

NORME PRODUIT ET NORME DE CONCEPTION RÉCEMMENT PARUES EN FRANCE POUR LES BFUP

François TOUTLEMONDE

Université Paris-Est / IFSTTAR

Grégory GÉNEREUX

CEREMA

Michel DELORT

ATILH

Jacques RESPLENDINO

SETEC-TPI

Contexte et objectifs

La démarche de normalisation des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) a été lancée en France sur la base du consensus technique traduit par les Recommandations de l'AFGC (édition révisée en 2013). La possibilité de disposer de normes est en effet considérée comme facilitant l'usage des BFUP pour la conception des ouvrages, et leur acceptation par les assurances. Les normes doivent aussi couvrir la formulation, la spécification et la production des BFUP en s'appuyant sur une expérience probante en France depuis plus de 15 ans.

En accord avec l'architecture des normes issue de la normalisation européenne, trois documents ont dû être mis en chantier :

- une norme couvrant le BFUP en tant que produit de construction, référencée NF P 18-470, qui se substitue à la norme béton et comporte en annexe les adaptations de méthode d'essai et d'analyse spécifiques au cas des BFUP ;
- une norme pour le calcul des structures en BFUP, référencée NF P 18-710, qui constitue un complément national à l'Eurocode 2 ;
- et une norme dédiée à l'exécution des structures en BFUP, apportant des compléments et des amendements à la norme d'exécution NF EN 13670/CN.

Les deux premiers documents ont été publiés en avril 2016, le présent article en expose les points saillants. Le dernier est prévu pour début 2017.

Domaine d'application : définition des BFUP

La norme NF P 18-470 couvre les BFUP renforcés de fibres métalliques de résistance caractéristique en compression supérieure ou égale à 150 MPa (appelés « BFUP-S »), qui relèvent des recommandations de l'AFGC depuis 2002. Le calcul des structures incorporant ces matériaux est l'objet de la norme NF P 18-710. Cependant la norme NF P 18-470 couvre également les « BFUP-A » dont la non-fragilité est assurée par d'autres types de fibres, ainsi que les matériaux BFUP de résistance caractéristique plus faible, néanmoins supérieure à 130 MPa, quel que soit le type de fibres contribuant à en assurer la non-fragilité (cf. ci-après).

A ce jour cependant, par manque d'expérience documentée et d'applications, la conception de structures utilisant des BFUP renforcés de fibres non métalliques ou de résistance inférieure à 150 MPa est considérée comme non traditionnelle. N'étant dès lors pas couverte par la norme NF P 18-710, elle relève d'évaluations techniques spécifiques. D'après la norme NF P 18-470, la désignation « BFUP » normalisée est donc limitée à des matériaux présentant une non-fragilité quantifiable qui, en plus de leur performance de résistance en compression, satisfont à des exigences ou atteignent des seuils de performance vis-à-vis de propriétés (notamment liées à la durabilité) détaillées ci-après. La non-fragilité requise, qui correspond à un comportement effectivement écrouissant du BFUP dans une sollicitation de flexion simple, est ainsi l'une des propriétés remarquables des BFUP outre leur résistance en compression. La norme NF P 18-470 explicite l'inégalité (1) qui doit être vérifiée :



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

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 valeur caractéristique de la contrainte post-fissuration, en fonction de l'ouverture de fissure w , en MPa.

La méthode permettant d'obtenir cette fonction par analyse inverse d'essais de flexion sur prismes est donnée dans deux annexes de la norme NF P 18-470, adaptées des annexes correspondantes des Recommandations AFGC.

La désignation « BFUP » implique aussi l'atteinte des exigences suivantes :

- D_{sup} (dimension nominale supérieure des granulats) inférieur ou égal à 10 mm;
- Masse volumique comprise entre 2200 kg/m³ et 2800 kg/m³;
- Valeur caractéristique de la limite d'élasticité en traction à 28 jours $f_{ctk,el}$ supérieure ou égale à 6,0 MPa;
- Porosité à l'eau à 90 jours $\leq 9,0$ % (selon la norme NF P 18-459);
- Coefficient de diffusion apparente des ions chlorure à 90 jours $\leq 0,5 \cdot 10^{-12}$ m²/s (selon la norme XP P 18-462 avec les adaptations décrites en A.1 (annexe A) de NF P 18-470);
- Perméabilité apparente aux gaz à 90 jours $\leq 9 \cdot 10^{-19}$ m² (selon la norme XP P 18-463 avec les adaptations décrites en A.2.1 (annexe A) de NF P 18-470).

