

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

SPECIAL BFUP. ETAT DE L'ART. NORMES. PROJET BADIFOPS : ETUDES ET ADHERENCE. FLEXION PLAQUES TRIANGULAIRES. PASSERELLE DU CANNET DES MAURES. JOINTS DE CLAVETAGE. PARALUMES TUNNEL DU VIEUX PORT A MARSEILLE. PROJET BIOSAV. APPLICATIONS ARCHITECTONQUES. REHABILITATION DES VIADUCS DE CHILLON. REPARATION DU PONT D'ILLZACH. REPARATION DU PONT DE HAMMERSMITH. INVESTIGATIONS A 10 ANS A BOURG-LES-VALENCE

N°920 DÉCEMBRE 2015



PONT DE LA
RÉPUBLIQUE
À MONTPELLIER
© LISA RICCIOTTI

LES TRAVAUX
PUBLICS FEDÉRATION
NATIONALE

**Ensemble,
allons plus loin !**



Solide et fiable, le Groupe SMA est le premier assureur des acteurs du BTP ; ses experts vous accompagnent à chaque instant grâce à des solutions adaptées à vos enjeux.

L'écoute, la proximité et la réactivité sont les atouts qui nous permettent de répondre exactement à vos besoins.

Chaque jour, nous développons des solutions innovantes pour, ensemble, aller plus loin.



SMA BTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

www.groupe-sma.fr

SMA

SMA VIE

SMA ASSURANCES

SMA COURTAGE

SMA VIE COURTAGE

Directeur de la publication
Bruno Cavagné**Directeur délégué**
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@intp.fr**Comité de rédaction**
Hélène Abel (Ingerop), David
Berthier (Vinci Construction France),
Sami Bounatirou (Bouygues TP),
Jean-Bernard Datry (Setec), Philippe
Gotteland (Fntp), Jean-Christophe
Goux-Reverchon (Fntp), Laurent
Guilbaud (Saipem), Ziad Hajar
(Eiffage TP), Florent Imbert
(Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis),
Stéphane Monleau (Soletanche Bachy),
Jacques Robert (Arcadis), Claude
Servant (Eiffage TP), Philippe Vion
(Systra), Michel Morgenthaler (Fntp)**Pilotage de ce numéro spécial**
Ziad Hajar (Eiffage TP)**A collaboré à la rédaction**
Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente**
Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.frFrance (9 numéros) : 190 € TTC
International (9 numéros) : 240 €
Enseignants (9 numéros) : 75 €
Étudiants (9 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)**Publicité**
Rive Média
2, rue du Roule - 75001 Paris
Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44
contact@rive-media.fr
www.rive-media.fr**Directeurs de clientèle**
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.frCarine Reininger - LD 01 42 21 89 05
c.reininger@rive-media.fr**Site internet :** www.revue-travaux.com**Édition déléguée**
Com'1 évidence
Siège :
101, avenue des Champs-Élysées
75008 PARIS
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.comLa revue Travaux s'attache, pour l'information
de ses lecteurs, à permettre l'expression de
toutes les opinions scientifiques et techniques.
Mais les articles sont publiés sous la
responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur
se réserve le droit de refuser toute insertion,
jugée contraire aux intérêts de la publication.Tous droits de reproduction, adaptation, totale
ou partielle, France et étranger, sous quelque
forme que ce soit, sont expressément réservés
(copyright by Travaux). Ouvrage protégé ;
photocopie interdite, même partielle
(loi du 11 mars 1957), qui constituerait
contrefaçon (code pénal, article 425).Editions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0116 T 80259
ISSN 0041-1906

LES BFUP ENTRENT EN MODE MAJEUR



© DR

Dix-huit ans... Après les grandes découvertes du nouveau-né, les apprentissages de l'enfance et les promesses de la jeunesse, c'est l'âge d'assumer vis-à-vis des siens ses responsabilités de majeur. Dix-huit ans, c'est donc l'âge pour le BFUP de prendre toute sa place dans la famille des bétons !

Car 18 ans, c'est l'âge des premières réalisations françaises, en particulier de la démonstration à grande échelle qu'ont constituée les poutrelles de l'aéroréfrigérant de Cattenom. Rares encore, les investigations sur les plus anciens ouvrages en BFUP sont précieuses pour attester des capacités de durabilité d'un matériau voulu pour défier l'avenir.

Certains palabreront sur l'âge vrai du BFUP et son origine : désir d'étendre la famille béton du côté de la résistance ou de la ductilité, paternité(s) multiple(s), annonce officielle en 1995 à l'ACI, émergence du sigle, fondation du groupe de l'AFGC en 1999... Quoi qu'il en soit, l'année 2015 atteste, par la parution des normes françaises de conception et de produit, de l'entrée des BFUP dans le domaine des techniques traditionnelles... où la jeunesse rejoint la sagesse !

À 18 ans, le BFUP bouscule quand même les règles traditionnelles de la famille béton. Il n'est pas fragile même s'il n'est pas armé, la qualité de son exécution fait partie intégrante de sa conformité... Défini par ses ultra-hautes performances, de résistance ou de durabilité, il pousse dans leurs retranchements les normes et usages parfois trop ajustés aux bétons de papa... et nous force à une compréhension renouvelée et intégrée de la chimie des matériaux cimentaires, de la mécanique des hydrates et des interactions fibres-matrice, de la structuration des capacités résistantes du matériau par son processus de mise en place, de la contractualisation de ses propriétés et de l'économie de son usage dans des logiques constructives où il demande à être associé de façon optimale et valorisé à hauteur de ses capacités.

Dix-huit ans donc, âge de tous les possibles. En France et depuis qu'il est tout jeune, le cher BFUP doit se voir : chouchou de l'architecture des façades, exhibé dans l'élancement des structures précontraintes et l'allègement des produits préfabriqués, il est support d'art nouveau. Et cette révolution technique et esthétique a peut-être même conquis le cœur de l'Amérique. Mais chez nos voisins suisses, il est plutôt manteau technique pour maintenir en forme les ouvrages agressés par l'hiver alpin. Aux États-Unis, c'est le discret maillon fort de la stratégie rénovation des infrastructures routières. En Europe du Nord, il est même « passager clandestin » de la construction métallique pour assembler les structures tubulaires offshore. Quel sera donc son avenir ?

Dans ce numéro de *Travaux*, mêlant recherches et réalisations, le BFUP majeur rentre par la grande porte pour vous aider à l'imaginer demain. Bienvenue à lui, il gagne à être connu !

FRANÇOIS TOUTLEMONDE
IFSTAR
PRÉSIDENT DU CHAPITRE ACI DE PARIS**LISTE DES ANNONCEURS :** SMA BTP, 2^e DE COUVERTURE - SETEC, P.11 - CERMIX, P.55 - CNETP, P.55 - ACI-PARIS, P.56 - VICAT, 4^e DE COUVERTURE

Photo couverture : Pont de la République à Montpellier - premier pont au monde entièrement en BFUP - ingénierie Lamoureux & Ricciotti, architecte Rudy Ricciotti, entreprise Fondeville, maîtrise d'ouvrage SERM.



SPÉCIAL BFUP

PROJET BICSAW © EIFFAGE



004 ALBUM

006 **ENTRETIEN AVEC JACQUES RESPLENDINO**
PLUS QU'UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE BÉTONS

012 **STRUCTURES EN BÉTONS FIBRÉS
À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES
(BFUP)**
ÉTAT DE L'ART ET PERSPECTIVES

020 **LA NOUVELLE NORME FRANÇAISE DE
PRODUIT SUR LES BFUP (NF P 18-470)**

025 **NORME NF P18-710 POUR LE CALCUL
DES STRUCTURES EN BFUP**

030 **EMPLOI STRUCTURAL DES BFUP
EN GÉNIE PARASISMIQUE**
RÉFLEXIONS ET ÉTUDE DE CAS

039 **ANCRAGE DES ARMATURES DE BÉTON
ARMÉ DANS LE BFUP**
JUSTIFICATION DES RÈGLES DE CALCUL

044 **RUPTURE EN FLEXION DE PLAQUES
TRIANGULAIRES EN BFUP**
INVESTIGATION EXPÉRIMENTALE, ANALYSE
DES MÉCANISMES ET DE LEUR DUCTILITÉ

050 **LA PASSERELLE
DU CANNET DES MAURES**

057 **RÉHABILITATION D'INFRASTRUCTURES**
LE POINT SUR LES JOINTS DE CLAVETAGE
EN BFUP

062 **DES PARALUMES EN BFUP**
À L'ENTRÉE DU TUNNEL DU VIEUX PORT
À MARSEILLE

068 **COQUES ET RÉSILLES EN BSI®**
HABILLENENT L'USINE D'ÉPURATION
SEINE AVAL
PROJET BIOSAV

074 **APPLICATIONS ARCHITECTONIQUES
EN BFUP**
UNE PALETTE DE SOLUTIONS INFINIE

080 **ÉLÉMENTS ARCHITECTONIQUES
EN BSI**

086 **RÉHABILITATION**
45 MM DE BFUP POUR RENFORCER
LE COMPORTEMENT STRUCTURAL
DES VIADUCS DE CHILLON

091 **RÉPARATION DU PONT D'ILLZACH
PAR LE PROCÉDÉ ORTHODALLE**
SUIVI DE L'ÉVOLUTION DE L'OUVRAGE

100 **HAMMERSMITH FLYOVER**
CHIRURGIE À CŒUR OUVERT

106 **INVESTIGATIONS À 10 ANS**
SUR LE MATÉRIAU DES OUVRAGES
EN BFUP DE BOURG-LES-VALENCE



MÉMORIAL INTERNATIONAL DE NOTRE DAME DE LORETTE UN ANNEAU MONUMENTAL EN BFUP

Ce mémorial est un ouvrage exceptionnel en BFUP, conçu par l'architecte Philippe Prost et construit par Eiffage sous maîtrise d'ouvrage de la région Nord-Pas-de-Calais. L'ouvrage est un anneau semi-elliptique de 328 m, composé de voussoirs préfabriqués en BSI® noir.

Les voussoirs courants à parois minces (ép. 4 cm), reposent sur des longrines, tandis que la partie en porte-à-faux, de 125 m de longueur, est réalisée à l'aide de voussoirs renforcés à joints conjugués collés assemblés par précontrainte. D'une grande qualité architecturale qui a valu à Philippe Prost le prix de l'Équerre d'Argent en 2014, cet ouvrage est aussi une prouesse technique, démontrant les possibilités offertes par le BFUP pour concevoir et réaliser des structures de forme complexe et d'une grande finesse.

(cf. N°911 TRAVAUX - déc. 2014).



© KARINE WARNY

PLUS QU'UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE BÉTONS

LES PROGRÈS DANS LE DOMAINE DES ADJUVANTS ET DES FORMULATIONS ONT CONDUIT À UNE ÉVOLUTION SPECTACULAIRE DES BÉTONS. À PARTIR DES BÉTONS COURANTS DE 30 MPA, LA GAMME S'EST ÉLARGIE AUX BÉTONS À HAUTES ET ULTRA HAUTES PERFORMANCES (BHP ET BHUP).

ENTRETIEN AVEC JACQUES RESPLENDINO, DIRECTEUR DE SETEC TPI SUD-EST.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1- Jacques Resplendino, directeur de Setec Tpi Sud-Est.

L'évolution a franchi un cap supplémentaire avec les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP) qui se distinguent notamment par leur résistance en compression supérieure à 150 MPa. Ce que nous explique Jacques Resplendino, qui en retrace l'historique et met en évidence les difficultés que présentait, en l'absence de normes dont la publication est d'ailleurs imminente, leur caractère innovant. C'est un sujet qu'il maîtrise parfaitement puisqu'il anime depuis 2000, au sein de l'Afgc, le groupe de travail « BFUP » et qu'il a été impliqué en tant que maître d'œuvre ou assistant maître d'ouvrage dans plusieurs ouvrages emblématiques : PS de Bourg-lès-Valence, ouvrages de Saint-Pierre-la-Cour, PS34 sur A51, le MuCEM⁽¹⁾ à Marseille et le stade Jean Bouin à Paris.

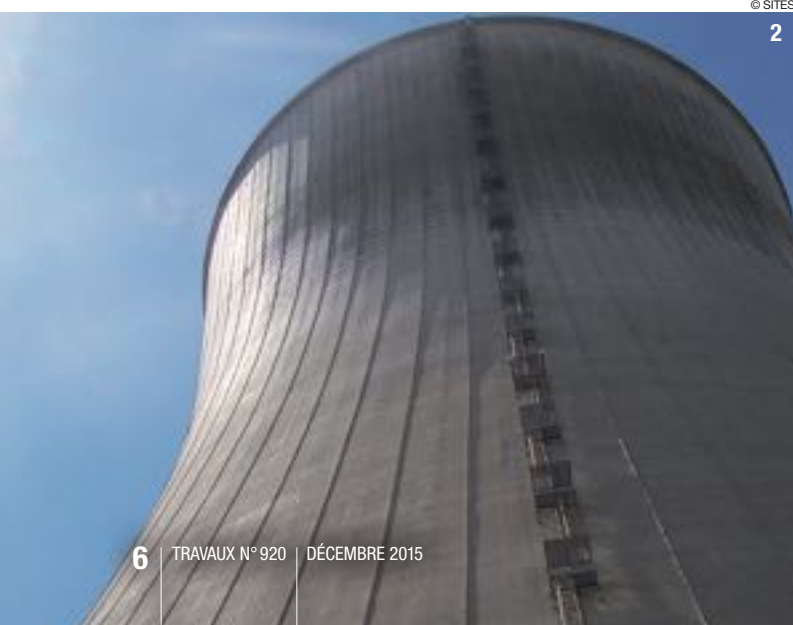
En quoi les bétons fibrés à ultra-hautes performances se distinguent-ils fondamentalement des bétons classiques ou des BHP et des BUHP ?

Les bétons fibrés à ultra-hautes performances sont des bétons dont la résistance à la compression est supérieure à 130-150 MPa et dont la résistance

en traction directe est supérieure à 6 MPa.

Utilisés dans ces applications structurales, ces bétons sont additionnés de fibres métalliques, en vue d'obtenir un comportement ductile en compression et en traction et de s'affranchir de l'usage de cages d'armatures passives traditionnelles. Leur composition et

© MARC MONTAGNON



© SITES

2



© MARC MONTAGNON

3

leur fort dosage en liant leur procurent une grande compacité qui leur garantit une exceptionnelle durabilité.

Quels sont les principes de base sur lesquels repose la conception des BFUP ?

Les bétons classiques présentent un rapport eau sur liant de l'ordre de 0,4 à 0,6. Pour obtenir un béton à haute performance (BHP), ce rapport descend aux alentours de 0,3 - 0,35.

Il est possible d'atteindre ce seuil par l'ajout de superplastifiants qui déflocculent les grains de ciment tout en favorisant la dispersion du liant, c'est-à-dire l'hydratation du ciment.

Dans les BHP, on utilise, ou pas, des ultra fines (généralement des fumées de silice) qui permettent un resserrement du fuseau granulaire.

La grande différence entre un BHP classique et un BHP avec fumées de silice se situe sur les effets différés : le second « bougera » beaucoup moins dans le temps.

Pour obtenir un BFUP, on diminue encore le rapport E/C (eau sur liant) jusqu'à des valeurs inférieures à 0,25 (de l'ordre de 0,16 à 0,2), abaissement obtenu généralement par une augmentation importante de la quantité de liant, et on ajoute systématiquement des ultra fines (fumées de silices - environ 20% de la masse du ciment). Le béton ainsi obtenu est extrêmement compact, ce qui explique sa résistance à la compression et sa remarquable durabilité. Avec le BFUP, un soin tout particulier est porté aux granulats dont la taille est très réduite et dont la résistance mécanique doit être élevée pour qu'ils ne soient pas le point faible de la composition.

Les fumées de silice ajoutées représentent environ 20% de la masse

JACQUES RESPLENDINO : UNE CARRIÈRE CONSACRÉE AUX OUVRAGES D'ART... ET AUX BFUP

Diplômé de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État et Ingénieur en chef des TPE, Jacques Resplendino a consacré l'essentiel de sa carrière aux ouvrages d'art au sein du réseau scientifique et technique du ministère de l'Équipement et du Développement durable.

De 1986 à 1989, il est chargé d'études à la Division Ouvrages d'Art du Cete de l'Ouest à Nantes.

Entre 1989 et 1992, il est chargé d'études à la Division des Grands Ouvrages du Centre technique des Ouvrages d'Art du Setra à Paris avant d'occuper, entre 1992 et 2000, le poste de chef de projets à la Division Ouvrages d'Art du Cete Méditerranée à Aix en Provence.

Il rejoint en 2000 le Cete de Lyon en tant qu'ingénieur divisionnaire des TPE, chef de la Division des Ouvrages d'Art, poste qu'il occupe jusqu'en 2006. Puis il est affecté, en 2007, en tant qu'ingénieur en chef des TPE, comme chargé de mission auprès de la toute nouvelle DIR Méditerranée à Marseille.

Parallèlement, il anime le groupe de travail Afgc-Setra sur les Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP) depuis 2001.

Depuis 2010, il est directeur sud-est de Setec Tpi.

2- Les aéroréfri-gérants ont été le cadre des premières applications industrielles des BFUP.

3- Le stade Jean Bouin à Paris.

4- Détail de la résille d'enveloppe et de couverture du stade Jean Bouin : seul le BFUP a pu permettre à Rudy Ricciotti un tel geste architectural.

5- Panneaux d'habillage en BFUP blanc de la fondation Louis Vuitton à Paris.

du ciment. Le béton ainsi obtenu est extrêmement compact ce qui explique sa résistance à la compression et sa remarquable durabilité.

On obtient ainsi des résistances à la compression supérieures à 150 MPa. Mais le matériau présente alors un comportement fragile en compression. Pour retrouver de la ductilité à la compression, on ajoute des fibres métalliques.

Les fibres ont une longueur de 12 à 20 mm et un diamètre de 0,2 à 0,3 mm et sont incorporées à un taux de l'ordre de 2 à 3% du volume qui peut monter jusqu'à 10% en fonction des besoins de performances recherchées en traction pure.

Le fait d'obtenir cette ductilité procure au matériau une résistance en trac-

tion tout à fait intéressante qui permet éventuellement de se passer d'armatures passives ou, plus précisément, de se passer des cages traditionnelles d'armature : les aciers de renfort actifs ou passifs éventuels sont limités aux efforts principaux agissant sur les sections de grande dimension.

Pour garantir leur durabilité, il est absolument indispensable que les fibres ne se corrodent pas comme dans un béton armé classique.

Les phénomènes de dégradation que l'on observe dans un béton classique ne se produisent pas car le matériau est très fermé.

Certaines fibres émergentes en surface peuvent se corroder mais le phénomène ne provoque pas de cycles d'éclatement du béton environnant et de progression de la corrosion comme dans un béton classique. Seules quelques traces de rouille peuvent apparaître en surface ce qui peut être esthétiquement gênant dans le cas de béton de teinte claire. Pour pallier ce problème esthétique on peut :

→ Travailler sur la formulation et la peau de coffrage pour limiter très fortement l'émergence de fibres en surface ;

→ Opter pour un béton à teinte foncée plutôt qu'un béton à teinte claire ;

→ Si on choisit un béton très clair (béton blanc), on peut alors recourir à des fibres inox.

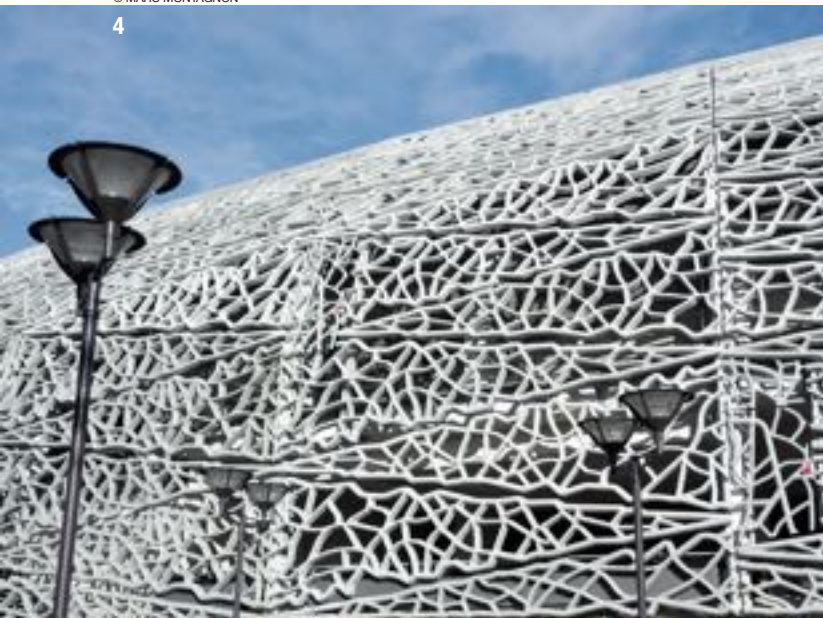
Comment les BFUP ont-ils démarré en France ?

En France, les BFUP ont démarré sous l'égide de Pierre Richard, directeur technique de Bouygues dans le cadre de la technologie des Bétons de Poudres Réactives dite BPR.

L'objectif était d'obtenir un béton extrêmement résistant. ▶

© MARC MONTAGNON

4



© MARC MONTAGNON

5





6 © JACQUES RESPLENDINO

Ses recherches l'ont mené à un béton de 800 MPa de résistance avant de s'arrêter sur une formulation plus économique se situant autour de 200 MPa.

Le concept a été ensuite optimisé au centre de recherche Lafarge de l'Isle- d'Abeau pour aboutir au Ductal[®], premier BFUP commercialisé.

Cette technologie est diffusée tant en Europe de l'Ouest, qu'en Asie (Japon), en Australie et aux États-Unis. Elle se développe dans tous les domaines tant au niveau des applications structurelles d'ouvrages d'art et de bâtiment que dans des applications non structurelles d'habillage de structures, de mobiliers urbains et/ou d'objet de décoration et de design.

À la fin des années 90, sous l'impulsion de Gérard Birelli, ingénieur à EDF, les BFUP sont sortis du laboratoire pour leur première application industrielle sous forme de poutres dans les corps d'échange des aérorefrigérants

des centrales nucléaires de Cattenom et Civaux.

Eiffage avec l'aide du cimentier Sika a développé un BFUP concurrent du Ductal[®], le Ceracem/BSI[®].

Les investigations menées en 2000 et 2008 sur des poutres témoins chargées en flexion dans un aérorefrigérant de la centrale de Cattenom ont permis de confirmer l'excellente durabilité du BFUP placé dans des conditions extrêmement agressives.

Dans les années 2000, le cimentier Vicat associé au groupe Vinci a développé un troisième BFUP : le BCV[®]. Dans les années 2000, plusieurs pays se sont lancés dans la recherche sur les BFUP.

Les Japonais très actifs ont publié des recommandations en 2004.

Ils ont réalisé plusieurs ouvrages remarquables (passerelles piétons, ponts routiers et ferroviaires) et sont actuellement en train de réaliser d'importantes applications structurelles

6- Le MuCEM de Marseille, dû à l'architecte Rudy Ricciotti.

7- La dentelle de BFUP en superstructure du MuCEM de Marseille.

8- Application structurelle du BFUP : la passerelle Seonuy à Séoul, en Corée du Sud.

9- Application de BFUP en résille - le Cerib (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton) à Épernon.

10- L'escalier en BFUP du siège de Lafarge Cement à Birmingham.

(ouvrages aéroportuaires en site maritime).

En Australie, une activité significative se développe axée sur la réalisation d'ouvrages d'art et l'utilisation du matériau dans des boucliers de protection contre les explosions.

Les Allemands ont réalisé à partir de 2005 un important programme de recherche (11 M€) sur 6 ans qui a mobilisé plusieurs universités sous le pilotage de l'université de Kassel.

Les Suisses sont actuellement très actifs notamment au travers d'utilisation de BFUP en renforcement de dalles en béton armé d'ouvrages existants.

Comment les BFUP, produits innovants et donc inconnus, ont-ils pu être introduits sur un marché de la construction très dépendant du respect de normes ?

C'est toute l'aventure du groupe de travail BFUP que j'anime au sein de Afgc.

© JACQUES RESPLENDINO

7



© VSL-BOUYGUES

8



Il a démarré en 1998 afin de mettre au point les premières recommandations d'utilisation.

En effet, en l'absence d'armatures dans le matériau, pour pouvoir dimensionner une structure, il fallait malgré tout s'appuyer sur des textes, d'où la création initiale du groupe de travail pour justifier auprès d'un maître d'ouvrage l'utilisation d'un matériau qui s'appelle béton et dans lequel les aciers passifs sont supprimés.

Comme la conception de structures en béton sans armatures sort du domaine d'application des règlements de calcul, l'Afgc a rédigé, en 2002, les premières recommandations au monde qui proposaient des règles de calculs spécifiques.

Ces recommandations ont été publiées en anglais et en français et ont connu un retentissement énorme à l'international notamment au Japon et aux États-Unis, en Australie et en Europe. Les Japonais ont publié leurs propres recommandations seulement deux ans plus tard, en 2004.

Suite à cette publication, le groupe Afgc a perduré avec la volonté de favoriser les échanges sur les retours d'expérience - les REX - et également, à partir de 2008/2009, de mettre les recommandations en concordance avec les Eurocodes.

L'amélioration de nos connaissances sur le matériau, les retours d'expériences accumulées, notamment sur les conditions de mise en œuvre, et la nécessité de rendre les principes de dimensionnement compatibles avec l'Eurocode 2, nous ont amenés à élaborer une mise à jour des recommandations Afgc qui a été diffusée lors du colloque international d'octobre 2013 à Marseille. L'objectif du colloque était de faire le point sur les compléments

INNOVATION ET ATEEx

Créée à l'initiative du Cstb avec les contrôleurs techniques, l'ATEEx est une procédure rapide d'évaluation technique formulée par un groupe d'experts sur tout produit, procédé ou équipement ne faisant pas encore l'objet d'un Avis Technique

En évaluant les premières utilisations d'un procédé innovant, l'ATEEx facilite l'intégration des expérimentations dans la construction, favorise l'identification des risques et leur prévention en permettant aux assureurs de les prendre en compte en connaissance de cause et de manière équilibrée et incite les maîtres d'ouvrage à favoriser l'expérimentation.

