BFUP (Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances)

Avril 2018

Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres et offrant des résistances en compression comprises entre 150 et 250 MPA.

Les progrès dans le domaine des adjuvants, des méthodes de formulation et de l'utilisation des ultrafines ont conduit à une évolution spectaculaire des bétons.

La gamme s'est élargie : des bétons courants, de résistance en compression de 30 mpa, on est passé aux bétons à hautes performances (bhp : plus de 50 mpa) et à très hautes performances (bthp : plus de 80 mpa). Une rupture technologique est intervenue au début des années 90 avec la mise au point de bétons dont la résistance dépasse les 150 mpa.

Leur formulation fait appel à des adjuvants superplastifiants et des compositions granulaires spécifiques ainsi qu'à des fibres (fibres métalliques ou organiques). Pour les bfup structuraux la présence de fibres et les performances en traction conduisent à un comportement pseudo-ductile permettant de s'affranchir de tout ou partie des armatures passives.

Ces bétons révolutionnent les techniques et méthodes de construction et permettent la conception de nouvelles structures.

Ces bétons offrent des performances exceptionnelles :

- Une très grande ouvrabilité,
- Une compacité très importante
- Une faible perméabilité
- Des résistances caractéristiques à la compression à 28 jours très élevées comprises(pour les bfup structuraux) entre 150 et 250 mpa,
- Des résistances mécaniques, au jeune âge, très élevées,
- Une durabilité exceptionnelle (ce qui permet de les utiliser dans des environnements très agressifs),
- Une ductilité (déformabilité sous charge sans rupture fragile) importante,
- Une ténacité (résistance à la micro-fissuration) élevée,
- Un retrait de dessiccation et un fluage très faibles,
- Une dureté de surface très importante,
- Une grande résistance à l'abrasion et aux chocs,
- Des aspects de parements particulièrement esthétiques et des textures de parement très fine,

Ils permettent une optimisation des frais de maintenance et d'entretien des ouvrages et de nouvelles perspectives constructives.

L'évolution des BFUP par rapport aux bétons à hautes performances (BHP) se caractérise par :

- Leurs très grandes résistances en compression mais aussi en traction,
- Leur composition spécifique et leur fort dosage en ciment (700 à 1000 kg/m3) et en adjuvants,
- Leur squelette granulaire spécifique (4 à 5 échelles de grains) et l'optimisation de leur empilement granulaire,
- L'utilisation de granulats de faibles dimensions et faisant l'objet d'une sélection particulière,
- Une teneur en eau beaucoup plus faible,
- La présence de fibres (à un taux élevé).

Les BFUP peuvent notamment, être associés à de la précontrainte par pré-tension ou par post tension, plus rarement à des armatures passives.

Les diverses formulations des BFUP permettent de leur conférer des propriétés complémentaires adaptées aux exigences spécifiques des projets.

Historique des BFUP et produits disponibles sur le marché francais

A partir des années 1990, une véritable rupture s'est produit dans le développement des connaissances sur le béton avec la mise au point de nouveaux concepts sur la formulation des matrices cimentaires , l'utilisation de fibres et l'optimisation des empilements granulaires.

Bouygues a été en 1992-1995 à l'initiative du développement du bpr (béton de poudres réactives) aux performances mécaniques et à la durabilité exceptionnelle laissant entrevoir de nouvelles voies pour la conception des structures.

EDF en 1996-1999 a utilisé des BFUP pour la rénovation de poutres en béton dans des aéroréfrigérants de centrales nucléaires (milieu particulièrement agressif).les contrôles réalisés ces dernières années confirment la durabilité de la solution retenue.

En France plusieurs BFUP sont proposés à l'échelle industrielle depuis le début des années 2000.

-le Ductal qui est le fruit d'un programme de recherche visant à optimiser le bpr dans le cadre d'un partenariat entre Bouygues, Lafarge et Rhodia.
La gamme Ductal est commercialisée par Lafarge (Ductal fo à base de fibres organiques pour les applications architectoniques, Ductal FM à base de fibres métalliques pour les applications structurelles et Ductal fm résistant au feu).