Classes et exigences

Les classes sont définies dans la norme NF P 18-470 pour faciliter la spécification du BFUP. Elles concernent notamment la résistance en compression, le comportement en traction, l'ouvrabilité, le type de traitement thermique éventuellement appliqué, et les caractéristiques de durabilité éventuellement améliorées. La classe de résistance en compression est déterminée par référence à la résistance caractéristique mesurée à 28 jours sur cylindres de diamètre nominal 110 mm et hauteur 220 mm. Le deuxième nombre de la désignation, qui correspond à la résistance sur cube, est indicatif. Les classes courantes sont BFUP 130/145, BFUP 150/165, BFUP 175/190, BFUP 200/215, BFUP 225/240 et BFUP 250/265, mais des valeurs intermédiaires arrondies à 5 MPa peuvent être utilisées.

La classe associée au comportement en traction d'un BFUP est obtenue en comparant la limite d'élasticité $f_{ct,el}$ à la résistance post-fissuration f_{ctf} , tant pour la courbe moyenne que pour la courbe caractéristique. La classe est déterminée en appliquant une valeur forfaitaire du facteur d'orientation K_{global} égale à 1,25 à la partie post-fissuration de la courbe, pour tenir compte de l'effet de la mise en œuvre du BFUP dans la structure. La conformité à la classe spécifiée peut être évaluée pour le matériau, indépendamment de son application structurelle. En conception cependant, comme précisé dans la norme NF P 18-710, c'est la valeur du facteur d'orientation K effectivement mesurée en épreuve de convenue qui est utilisée pour déterminer la classe de calcul associée au comportement en traction, qui gouverne la méthode de vérification. Cette valeur de K_{global} doit être inférieure à 2,0.

La consistance du BFUP est préférentiellement à spécifier sous forme de valeur cible. A défaut, on utilise les classes de consistance. Les classes correspondant à une durabilité potentielle améliorée sont utiles en cas d'exposition particulièrement sévère (zone de marnage ou d'embruns marins, cycles de gel-dégel sévère en présence de sels) ou pour des durées de vie de projet exceptionnelles (plus de 100 ans). Enfin, l'utilisation d'un BFUP relevant d'une classe d'abrasion RM adaptée à l'importance du risque d'abrasion par circulation d'eaux chargées peut permettre de se dispenser de l'épaisseur sacrificielle d'enrobage normalement prévue en réponse à ce risque dans la norme NF P 18-710.

La norme NF P 18-470 détaille les exigences applicables aux BFUP conformes à la norme. Ces exigences concernent les constituants, la composition, les propriétés du BFUP à l'état frais et à l'état durci. Par défaut, les propriétés du BFUP durci sont mesurées à 28 jours sauf si le BFUP est produit avec application d'un traitement thermique post-prise, auquel cas les propriétés sont mesurées après application de ce traitement thermique. Certaines exigences s'appliquent à tous les BFUP, d'autres sont optionnelles en fonction du projet. La norme NF P 18-470 définit le concept de carte d'identité, document qui, lorsqu'il existe, liste pour chaque propriété la performance atteinte par un BFUP donné. La mise en place du BFUP frais, la cure et les éventuels traitements thermiques constituent des opérations relevant des normes d'exécution des ouvrages, tout en ayant une influence critique sur les performances à atteindre par le matériau BFUP. Aussi la norme NF P 18-470 comprend les exigences associées à ces opérations et les dispositions permettant d'en assurer la maîtrise (procédures, grandeurs à contrôler, critères d'acceptation).

Evaluation de la conformité du BFUP

La norme NF P 18-470 définit les différentes étapes de l'évaluation de conformité et de l'acceptation du BFUP fourni, ainsi que l'intervenant en charge de déclarer la conformité aux exigences. Ces étapes comprennent : l'évaluation de la conformité du pré-mélange, le cas échéant ; l'acceptation de l'épreuve d'étude (adaptée le cas échéant avec l'évaluation de la conformité des valeurs déclarées dans la carte d'identité) ; l'acceptation de l'épreuve de convenance ; l'évaluation de conformité en phase de production sur la base des contrôles sur BFUP frais ainsi que sur BFUP durci, après mise en place et éventuels traitements.

