

Solutions béton

Les recommandations de l'AFGC
sur les BFUP ont été révisées P. 2

Les conclusions du symposium
international BFUP 2013 P. 4

L'expérience de quelques
réalisations récentes P. 6

Normaliser les BFUP :
état des lieux et enjeux P. 7



BFUP : nouvelles règles, normes NF, et croissance mondiale d'un « art nouveau »

Avec la **révision** des recommandations de l'Association Française de Génie Civil, la tenue à Marseille du deuxième symposium international « Concevoir et construire en BFUP » et le lancement d'une démarche de normalisation française, l'année 2013 aura marqué en France un tournant dans la montée en puissance de l'usage des bétons fibrés à ultra hautes performances. Consacrés dans l'esprit du grand public par la naissance d'un « art nouveau » de la construction en béton manifestée notamment par l'inauguration du MuCEM ou la rénovation du stade Jean Bouin, les BFUP gagnent leur place au soleil.

Au-delà de ces constructions emblématiques, c'est à une croissance mondiale de l'usage de ces matériaux que l'on assiste, au service notamment de la durabilité des ouvrages ou de l'optimisation industrielle d'équipements en béton. Point sur ce virage et les clés pour le négocier.

Texte : François Toutlemonde

Les recommandations de l'AFGC sur les BFUP ont été révisées

Intégrant l'expérience acquise depuis 15 ans et adoptant les notations et le format des Eurocodes, l'édition révisée 2013 des recommandations de l'Association Française de Génie Civil sur les bétons fibrés à ultra hautes performances fait désormais référence (*pour se la procurer : www.afgc.asso.fr*).

Les recommandations provisoires de l'AFGC sur les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) ont constitué en janvier 2002 le premier document général au monde sur ces matériaux élaborés en laboratoire au milieu des années 1990 et utilisés pour des ouvrages à partir de 1997 (passerelle de Sherbrooke, poutrelles d'aéroréfrigérant de Cattenom). Leur édition bilingue a permis une large diffusion qui a inspiré notamment le document correspondant de la *Japan Society of Civil Engineers* (2004).

S'appuyant sur le règlement de calcul en vigueur en France à l'époque (BAEL/BPEL), ces recommandations ont été une référence pour la conception des structures, comme ont pu notamment en témoigner les réalisations pionnières dans tous les domaines du bâtiment et du Génie Civil présentées dans l'ouvrage « *Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Deve-*

lopment » (Toutlemonde & Resplendino eds., ISTE-Wiley, 2011)*.

Marquées par le développement historique des BFUP, les recommandations de 2002 avaient défini leur domaine d'application par un triple critère :

- résistance en compression caractéristique comprise entre 150 MPa et 250 MPa ;
- critère de non-fragilité impliquant de fait l'incorporation d'un fort taux de fibres métalliques ;
- optimisation de la composition conduisant à une durabilité améliorée d'au moins un ordre de grandeur par rapport aux bétons à très hautes performances avec fumée de silice de 110 MPa à 120 MPa de résistance caractéristique.

Elles avaient par ailleurs introduit deux notions nouvelles fondamentales :

- le calcul aux états limites en section fissurée du BFUP, éventuellement non précontraint et dépourvu d'armatures classiques, avec une ouverture de fissure limite, ce calcul pouvant être ramené à un calcul en déformations ;
 - la notion de coefficient d'orientation K déterminé en épreuve de convenue, permettant de tenir compte de la participation réelle du renfort assuré par les fibres dans l'ouvrage, dans la loi de calcul déterminée à partir d'éprouvettes moulées.
- L'expérience acquise après une quinzaine d'années d'emploi de ces matériaux, l'évolution du corpus normatif de référence (marqué notamment par l'entrée en vigueur des Eurocodes) et l'ampleur des résultats de la recherche sur les BFUP au

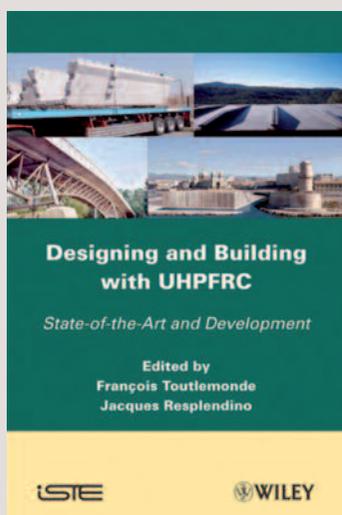
niveau international ont conduit le groupe de travail de l'AFGC sur les BFUP, présidé par Jacques Resplendino (CETE Méditerranée puis Setec TPI) et dont le secrétariat est assuré par Pierre Marchand (Sétra puis IFSTTAR), à engager une révision de ces recommandations provisoires. Parues à l'été 2013, toujours bilingues, et diffusées notamment début octobre lors du colloque international BFUP 2013 à Marseille, ces recommandations remplacent le document précédent, épuisé, et sont disponibles auprès de l'AFGC**. Elles en conservent le plan de principe (premier chapitre consacré à la caractérisation du matériau, deuxième chapitre dédié au calcul des structures, troisième chapitre à la durabilité) en ajoutant un chapitre « Développement Durable » et en étoffant le nombre et la consistance des annexes, pour aboutir à un document d'environ 350 pages.