-les entreprises Eiffage et Sika ont développé le BSI CERACEM (BSI structurel et BSI architectonique)

-le cimentier Vicat associé au groupe Vinci a mis au point le BCV (béton composite Vicat)

Le Cemtec, BFUP développé au LCPC (actuel IFSTTAR) à base d'une association de fibres métalliques courtes et longues a notamment été optimisé et appliqué dans le cadre de projets européens en partenariat avec l'EFPL.

Principes de formulation des BFUP

L'obtention de résistances élevées et de faibles perméabilités aux agents agressifs passe par une réduction très importante de la porosité et plus précisément du réseau des pores connectés, en jouant sur deux paramètres.

Une teneur en eau extrêmement faible, grâce à l'utilisation optimisée de superplastifiants qui défloculent les grains de ciment (rapport e/c de 0.15 à 0.25)

Une compacité maximale, obtenue en utilisant des composants correspondant à plusieurs classes granulaires (classiquement quatre à cinq qui incluent ciment, ultrafines, fillers et sable). La taille et la quantité des plus gros grains sont considérablement réduites (diamètre maximal variant de 1 à 7 mm, les granulats faisant l'objet d'une sélection particulière). L'optimisation de l'empilement granulaire permet de diminuer le volume des vides.

Les bfup présentent ainsi une très faible porosité capillaire. Les ultrafines utilisées dans les BFUP sont en général des fumées de silice qui remplissent les espaces intergranulaires, optimisant la compacité du matériau, et qui réagissent grâce à leur pouvoir pouzzolanique avec la chaux issue de l'hydratation du ciment. Elles améliorent la rhéologie du béton frais, participent activement à la résistance de l'ensemble et ferment le réseau des pores à la diffusion des ions et des gaz. D'autres ultrafines peuvent être également utilisées telles que les microfillers calcaires ou siliceux et les pouzzolanes naturelles ou artificielles.

L'emploi d'adjuvants, tels que les plastifiants réducteurs d'eau et les superplastifiants , permet de formuler les bfup avec un très faible rapport eeff/liant équivalent.

Les fibres, composant clé des BFUP confèrent au matériau sa ductilité. Ces fibres ont une longueur adaptée à la taille du plus gros grain et une section faible. Elles ont en général un diamètre de 0,1 à 0,3 mm et une longueur de 10 à 20 mm.

Les fibres métalliques sont utilisées pour des applications structurelles nécessitant des résistances mécaniques importantes, les fibres polymères et organiques plutôt pour des applications esthétiques et des parties d'ouvrages non structurelles. Les fibres polypropylène sont ajoutées pour éviter l'écaillage du béton en cas d'exposition au feu.

Exemples de formulations de BFUP (pour 1 m3) :

- Ciment
- Sable fin
- Quartz broyé
- Fumée de silice
- Fibres métalliques

- Adjuvant (extrait sec)
- Eau totale
- 750 kg
- 1 020 kg
- 200 kg
- 230 kg
- 160 kg
- 10 kg
- 140 L
- 1 075 kg
- 1 050 kg
- 160 kg
- 220 kg
- 35 kg
- 200 L

Microstructure des BFUP et potentiel de cicatrisation

Les BFUP sont des matériaux à structure micrométrique. (les composants des BFUP varient du millimètre au nanomètre).

Ils présentent, du fait de leur granulométrie très fine et optimisée, une porosité très faible non connectée à l'échelle du nanomètre ainsi qu'une absence de porosité capillaire. Cette propriété garantit une très faible perméabilité aux agents agressifs.

A grossissement relativement faible (x 200), la pâte d'un BFUP laisse apparaître en clair des particules declinker non hydraté qui jouent le rôle de microgranulats à surface très active et de haut module d'élasticité (120 000 MPA).