La norme NF P 18-470 confirme que le BFUP est toujours un BFUP « à propriétés spécifiées ». L'atteinte des spécifications par le choix approprié d'un BFUP découle de l'expérience consolidée dans la carte d'identité du matériau, ou des résultats probants de l'épreuve d'étude. Cette épreuve d'étude est réalisée par le producteur de BFUP ou sous sa responsabilité. Elle consiste à vérifier que le BFUP permet d'atteindre les exigences du projet, en tenant compte des tolérances de fabrication (elle inclut donc des gâchées selon la formule nominale, et selon les dérivées solide et liquide). Lorsque le BFUP dispose d'une carte d'identité, le producteur de BFUP s'appuie sur les informations qu'elle rassemble pour démontrer que tout ou partie des spécifications sont atteintes. Dans le cas contraire ou si l'information manque, l'épreuve d'étude doit comprendre les essais permettant de déterminer les caractéristiques exigées manquantes et de vérifier qu'elles répondent.

L'épreuve de convenance a quant à elle pour but de vérifier que les exigences sont effectivement atteintes dans les conditions de production du projet. Elle doit être conduite par le producteur de BFUP afin que le prescripteur puisse valider le choix de la composition du BFUP en tenant compte des opérations de transport, mise en place, cure et éventuels traitements précisés dans les spécifications d'exécution. L'épreuve de convenance doit également comprendre la fabrication d'un élément témoin, réalisée sous la responsabilité de l'utilisateur du BFUP frais ; cette étape est indispensable à la validation de l'ensemble des procédures d'exécution, en particulier celles associées à la mise en œuvre, à la cure et aux traitements thermiques, par la démonstration qu'elle doit apporter que les exigences spécifiées (en particulier les facteurs d'orientation K) sont bien atteintes.

La norme NF P 18-470 fournit les critères d'acceptation de l'épreuve d'étude et de l'épreuve de convenance. Elle donne également les objectifs à atteindre au regard de la maîtrise de la production du BFUP, ainsi que les tests et critères d'acceptation à atteindre afin d'assurer que cette maîtrise de la production est effective.

L'évaluation de la conformité du BFUP à la norme NF P 18-470 comprend donc plusieurs étapes :

- a) Evaluation de la conformité du pré-mélange, lorsque le BFUP considéré est produit à partir d'un pré-mélange de constituants (l'évaluation correspond à une conformité potentielle vis-à-vis du BFUP de la carte d'identité associée au pré-mélange) ;
- b) Evaluation initiale de conformité du BFUP par acceptation de l'épreuve d'étude, s'appuyant le cas échéant sur les résultats disponibles dans la carte d'identité du BFUP (l'évaluation porte sur la conformité aux exigences, sans prendre en compte les aspects spécifiques du mode de production) ;
- c) Evaluation initiale de conformité du BFUP par acceptation de l'épreuve de convenance, basée sur la réalisation représentative d'un élément témoin (l'évaluation porte sur la conformité complète aux exigences spécifiées, en tenant compte de la composition, de la fabrication, du transport, de la mise en œuvre et des éventuels traitements) ;
- d) Evaluation de conformité du BFUP en phase de production basée sur l'autocontrôle associé à la production du BFUP frais ;
- e) Evaluation de conformité du BFUP en phase de production basée sur l'autocontrôle associé à la mise en œuvre et aux éventuels traitements, et à l'atteinte des spécifications relatives au BFUP durci.

La conformité du BFUP à la norme NF P 18-470 n'est établie que si la conformité a été vérifiée à chacune de ces étapes, qu'elle ait ou non donné lieu à transfert de propriété.

A l'étape e) ci-dessus l'utilisateur du BFUP, producteur du produit, du composant ou de la structure en BFUP, est responsable de l'évaluation et de la déclaration de conformité du BFUP pour ce qui concerne les opérations de mise en place, cure et traitements thermiques éventuels, et de la conformité aux exigences des propriétés du BFUP mis en œuvre : résistance en compression, comportement en traction, éventuelles autres propriétés spécifiées ou faisant l'objet de contrôles.



Spécificités du calcul des structures en BFUP

En tant que complément national à l'Eurocode 2 (partie 1-1 : Généralités et bâtiments, partie 1-2 : Généralités, calcul au feu, et partie 2 : ponts en béton), la norme NF P 18-710 se focalise sur les clauses spécifiques aux BFUP, en indiquant si les autres clauses s'appliquent sans changement, ou ne s'appliquent pas. Il a été estimé que ce formalisme favoriserait l'utilisation de cette nouvelle norme par les concepteurs familiers de l'Eurocode.

