

17 et 18 novembre 2009 à Marseille

**Colloque BFUP/UHPFRC 2009 : Concevoir et construire en BFUP
Etat de l'art et perspectives**

L'Association Française de Génie Civil (AFGC) et la fédération internationale du béton (fib) ont organisé à Marseille les 17 et 18 novembre 2009 un colloque international sur les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances (BFUP).

Sept ans après la sortie des premières recommandations AFGC - SETRA sur les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances (BFUP), l'objectif du Colloque était de faire le point sur le savoir faire et l'expérience dans le domaine des BFUP et d'analyser les perspectives de développement.

Après un rappel des performances et caractéristiques principales de ces matériaux, le colloque a présenté des réalisations concrètes récentes tant en génie civil, en bâtiment que dans le domaine des équipements et infrastructures diverses :

- Projets et réalisations remarquables récentes tant en France qu'à l'étranger,
- Nouvelle version des recommandations AFGC, qui profitent des dernières réflexions conduites au travers des Eurocodes et au sein de la fib,
- Projet de la métropole Marseillaise : le MuCEM (Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée) qui mettra en valeur les bétons à ultra hautes performances.

Le Colloque a aussi été l'occasion pour tous les acteurs de la Construction qui ont été impliqués dans des réalisations en BFUP de venir les présenter.

Les conférences et les débats ont permis d'expliquer les raisons du recours au BFUP (esthétique, technique, structurelle ou environnementale), de faire le bilan de l'expérience acquise et d'en tirer des enseignements pour les réalisations futures notamment vis-à-vis des concepts du développement durable.

Le colloque a réuni 340 participants.



Rappel du programme

Mardi 17 novembre

8h30 : Accueil des participants

9h00 : Ouverture du Colloque

Jacques Resplendino (BFUP 2009), Hanz Rudolf Ganz (fib), Jean-Marc Tanis (AFGC)

1ère Session introductive

Président de session : Franz Josef Ulm

10h00 : Introduction : Qu'est ce qu'un BFUP

Jacques Resplendino

10h10 : La science au service de la construction
Analyse multi-échelle, chimie, mécanique non linéaire, topologie et sciences de l'ingénieur en lien avec l'innovation dans les matériaux cimentaires

Franz Josef Ulm

10h25 : Historique du développement des BFUP et applications décisives

Gérard Birelli, Thierry Thibaux, Mouloud Behloul

10h50 : Discussions

2ème Session : Réalisations en BFUP : des possibilités architecturales renouvelées

Président de session : Paul Acker

11h00 : Les perspectives pour l'architecte

R. Ricciotti

11h30 : La Galerie Enrico Navarra

Rudy Ricciotti, Romain Ricciotti, Patrick Mazzacane

11h40 : Centre de bus de Thiais

D. Marrec

11h50 : Les résilles en BFUP : maîtriser le retrait pour jouer avec les formes

D. Stoeux, L. Guingot, L. Jacques

12h00 : La couverture du stade Jean Bouin

Rudy Ricciotti, G. Lamoureux, Romain Ricciotti, C. Thiriet, P. Revillon

12h10 : Discussions

12h30 : Déjeuner sur place

3ème Session (partie 1) : Réalisations en BFUP : des ouvrages qui repoussent les limites du possible

Président de session : Jean-Marc Tanis

14h00 : La passerelle des Angès

F. Teply, P. Mazzacane, R. Ricciotti

14h10 : La passerelle "Gärtnerplatz" sur la rivière Fulda à Kassel - ouvrage mixte acier-BFUP multitravées

E. Fehling, K. Bunje, M. Schmidt

14h20 : Construction du pont de la Chabotte en BFUP sur l'autoroute A51 (PS34 - A51)

O. Delauzun, L. Linger, L. Boutillon, C. Clergue, D. Rogat

14h30 : Applications innovantes des BFUP au Japon dans le domaine des ponts

Y. Tanaka, K. Maekawa, Y. Kameyama, A. Ohtake, H. Musha, N. Watanabe

14h50 : Les perspectives de développement des BFUP, point de vue d'une entreprise de construction spécialisée

M. Rebentrost, G. Wight

15h05 : Discussions

3ème Session (partie 2) : Réalisations en BFUP : des ouvrages qui repoussent les limites du possible

Président de session : Thierry Kretz

15h15 : Le pont routier WILD : application du BFUP en préfabrication pour une structure en arc

M. Reichel, B. Freytag, L. Sparowitz, W. Zimmermann

15h25 : Application des BFUP dans les infrastructures du réseau routier américain

B. Graybeal

15h40 : La poutre ITE, une alternative économique et durable aux poutrelles enrobées

T. Thibaux

15h50 : Application du projet de dalle gaufrée du PN MIKTI sur un ouvrage à Livron-Loriol

F. Tavakoli, S. Bouteille, F. Toutlemonde

16h00 : Prototypes en BFUP pour un pont ferroviaire provisoire modulaire

M. Reichel, G. Altersberger, L. Sparowitz

16h10 : Emploi du BFUP en fondations profondes

S. Sritharan, T. Vande Voort, M. Suleiman

16h20 : Discussions

16h30 : Pause café

4ème Session (partie 1) : Réalisations en BFUP : des équipements ou composants innovants pour le bâtiment et le Génie Civil

Président de session: Charles Baloché

17h00 : Applications des BFUP en préfabrication : cas du CRC

B. Aarup

17h15 : Apport des BFUP dans le traitement des ponts thermiques

T. Burckel, L. Jacques, L. Heintz, J. Daliphard, M. Behloul, A. Birault

17h25 : Composants de couverture écologiques et durables : une solution proposée par le secteur des composites cimentaires

M. di Prisco, M. Colombo, L. Ferrara, A. Magri

17h35 : Les brise-soleil en BFUP : une solution élégante pour réguler les apports thermiques dans les bâtiments

L. Jacques, J.Y. Jousselin, J.F. Batoz, Y. Fournier

17h45 : Dalles en BFUP soumises au souffle et aux explosions

M. Rebentrost, G. Wight

17h55 : Discussions

4ème Session (partie 2) : Réalisations en BFUP : des équipements ou composants innovants pour le bâtiment et le Génie Civil

Président de session : Thierry Thibaux

18h05 : Application des BFUP en préfabrication : l'expérience néerlandaise

S. Grünwald, R. Weyns, J. Dekkers

18h20 : Optimisation de parapets de ponts préfabriqués en béton fibré à ultra hautes performances

J.P. Charron, E. Niamba, B. Massicotte

18h30 : Éléments de façade complexes en béton fibré à ultra hautes performances

R. Suter, L. Moreillon, C. Clergue, R. Brusa

18h40 : Un nouveau type de joints en BFUP coulés en place entre dalles de ponts préfabriqués. Conception, essais et projets

V. Perry, G. Weiss

18h50 : L'Enduit Hydraulique Fibré Gravillonné (EHFG), un cousin du BFUP pour des chaussées à longue durée de vie

F. de Larrard

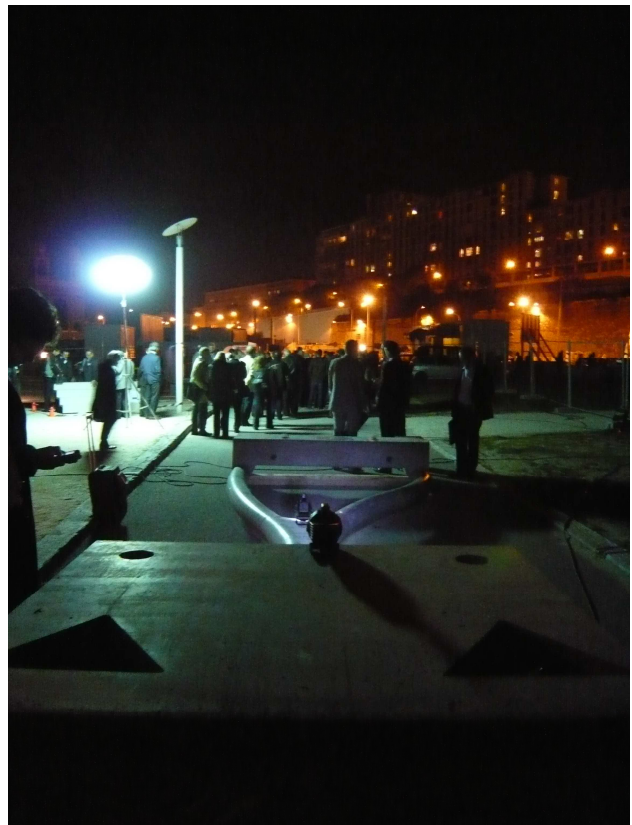
19h00 : Evaluation structurelle de poutres de ponts mixtes composites à matrice polymère - BFUP

A. Elmadhy, R. El-Hacha, N. Shrive, V. Perry

19h20 : Discussions

19h45 : Départ vers le MuCEM et le Fort Saint Jean

20h00 : Visite de nuit de la Terrasse du MuCEM avec présentation des prototypes en BFUP