UNE CONSOLIDATION DES DISPOSITIONS TECHNIQUES ESSENTIELLES

Précisé dans sa forme, le domaine d'application du document n'a pas évolué sur le fond, dans la mesure où l'expérience acquise en termes d'usage structurel et la validation des dispositions associées à la durabilité ont essentiellement été acquises pour les BFUP « historiques ». En particulier, le développement de matériaux « de type BFUP » mais de moindre résistance mécanique, avec un renfort fibré organique ou un moindre taux de fibres éventuellement

compensé par la présence d'armatures passives classiques, a surtout fait l'objet d'applications non structurales ou architectoniques.

La prise en compte dans le dimensionnement de la capacité résistante en traction des BFUP constitue à l'heure actuelle encore une originalité. Même si le code modèle *fib* 2010 donne des indications sur le calcul d'ouvrages en bétons de fibres, ses dispositions simplifiées en termes de lois de comportement restent adaptées à des matériaux de résistance caractéristique conventionnelle et à faible taux de fibres, où ces dernières ne sont en définitive pas critiques vis-à-vis de la sécurité ou de la fonctionnalité de l'ouvrage. Pour les BFUP, non couverts par le code modèle *fib*, le principe de diagrammes de calcul issus d'une identification expérimentale en traction par flexion traitée par analyse inverse, et limités par des états limites d'ouvertures de fissure (éventuellement rendues équivalentes à des déforma-



* Couverture de l'ouvrage, issu du symposium BFUP 2009.



→ Couverture des recommandations révisées, AFGC 2013.

** 15, rue de la Fontaine-au-Roi – 75127 Paris Cedex 11 – www.afgc.asso.fr.

tions), a été conservé dans les recommandations AFGC révisées. Il a été précisé en distinguant notamment :

- les BFUP présentant une loi de comportement caractéristique écrouissante en traction directe (c'est le cas d'un nombre restreint de matériaux, à cause du fort pourcentage de fibres nécessaire) ;

- les BFUP présentant une loi de comportement moyenne écrouissante en traction directe, mais une loi caractéristique adoucissante (ce qui est le cas de la plupart des BFUP disponibles sur le marché) ;

- les BFUP présentant un caractère adoucissant en traction directe (la règle de non-fragilité imposant néanmoins à ces matériaux, généralement peu fibrés, un comportement écrouissant en flexion pure s'ils sont destinés à un usage structurel).

Les modalités d'obtention des lois et diagrammes de calcul ont à cet effet été explicitées et clarifiées, avec une cohérence améliorée pour le cas des éléments minces.

COEFFICIENT K : UNE NOTION PRÉCISÉE

L'importance de la validation sur élément témoin représentatif, lors de l'épreuve de convenance, d'une répartition des fibres capable d'assurer dans l'ouvrage ou l'élément considéré l'atteinte des performances de reprise d'effort en traction, a été reconnue par l'analyse fiabiliste (réduction de l'incertitude sur la propriété dimensionnante par acquisition directe de l'information pertinente) et justifie les coefficients de sécurité « matériau » adoptés. Ainsi le coefficient d'orientation K pondérant la loi issue d'essais de caractérisation sur prismes moulés a été introduit plus largement par le code modèle *fib* 2010 pour l'ensem-

ble des bétons de fibres, notamment sur la base de l'important retour d'expérience acquis lors de la réalisation des ouvrages en BFUP. Malgré le coût et les contraintes organisationnelles qu'occasionnent la réalisation d'un élément témoin représentatif et le prélèvement d'éprouvettes pour caractériser les performances mécaniques à l'issue de la mise en œuvre, cette pratique s'est imposée comme une étape précieuse d'optimisation du mode de mise en place du BFUP et de validation de la sécurité de l'ouvrage. Même en présence d'intervenants très expérimentés, cette étape de l'épreuve de convenance a souvent conduit à des améliorations de formulation et de méthodes de coulage, ou à des adaptations de coffrage, de façon à conserver des valeurs de K modérées, les valeurs par défaut de 1,25 (coefficient global) et 1,75 (coefficient pour les effets locaux) proposées en 2002 se trouvant confortées par l'ensemble de ce retour d'expérience.