L'ATEEx peut concerner aussi bien la phase de conception d'un produit que la phase d'exécution sur chantier.

d'expérience acquise dans la connaissance et l'utilisation des BFUP (conception de structures, d'éléments et d'ouvrages ; réalisation industrielle ; applications à grande échelle).

Les retours d'expérience que vous avez évoqués concernaient quels types de réalisations ?

Suite à la réalisation des aéroréfrigérants de Cattenom, une réalisation importante sera ensuite la construction en BSI® des ponts de la déviation de Bourg-lès-Valence, premiers ponts routiers au monde construits en BFUP. La conception de ces ouvrages s'inscrivait alors dans le cadre de la Charte innovation Ouvrages d'art du Setra, dont l'objet était de promouvoir l'utilisation de nouvelles techniques ou nouveaux matériaux. Leurs tabliers sont constitués de poutres préfabriquées en BFUP dépourvues d'armatures passives.

Ce chantier, par la réalisation des très nombreux essais qui y ont été pratiqués, a servi d'expérimentation

in situ au groupe de travail BFUP qui a alors pu mettre au point les premières « Recommandations Afgc » de 2002. Il faut noter également quelques autres réalisations intéressantes : le passage supérieur PS34 en 22 voussoirs préfabriqués en BCV® sur l'A51, un aqueduc de 27 m de longueur en éléments préfabriqués précontraints en BSI®/Ceracem sur le lot 18 de la Ligne à Grande Vitesse Est (LGV Est), la couverture de la gare de péage du viaduc de Millau en BSI®, structure constituée de 53 voussoirs préfabriqués collés.

À côté des ouvrages de génie civil, des réalisations architecturales ont-elles pu bénéficier des avantages techniques que procurent les BFUP ?

Sur le terrain, nous étions déjà très impliqués, dès 2005, dans des réalisations concrètes telles que le MuCEM, de Marseille, par exemple, pour lequel j'ai été assistant au maître d'ouvrage. J'ai également participé en 2008 - 2009 aux études de conception ini-

tiale (AVP - PRO) du stade Jean Bouin en tant qu'assistant Maître d'Ouvrage, pour la Ville de Paris.

Nous avons également travaillé sur la réalisation de paralumes en BFUP à l'entrée du tunnel sur le Vieux Port à Marseille, dont nous avons assuré la maîtrise d'œuvre complète depuis les études amont jusqu'à la réalisation. Sans oublier la fondation Louis Vuitton, à Paris, pour laquelle Setec Bâtiment a assuré la maîtrise d'œuvre et qui est revêtu d'éléments d'habillage en BFUP blanc réalisés par Bonna Sabla.

Comment le groupe de travail est-il passé de la notion de recommandations à celle de normes ?

La décision a été prise en décembre 2012, par l'ensemble des partenaires du groupe, de se lancer dans un travail de rédaction de normes.

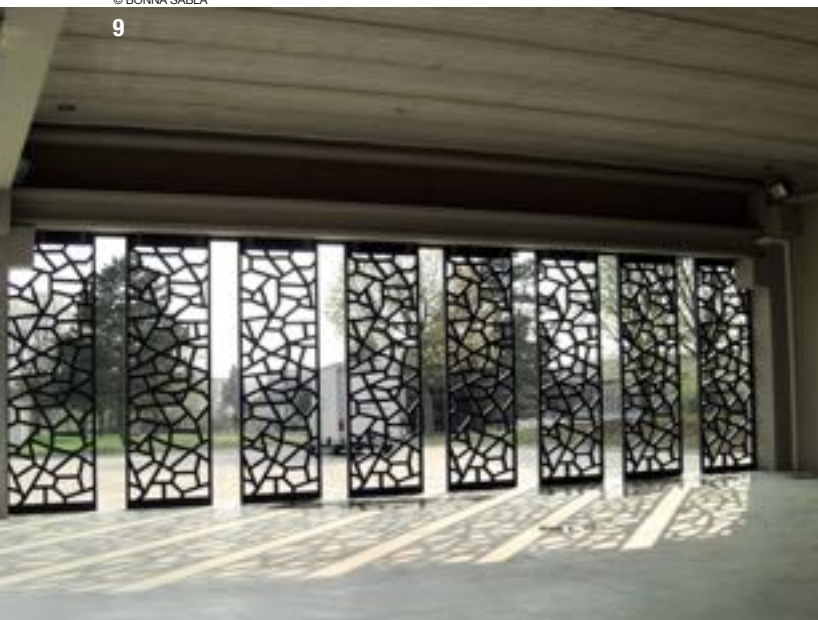
Hors de la norme, il existe en France des démarches innovantes qui peuvent être fructueuses si elles s'appuient par exemple sur les ATEEx, les Appréciations Techniques d'Expérimentation, des procédures que l'on a mises en œuvre notamment pour le MuCEM de Marseille ou le stade Jean Bouin à Paris, pilotées par le CSTB, pour justifier la mise en œuvre de matériaux innovants. Mais il devenait nécessaire de dépasser le stade des ATEEx. Compte tenu de l'expérience acquise par la profession dans le domaine, est intervenue la décision de transformer les recommandations en normes.

À partir de 2013, nous sommes donc passés à la rédaction de normes dont la parution de deux d'entre elles est imminente :

- La première sur le matériau BFUP proprement dit ;
- La deuxième sur les calculs. ▷

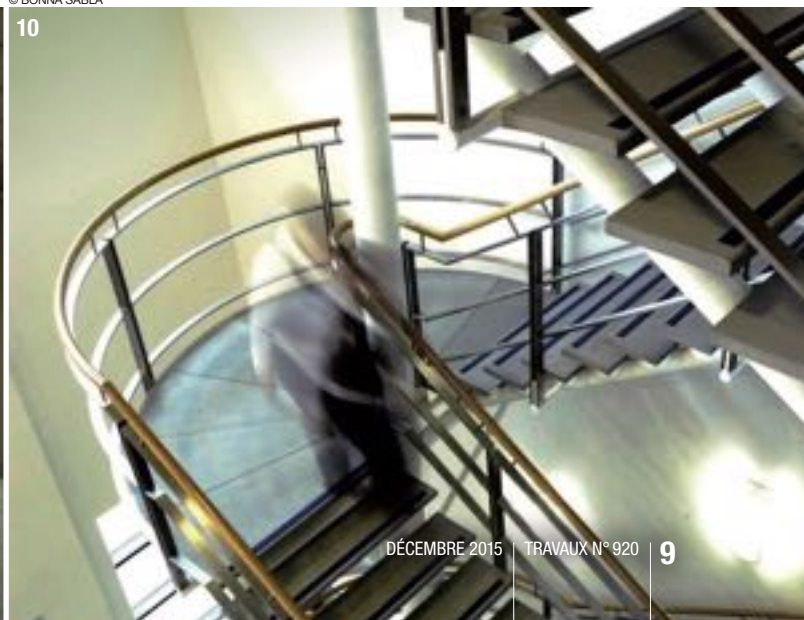
© BONNA SABLA

9



© BONNA SABLA

10



Ces deux normes prennent en compte les évolutions les plus récentes relatives aux BFUP.

Les premières recommandations s'intéressaient exclusivement aux BFUP structurels, sur la base de la préoccupation principale de justifier auprès d'un maître d'ouvrage l'utilisation d'un matériau sans acier passif, avec ses caractéristiques et ses performances : traction portée par les fibres, validation de leur bonne mise en œuvre et tous les essais afférents.

La norme matériau qui va être publiée va plus loin : elle concerne les BFUP structurels mais également les BFUP non structurels, très utilisés dans le bâtiment, que ce soit en parements ou pour des choix esthétiques, ce qui va contribuer à élargir leur spectre d'emploi.

En revanche, la norme « Calcul » est calée exclusivement sur les BFUP structurels, sachant que les BFUP non structurels peuvent entrer dans le cadre d'essais de produits industrialisés classiques. Cette norme est une annexe nationale aux normes Eurocodes 2.

Ces deux textes ont été soumis à enquête et sont en cours de validation sous l'égide de l'AFNOR.

Nous avons en préparation une troisième norme sur l'exécution qui sera mise au point sur la base des normes sur les bétons classiques actuellement en vigueur avec la même démarche en trois phases au niveau du produit : fabrication, calcul, exécution.

Par qui ces normes ont-elles été rédigées ?

La norme matériau NF P18-470 a été rédigée par le groupe de normalisation AFNOR GT AFNOR/P18B piloté par François Toutlemonde de l'Isttar.

La norme calcul NF P18-710 a été rédigée par la commission BNTRA CN EC2 « Calcul des structures en béton », présidée par Jacques Cortade.

Cette commission est la commission miroir française du CEN/TC 250/SC2, groupe européen en charge de la rédaction et de la gestion de l'Eurocode 2.

Pour rédiger la norme NF P18-710 sur le calcul des structures en BFUP, la commission s'est organisée de façon assez classique en créant un sous-groupe dédié qui s'est réuni avec un rythme soutenu pendant un peu plus d'une année. Ce sous-groupe, que j'ai piloté avec l'assistance très active de Grégory Généreux du Cerema, a intégré plusieurs membres du Groupe de travail Afgc sur les BFUP. Une fois le document rédigé par le sous-groupe, celui-ci a été validé par le groupe plénier et a été soumis à l'enquête publique pendant une durée de deux mois.

Quelles perspectives de développement voyez-vous pour les BFUP tant dans le domaine architectural que dans celui du génie civil ?

Les BFUP permettent une libération des formes et un élancement des structures que favorise encore le caractère auto-plaçant du matériau. Les architectes comprennent aujourd'hui à la fois les qualités structurales, esthétiques et durables de ce matériau. La couverture du péage de viaduc de Millau avait ouvert la voie et, pour des réalisations récentes, on peut citer, parmi d'autres, outre le MuCEM à Marseille et le stade Jean Bouin à Paris, la fondation Louis Vuitton, dans le Bois de Boulogne...

Ces qualités concernent également les ouvrages d'art de toutes natures et tous les ouvrages en béton (viaducs, ponts-

mixtes, passerelles, piscines, escaliers, mobilier urbain, pare-soleil...) y compris dans le cadre du renforcement d'ouvrages existants (renforcement de VIPP⁽²⁾, renforcement sismique, protection au feu, ...).

En projets de recherche chez Setec Tpi, nous avons étudié des mâts d'éolienne on-shore et off-shore pour les substituer à des mâts en acier.

La résistance à l'abrasion des BFUP trouve aussi une excellente application dans les ouvrages hydrauliques soumis à l'écoulement d'une eau chargée en matériaux abrasifs : canaux, déversoirs... Par exemple, dans le cadre de la route d'accès au tunnel du Fréjus, le BFUP est utilisé en éléments minces de protection pour le revêtement de ponts-canaux.

Le BFUP devrait fortement se développer dans le cadre d'éléments minces utilisés en éléments de protection ou de renfort, réalisés en éléments préfabriqués coffrants participants, ou coulés en place, dans le cadre de la réalisation de structure composite (BFUP, associé à du béton armé ou précontraint) utilisant pleinement les performances du matériau en terme de résistance et durabilité.

Les BFUP sont en effet particulièrement recommandés pour les ouvrages préfabriqués, mais peuvent également être

utilisés sur site de façon très pertinente. Quelques exemples d'applications qui devraient se développer :

→ Utilisation de poutres en U préfabriquées précontraintes en BFUP servant de coffrage participant à des poutres précontraintes :

- Forte diminution du ferrailage des étriers des poutres liée à la participation de la peau de coffrage en BFUP,
- Suppression des coffrages sur site,
- Optimisation globale de la section des poutres,
- Augmentation significative de la durabilité de la structure.

→ Pièces de pont préfabriquées précontraintes dans le cas de grands ouvrages de grande largeur ;

→ Renforcement sismique et/ou au feu par confinement BFUP coulé sur site ;

→ Protection contre l'abrasion par peau ou coque de protection.

Des niches existent et les applications performantes tendent à se développer de plus en plus d'autant que la durabilité, l'esthétique des structures, la rapidité d'exécution, l'évolutivité possible des aménagements, le gain de matière première sont des préoccupations qui iront croissant et auxquelles les BFUP permettent d'apporter de réelles réponses novatrices.

Les projets importants en cours confortent leur développement à moyen terme et contribuer à en faire percevoir un peu plus tout le potentiel structurel et architectural. □

11- L'un des tout premiers ouvrages de génie civil en BFUP : le PS 34 sur l'autoroute A51.

12- PS de type PRAD en BFUP à Saint-Pierre-la-Cour.

1 - **MUCEM** : Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée. Le MuCEM, comme le stade Jean Bouin sont l'œuvre de l'architecte Rudy Ricciotti.

2 - **VIPP** : Viaduc à travées Indépendantes à Poutres Précontraintes.



11

© CAMPENON BERNARD RÉGION



12

© JACQUES RESPLENDINO

setec tpi est le spécialiste français des structures complexes et ouvrages de grande portée. Nous assurons des missions de conception, de maîtrise d'oeuvre, de contrôle et d'ingénierie de la construction.

setec tpi accompagne la réalisation des grands ouvrages



Tunnel de la Croix Rousse (Lyon)



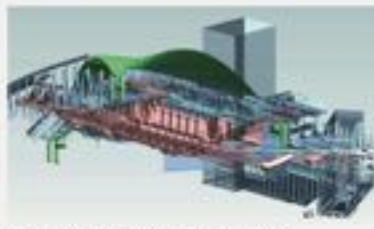
Passerelle de Dunkerque



Tour D2 (Paris la Défense)



Téléphérique de Brest



Gare Ecôle (Paris la Défense) - Maquette BIM



Credits photos : Anne-Claude Barbier pour setec tpi, setec tpi, Hercog & De Meuron & setec tpi



TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

Prochains numéros :

- TRAVAUX n° 921 « Travaux souterrains »
- TRAVAUX n° 922 « Travaux maritimes et fluviaux »
- TRAVAUX n° 923 « Ouvrages d'art »

Retrouvez l'actualité de la profession, les chantiers en images, les interviews des grands décideurs, le point de vue des ingénieurs.
Pour réserver votre emplacement publicitaire dans Travaux, contactez :

Bertrand COSSON
 Tél. 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.fr



Carine REININGER
 Tél. 01 42 21 89 05
c.reininger@rive-media.fr

STRUCTURES EN BÉTONS FIBRÉS À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES (BFUP) - ÉTAT DE L'ART ET PERSPECTIVES

AUTEURS : JACQUES RESPLENDINO, DIRECTEUR SUD EST, SETEC TPI - ZIAD HAJAR, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - SÉBASTIEN BERNARDI, DIRECTEUR TECHNIQUE LAFARGE DUCTAL®

AVEC UNE RÉSISTANCE EN COMPRESSION DÉPASSANT 130 MPA ET POUVANT ATTEINDRE JUSQU'À 250 MPA, LES BÉTONS FIBRÉS À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES (BFUP) CONSTITUENT UNE GAMME DE BÉTONS EXCEPTIONNELS, ALLIANT PERFORMANCE MÉCANIQUE, DUCTILITÉ ET DURABILITÉ. APRÈS UN RAPIDE RAPPEL DES CARACTÉRISTIQUES DES BFUP, DE L'HISTOIRE DE LEUR DÉVELOPPEMENT ET DE L'ÉVOLUTION DE LA RÉGLEMENTATION TECHNIQUE ASSOCIÉE, LE PRÉSENT ARTICLE DRESSE UN PANORAMA DES STRUCTURES MARQUANTES RÉALISÉES AVEC LES PRINCIPAUX BFUP, ET S'ACHÈVE PAR UNE PRÉSENTATION DES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE CES MATÉRIAUX.



1
© RUDY RICCOTTI

RAPPEL - QU'EST CE QU'UN BFUP

DÉFINITION DES BFUP

Les bétons fibrés à ultra-hautes performances sont des matériaux à matrice cimentaire, de résistance caractéristique à la compression comprise entre 130 MPa et 250 MPa.

Les normes françaises qui vont être publiées très prochainement distinguent :

→ Les BFUP structurels, notés BFUP-S qui ont une résistance caractéristique supérieure à 150 MPa et sont renforcés de fibres métalliques en vue d'obtenir un comportement

ductile en traction. Ces BFUP, qui recouvrent le même domaine technique que les recommandations Afgc de 2002 et 2013, sont couverts par la norme calculs NF P 18-710 et sont le cœur des applications objet du présent article ;

→ Les BFUP non structurels qui peuvent être utilisés dans diverses applications non structurelles ou architectoniques (panneau de revêtement de façade, mobilier urbain, équipements divers, ...). Ces BFUP peuvent faire l'objet d'applications industrielles associées éventuelle-

1- Vue générale du MuCEM et du Fort Saint-Jean.

1- General view of the MuCEM and Fort Saint-Jean.

ment à des normes produit spécifiques. Ils peuvent également faire l'objet d'applications structurales couvertes par des procédures d'évaluation techniques spécifiques.

Les BFUP-S structurels se distinguent des bétons à hautes et très hautes performances :

- Par la non-fragilité du matériau qui peut permettre de s'affranchir d'armatures traditionnelles ;
- Par leur résistance en compression en général supérieure à 150 MPa ;
- Par leur composition et leur fort dosage en liant qui conduit à l'absence de toute porosité capillaire ;
- Par leur résistance en traction directe de la matrice systématiquement supérieure à 6 MPa.

On recherche avec les BFUP un fonctionnement basé sur la résistance



© EIFFAGE

2

propre à la traction des fibres. De façon générale, on supprime toute cage de ferrailage passif traditionnel pour ne mettre en œuvre que les armatures passives ou actives principales requises dans le cas où la résistance aux efforts ne peut être apportée par les fibres.

LES PRINCIPAUX BFUP DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ

Les BFUP actuellement disponibles sur le marché en France sont :

- Les différents bétons Ductal®, développés dans le monde par Lafarge-Holcim ;
- Le BSI® développé par le groupe Eiffage ;
- Le BCV® développé par le cimentier Vicat et le groupe Vinci.

D'autres BFUP ont fait l'objet d'applications diverses :

- Le CEMTEC multiscale® développé par l'Ifsttar (ex. Lcpc) ;
- Des matériaux de laboratoire développés par Edf, par le Cerib.

À l'étranger on peut noter la technologie CRC développée par Aalborg Portland Cement (Densit) au Danemark. Quelques produits se développent en Allemagne, sachant que ce sont essentiellement les technologies BSI® et Ductal® qui sont utilisées en Europe de l'Ouest, et que Ductal® constitue la technologie principale diffusée en Asie, au Moyen-Orient, en Australie, et en Amérique du Nord (USA, Canada).

BREF HISTORIQUE DU DÉVELOPPEMENT DE CES MATÉRIAUX

Les premières recherches sur les BFUP ont été effectuées par le Pr Bache dans les années 1970 au Danemark dans le cadre du développement de la technologie CRC. Il s'agit d'une technologie toutefois très particulière dans laquelle un pourcentage très important de fibres métalliques est mis en œuvre pour réaliser des structures préfabriquées de bâtiment (balcons, escaliers) qui sont renforcées par des armatures traditionnelles calculées sans prendre

2- Vue d'ensemble de la couverture du péage du viaduc de Millau.

3- Vue de la couverture du stade Jean-Bouin.

2- Overall view of the roof covering of Millau Viaduct toll booth.

3- View of the roof covering of Jean-Bouin Stadium.

en compte la participation mécanique des fibres.

En France, les premières recherches sur les BFUP ont été développées dans les années 1990 sous l'impulsion de Pierre Richard (Groupe Bouygues) dans le cadre de la technologie des Bétons de Poudres Réactives (BPR). Le concept a été ensuite optimisé au centre de recherche Lafarge de l'Isle

d'Abeau dans le cadre d'un partenariat Bouygues-Rhodia et Lafarge pour élaborer le Ductal®, premier BFUP commercialisé, qui a été lancé à la fin des années 90. Cette technologie est largement diffusée aujourd'hui par Lafarge-Holcim tant en Europe de l'Ouest, qu'en Asie (Japon, Chine), au Moyen-Orient, en Afrique du Nord, aux États-Unis et au Canada. Elle se développe dans tous les domaines tant au niveau des applications structurelles d'ouvrages d'art et de bâtiments que dans des applications non structurelles d'habillage de structures, de mobiliers urbains et/ou d'objets de décoration et de design.

Sous l'impulsion d'EDF qui a été un maître d'ouvrage très moteur dans le développement des BFUP, la technologie BSI® a été mise au point par le groupe Eiffage à la fin des années 90 puis développée avec le concours de la société Sika. Cette technologie donne lieu à la réalisation d'un nombre croissant d'applications structurelles et architectoniques marquantes dans le domaine des ouvrages neufs et des réparations de structures, essen-



3

© EIFFAGE

tiellement en France et en Europe de l'Ouest.

Dans les années 2000, le cimentier Vicat, avec l'appui du groupe Vinci, a développé le BCV qui a fait également l'objet de réalisations structurelles. Vicat poursuit actuellement le développement des BFUP au travers de la marque SMART UP qui concerne à la fois des BFUP structurels et des matériaux architectoniques.

Dans les années 2000, plusieurs pays se sont lancés dans la recherche sur les BFUP. Les Japonais, très actifs, ont publié des recommandations en 2004. Ils ont réalisé plusieurs ouvrages remarquables (passerelles piétons, ponts routiers et ferroviaires) et ont réalisé d'importantes applications structurelles (ouvrages aéroportuaires en site maritime).

En Australie, une activité significative se développe axée sur la réalisation d'ouvrages d'art et l'utilisation du matériau dans des boucliers de protection contre les explosions.

De même, aux USA, d'importants travaux ont été réalisés sous l'égide notamment de l'administration américaine des autoroutes (FHWA).

Les américains ont réalisé plusieurs dizaines d'ouvrages et ont publié en 2013 des recommandations et règles de l'art concernant notamment deux applications qui font l'objet d'un nombre croissant de réalisations :

- Tabliers de pont en dalles gaufrées en BFUP ;
- Utilisation de BFUP pour la connexion de dalle en béton armé à des poutres préfabriquées de type AASHTO ou à des poutres en charpente métallique.

Les Allemands ont réalisé de 2005 à 2012 un important programme de recherche (plus de 11 M€) qui a mobilisé plusieurs universités sous le pilotage de l'université de Kassel. Ils ont, par contre, peu d'expérience de conception et d'utilisation réelle du matériau, parce qu'ils sont handicapés par le nombre peu important d'entreprises et de maîtres d'ouvrages impliqués dans le développement de ces technologies.

Les Suisses, sous l'égide notamment de l'École Polytechnique de Lausanne et de l'École d'Ingénieur et Architecte de Fribourg, ont effectué d'important travaux de recherche et un nombre significatifs d'applications notamment dans le domaine du renforcement sur site de dalle béton en armé par une mince couche superficielle de BFUP écrouissant.

Ces applications en renforcement ont fait d'énormes progrès technologiques ces dernières années avec l'aide de LafargeHolcim pour passer à un stade quasi industriel permettant la mise en œuvre sur site de grandes surfaces de dalle de renforcement en BFUP à l'aide d'un finisher en béton spécialement adapté pour le BFUP (voir l'article sur le renforcement du viaduc de Chillon). Forte de son expérience et de son potentiel sur ces matériaux, la France a été le premier pays à publier des recommandations, en 2002, permettant de formaliser les méthodes de caractérisation des performances de ces matériaux et de donner des règles de calcul de structures en BFUP sans aucune armature de renfort autre que les fibres, ce qui constitue l'innovation majeure de ce type de matériau. Une nouvelle version des recommandations mise en conformité avec les Eurocodes a été publiée en version bilingue anglais/français en juin 2013.

Par ailleurs, dans l'objectif de faciliter l'assurabilité des ouvrages en BFUP, la profession en France a travaillé récemment sur la rédaction de trois normes françaises sur les BFUP :

→ Une norme sur le matériau : NF P 18-470. Cette norme qui traite des BFUP structurels et non structurels est finalisée. Le document, qui sera publié très prochainement, fait l'objet d'un article spécifique de présentation dans le présent numéro de *Travaux* ;

→ Norme sur le calcul des structures en BFUP : NF P 18-710. Cette norme a été rédigée comme un complément national à l'Eurocode 2. Le texte qui a été rédigé en parallèle et en cohérence totale avec la norme matériau est également finalisé et sera publié très prochainement (voir également l'article spécifique sur cette norme dans le présent numéro de *Travaux*) ;



4 © EIFFAGE

→ Norme sur l'exécution des structures en BFUP : NF P 18-541. Le travail sur ce document a démarré et devrait aboutir assez rapidement compte tenu de la matière présente dans les autres normes et les recommandations.

Pour faciliter l'utilisation de ces nouvelles normes dans les travaux à l'international un travail de traduction en anglais de ces documents a été amorcé et devrait aboutir au premier semestre 2016.

BREF PANORAMA D'APPLICATIONS REMARQUABLES

Nous présentons quelques applications remarquables sur plusieurs thèmes :

- Utilisation vis-à-vis de performances architecturales décuplées ;
- Utilisation du BFUP pour ses performances en termes de performance mécanique, ductilité, durabilité.

4- Vue générale du mémorial de Notre-Dame-de-Lorette.

5- a) Toit de la maison Navarra en Ductal®. b) Toit précontraint de la villa de Ramatuelle en SMART UP, conception Anthony Ugo.

4- General view of the Memorial of Notre-Dame-de-Lorette.

5- a) Roof of Navarra house in Ductal®. b) Prestressed roof of the Ramatuelle villa in SMART UP, Anthony Ugo concept.

LE BFUP DES POSSIBILITÉS ARCHITECTURALES DÉCUPLÉES

Le MuCEM

Le MuCEM (Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée) conçu par l'architecte Rudy Ricciotti et le bureau d'étude Sica est certainement un des projets les plus emblématiques ayant permis de montrer les possibilités créatives performantes des BFUP.

Le BFUP (Ductal®) est utilisé pour l'ensemble des structures porteuses périphériques constituées de poteaux arborescents, ainsi que pour la réalisation des résilles de façade et de toiture (figure 1).