Le dosage en eau est inférieur à celui nécessaire pour l'hydratation complète du ciment. Les BFUP possèdent ainsi une réserve de ciment anhydre qui leur procure un potentiel d'auto-cicatrisation en cas de fissuration. L'eau pénétrant éventuellement par les fissures va permettre la formation d'hydrates au sein des microfissures en réagissant avec les grains de clinker résiduel. Ce phénomène constitue un atout particulièrement intéressant en termes de durabilité et de protection des fibres, des câbles ou des armatures le cas échéant.

Traitement thermique

Les BFUP peuvent faire l'objet de traitement thermique juste après la fin de leur prise, ce qui permet :

- D'obtenir des résistances mécaniques élevées très rapidement
- D'accélérer la maturation du matériau et de lui conférer rapidement une stabilité dimensionnelle
- D'obtenir des performances en traction et en compression plus élevées
- D'améliorer la microstructure et donc d'améliorer la durabilité grâce à une réduction de la porosité
- De diminuer les effets différés du retrait et du fluage

Après un traitement thermique , le retrait est quasi inexistant et le fluage très fortement réduit.

Ce traitement thermique, distinct de l'étuvage destiné à accélérer la prise, consiste en effet à soumettre la pièce à une température de l'ordre de 90 °c et une humidité proche de la saturation pendant 48 heures.

Performances mécaniques des BFUP

Les BFUP présentent des performances exceptionnelles aussi bien en compression qu'en traction etflexion.

Comportement en compression

Les BFUP ont un comportement quasi linéaire jusqu'à une résistance à la compression à 28 jours comprise entre 150 et 250 MPA. Le module d'élasticité varie selon les formulations entre 40 et 70 GPA.

Comportement en traction

Le comportement en traction est caractérisé par :

- Un domaine de déformation élastique limité par la résistance en traction de la matrice cimentaire. Cette résistance est supérieure à 7 mpa en traction directe.
- Un domaine post-fissuration caractérisé par la résistance en traction du matériau fibré obtenue après fissuration de la matrice, domaine qui permet une non fragilité des éléments fléchis est une caractéristique indispensable à la sécurité des applications et nécessite le contrôle approprié de cette contribution mécanique du renfort fibré.

Résistance en flexion

Selon le type de formule, la géométrie du corps d'épreuve , le type de fibres et les modalités de bétonnage , les bfup ont une résistance en flexion de l'ordre de 30 à 50 MPA.

Ductilité

La ductilité (capacité du matériau à se déformer sous charge sans rupture fragile), la résistance en traction et la ténacité (résistance à la micro-fissuration) des bfup sont dues à la présence des fibres (pourcentage variant généralement entre 2 et 3 % en volume) et à l'interaction fibre-matrice.

Ces propriétés permettent au matériau de se déformer et de supporter des charges importantes même après apparition des premières micro-fissures.

Propriétés des BFUP

Les BFUP offrent de multiples propriétés adaptables aux exigences spécifiques de chaque application.

Ouvrabilité

Les formules types de BFUP conduisent, le plus souvent, à des bétons, deconsistance fluide ,ils sont en général autoplaçants et pompables ce qui permet un remplissage aisé des coffrages et des moules. La plage d'ouvrabilité est cependant très large. Il est possible aussi à l'inverse de réaliser des BFUP par extrusion.

Retrait – fluage

Le retrait endogène de la matrice cimentaire est de l'ordre de 300 à 500 µm/m. Ce retrait n'est pas gêné par le squelette granulaire, et la formation de microfissures est extrêmement faible lorsque le retrait est libre.

- Retrait endogène : 300 à 500 µm/m
- Retrait de dessiccation : 50 à 100 µm/m
- Retrait total : 500 à 1 000 µm/m

Les BFUP ont un retrait d'auto dessiccation important, ce qui impose de prendre des précautions spécifiques pour ne pas gêner les déformations dans les coffrages (utilisation de moules souples) et d'en tenir compte dès les phases de jeune âge.

Grâce à la faible teneur en eau et la compacité du matériau et à l'utilisation de fumées de silice, la déformation sous charges permanentes (fluage) est très fortement réduite.