Les recommandations révisées de 2013 reprennent donc en les explicitant les dispositions de détermination des propriétés de calcul en traction et de détermination des coefficients K pour les effets locaux et globaux, aussi bien pour les éléments épais que pour les plaques et coques minces, en détaillant le nombre d'essais nécessaires et les modalités de traitement des résultats.

NOUVEAUTÉS ET COMPLÉMENTS

Le développement des formules de BFUP et de la préfabrication en usine d'éléments en BFUP a conduit à détailler les effets du traitement thermique sur le retrait et le fluage, notamment pour tenir compte, en dehors du traitement thermique et hydrique relativement long (typique-

ment 48 h en atmosphère saturée à plus de 90 °C) réalisé sur certains BFUP après prise (typiquement à 48 h d'âge), de traitements thermiques modérés (parfois appelés « étuvages », à une température généralement limitée à 60 °C) destinés à accélérer la prise et faciliter un décoffrage précoce.

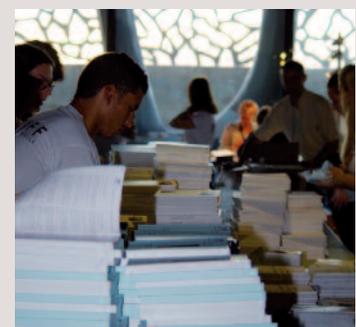
Les vérifications de résistance à l'effort tranchant et au poinçonnement, significativement modifiées dans leur format par souci de compatibilité avec les principes et notations de l'Eurocode 2, ont bénéficié pour leur calibration d'assez nombreux résultats de recherches françaises et étrangères. Parmi elles, des travaux dédiés réalisés à l'IFSTTAR ont notamment couvert les situations où fibres et armatures passives, en présence ou non de précontrainte, interviennent simultanément dans la participation à la reprise des efforts.

La justification des zones d'ancrage de la précontrainte par post-tension, selon une procédure d'essai inspirée du guide d'agrément technique européen 013, est explicitée, de même que les dispositions constructives associées à la présence d'armatures actives ou passives au sein des pièces en BFUP. En cohérence avec l'Eurocode 2, des prescriptions d'enrobage des armatures adaptées à la compacité des BFUP sont indiquées. La résistance au feu des éléments et ouvrages en BFUP a fait l'objet d'investigations nombreuses, en particulier pour assurer la sécurité des applications en bâtiment. Les recommandations révisées compilent les enseignements qui en sont tirés, en termes d'évolution des propriétés mécaniques avec la température, de propriétés physiques associées à l'ingénierie incendie et de dispositions permettant de prévenir le risque d'écaillage. Les outils d'un

prédimensionnement vis-à-vis de l'incendie sont donc disponibles, moyennant une identification de propriétés propre à chaque BFUP, la validation expérimentale sur élément représentatif du projet restant nécessaire.

L'emploi des BFUP dans des ouvrages variés a permis de documenter leurs propriétés de résistance à l'abrasion (en particulier dans le cas des ouvrages hydrauliques), de décliner les éléments d'appréciation de leur empreinte environnementale, et de fournir des informations sur l'utilisation des méthodes de calcul aux éléments finis pour le dimensionnement des ouvrages en BFUP.

Enfin, les recommandations révisées de 2013 fournissent des indications limitées et prudentes quant à l'utilisation des BFUP en ingénierie parasismique. Dans le cadre de l'application de l'Eurocode 8, en zone de sismicité modérée, les BFUP sont d'ores et déjà utilisables pourvu que l'on se limite à un comportement élastique. La justification de dispositions assurant un comportement ductile pour les éléments ou parties d'ouvrage en BFUP qui le nécessitent reste un sujet de recherche actif en France et à l'étranger, en vue notamment d'applications prometteuses des BFUP en réparation ou en renforcement parasismique. ■



→ Distribution des recommandations révisées, BFUP 2013, Marseille.

Photo : AFGC

Les conclusions du symposium international BFUP 2013

Marseille a été à nouveau capitale mondiale des BFUP en accueillant au MuCEM du 1^{er} au 3 octobre 2013 plus de 330 participants au 2^e symposium international « Concevoir et construire en BFUP ». Les actes édités par la RILEM et téléchargeables *via* le site www.afgc.asso.fr comprennent plus de 80 contributions.

Photos : AFGC



→ Le parrainage officiel : Jean-Marc Tanis, AFGC – György Balázs, fib – Nicolas Roussel, RILEM.

Quatre ans après le premier colloque « Concevoir et construire en BFUP » organisé à Marseille par l'Association Française de Génie Civil (AFGC) en partenariat avec la Fédération internationale du béton (*fib*), cette nouvelle édition, qui a bénéficié également du soutien de la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages), a confirmé, dans le cadre emblématique du MuCEM, démonstratif des capacités constructives et architecturales des BFUP, la montée en puissance de l'usage de ces matériaux en France et à l'international.