21h00 : Dîner de Gala au Fort Saint-Jean

Mercredi 18 novembre

5ème Session (partie 1) : Les BFUP au service d'une nouvelle vie des ouvrages

Président de session : Bruno Godart

8h00 : Renforcement parasismique de piles de pont par chemisage en BFUP

B. Massicotte, G. Boucher-Proulx

8h10 : Emploi du BFUP pour des travaux de réparation de canaux d'irrigation

T. Ono

8h20 : Renforcement structurel de bâtiments et d'ouvrages de Génie Civil au moyen de BFUP

T. Thibaux

8h40 : Discussions

5ème Session (partie 2) : Recherches et développements en cours

Président de session : Joost Walraven

8h50 : Enjeux de la prévision du fluage pour les composants précontraints en BFUP

P. Francisco, F. Benboudjema, P. Rougeau, J.M. Torrenti

9h00 : Rhéologie et mise en œuvre des matériaux cimentaires fibrés : de l'isotropie au comportement orienté

L. Martinie, P. Rossi, N. Roussel

9h10 : Discussions

5ème Session (partie 3) : Retours d'expérience et acquis récents

Président de session : Pierre Rossi

9h20 : Durabilité et évolution in-situ des caractéristiques d'un BFUP : retour d'expérience sur poutrelles dans un aéroréfrigérant

F. Toutlemonde, M. Carcasses, M. Lion

9h30 : Comportement des BFUP à haute température

P. Pimienta, J.C. Mindeguia, A. Simon, M. Behloul

9h40 : Conception des ponts à poutres en BFUP selon le règlement canadien

H. Almansour, Z. Lounis

9h50 : Efforts et acquis de recherche sur les BFUP depuis 2002 en vue de l'actualisation des recommandations de l'AFGC

F. Toutlemonde, F.J. Ulm, B. Fouré, F. Baby, P. Marchand, L. Sorelli

10h10 : Discussions

10h20 : Pause café

6ème Session (partie 1) : Recommandations et réglementations

Président de session : Hanz Rudolf Ganz

10h50 : Les nouvelles recommandations AFGC

J. Resplendino

11h00 : Point sur les recommandations fib

J. Walraven

11h10 : Actualisation du chapitre 1 « matériau »

A. Simon

11h25 : Actualisation du chapitre 2 « calcul de structure »

P. Marchand

11h45 : Actualisation du chapitre durabilité

M. Carcasses

12h00 : Discussions

6ème Session (partie 2) : BFUP et développement durable

Président de session : Christian Cremona

12h10 : Synthèses des données disponibles

P. Marchand

12h20 : Illustration des possibilités de recyclage

T. Sedran, C. Durand, F. de Larrard

12h30 : La contribution du BFUP au développement durable

J.F. Batoz, M. Rivallain

12h40 : Ponts routiers en BFUP et développement durable : état des lieux et défis technologiques pour le béton

T. Stengel

12h50 : Discussions

13h00 : Déjeuner sur place

7ème Session : Le projet du MuCEM (Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée)

Président de session : Jean-Claude Dumont

14h30 : Point de vue du maître d'ouvrage

G. Gazon

14h45 : Conception de la structure utilisant largement les BFUP

R. Ricciotti, J. Portelatine, F. Nicolas

15h25 : Expérimentation et modélisation de poteaux droits et de forme Y en BFUP précontraints sous l'action d'un chargement vertical excentré

P. Rivillon, J. Portelatine

15h50 : Discussions

Session de clôture

16h00 : Synthèse des conférences

Concevoir et construire en BFUP - Bilan et perspectives pour les domaines de la recherche, de la conception et de l'exécution de structures qui répondent aux exigences des concepts du développement durable. Using UHPFRC for design and building: gained knowledge and perspectives for research needs, design trends and improvement of construction techniques for sustainable UHPFRC construction

Jacques Resplendino, François Toutlemonde

16h15 : Clôture du colloque

Synthèse des présentations

À l'heure où tout le monde se focalise sur une crise difficile à cerner et qui semble toucher presque tous les secteurs, que chacun se pose des questions sur l'avenir, l'évolution du climat et les façons de rendre notre existence plus écologique, des chercheurs, accompagnés d'architectes et ingénieurs, de tous horizons, essaient de repenser la façon de construire. Les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP) en sont un des fruits.

L'industrie du béton, matériau de construction le plus utilisé au monde, représente aujourd'hui un chiffre d'affaires annuel de 3,1 milliards d'euros, et pas moins de 32 millions de tonnes de produits. C'est au détour d'un chemin, au cœur du palais du Pharo à Marseille, que s'est déroulé ce Colloque international sur les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances.

L'Association Française de Génie Civil et la Fédération Internationale du Béton ont choisi la capitale européenne de la culture en 2013, et cœur de la Méditerranée, carrefour privilégié des peuples, des cultures, et des économies, pour réunir les principaux acteurs de cette révolution en marche les 17 et 18 novembre 2009. Venu du monde entier, chercheurs, architectes, ingénieurs, industriels, et universitaires, ont pu assister à différentes présentations réparties en sept sessions, ainsi qu'à une exposition d'ouvrages réalisés en BFUP sur le môle J4. C'est d'ailleurs à cet endroit que s'élèvera le MuCEM, Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée, projet phare de la métropole marseillaise et fil rouge de ce colloque, qui met en valeur les bétons à ultra hautes performances.

Le colloque s'est ouvert avec une introduction de Jacques Resplendino nous rappelant qu'une rupture technologique est intervenue au début des années 90 avec la mise au point de bétons ayant une résistance à la compression de l'ordre de 200MPa.

Les BFUP, derniers-nés de cette génération, font appel à des adjuvants super plastifiants et à des compositions granulaires spécifiques, ainsi qu'à des fibres métalliques, polymères ou minérales. La présence de celles-ci, les performances en traction et le comportement ductile du matériau, permettent de s'affranchir des cages de ferrailage passif traditionnelles.

Les BFUP révolutionnent ainsi les techniques et méthodes de construction, en facilitant la conception de nouvelles structures de formes plus libres et plus audacieuses. Ils permettent également des avancées sensibles sur les aspects environnementaux et la durabilité des structures. Le colloque a permis ensuite d'explorer toutes les facettes et possibilités des BFUP.

Des réalisations concrètes.

Tant en génie civil et bâtiment que dans le domaine des équipements et infrastructures diverses, en France et dans le monde, des réalisations récentes, comme la « passerelle des anges » ou le centre de bus de Thiais, ont été présentées aux participants permettant de mettre en évidence les possibilités qu'offrent ces matériaux : réalisation de poutres, coques de formes complexes très élancées, utilisation dans la conception de rupteurs thermiques préfabriqués, de brosse-soleil, de résilles, de bouclier de protection contre les explosions pour le bâtiment, application en réparation, renforcement, protection de structure.

Parmi les prochains projets, on retiendra en particulier la couverture du Stade Jean Bouin, 22 000m² de résille formée d'un maillage de panneaux isostatiques en BFUP, supportant les charges climatiques, étanche et durable.

De nombreuses études sont également en cours ou ont été réalisées quant à l'utilisation des BFUP pour le renforcement des couches de roulement de chaussée routière, l'utilisation en fondations profondes, comme les pieux reprenant une charge plus importante à section égale par rapport aux pieux conventionnels, l'utilisation dans des structures composites associant les BFUP avec du bois, des matériaux composites ou de l'acier.

Des dernières réflexions scientifiques aux nouvelles recommandations de l'AFGC

Un des points importants du colloque a été l'actualisation des recommandations existantes de l'AFGC.

L'AFGC dispose d'un comité scientifique et technique qui pilote des groupes de travail interdisciplinaires en charge de l'élaboration d'éléments de doctrine technique. Le Groupe de travail sur les BFUP a publié en 2002 les premières recommandations sur ces matériaux qui comportent trois chapitres : caractéristiques du matériau, dimensionnement des structures, durabilité incluant la résistance au feu.

Pour mettre en cohérence ces recommandations avec le nouveau contexte réglementaire apporté par les eurocodes, et intégrer les progrès les plus récents sur la connaissance de ces matériaux (résistance au feu, au gel, à l'abrasion, résistance à l'effort tranchant, effets différés, traitements thermiques....), le groupe de travail a rédigé une nouvelle version des recommandations qui sera publiée en 2010.

Cette nouvelle version intègre un quatrième chapitre sur le développement durable qui fait la synthèse d'études récentes concernant les bilans économiques et environnementaux de structures utilisant du BFUP, les possibilités de recyclage du matériau.

Le Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée

Après dix ans de réflexions et discussions, c'est la naissance concrète d'un grand musée national décentralisé qui fera revivre les collections du musée des Arts et Traditions populaires dans une perspective élargie à l'Europe et au monde méditerranéen. Rappelons que le MuCEM sera un musée d'un nouveau genre, articulé autour de trois espaces. Celui du môle J4 sur lequel commence la construction, a été confié à l'architecte Rudy Ricciotti. Ses deux grands plateaux accueilleront expositions, concerts, colloques, forums, ainsi que des lieux de convivialité et une librairie.

Si la première pierre est un parpaing symbolique, le musée sera largement construit en BFUP, en particulier pour la résille de façade et de couverture, la passerelle, les planchers, et poteaux arborescents. Ceci permet de réduire l'épaisseur des poteaux et des murs, sans nuire à la solidité de l'ensemble, conduisant ainsi une optimisation importante de l'espace.