Les valeurs de coefficient de fluage à long terme égaux à 0,8 pour les matériaux sans traitement thermique et 0,2 dans le cas d'un traitement thermique peuvent être prises en compte pour le dimensionnement des ouvrages en BFUP.

Le très faible fluage et le retrait de dessiccation quasiment nul des BFUP, les rendent particulièrement intéressants pour la réalisation d'ouvrages précontraints car les pertes de précontrainte sont ainsi fortement réduites.

Cinétique de durcissement

La cinétique de durcissement des BFUP est adaptable en fonction du type de chantier et d'application, des conditions du chantier ou du procédé de fabrication .une résistance à la compression de 50 MPA peut être atteinte à 16 heures ce qui permet la mise en tension précoce de câbles de précontrainte par post-tension .

Résistance au feu

Les BFUP n'ont aucune contribution au développement d'un feu. Ils sont bien sur incombustibles comme tous les bétons.

Le calcul au feu des ouvrages en BFUP peut s'appuyer sur les principes de la norme Eurocode (NF en 1992-1-2) moyennant une calibration appropriée des paramètres , l'évolution de la résistance relative du matériau étant assez proche de celle des BHP.

Lors d'une élévation importante de la température, l'eau présente dans le béton ne peut s'échapper, compte tenu de la perméabilité très faible des bfup .la vapeur d'eau génère donc des surpressions internes susceptibles de provoquer l'écaillage du béton. L'utilisation de fibres de polypropylène (quelques kg par m3 de béton) crée lors de la fonte des fibres (à une température de l'ordre de 160 °c) un réseau poreux connecté qui permet à la vapeur d'eau de s'évacuer et donc d'éviter l'écaillage.

Dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique des BFUP est fonction du type de formulation. Généralement une valeur de 1,1 x 10-5 m/°c peut être prise en compte.

Résistance au choc

Les BFUP présentent compte tenu de la présence de fibres une grande capacité de dissipation d'énergie, ce qui leur permet d'offrir une résistance au choc important

Masse volumique

La masse volumique des BFUP est de l'ordre de 2 400 à 2 800 kg/m3.

Fabrication, transport et mise en oeuvre des BFUP

Les BFUP sont en général commercialisés sous forme de prémix manufacturés en sacs ou en big bag (de 500 kg ou 1 tonne) sous la forme de pré-mélange à sec de poudres et de fibres (les fibres et les divers adjuvants peuvent être conditionnés séparément et incorporés en cours de malaxage). Le processus industriel de conditionnement bénéficie de procédures qualité garantissant la régularité et l'homogénéité des formulations et des performances.

La fabrication des BFUP nécessite une grande précision du dosage, une régularité des constituants et des contrôles rigoureux. Une maîtrise parfaite de la quantité d'eau et du rapport eau/ciment est indispensable.

La fabrication nécessite en général des malaxeurs à fort gradient de cisaillement et possédant un grand pouvoir dispersant, une procédure de malaxage spécifique (ordre d'introduction respective des divers constituants) et des temps de malaxage importants. Aucun ajout d'adjuvant ou d'eau n'est autorisé après la fabrication du béton.

La durée entre la fabrication du BFUP et sa mise en place doit rester compatible avec les moyens de production à la centrale et de mise en œuvre sur le chantier.

Les formulations des BFUP peuvent être adaptées à toutes les techniques de mise en œuvre. Ils sont en général autoplaçants, leur mise en place dans les coffrages à la benne avec une manchette ou par pompage ne fait normalement pas appel à la vibration. Le caractère souvent auto-plaçant des BFUP facilite le remplissage des coffrages ou des moules et permet le coulage des pièces à géométrie complexe ou de parois de faible épaisseur.

La fluidité du matériau et sa faible granulométrie imposent une étanchéité parfaite des coffrages.

La mise en place des BFUP dans les coffrages et les moules nécessite une anticipation et une maîtrise de l'orientation des fibres .les fibres ayant tendance à s'orienter préférentiellement dans le sens d'écoulement du béton frais.