Les réalisations remarquables présentées concernent en effet aussi bien le Japon (extension de l'aéroport d'Haneda, premier pont ferroviaire en BFUP), la France (passerelles et bâtiment du MuCEM, couverture du stade Jean Bouin, vêtements de la fondation Louis Vuitton,

couverture de l'usine d'Achères...). que l'Europe (Musée olympique à Lausanne, passerelles d'Alicante ou de Rotterdam). Mais de nombreuses applications moins spectaculaires mais importantes ont aussi été présentées, notamment en termes d'éléments de protection d'infrastructures, de projets et de réalisations de nouveaux ponts (Corée, France), de réparation d'ouvrages d'art (USA, Suisse, France, Canada) et de composants de façades pour les bâtiments.

Les résultats acquis sur la durabilité *in situ* des BFUP dans les ouvrages ont été diffusés, ce qui devrait favoriser l'application future de ces matériaux dans les environnements sévères. Des expérimentations à échelle représentative ont mis en évidence l'intérêt des BFUP dans des structures mixtes en association avec l'acier, le bois ou le béton armé ordinaire. Des exemples de caractérisation de la capacité post-

fissuration des BFUP et de leur ductilité structurelle ont été fournis, de façon à valider les règles de calcul présentes et futures et garantir la sécurité des recommandations AFGC révisées, rendues compatibles avec l'Eurocode 2.

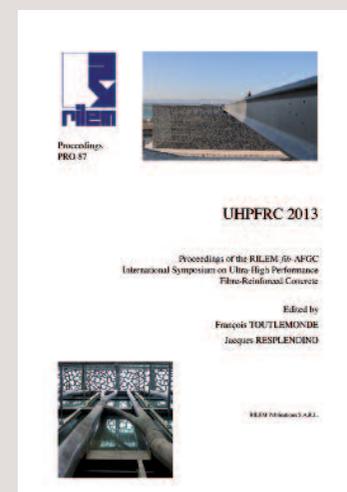
TENDANCES

En 2009, les expériences d'utilisation des BFUP mettaient principalement en avant deux types d'usage constructif : des éléments porteurs minces, précontraints ou soumis à des compressions élevées (poutres, poteaux, dalles et coques), et des éléments légers et résistants comme les composants de façades. Les domaines identifiés comme favorables pour l'application des BFUP étaient les ponts et passerelles, les bâtiments exceptionnels, et des applications à haute valeur ajoutée. Quatre ans plus tard, les ponts et passerelles restent particulièrement démonstratifs de l'efficacité structu-

relle des BFUP. Pour que l'emploi des BFUP continue à progresser dans ce domaine, il pourrait cependant être nécessaire de développer les applications à caractère moins prototype ou architecturalement moins marqué.

En France en particulier, les producteurs de BFUP font face à une demande croissante de composants de façades pour les bâtiments, compte tenu d'un retour d'expérience grandissant démontrant la flexibilité architecturale et l'efficacité structurelle de solutions BFUP pour ces éléments. Le caractère innovant et le degré de complexité associé peuvent varier significativement d'un projet à l'autre, ce qui nécessite des procédures de conception et de contrôle appropriées.

Des éléments de série optimisés pour applications en Génie Civil et infrastructures de transport (plaques de couverture de tranchées, dalles d'une structure de quai, joints de cla-



→ Les actes de BFUP 2013, collection de la RILEM.



→ L'auditorium du MuCEM a fait le plein.

vage...) constituent des volumes considérables de BFUP mis en œuvre. Cet enjeu économique mériterait sans doute une attention accrue de la part des ingénieurs d'études. Dans certains cas, ces éléments sont en effet critiques pour les installations ou infrastructures qu'ils équipent.

Les applications des BFUP en remise à niveau et renforcement structurel se sont multipliées. Le revêtement du BFUP est quelquefois uniquement protecteur vis-à-vis de la

durabilité, il participe d'autres fois à l'augmentation de rigidité, de capacité ou de confinement. En effet, les résultats de recherche confirment l'efficacité du BFUP dans des applications où un fonctionnement de section mixte est attendu, et les projets en béton utilisant le BFUP en coffrage perdu suscitent un intérêt grandissant.

L'usage des BFUP en génie et renforcement parasismique semble prometteur, compte tenu des avantages escomptés de légèreté et de capa-

cité de confinement réparti. Des efforts de recherche restent cependant nécessaires dans ce domaine pour vérifier les dispositions constructives complexes et garantir la ductilité structurale.

Enfin, l'emploi du BFUP pour contribuer de façon décisive à répondre aux spécifications de durabilité semble avoir des marges de croissance.

