’EXPOSITION ET DE LA DURÉE D’UTILISATION DU PROJET (DUP).

Classe D'exposition	DUP	Exigences	Commentaires
XC1 XC2 XC3 XC4	50 ans	-	<i>Respect des seuils de base (BFUP)</i>
	100 ans		
	150 ans	Dp+ / Dg+	
XS1 XS2 XD1 XD2 XF2	50 ans	-	<i>Respect des seuils de base (BFUP)</i>
	100 ans		
	150 ans	Dp+ / Dc+ / Dg+	
XF1 XF3	50 ans	-	<i>Respect des seuils de base (BFUP)</i>
	100 ans		
	150 ans		
XS3 XD3	50 ans	-	<i>Respect des seuils de base (BFUP)</i>
	100 ans	Dp+ / Dc+	
	150 ans	Dp+ / Dc+ / Dg+	
XF4	50 ans	-	<i>Respect des seuils de base (BFUP)</i>
	100 ans	Dp+ / Dc+ / Dg+	
	150 ans	Dp+ / Dc+ / Dg+	<i>Nécessite une étude spécifique supplémentaire</i>
XA1	50 ans	-	<i>Respect des seuils de base (BFUP)</i>
	100 ans	-	<i>Respect des seuils de base (BFUP) + (1)</i>
	150 ans	Dp+ / Dc+ / Dg+	<i>+ (1)</i>
XA2 XA3	50 ans	-	<i>Respect des seuils de base (BFUP) + (1)</i>
	100 ans	Dc+	<i>+ (1)</i>
	150 ans	Dp+ / Dc+ / Dg+	<i>+ (1)</i>

Tableau 6 de la norme NF P18-470, §5.3.3

(1) Pour des environnements présentant des risques d'agression chimique, des dispositions particulières doivent être vérifiées concernant le choix du ciment. (NFP 18- 470 Partie 5.2.1)