Le Ductal® est également utilisée pour réaliser les passerelles piétonnières de liaison du nouveau musée au Fort Saint-Jean et du Fort Saint-Jean au quartier du Panier. Ces passerelles utilisent pleinement les performances mécaniques du matériau avec des élancements remarquables qui nécessitent



5a

© RUDY RICCIOTTI



5b

© VICAT



6
© LAFARGEHOLCIM



7
© EIFFAGE

le recours à des amortisseurs dynamiques accordés pour la résistance au vent et le confort des usagers.

La couverture du péage du viaduc de Millau

Pour le groupe Eiffage, la construction du viaduc de Millau fut l'occasion de tester le BSI® dans des formes inédites en confiant le projet de la couverture du péage à l'architecte Michel Herbert (figure 2).

L'ouvrage, d'une longueur de 98 m pour une largeur de 28 m, est constitué d'une coque mince en BFUP de forme hélicoïdale, reposant sur 48 poteaux métalliques groupés par faisceaux et répartis sur 4 files.

La surface hélicoïdale de la coque de 2800 m² qui survole les cabines de péage est obtenue par assemblage de voussoirs préfabriqués à joints conjugués collés ne comportant aucune armature passive, assemblés par une précontrainte longitudinale filante (*Travaux* n°816 - Février 2005).

Le Stade Jean Bouin

La couverture du stade Jean-Bouin conçu par l'architecte Rudy Ricciotti et l'ingénieur Romain Ricciotti est également un exemple des possibilités exceptionnelles offertes par les BFUP. La structure est une coque tri-dimensionnelle réalisée au moyen d'éléments de dalle nervurés triangulaires en BFUP de grandes dimensions (jusqu'à 9 m de portée) comportant des inclusions en verre (figure 3).

Ces éléments sont appuyés de façon isostatique sur une structure porteuse en charpente métallique.

Le mémorial International de Notre-Dame-de-Lorette

Ce mémorial est un ouvrage exceptionnel en BFUP, conçu par l'architecte Philippe Prost et construit par Eiffage sous maîtrise d'ouvrage de la région Nord-Pas-de-Calais. L'ouvrage est un anneau semi-elliptique (figure 4) de

6- Réparation, renforcement du viaduc de Chillon.

7- Pont d'Illzach.

6- Repair and strengthening of the Chillon Viaduct.

7- Illzach Bridge.

328 mètres, réalisé à l'aide de voussoirs préfabriqués en BSI®.

D'autres applications structurelles remarquables par leur qualité architecturale et innovante ont utilisé pleinement les performances du BFUP, comme la toiture de la maison Navarra, imaginée par Rudy Ricciotti pour le marchand d'art Enrico Navarra. (figure 5a), ou le chantier innovant d'une villa à Ramatuelle conçue par l'architecte Anthony Ugo (figure 5b). Dans les domaines des équipements de bâtiment, les BFUP ont été l'objet de nombreuses applications, auxquelles sont consacrés plusieurs articles dans le présent numéro de *Travaux*.

UTILISATION DU BFUP VIS-À-VIS DE SES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DURABILITÉ

Utilisation en couche de renforcement de dalle d'ouvrage

Renforcement de dalle de roulement en béton armé ou en béton précontraint.

En Suisse, dans le cadre du projet européen Samarit, l'École Polytechnique de Lausanne a étudié, avec le concours de l'Ifsttar, la possibilité d'utiliser du BFUP

pour la réparation de tabliers en béton armé ou précontraint. Les études réalisées par l'Epfl ont montré l'efficacité de cette méthode de renforcement qui a ensuite été déployée sur plusieurs ouvrages.

La technique vient récemment d'être portée au stade industriel dans le cadre de la réparation des viaducs de Chillon (figure 6) pour le compte de l'État fédéral (voir l'article spécifique dans le présent numéro de *Travaux*).

L'entreprise Walo, avec l'aide de LafargeHolcim, a adapté un finisher d'aéroport pour mettre en œuvre sur site à une cadence importante les quantités de BFUP (Ductal®) nécessaires au renforcement de ces viaducs exceptionnels de grande longueur.

Renforcement de dalle orthotrope.

Le procédé Orthodalle mis au point par Eiffage, propose une nouvelle technique de renforcement de tablier de pont métallique en dalle orthotrope à l'aide d'un revêtement mince structurel en BFUP en lieu et place du revêtement bitumineux. Ce procédé, déclaré lauréat de la Charte Innovation Routière 2010, a été expérimenté sur un ouvrage en service dont le platelage orthotrope présentait une forte pathologie, à Illzach près de Mulhouse, par la mise en œuvre d'éléments de dalle préfabriqués en lieu et place du revêtement bitumineux au cours de l'été 2011 (figure 7).

Utilisation de BFUP pour la reprise en sous-œuvre de bâtiment

Dans le cadre de la réhabilitation de l'ancien immeuble du Crédit Foncier situé rue Volney à Paris, le projet prévoyait la suppression de porteurs et leur remplacement par des poteaux métalliques garantissant une stabilité au feu d'une heure.

Une solution de poteaux en BFUP s'est avérée avantageuse. Elle présentait l'intérêt d'être beaucoup plus légère qu'une solution métallique (poids des

éléments divisé par 3) et permettait de conserver l'aspect demandé (figure 8), la solution retenue consistant en une fine enveloppe métallique en acier de 3/10^e de mm remplie d'une formule de BSI® anti-feu (formule comportant l'adjonction de fibres en polypropylène).

Autres utilisations de BFUP pour le renforcement d'ouvrages

La présence de la future ligne de tramway de la ville du Mans a imposé d'augmenter le nombre de voies sur le pont sur l'Huisne au Mans, ce qui nécessitait de renforcer ce VIPP construit en 1976.

Pour trouver une solution plus simple et performante, l'idée a été d'utiliser du BSI® pour augmenter l'inertie des poutres latérales les plus sollicitées, en augmentant leur section (figure 9) et en profitant du module d'Young élevé du BSI®, qui est le double de celui d'un béton classique (65 GPa).

Ce principe de renforcement permet de s'affranchir, bien sûr, de tout ferrailage passif dans les pièces de renfort, lequel ferrailage pose toujours d'importants problèmes de façonnage compte tenu des conditions d'accès et de la difficile maîtrise de la géométrie réelle des éléments à renforcer.

Utilisation de BFUP pour la protection d'ouvrages soumis à l'érosion, pour la construction, la réparation et le renforcement d'ouvrages hydrauliques

La réparation et la protection d'ouvrages soumis à des écoulements torrentiels sont des problématiques qui peuvent trouver avec les BFUP des solutions très économiques et performantes.

L'efficacité des BFUP vis-à-vis de ces agressions est quantifiée dans la norme matériau par la définition de trois classes de résistance à l'abrasion définies en fonction des performances obtenues lors de la réalisation d'essais ▷



8



9



10

© EIFFAGE

« CNR » dont le mode opératoire a été repris par l'annexe I de la norme :

- Classe RM1 : $1 \leq$ indice d'abrasion < 1,5 (matériau résistant à l'abrasion hydraulique) ;
- Classe RM2 : $0,7 \leq$ indice d'abrasion < 1 (matériau très résistant à l'abrasion hydraulique) ;
- Classe RM3 : indice d'abrasion < 0,7 (matériau ultra-résistant à l'abrasion hydraulique).

À noter que, quelle que soit la classe de résistance à l'abrasion, les performances obtenues avec les BFUP sont toujours très supérieures à celles des BHP et des bétons ordinaires qui ont des indices d'abrasion de l'ordre de 2,8 à 4 respectivement.

Le groupe Eiffage a ainsi utilisé le BSI® pour réparer et protéger les semelles de fondation et les appuis du viaduc de Valabres, pour le compte du Conseil départemental des Alpes Maritimes. Après enlèvement des parties dégradées des semelles et des fûts de pile, une fine coque de protection a été coulée en place contre la structure existante (figure 10).

Le BSI® a également été utilisé pour la réparation du canal de Saint-Julien-Mont-Denis (cf Article *Travaux* Nov. 2004) pour le compte de la Srtf, par la mise en œuvre d'une couche de BSI coulée en place, assurant une protection contre les chocs et l'usure (figure 11).

Le Ductal® a été utilisé dans plusieurs applications privilégiant la durabilité ou la résistance au feu tels que les points d'ancrage (plus de 6 000) équipant l'île de la Réunion et le Ductal®-AF uti-

lisé pour la construction des colonnes composites du musée de la Reine Sofia à Madrid (Espagne). Le Ductal® a été utilisé pour la fabrication des tranchées de l'usine de traitement des eaux usées de Gold Bar (Edmonton, Canada) (figure 12).

Le Ductal® a également été utilisé pour renforcer des ouvrages hydrauliques (figure 13 - réparation du tunnel de la rivière Hosokawa). Le matériau permet de réaliser un renforcement très mince qui n'engendre pas de diminution sensible de l'ouverture hydraulique. La solution est très intéressante pour ses performances en terme de résistance à l'abrasion et de diminution de la rugosité qui garantissent un maintien - voire une amélioration globale - de la performance hydraulique de l'ouvrage. Ce type de solution peut valablement être adapté pour des réhabilitations de tunnel : renforcement de la voûte avec création d'une protection anti-feu résistante aux effets de chocs des véhicules.

Utilisation de BFUP en ouvrages maritimes

Un des plus importants projets en BFUP est l'aéroport d'Hadéna (Tokyo, Japon) qui a vu la construction sur la mer d'une immense dalle en Ductal® fondée sur des viroles métalliques (figure 14). Cette dalle est réalisée au moyen d'éléments préfabriqués, précontraints dans les deux directions et construits dans une usine foraine à proximité de l'ouvrage. Par rapport à une solution classique, le matériau permet de réduire considérablement le poids de l'ouvrage et garantit la pérennité de la structure soumise à une

8- Percement des façades et mise en place des nouveaux poteaux.

9- Pont sur l'Huisne - Vue du renforcement du tablier.

10- Réparation et protection des fondations et des appuis du viaduc de Valabres.

8- Drilling facades and putting in place the new columns.

9- Bridge over the Huisne - View of deck strengthening.

10- Repair and protection of the foundations and supports of Valabres Viaduct.

atmosphère particulièrement agressive. Cette réalisation montre que le domaine maritime est certainement un des domaines les plus pertinents pour l'utilisation du matériau BFUP.

LES APPLICATIONS STRUCTURELLES EN GÉNIE CIVIL AVEC RECOURS INTENSIF À LA PRÉFABRICATION

La poutre ITE

L'étude du triplement du pont Pinel à Rouen a vu la réalisation des poutres

ITE, une alternative en BFUP aux solutions de tabliers à poutrelles enrobées. Cette solution, a également été mise en œuvre pour le doublement du pont de la RD 125 à Garges-Sarcelles (figure 15), et plus récemment sur le tablier en BSI® du pont de la République à Montpellier.

La poutre ITE (poutre en I à Talon Élargie) est une poutre préfabriquée en T inversé réalisée en BSI® et précontrainte par fils adhérents. Cette innovation développée par Eiffage a reçu en 2009 le premier Prix, catégorie grandes entreprises, des Trophées de l'Innovation de la Fédération nationale des travaux publics (Fntp).

Un hourdis supérieur en béton armé classique est coulé sur des prédalles posées sur le dessus des poutres. Hormis les aciers de connexion avec la dalle supérieure, la poutre ne comporte aucun acier passif (figure 16).

Les performances des poutres ITE® en termes d'élanement sont identiques aux poutrelles métalliques enrobées, mais le hourdis supérieur représentant un volume de béton très inférieur à celui d'un tablier à poutrelles enrobées, l'allègement du tablier est très important (réduction de poids de 40%) ce qui engendre des économies pour les fondations d'autant plus intéressantes que l'on est dans un site géotechnique difficile ou que l'ouvrage est soumis au risque sismique.

Ponts et passerelles de type PRAD

Un exemple remarquable d'ouvrage de type PRAD en BFUP est le pont routier de Saint-Pierre-la-Cour.

11- Réparation du canal de Saint-Julien-Mont-Denis - Installation à pied d'œuvre.

12- Usine de Gold Bar (Edmonton) - Vue des tranchées après installation.

13- Renforcement d'ouvrage hydraulique.

11- Repair of the Saint-Julien-Mont-Denis canal - Installation on site.

12- Gold Bar plant (Edmonton) - View of the trenches after installation.

13- Reinforcement for a culvert.



© EIFAGE 11



© LAPARGEHOLCIM 12



© LAPARGEHOLCIM 13

L'ouvrage est un pont routier à poutres en i préfabriquées, précontraintes par prétension en Ductal[®], connectées à une dalle en béton armé ordinaire, coulée sur des prédalles en Ductal[®] de 25 mm d'épaisseur (figure 17).

Outre l'allègement de la structure par rapport à une solution traditionnelle (diminution du poids du tablier d'un facteur de 2,2), l'intérêt de la conception est d'utiliser pleinement le BFUP pour ses performances en termes de durabilité. En effet, toutes les surfaces du tablier en contact avec l'air ambiant sont, soit réalisées en BFUP (poutres et intrados de la dalle), soit protégées par l'étanchéité (extrados de la dalle). Une durabilité qui réduit les budgets de maintenance et génère une solution globalement plus économique.

Utilisant de poutre en U précontrainte servant de coffrage

L'entreprise Matière a développé une solution d'ouvrages en BFUP préfabriqués permettant de répondre de façon extrêmement performante à des besoins de réalisation rapide de petits ouvrages.

Le concept développé par Matière qui s'appelle le pont X.Press (figure 19) consiste en la réalisation d'un tablier au moyen de poutres creuses en U préfabriquées en BFUP précontraint qui servent de coffrage à des poutres en BA classiques.

Le recours à ces éléments préfabriqués en U permet de réaliser l'ouvrage sans cintre et d'obtenir in fine une structure beaucoup plus durable, l'ensemble des parties non protégées par l'étanchéité étant réalisé en BFUP.

À noter que le recours à des éléments coffrants précontraints en U pour la réalisation de poutres en béton armé ou en

béton précontraint permet de réduire sensiblement la quantité d'acier d'armatures d'effort tranchant à mettre en œuvre dans la poutre. Des recherches ont été réalisées au Japon sur le sujet

UTILISATION DE BFUP POUR LE RENFORCEMENT D'OUVRAGES AU SÉISME

Des recherches conduites au Canada ont montré le grand intérêt de la solution de confinement en BFUP pour renforcer des piles existantes au séisme. Le remplacement du béton d'enrobage par une enveloppe en BFUP coulé en place dans les zones de recouvrement à la base des fûts de pile permet de supprimer les risques de rupture fragile de la section d'encastrement du fût et procure une grande ductilité et capacité de dissipation à la structure renforcée. Des travaux similaires ont également

été menés en France, dans le cadre du projet de recherche appelé BADIFOPS « BFUP armés ductiles instrumentés par fibres optiques pour applications parasismiques ». Ces travaux ont montré, au travers d'études de cas et d'expérimentations que la réalisation de chemisages en BFUP au niveau des rotules plastiques en tête ou au pied de piles ou poteaux en béton armé est une voie prometteuse de remise à niveau structural.

PERSPECTIVES ET AVENIR DES BFUP

INTÉRÊT DES BFUP VIS-À-VIS DES PROBLÉMATIQUES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Un volume de BFUP comporte environ deux fois plus de ciment qu'un béton traditionnel. Il dégage donc deux fois plus de CO₂ et consomme deux fois plus d'énergie pour être produit.

Par contre l'expérience sur les réalisations en BFUP montre que, s'ils sont utilisés de façon pertinente, ils permettent de diviser les quantités de matière mises en œuvre dans une structure par deux ou trois.

Par rapport à une structure traditionnelle, un ouvrage en BFUP permet ainsi un gain en termes de CO₂ et d'énergie. Il offre par ailleurs un gain important en terme de durabilité, légèreté et économie globale de matière.

LES DOMAINES D'UTILISATION POTENTIEL DES BFUP

Comme le montrent les diverses réalisations, les BFUP sont particulièrement bien adaptés aux structures préfabriquées, mais leur utilisation sur site est possible et peut être complètement pertinente.

Les domaines d'utilisation privilégiés peuvent concerner :

- Les structures ou parties de structure soumise à des environnements agressifs (effets abrasifs, ouvrages en site maritime, agression chimique) ;
- Les structures ou parties de structure pour laquelle un gain de poids est intéressant (zone sismique, difficulté de fondation, structures élancées ou de grande portée, ...) ;
- Les structures soumises à des effets de chocs importants (containers de stockage de déchets, boudiers de protection, ...) ;
- Les ouvrages où l'on recherche une grande qualité, de la finesse et la possibilité de matricage des parements ;

- Les structures composites : les BFUP présentent un rapport résistance/module très intéressant pour une utilisation combinée avec l'acier ou la fibre de carbone. La quasi-absence d'effets différés dans le matériau (fluage, retrait de dessiccation) rend leur utilisation en structure mixte particulièrement pertinente ;
- Les structures ou parties de structure pour lesquelles la complexité et la densité du ferrailage passif traditionnel rendent très difficiles une conception et une mise en œuvre correcte (connexion sur une structure existante de géométrie non maîtrisée et difficilement accessible, connexion mécanique à une charpente métallique de forme complexe, ...)
- Les solutions d'ouvrages ou de parties d'ouvrage pour lesquelles la préfabrication associée au gain sur les méthodes de mise en œuvre et sur la durabilité permet d'apporter une réponse complètement pertinente sous les aspects technique et économique. On peut penser ici à des solutions de pièces de pont préfabriquées de grands ouvrages, des coques préfabriquées servant de coffrage participant à des poutres transversales ou principales ou à des branches verticales d'appui ou de pylônes. Ces solutions sont d'autant plus pertinentes que la conception prévoit une répétabilité maximale des pièces préfabriquées et évite la réalisation de pièces de géométrie toutes différentes.

LES BFUP : DES MATÉRIAUX QUI RÉVOLUTIONNENT LES TECHNIQUES DE CONCEPTION ET DE MISE EN ŒUVRE

La conception et la réalisation d'ouvrages en BFUP nécessitent de sortir des réflexes attachés aux structures traditionnelles en béton armé ou en béton précontraint.



© LAFARGEHOLCIM

14- Vue générale de la construction de la structure de l'aéroport d'Haneda (Tokyo).

15- Pont de la RD125- Pose des poutres ITE®.

16- Pont Pinel - Coupe transversale solution variante avec poutres ITE®.

17- Coupe transversale du pont.

14- General view of construction of the structure of Haneda Airport (Tokyo).

15- Bridge over county road RD125- Placing ITE® beams.

16- Pinel Bridge - Cross section of variant solution with ITE® beams.

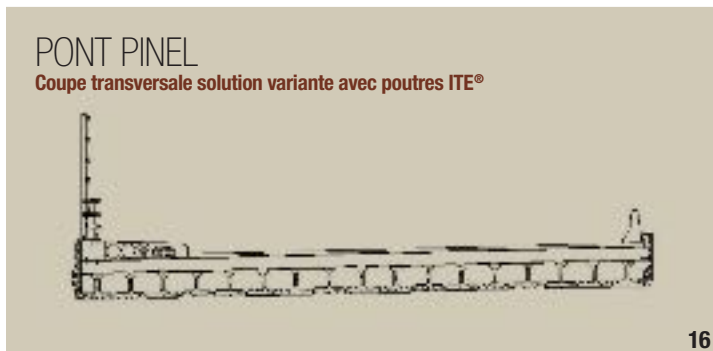
17- Cross section of the bridge.

Les volumes de structure sont complètement modifiés, avec des épaisseurs qui peuvent devenir très réduites. Bien que souvent parfaitement pertinent, ceci peut inquiéter les non-initiés. La réduction d'épaisseur tend à favoriser l'orientation des fibres et à augmenter la résistance du matériau. La possibilité de réaliser des pièces très élancées nécessite, par contre, d'être vigilant sur les vérifications de déformations et d'efforts dans les phases transitoires de manutention et d'assemblage. La forme des coffrages doit être complètement revue. Dans une structure traditionnelle on privilégie les angles permettant un façonnage aisé des armatures. Avec les BFUP on a tout intérêt à ne pas mettre d'angle mais

plutôt des surfaces arrondies qui facilitent la mise en œuvre du matériau et évitent les discontinuités d'écoulement. L'absence de ferrailage permet d'envisager toutes les formes de structures pour peu que la géométrie soit cohérente et pertinente avec un bon cheminement des efforts et compatible avec une bonne mise en œuvre du béton. La parfaite adéquation de ces matériaux avec la préfabrication nécessite souvent de repenser la conception globale d'une structure : dans un ouvrage volumineux de forme géométrique éventuellement complexe, une réflexion doit être conduite sur la façon de réaliser la structure globale à partir d'un assemblage d'éléments de taille réduite, de géométrie la plus redondante possible,

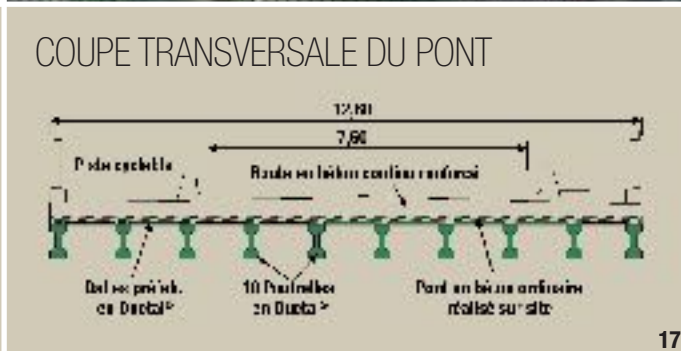


© EIFFAGE



16

© EIFFAGE



17

© LAFARGEHOLCIM

permettant un cheminement optimal des efforts et une réalisation facile à la fois des pièces élémentaires et des assemblages. Cette démarche non traditionnelle nécessite un nouveau regard sur la façon de concevoir et réaliser la structure.

Le développement de la préfabrication va de pair avec des recherches de conception sur les connexions entre les éléments permettant d'assurer au mieux la transmission des efforts, l'étanchéité et la pérennité de l'assemblage.

La technologie des coffrages évolue. On voit se développer des solutions de coffrage 3D en plastique moulé ou polystyrène découpé automatiquement pour permettre des formes tridimensionnelles quelconques.

Plus les bétons sont pointus, plus la mise en œuvre nécessite un soin et des contrôles particuliers :

- Validation des processus par épreuves de convenance et essais préalable ;
- Suivi et maîtrise de la rhéologie en fonction des conditions climatiques ;
- Respect strict des tolérances sur la consistance et la résistance ;
- Respect des tolérances dimensionnelles et suivi géométrique d'autant plus important que les pièces sont fines et flexibles.

Les méthodes de calcul sortent des usages traditionnels du béton armé et/ou précontraint bien maîtrisés par les bureaux d'études : les calculs de résistance font appel aux théories développées pour les bétons fibrés, qui sont peu connues.

De même les méthodes d'essais de résistance en traction par flexion sont peu connues des laboratoires et requièrent des outils numériques d'exploitation spécifiques (méthode inverse).

© J. RESPLENDINO



18

VUE GÉNÉRALE TABLIER X.PRESS



19

© MATIÈRE

18- Vue générale du pont de Saint-Pierre-La-Cour.
19- Vue générale tablier X.Press.

18- General view of Saint-Pierre-La-Cour Bridge.
19- General view of X.Press deck.

Un des principaux freins actuel au développement des BFUP est ainsi lié au manque de compétences spécifiques au sein des bureaux d'études, chez les architectes, dans les laboratoires et les entreprises.

Le matériau nécessite un investissement intellectuel préalable important. Le développement du marché, dépendant de la sortie des nouvelles normes associées et du développement des formations dans les écoles d'ingénieurs et les instituts de formation permanente, devrait contribuer à la promotion de ces matériaux.

Compte tenu du décollage que l'on constate (notamment aux USA, au Japon, mais également en Europe

et en France) il est probable qu'un nombre plus important de bureaux d'études et d'entreprises va former des équipes dédiées à ces matériaux afin de pouvoir répondre à la demande. Cette démarche devrait renforcer le développement du matériau, sachant qu'elle devrait conduire à l'émergence d'un nombre croissant de solutions de structures en BFUP alternatives aux solutions classiques, dans les cas où le choix du matériau s'avère pertinent sous les aspects économiques et environnementaux.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La conception et la réalisation de structures en BFUP nécessitent de sortir des réflexes attachés aux structures traditionnelles en béton armé ou en béton précontraint.

Les BFUP ne sont pas des matériaux économiquement révolutionnaires dans le sens où leur coût de production et de mise en œuvre reste élevé et nécessite une recherche d'optimisation pour garantir un réel gain financier.