*Synthèse rédigée par
Guillaume BURCKLÉ et Anthony RAPPA,
Etudiants à Polytech Marseille*

SESSION 1

Introduction

Le monde du béton connaît actuellement un changement profond. Pour reprendre l'expression de Franz-Josef Ulm, professeur au MIT ce « changement de paradigme » provient du fait que les ingénieurs se sont réellement appuyés sur des concepts scientifiques pour développer les Bétons à Hautes Performances (BHP) puis les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP). Les BFUP représentent le challenge du prochain siècle -dixit Paul Acker, Directeur Scientifique chez Lafarge.

Pourtant la technologie du béton a peu varié dans le temps. Il faut attendre les années 1980 et la construction en BHP du pont de l'île de Ré, qui amorce un changement industriel profond. C'est dans cette avancée de la science que vont se développer les BFUP. De plus leur démarrage va déclencher un enchaînement des évolutions dans les bétons, telle la création du béton auto plaçant.

Cependant Paul Acker met l'accent sur le fait qu'il faut absolument comprendre les mécanismes gouvernant la microstructure des BFUP : si le matériau possède déjà un important atout environnemental et permet la baisse de la consommation en énergie des bâtiments, la combinaison optimale est loin d'être trouvée. Les travaux futurs restent gigantesques.

Même non optimisés, les BFUP ont un potentiel énorme puisque ils ont un avantage concurrentiel indéniable sur le marché face aux autres matériaux : leur grande durabilité est un avantage primordial.

Malgré cela, la profession reste peu convaincue et il faut encore acquérir une approche spécifique de ce matériau ; approche que l'on trouve déjà au Japon.

C'est dans ce contexte que l'Association Française de Génie Civil (AFGC) en association avec la Fédération Internationale de Béton (*fib*), qui travaille depuis de nombreuses années sur le domaine des BFUP, ont organisé le colloque international de Marseille 2009. Le but de ce colloque est de permettre aux différents intervenants d'avancer dans leur réflexion concernant des questions telles que « comment utiliser concrètement les BFUP » et de découvrir que l'utilisation du BFUP est désormais réellement possible.

Historique

Avant tout, un historique des BFUP s'impose. Le premier BFUP date de 1970 et fut réalisé par le professeur Bache au Danemark qui fut à l'origine de la technologie CRC marquée par un taux de fibrage élevé tout en gardant la présence d'armatures passives.

Ce fut ensuite Pierre Richard (groupe Bouygues) qui fit des recherches dans les années 1990 à 1995 et permit d'acquérir des informations capitales. C'est réellement la passerelle de Sherbrooke au Canada, construite en 1997 qui fut la première grande construction en BFUP.

Entre 1997 et 1998, les travaux d'EDF sur les aéroréfrigérants des centrales nucléaires vont grandement contribuer au développement des BFUP. Comme nous l'explique Gérard Birelli, des vieillissements prématurés sur certains sites ont demandé aux ingénieurs une réflexion sur la mise en œuvre des réparations. En effet les travaux doivent se réaliser pendant l'activité de la centrale et ne doivent pas altérer son fonctionnement. De toutes les solutions envisagées celle utilisant les BFUP était la meilleure. Mais en l'absence de retour d'expérience significatif, son emploi était un vrai défi qu'EDF a su relever. Il fallait tout de même oser prendre comme première utilisation des BFUP en France une centrale nucléaire et non un bâtiment plus simple. Les études sur le site de Cattenom en 2000 et 2008 (respectivement 3ans et 11ans d'expérience) vont donner des informations sur l'évolution des BFUP dans un environnement agressif et ainsi confirmer leurs caractéristiques.

À partir des années 2005 de nombreux programmes de recherches sont lancés, notamment en Allemagne, et les BFUP connaissent un développement important au Japon, Australie ou encore aux USA.

Définition des BFUP

Mais que sont les BFUP ? C'est Jacques Resplendino expert Ouvrages d'Art à la DIR Méditerranée et animateur du groupe BFUP de l'AFGC qui a éclairé la question. Le BFUP est un matériau cimentaire à granulats très petits. Son rapport eau/ciment inférieur à 0.2 détermine ses performances exceptionnelles. Un fort dosage en liant, en super plastifiant, et en ultra fines (Fumée de Silice) entraîne une microporosité

réduite et une durabilité exceptionnelle. Les ultrafines servent à la compacité du matériau et le mélange reste très homogène.

L'emploi de fibres métalliques de taille très petite adaptée à celle des granulats, donne ses particularités au BFUP (ductilité, résistance en traction) qui va ainsi pouvoir se libérer des cages d'armatures traditionnelles et permettre de concevoir des structures plus épurées. Les BFUP présentent une résistance en compression comprise entre 150 et 250 MPa. Il est cependant nécessaire de porter une attention particulière aux coffrages et au traitement des surfaces non coffrées pour éviter l'apparition des fibres métalliques en surface du béton.

Sur le marché on trouve plusieurs BFUP développés par des associations d'entreprises, avec notamment : le Ductal® développé par le groupement Lafarge /Bouygues /Rhodia, le CERACEM/BSI® développé par Eiffage et Sika ou encore le BCV® du groupement Vicat/Vinci.

Le BFUP est un matériau très « nerveux » à la prise : le faible rapport eau/ciment entraîne un fort retrait (endogène) pendant la prise puis le matériau ne bouge pratiquement plus : retrait de dessiccation très faible voire nul en cas de traitement thermique (réalisé après la prise à une température d'environ 90°C pendant environ 48h). Les BFUP ont un fluage encore plus faible que les Bétons à Hautes Performances avec fumée de silice. Dans le cas d'un traitement thermique, le coefficient de fluage est très réduit et on obtient un matériau pratiquement inerte. La taille réduite des pores et l'absence de connexion entre eux vont empêcher les mécanismes de propagation des agents agressifs et ainsi augmenter fortement la durabilité.

Les essais de résistance en compression doivent être réalisés avec un soin particulier (préparation des éprouvettes, surfaçage) lié à la très forte résistance. Quant à la résistance en traction, elle dépend de l'orientation des fibres qui est fortement influencée par la mise en œuvre. Afin de valider les processus de mise en œuvre, il est ainsi indispensable de réaliser une épreuve de convenance consistant à réaliser un élément témoin de taille représentative de la structure réelle coulé dans les mêmes conditions que cette dernière. On prélève dans cet élément des échantillons permettant de mesurer la résistance en traction dans les directions principales d'efforts afin de vérifier la cohérence des hypothèses retenues pour le dimensionnement par rapport à la résistance réelle dans la structure (notion de coefficient K qui permet de prendre en compte les biais et la dispersion sur la résistance en traction liés aux processus de mise en œuvre).

Les recommandations AFGC donnent des valeurs de K permettant de dimensionner une structure a priori. Les épreuves de convenance permettent de vérifier que le coefficient K obtenu dans la structure réelle place en sécurité par rapport aux hypothèses initiales, ou nécessite soit de revoir le dimensionnement soit d'optimiser les processus de fabrication.

L'emploi des BFUP révolutionne ainsi la mise en œuvre et l'esthétique des constructions. L'absence d'armatures et le poids propre plus faible du BFUP permettent une grande liberté de formes; il est maintenant possible de sortir des structures traditionnelles et d'imaginer sans complexe des cylindres et des formes arrondies là où il y avait des parallélépipèdes et des formes angulaires, de construire des structures minces sur des sites difficiles.

Mouloud Behloul, ingénieur chez Lafarge nous en a fait la démonstration en nous exposant de nombreux types de bâtiments construits avec des BFUP.

Pour les passerelles, les BFUP permettent d'affiner et d'étirer les structures. Séoul ou Sherbrooke en sont l'exemple.

Pour les ponts, l'utilisation de poutres préfabriquées précontraintes par post tension permet d'augmenter sensiblement les élancements par rapport à des solutions traditionnelles. De même les caractéristiques des BFUP dans des environnements agressifs permettent de grandes applications dans le génie civil comme le Haneda Airport (Japon). Bien que le BFUP soit essentiellement utilisé dans la construction d'ouvrages d'art pour ses hautes performances et sa durabilité, il fait désormais ses preuves dans la construction des bâtiments. En effet, il permet des constructions de structures légères, plus esthétiques et peut permettre de résoudre les problèmes de construction dont le poids propre est très pénalisant. On voit apparaître des façades et des éléments d'habillage des bâtiments comme les panneaux acoustiques de la gare de Monaco (15 mm d'épaisseur). Les BFUP sont désormais aussi utilisés pour des escaliers ou encore des habitations « basse consommation ».

Les BFUP sont aussi une avancée dans le domaine du développement durable, en particulier sur le gain en terme d'empreinte CO₂, d'énergie, et de matière première. De plus, ils sont intéressants vis-à-vis de solutions de structures « inusables » ou « évolutives ».

*Synthèse de la Session 1 rédigée par
Sophie DALSTEIN et Steven GUISS
Étudiants à Polytech Marseille*

SESSION 2 : Réalisations en BFUP, des possibilités architecturales

Les perspectives pour l'architecte

Pour commencer cette session, Rudy Riccieti, un architecte passionné qui n'a pas la langue dans sa poche !