DEFIS ET PERSPECTIVES

Plusieurs défis peuvent donc être identifiés au regard du potentiel de développement des BFUP. Et tout d'abord, même si la formation et l'expérience dans le domaine du BFUP se répandent chez les architectes et les ingénieurs d'études, et si les experts en BFUP deviennent plus nombreux, la formation de l'ensemble des acteurs de la chaîne de la construction vis-à-vis des spécificités de ces matériaux en termes de technologie et de conception reste un enjeu majeur.

Par ailleurs, si des savoir-faire industriels et pratiques ont été acquis dans le domaine de la mise en œuvre et de la réalisation des ouvrages en

BFUP, ils ne sont pas toujours partagés ni adossés à une démonstration rationnelle, ce qui nuit à une garantie durable de la qualité d'exécution des ouvrages en BFUP. Si le BFUP doit une part décisive de son attrait à la créativité des projets où il s'intègre, la maîtrise des coûts et l'efficacité structurelle doivent rester des objectifs clés pour que la croissance des applications des BFUP reste supportable économiquement et vis-à-vis de l'environnement.

Enfin, le cadre contractuel d'emploi des BFUP gagnerait à être mis à jour dans les pays qui en ont acquis une expérience suffisante. Ainsi, en France, une démarche de normalisation a été lancée, visant la compatibilité avec le format des normes européennes.

NOUVEAUX PROGRÈS EN VUE... D'ICI 2017 !

Sur le plan technique, certains problèmes de conception nécessitent encore des recherches : calcul au séisme, vérification au choc et en fatigue, conception performantielle de la durabilité, conception assistée par ordinateur (en particulier, analyse non linéaire tridimensionnelle de pièces complexes), résistance post-fissuration en situation d'incendie, continuité avec la conception des structures en béton de fibres ordinaire/béton à très hautes performances...

Au total, à côté des rendez-vous académiques, les colloques BFUP 2009 et 2013 de Marseille ont démontré l'utilité des échanges scientifiques et techniques basés non seulement sur les résultats de laboratoire, mais aussi sur le retour d'expérience en termes de conception, mise au point, justification de sécurité, exécution et durabilité en œuvre des ouvrages en BFUP.

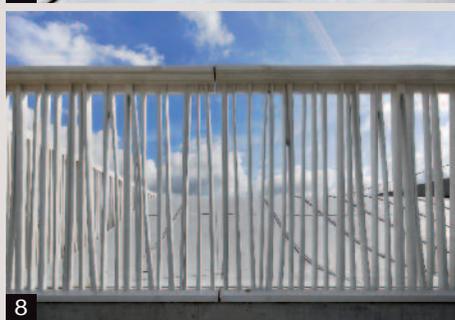
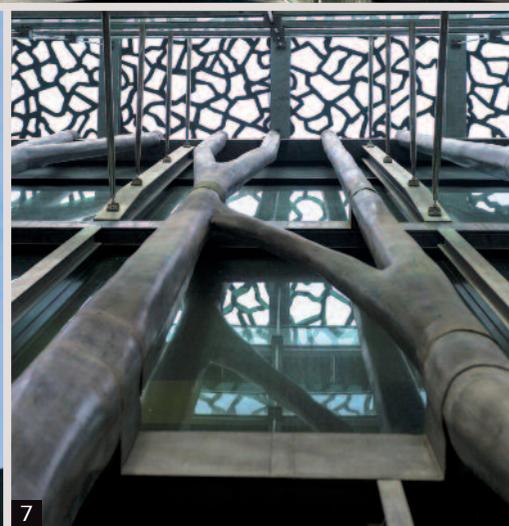
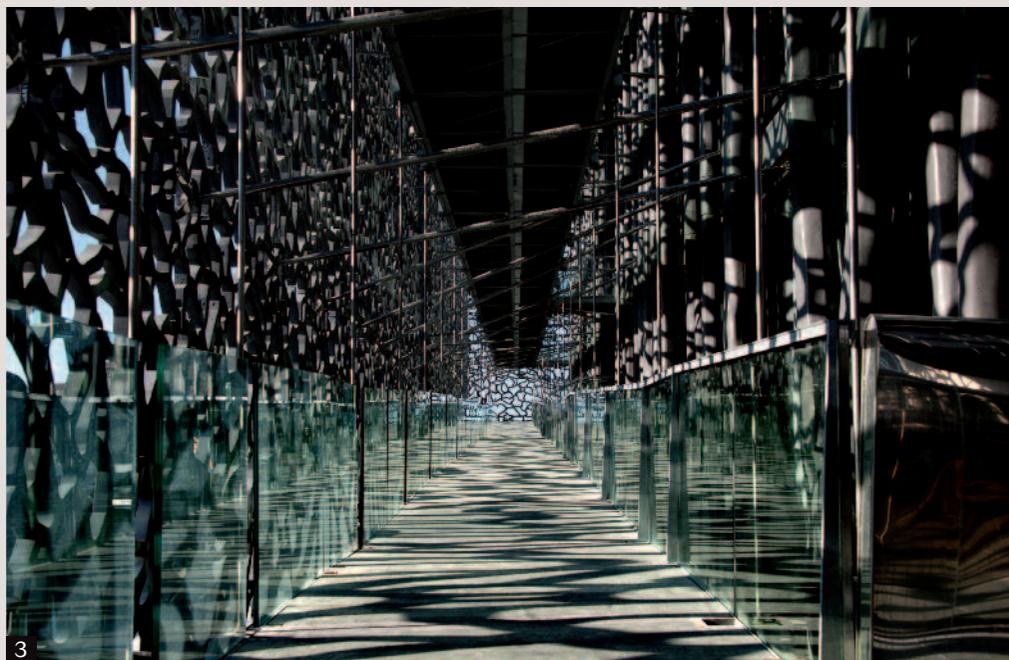
Les futurs progrès dans ces domaines laissent donc espérer un intéressant prochain colloque « Concevoir et construire en BFUP »... en 2017 ! ■