Les applications performantes tendent à se développer de plus en plus, d'autant que la durabilité, l'esthétique des structures, la rapidité d'exécution, l'évolutivité possible des aménagements, le gain de matière première sont des préoccupations qui iront croissant et auxquels les BFUP permettent d'apporter de réelles réponses novatrices. Les projets importants en cours et la sortie des nouvelles normes vont conforter leur développement à moyen terme au travers d'une montée en compétence de la profession qui aura un effet boule de neige sur l'émergence de solutions innovantes qui contribueront à consolider le potentiel structurel et architectural ces matériaux. □

ABSTRACT

ULTRA-HIGH-PERFORMANCE FIBRE-REINFORCED CONCRETE (UHPFRC) STRUCTURES - STATE OF THE ART AND PROSPECTS

J. RESPLENDINO, SETEC TPI - Z. HAJAR, EIFFAGE - S. BERNARDI, LAFARGE DUCTAL®

Following a rapid reminder of what ultra-high-performance fibre-reinforced concretes are, this article presents a history of the development of these materials. It summarises changes in the technical recommendations established by the Association Française de Génie Civil (AFGC: French Civil Engineering Association) and the new standards which will be published on these materials very soon, which should help to boost their development. It then presents a brief overview of outstanding structures built with the leading UHPFRCs available in the market. For each structure, the article highlights the specific features which made it possible to exploit the properties of these materials with a view to economic optimisation and durability. The article ends with a description of the prospects for development of these materials. □

ESTRUCTURAS EN HORMIGONES DE MUJ ALTA RESISTENCIA REFORZADOS CON FIBRAS (HMAR) - SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

J. RESPLENDINO, SETEC TPI - Z. HAJAR, EIFFAGE - S. BERNARDI, LAFARGE DUCTAL®

Tras un rápido recordatorio de lo que son los hormigones de muy alta resistencia reforzados con fibras, el presente artículo relata la historia del desarrollo de estos materiales. Recuerda las evoluciones de las recomendaciones técnicas emitidas por la Asociación Francesa de Ingeniería Civil y las nuevas normas que muy próximamente se publicarán acerca de estos materiales, que deberían contribuir a reforzar su desarrollo. A continuación, presenta un breve panorama de las estructuras más destacadas realizadas con los principales HMAR existentes en el mercado. Para cada obra, el artículo destaca las especificidades que han permitido sacar el máximo partido de las prestaciones de estos materiales en aras de la optimización económica y la durabilidad. El artículo termina planteando las perspectivas de evolución de estos materiales. □



1a

© IFSTTAR

LA NOUVELLE NORME FRANÇAISE DE PRODUIT SUR LES BFUP (NF P 18-470)

AUTEUR : FRANÇOIS TOUTLEMONDE, DÉLÉGUÉ SCIENTIFIQUE, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST)

LES BFUP DE RÉSISTANCE CARACTÉRISTIQUE EN COMPRESSION COMPRISE ENTRE 130 ET 250 MPA ONT DÉSORMAIS LEUR NORME, ÉQUIVALENTE DE LA NORME NF EN 206/CN POUR LES BÉTONS. APPROUVÉE POUR PUBLICATION LE 7 OCTOBRE 2015, ELLE DÉTAILLE LES PERFORMANCES DES BFUP ET LES DISPOSITIONS PERMETTANT DE LES DÉTERMINER ET DE LES SPÉCIFIER. ELLE PRÉCISE LES EXIGENCES ASSOCIÉES À LA PRODUCTION DES BFUP ET LES CONDITIONS PERMETTANT D'EN ÉVALUER ET D'EN DÉCLARER LA CONFORMITÉ. ELLE EST DESTINÉE À EN FAVORISER UN EMPLOI SÛR ET À FAIRE ÉCOLE À L'INTERNATIONAL.

POINT DE DÉPART ET OBJECTIFS

La démarche de normalisation des BFUP a été lancée en France fin 2012 sur la base du consensus technique issu des recommandations de l'Afgc (Association française de génie civil), afin de faciliter l'assurabilité des constructions en BFUP, notamment dans le domaine des bâtiments, de consolider l'expérience française en termes de commande, de mise au point et de contrôle des BFUP sur la base d'une quinzaine d'années de pratique (figures 1 et 2), et de prendre date au niveau international. Répondant au souci de s'inscrire autant que possible dans l'architecture de la normalisation existante sur les bétons, déclinée de la normalisation européenne, la démarche a débouché sur la préparation cohérente de trois textes (figure 3), mobilisant les commissions

de normalisation AFNOR P18B, BNTRA CN EC2 et BNTEC P18E :

- Une norme de produit NF P 18-470, objet du présent article, équivalente de la norme NF EN 206/CN pour les bétons, intégrant en annexes des modes opératoires ou précisions sur les normes d'essais et l'interprétation des résultats pour leur application aux BFUP ;
- Une norme de conception NF P 18-710, complément national à l'Eurocode 2 pour le calcul des structures en BFUP ;
- Une norme d'exécution NF P 18-451 qui complète, précise ou amende la norme NF EN 13670/CN.

La norme NF P 18-451 est actuellement au stade de projet, tandis que le texte des deux premières normes a fait l'objet d'une enquête publique et

qu'à la suite de cette phase, le projet de la norme produit a été approuvé pour publication le 7 octobre 2015. Au stade actuel, il est envisagé que les normes associées aux produits préfabriqués en usine (normes de produits et règles communes) soient prochainement mises à jour pour permettre l'usage des BFUP dans ces produits en s'appuyant autant que possible sur ces mêmes trois textes.

La norme de produit NF P 18-470 en cours de publication, objet du présent article, couvre évidemment les BFUP de résistance caractéristique à la compression supérieure à 150 MPa et contenant des fibres métalliques (BFUP-S), auxquels s'appliquent les recommandations de l'Afgc depuis 2002 et dont l'emploi pour le calcul des structures sera couvert par la norme NF P 18-710,

mais aussi des BFUP dont la non-fragilité est assurée par d'autres types de fibres (BFUP de type A), ainsi que des BFUP de résistance caractéristique à la compression inférieure, quel que soit le type de fibres contribuant à assurer leur non-fragilité, sans toutefois descendre au-dessous de 130 MPa.

APPELLATION BFUP ET PERFORMANCES MINIMALES

L'appellation normalisée BFUP est réservée à un matériau dont la non-fragilité est démontrée, et qui, outre la performance de résistance en compression dans la gamme précisée ci-dessus, satisfait des exigences et atteint ou dépasse des seuils de performance pour une série de paramètres (notamment liés à la durabilité) détaillés ci-après.



1b
© HERVÉ ABBADIE



2
© EIFFAGE



La « non-fragilité » dont il est question, c'est-à-dire le caractère écrouissant en flexion que doit revêtir le comportement des BFUP, constitue, en-dehors de la résistance en compression, l'une des performances les plus remarquables de ces matériaux. La norme explicite l'inégalité qui doit être vérifiée :

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

où :

- $w_{0,3} = 0,3$ mm.
- $f_{ctm,el}$ est la valeur moyenne de la limite d'élasticité en traction, en MPa.
- $\sigma(w)$ est la contrainte caractéristique post-fissuration en fonction de l'ouverture de fissure w , en MPa. L'obtention de cette fonction par analyse inverse d'essais de flexion sur prismes est détaillée dans deux annexes adaptées des annexes correspondantes des recommandations Afgc (révision 2013).

L'appellation BFUP est également conditionnée par le respect des conditions suivantes :

- Valeur caractéristique de la limite d'élasticité en traction à 28 jours $f_{ctk,el}$ supérieure ou égale à 6 MPa.
- Masse volumique comprise entre 2200 kg/m³ et 2800 kg/m³.
- Porosité à l'eau à 90 jours inférieure ou égale à 9,0% (selon la norme NF P 18-459).
- Coefficient de diffusion des ions chlorure à 90 jours inférieur ou égal à 0,5 · 10⁻¹² m²/s (selon la norme XP P 18-462 adaptée suivant les dispositions du A.1 de l'annexe A de la norme).
- Perméabilité apparente aux gaz à 90 jours inférieure ou égale à 0,5 · 10⁻¹² m² (selon norme XP P 18-463

1a & 1b- Applications récentes à l'échelle industrielle : Jean Bouin, Achères.
2- Première application en France - fabrication des poutrelles en BPR et BSI destinées à l'aéroréfrigérant de Cattenom.

1a & 1b- Recent applications on an industrial scale: Jean Bouin, Achères.
2- First application in France - production of BPR and BSI beams intended for the Cattenom cooling tower.

adaptée suivant les dispositions du A.2.1 de l'annexe A de la norme).
→ D_{sup} (dimension nominale supérieure du plus gros granulat) inférieure ou égale à 10 mm.

CLASSES

Pour faciliter la spécification des BFUP, des classes ont été définies pour la résistance en compression, la résistance en traction, la consistance, le type de traitement thermique appliqué, la durabilité améliorée et la résistance à l'abrasion.

La classe de résistance en compression d'un BFUP est définie par référence à la résistance caractéristique à 28 jours mesurée sur cylindres de dimensions nominales diamètre 110 mm/hauteur 220 mm (tableau A).

La classe de comportement en traction d'un BFUP est obtenue par comparaison de la limite d'élasticité $f_{ct,el}$ et de la résistance post-fissuration f_{ctf} pour la courbe moyenne et la courbe caractéristique. Elle est déterminée a priori en intégrant de façon forfaitaire la prise en compte sur la phase post-fissuration

du facteur d'orientation K_{global} traduisant l'effet de la mise en œuvre du BFUP dans la structure, le produit ou le composant d'ouvrage, en adoptant pour ce facteur une valeur postulée de 1,25. Ainsi :

- Le BFUP est de classe T1 (adoucissant en traction directe) lorsque $f_{ctf}/1,25 < f_{ct,el}$ aussi bien pour la courbe moyenne que pour la courbe caractéristique, soit $f_{ctfm}/1,25 < f_{ctm,el}$ et $f_{ctfk}/1,25 < f_{ctk,el}$.
- Le BFUP est de classe T2 (peu écrouissant) lorsque $f_{ctf}/1,25 \geq f_{ct,el}$ pour la courbe moyenne et que $f_{ctf}/1,25 < f_{ct,el}$ pour la courbe caractéristique, soit $f_{ctfm}/1,25 \geq f_{ctm,el}$ et $f_{ctfk}/1,25 < f_{ctk,el}$.
- Le BFUP est de classe T3 (très écrouissant) lorsque $f_{ctf}/1,25 \geq f_{ct,el}$ aussi bien pour la courbe moyenne que pour la courbe caractéristique, soit $f_{ctfm}/1,25 \geq f_{ctm,el}$ et $f_{ctfk}/1,25 \geq f_{ctk,el}$.

À défaut d'une spécification associée à une valeur cible, la consistance d'un BFUP à l'état frais peut être spécifiée sous forme de classes :

- a- Ca** : BFUP susceptible d'être autoplaçant, c'est-à-dire généralement apte à être mis en place sans vibration ni aide mécanique à l'écoulement ;
- b- Cv** : BFUP visqueux, c'est-à-dire généralement apte à être mis en place sans vibration mais qui nécessite une aide mécanique à l'écoulement ;
- c- Ct** : BFUP à seuil, c'est-à-dire généralement apte à s'écouler sous l'effet d'un cisaillement dynamique mais dont la surface libre au repos est capable de tenir une pente.

La norme précise les domaines des résultats d'essais de consistance adaptés au BFUP correspondant aux limites de ces classes.

TABLEAU A : CLASSES DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION POUR LES BFUP (Il est possible d'utiliser des niveaux de résistance intermédiaires, arrondis à 5 MPa près)

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres	Résistance caractéristique minimale indicative sur cubes
	f_{ck-cyl} MPa	$f_{ck-cube}$ MPa
BFUP 130/145	130	145
BFUP 150/165	150	165
BFUP 175/190	175	190
BFUP 200/215	200	215
BFUP 225/240	225	240
BFUP 250/265	250	265

© IFSSTAR

Le BFUP est classé selon le traitement thermique qui lui est éventuellement appliqué pour atteindre ses propriétés à l'état durci mature :

→ Il est classé STT lorsqu'il ne fait l'objet d'aucun traitement thermique.

→ Il est classé TT1 lorsqu'il fait l'objet d'une « cure thermique » ou « accélération de l'hydratation par traitement thermique » ou « étuvage » qui vise à anticiper le début de prise et accélérer la prise et le durcissement initial dans le moule par application d'un chauffage modéré.

→ Il est classé TT2 lorsqu'il fait l'objet, plusieurs heures après la prise, d'un traitement thermique à température relativement élevée (de l'ordre de 90°C) et à un degré d'humidité supérieur à 90% pendant quelques dizaines d'heures.

→ Il est classé TT1+2 lorsqu'il fait l'objet des deux types de traitement thermique ci-dessus appliqués successivement.

Il est noté que l'accompagnement du refroidissement d'une structure ou d'un élément en BFUP ne constitue pas une classe de traitement thermique et relève de la norme d'exécution NF P 18-451. Des classes de durabilité potentielle améliorée ont été définies, selon l'atteinte des seuils ci-après :

a- Dp+ : porosité améliorée : porosité à l'eau à 90 jours $\leq 6,0\%$ (selon la norme NF P 18-459) ;

b- Dc+ : résistance améliorée à la diffusion des ions chlorure : coefficient de diffusion des ions chlorure à 90 jours $\leq 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ selon la norme XP P 18-462 adaptée suivant les dispositions du A.1 de l'Annexe A de la norme ;

c- Dg+ : résistance améliorée aux transferts gazeux : perméabilité apparente aux gaz à 90 jours $\leq 1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ selon la norme XP P 18-463 adaptée suivant les dispositions du A.2.2 de l'Annexe A de la norme.

Ces classes de durabilité potentielle améliorée sont notamment valorisées lorsque l'exposition particulièrement sévère ou la durée d'utilisation du projet particulièrement longue le justifie. Enfin, vis-à-vis de l'abrasion associée à des écoulements hydrauliques, le BFUP est classé par sa performance sur la base de son indice d'abrasion, déterminé conformément à l'annexe I de la norme, consistant à comparer l'empreinte formée dans le matériau soumis à un jet de sable à celle qui se forme sur du verre :

a- Classe RM1 : $1 \leq$ indice d'abrasion $< 1,5$ (matériau résistant à l'abrasion « hydraulique ») ;

b- Classe RM2 : $0,7 \leq$ indice d'abrasion < 1 (matériau très résistant à l'abrasion « hydraulique ») ;

c- Classe RM3 : indice d'abrasion $< 0,7$ (matériau ultra-résistant à l'abrasion « hydraulique »).

L'emploi d'une classe adaptée à la sévérité du risque d'abrasion associé à un écoulement hydraulique plus ou moins chargé est destiné à permettre de se dispenser de l'épaisseur sacrificielle prévue par défaut dans la norme de conception.

EXIGENCES

La norme NF P 18-470 précise les exigences qu'un BFUP doit satisfaire pour pouvoir être déclaré conforme. Celles-ci portent sur la composition, sur les propriétés du BFUP à l'état frais et sur les propriétés du BFUP durci. Certaines exigences s'appliquent à tous les BFUP alors que d'autres, optionnelles, dépendent des propriétés requises pour un projet donné. La norme introduit la notion de « carte d'identité » qui contient, le cas échéant, les performances atteintes par un BFUP donné. La norme NF P 18-470 comporte des exigences relatives aux constituants des BFUP, basées sur le retour d'expérience, et décrit également de façon détaillée les exigences associées aux constituants fournis sous forme de pré-mélange.

Elle comporte des exigences de composition incluant notamment une tolérance limitée à $\pm 2\%$ pour chaque constituant pesé (-2% ; $+4\%$ pour les fibres). En cohérence avec la norme de conception NF P 18-710 et sans oublier le respect des exigences associées à une exécution conforme aux dispositions de la future NF P 18-451, l'obtention d'ouvrages durables en BFUP se base généralement sur le respect d'exigences performantielles (tableau B), sans préjuger d'éventuelles dispositions particulières liées par exemple à l'environnement chimique agressif ou au risque d'éclatement sous l'action du feu. La possibilité d'atteindre des durées d'utilisation de projet exceptionnelles se trouve explicitée.

La mise en place du BFUP frais, la cure et les traitements thermiques éventuels font partie des opérations relevant de l'exécution des ouvrages, tout en ayant une incidence critique sur l'atteinte des propriétés spécifiées du BFUP. Aussi la norme NF P 18-470 précise les exigences associées à ces opérations et à leur maîtrise (protocole, paramètres

de contrôle, critères d'acceptabilité), la norme NF P 18-451 détaillant les moyens à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs.

La norme NF P 18-470 détaille enfin les exigences pour les BFUP durcis, liées notamment à leur usage structural et susceptibles d'être spécifiées, en précisant les conditions de leur détermination. Il est noté que sauf spécification contraire ces propriétés doivent être mesurées à 28 jours pour les BFUP de type STT et TT1, ou après application du traitement thermique pour les BFUP de type TT2 ou TT1+2.

Il est précisé que le comportement en traction du BFUP doit faire l'objet d'une spécification comprenant les trois éléments suivants :

→ La classe de comportement en traction ;

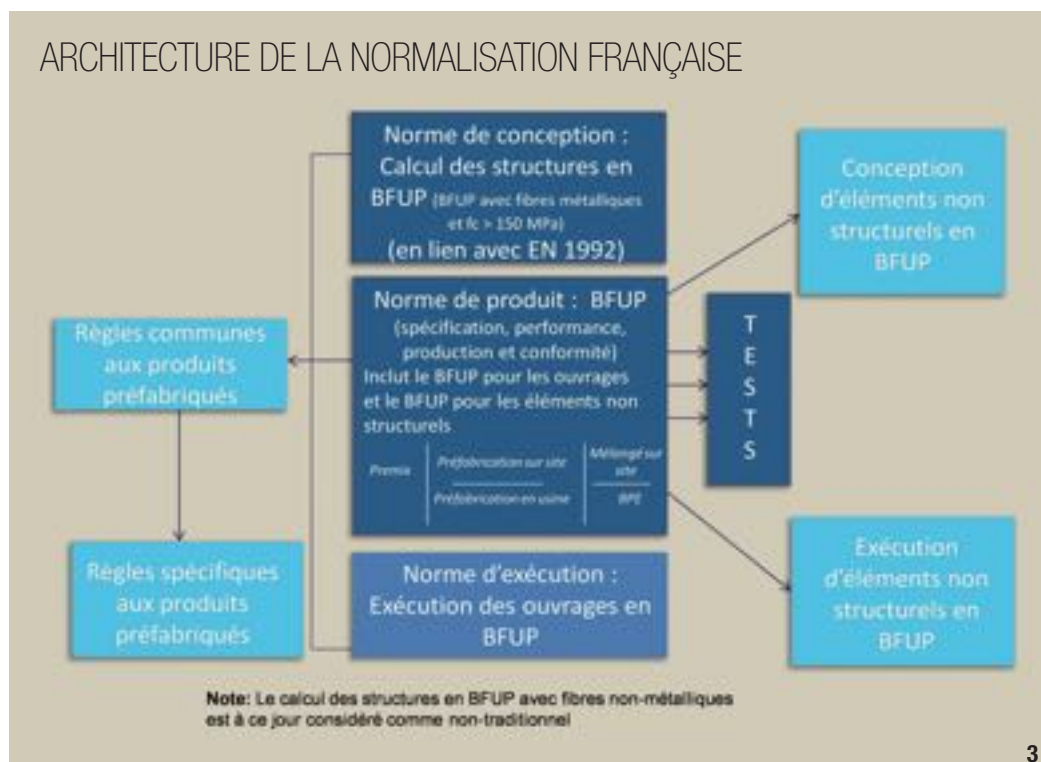
→ La donnée d'une courbe de réponse du matériau en traction, vis-à-vis de laquelle sera comparée l'estimation expérimentale de la courbe caractéristique de comportement déterminée sur éprouvettes moulées ;

→ La donnée d'un jeu de facteurs d'orientation K_{global} et K_{local} , dans les différentes parties d'ouvrages et directions faisant l'objet d'une vérification mobilisant la contribution du BFUP en traction.

La détermination des propriétés physiques et mécaniques à haute température nécessaires à une justification de stabilité au feu par modélisa-

3- Architecture de la normalisation française.

3- French standardisation architecture.



tion thermomécanique est explicitée. Il s'agit d'une détermination forfaitaire conforme à la norme NF EN 1992-1-2 et à son annexe nationale pour l'évolution avec la température de la masse volumique, de la chaleur spécifique et de la conductivité thermique, et d'une évaluation expérimentale basée sur des essais à chaud selon recommandations Rilem, à réaliser en épreuve d'étude ou à documenter dans la carte d'identité du BFUP, pour l'évolution de la résis-

tance en compression, du module d'Young, de la dilatation thermique et du comportement en traction.

La prise en compte du retrait et du fluage des BFUP distingue plusieurs aspects : le développement précoce du retrait endogène et la très faible part des déformations dues à la dessiccation, dès lors que le BFUP est suffisamment mature, qui induisent des précautions spécifiques ; les modalités de détermination de l'amplitude du

retrait total, cette grandeur faisant le cas échéant partie de la carte d'identité du BFUP et pouvant constituer une exigence spécifiée ; la détermination des lois de calcul associées au retrait et au fluage du BFUP, lorsque la norme NF P 18-710 s'applique ; et la maîtrise des déformations différées, sans lien nécessaire avec une justification par calcul.

C'est à la fin de cet article portant sur les exigences que la norme réca-

pitule le contenu (part obligatoire et part optionnelle) de la carte d'identité, document qui est, lorsqu'il existe, associé à une composition nominale de BFUP, à son principe de fabrication et aux traitements pouvant suivre sa mise en œuvre, et qui comprend l'ensemble des caractéristiques du matériau sur lesquelles le producteur s'engage.

ÉTAPES ET RESPONSABILITÉS DANS L'ÉVALUATION DE CONFORMITÉ

La norme NF P 18-470 définit les différentes étapes de contrôle et d'acceptation d'un BFUP ainsi que la partie responsable de la déclaration de conformité aux exigences. Ces étapes comprennent le contrôle du pré-mélange le cas échéant, puis l'épreuve d'étude (adaptée le cas échéant avec le contrôle de la conformité de la carte d'identité), l'épreuve de convenance, le contrôle du BFUP en production à l'état frais, puis à l'état durci après sa mise en place et l'application des éventuels traitements.

La norme NF P 18-470 confirme les conditions de spécification du BFUP comme un BFUP à propriétés spécifiées, l'obtention de ces propriétés par le choix d'un BFUP donné étant issue d'une expérience consolidée dans la carte d'identité du matériau, ou résultant d'une épreuve d'étude.

L'épreuve d'étude, exécutée par le producteur du BFUP et sous sa responsabilité, consiste à vérifier que la formule de BFUP permet de satisfaire les spécifications du projet en tenant compte des tolérances de fabrication (d'où la réalisation de gâchées selon la formule nominale, la dérivée solide et la dérivée liquide). À cet effet, le producteur peut le cas échéant s'appuyer sur l'existence d'une carte d'identité permettant de répondre à tout ou partie des spécifications.

En l'absence de carte d'identité ou d'informations adaptées dans la carte d'identité, il doit réaliser une épreuve d'étude comprenant la détermination des propriétés spécifiées non étudiées préalablement.

La vérification de l'obtention effective des propriétés dans les conditions du projet fait l'objet de l'épreuve de convenance, que le producteur du BFUP doit réaliser afin que le prescripteur puisse valider l'utilisation de la formule de BFUP proposée compte tenu des moyens de fabrication, transport, mise en place, cure et traitements éventuels prévus dans les procédures de production.

TABLEAU B : EXIGENCES PERFORMANTIELLES LIÉES À LA DURABILITÉ (5.3.3)

Classe d'exposition	DUP (a)	Exigence	Commentaire
XC1, XC2, XC3, XC4	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	150 ans	Dp+, Dg+	
XS1, XS2, XD1, XD2, XF2	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+	
XF1, XF3	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	150 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
XS3, XD3	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	Dp+, Dc+	
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+	
XF4	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	Dp+, Dc+, Dg+	
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+ et étude spécifique	
XA1	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	-	Seuils de base du 4.2.2 et exigences spécifiques du 5.1.2
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+	Et exigences spécifiques du 5.1.2
XA2, XA3	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2 et exigences spécifiques du 5.1.2
	100 ans	Dc+	Et exigences spécifiques du 5.1.2
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+	Et exigences spécifiques du 5.1.2 à compléter par une étude spécifique dans le cas XA3 en conditions non statiques
Exigences complémentaires (c) pour la prévention de la réaction sulfatique interne (voir 4.2.1) lorsque la géométrie ou la destination de l'élément, ou le traitement thermique associé au protocole de fabrication et de maturation du BFUP, ne permettent pas d'écarter au cours de la fabrication ou de la vie de la pièce le risque d'exposition à une température supérieure à 65°C maintenue plus de 4 heures.			
XH1	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	150 ans	Dp+	
XH2	50 ans	-	Seuils de base du 4.2.2
	100 ans	(b)	Seuils de base du 4.2.2 et (b)
	150 ans	Dp+ et (b)	
XH3	50 ans	(b)	Seuils de base du 4.2.2 et (b)
	100 ans	Dp+ et (b)	
	150 ans	Dp+, Dc+, Dg+ et (b)	
(a) Les exigences indiquées pour une DUP de 150 ans s'appliquent pour des projets exceptionnels dont la DUP est strictement supérieure à 100 ans. À partir de 200 ans une étude particulière est requise.			
(b) Le risque de réaction sulfatique interne doit être écarté sur la base d'une vérification de performance fondée sur la méthode d'essais LPC66 [5].			
(c) Il n'est pas nécessaire d'appliquer ces exigences complémentaires si le dépassement de la température de 65°C n'intervient qu'en situation accidentelle d'incendie.			

L'épreuve de convenance doit comprendre également la réalisation d'un élément témoin, effectuée sous la responsabilité de l'utilisateur du BFUP frais, permettant la validation de l'ensemble des procédures de production, notamment des modalités de mise en place, cure et traitements thermiques éventuels, par l'atteinte des performances spécifiées. La norme détaille dans les articles appropriés les critères d'acceptation des épreuves d'étude et de convenance, puis les objectifs de maîtrise de la production des BFUP dont les contrôles en production permettent de s'assurer qu'ils sont remplis.

In fine, l'article 10 précise les étapes et responsabilités associées à l'évaluation de conformité d'un BFUP.

L'évaluation de la conformité d'un BFUP à la norme comprend en effet plusieurs étapes qui peuvent ou non correspondre à des transferts de responsabilité :

- a- Évaluation de la conformité du pré-mélange, lorsque le BFUP est produit à partir de ce pré-mélange de constituants (l'évaluation porte sur une conformité potentielle à la carte d'identité du BFUP) ;
- b- Évaluation initiale de conformité du BFUP par acceptation de l'épreuve d'étude intégrant le cas échéant les données de la carte d'identité de ce BFUP (l'évaluation porte sur une conformité à la spécification, sans intégrer l'ensemble des spécificités du processus de production) ;
- c- Évaluation initiale de conformité par acceptation de l'épreuve de convenance (l'évaluation porte sur une conformité complète à la spécification, intégrant à la fois la formule du BFUP et le processus de malaxage, transport, mise en place et traitement) ;
- d- Évaluation de conformité en phase de production sur la base des résul-

tats des épreuves de contrôle associées à la fourniture du BFUP frais ;

- e- Évaluation de conformité en phase de production sur la base des épreuves de contrôle liées à la mise en place du BFUP, aux traitements qui lui sont appliqués, et à l'atteinte des performances spécifiées sur béton durci.

La conformité du BFUP à la norme n'est établie que si la conformité à chacune de ces étapes a été vérifiée, qu'il y ait eu ou non transfert de propriété.

Le producteur d'un pré-mélange de constituants destinés à l'emploi dans des BFUP est responsable de l'évaluation et de la déclaration de conformité aux propriétés spécifiées selon les modalités définies dans l'Annexe G de la norme.