C'est en 1998 qu'il travaille pour la première fois avec du BFUP, pour la construction de la passerelle de Séoul où il découvre cette nouvelle technologie. Il en fait aujourd'hui l'éloge : « C'est une supra technologie, une technologie métaphysique... ».

Rudy Riccieti est avant tout un adepte du béton qui est, selon lui, un matériau de production (puisque les éléments qui le composent sont présents partout dans le monde), de politique et même de lien social.

Le BFUP permet de repousser les limites des contraintes structurelles et ainsi de jouer avec les formes, de s'amuser avec les textures. Avec le BFUP, on peut obtenir des formes légères, frivoles, tout en gardant l'aspect brut du béton. C'est grâce à ses caractéristiques physiques et à son étanchéité que l'on peut obtenir ces résultats.

Le BFUP chamboule notre mémoire visuelle, en effet chaque individu a sa propre idée des proportions dites « normales » d'un ouvrage. Avec le BFUP, on sort des conventions, on peut obtenir des formes plus élancées avec des portées plus importantes, des structures avec moins de masse et pourtant encore plus solides et performantes.

C'est par exemple le cas pour la « Passerelle des Anges » qui propose une structure d'une portée de 70m pour une hauteur de seulement 1m80. Rudy Riccieti parle aussi de « déplacement de l'intelligence », puisque pour cet ouvrage l'ingénierie a été beaucoup plus sollicitée que la mise en œuvre en elle-même, facilitée par le peu de matériaux utilisés.

La Galerie Enrico Navarra

Cet ouvrage a une forme simple rectangulaire, la seule problématique consiste en une toiture en porte à faux de 8m. Deux solutions étaient réalisables : une structure métallique ou une structure en BFUP.

Des éléments préfabriqués en BFUP coulés de manière monolithique seront les plus à même de répondre au problème de porte à faux. Ses caractéristiques esthétiques et physiques sont des avantages incontestables financièrement et qualitativement parlant.

Centre de bus de Thiais

Situé à 20 minutes de Paris, sur une zone périurbaine, le bâtiment est entouré d'un parking de bus géant. Pour rester en harmonie avec l'aspect minéral qui se dégage de ce lieu, l'utilisation du BFUP était inévitable.

Le projet architectural consiste à déformer le territoire, en donnant l'impression que le bâtiment fait parti intégrante du sol. Il n'y a aucun joint visible, aucune démarcation, comme si la structure était sortie de terre.

Le bâtiment a été recouvert d'une couche imperméable, formée de petits picots, donnant un aspect extérieur en adéquation avec son environnement.

Les résilles en BFUP : Maîtriser le retrait pour jouer avec les formes

Jusque-là, les résilles étaient réservées à des matériaux autres que le béton, mais aujourd'hui le BFUP (généralement armé de fibres organiques lorsqu'il s'agit d'éléments non structurels) permet de retrouver des

résilles avec des formes plus arrondies et plus complexes. Grâce aux fibres, le BFUP possède une bonne résistance en flexion. On peut créer des structures solides et résistantes aux agressions extérieures tout en mettant en avant le côté esthétique de la finesse des résilles ainsi que l'aspect minéral très recherché du béton. De plus la finesse de la structure permet d'obtenir un poids inférieur à celui d'une solution en béton traditionnel, ce qui facilite les descentes de charges et n'entraîne pas de surcoûts au niveau structurel.

A très court terme après coulage, le BFUP subit un fort retrait endogène. Pour éviter tout problème on utilise des moules souples en silicones ou en élastomères. La technique la plus utilisée aujourd'hui est le coffrage à plat sur une seule face, ce qui permet d'éviter le bullage, mais nécessite une cure soignée et un traitement spécifique des surfaces non coffrées dans le cas d'utilisation de fibres métalliques (résilles structurelles).

Un nouveau processus d'injection sous vide est en train d'apparaître : un moule entièrement fermé, qui permet d'obtenir une surface entièrement homogène et diminue la porosité du béton. Cette technique présente un avantage esthétique permettant une grande finesse d'aspect.

La couverture du Stade Jean Bouin

Il s'agit d'un projet visant à réaliser l'enveloppe du stade Jean Bouin : 22000m² de résilles dont les façades et la couverture (11000m²). La résille est formée d'un maillage de panneaux isostatiques préfabriqués de forme triangulaire en BFUP. Chaque élément s'emboîte facilement ce qui simplifie les interfaces.

Le positionnement des panneaux préfabriqués permet une homogénéité des contraintes et des déformations. La façade sert de support des charges climatiques. Elle est étanche et durable. Cet ouvrage, très économique et s'inscrivant dans une démarche écologique, n'aura pratiquement besoin d'aucune maintenance durant 50 ans. La difficulté consiste à faire accepter ce projet innovateur par les bureaux de contrôle (nécessité d'une démarche d'ATEX).

*Synthèse de la Session 2 rédigée par
Florent GONTARD et Noémie PUTZU
Étudiants à Polytech Marseille*

SESSION 3 : des ouvrages qui repoussent la limite du possible

Passerelle des Anges

Maître d'ouvrage : La communauté de communes de la Vallée de l'Hérault
Architecte : Rudy RICCIOTTI
Ingénieur : Romain RICCIOTTI
Entreprise : Freyssinet et Bonna Sabla
Bureau de contrôle : Socotec

L'édifice a été livré en août 2008. La passerelle surplombe une brèche naturelle de 70 m de long et de 10 m de profondeur. Située au cœur d'un site naturel classé au patrimoine de l'UNESCO (présence de chênes centenaires), cette passerelle sert de point de passage sécurisé pour environ 1 300 personnes par jour. L'environnement extérieur impose l'absence d'appuis intermédiaires, de haubans et d'arcs. La solution BFUP s'impose alors naturellement : elle permet de traverser facilement le gouffre en un temps relativement court.

La passerelle est constituée par deux poutres isostatiques préfabriquées en usine. Elle comporte 15 voussoirs coulés par le bas, dans un moule spécialisé de 4,6 m de long. Une épreuve de convenance a permis de vérifier la bonne répartition des fibres dans chaque élément. Les voussoirs sont ensuite assemblés, clavés et assemblés sur site par post-tension. Des amortisseurs sont ensuite installés pour limiter les effets du vent.



Passerelle Gärtnertplatz

Ingénieurs : Ekkehard FEHLING, Kai BUNJE, Michaël SCHMIDT

La passerelle piétonne, traversant la rivière Fulda à Kassel en Allemagne est un pont mixte BFUP-acier, constituée d'une dalle préfabriquée en BFUP collée sur des nervures longitudinales en BFUP connectées à une charpente métallique tridimensionnelle en treillis. C'est la première construction réalisée en BFUP en Allemagne. La passerelle mesure 132 m de long et 5 m de large. Elle a été construite en 2007 en six travées distinctes assemblées par post-tension. Les piles du pont ont été bâties en premier puis les éléments préfabriqués du tablier et les gardes corps ont été assemblés travée par travée.



L'utilisation du BFUP dans ce cas permet d'augmenter la durabilité du pont et de mieux le protéger des attaques extérieures. Un plan d'étude a été conçu afin de recueillir de nombreuses informations sur les nouvelles structures en BFUP. Ces informations permettront d'établir des bases de données fiables sur ce nouveau matériau.

Pont de la Chabotte sur l'autoroute A51

Entreprise : Campenon Bernard Régions (VINCI)

MO : AREA

ME : EGIS Route

Il s'agit d'un passage supérieur sur l'autoroute A51 situé au cœur d'un espace naturel de l'Isère. L'utilisation du BFUP a permis de franchir l'autoroute sans appui intermédiaire et de supprimer ainsi les deux piles centrales de la solution classique alternative. Par ailleurs, il s'agit du premier pont route construit en France sur lequel aucune chape d'étanchéité ni couche de roulement n'a été mise en œuvre, la dalle de roulement en BFUP ayant été conçue pour garantir la rugosité nécessaire à l'adhérence des véhicules, et l'étanchéité du pont. L'ouvrage a été réalisé dans une usine de préfabrication équipée d'une nouvelle centrale à béton spécialement dimensionnée pour mettre en œuvre du BFUP, et comportant notamment un malaxeur à variation de vitesse permettant de favoriser la dispersion des fibres et éviter la formation d'oursins.

Le tablier en poutre caisson précontraint par post tension est réalisé au moyen de 22 voussoirs préfabriqués réalisés à joints conjugués collés. La faible dimension des voussoirs permet un transport par convoi autoroutier classique. La totalité du pont est assemblée au sol, puis levée à la grue avec l'ensemble de ses équipements pour la mise en place ; le poids total de la structure étant de seulement 295 tonnes pour une longueur de près de 50 mètres.

Quelques avantages du BFUP :

- Optimisation de la durabilité grâce à l'absence d'étanchéité.
- Diminution de l'utilisation de ressources naturelles.
- Compensation du coût du BFUP par la diminution du coût des fondations, la limitation de l'utilisation de matières premières et la minimisation du poids.
- Durée de mise en place réduite.



Passerelle Sakata-Mirai au Japon.

Il s'agit de la première utilisation de BFUP au Japon, elle est donc le symbole d'un changement important dans la réalisation des ponts.