→ François Toutlemonde et Jacques Resplendino, respectivement présidents du comité scientifique et du comité d'organisation.

L'expérience de quelques réalisations récentes

Finesse et transparence des éléments porteurs, élancement des ouvrages, légèreté des éléments de couverture, peau satinée et jeux de lumière... les récentes applications des BFUP, comme celles illustrées dans ces pages, contribuent à écrire un « art nouveau » de la construction en béton.

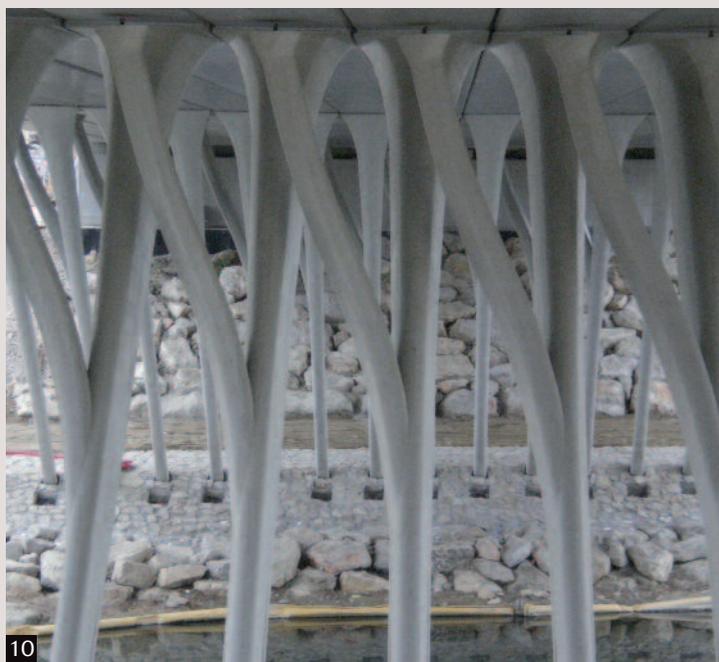


→ 1, 2, 3 et 7 • Le MuCEM à Marseille (13), photos 1 à 3 : Lisa Ricciotti – Rudy Ricciotti et Roland Carta, architectes ; photo 7 : Charles Plumey-Faye, médiathèque Lafarge – Rudy Ricciotti et Roland Carta, architectes. 4, 5 et 6 • Le stade Jean Bouin à Paris (75), photo 4 : Agence Ricciotti ; photos 5 et 6 : Olivier Amsellem. 8 et 9 • Unité de post-dénitrification et de traitement des boues à Achères/Seine-Aval, (78), photos : Alex Beraud.

Pour retrouver plus de détails sur ces ouvrages : MuCEM, *Construction Moderne* n° 141 – Décembre 2013 ; Stade Jean Bouin, *Construction Moderne* annuel OA 2013 ; Pont de la République, *Construction Moderne* annuel OA 2014 ; Achères, actes BFUP 2013.

Normaliser les BFUP : état des lieux et enjeux

Le chantier d'une normalisation française des BFUP calquée sur l'architecture des normes européennes a été lancé pour consolider les acquis techniques et les conditions de qualité et de sécurité associés aux ouvrages en BFUP construits en France depuis plus de 15 ans.



→ 10 et 11 • Le pont de la République à Montpellier (34), photos : Patrick Guiraud.

POURQUOI UNE DÉMARCHÉ DE NORMALISATION FRANÇAISE ?