Le producteur du BFUP est responsable de l'évaluation de conformité au stade de l'épreuve d'étude dont les résultats sont soumis au prescripteur pour acceptation. Le producteur du BFUP est responsable de l'évaluation de conformité au stade de l'épreuve de convenance, pour ce qui concerne les vérifications de consistance, de résistance en compression, de comportement en traction déterminé sur éprouvettes moulées, et de teneur en air, de module d'Young et de développement des résistances le cas échéant. L'utilisateur du BFUP est responsable de l'évaluation de conformité au stade de l'épreuve de convenance, pour ce qui concerne les facteurs d'orientation K_{global} et K_{local} et les procédures de mise en œuvre et traitement du BFUP appliquées lors de la fabrication de l'élément témoin en vue de leur validation. Sauf dans le cas de BFUP pour produits préfabriqués relevant de normes de produits, les résultats de l'épreuve de convenance doivent être soumis au maître d'ouvrage pour acceptation. Le producteur du BFUP frais est res-

ponsable de l'évaluation et de la déclaration de conformité du BFUP pour le respect du protocole de production et les propriétés déterminées à l'état frais, et pour les propriétés déterminées à l'état durci au titre de la conformité potentielle du BFUP livré : résistance en compression, comportement en traction, propriétés complémentaires spécifiées éventuelles.

L'utilisateur du BFUP frais, producteur d'un produit, d'un composant ou d'une structure en BFUP durci, est responsable de l'évaluation et de la déclaration de conformité du BFUP pour ce qui concerne la conformité aux protocoles de mise en place, de cure et de traitement(s) thermique(s) éventuel(s), et pour ce qui concerne la conformité aux propriétés déterminées à l'état durci du BFUP mis en œuvre : résistance en compression, comportement en traction, éventuelles propriétés complémentaires spécifiées ou faisant l'objet de contrôles.

CONCLUSION

Le présent article ne prétend pas remplacer le texte complet de la nouvelle norme produit sur les BFUP. On s'est cependant efforcé d'y mettre en évidence les points les plus marquants du texte, en particulier lorsqu'ils précisent ou formalisent les indications des

recommandations Afgc 2013, dans la perspective des situations contractuelles variées où les BFUP seront, on l'espère, appelés à connaître des utilisations de plus en plus nombreuses. Même si la mise au point de la norme a contribué à figer certains paramètres, les dispositions associées aux essais permettant de déterminer les propriétés spécifiées des BFUP ne sont pas toutes stabilisées, et des indications de fidélité et de variabilité manquent notamment concernant les paramètres de transfert, les propriétés à haute température, le retrait ou le fluage. Des dispositions de contrôle non destructif éprouvées pourraient permettre, à terme, d'alléger les dispositions destinées à assurer la répétabilité de la mise en œuvre en vue de l'obtention des propriétés de non-fragilité souhaitées. Une révision de la norme pourra donc être nécessaire assez vite, en particulier si le document peut s'enrichir, sans se dénaturer, de discussions menées au niveau européen. L'étape que constitue la publication de cette norme produit, en lien avec la norme de conception et la future norme d'exécution, n'en reste pas moins un acquis important en faveur d'une utilisation plus large des BFUP, sans dégradation de leur qualité ni de la sûreté des ouvrages. □

GROUPE DE RÉDACTION DU PROJET DE NORME

PARTICIPANTS :

- François Toutlemonde, Ifsttar
- Sébastien Bernardi, LafargeHolcim
- Christian Clergue, Vicat
- Pierre Pimienta, Cstb
- Patrick Rougeau, Cerib
- Alain Simon, Eiffage Tp
- Michel Delort, Atilh (animateur du groupe de rédaction et du GE BFUP au sein de la commission de normalisation française des bétons (P18B))

ABSTRACT

THE NEW FRENCH PRODUCT STANDARD ON UHPFRCs (NF P 18-470)

FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR

Ultra-high-performance fibre-reinforced concretes (UHPFRCs), of characteristic compressive strength ranging between 130 and 250 MPa, now have their standard, the equivalent of the NF EN 206/CN standard for concretes. The document, approved for publication on 7 October 2015 by the French Concrete Standardisation Committee, describes in detail the properties of UHPFRCs and the measures enabling their definition and specification. Based on the future standard for execution of structures in UHPFRC, it specifies the requirements relating to production of the material and the conditions for assessing it and determining its conformity. This free-standing standard is designed to promote the safe use of UHPFRCs and serve as an international model. □

LA NUEVA NORMA FRANCESA DE PRODUCTOS SOBRE LOS HMAR (NF P 18-470)

FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR

Los HMAR, de resistencia característica en compresión comprendida entre 130 y 250 MPa, ya tiene su propia norma, equivalente a la norma NF EN 206/CN para los hormigones. Aprobada para su publicación el 7 de octubre de 2015 por la comisión francesa de normalización de los hormigones, el texto detalla las prestaciones de los HMAR y las disposiciones que permiten determinarlas y especificarlas. Basándose en la futura norma de ejecución de obras en HMAR, precisa las exigencias asociadas a la producción del material y las condiciones que permiten evaluar y determinar su conformidad. Esta norma específica tiene como objetivo favorecer el empleo seguro de los HMAR y fomentar el conocimiento de este material a escala internacional. □

NORME NF P18-710 POUR LE CALCUL DES STRUCTURES EN BFUP

AUTEURS : GRÉGORI GÉNÉREUX, INGÉNIEUR D'ÉTUDES EN OUVRAGES D'ART, DIRECTION TECHNIQUE INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT ET MATÉRIEAUX, CEREMA - JACQUES RESPLENDINO, DIRECTEUR SUD-EST, SETEC TPI

LA NORME NF P18-710 S'INTITULE « CALCUL DES STRUCTURES EN BÉTON : RÈGLES SPÉCIFIQUES POUR LES BÉTONS FIBRÉS À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES ». APRÈS AVOIR DÉTAILLÉ LA NORME ET SA MISE AU POINT EN COMMISSION, ON DÉCRIT CE QUI DISTINGUE UN BFUP D'UN BÉTON CLASSIQUE AU NIVEAU DU CALCUL, PUIS SONT PRÉSENTÉES L'ÉVOLUTION DES RECOMMANDATIONS AFGC ET LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA NORMALISATION DES BFUP.

MISE AU POINT DE LA NORME

OBJET DE LA NORME

L'objectif premier de rédaction des normes dédiées au BFUP (norme matériau, norme calcul et norme exécution) a été de consolider l'important retour d'expérience acquis sur ces matériaux depuis près de vingt ans.

Pour la norme relative au calcul des structures en BFUP, l'idée a donc été de partir du chapitre calculs des recommandations 2013 sur les BFUP du groupe de travail de l'Association Française de Génie Civil (Afgc) et de transformer le document en norme qui s'intègre totalement dans l'esprit des Eurocodes. Cette démarche constitue une suite logique du travail fait pour les recommandations BFUP 2013, puisque le chapitre 2 des recommandations a été rédigé de façon à être « Eurocode 2 compatible ».

La norme concernant le calcul des structures en BFUP est nommée norme NF P18-710 « Complément national à l'Eurocode 2 - Calcul des structures en béton : règles spécifiques pour les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP) ». Elle a pour objet le calcul des structures en BFUP non armé, armé ou précontraint, les structures visées étant les bâtiments et les

ouvrages de génie civil. Cette norme donne ainsi les exigences en matière de résistance mécanique, d'aptitude au service, de durabilité et de résistance au feu pour ces structures. Elle donne également quelques éléments vis-à-vis du calcul de ces structures pour leur résistance au séisme puisque désormais, avec la nouvelle carte sismique de la France, le problème du calcul sismique se pose de plus en plus.

Les éléments relatifs au séisme ont bien sûr été validés par la commission de Normalisation Parasismique (CN/PS) en charge de la rédaction de l'ensemble des textes normatifs relatifs au risque sismique (Eurocode 8).

Conformément au domaine d'application des recommandations Afgc 2013, les BFUP couverts par la norme de calcul ne concernent que les BFUP structurels contrairement à la norme matériau qui a élargi le champs couvert par les recommandations aux BFUP structurels et non structurels qui permettent de répondre à un nombre important d'applications (équipements, mobiliers urbains, panneaux d'habillage) et qui pourront faire l'objet de normes produits spécifiques ultérieures autant que nécessaire.

Au sens de la norme matériau NF P18-470 « BFUP : spécification, perfor-

mance, production et conformité » les BFUP structurels couverts par la norme calculs NF P18-710 sont les BFUP-S, c'est-à-dire que les fibres qui les composent sont des fibres métalliques.

Leur résistance mécanique caractéristique en compression est comprise entre 150 et 250 MPa, leur résistance caractéristique en traction est supérieure à 6 MPa et ils ont un comportement suffisamment ductile en traction imposé par la norme. À noter également que ces BFUP doivent avoir une masse volumique comprise entre 2300 et 2800 kg/m³.

La norme NF P18-710 est destinée à être utilisée conjointement avec d'autres normes, à savoir la norme matériau NF P18-470 en cours de publication et la norme P18-451 concernant l'exécution des structures en BFUP qui paraîtra dans un deuxième temps.

Élaborée en totale cohérence avec l'Eurocode 2, la norme NF P18-710 est également destinée à être utilisée conjointement avec les Eurocodes 0 et 1 en ce qui concerne les bases du calcul et les actions et avec les Eurocode 7 et 8, et leurs compléments nationaux en ce qui concerne les fondations des structures et la conception parasismique.

RÉDACTION AU SEIN DE LA COMMISSION BNTRA CN EC2

La rédaction et la gestion de cette norme ont été confiées à la commission BNTRA CN EC2 « Calcul des structures en béton », présidée par Jacques Cortade.

Cette commission est la commission miroir française du CEN/TC 250/SC2, groupe européen en charge de la rédaction et de la gestion de l'Eurocode 2, code de calcul actuellement composé de 8 normes : NF EN 1992-1-1 « Règles générales et règles pour le bâtiment », NF EN 1992-1-2 « Calcul du comportement au feu », NF EN 1992-2 « Ponts en béton - Calcul et dispositions constructives », NF EN 1992-3 « Silos et réservoirs » et leurs quatre Annexes Nationales respectives, indispensables à l'application de l'Eurocode 2 en France.

Les missions principales de la commission BNTRA CN EC2 sont le suivi et la participation aux échanges européens concernant l'Eurocode 2, la rédaction et le suivi des Annexes Nationales (les premières versions des Annexes Nationales de l'Eurocode 2 ont été rédigées au milieu des années 2000) et une aide à l'application et à la compréhension de l'Eurocode 2 faite par le biais d'un fascicule de documentation ▷

FD P18-717 intitulé « Guide d'application des normes NF EN 1992 » paru en décembre 2013 et qui sera réexaminé périodiquement par la commission. Pour rédiger la norme NF P18-710 sur le calcul des structures en BFUP, la commission s'est organisée de façon assez classique en créant un sous-groupe dédié qui s'est réuni avec un rythme soutenu pendant un peu plus d'une année. Ce sous-groupe a intégré plusieurs membres du Groupe de travail Afgc sur les BFUP et a été piloté par Jacques Resplendino et Grégory Généreux. Une fois le document rédigé par le sous-groupe, celui-ci a été validé par le groupe plénier et a été soumis à l'enquête publique pendant une durée de deux mois.

CONSTRUCTION DU DOCUMENT

La norme NF P18-710 est construite en adaptant l'Eurocode 2 au cas des structures en BFUP. La plupart des parties spécifiques au calcul des structures en BFUP sont issues de la partie 2 « Méthodes de dimensionnement des structures » des recommandations BFUP 2013 (figure 1) qui suit en partie le plan de l'Eurocode 2.

L'essentiel du travail a alors consisté à compléter les recommandations et à reprendre l'ensemble de la rédaction pour la rendre conforme aux exigences d'une norme.

Le choix a été fait de pousser la démarche entreprise pour les recommandations jusqu'au bout en suivant au maximum l'Eurocode 2. Le sommaire de la norme NF P18-710 est donc identique à celui de la partie 1-1 de l'Eurocode 2 (« Règles générales et règles pour les bâtiments »), c'est-à-dire que les douze différentes sections ainsi que l'ensemble des annexes y sont reconduites.

La norme NF P18-710 est donc établie en se positionnant de façon systématique par rapport aux différents paragraphes de l'Eurocode 2. L'utilisation de la mention « Inchangé » ou de la mention « Ne s'applique pas » a également été faite de nombreuses fois lorsqu'il n'y a pas de spécificité calculatoire des BFUP par rapport aux bétons couverts par l'Eurocode 2, ou au contraire lorsque les paragraphes de l'Eurocode 2 ne s'appliquent pas aux structures en BFUP. Ce choix présente l'inconvénient que la norme n'est pas tout fait autoportante mais cela permet de mettre en exergue ce qui est spécifique au calcul des structures en BFUP par rapport au calcul des structures en béton classique. Un ingénieur ayant une

bonne connaissance de l'Eurocode 2 n'est alors pas dépaycé (ne serait-ce qu'en termes de numérotation des différentes parties) et trouve directement ce qui l'intéresse le plus lorsqu'il lit cette norme, à savoir les parties spécifiques au BFUP.

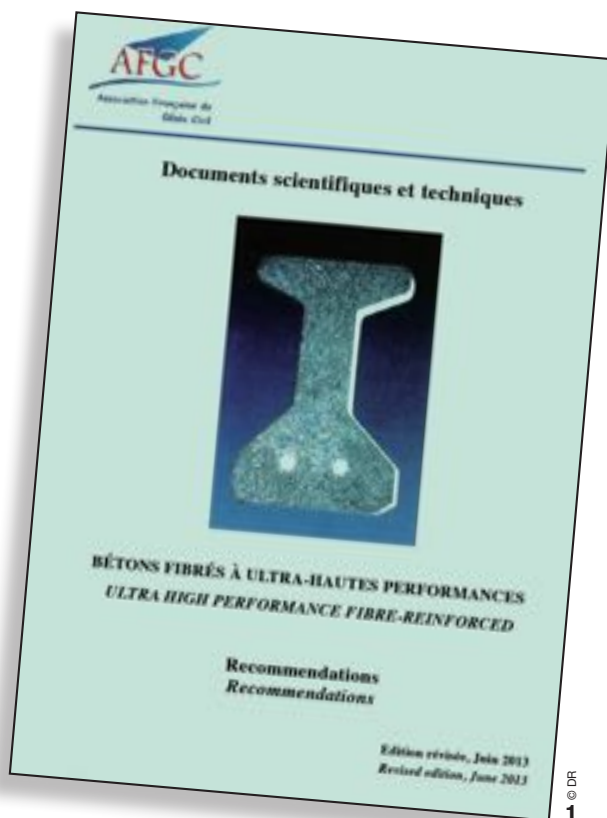
L'Annexe Nationale de la partie 1-1 de l'Eurocode 2 a également été prise en compte, ainsi que la partie 2 (« Ponts en béton ») et son Annexe Nationale. La norme NF P18-710 a également nécessité la rédaction de cinq annexes spécifiques (3 annexes normatives et 2 annexes informatives) qui sont les suivantes :

- Calcul du comportement au feu des BFUP (normative) ;
- Adaptation de la procédure d'agrément technique européen aux ancrages de précontrainte utilisés dans un BFUP (normative) ;
- Valeurs indicatives de caractéristiques du BFUP (informatives) ;
- Calcul des structures en BFUP pour leur résistance aux séismes (normative) ;
- Calculs avancés (informatives).

Au total, la norme NF P18-710 est un document d'environ 150 pages.

SPÉCIFICITÉS DE LA NORME NF P18-710 PAR RAPPORT À L'EUROCODE 2

Cette partie du présent article décrit les paragraphes de la norme NF P18-710 spécifiques au calcul des structures



1- Recommandations de l'Afgc sur les BFUP de 2013.

1- Afgc recommandations on UHPFRCs in 2013.

en BFUP. Cette partie est donc plutôt destinée aux ingénieurs qui ont une bonne connaissance de l'Eurocode 2 avec l'utilisation de bétons classiques (C12/15 à C90/105) et qui voudraient avoir une vision de ce qui diffère avec les BFUP. Cela permet également de mettre en avant les avantages que peut apporter le BFUP dans une conception de structure.

Le premier élément qui diffère entre les bétons classiques et les BFUP, et que permet la norme NF P18-710, est la prise en compte de la résistance en traction du BFUP, y compris après fissuration. Cette prise en compte est possible pour les calculs de flexion à l'ELU et à l'ELS, pour les calculs d'effort tranchant et de torsion à l'ELU. Il est également possible de prendre en compte cette résistance en traction dans les tirants d'un modèle bielle-tirants à l'ELU, ainsi que dans certains chaînages des bâtiments.

Pour des études d'exécution, comme un assez grand nombre de paramètres du BFUP, l'ensemble du comportement en traction doit être déterminé après réalisation d'épreuves d'études et de convenue, suivant les annexes adéquates de la norme matériau NF P18-470. La réalisation de ces épreuves d'études et de convenue pour la résistance en traction est tout à fait spécifique et indispensable pour les BFUP. Elle permet de vérifier que le matériau choisi et les méthodes de mise en œuvre dans les conditions réelles permettent d'obtenir une dispersion d'orientation des fibres dans la structure réelle satisfaisante, qui permet d'obtenir le niveau de résistance attendu conforme à la conception, tant au niveau local qu'au niveau global (notion de facteur d'orientation des fibres K pondérant la résistance issue des essais de laboratoire pour obtenir la valeur de la résistance dans la structure réelle).

Suivant la nature du comportement du BFUP en traction (adoucissant, peu écrouissant, fortement écrouissant), le travail à partir des essais est mené en exprimant les contraintes en fonction soit de la déformation, soit de l'ouverture de fissures. Si la nature du BFUP oblige à exploiter l'essai en exprimant les contraintes en fonction de l'ouverture des fissures, une expression mathématique, donnée dans la norme NF P18-710, permet de passer de l'ouverture de fissure à la déformation. Afin d'obtenir les lois de calculs à utiliser dans les calculs d'exécution, les lois issues des essais doivent être écrites d'une façon précise, décrite dans la norme de calcul, afin de tenir compte notamment du facteur d'orientation des fibres K (pour les BFUP très écrouissants, il n'y a pas d'écraillage à faire, mais le mode de construction de la loi est particulier et est décrit dans la norme NF P18-710).

Une illustration d'un exemple de comportement d'un BFUP à l'ELU est donnée sur la figure 2.

Cette prise en compte de la résistance en traction du BFUP, y compris après fissuration, a donc impliqué la définition de nouvelles notions par rapport à l'Eurocode 2, comme le coefficient partiel relatif au BFUP tendu γ_{df} , le facteur d'orientation K qui peut être associé à des effets globaux ou locaux, le fait que le comportement en traction dépende de l'épaisseur des éléments. Une distinction est faite entre un élément mince et un élément épais, un élément mince étant défini comme un

élément dont l'épaisseur est inférieure à trois fois la longueur des fibres composant le BFUP.

Dans ces éléments l'effet des parois engendre une orientation des fibres plutôt en deux dimensions qui change notablement la résistance du matériau par rapport à une orientation 3D classique au sein de pièces épaisses. Il y a aussi la définition de trois classes pour le BFUP suivant le comportement en traction (adoucissant, peu écrouissant, très écrouissant) et une façon de calculer éventuellement différente suivant la classe.

Le deuxième point important qui distingue la norme NF P18-710 de l'Eurocode 2 est la nouvelle façon de considérer la non fragilité. En effet, l'Eurocode 2, via sa section 9, impose à l'ensemble des éléments (poutres, dalles, poteaux etc.) de posséder un pourcentage d'armatures minimale $A_{s,min}$ afin d'empêcher une rupture fragile, de larges fissures et également pour résister à des efforts provenant d'actions gênées. Pour les BFUP, cela a été modifié et passe désormais par le respect de deux conditions, une portant sur le matériau lui-même et une portant sur une vérification des sections. Il est important de noter que, si le calcul le permet et si les deux conditions de non fragilité sont satisfaites, il est possible de se dispenser totalement d'armatures (de béton armé ou de précontrainte). Par rapport à du béton classique, il est important de souligner que les bonnes performances du BFUP en

traction permettent de réduire les longueurs d'ancrage et de recouvrement des armatures de béton armé, cela a été vérifié via de nombreux essais en laboratoire. Les paragraphes relatifs à la longueur d'ancrage de la norme NF P18-710 ont donc été modifiés par rapport à l'Eurocode pour intégrer un coefficient δ , qui permet de réduire de façon assez significative les longueurs d'ancrage et de recouvrement, à la fois pour la partie forfaitaire du calcul de longueur d'ancrage ($l_{b,min}$) et pour le calcul « direct » ($l_{b,req}$).

Compte tenu de la plus grande rigueur apportée lors de l'exécution des structures en BFUP par rapport à des structures en béton classique, il a été nécessaire dans la norme NF P18-710 de laisser la possibilité de diminuer les imperfections géométriques à retenir pour le calcul. Cependant, comme ce sujet a vocation à être traité dans

la future norme relative à l'exécution des structures en BFUP dont la rédaction n'avait pas commencé lors de la rédaction de la norme NF P18-710, seule une phrase du type « la valeur peut être réduite si des dispositions spécifiques sont prises en compte à l'exécution » et des notes avec des exemples de diminutions possibles ont été données.

Un autre point important concerne les bonnes performances des BFUP par rapport aux aspects liés à la durabilité (porosité à l'eau, perméabilité à l'oxygène, pénétration des ions chlorure, etc.). Par rapport à l'Eurocode 2, la norme NF P18-710 modifie donc assez grandement ce qui est lié au calcul d'enrobage, ce qui permet de retenir des enrobages sensiblement réduits par rapport aux bétons classiques. Concernant ce sujet, il est important de souligner que la longueur des fibres métalliques devient un paramètre déterminant du calcul de l'enrobage, puisque celui-ci doit être supérieur à 1,5 fois la longueur des fibres, sauf justification par essai de convenance spécifique.

Il peut être ensuite important de souligner le nouveau calcul des ouvertures de fissures présenté dans la norme NF P18-710. Celui-ci intègre la prise en compte de la résistance en traction du BFUP ce qui rend le calcul plus complexe que le calcul proposé par l'Eurocode 2.

La complexité est également accrue du fait que les trois cas différents, BFUP

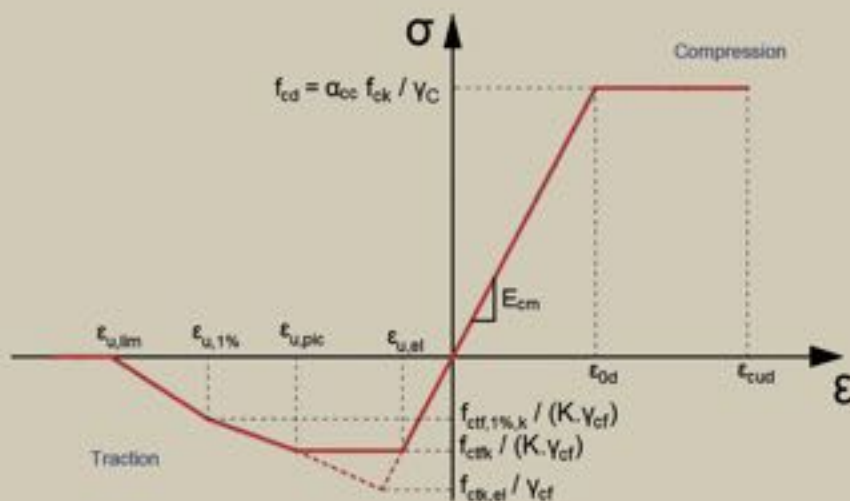
non armé, BFUP armé et BFUP précontraint sont traités. La méthode simplifiée qui figure dans l'Annexe Nationale l'Eurocode 2 partie 2 (Pont en béton) qui consiste à limiter les contraintes dans les armatures de béton armé et leur espacement n'a pu être reconduite pour les BFUP.

Enfin, pour un ingénieur en charge de la conception d'une structure en BFUP, il faut noter que par rapport à une structure en béton classique, les normes BFUP « matériau » et « calcul » exigent des essais pour un nombre beaucoup plus important de paramètres, il n'est donc pas possible, comme dans l'Eurocode 2, de déduire la quasi-totalité des paramètres à partir de la seule donnée de la résistance caractéristique en compression f_{ck} . Les paramètres que l'on doit déterminer expérimentalement sont la résistance caractéristique en compression f_{ck} , le module de Young E_{cm} , l'ensemble du comportement en traction, les lois de fluage, de retrait et le comportement au feu. Pour éviter de refaire systématiquement les essais pour un BFUP connu, la notion de carte d'identité a été intégrée aux normes BFUP. Il est également important de noter que ces essais sont nécessaires au stade des études d'exécution (épreuves d'études et de convenance). Pour des études préliminaires ou de projet, et en l'absence d'essais ou de carte d'identité, une annexe informative a été mise au point dans la norme NF P18-710 pour donner des valeurs indicatives de caractéristiques du BFUP, ce qui permet de pré-dimensionner relativement finement des ouvrages en BFUP et de les comparer à d'autres types de solutions (béton armé, béton précontraint, métal etc.) dans les phases amont des projets.

2- Exemple d'une relation contrainte-déformation pour le calcul de sections à l'ELU.

2- Example of a stress-strain relation for ULS section design.

EXEMPLE D'UNE RELATION CONTRAINTE-DÉFORMATION POUR LE CALCUL DE SECTIONS À L'ELU



AVANTAGES DU BFUP DANS LA CONCEPTION DE STRUCTURES

Les principaux avantages apportés par le BFUP dans la conception des structures sont rappelés ci-dessous :

→ De par ses caractéristiques mécaniques élevées (résistance en compression supérieure à 150 MPa, résistance en traction pouvant être prise en compte avec une limite d'élasticité en caractéristique de l'ordre de 8 MPa), il y a un réel gain de matière par rapport à d'autres solutions, les structures en BFUP pouvant globalement être fines et légères (diminution par 2 ou 3 des quantités de béton par rapport à un béton classique).

La forte résistance en compression associée à un module élevé en fait un matériau très adapté pour reprendre des descentes de charges verticales importantes avec une section relativement faible.