Cette passerelle de 50 m de long fut réalisée en 2002 et a permis l'élaboration de normes BFUP au Japon en 2004.

Depuis 5 ans, la construction de ponts en BFUP s'est accélérée au Japon. Ces 8 dernières années, 20 projets de ce type ont vu le jour. L'utilisation du BFUP est donc entrée dans les mœurs au Japon, notamment pour diminuer les contraintes dans les ouvrages.

Parmi ces projets, quatre ont une importance particulière :

- La passerelle Toyota qui utilise pour la première fois une technologie de joint sec,
- Un pont à poutre caisson de travée de 40m de long qui est la plus longue poutre faite en BFUP,
- Le pont de transport de l'aéroport international d'Haneda
- La piste D de l'aéroport d'Haneda, qui est le plus important projet au monde en volume pour l'application de BFUP



Perspectives de développement des BFUP en Océanie

Les BFUP ont de nombreux avantages sur les bétons traditionnels : grande résistance à la compression (150 à 250 MPa, grande résistance en flexion (25 à 40 MPa) et des capacités auto-plaçantes

Ces avantages ont permis le développement de l'utilisation des BFUP en Australie et en Nouvelle-Zélande. Les architectes poussent d'ailleurs les ingénieurs à utiliser le BFUP pour la réalisation de nombreuses structures.

On peut notamment citer :

- le premier pont réalisé en Australie avec du BFUP en 2004
- des passerelles d'accès à une gare en Nouvelle-Zélande
- des panneaux de centrale électrique soumis à une projection permanente d'eau salée
- une protection d'autoroute phonique...



Les capacités des BFUP permettent leur utilisation dans de nombreux domaines. En particulier, quand ils augmentent la durabilité des ouvrages.

Pont routier WILD (Autriche)

Il s'agit d'une structure en arc réalisée à l'aide de voussoirs préfabriqués. L'arc, d'une portée de 70 m, est réalisé verticalement en deux parties distinctes. Les voussoirs sont assemblés à l'aide d'une précontrainte provisoire. Une fois le clavage central réalisé, une précontrainte définitive est mise en œuvre et l'arc est décintré. Les pilettes et le tablier sont alors construits en béton armé traditionnel.

L'utilisation du BFUP sur un ouvrage de ce type a entraîné de nombreuses études avant sa réalisation.

Des essais mécaniques ont été réalisés sur divers voussoirs prototypes à l'échelle 1, parfois jusqu'à rupture.

Cet ouvrage particulier permet d'étoffer les bases de données sur les BFUP. Ce qui devrait entraîner le développement de ce type d'ouvrage en Autriche ainsi que la poursuite des recherches.



Le BFUP dans les infrastructures du réseau routier américain

Bien que les recherches sur ce matériau n'aient débuté qu'en 2001 aux Etats-Unis, la première construction en BFUP date de 2006. En effet, l'utilisation du BFUP s'impose dans la réalisation des ponts aux USA. La résistance élevée, la rapidité de réalisation et la durabilité permettent un entretien moindre des ouvrages types très répandus et souvent coûteux à l'entretien. De plus, le BFUP permet d'économiser du béton puisque les dalles n'ont plus besoin d'être aussi épaisses qu'avec un béton armé classique.

En outre, les BFUP ont une porosité bien plus faible que le béton armé. Les fibres sont donc moins soumises aux agressions extérieures et moins détériorées. Le gain de poids du tablier permet également d'améliorer le comportement du pont en cas de tremblement de terre. Les BFUP ont également un faible taux de fissuration ce qui augmente d'autant plus leur résistance aux agressions extérieures.



Les BFUP offrent de grandes perspectives d'avenir pour les ponts aux États-Unis et de nombreuses recherches sont réalisées dans ce domaine.

La poutre ITE, une alternative aux ponts à poutrelles enrobées

Les poutrelles métalliques enrobées sont de plus en plus utilisées dans la construction de ponts. Face à la demande grandissante une nouvelle solution alternative en BFUP a été développée : la poutre ITE. Il s'agit de poutres préfabriquées en T inversé, à semelles inférieures jointives, connectées en partie supérieure à une dalle en béton armé traditionnel. Les poutres sont conçues de façon à avoir une inertie maximale pour un poids minimal. Le premier chantier de ce type fut le Pont Pinel à Rouen qui est un passage supérieur sur une voie ferroviaire. Les poutres ont un poids de 12 tonnes, une longueur de 27 m, 80 cm de large et 62 cm de haut. Chaque poutre est précontrainte par prétension avec 28 torons T155.



L'utilisation de ce type de structure a permis la réalisation du pont dans des délais très courts et sans interruption du trafic. En effet, celui-ci a été restreint de deux à une voie mais n'a jamais été stoppé totalement. De plus, les poutres étant disposées jointivement, les ouvriers peuvent travailler en toute sécurité sur la plateforme ainsi formée.

Avantages des poutres ITE par rapport à une solution en poutrelles enrobées :

- Réalisation de ponts moins épais

- Diminution du poids du tablier de 40%
- Rapidité et simplicité du chantier
- Gain sur les fondations
- Réalisation de portées importantes : 20 à 30 m

Dalles gaufrees du PN MIKTI :

Les dalles gaufrees en BFUP sont une solution alternative à la réalisation des dalles en béton armé traditionnel des tabliers bipoutres mixtes acier/béton. La dalle de roulement a une épaisseur de 5cm. Elle est nervurée dans les deux directions avec des nervures espacées tous les 60cm. La dalle a une épaisseur équivalente inférieure à 15cm. Elle est réalisée en éléments préfabriqués en pleine largeur, d'environ 2,5m de longueur. Les nervures transversales sont précontraintes pour permettre d'assurer la reprise des efforts transversaux dans l'ouvrage. L'assemblage des éléments se fait grâce à un joint maté en BFUP puis par l'application d'une précontrainte extérieure longitudinale mise en œuvre avant la connexion de la dalle à la charpente.

Dans le cas du projet MIKTI, des éléments prototypes de dalle ont été testés vis-à-vis de la résistance en fatigue, de la résistance à la rupture, de la résistance aux chocs sur les dispositifs de retenue et de la connexion à la charpente métallique.

Cette conception a été appliquée pour un ouvrage sur voie ferroviaire réalisé dans la cadre de la déviation de Livron-Loriol dans la Drôme. Ce pont se compose de trois travées de 41m - 68m - 41m et mesure 10,6 m de large. Les dimensions des dalles ont été adaptées au projet. L'intérêt de la solution est de permettre un allègement important du poids de la dalle permettant sa mise en œuvre avant le lancement de la charpente sur les voies ferroviaires, ce qui diminue de façon très sensible les perturbations aux circulations ferroviaires.

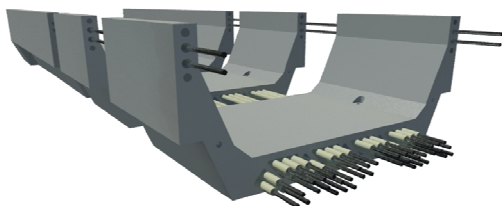


Prototype en BFUP pour un pont ferroviaire modulaire :

Un test à l'échelle 1 a été réalisé pour vérifier la faisabilité et la fiabilité de solutions de ponts préfabriqués en BFUP pour ouvrages ferroviaires.

Étant donné que les BFUP permettent la création d'éléments modulables ainsi qu'un coulage homogène dans les moules, leur utilisation pour la réalisation de structures préfabriquées est idéale. Ces solutions permettent également une pose rapide de la structure et un gain sur la durabilité.

En Autriche, un pont ferroviaire modulaire a ainsi été réalisé et sera soumis à de vraies conditions de service durant trois ans. Les résultats obtenus permettront de consolider les bases de données existantes sur les BFUP.



Les BFUP en fondations profondes :

Les fondations des ponts sont généralement réalisées à l'aide de pieux métalliques ou en béton armé enfoncés par battages. Or, ces pieux subissent de nombreuses détériorations aussi bien lors du battage que pendant leur utilisation. Une solution BFUP a donc vu le jour afin de rendre les pieux plus résistants et durables.

Ces pieux ont une section en H et un poids comparable aux pieux métalliques couramment utilisés. Les essais sur site et en laboratoire ont montré que leur résistance à l'enfoncement est nettement meilleure et que leur durabilité est augmentée. Ainsi, l'utilisation de tels pieux pour réaliser des fondations de ponts permet de diminuer la profondeur et donc le prix des fondations... ce qui compense l'augmentation budgétaire due à l'emploi de BFUP.

*Synthèse de la Session 3 rédigée par
Vincent BELLEGARDE et Florian REBECQ
Étudiants à Polytech Marseille*

SESSION 4 : Réalisations en BFUP : des équipements ou composants innovants pour le bâtiment et le Génie Civil.

Application des BFUP en préfabrication : cas du CRC

M. Bendt Aarup travaille pour HICON préfabrication, qui réalise une production annuelle moyenne de 40000T de BFUP. Le BFUP utilisé est le CRC créé en 1987, il a une résistance à la compression entre 150 et 350 MPa (après autoclavage). Il est armé de fibres d'acier mais est mis en œuvre avec un ferrailage passif traditionnel. Ses domaines d'application actuels sont les ponts et les structures secondaires (escalier sans pailasse, hélicoïdaux, spirales...), il permet aussi de grand porte à faux avec des épaisseurs contenues (balcons). Il peut

aussi être utilisé pour : des moulins, des éoliennes, des machines marémotrices (flotteur de 10m de diamètre).