En France, la démarche de normalisation des BFUP a été lancée sur la base du consensus technique issu des recommandations de l'AFGC, afin de consolider la pratique de la

commande et du contrôle des BFUP en intégrant le retour d'expérience d'une quinzaine d'années de projets, sans supprimer un contrôle approprié des projets novateurs.

Dans l'idéal, la normalisation doit être internationale pour favoriser la libre circulation des produits, en par-

ticulier lorsqu'ils disposent d'avantages techniques. Cependant, la normalisation suppose un compromis acceptable traduisant les équilibres économiques et les conditions de commande et contractualisation réelles. À cet égard, dans le domaine des BFUP, l'expérience de groupes de travail de sociétés savantes s'efforçant de mettre au point des dispositions prénormatives a fait apparaître la difficulté d'aboutir à un accord international, même au niveau européen, compte tenu de la diversité des expériences techniques et des modalités contractuelles liées à l'innovation. À titre d'exemple, la notion d'épreuve de convenance est souvent apparue critique.

Compte tenu des démarches de normalisation déjà en préparation dans plusieurs pays (Chine, Suisse, Allemagne...), il a donc semblé urgent que des textes de normes françaises traduisent valablement une réalité technique et économique de pointe où la France entend conserver des savoir-faire et des pratiques qui ont fait leurs preuves.

Il en est également attendu au plan national une acceptation facilitée des solutions BFUP.

PRINCIPAUX TEXTES À ÉLABORER

Le travail d'élaboration du corpus normatif permettant de conserver les acquis des recommandations de l'AFGC comprend en priorité trois volets :

- une norme « matériau », située à un niveau comparable à la norme NF EN 206 pour les bétons ordinaires, et associée à d'éventuelles

normes d'essais spécifiques associées aux performances des BFUP susceptibles d'être prescrites ;

- une norme de calcul basée sur le chapitre 2 des recommandations de l'AFGC qui vient compléter, préciser ou amender la norme NF EN 1992 ;
- une norme d'exécution qui complète, précise ou amende la norme NF EN 13670.

UN ENJEU COLLECTIF POUR LA PROFESSION

Cette démarche a été présentée par Michel Delort (ATILH) et François Toutlemonde (IFSTTAR), au nom de l'ensemble des parties prenantes, auprès des présidents des commissions de normalisation chargées du matériau béton (Thierry Kretz), du calcul des structures en béton (Jacques Cortade) et de l'exécution des ouvrages en béton (Michel Guérinet), et a obtenu leur soutien.

La norme matériau est préparée par un sous-groupe du comité « béton » de l'AFNOR (AFNOR/P 18B/GE BFUP) en coordination avec le groupe BN TRA CN EC2 (calcul) et le groupe de l'AFNOR sur l'exécution des ouvrages en béton.

Les parties représentées dans ce groupe sont l'ATILH et le SNBPE, la FNTP, EGF-BTP, l'UMGO, la FIB et le CERIB, l'IFSTTAR et le CSTB, SYNTEC et les producteurs de fibres et d'additions.

L'objectif est d'avoir élaboré ces textes d'ici fin 2014. Des contacts seront pris à des stades d'avancement appropriés avec la fib et les autres instances internationales, de façon à faire connaître les positions arrêtées importantes.

PREMIÈRES OPTIONS PRISES POUR LA NORME « MATÉRIAU BFUP »

Par référence aux définitions de la norme NF EN 206, il apparaît que les BFUP auront un statut de BPS (Bétons à Propriétés Spécifiées, propriétés à atteindre pour un projet) dont la composition est fixée à l'issue de l'épreuve d'étude (comme dans le fascicule 65, l'épreuve d'étude valide la conformité potentielle de la composition) en s'appuyant le cas échéant sur une carte d'identité, et dont la composition et le procédé d'obtention sont *in fine* validés par l'épreuve de convenance (obtention des propriétés requises dans les conditions du projet, validant notamment l'incidence de la mise en œuvre).

La définition des BFUP (domaine de validité de la norme) s'appuiera sur des seuils associés aux propriétés listées ci-après :

- porosité ;
- résistance en compression ;
- limite élastique en traction ;
- non-fragilité en traction par flexion ;
- masse volumique.

DÉFINIR DES CLASSES DE BFUP

Plusieurs propriétés importantes associées à la spécification des BFUP donneront lieu à la définition de classes. Il s'agit :

- du type de fibres contribuant à assurer la non-fragilité (métalliques/autres) ;
- de la consistance : BFUP autoplaçant, visqueux ou thixotrope ;
- de l'application éventuelle d'un traitement thermique et du moment d'application de ce traitement (avant ou après prise, ou les deux) ;
- de la classe de résistance en compression : il est prévu une désignation par la résistance caractéristique de compression en MPa mesurée sur cylindre avec les valeurs sui-

vantes 130, 150, 175, 200, 225, 250 ; il sera possible d'utiliser des valeurs intermédiaires ; une désignation mixte résistance sur cylindre/résistance sur cube devrait être proposée ;

- de la taille maximale du granulat ;
- du type de comportement en traction : très écrouissant, peu écrouissant, adoucissant en traction directe (mais écrouissant en flexion). Outre le type de comportement, la caractérisation des performances du BFUP en traction fera l'objet de valeurs spécifiées, soit par des valeurs discrètes de propriétés caractéristiques, soit par une approche continue.