Grâce à ce formalisme, la différence majeure qui consiste à tenir effectivement compte de la contribution du BFUP en traction est mise en évidence. Cette contribution, qui correspond à une courbe de réponse de calcul exprimée en contrainte-déformation ou contrainte-ouverture de fissure, est fournie dans la section 3 « Matériau » avec différents degrés d'approximation. Elle est utilisée dans les vérifications à l'état limite ultime (ELU : flexion, effort tranchant, torsion) et pour les vérifications à l'état limite de service en particulier pour la maîtrise de la fissuration. Elle s'applique aussi, sous certaines limites, aux vérifications utilisant une modélisation en bielles-tirants, et au dimensionnement des chaînages.

Pour le calcul d'exécution, ce sont les caractéristiques du matériau déterminées en épreuve de convenance ainsi que le jeu de facteurs d'orientation effectivement mesurés, qui doivent être utilisés pour paramétrer les lois de comportement de calcul en traction, qui constituent une spécificité du calcul des structures en BFUP. Comme cette prise en compte du comportement en traction des BFUP permet souvent de se dispenser du ferrailage secondaire traditionnel, un coefficient partiel γ_{cf} relatif au BFUP tendu a été défini et calibré sur la base de statistiques de production industrielle effective de BFUP.

La non-fragilité constitue une autre spécificité de la norme NF P 18-710. Les conditions de ferrailage minimum de la section 9 de l'Eurocode 2 sont remplacées par deux vérifications : la première est liée à une ductilité minimale du matériau associée à la reprise d'efforts en traction jusqu'à une ouverture de fissure de 0,3 mm, qui, en tenant compte d'un facteur d'orientation forfaitaire de 1,25, ne doit pas être inférieure à 40 % de la limite de linéarité en traction (équation (1)) ; la seconde concerne les sections non entièrement comprimées, pour lesquelles une marge suffisante doit être vérifiée entre les sollicitations résistantes (moment et effort normal calculés en tenant compte de la contribution du BFUP tendu fissuré) et celles correspondant à la limite du comportement linéaire. Si cette dernière condition est vérifiée avec la seule participation du BFUP, il n'est pas nécessaire de prévoir un ferrailage minimal au titre de la non-fragilité.

Les propriétés supérieures des BFUP influent directement sur les dispositions constructives des projets en BFUP armé, notamment concernant la longueur d'ancrage des armatures, pour lesquelles les règles ont été re-calibrées, et l'épaisseur d'enrobage, pour laquelle le critère associé à une mise en place correcte (en général, enrobage supérieur à 1,5 fois la longueur des fibres) peut devenir prépondérant par rapport à la prévention de la corrosion.

On note enfin que les diverses propriétés constructives des BFUP utiles au calcul (module d'Young, comportement en traction, retrait, fluage...) ne peuvent être déterminées a priori en fonction de la seule résistance en compression. Pour l'avant-projet, un jeu indicatif de valeurs est fourni. Et le cas échéant, les informations des cartes d'identité des BFUP peuvent guider les premiers calculs. Pour la justification finale du projet, il reste cependant obligatoire d'utiliser les valeurs issues de la détermination en épreuve de convenance.

Compléments récents aux règles de calcul

Les points spécifiques décrits ci-avant sont directement issus de l'expérience française du calcul d'ouvrages en BFUP documentée par les Recommandations de l'AFGC révisées en 2013. La préparation de la norme NF P 18-710 a conduit à une formalisation des exigences, en lien avec l'identification des propriétés du matériau selon la norme NF P 18-470. En outre, l'adaptation de la section 5 « analyse structurelle » aux structures en BFUP a conduit à préciser les vérifications de stabilité de forme / prévention du flambement, en tenant compte de la contribution du BFUP tendu, et les possibilités de vérifications (non-linéaires) avancées ont fait l'objet d'une annexe dédiée.

Les règles de vérification en fatigue ont été établies, et les cas d'exclusion où aucun risque de fatigue n'est attendu ont été explicités. Les vérifications à l'effort tranchant, en torsion et au poinçonnement ont été clarifiées en distinguant davantage les cas du BFUP seul, armé ou précontraint, et en détaillant le cas des charges concentrées près des appuis. Un jeu de coefficients partiels correspondant au cas des actions accidentelles a été fourni.

Bien que courte, l'annexe normative R correspondant au calcul au feu est critique pour un emploi sûr des BFUP, par exemple en bâtiment ou en tunnel. Les principes de la NF EN 1992-1-2 ont été conservés, à l'exception des méthodes simplifiées dites « tabulées ». La détermination des propriétés physiques et mécaniques à haute température est à réaliser selon les indications de la norme NF P 18-470, qui comporte des déterminations forfaitaires à partir de courbes normalisées, et des grandeurs nécessitant une détermination expérimentale explicite, pour lesquelles le mode opératoire

est défini. Il est rappelé que la maîtrise de l'instabilité thermique (écaillage), généralement obtenue par un dosage approprié de fibres de polypropylène, ne constitue pas une propriété intrinsèque du matériau et doit être démontrée expérimentalement sur la base d'un essai suffisamment représentatif en termes de géométrie, scénario de feu et chargement mécanique.