Apports des BFUP dans le traitement des ponts thermiques.

En France, la construction traditionnelle entraîne de nombreux ponts thermiques. Ces ponts représentent 15 à 30% des pertes énergétiques totales des habitations, et sont la source de phénomènes de condensation qui peuvent entraîner des désordres structurels. Ces problèmes seront pris en compte dans la RT 2012 qui imposera un traitement obligatoire. Un groupe de travail regroupant Lafarge et Fehr Technologie a mis au point une solution utilisant du BFUP, constituée d'éléments préfabriqués très minces permettant l'incorporation d'isolant entre la dalle et la façade porteuse. Cette solution économiquement pertinente, durable et facile à mettre en œuvre devrait se développer de façon importante dans les prochaines années.

Brise Soleil en BFUP



La démocratisation des climatiseurs entraîne une surconsommation d'énergie l'été parfois même supérieure à la consommation hivernale. Il y a donc un réel besoin de minorer les apports solaires estivaux. Pour cela les brises soleil ont prouvé leur efficacité et l'utilisation de BFUP permet de nouvelles perspectives de dimensionnement (élancement réduit...) et de durabilité. Le coulage à froid permet une utilisation sur

mesure, la couleur blanche des BFUP non structurels permet de renvoyer le rayonnement solaire, de plus on évite les problèmes de corrosion et d'entretien liés aux brises soleil métalliques. Seul bémol le montage est une phase critique, et une attention particulière doit être apportée aux opérations de manutention et mise en œuvre des éléments.

Dalles en BFUP soumises au souffle et aux explosions

Les BFUP ont des résistances supérieures aux bétons ordinaires. Ils ont une grande capacité de dissipation d'énergie et une bonne résistance à la fragmentation. Des essais de résistance aux explosions ont commencé en 2004 en Australie révélant une énergie de rupture vingt fois supérieure à celle d'un béton armé ordinaire. Ces BFUP renforcés peuvent donc être utilisés en zones sensibles (protection des ambassades et bâtiments officiels) afin de protéger les biens et les personnes. Le principal avantage par rapport aux solutions traditionnelles en béton armé est un gain de poids très sensible sur les panneaux de protection, ainsi qu'une diminution importante des fragments susceptibles de blesser les personnes protégées du souffle.

L'application des BFUP en préfabrication : l'expérience néerlandaise.

Les Néerlandais ont déjà 10 ans d'expérience sur le BFUP, pour eux ce matériau a trois principaux domaines d'applications :

- Tout d'abord la durabilité en effet le BFUP peut-être utilisé dans un environnement très agressif, il a été utilisé dans une centrale nucléaire et c'est un des rares bétons à pouvoir être utilisé dans un tel environnement,
- Pour réaliser des ponts, ainsi que pour réparer certains ouvrages,
- Enfin il a aussi des applications architecturales, cela est dû à la possibilité de faire de grands porte-à-faux ainsi que de réduire de façon très significative l'épaisseur des ouvrages, on a donc un plus large éventail de formes.

Optimisation de parapets de ponts préfabriqués en BFUP.

Le but de l'étude présentée a été de vérifier si le BFUP pouvait être utilisé pour réaliser des parapets de ponts. Pour cela, différents essais ont été réalisés sur deux échantillons l'un à base d'une section pleine en BFUP, l'autre constitué d'une section composite comportant une enveloppe en BFUP remplie de béton à hautes performances (BHP). L'un de ces essais consistait à faire subir un crash test aux différents échantillons pour simuler un accident et voir si le parapet était assez résistant pour ne pas céder. A cet essai c'est le BFUP qui a eu les meilleurs résultats car aucun endommagement visuel n'a été décelé après le test. Par contre cette solution présente un rapport coût/résistance plus important que la solution composite alternative. En conclusion, la solution

préfabriquée en BFUP est la plus pertinente en terme de limitation du temps de mise en œuvre, durabilité et aspect architectural, mais la solution composite est un bon compromis économiquement intéressant dans le cas de solution de parapet coulé en place.

Éléments de façade complexes en BFUP.

Lors de cette présentation, Créabéton Matériau SA, l'École d'Ingénieurs et d'Architecte de Fribourg et Vica nous ont fait part de leurs avancées dans la création de pare-soleil intégrés dans une façade de bâtiment. Ces éléments préfabriqués sont en forme de L, composés d'un acrotère, d'une dalle nervurée et de quatre nervures transversales permettant de fixer les lamelles pare-soleil. Après plusieurs tests ciblés (dans les angles, les extrémités...) le comportement de ces éléments s'est montré satisfaisant, donnant par ailleurs la composition optimale et la nature des fibres les plus performantes pour le projet. L'utilisation de BFUP dans cette configuration de pièces complexes, soumises à diverses contraintes est particulièrement intéressante.

Un nouveau type de joints en BFUP coulés en place dalles de ponts préfabriquées-Conception, essais, projets.

D'ordinaire le joint est le maillon faible dans les ponts à dalles préfabriquées. Les chercheurs se sont alors demandé comment résoudre le problème. Ils ont ajouté à la formule de base du joint une quantité de BFUP. Le résultat est fort intéressant, car pour un joint normal il y a un fléchissement constant dû au trafic, au sel, au gel et dégel. Mais pour le joint utilisé avec du BFUP ce fléchissement disparaît. Ensuite l'échantillon BFUP a subi plusieurs tests de fatigue pour vérifier qu'il reste bien imperméable. C'est le cas car après 10 millions de cycles aucune fuite significative n'a été détectée. Finalement l'utilisation du BFUP dans les joints s'est avérée intéressante.

L'enduit Hydraulique Fibré Gravillonné (EHFG), un cousin du BFUP pour des chaussées à longue durée de vie

Ce nouveau matériau a été développé dans le cadre d'un projet international intitulé Long Life Pavement (LLP). Alors que la durée de vie d'une couche de roulement de chaussée traditionnelle à fort trafic est de 7 à 15 ans, une couche de roulement en BFUP devrait durer 30 à 40 ans. Ce revêtement routier est constitué d'une couche de base, d'une couche de liaison en enrobé bitumineux et d'une couche de roulement de 8mm en BFUP utilisant au moins 3% de fibres métalliques afin d'empêcher la macro-fissuration. La résistance de surface a été testée de façon concluante vis-à-vis de l'abrasion, de l'usure, du gel-dégel, des attaques acides.

Des chantiers expérimentaux coordonnés entre dix pays vont être réalisés pour conforter ces premiers résultats et développer les matériels de mise en œuvre.

Évaluation structurelle de poutres de ponts mixtes composites à matrice polymère -BFUP

Le projet présente un concept innovant de tablier de pont réalisé au moyen de poutres constituées d'un profilé fermé pultrudé en fibre de verre renforcé en partie inférieure par collage de composite unidirectionnel à fibres de verre ou fibres de carbone et surmontées en partie supérieure par une fine dalle en BFUP connectée aux poutres par collage et connecteurs. Le rôle du BFUP dans cette association est de reprendre les efforts de compression en partie supérieure de la poutre. L'objectif de ces essais est d'atteindre une haute performance pour un coût réduit. Les essais se sont avérés concluants et conformes aux calculs de conception.

*Synthèse de la Session 4 rédigée par
Julien JONAC et Hichem SLIMANI
Étudiants à Polytech Marseille*

SESSION 5

Les BFUP au service d'une nouvelle vie des ouvrages

Le renforcement parasismique de piles de pont, dont le ferrailage est insatisfaisant à la base, peut se faire par chemisage en BFUP qui améliore de façon très importante le confinement du fût de pile et les performances de ductilité de l'élément. La méthode consiste à purger le béton existant jusqu'à mise à nu des armatures, puis de couler un BFUP en place.

Une autre technique de réparation valorisant les BFUP concerne les canaux d'irrigation qui ont une forte dégradation due à l'abrasion des matériaux charriés. C'est le cas d'un tunnel d'irrigation pour une usine hydroélectrique qui a été réparé au Japon grâce à une 2nd peau en BFUP constituée d'éléments préfabriqués de 5cm d'épaisseur, dont un côté est lisse (pour l'écoulement des fluides), l'autre est rugueux (pour une bonne adhérence par rapport au béton initial), qui évite une réduction de la section de passage. Dans ce cas, le BFUP est allé plus loin qu'une simple réparation, car il a permis d'accroître la performance du tunnel par réduction de la rugosité.



Une utilisation moins connue est l'utilisation de BFUP dans le renfort de bâtiment. On a démontré qu'il a une

très bonne tenue au feu (ce qui l'avantage par rapport à des solutions en fibre de carbone ou renfort acier). Il est également efficace dans le renfort de poteaux, en particulier si la destination du bâtiment a changé et que des renforts sont nécessaires pour reprendre les nouvelles descentes de charge (*parking Perpignan*). La réparation a été effectuée en rabotant le poteau jusqu'aux armatures (environ 35mm) et en coulant du BFUP (en coffrage fermé, coulé de l'étage supérieur avec une pompe). On peut espérer par ce genre de renfort une augmentation de la capacité portante de l'ordre de 70%. Une autre possibilité de réhabilitation consiste à diminuer la section des poteaux pour avoir des poteaux plus élancés (*Musée d'Albi*).