→ Le fait de pouvoir retenir une résistance en traction non négligeable dans le calcul ne permet généralement pas de se dispenser des armatures principales (armatures de béton ou de précontrainte) mais permet dans la plupart des cas de se dispenser des cages d'armatures secondaires (armatures d'effort tranchant et de torsion), ce qui est un avantage indéniable, et conduit à véritablement révolutionner la conception des structures. En effet, la forme générale des structures en Béton Armé et Béton Précontraint est guidée par la présence des armatures de béton armé :

- Épaisseur minimale imposées par la nécessité d'avoir un bras de levier pour les armatures et de disposer d'un enrobage minimal ;
- Forme des sections angulaire quasi-indispensable pour arriver à ferrailer les pièces et éviter les poussées au vide dans les armatures.

Avec les structures BFUP toutes ces exigences disparaissent :

- Dans les pièces sans armatures, plus les éléments sont minces, meilleure est la résistance. La conception de structures en BFUP peut ainsi conduire à réaliser des éléments très minces qui sortent complètement des épures traditionnelles. La conception exige alors des tolérances et un soin à l'exécution beaucoup plus importants que dans les solutions classiques, ainsi que des vérifications en déformations et lors des phases transitoires d'exécution plus poussées ;
- L'absence de cages d'armatures de confinement permet de réaliser des pièces de forme quelconque pour lesquelles on préférera éventuellement des formes arrondies qui facilitent la mise en place du matériau.
- Ces avantages en font un matériau très apprécié par les architectes, car il peut être la réponse technique la plus adaptée pour les formes courbes et les épaisseurs fines ;
- Il faut noter que la résistance à la compression et à la traction élevée du BFUP en fait un matériau très adapté à la précontrainte, puisque l'on peut, d'une part, le comprimer très fortement et, d'autre part, utiliser peu voire pas d'armatures de fret-

tage grâce à la résistance en traction. Dans le domaine des ponts et des passerelles piétonnes, les structures en BFUP précontraint permettent de franchir des travées relativement importantes (par exemple plus de 76 m pour la travée centrale la passerelle du MuCEM, pour un élanement au 42,5°). À noter que ces performances imposent également une très grande rigueur à l'exécution : plus les pièces sont minces et précontraintes, plus les tolérances sur la géométrie des sections et la position des armatures doit être réduite pour garantir la maîtrise des efforts et des déformations des ouvrages.

ÉVOLUTIONS PAR RAPPORT AUX RECOMMANDATIONS TRAVAIL EFFECTUÉ POUR PASSER DES RECOMMANDATIONS À LA NORME

Le travail effectué par le sous-groupe BFUP de la commission BNTRA CN EC2 a été allégé du fait qu'on repartait d'un document existant, les recommandations Afgc sur les BFUP, mais il a quand même été conséquent :

- Il y a tout d'abord eu un important travail de reprise de la rédaction des recommandations, pour la rendre « normative ». Cela a consisté à reprendre un grand nombre de tournures de phrase, notamment pour enlever le maximum d'ambiguïté et pour être plus directif. Tout

ce qui est commentaires explicatifs a été supprimé car une norme n'a pas vocation à être un guide pour les ingénieurs mais bien seulement à donner des exigences. Toutes les parties où les différentes marques de BFUP étaient citées ont également dû être supprimées.

Un important travail a dû également être fait pour choisir les parties des recommandations destinées à la norme « matériau » et celles destinées à la norme « calcul », avec la mise au point de renvois entre les deux normes.

La présence d'experts participants à la rédaction des deux normes était à ce titre indispensable.

Une autre part du travail important qui a été fait est la rédaction de parties

complémentaires aux recommandations, pour être pleinement en phase avec l'Eurocode 2.

Tout ce qui concerne la section 1 « Généralités », la section 2 « Bases de calcul » et la section 5 « Analyse structurale » (qui comprend notamment le calcul au flambement) de l'Eurocode 2 a dû être travaillé. Le détail des compléments est donné dans une partie suivante du présent article.

Ce travail a aussi été l'occasion de répertorier les sujets qui nécessitent des développements ultérieurs (travaux de recherches en laboratoire, numériques, etc.) avant de pouvoir figurer dans une norme. Ces sujets ont été renvoyés au groupe Afgc sur les BFUP afin de les traiter et de les faire figurer dans quelques années dans les normes. Le détail est donné dans une partie suivante du présent article.

Enfin, un important travail au niveau de la forme (règles éditoriales de l'Afnor à respecter) et la rédaction d'un avant-propos propre à la norme ont dû être faits.

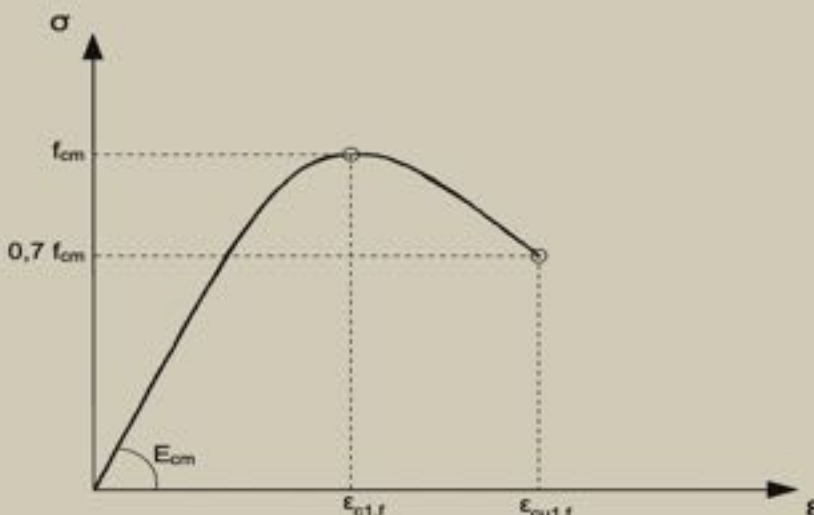
3- Représentation schématique de la relation contrainte-déformation pour l'analyse structurale non linéaire pour le BFUP.

3- Schematic representation of the stress-strain relation for nonlinear structural analysis of UHPFRC.

COMPLÉMENTS PAR RAPPORT AUX RECOMMANDATIONS

Cette partie du présent rapport est plutôt destinée aux ingénieurs ayant une bonne connaissance des recommandations Afgc 2013 sur les BFUP car elle met en avant les compléments apportés par la norme NF P18-710 par rapport aux recommandations.

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA RELATION CONTRAINTE-DÉFORMATION POUR L'ANALYSE STRUCTURALE NON LINÉAIRE POUR LE BFUP



Les sujets principaux nouveaux traités par la norme sont les suivants :

- Rédaction de l'équivalent de la section 5 « Analyse structurale » : d'un point de vue de l'analyse structurale stricte, la norme NF P18-710 suit globalement l'Eurocode 2, sauf pour l'analyse avec modèles bielles et tirants où il a été décidé de ne pas reconduire le paragraphe permettant d'effectuer des vérifications à l'ELS avec des modèles bielles-tirants. L'apport principal de la norme par rapport aux recommandations concernant cette section est la rédaction des parties permettant de faire un calcul au flambement. Globalement, c'est la méthode générale de la partie 1-1 de l'Eurocode 2 qui a été adaptée au cas des BFUP en permettant la prise en compte de la résistance en traction du BFUP. À ce sujet, il a fallu également définir précisément le comportement à retenir pour le calcul au flambement en compression (loi Sargin). Cette loi figurait dans la partie B de l'annexe 2 des recommandations et a été précisé dans la norme. Une représentation schématique est donnée sur la figure 3.
- Travail pour la rédaction de l'équivalent de la partie 6.8 « Fatigue » de l'Eurocode 2 : l'idée pour cette partie était tout d'abord de reconduire les principaux cas d'exclusion de vérifications à la fatigue de l'Eurocode 2 (bâtiments courants, fondations etc.), puis de faire en sorte que les procédures de vérification pour les armatures de béton armé et les armatures de précontrainte (courbe S-N) soient utilisables pour le BFUP armé ou précontraint. Des

vérifications plutôt simples et sécuritaires ont été établies pour le BFUP comprimé et le BFUP tendu, utilisant plusieurs résultats de thèses ayant travaillé sur la résistance à la fatigue des BFUP.

- Travail pour la rédaction de l'équivalent de la partie 9.10 « Chaînages » de l'Eurocode 2 : l'idée pour cette partie est de pouvoir utiliser la résistance du BFUP tendu pour certains chaînages de bâtiments.
- Les formules concernant les vérifications à l'ELU de l'effort tranchant, de torsion et poinçonnement ont été précisées par rapport aux recommandations, notamment pour mieux distinguer les trois cas bien distincts que sont les éléments en BFUP non armé, les éléments en BFUP armé et les éléments en BFUP précontraint. À noter également que le cas des charges concentrées près des appuis pour l'effort tranchant a été pleinement traité la norme NF P18-710 alors que ce n'était pas le cas dans les recommandations.
- Un travail a été fait pour modifier légèrement les formules de longueur d'ancrage et de recouvrement des armatures car le projet de recherche BADIFOPS (BFUP armés ductiles instrumentés par fibres optiques pour des applications parasismiques) qui contenait un certain nombre d'essais d'arrachement de barres HA ancrées dans du BFUP a montré que les formules des recommandations, méritaient d'être complétées notamment lorsque le rapport enrobage sur diamètre de l'armature est faible.
- Une nouveauté introduite dans la norme NF P18-710 par rapport aux recommandations est également la

possibilité de réduire le coefficient partiel relatif au BFUP en compression de 1,5 en situation de projet durable et transitoire à 1,3 et de 1,2 à 1,05 en situation accidentelle lorsque le BFUP est produit à partir d'un pré-mélange de constituants. Cela a été justifié à partir d'une série d'essais en laboratoire.

SUJETS MÉRITANT DES DÉVELOPPEMENTS ULTÉRIEURS

Peu d'éléments manquent pour avoir une norme de calcul sur le BFUP qui soit totalement équivalente à l'Eurocode 2. Les éléments qu'il faudrait avoir à disposition pour être pleinement en phase avec l'Eurocode 2 sont les suivants :

- Essais de fatigue sur du BFUP non armé, armé ou précontraint, pour mettre au point des formules plus fines de vérifications à la fatigue ;
- Essais de poinçonnement sur du BFUP armé et précontraint pour mettre au point des formules de résistance au poinçonnement intégrant la participation des armatures ;
- Essais de compression sur des éprouvettes de BFUP confiné par des cadres pour mettre au point des formules analogues au 3.1.9 « Béton confiné » de l'Eurocode 2 ;
- Rédaction de règles spécifiques pour les silos et les réservoirs.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le présent article détaille la norme NF P18-710 concernant les règles spécifiques de calcul des structures en BFUP. Cette norme établie en totale cohérence avec l'Eurocode 2 s'inscrit

dans la continuité des recommandations de l'Afgc 2013 et devrait constituer un outil très précieux et utile pour tous les projets BFUP dès l'année 2016. Cette norme, tout comme la norme « matériau » et la norme « exécution » qui viendra dans un futur proche, répond à l'attente française de normaliser ce matériau. Elle devrait à ce titre faciliter les questions d'assurabilité des projets de bâtiments et de génie civil.

On peut également raisonnablement penser que les groupes européens en charge de la rédaction des Eurocodes saisiront à court ou moyen terme le sujet des BFUP et la France aura alors une matière importante à apporter aux réflexions européenne en ayant des normes nationales sur le sujet, sanctionnées par un certain nombre d'années d'expérience. Cela permettra de faire valoir au mieux les pratiques françaises au niveau européen lorsque le sujet du BFUP sera en discussion. Enfin, si à ce jour nous avons une norme qui donne les règles spécifiques pour les BFUP par rapport à l'Eurocode 2, le travail est encore important pour compléter les règles spécifiques pour les BFUP par rapport à l'Eurocode 8.

Le domaine de la conception parasismique est un domaine dans lequel l'apport des BFUP devrait certainement se développer notamment au niveau du confinement apporté par les fibres et de la pertinence de solution de renforcement de structure existante (rajout d'armatures de renfort en flexion dans un confinement mince en BFUP). Plusieurs essais prometteurs ont été réalisés sur le sujet, mais un travail important reste à faire pour traduire ces résultats en textes normatifs. □

ABSTRACT

FRENCH STANDARD NF P18-710 FOR THE DESIGN OF STRUCTURES IN UHPFRC

GRÉGORY GÉNÉREUX, CEREMA - JACQUES RESPLENDINO, SETEC TPI

This article goes back in detail over French standard NF P18-717: "Design of concrete structures: special rules for ultra-high-performance fibre-reinforced concretes (UHPFRCs)". Part One of this article describes in detail the purpose of the standard and its development in the BNTRA CN EC2 committee on "Concrete structural design", while Part Two focuses on what is different at the design level between an UHPFRC and a "conventional" concrete, and is one of the key qualities of the UHPFRC design. The last part outlines the changes between French civil engineering association AFGC's recommendations on UHPFRCs and the NF P18-710 standard. The article ends with the outlook for further standardisation work on these materials. □

NORMA NF P18-710 PARA EL CÁLCULO DE LAS ESTRUCTURAS EN HMAR

GRÉGORY GÉNÉREUX, CEREMA - JACQUES RESPLENDINO, SETEC TPI

El presente artículo aborda de forma detallada la norma NF P18-717 "Cálculo de las estructuras de hormigón: normas específicas para los hormigones de muy alta resistencia reforzados con fibra (HMAR)". La primera parte de este artículo detalla el objeto de la norma y su elaboración en el seno de la comisión BNTRA CN EC2 "Cálculo de las estructuras de hormigón". La segunda parte hace hincapié en la diferencia de cálculo entre un HMAR y un hormigón "clásico", que constituye una de las principales ventajas del HMAR en el diseño. La última parte presenta las evoluciones entre las recomendaciones AFGC sobre los HMAR y la norma NF P18-710. El artículo termina con las perspectivas de los futuros trabajos de normalización sobre estos materiales. □



1
© CEREMA

EMPLOI STRUCTURAL DES BFUP EN GÉNIE PARASISMIQUE : RÉFLEXIONS ET ÉTUDE DE CAS

AUTEURS : ALAIN SIMON, CHEF DE SECTEUR, DIRECTION DES MOYENS D'INGÉNIERIE, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - NELSON LUIS MOREIRA, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, DIRECTION DES MOYENS D'INGÉNIERIE, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - JEAN-PAUL DEVEAUD, CHARGÉ D'AFFAIRES, DIVISION OUVRAGES D'ART, DIRECTION TERRITORIALE CENTRE-EST, CEREMA - MENAD CHENAF, DIRECTEUR-ADJOINT, DÉPARTEMENT SÉCURITÉ, STRUCTURES ET FEU, CSTB - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, DÉLÉGUÉ SCIENTIFIQUE, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST)

UNE RÉFLEXION A ÉTÉ MENÉE SUR L'EMPLOI STRUCTURAL DES BFUP EN GÉNIE PARASISMIQUE. ELLE CONDUIT À DISTINGUER LEUR VALORISATION DANS DES ÉLÉMENTS LÉGERS DONT LE COMPORTEMENT RESTE ÉLASTIQUE SOUS SÉISME, DU CAS D'ÉLÉMENTS (GÉNÉRALEMENT FLÉCHIS AVEC FORTE COMPRESSION AXIALE, DANS DES ZONES DE ROTULES PLASTIQUES) OÙ LE BFUP PEUT RÉPONDRE (SEUL, ARMÉ OU EN ASSOCIATION AVEC LE BÉTON ARMÉ DE LA SECTION) À UNE DEMANDE DE DUCTILITÉ. DEUX EXEMPLES ASSOCIÉS AU RENFORCEMENT D'OUVRAGES D'ART ET UN EXEMPLE DE STRUCTURE NEUVE DE BÂTIMENT ONT ÉTÉ ÉTUDIÉS.

POINT DE DÉPART ET ANALYSE

Le projet de recherche BADIFOPS, regroupant l'Ifsttar, le Cstb, Eiffage Tp et le Cerema (DTecITM), soutenu par le réseau Génie Civil et Urbain du MEDDE, a eu pour ambition de préparer l'extension de l'usage des BFUP dans le contexte d'une exigence croissante de prise en compte du risque sismique. Le nouveau zonage sismique de la France et l'entrée en vigueur de l'Eurocode 8 avaient d'ores et déjà motivé la rédaction de l'annexe 12 « résistance au séisme des BFUP » dans l'édition révisée en 2013 des recommandations de l'Afgc sur les BFUP^[1]. De façon plus approfondie, les situations d'emploi structural des BFUP et le besoin de justifier d'un comportement ductile pouvant nécessiter la présence d'armatures ont été analysés de façon

simplifiée par types d'ouvrages, afin de favoriser la pertinence d'exemples de projets documentés permettant d'inspirer des travaux d'ingénierie et d'anticiper les dispositions normatives futures. Une synthèse de cette réflexion est présentée ci-après.

Dans le domaine des ouvrages d'art courants, un tablier BFUP (neuf ou étudié dans le cadre d'une rénovation lourde) a l'intérêt de la légèreté mais ne nécessite pas de ductilité, dans la mesure où son fonctionnement doit rester élastique ($q=1$) d'après les règles de conception déduites de la partie 2 de l'Eurocode 8. Le BFUP peut dans ce cas contribuer à l'efficacité d'un dimensionnement en résistance. La ductilité est, quant à elle, intéressante dans les appuis, mais l'intérêt économique d'une section complète de

1- Ouvrage courant étudié, datant de la fin des années 1960, conçu sans disposition particulière vis-à-vis du séisme, et situé dans une zone dont l'aléa sismique a été récemment réévalué.

1- A standard engineering structure studied, dating from the late 1960s, designed without special measures against earthquakes, and located in a region for which the seismic hazard was recently reassessed.

BFUP n'y est pas évident, compte tenu de la nécessaire massivité due, entre autres, aux sujétions de résistance au choc. Ainsi le BFUP aurait plutôt un intérêt en chemisage de renforcement ou en coffrage perdu, avec un avantage de durabilité.

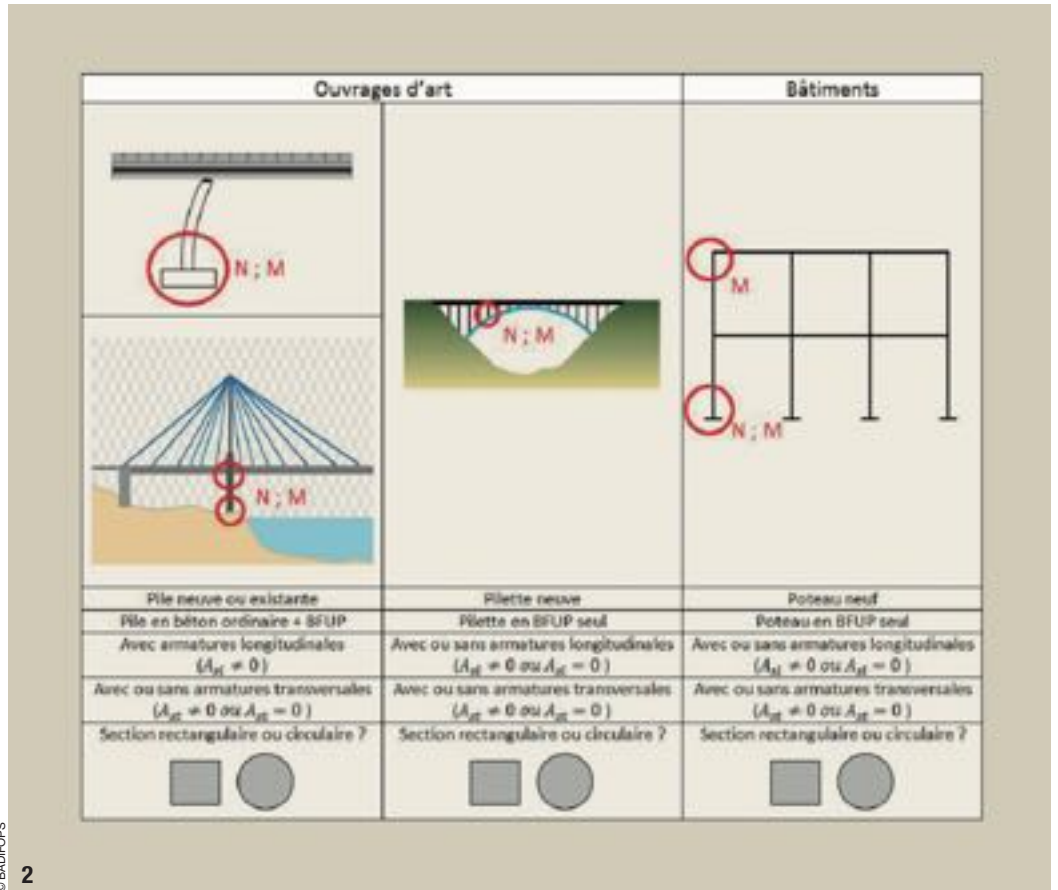
Pour des ouvrages en arc ou à béquilles, le BFUP apparaît pertinent dans les éléments comprimés (arc ou béquilles), mais l'Eurocode 8 limite la dissipation dans ces éléments en limitant la valeur du coefficient de comportement à une valeur comprise entre 1,2 et 2, ce qui limite l'enjeu d'une démonstration de ductilité. Par ailleurs le BFUP semble pertinent dans les pilettes, qui se trouvent dans une situation de flexion composée (assez similaire au cas de poteaux de bâtiment) et où se situeront les rotules plastiques.

2- Représentation schématique de situations d'emploi structural du BFUP correspondant à une demande de ductilité lorsque l'ouvrage est situé en zone sismique.

3- Loi de comportement prise en compte et diagramme moment-courbure résultant dans le cas d'une section rectangulaire armée, tel qu'obtenu par les outils de calcul des différents partenaires.

2- Summary schematic representation of situations of structural use of the UHPFRC corresponding to a ductility demand when the structure is located in a seismic zone.

3- Behaviour pattern taken into account and resultant bending moment-curvature diagram in the case of a reinforced rectangular section, as obtained by the computing tools of the various partners.



© BADI FOPS

Comme dans le cas des ouvrages courants, le BFUP utilisé dans le tablier peut contribuer à l'allègement de l'ouvrage et à la réduction des efforts sismiques, mais il ne fait pas l'objet d'une demande de ductilité.

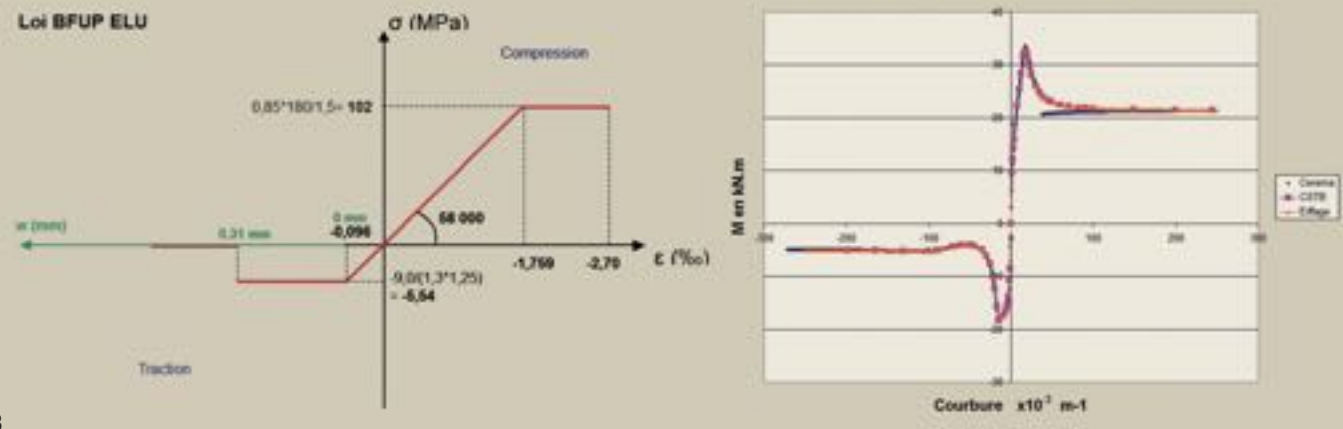
De façon générale pour les grands ouvrages non courants, le BFUP peut être pertinent dans les piles, pilettes, pylônes et appuis, qui sont généralement de section creuse. Cette situation

est spécifique aux ouvrages d'art (les poteaux creux sont rares dans les bâtiments en béton). Elle peut aussi correspondre au pied des mâts d'éoliennes, aux cheminées (dont l'effort normal reste cependant limité, la fatigue et le séisme de service limiteront le coefficient de comportement à $q=1$). Dans ces cas il faudrait pouvoir justifier d'une rotule suffisamment ductile en pied, qui peut concerner de grandes hauteurs.

Au total, pour les ponts, l'application des BFUP armés où une ductilité suffisante est à démontrer concerne plutôt des éléments en flexion composée, pleins et pas forcément en section tout BFUP (aussi bien pour des ouvrages neufs où le BFUP peut être envisagé en « coffrage perdu » participant, qu'en réhabilitation d'ouvrages anciens), ce qui rejoint des travaux internationaux (par exemple Massicotte et al.^[2], ▷

LOI DE COMPORTEMENT PRISE EN COMPTE ET DIAGRAMME MOMENT-COURBURE RÉSULTANT DANS LE CAS D'UNE SECTION RECTANGULAIRE ARMÉE

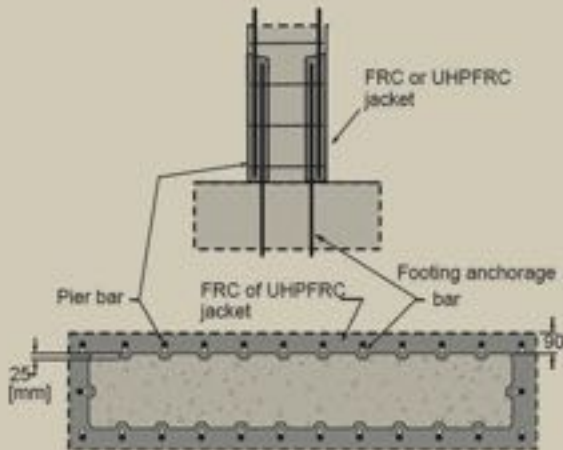
tel qu'obtenu par les outils de calcul des différents partenaires



© BADI FOPS

ESSAIS DE CHEMISAGE BFUP EN PIED DE PILE

d'après B. Massicotte et al. [4]



4

© MASSICOTTE

Sokabe et al. [3]...) où le BFUP contribue à maintenir les armatures longitudinales pour les empêcher de flamber, à préserver l'efficacité des recouvrements d'armatures longitudinales lorsqu'ils sont situés dans ces zones, et permet de contrôler la hauteur de la rotule plastique, en se substituant au moins partiellement aux armatures de confinement extérieures.