Une des particularités des BFUP est que la caractérisation de cette propriété pour le calcul n'est finalisée qu'à l'issue de l'épreuve de convenance ;

- du coefficient de diffusion des ions chlorure ;
- de la perméabilité aux gaz ;
- de la résistance à l'abrasion.

Les trois derniers indicateurs se substituent à la désignation usuelle des bétons ordinaires par les classes d'exposition auxquelles ils résistent. En effet, les classes d'exposition XC1 à XC4, XD1 à XD3, XS1 à XS3, XF1 à XF4 semblent peu discriminantes pour les BFUP lorsque les durées de service attendues sont de 50 ans ou 100 ans.

La définition d'une classe pour le type de fibres et de la classe de résistance en compression est destinée à faciliter l'identification des BFUP pour les usages structuraux, qui constituent le domaine d'application de la norme « calcul » dans la continuité des recommandations AFGC et de leur édition révisée.

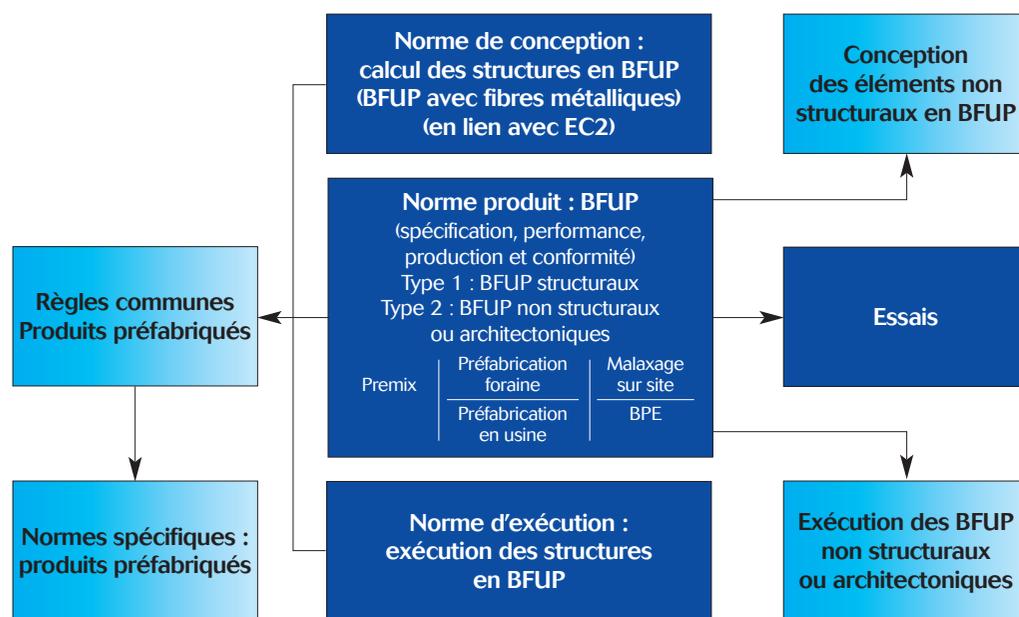
Les propriétés de réaction au feu des BFUP seront décrites dans la norme « matériaux » sans faire l'objet d'une notion de classe (et sans que cela dispense le cas échéant d'une vérification à l'échelle structurale).

Par rapport au plan de la norme NF EN 206, la spécificité des BFUP conduit à prévoir des paragraphes particuliers pour décrire les exigences et le contrôle des phases critiques dans l'obtention des propriétés utiles. Ainsi, il s'avère indispensable de traiter :

- des prémélanges de constituants ;
- du protocole de malaxage ;
- de l'homogénéité de la teneur en fibres ;
- de la mise en œuvre du BFUP frais, critique dans le contrôle de l'orientation des fibres ;
- de la cure et du traitement thermique éventuel ;
- de la notion de « carte d'identité ».

Le travail de rédaction, en cours, permet de formaliser et capitaliser de nombreuses connaissances et devrait constituer un précieux outil de diffusion pour favoriser l'emploi sûr des solutions BFUP. ■

L'ARCHITECTURE DE LA NORMALISATION FRANÇAISE DES BFUP



Note : La conception des structures en BFUP avec fibres non métalliques n'est pas traitée dans le présent document et doit être traitée comme non traditionnelle.