Enfin des recherches sont en cours pour renforcer les tabliers à dalle orthotrope par une couche fine de BFUP étanche, dont la connexion pourrait se faire par soudage d'un treillis soudé sur la tôle. Au Japon, une technique similaire est déjà employée grâce à un collage de dalles BFUP sur des dalles orthotropes.

Recherches et développements en cours

Une étude sur les traitements thermiques modérés est en cours de développement. Elle permettra à terme de créer des outils simples de calcul des déformations différées et de retrait endogène (qui est très important dans le BFUP). Elle modifiera l'EC2-2 afin d'avoir une meilleure modélisation, et permettra l'augmentation des cadences de production pour les industriels grâce aux modèles numériques associés à ces traitements thermiques intermédiaires.

Une seconde étude concerne la modélisation numérique de la mise en œuvre des BFUP en fonction de la rhéologie du béton, de la quantité de fibres et des conditions de mise en œuvre. Cette recherche vise à permettre une optimisation des quantités de fibres et des conditions de mise en œuvre permettant à la fois de bonnes performances et une bonne ouvrabilité.

Durabilité et évolution *in situ* des caractéristiques d'un BFUP : retour d'expérience sur poutrelles dans un aéroréfrigérant

Les poutrelles BFUP de la centrale nucléaire de Cattenom, réalisées en 1996, sont le plus ancien exemple français de BFUP utilisé en ambiance très agressive : pluie continue, eau agressive chargée en sel, 35°C en partie haute, avec un fort risque de gel, ainsi qu'un taux d'humidité de 100%.

Des prélèvements ont été effectués en février 2008 sur deux poutrelles maintenues dans un état de flexion permanente et servant de témoins de durabilité vis-à-vis du reste de la poutraison.

L'observation de l'état des fibres et des fils adhérents, les mesures de résistance et de module d'Young, des essais de pénétration des chlorures, de carbonatation, de porosité, des observations au microscope électronique ainsi que des analyses chimiques, ont permis d'analyser l'état chimique et mécanique du matériau après dix ans d'exposition *in-situ*, et de comparer ses caractéristiques avec celles identifiées lors de sa fabrication. Ces mesures ont permis de conclure au très haut potentiel de durabilité de ces éléments, confirmant la pertinence d'emploi des BFUP dans des environnements très sévères.

Comportement à haute température

Le bilan des essais de comportement des BFUP à haute température réalisés sur des formulations spécifiques comportant des inclusions (généralement des fibres polypropylènes) indispensables pour éviter les problèmes d'écaillage. Ces essais montrent une chute de la résistance en compression de l'ordre de 10% à 50% à 600°C et de l'ordre de 80% à 800°C. La résistance en traction de la matrice cimentaire chute d'environ 40% à 150°C et 55% à 750°C. Les quelques essais réalisés dans le domaine post-fissuration indiquent qu'il n'y aurait plus de résistance en traction post-fissuration au-delà de 450°C.

Le module élastique baisse de 50 à 80% à 600°C.

Concernant le coefficient de dilatation thermique, les résultats varient en fonction du BFUP utilisé. Certaines formulations ont un coefficient de dilatation thermique qui s'annule et devient négatif à partir de 200°C. D'autres suivent à peu près la courbe Eurocode pour béton avec granulats siliceux. L'évolution de la masse volumique suit une courbe comparable à celle préconisée par les Eurocodes.

Concernant la conductivité thermique, les résultats montrent des résultats qui varient de 3 à 2 ou de 2,5 à 1,8 en fonction de T. Concernant la chaleur spécifique, les résultats montrent des valeurs avoisinant 900 J/kg/K avec des variations fonction des changements de phase, mais qui ne correspondent pas forcément aux pics observés sur des bétons classiques.

L'ensemble de ces travaux permet de donner des éléments pour prédimensionner un ouvrage en BFUP qui

fait l'objet de spécifications précises liées au risque incendie. Toutefois les différences obtenues suivant les divers BFUP montrent l'absolue nécessité pour valider un dimensionnement final au travers d'une modélisation numérique, de caractériser en température la formulation retenue pour l'exécution de la structure : conductivité thermique, chaleur spécifique, dilatation, résistance en compression, en traction, module d'Young....

Par ailleurs suivant la structure étudiée, la propension à l'écaillage doit être contrôlée par des essais sur des éléments représentatifs (en géométrie et en charge) de la structure réelle.

Conception des ponts à poutres en BFUP selon le règlement canadien

Au Canada, ainsi qu'au Etats-Unis, 75% des ponts en béton ont un problème de corrosion dû à la perméabilité excessive du tablier, et à l'usage intense de sels de déverglaçage. Le BFUP peut corriger ce problème. Son utilisation a comme conséquence, de concevoir plus efficacement une superstructure par réduction significative du nombre et de la taille des poutres. Ce qui entraîne donc une diminution du poids de la structure.

Efforts et acquis de recherche sur les BFUP depuis 2002 en vue de l'actualisation des recommandations de l'AFGC :

Les résultats d'essais sur éléments en BFUP, plus ou moins fibrés, armés ou non, précontraints ou non ont permis de mieux décrire les effets combinés des fibres et des armatures actives ou passives et de mieux cerner les conditions d'obtention d'une ductilité satisfaisante. Les validations à l'échelle 1 des capacités de diffusion d'efforts localisés ou de tenue en fatigue, associées à un retour d'expérience grandissant confortent à ce jour les principes des recommandations de conception mises au point en 2002. L'accumulation des résultats d'analyse microstructurale voire nanométrique des matériaux cimentaires, et de données quantifiées sur les paramètres de transfert des BFUP et leurs caractéristiques de résistance vis-à-vis des agressions tant physiques (incendie, gel, abrasion) que chimiques, a permis de mieux cerner les propriétés de durabilité exceptionnelles des BFUP et d'en contrôler l'obtention suivant les modulations de formulation.

Enfin, la quantification de l'impact environnemental des ouvrages et éléments en BFUP, tenant compte de leur cycle de vie et de leur aptitude au recyclage, conduit à mieux identifier l'intérêt des BFUP dans une démarche de développement durable.

Les Recommandations de l'AFGC sur les BFUP, dont la publication actualisée est prévue en 2010 intégreront l'ensemble de ces résultats

*Synthèse de la Session 5 rédigée par
Maxime GRAZIANI et Nans DELHOMME
Étudiants à Polytech Marseille*

SESSION 6

Nouvelles recommandations et réglementations

Jacques Resplendino et Joost Walraven ont chacun présenté les travaux et recherches effectués sur les BFUP respectivement par l'AFGC (Association Française de Génie Civil) et la *fib* (Fédération Internationale du Béton). La quantification du coefficient K en constitue un aspect crucial. Il est en effet le point de contrôle de l'orientation des fibres dans les BFUP suite à une épreuve de conformance réalisée dans les conditions réelles de la structure. Par exemple, un coefficient K de 1,24 traduit une orientation relativement isotrope des fibres, à l'inverse si K vaut 1,91 les fibres sont orientées de façon privilégiée dans une direction pas forcément cohérente par rapport aux efforts à reprendre. Le principe est de pouvoir déterminer les lois de comportement en situation réelle.

Les récentes recherches ont permis de faire évoluer les connaissances notamment sur les résistances au feu, au poinçonnement, à l'effort tranchant, à la traction. Les modifications des recommandations sur les BFUP ont été apportées sur les chapitres 1 à 3 des recommandations AFGC de 2002 : caractéristiques mécaniques, dimensionnement des structures (chapitre mis en cohérence par rapport aux Eurocodes), résistance au feu et au gel.

Il a été également décidé d'ajouter un chapitre 4 relatif au développement durable.

Alain Simon (Eiffage TP) a présenté l'actualisation du chapitre 1 sur les caractéristiques du matériau telles que le traitement thermique, la détermination de la résistance en compression et en traction, coefficient de Poisson, module d'Young, densité, fluage, et retrait qui sont les paramètres formant la carte d'identité d'un BFUP. Les recommandations AFGC distinguent deux types de structures : « minces » et « épaisses ». Cette nuance intervient sur le comportement en traction de l'élément, et plus précisément sur l'orientation des fibres et le caractère multi-fissurant du matériau. Il est également ajouté à ce chapitre des précisions sur les protocoles expérimentaux, sur les grandeurs à mesurer, et enfin sur les méthodes d'analyses des résultats. Il faut également préciser que les effets d'échelle ont une grande influence sur certains résultats obtenus.

Le chapitre 2 relatif au calcul des structures doit son actualisation principalement à la mise en application des Eurocodes depuis quelques années. Pierre Marchand a ainsi présenté certaines modifications concernant le phénomène d'écrouissage des BFUP (multifissuration avant rupture) mais aussi les critères ELS et ELU (effort tranchant).