Il convient de privilégier des coffrages avec des arrêtes arrondies qui facilitent l'écoulement du matériau et éviter toute discontinuité d'écoulement et la rencontre de fronts de coulage sans interpénétration.

Comme pour tous les bétons, des précautions particulières doivent être prises pour l'utilisation des BFUP à des températures basses ou à l'inverse élevées. La cure doit être systématique et particulièrement soignée compte tenu de la très faible teneur en eau du béton, afin d'éviter la dessiccation.

La mise en œuvre nécessite la validation des procédures de bétonnage par des essais préalables de convenance, une maîtrise de la rhéologie du béton frais en fonction des conditions climatiques, ainsi qu'une maîtrise des tolérances géométriques des coffrages (le respect de ces tolérances est d'autant plus indispensable que les éléments sont de très faible épaisseur).

Durabilité des BFUP

Du fait de leur microstructure extrêmement dense, de leur porosité capillaire très faible et de leur grande compacité, les bfup présentent des caractéristiques de durabilité exceptionnelles, quelles que soient les conditions environnementales, face aux agressions et attaques suivantes: cycles gel-dégel, sels de déverglaçage ,eau de mer, sulfates, carbonatation, lixiviation ,pénétration d'ions agressifs et des acides faibles, abrasion, ultra-violets ,chocs , températures élevées(sous réserve de la prise en compte du risque d'écaillage) …

La matrice cimentaire des BFUP constitue un milieu quasi imperméable, en particulier, à la pénétration des divers agents agressifs.

PROPRIÉTÉ	VALEURS
Porosité	2 % à 5 %
Perméabilité à l'azote	1 à 5.10^{-20} m²
Gel-dégel : - module résiduel après 300 cycles - perte de masse après 300 cycles	 100 % < 10 g/m²
Abrasion (coefficient CNR)	1,3
Carbonatation : - pénétration sur 15 mm	 Plusieurs centaines d'années
Perméabilité à l'oxygène	$< 10^{-9}$ m²
Coefficient de diffusion des ions chlorure	210^{-14} m²/s

Nota : ces valeurs données à titre indicatif dépendent beaucoup du type de BFUP, de sa formulation et de son process de fabrication.

Domaines d'applications potentiels des BFUP

Les nombreuses qualités des BFUP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (poutres précontraintes par pré ou post tension, dalles, passerelles piétonnes , ouvrages offshore, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, cuves de rétention, canalisations , conteneurs, murs de soutènement, structures triangulées, voussoirs de tunnels …) qu'en bâtiment (poutres, poteaux élancés, planchers de grande portée …) ainsi que pour la création de pièces esthétiques .elles offrent des applications innovantes , en particulier pour des structures très minces, perforées ou ajourées jusque-là inaccessibles au matériau béton.

Les BFUP sont aussi utilisés pour la réparation ou la réhabilitation d'ouvrages (renforcement parasismique de piles de ponts, protection d'ouvrages soumis à l'érosion d'écoulement torrentiel, renforcement de poteaux, renforcement de tablier d'ouvrages d'art à poutres, renforcement structural de faible épaisseur…).

En règle générale les BFUP à base de fibres métalliques sont destinées à des applications structurelles, ceux à base de fibres organiques à des applications architectoniques.

Les BFUP sont utilisés aussi bien par l'industrie du béton pour constituer des produits préfabriqués (résilles, coques, panneaux acoustiques, panneaux de couverture ,panneaux de façade , parements de faible épaisseur , grilles décoratives ,éléments architecturaux, , corniches, escaliers, lames pare-soleil, résilles ,mobiliers urbains, sculptures …) que directement sur chantier

pour diverses applications.

Les multiples performances des BFUP permettent d'élargir les domaines d'utilisation des bétons en particulier pour la réalisation de structures ou d'éléments de structures :

-soumis à de très fortes agressions chimiques ou mécaniques ou à des chocs importants

-réalisés en site maritime (structures off shore …)

-nécessitant des gains de poids

-dont la conception à base de béton traditionnel nécessiterait des ferraillages très denses ou des bétonnages complexes.