Une analyse similaire a été conduite pour les ouvrages de bâtiment.

Concernant les éléments horizontaux (planchers), il est nécessaire de distinguer plusieurs cas. Compte tenu des autres fonctionnalités en bâtiment de logement, l'épaisseur minimale de béton des dalles est d'environ 18 cm ce qui supprime l'intérêt du BFUP. Une variante consistant en planchers nervurés 2D ne se fait plus, elle est trop complexe de réalisation. Enfin, les planchers constitués de poutres en Pi existent pour les parkings, mais leur rôle attendu de diaphragme conduit à ne pas en attendre un fonctionnement ductile en situation sismique. Comme pour les tabliers de pont, l'intérêt en sismique d'une solution BFUP pourrait être la légèreté. Par ailleurs, ces applications relèvent a priori de la préfabrication avec précontrainte par fils adhérents, avec une géométrie en I (pannes préfabriquées). Leur fonctionnement est essentiellement en flexion simple.

La principale « demande » sous action sismique, qui s'applique plutôt au système de connexion, est que ces éléments n'échappent pas de leurs appuis. Les poteaux, compte tenu du mode constructif habituel, n'assurent pas de fonction de contreventement. Lorsque

leur fonctionnement recherché est bi-articulé, ils ne seront pas pris en compte dans le système résistant au séisme, il n'est donc pas besoin de justifier spécifiquement de leur ductilité. La possibilité de portiques BFUP (avec encastrement en tête des poteaux) est envisageable, mais ce système de portiques est rare en bâtiment (les murs sont plus économiques). Pour les bâtiments industriels, l'encastrement des poteaux (souvent préfabriqués) est réalisé en pied par exemple avec un encuvement, et plus rarement au niveau de la liaison avec la poutre. Dans l'hypothèse d'un poteau encastré se pose la question du maintien de la fonction porteuse (effort normal) en concomitance au déplacement imposé (moment induit), la question est donc celle de la loi moment courbure sous sollicitations alternées d'un élément en flexion composée (BFUP armé ou pas).

Dans certains éléments en BFUP, les contraintes architecturales pourraient imposer que le contreventement soit assuré par les éléments eux-mêmes : dans de tels cas il faut assurer la capacité du BFUP à confiner les aciers longitudinaux sous compression combinée au cisaillement (poteau simultanément encasté et cisailé). Vis-à-vis de cette situation, il serait intéressant de pouvoir assurer la justification du BFUP en se passant au moins partiellement des armatures de confinement imposées par l'EC8.

Si on considère l'ensemble des autres éléments verticaux, on constate qu'en bâtiment classique les voiles ont des épaisseurs supérieures à 15 ou 20 cm pour d'autres fonctions que la descente de charge. Il est donc difficile d'y voir un intérêt pour les BFUP. Pour les immeubles de grande hauteur, l'expérience japonaise a été de substituer

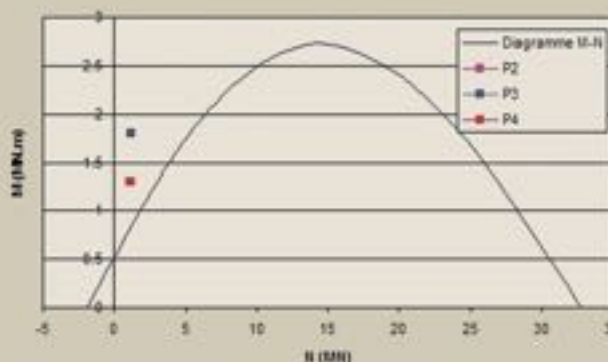
4- Essais de chemisage BFUP en pied de pile, d'après B. Massicotte et al. [4]

5- Sollicitation sous séisme des sections fléchies des piles P2, P3 et P4 en regard du diagramme d'interaction moment - effort normal traduisant leur capacité résistante. P3 correspond au cas le plus critique, P2 et P4 sont équivalentes mais restent insuffisamment résistantes.

4- UHPFRC casing test at pier base, as per B. Massicotte et al. [4]

5- Earthquake loading of the bent sections of piers P2, P3 and P4 based on the bending moment-normal stress interaction diagram reflecting their resistance capacity. P3 corresponds to the most critical case; P2 and P4 are equivalent but remain insufficiently resistant.

DIAGRAMME M-N



5

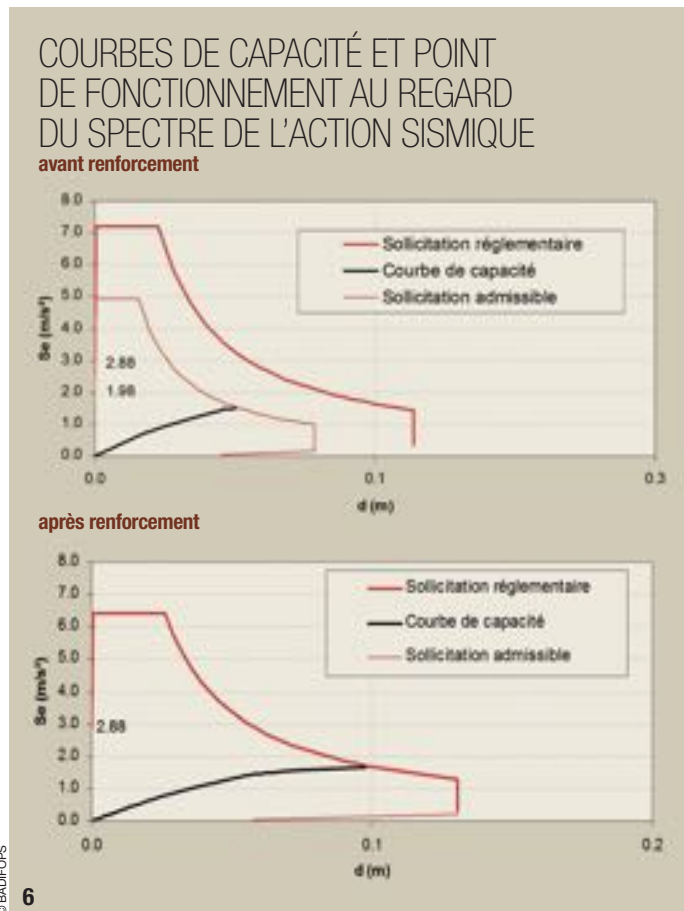
© BACIFOPS

6- Courbes de capacité et point de fonctionnement au regard du spectre de l'action sismique avant renforcement (en haut) / après renforcement (en bas).

7- Profil en long et coupe transversale de l'ouvrage étudié, tablier en double caisson en béton précontraint, fûts de pile dédoublés.

6- Capacity and operating point curves compared with the spectrum of seismic action before strengthening (top) / after strengthening (bottom).

7- Longitudinal profile and cross section of the structure studied, twin-box-girder deck in prestressed concrete, duplicated pier shafts.



le BFUP au béton à hautes performances armé (C80/95 en général) dans des poteaux ferrillés vis-à-vis de l'exigence parasismique (en conservant alors l'équarrissage de la section et les quantités d'acier), sans démontrer une capacité de ductilité grâce aux fibres. Cette démarche paraît difficile

à transposer directement en France à cause de la sismicité modérée qui conduirait à des dimensionnements peu économiques. Ainsi, en s'adaptant aux solutions constructives plus classiques en France, il pourrait s'agir de vérifier pour les murs que des murs en BFUP rempliraient avec moins d'armatures

la fonction de mur ductile (type EC8), et d'explorer en conséquence la pertinence de cet emploi dans le contexte constructif français. Cependant on peut penser que des murs en BFUP seraient conçus pour reprendre la charge et ne devraient alors pas justifier de ductilité. Enfin, pour des éléments de façade (par

exemple des coques, probablement ajourées, et éventuellement porteuses) on limiterait en fait leur fonctionnement à un comportement élastique (correspondant à un coefficient de comportement $q=1$).

La conclusion de cette analyse (figure 2) a conforté, pour favoriser la représentativité et l'applicabilité directe des résultats, le choix de réaliser dans le cadre de BADIFOPS des essais sur poteaux encastrés, soit constitués de BFUP en pleine section, soit constitués d'un noyau en béton ordinaire confiné entre deux faces de BFUP, et de solliciter ces éléments en flexion composée avec sollicitation latérale alternée. Ces essais sont en cours de réalisation sur la dalle d'essais des structures de l'Ifsttar à l'automne 2015.

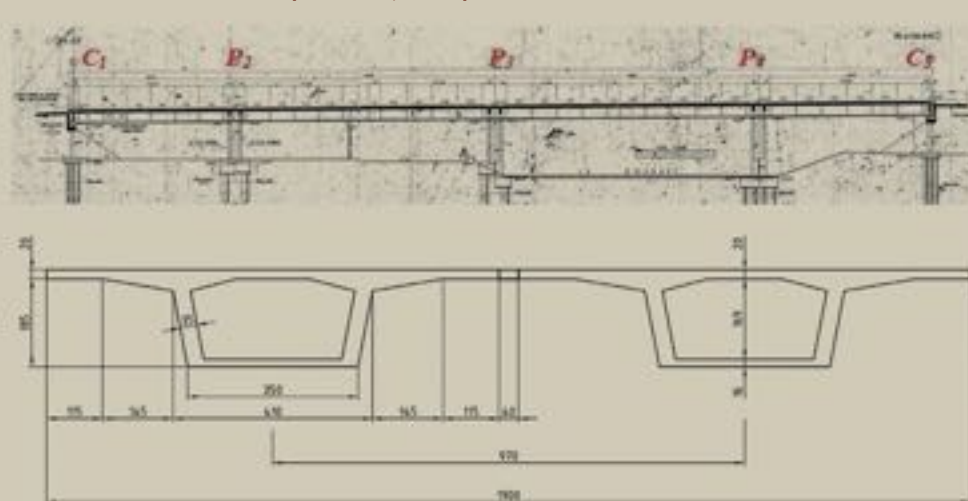
OUTILS DE CALCUL

Préalablement à l'étude de cas illustrant la possibilité de valoriser une certaine ductilité du BFUP, le cas échéant armé et/ou utilisé en combinaison avec le béton armé traditionnel, il a été procédé dans le cadre du projet BADIFOPS à une vérification de la cohérence entre les outils de calcul, nécessaires à ce type d'études, employés par l'Ifsttar, le Cerema, le Cstb et Eiffage Tp. Cette vérification a consisté à calculer le diagramme d'interaction de différentes sections de BFUP armé et/ou précontraint représentatives des situations de calcul envisagées, sur la base de propriétés de calcul adoptées par tous pour le BFUP étudié (figure 3).

Les variantes de calcul (section brute ou nette, modalités de la prise en compte de la surtension du toron) ont été analysées. Tous les outils se sont avérés cohérents pour réaliser la suite des études. En particulier le logiciel utilisé par le Cstb, même s'il ne permet pas de fournir directement les résultats en termes de contraintes et déformations, a pu bénéficier d'une programmation des lois BFUP et sur cette base fournir des lois moment-courbure conformes aux lois obtenues par les autres partenaires, permettant de réaliser des analyses en poussée progressive. Dans les sections considérées, le moment maximal est obtenu lorsque la contribution maximale des fibres se cumule à celle des armatures, puis on observe une redescende quand les fibres se déchaussent. La forme des lois moment-courbure, où on attend normalement une ductilité telle que le moment post-pic reste suffisamment longtemps supérieur à 80% du pic, dépend de l'effort normal.

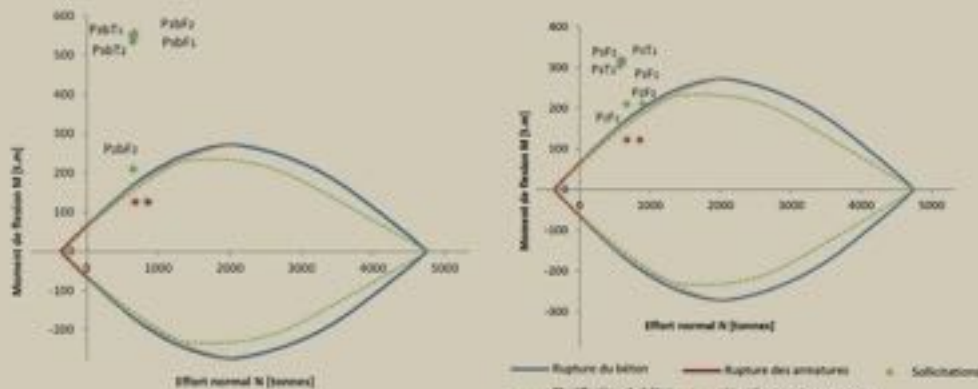
PROFIL EN LONG ET COUPE TRANSVERSALE DE L'OUVRAGE ÉTUDIÉ

Tablier en double caisson en béton précontraint, fûts de pile dédoublés



SOLLICITATION SOUS SÉISME DES SECTIONS FLÉCHIES DES PILES

en regard du diagramme d'interaction moment-effort normal traduisant leur capacité résistante



8

© BAOIFOPS

8- Sollicitation sous séisme des sections fléchies des piles en regard du diagramme d'interaction moment - effort normal traduisant leur capacité résistante (selon les différents modes de rupture en flexion). P3 correspond au cas le plus critique aussi bien à la base (graphique de gauche) qu'en tête de pile (graphique de droite).

MODÈLE DE CALCUL EN POUSSÉE PROGRESSIVE DE L'OUVRAGE

Présence des 7 rotules précédant immédiatement la perte de stabilité (mécanisme)

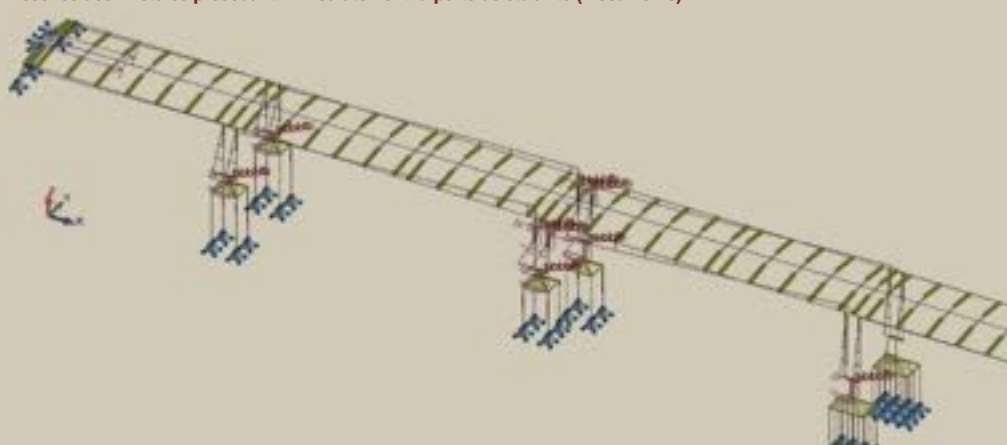
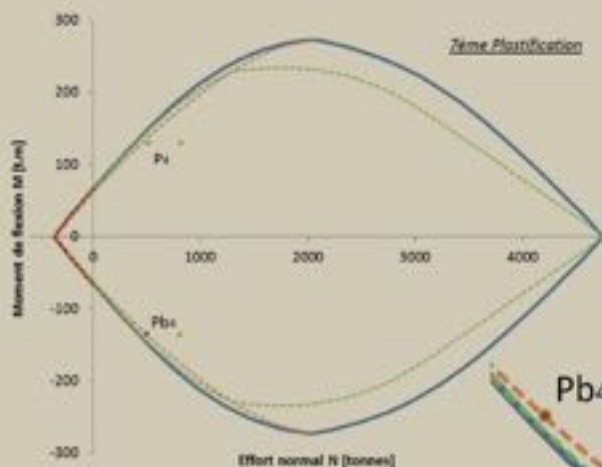


Diagramme d'interaction



9

© BAOIFOPS

9- Modèle de calcul en poussée progressive de l'ouvrage illustrant la présence des 7 rotules précédant immédiatement la perte de stabilité (mécanisme) et diagramme d'interaction correspondant.

8- Earthquake loading of the bent sections of piers based on the bending moment-normal stress interaction diagram reflecting their resistance capacity (according to the various bending failure modes). P3 corresponds to the most critical case at both the pier base (left-hand graph) and cap (right-hand graph).

9- Design calculation model in progressive thrust on the structure illustrating the presence of the 7 hinges immediately preceding the loss of stability (mechanism) and corresponding interaction diagram.

RENFORCEMENT SISMIQUE D'OUVRAGES D'ART

Conformément à l'analyse présentée, il a été procédé à une étude de cas associée à un exemple d'utilisation de BFUP en ouvrages d'art en considérant la situation d'ouvrages relativement anciens, dont les dispositions constructives sont jugées aujourd'hui insuffisantes vis-à-vis d'un aléa sismique récemment réévalué à la hausse en France^[6]. Cette situation est représentative d'un nombre important d'ouvrages, soit parce qu'ils sont désormais en zone de sismicité non négligeable (faible, modérée voire moyenne), soit parce qu'ils se trouvaient déjà dans une zone sismique mais d'aléa plus faible et, dans tous les cas, parce que les avancées scientifiques et les retours d'expérience ont fait évoluer les règles de conception parasismique et montré les limites de dimensionnements ou dispositions anciens.

Les ouvrages étudiés sont un ouvrage d'art courant de type pont-dalle aujourd'hui situé en zone de sismi-

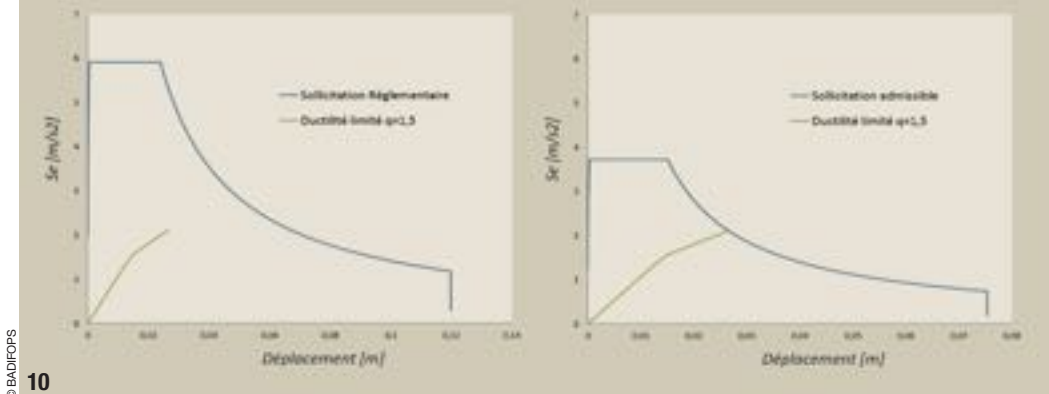
ité moyenne et un ouvrage d'art non courant de type caisson en béton précontraint désormais situé en zone de sismicité modérée. Ces deux ouvrages ont été construits dans les années 70 et n'avaient pas fait l'objet d'une conception parasismique. Pour ces ouvrages, dont les plans et données

géométriques, matérielles et de site étaient disponibles, on a envisagé une technique de renforcement qui consiste à substituer, en pied de certaines piles, le béton ordinaire en périphérie par un chemisage en BFUP. Cette technique permet de pallier le manque de dispositions de confinement et d'augmenter

la ductilité de cette zone très sollicitée afin de dissiper l'énergie sismique et obtenir, avec des dispositions capables d'assurer un fonctionnement dit de rotule plastique, un bon comportement de l'ouvrage. Contrairement à d'autres solutions de renforcement par chemisage (par composites ou tôle métal-

INSUFFISANCE DE L'OUVRAGE NON RENFORCÉ

vis-à-vis de la sollicitation sismique réglementaire actuelle



© BADIPOPS
10

lique...), cette solution reste efficace pour des sections transversalement élancées telles que celles de piles de type voile et permet de pallier un important déficit d'armatures transversales. En outre elle reconstitue une protection durable des armatures longitudinales même avec un enrobage réduit. Les essais de poteaux, avec et sans chemisage, représentatifs d'appui d'ouvrage d'art, en cours de réalisation à l'Ifsttar, sont directement destinés à

vérifier par des chargements cycliques alternés en flexion composée, le gain de ductilité apporté par cette technique, selon les dispositions d'exécution retenues, une estimation provisoire pouvant en être tirée (avec des dispositions constructives un peu différentes) des essais de B. Massicotte et al. (figure 4). Dans le cas de l'ouvrage courant (figure 1), les piles sont constituées de 2 voiles trapézoïdaux, d'épaisseur 60 cm. La pile centrale est fixe tandis

que les autres appuis sont équipés d'appuis en néoprène. On note que la solution « classique » de confortement par changement de type d'appuis n'est pas évidente en termes constructifs. Pour l'analyse de vulnérabilité sismique, l'ouvrage a tout d'abord été représenté par un modèle à barres et a fait l'objet d'une analyse modale. Le mode fondamental s'établit pour une période $T = 0,71$ s et l'effort sismique vaut 3,44 MN en faisant le calcul avec

une rigidité non fissurée. L'appui central reprend alors la moitié de cet effort et la demande de déplacement est de 5 cm à la limite tablier-culée. On a ensuite réalisé un calcul avec une inertie fissurée, évaluée selon l'EC8.2 (en tenant compte des dispositions constructives adoptées) à 20 % de l'inertie non fissurée. Dans cette hypothèse on recalcule l'effort sismique (2,19 MN), sa répartition (P3 ne reprend plus que 27 % de cet effort) et le déplacement lors du séisme, qui vaut 8 cm. La comparaison des efforts sismiques avec les efforts résistants montre que toutes les piles se placent hors du diagramme (figure 5).

Afin d'appréhender plus finement le comportement de l'ouvrage l'analyse est poursuivie par un calcul en déplacement (méthode en poussée progressive) en programmant la loi de comportement des piles et des culées, en ne dépassant pas la plastification des aciers car au-delà on craint le risque de flambement des armatures dû à la perte d'enrobage. Dans cette hypothèse, une partie du déplacement est encaissée par flexion de la pile et cela n'entraîne pas de glissement de l'appareil d'appui. ▷

10- Insuffisance de l'ouvrage non renforcé vis-à-vis de la sollicitation sismique réglementaire actuelle.

11- Diagramme synthétique illustrant différents modes de renforcement sismique possibles et leur application au cas de l'ouvrage non courant étudié au regard de différents critères.

10- Inadequacy of the non-strengthened structure with regard to current regulatory seismic loading.

11- Summary diagram illustrating various possible seismic strengthening methods and their application to the case of the non-standard structure studied based on various criteria.

Solutions Courantes	Coût	Difficultés Techniques	Temps	Risque	Pertinence?
1) Démolition de l'ouvrage et Reconstruction	*****	**	*****	*	✓
2) Dissipateurs d'énergie	***	***	***	**	✓
3) Chemisage Composites Carbonne	*	*	*	*	✗
4) Appuis en Elastomère Fretté	***	**	***	****	✗
5) Diminution de la raideur des piles P3 en site	*	**	*	***	✗
6) Renforcement de l'ouvrage	?	*	*	?	⚠

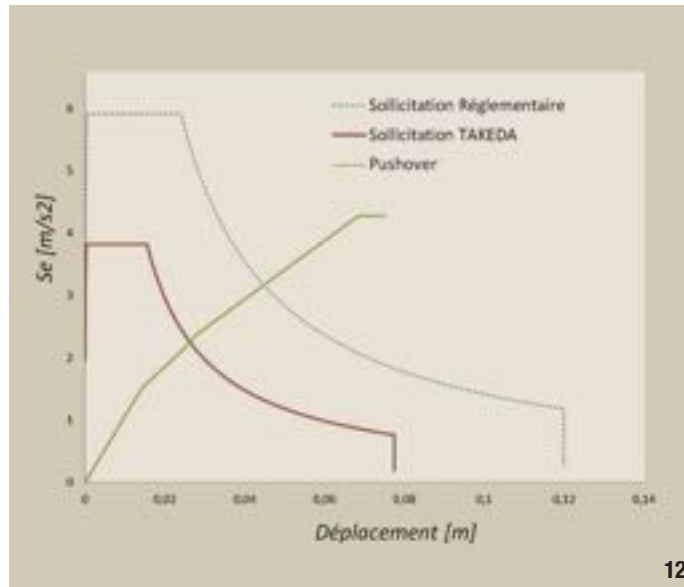
© BADIPOPS

11

La courbe de réponse est comparée à la sollicitation, issue du spectre réglementaire et intégrant un amortissement de base de 5%. La comparaison montre que l'ouvrage ne passe toujours pas (l'accélération admissible est de $1,98 \text{ m/s}^2$ par rapport à une valeur de projet de $2,88 \text{ m/s}^2$).

Le principe de renforcement considéré consiste à donner de la ductilité à P3, sans augmenter la résistance afin d'éviter de reporter des efforts ailleurs, notamment sur les fondations, selon le procédé dit de « chemisage BFUP » dans la zone attendue de rotule plastique. La loi moment courbure est obtenue en faisant l'hypothèse, après chemisage, d'un fonctionnement où les armatures peuvent travailler jusqu'à leur capacité ultime de calcul (5%) en considérant que le BFUP restera en place grâce à ses propriétés en traction ce qui empêchera leur flambement et la perte d'efficacité du recouvrement. On se borne à une valeur associée au maximum du déplacement élastique de P2 et P4 : on passe alors de 6 cm à 10 cm. Dans ces conditions, on peut calculer une ductilité de 1,44 et une valeur d'amortissement de 7,5%. Ces valeurs conduisent à une valeur d'accélération admissible juste égale à la valeur de l'action ($2,88 \text{ m/s}^2$) et permettent donc de conclure à une réduction satisfaisante de la vulnérabilité sismique de l'ouvrage par cette méthode (figure 6).

