

RECOMMANDATIONS : BIEN PRESCRIRE LES BÉTONS

LES BFUP : BÉTONS FIBRÉS À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES

Pour la prescription d'ouvrages ou éléments en BFUP, le prescripteur doit définir dans le CCTP :

- **La conformité d'un BFUP conforme à la norme NF P 18-470**
- **La classe de résistance à la compression**
- **La classe associée au type de fibres : Type M ou Type A**
- **La Classe de consistance : Ca / Cv / Ct**
- **La classe de Traitement Thermique : STT / TT1 / TT2 / TT1+2**
- **La valeur caractéristique de la limite d'élasticité en traction (mini 6 MPa) et la classe de comportement en traction : T1, T2 ou T3.**
- **Les classes d'exposition pour chaque partie d'ouvrage.**
- **Durée d'Utilisation Projet.**

Si nécessaire :

- **La classe d'exposition à l'abrasion (XM1/XM2/XM3) (hydraulique ou mécanique) et la performance de durabilité associée (RM1/RM2/RM3).**

- Le choix d'un BFUP se fait selon des critères de performances mécaniques, d'ouvrabilité et de durabilité.
- Les propriétés des BFUP définies dans la norme matériau (NF P 18-470) ne sont pas toutes couvertes par la norme calcul (NFP18-710).
- Si le projet revêt un enjeu structurel, les propriétés minimales devront être conformes aux minimaux de la norme NFP18-710.
- Les propriétés de durabilité sont induites par les choix de DUP et des classes d'exposition.
- 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 applications structurelles ou de protection vis-à-vis d'environnements agressifs.

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)) impose des propriétés mécaniques plus exigeantes. Elle ne concerne que les BFUP structurels (BFUP-S).

La norme NF P 18-451 liée à l'exécution des BFUP est en cours de rédaction. En attendant la parution de ce document, les prescripteurs peuvent se référer aux recommandations AFGC de Juin 2013.

CLASSIFICATION, DÉSIGNATION ET CODIFICATION DES BFUP

Les BFUP peuvent être classés selon différents critères liés à leurs performances mécaniques ou de durabilité. 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 de Type M** (Métalliques) lorsqu'il s'agit de fibres métalliques
- **Les BFUP 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 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 |

Note 1 : Les BFUP de type M dont la résistance caractéristique à la compression est au moins de 150 MPa sont noté BFUP-S. Ils sont couverts par la norme NF P 18-710.

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

CLASSES DE COMPORTEMENT EN TRACTION

Les BFUP couverts par la norme matériau doivent satisfaire au 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
- $s(w)$ est la contrainte caractéristique post-fissuration en fonction de l'ouverture de fissure w , en MPa.

Ensuite, une classe de comportement en traction du BFUP doit être prescrite selon les besoins nécessaires et suffisants 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 l'obtention de ces classes de comportement.

CLASSES DE CONSISTANCE

Selon les besoins liés à une opération (remplissage de coffrages complexes, travail sur un tablier de pont incliné), le prescripteur définit une des trois classes de consistance suivantes :

- **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 complétées dans le paragraphe 4.4.2 de la norme NFP18-470.

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 doit être :**
Inférieure ou égale à 9% (Norme NF P18-549)
- **Le coefficient de diffusion des ions chlorures à 90 jours doit être :**
Inférieur ou égal à $0,5 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ (Norme XP P18-462 et NFP18-470 Annexe A (A.1))
- **La perméabilité apparente aux gaz à 90 jours doit être :**
Inférieure ou égale à $9 \cdot 10^{-19} \text{m}^2$ (Norme XP P18-463 et NFP18-470 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 spécifiés doivent rentrer dans différentes 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 :**
Indice d'abrasion $< 0,7$ (matériau ultra-résistant à l'abrasion « hydraulique »)

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 granulats 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> |

(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)