Les références d'ouvrages réalisés ces dernières années ou en cours de réalisation en BFUP en France sont nombreuses et variées :

- Poutrelles de l'aéroréfrigérant de Cattenom
- Pont de bourg les valence (drome)
- Pont de saint pierre la cour (Mayenne) (1)
- Pont de la Chabotte (ps 34 sur l'autoroute a51 dans l'Isère) (2)
- Passerelle des anges (Herault) (3)
- Couverture de la gare de péage du viaduc de Millau(Aveyron) (4)
- Pont canal sur la LGV est
- Pont Pinel à Rouen
- Centre d'autobus de la RATP à Thiais
- Immeuble des grands moulins de Paris
- Fondation Louis Vuitton à Paris
- Toiture de la maison Navarra
- Cinéma les enfants du paradis à Chartres
- Coques de couverture des bassins de la station d'épuration seine aval à achères
- Couverture du stade Jean Bouin à Paris (5)
- Musée national des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée à Marseille :MUCEM (Bouches du Rhône) (6)

<(1) l'ouvrage est un pont routier constitué de poutres précontraintes par **prétension** en BFUP connectées à un **hourdis** en béton traditionnel coulé sur des prédalles en BFUP.

<(2) le tablier de la Chabotte n'a pas été recouvert d'étanchéité ni de couche de roulement. La rugosité du tablier a été adaptée pour assurer l'adhérence des véhicules circulant sur l'ouvrage.

<(3) la passerelle conçue par l'architecte Rudy Ricciotti et l'ingénieur Romain Ricciotti est un ouvrage isostatique de 67.5 m de portée pour une hauteur de 1.80 m (élancement 1/38). Elle est constituée de voussoirs préfabriqués en bfup précontraints par post tension.

<(4) l'ouvrage présente une géométrie complexe (forme gauche à génératrices hélicoïdales). Il mesure 98 m de long et 28 m de large. Il est constitué de 53 voussoirs préfabriqués à joints conjugués collés et assemblés par des câbles de précontrainte.

<(5) la couverture du stade Jean Bouin est une coque tridimensionnelle constituée d'éléments de dalles nervurées triangulaires de grandes dimensions en BFUP, associées à des inclusions en verre.

<(6) au MUCEM, le BFUP est utilisé pour l'ensemble des structures porteuses périphériques constituées de poteaux arborescents, pour la réalisation des résilles habillant les façades et les toitures ainsi que pour les passerelles d'accès.

Les BPUP malgré un coût matière largement supérieur à celui des bétons traditionnels permettent de réaliser des structures économiquement et environnementalement compétitives grâce :

- à une réduction des volumes de matériaux mis en œuvre et donc des ressources naturelles utilisées (matières premières et énergie)
- une rapidité de réalisation de structures plus légères
- la pérennité du matériau gage d'une réduction très importante des frais de maintenance et d'entretien sur des durées d'utilisation des structures bien plus longues.

Les BFUP ont aussi été utilisés aussi bien en France qu'à l'étranger pour la réparation, la rénovation, la réhabilitation ou la protection d'ouvrages divers dont en particulier : le Viaduc de Valabres , le Musée de Toulouse Lautrec, l'ouvrage **hydraulique** de Saint Julien, le viaduc de l'Huisne au Mans, le pont d'Illzach…

À l'étranger, les BFUP ont permis la réalisation de nombreux ouvrages tels que les passerelles de Sherbrooke, Séoul, Sakata Mirai, Papatoetoe, Glemmore, l'extension de l'aéroport d'haneda , la couverture de la gare de shawnesy…

Valorisation des performances des BFUP

Valorisation des résistances mécaniques

Le comportement mécanique du matériau permet de concevoir des ouvrages particulièrement élancés et légers, notamment avec des concepts innovants tels que des structures nervurées en **treillis** ou ajourées

Il permet de réduire les volumes de béton à mettre en œuvre, d'affiner les structures et donc de réduire le poids des ouvrages et leur impact sur les fondations.