La durabilité du BFUP est également une caractéristique importante de celui-ci. L'ensemble des recommandations AFGC se trouve dans le chapitre 3. Après avoir rappelé qu'un BFUP possède une grande durabilité due principalement à sa très faible porosité,

Myriam Carcasses (INSA Toulouse) a rendu compte des dernières recherches, avancées, et réalisations dans ce domaine. Les indicateurs pris en compte par l'AFGC sont la porosité à l'eau, la perméabilité à l'oxygène, le coefficient de diffusion des ions Cl^- , et la teneur en Portlandite. Il est à noter que la porométrie très fine des BFUP ainsi que leur grande résistance mécanique, sont à l'origine de leur excellent comportement aux cycles de gel-dégel. Enfin, en situation d'incendie, les formulations adaptées des BFUP sont incombustibles, ne contribuent pas à la propagation du feu, et ont fait l'objet de nombreuses études permettant de mieux appréhender le comportement de ces matériaux à haute température.

BFUP et développement durable

La deuxième partie de cette sixième session avait pour but de faire le bilan des données disponibles concernant les BFUP et de les regrouper dans un nouveau chapitre qui sera le quatrième des recommandations AFGC.

Pierre Marchand a présenté les aspects qualitatifs des facteurs environnementaux ; il nous rappelle en premier lieu qu'une tonne de BFUP possède une empreinte carbone deux à trois fois supérieure à celle d'un béton classique. C'est ainsi que l'utilisation d'un BFUP se révèle être intéressante seulement si l'on met en œuvre 2 à 3 fois moins de béton. Il faut noter que le développement durable vu sous l'angle des BFUP consiste surtout à pérenniser les ouvrages, et à effectuer des renforcements de structures. Il est également nécessaire d'étudier les possibilités de recyclages des BFUP.

Thierry Sedran (LCPC), sur la base des résultats obtenus au LCPC, a démontré qu'il est possible de récupérer une partie des granulats, après concassage et extraction des fibres par aimant. Le recyclage permet d'obtenir un sable 0/3 ainsi réutilisable soit dans un BFUP soit dans un Béton auto-plaçant, à la place d'un sable de rivière.

Jean-François Batoz (Lafarge) a également indiqué quelques éléments concernant la contribution des BFUP au développement durable. Bien qu'il faille une quantité de ciment beaucoup plus importante pour la réalisation d'un BFUP, il faut tenir compte surtout de la durabilité du matériau. Si l'on n'oublie pas que 80% de l'empreinte environnementale d'un bâtiment provient de son utilisation, l'emploi d'un béton classique possédant des caractéristiques de durabilité bien moindres peut être remise en cause, et ce, même pour une maison individuelle.

Enfin, Thorsten Stengel (Technische Universität München) a montré qu'un ouvrage en BFUP optimisé peut avoir une empreinte environnementale initiale fortement réduite, légèrement supérieure à celle d'un ouvrage en béton classique. L'optimisation a lieu sur le ciment (utilisation d'un autre type), les fibres, et le superplastifiant.

En conclusion, BFUP et développement durable peuvent bien s'accorder. À l'aube d'une période de prise de conscience environnementale générale, ces recommandations annoncent une ère nouvelle dans l'histoire de la construction.

*Synthèse de la Session 6 rédigée par
Rémi SPEDO et Marjory TURINAY
Étudiants à Polytech Marseille*

SESSION 7 : Le projet MuCEM

Bernard Imberton, Maître d'ouvrage a présenté les principaux axes du programme du MuCEM (Musée des civilisations Europe Méditerranée). Il s'agit de la création d'un musée sur 7 niveaux pour une enveloppe total de 130,2 millions d'Euros, situé sur le môle J4 et le Fort Saint-Jean. Il s'inscrit dans un projet global d'urbanisme où il est articulé avec un centre de conservation des ressources et un centre de recherche subaquatique. Ce projet se démarque par son utilisation large du BFUP dans la structure et l'habillage : résille, passerelle, planchers, poteaux arborescents. Ce projet s'est heurté à différents problèmes : l'intégration dans le site, un délai court (livraison fin 2012), un choix difficile à réaliser quant au choix des entreprises et la nécessité de fournir des ATEX (Avis Technique d'Expérimentation) en raison de l'aspect innovant du BFUP, notamment vis-à-vis du feu et des problématiques d'instabilité élastique (flambement).

La session s'est poursuivie par l'intervention de Jacques Portelatine (BE SICA) et de l'architecte du projet Rudy Ricciotti. Le premier défi est de faire en sorte que le MuCEM se démarque du site à cause de l'impossibilité de l'intégrer dans celui-ci. En est ressorti un projet minéral où l'impératif est la réduction des masses et de la visibilité de la structure. Dès le début du concours M. Ricciotti a choisi de tirer le meilleur parti architectural du BFUP. Néanmoins le BFUP étant un matériau spécial, que l'on découvre au fur et à mesure, certains problèmes se sont posés, notamment vis-à-vis du comportement au séisme, le futur zonage sismique ayant modifié les calculs de contreventement. Ainsi de grandes modifications ont dû être apportées à la structure à l'issue de l'Avant Projet Détaillé. Le contreventement devait être assuré au départ par les poteaux arborescents de façade mais au final c'est l'utilisation de croix de Saint André qui aura été retenue.

L'utilisation de BFUP pour des éléments structurels comme des poutres de grande portée ou des poteaux a permis d'importantes optimisations : la disparition des faux plafonds permet d'implanter des dispositifs acoustiques, d'éclairage et de désenfumage modulable entre les poutres. Par ailleurs la présence de poteaux arborescents nécessite la création d'une douzaine de moules interchangeables. Au niveau de l'habillage le maintien des résilles en BFUP est réalisé à l'aide de joints de cardan à quatre doigts couplés à des rondelles

en polyuréthane qui empêchent la transmission des moments dans la structure.

La parole à ensuite été prise par Philippe Rivillon et Jacques Portelatine pour l'expérimentation et la modélisation des poteaux droits et en forme de Y sous l'action d'un chargement vertical excentré. L'utilisation pour ceux-ci d'un procédé innovant proposé par Rudy Ricciotti résidant dans l'association de la technologie du BFUP et de la pré-contrainte axiale a nécessité une justification de sa faisabilité et de la validité des paramètres de calcul.

L'expérimentation a été réalisée au CSTB et modélisée par le Bureau d'études SICA. Trois poteaux droits et trois poteaux en Y coulés avec les BFUP en provenance d'EIFAGE, LAFARGE et VICAT ont été testés. Les paramètres contrôlés ont été la déformation et les déplacements, provoqués par un chargement vertical excentré de 200 mm, mené jusqu'à la ruine de l'élément : 400kN pour les poteaux droits et 200kN pour ceux en Y. A particulièrement été observée une rotation en tête de poteaux due à leur non-symétrie.

Florence Nicolas a présenté les calculs réalisés à l'aide du logiciel SCIA ESA PT en considérant la non-linéarité géométrique et la loi de comportement non linéaire du matériau en traction. Le comportement des poteaux a globalement été confirmé mais les charges de ruptures trouvées se sont avérées inférieures à celles obtenues lors des essais. Les essais ont donc prouvé la faisabilité des poteaux et la cohérence des méthodes de calculs.

Les questions de fin de session ont principalement porté sur la modélisation des poteaux, sur l'effet de la précontrainte lorsque les angles sont importants et sur la modélisation par éléments finis. A ce sujet, afin de diminuer la lourdeur des calculs, des sections rectangulaires d'inertie équivalente aux sections réelles ont été choisies, au détriment d'une équivalence correcte en inertie de torsion. A alors été soulevé le problème de la différence entre le corps d'épreuve et le modèle retenu, qui a été justifié par la difficulté de la modélisation linéaire lorsque l'on est proche des ELU. Cependant, les règles appliquées pour le calcul préliminaire sont celles utilisées en construction métallique ce qui implique une très large marge.

Lors de l'exposé de clôture François Toutlemonde et Jacques Resplendino ont insisté sur le nombre important d'applications possibles. « *Le marché est réduit, mais les applications pertinentes existent* » : structures précontraintes, poutres, arcs, dalles, pont, passerelles et bâtiments exceptionnels, mais aussi d'autres plus imprévues comme les éléments minces et résistants de type résille, l'utilisation en réparation, renforcement, protection de structure. La nécessité de travailler sur les performances au jeune âge, l'interaction avec des armatures, sur la conception des connexions entre éléments préfabriqués est évidente. Ils ont également rappelé qu'il est indispensable que les architectes et les ingénieurs sortent de leur schéma traditionnel de pensée pour arriver à concevoir des

structures adaptées aux spécificités du matériau. Pour cela « *il est impératif que des BET d'envergure spécialisent quelques ingénieurs sur les spécificités des matériaux d'avenir* ». Les actuelles difficultés liées à l'innovation doivent être résolues par des Maîtres d'Ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises forts et bien entourés des compétences nécessaires, et de dispositions permettant de circonscrire le risque pour les compagnies d'assurance notamment en bâtiment (démarche d'ATEX, mise en place d'un plan de contrôle et de validation dans toutes les phases d'élaboration des projets).

Le mot de la fin de BFUP'2009 est revenu à M. Jean-Marc Tanis président de l'AFGC : « *Il faut aller de l'avant avec enthousiasme et professionnalisme* »

*Synthèse de la session 7 rédigée par
Guillaume BURCKLÉ et Anthony RAPPA,
Etudiants à Polytech Marseille*