L'annexe normative U qui porte sur les vérifications au séisme, courte également, est un ajout également capital pour l'emploi des BFUP. Ces vérifications interviennent par déclinaison de l'application nationale de l'Eurocode 8, et sont règlementairement applicables aux bâtiments. Il était donc nécessaire de se prononcer sur leur prise en compte dans le cas de composants structurels en BFUP. Tout d'abord, les coefficients partiels matériau à utiliser à l'ELU sismique sont précisés. Il est ensuite indiqué comme admis de justifier des éléments en BFUP restant dans le domaine élastique, en prenant en compte l'inertie non-fissurée et un coefficient d'amortissement de 2 %, et en vérifiant que l'effet des actions sismiques est inférieur au couple effort normal / moment résistant ELU. Si des éléments doivent justifier d'un comportement ductile, une démonstration expérimentale est requise. L'élément testé représentatif doit être soumis à au moins 5 cycles de chargement alterné jusqu'au déplacement ultime correspondant à la ductilité requise, sans diminution de capacité portante de plus de 20 % de la charge maximale supportée.

Conclusions

Le présent article souligne les points majeurs des nouvelles normes NF P 18-470 et NF P 18-710 pour les BFUP, en particulier ceux qui apportent des compléments ou une clarification formelle aux indications des Recommandations de l'AFGC (2013). L'adoption pour mise en application de ces normes, que complètera la future norme d'exécution des ouvrages en BFUP, constitue un jalon important pour favoriser la diffusion de l'emploi des BFUP tout en conservant la qualité et la sécurité des applications.

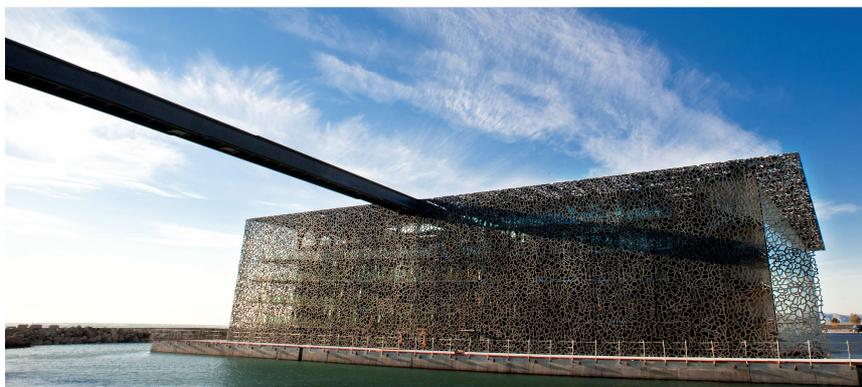
Références

- Association Française de Génie Civil (AFGC) « Bétons Fibrés à ultra-hautes Performances », Edition révisée, Paris, 2013.
EN 1992 Eurocode 2 – Calcul des structures en béton (différentes parties), CEN, 2004.
NF EN 13670/CN Exécution des structures en béton – complément national à la norme NF EN 13670, AFNOR, Paris, 2013.
NF P 18-470 Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Spécification, performance, production et conformité, AFNOR, Paris, 2016.
NF P 18-710 Calcul des structures en béton – Règles spécifiques pour les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP), AFNOR, Paris, 2016
PR NF P 18-451 Exécution des structures en béton – Règles spécifiques pour les BFUP (projet).

Remerciements

Le présent article est adapté d'une contribution au 1^{er} « symposium international interactif » sur les BFUP « UHPC 2016 » (Des Moines, Iowa, USA).

Les auteurs tiennent à exprimer leur reconnaissance à leurs collègues principaux contributeurs des comités d'élaboration des normes NF P 18-470 et NF P 18-710 : S. Bernardi (LafargeHolcim), A. Simon et S. Chanut (Eiffage), C. Clergue (Vicat), P. Rougeau et M. Scalliet (CERIB), P. Zink (Ingerop), B. Fouré, J. Cortade, H. Thonier (experts).



Le MuCEM à Marseille : application emblématique des BFUP (2013), prix d'excellence ACI
MuCEM building in Marseille: iconic UHPFRC application (2013), ACI Excellence Award