Pour les bâtiments de grande hauteur, par exemple, la réduction de section des poutres permet de construire à coûts et à hauteur égaux des étages supplémentaires. De même, il devient possible avec des portées plus grandes, de réaliser des plateaux libres et d'accroître les surfaces d'habitation ou de travail.

Les performances mécaniques à court terme contribuent à optimiser les procédés de construction. L'utilisation de la précontrainte valorise les très hautes résistances en compression, en traction ou en flexion du matériau. L'absence d'armatures passives permet de réduire les délais de construction et les sections ou les épaisseurs des pièces.

Liberté de création et de forme

Les résistances élevées du matériau et l'absence d'armature associées à une haute précision du moulage facilitent la réalisation de formes variées pour la construction de structures légères et élancées, et l'élaboration de structures complexes (coques, voiles minces, résilles…).

Les performances mécaniques des BFUP autorisent une grande liberté de création de formes et de volumes.

Valorisation des qualités esthétiques des BFUP

La gamme des BFUP, au besoin complétée par des pigments, permet d'obtenir des textures très variées et des parements lisses satinés, mats, brillants, homogènes et très réguliers présentant d'excellentes qualités esthétiques.

Leur capacité à être moulé et la finesse des grains permettent de reproduire fidèlement les détails très précis de la micro-texture de la peau du coffrage ou du moule.

Valorisation de la durabilité des BFUP

Les BFUP sont particulièrement adaptés aux environnements sévères tels que de fortes variations de température ou d'hygrométrie, des agressions chimiques par des ions chlorure ou des acides, des cycles de gel-dégel…

Les gains sur la compacité du béton autorisent la réduction de l'enrobage des armatures éventuelles (armatures passives ou actives). Ils permettent d'envisager la réalisation d'ouvrages offrant de grandes durées de service pratiquement sans entretien, ni réparation ;

Document de référence

Le document de référence pour les BFUP a été édité en janvier 2002 par l'association française de génie civil (AFGC) dans sa collection de documents scientifiques et techniques : « bétons fibrés à ultra-hautes performances : recommandations provisoires » :

L'amélioration des connaissances , les retours d'expérience sur les ouvrages réalisés au cours de la dernière décennie , les recherches récentes sur les ouvrages en BFUP ont permis de faire évoluer ces recommandations et de les mettre à jour en

cohérence avec les nouvelles normes européennes de dimensionnement des structures (les Eurocodes) .

Ces nouvelles recommandations (édition 2011) comportent 4 chapitres

Le chapitre 1 « comportement et caractéristiques mécaniques des BFUP » précise les caractéristiques mécaniques des BFUP (résistance en compression, résistance en traction, module d'élasticité ,coefficient de poisson...) Et décrit les méthodes d'essais pour les déterminer et les analyses pour les interpréter. Il détaille aussi les épreuves d'études, de convenance et de contrôle nécessaires lors de la réalisation des ouvrages. L'épreuve de convenance consiste à réaliser un élément témoin à l'échelle 1 permettant d'optimiser les méthodes de bétonnage et de prendre en compte l'incidence de l'orientation privilégiée des fibres par les parois du coffrage lors du coulage.

Le chapitre 2 « méthode de dimensionnement des structures « a été adapté pour tenir compte des évolutions et des notations de l'Eurocode 2. Il intègre les derniers résultats de recherche concernant par exemple le dimensionnement des ouvrages vis-à-vis du cisaillement.

Le chapitre 3 « durabilité des BFUP « décrit les principales caractéristiques des BFUP en terme de durabilité liée. Il présente aussi les derniers résultats d'essais en particulier en matière de comportement vis-à-vis des élévations de températures et des cycles de gel/dégel.

Le chapitre 4 «développement durable « synthétise les données environnementales des BFUP et décrit les nouvelles possibilités offertes par ces matériaux en matière de développement durable et de recyclage. Les BFUP en optimisant les ressources en matériaux permettent de minimiser l'empreinte environnementale des structures. La durabilité du matériau face aux diverses agressions permet la conception de structures véritablement pérennes. Des études ont démontré la recyclabilité des BFUP et la valorisation potentielle de leurs constituants dans la fabrication de nouveaux bétons.

Nota : ce document est disponible sur commande à AFGC.

Perspectives de recherches et développement

Les BFUP fruit d'un ensemble d'avancées scientifiques font encore l'objet de nombreuses recherches. Ces recherches visent à optimiser les performances du matériau, à mieux appréhender son comportement et ses propriétés, à mieux comprendre les effets combinés des fibres et des armatures passives ou de précontrainte sur les caractéristiques mécaniques et la ductilité, à maîtriser les déformations au jeune âge (retrait endogène), à modéliser les écoulements du matériau frais dans les coffrages et les moules et l'orientation privilégiée des fibres. Les recherches se focalisent aussi sur la mise au point de nouvelles applications et de nouvelles solutions structurelles optimisées.

Évolutions du corpus normatif

Les Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances (FUP) relèvent désormais de 3 normes relatives au matériau, au dimensionnement et à l'exécution. Ils disposent désormais d'un corpus complet spécifique.

Norme matériau BFUP

Norme **NF P 18-470** (Bétons - Bétons fibrés à ultra hautes performances - Spécifications, performance, production et conformité – Juillet 2016)

Norme dimensionnement BFUP

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) Avril 2016).

Norme exécution BFUP

Norme **NF P 18-451** (Exécution des structures en béton –règles spécifiques pour les BFUP -Décembre 2018).

Nota : Pour les **produits préfabriqués**, la norme « règles communes pour les produits préfabriqués en béton » (norme NF EN 13369/CN) a été révisée pour y inclure les normes relatives au BFUP.

Conclusions

Les BFUP compte tenu de leurs multiples performances s'adaptent aux diverses contraintes et exigences des ouvrages. Ils ouvrent de grandes perspectives d'applications pour les structures nécessitant résistances importantes, durabilité et esthétisme. Ils répondent aux évolutions majeures de la construction en permettant d'optimiser les dimensionnements (augmentation des portées, réduction des quantités de matériaux utilisés), de réduire la durée des chantiers et les coûts globaux des ouvrages et l'impact sur l'environnement, d'améliorer l'esthétique des parements et la pérennité des structures et d'offrir une liberté architecturale.

Les différents BFUP disponibles ont des comportements spécifiques, il est donc nécessaire de les caractériser pour chaque application. Il convient en particulier d'appréhender l'interaction de la géométrie et de l'épaisseur des parties d'ouvrage avec les conditions de mise en œuvre afin d'optimiser la répartition homogène des fibres.

Ne nécessitant en général ni vibration, ni armatures passives, les BFUP permettent une diminution de la pénibilité sur les chantiers.

Leurs performances exceptionnelles offrent la possibilité de nouveaux domaines d'applications et de nouvelles structures de bâtiment ou de génie civil sous réserve que les concepteurs s'affranchissent des contraintes et des réflexes habituels de calcul des ouvrages en béton. Le concepteur doit avoir un regard innovant sur la conception et la réalisation de la structure.

Les BFUP étendent les possibilités d'emploi des bétons en optimisant les structures en particulier en termes de développement durable. L'intérêt économique potentiel en termes d'investissement est consolidé par les gains sur la maintenance et l'entretien au cours de la durée d'utilisation de l'ouvrage. Les performances mécaniques des BFUP associées à une haute précision du moulage permettent la réalisation de structures fines et complexes.

Ils réunissent tous les qualificatifs en termes mécaniques et esthétiques : résistance, durabilité, compacité extrême, liberté des formes et des textures. Ils permettent d'inventer de nouvelles formes plus légères qui n'ont de limite que la créativité des architectes.

Auteur

Patrick Guiraud

Retrouvez toutes nos publications sur les ciments et bétons sur infociments.fr

Consultez les derniers projets publiés
Accédez à toutes nos archives
Abonnez-vous et gérez vos préférences
Soumettez votre projet

Article imprimé le 26/11/2026 © infociments.fr