Par rapport à d'autres solutions variantes de remise à niveau sismique (changements d'appui de P2, P3 et P4, introduction d'amortisseurs, éventuel chemisage ou reconstitution de rotule au pied de P3 en béton armé traditionnel), l'intérêt de la solution BFUP se caractérise par une faible modification de la résistance et des dimensions de la pile, et par le caractère local de l'intervention avec uniquement une répercussion sur la demande de déplacement. L'ouvrage non courant étudié (figure 7) a de la même façon fait l'objet d'une modélisation par un programme à barres, avec une évaluation appropriée des pertes de précontrainte et une action sismique réévaluée selon le nouveau zonage^[9]. Les dispositions critiques conditionnant la capacité de l'ouvrage sont liées à la présence de piles précontraintes, le tablier reposant sur ces piles avec des articulations Freyssinet sauf sur la pile P3 (où des armatures passives périphériques réalisent un encastrement). L'analyse modale et spectrale a mis en évidence l'insuffisance de capacité des piles P2



12

© BADIFOPS

et P3 (figure 8). Pour confirmer l'apparition progressive des mécanismes critiques une analyse en poussée progressive a alors été effectuée en imposant le déplacement au centre d'un voussoir du tablier^[7]. Les sections critiques (rotules) apparaissent d'abord en haut et en bas de la pile P3 (fûts parallèles) puis en bas des piles P2 et P4 (figure 9). Avec le séisme réglementaire et un coefficient de comportement de 1,5 (probablement un peu trop favorable compte tenu des dispositions de ferrailage) l'accélération admissible est de $0,83$ au lieu de $1,32 \text{ m/s}^2$ (figure 10).

Afin de remettre à niveau l'ouvrage un examen de solutions techniques alternatives a priori possibles a été effectué (figure 11) : démolition, mise en place de dissipateurs, chemisage par composites, changement d'appuis en élastomère, diminution de la raideur

12- Courbe de capacité de l'ouvrage renforcé superposée à la sollicitation sismique de calcul.

13- Modèle de calcul de la galerie rapportée en avant d'un bâtiment.

12- Capacity curve of the strengthened structure superimposed on the design seismic loading.

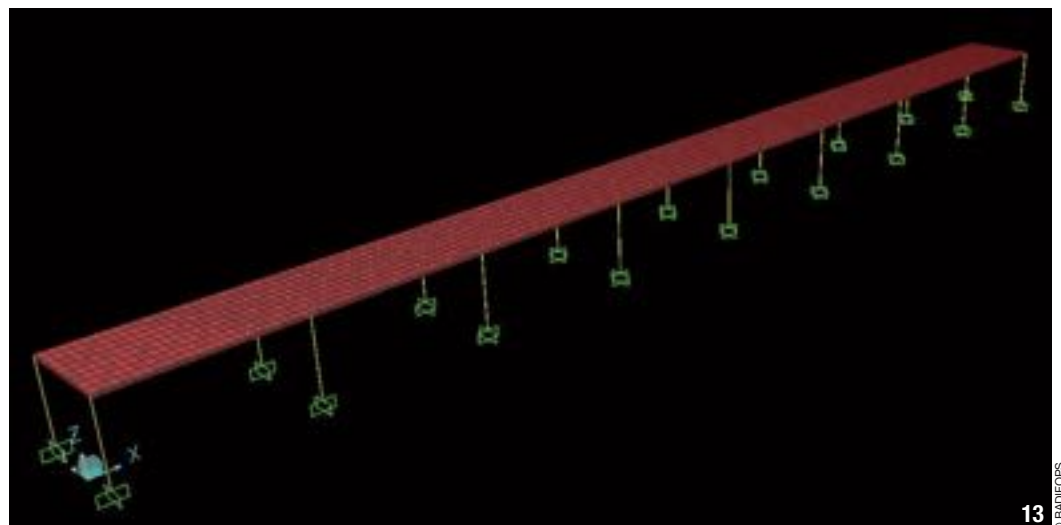
13- Design calculation model of the gallery added on at the front of a building.

des piles pour éliminer l'encastrement, renforcement par béton projeté, chemisage BFUP. Plusieurs de ces solutions ne sont d'ailleurs pas viables dans le cas de cet ouvrage.

La solution retenue pour l'étude consiste à considérer un chemisage BFUP au pied des piles P3 (nord et sud) en même temps que l'élimination de l'encastrement en tête de P3 (sciage des armatures périphériques). L'analyse en poussée progressive est reprise après mise en œuvre de cette solution et on vérifie les déplacements vis-à-vis du souffle des joints de chaussées (figure 12). La solution mobilise une ductilité égale à une valeur de 5 au niveau des sections de piles les plus sollicitées (lorsqu'intervient la formation du mécanisme considéré comme étape ultime de fonctionnement de l'ouvrage). Ainsi, pour les deux ouvrages d'art étudiés, le calcul montre que le chemisage de certaines piles permet de réduire significativement la vulnérabilité sismique de ces structures et de résister à une accélération de calcul comparable à celle de leur zone sismique.

APPLICATION À UNE STRUCTURE DE BÂTIMENT

L'étude de cas associée à un exemple d'utilisation de BFUP dans un ouvrage de bâtiment a considéré la situation d'une galerie périphérique (dalle en béton ordinaire armé sur poteaux minces) rapportée en façade d'un bâtiment situé en zone de sismicité élevée (Antilles) sans connexion avec ce bâtiment (figure 13). Cette situation s'est inspirée de projets réels en simplifiant le fonctionnement structural pour mettre en évidence les apports de la « variante BFUP ». Dans un tel ouvrage, le BFUP apparaît en effet sus-



13

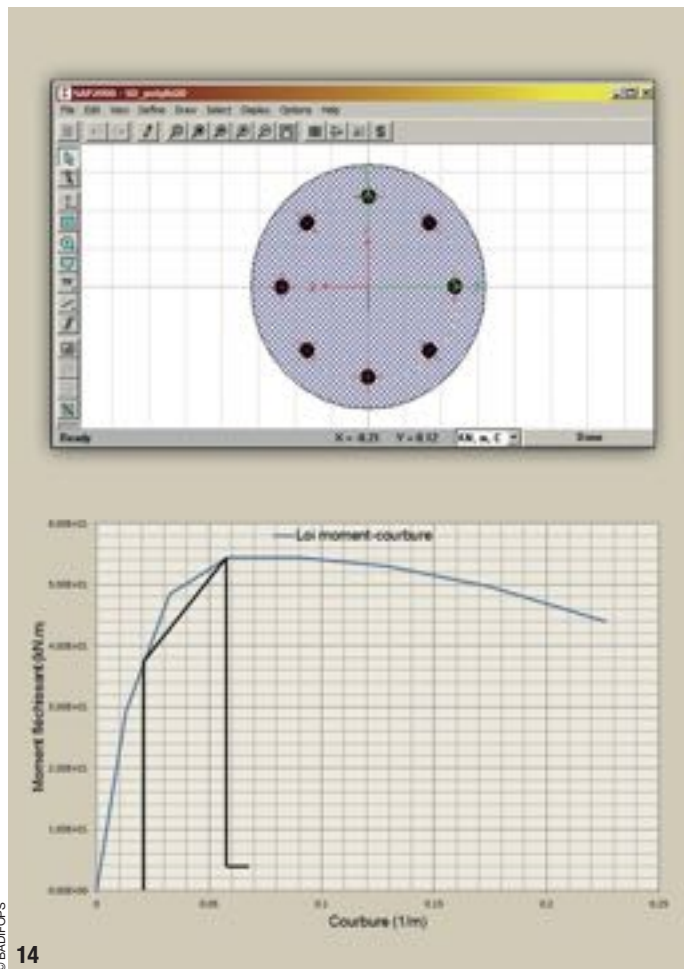
© BADIFOPS

14- Section des poteaux, loi moment-courbure calculée dans le cas des poteaux BFUP (en bleu) et loi de comportement idéalisée (en noir) de la rotule plastique obtenue lorsque la déformation des aciers longitudinaux dépasse 2,5‰ jusqu'à atteindre le moment résistant maximum.

15- Rotules plastiques au pied des poteaux mises en évidence par le calcul en poussée progressive, dans le cas des poteaux BFUP sous un effort de 560 kN. La couleur indique l'intensité de la courbure concentrée au niveau de chaque rotule.

14- Cross section of columns, bending moment-curvature law calculated in the case of the UHPFRC columns (in blue) and idealised behaviour pattern (in black) of the plastic hinge obtained when the deformation of the longitudinal steel bars exceeds 2.5‰ until reaching the maximum resistance moment.

15- Plastic hinges at the foot of the columns determined by progressive thrust calculation, in the case of the UHPFRC columns under a force of 560 kN. The colour indicates the intensity of the curvature concentrated at the level of each hinge.



© BADIPOPS

14

ceptible de répondre à des demandes architecturales (minceur et espacement des poteaux) auxquelles une solution traditionnelle ne répondrait pas. Néanmoins il convient de vérifier comment se positionnerait cette solution alternative compte tenu du fonctionnement attendu de rotules plastiques en tête et/ou en pied des poteaux supposés encastres.

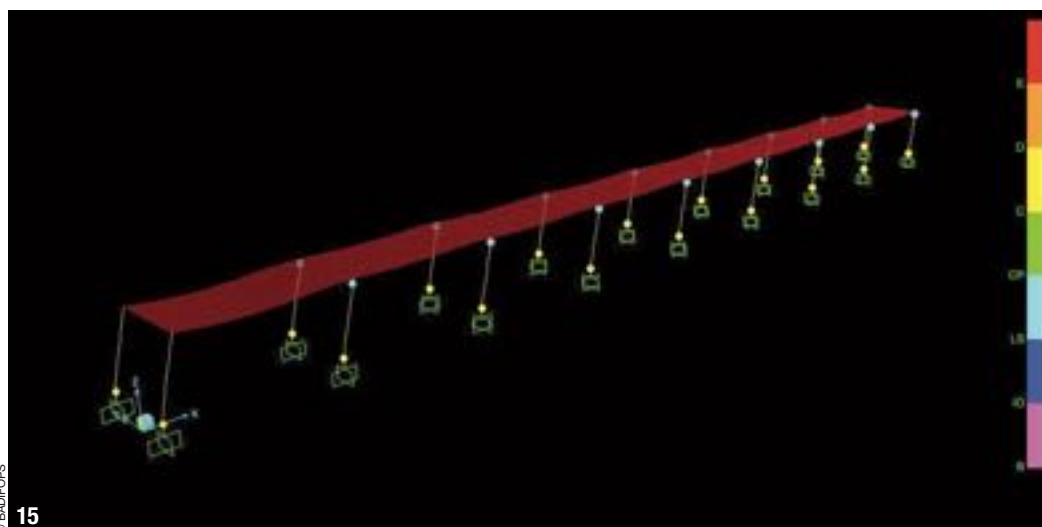
Le fonctionnement de la galerie a été étudié avec des poteaux de 20 cm de diamètre espacés de 6,55 m, armés longitudinalement de 8 armatures HA12, selon deux variantes différant uniquement par le béton employé : C90/105 conforme à l'Eurocode 2, et BFUP décrit par les lois de comportement issues de la caractérisation effectuée sur le matériau d'étude du projet

(figure 14). Sans qu'une étude détaillée des dispositions de confinement ait été effectuée, il a été admis d'utiliser pour le calcul du fonctionnement des sections critiques (lois moment-courbure des zones de rotules plastiques) les lois de Sargin de ces deux matériaux conformément à l'Eurocode 2 d'une part, aux recommandations Afgc BFUP révisées 2013 d'autre part.

Le calcul en poussée progressive piloté par un déplacement longitudinal de la coursoive le long de sa plus grande dimension a fait apparaître dans les deux variantes des plastifications au pied des poteaux supposés encastres dans une longrine de fondation (figure 15).

Pour ces sections qui seront le siège des rotules plastiques, le moment correspondant à la limite d'élasticité et le moment au pic sont obtenus pour des courbures similaires dans les deux cas, le moment résistant étant cependant assez nettement plus élevé dans le cas de la section de BFUP (54 kN.m au lieu de 36 kN.m).

En conséquence, la courbe de capacité de la variante BFUP conduit à un effort maximal de 24% supérieur à celui de la variante C90/105, obtenu pour un déplacement au pic de 9,3 cm au lieu de 5,6 cm (figure 16). Ce déplacement au pic est lui-même égal à 5,8 fois le déplacement correspondant à l'apparition des premières non-linéarités. Avec un même spectre sismique et un coefficient de comportement égal à 1, la demande de déplacement en tête est de 4,2 cm pour la variante BFUP par rapport à une demande de 4,9 cm pour la variante C90/105. Le point de fonctionnement correspond donc à une marge nettement supérieure dans le cas de la variante BFUP. ▸



© BADIPOPS

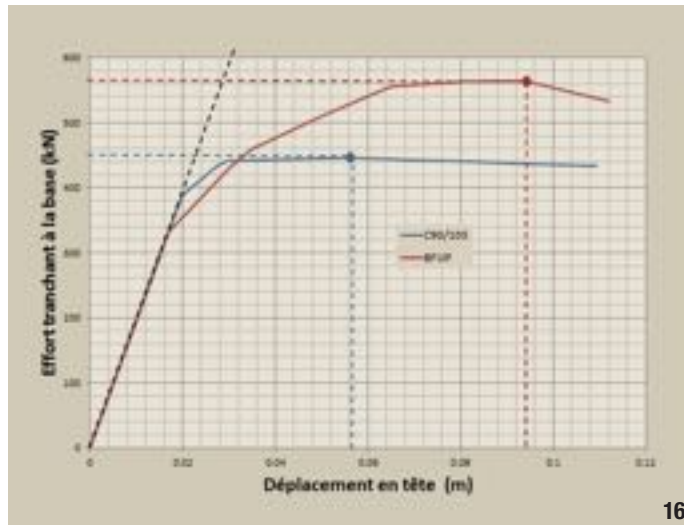
15

Au total, même si ces conclusions quantitatives ne sont pas à transposer sans précaution à n'importe quelle situation, il apparaît bien possible de justifier, sur la base de diagrammes de comportement établis rationnellement, un fonctionnement sismique satisfaisant pour des structures de bâtiment en BFUP. Les essais de flexion composée sur poteaux BFUP en cours de réalisation à l'Ifsttar devraient permettre de confirmer cette méthodologie de calcul et la ductilité ainsi mobilisable dans des sections de BFUP armé.

CONCLUSION

La réflexion sur l'utilisation des BFUP dans le cadre de structures de bâtiment et d'ouvrages d'art devant résister au séisme, et les études de cas réalisées, constituent une avancée significative du projet BADIFOPS, consolidant les méthodes de conception et de réparation envisageables, et démontrant que même avec une ductilité modeste en termes quantitatifs, la réalisation de chemisages BFUP au niveau des rotules plastiques en tête ou au pied de piles ou poteaux en béton armé est une voie prometteuse de remise à niveau structural. L'intérêt du BFUP pour réaliser des éléments porteurs minces, cependant capables d'assurer une capacité élevée au niveau des zones critiques appelées à fonctionner en rotules plastiques, a également été analysé et confirme la faisabilité de conceptions innovantes et prometteuses vis-à-vis du potentiel architectural, de l'économie matérielle globale et de solutions constructives nouvelles au service du développement durable.

Les expérimentations de validation sur poteaux en flexion composée, en cours à l'automne 2015, devraient permettre de consolider ces résultats en précisant



16- Courbes de capacité de la galerie sur poteaux selon les deux variantes considérées (C90/105 et BFUP). Compte tenu de la demande de déplacement correspondant au séisme réglementaire il se dégage une marge nettement supérieure avec la solution BFUP.

16- Capacity curves of the gallery on columns according to the two variants considered (C90/105 and UHPFRC). Given the displacement demand corresponding to the regulatory earthquake there is a far greater margin with the UHPFRC solution.

les dispositions constructives et d'exécution appropriées, la méthodologie sous-jacente et le potentiel d'applications, justifier l'application innovante réalisée dans le cadre du projet R6Pont retenu par l'appel à projets CIRR 2015, et compléter la base de l'annexe « calcul des structures en BFUP pour leur résistance aux séismes » de la future norme NF P 18-710 de calcul des structures en BFUP^[6]. □

RÉFÉRENCES :

[1] Resplendino J., Marchand P. et al. (2013) « Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations », Aïgç, édition révisée.
 [2] Massicotte B., Dagenais M.-A., Lagier F. (2013) « Performance of UHPFRC jackets for the seismic strengthening of bridge piers », UHPFRC 2013, Marseille (France), RILEM PRO 87, Toutlemonde & Resplendino eds., pp. 89-98.
 [3] Sokabe N., Yamanobe S., Kono T. (2008) « Cyclic loading test of high-strength performance RC piers with ultra-high strength fiber-reinforced concrete precast forms », 8th int. symp. on Utilization of High-Strength and High Performance Concrete, Tokyo (Japan), T. Uomoto ed., pp. 445-450.
 [4] Massicotte B., Dagenais M.-A., Lagier F. (2013) « Strengthening bridge piers using Ultra-high performance fiber reinforced concrete », 7th Nat. Seismic Conf. On Bridges & Highways, Oakland (California, USA).

[5] Deveaud J.-P., Généreux G., Simon A. (2014) Projet RGCU BADIFOPS : Applications aux ouvrages d'art, Journées Ouvrages d'Art Ifsttar - Cerema, Mame-la-Vallée, 11-13 juin.
 [6] Ahouansou Z. (2013) Conception et dimensionnement des ponts vis-à-vis du séisme et propositions de solutions innovantes à la base de béton fibré. Étude d'ouvrage non courant (projet BADIFOPS), rapport de stage de maîtrise, École des Ponts et Chaussées, 16 décembre.
 [7] Luis Moreira N. (2014) Étude d'un ouvrage non courant. Renforcement sismique des piles de pont par chemisage BFUP (projet BADIFOPS), rapport de stage, École des Ponts et Chaussées, 11 septembre.
 [8] 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), AFNOR (2015).

LES PARTENAIRES

Les études évoquées ont été réalisées dans le cadre du projet BADIFOPS, soutenu par l'État dans le cadre du programme de recherche « concevoir et construire pour le développement durable » (C2D2) géré par la mission Génie civil et construction du Ministère en charge du développement durable, convention n°10 MGC S010. Les partenaires de ce projet sont : Ifsttar, Cstb, Eiffage TP et Cerema (ex-Setra).

ABSTRACT

STRUCTURAL USE OF UHPFRC IN EARTHQUAKE RESISTANCE ENGINEERING: RESEARCH AND CASE STUDY

ALAIN SIMON, EIFFAGE - NELSON LUIS MOREIRA, EIFFAGE - JEAN-PAUL DEVEAUD, CEREMA - MENAD CHENAF, CSTB - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR

As part of the BADIFOPS project, research was carried out on the structural use of UHPFRCs in earthquake resistance engineering. It led to a distinction between their use in light members whose behaviour remains elastic under an earthquake, and the case of members (generally bent with strong axial compression, in plastic hinge areas) where UHPFRC (alone, reinforced or in combination with the reinforced concrete in the section) can meet a ductility demand. This distinction is the basis of the appendix on "Design of UHPFRC structures for their earthquake resistance" of the future NF P 18-710 standard. Two examples relating to the strengthening of engineering structures and one example of a new building structure were studied, confirming the potential benefits of UHPFRC. □

USO ESTRUCTURAL DE LOS HMAR EN INGENIERÍA PARASÍSMICA: REFLEXIONES Y ESTUDIO DE CASOS

ALAIN SIMON, EIFFAGE - NELSON LUIS MOREIRA, EIFFAGE - JEAN-PAUL DEVEAUD, CEREMA - MENAD CHENAF, CSTB - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR

En el marco del proyecto BADIFOPS, se ha realizado una reflexión acerca del uso estructural de los HMAR en ingeniería parasísmica, que ha llevado a distinguir entre su utilización en elementos ligeros cuyo comportamiento se mantiene elástico en caso de sismo y el caso de elementos (en general doblados con una fuerte compresión axial en zonas de rótulas de plástico) donde el HMAR puede responder (solo, armado o asociado con el hormigón armado de la sección) a necesidades de ductilidad. Esta distinción ha dado origen al anexo "Cálculo de estructuras de HMAR para su resistencia a los sismos" de la futura norma NF P 18-710. Se han estudiado dos ejemplos asociados al refuerzo de obras de fábrica y un ejemplo de estructura nueva de edificio, que confirman el interés potencial del HMAR. □

ANCRAGE DES ARMATURES DE BÉTON ARMÉ DANS LE BFUP : JUSTIFICATION DES RÈGLES DE CALCUL

AUTEURS : PIERRE MARCHAND, CHEF DU LABORATOIRE EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST) - FLORENT BABY, INGÉNIEUR DE RECHERCHE AU LABORATOIRE EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST) - PHILIPPE RIVLLON, CHEF DE LA DIVISION MÉCANIQUE ET RÉSISTANCE AU FEU, DÉPARTEMENT SÉCURITÉ, STRUCTURES ET FEU, CSTB - GRÉGORY GÉNÉREUX, CHARGÉ D'ÉTUDES EN OUVRAGES D'ART, CENTRE DES TECHNIQUES D'OUVRAGES D'ART, DIRECTION TECHNIQUE INFRASTRUCTURES TRANSPORTS ET MATÉRIAUX, CEREM - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, DÉLÉGUÉ SCIENTIFIQUE, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST)

L'ADHÉRENCE D'ARMATURES DE BÉTON ARMÉ DANS DU BFUP A ÉTÉ CARACTÉRISÉE EXPÉRIMENTALEMENT SUR ÉLÉMENTS MINCES ET EN PLEINE MASSE, SOUS CHARGEMENT MONOTONE ET RÉPÉTÉ, EN S'APPUYANT SUR UNE INSTRUMENTATION INNOVANTE PAR FIBRES OPTIQUES. LES RÉSULTATS CONFIRMENT UNE LONGUEUR D'ANCRAGE TRÈS FAIBLE, MAIS AUGMENTANT SIGNIFICATIVEMENT POUR DE FAIBLES VALEURS D'ENROBAGE. LES DISPOSITIONS DE CONCEPTION DU BFUP ARMÉ ONT ÉTÉ ACTUALISÉES EN CONSÉQUENCE LORS DE LA MISE AU POINT DE LA NORME NF P 18-710.



© IFSTTAR

MOTIVATION

L'expérience française dans l'application des BFUP s'est, depuis 15 ans, surtout construite sur la base d'éléments de BFUP seul (plaques, coques et éléments de relativement faible portée) ou d'éléments précontraints (pour la reprise des efforts de flexion principaux)^{[1], [2]}. L'utilisation d'armatures de béton armé dans le BFUP est plus récente, et nécessite une sécurité satisfaisante vis-à-vis de l'adhérence

permettant le transfert d'efforts entre le BFUP tendu et l'armature. Les résultats de la littérature^[3-6] sont principalement basés sur des essais de tirants, la rupture de l'ancrage n'ayant généralement pas été obtenue et les déformations de l'armature n'étant généralement pas documentées.

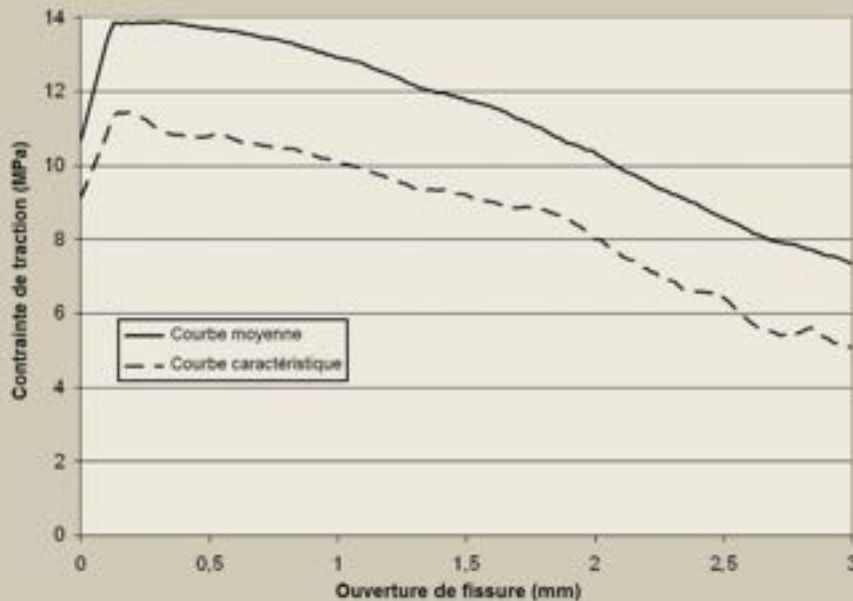
Dans le cadre du projet de recherche BADIFOPS visant au développement des BFUP en conception parasismique, la possibilité d'une instrumentation

1- Essais d'arrachement de barres ancrées :
a) dans une plaque mince - b) & c) dans un massif.

1- Anchored bar pull-out tests:
a) in a thin plate - b) & c) in a mass.

innovante des armatures par des fibres optiques a été mise à profit pour caractériser l'adhérence des aciers au BFUP, dans des essais dédiés d'arrachement^[8]. La haute résolution spatiale de ces capteurs et leur caractère faiblement intrusif ont été décisifs pour en décider l'utilisation, et fournir ainsi des données robustes pour la calibration de la norme de calcul des structures en BFUP lors de sa mise au point^[9].

LOIS CONTRAINTE - OUVERTURE DE FISSURE, MOYENNE ET CARACTÉRISTIQUE, OBTENUES PAR ANALYSE INVERSE POUR LE BFUP ÉTUDIÉ



2 © FSTTAR

2- Lois contrainte - ouverture de fissure, moyenne et caractéristique, obtenues par analyse inverse pour le BFUP étudié.

3- Déformations mesurées par fibres optiques le long de l'armature à différents paliers de chargement.

a) Longueur de scellement courte.
b) Barre pleinement ancrée avec un scellement de 8 diamètres.

2- Mean and characteristic stress/crack opening laws, obtained by inverse analysis for the UHPFRC studied.

3- Deformation measured by optical fibre along the reinforcing bars at various loading levels.

a) Short embedding length.
b) Bar fully anchored with embedding of 8 diameters.

**PROGRAMME EXPÉRIMENTAL
PARAMÈTRES ÉTUDIÉS**

L'ensemble des essais ont été réalisés sur un BFUP de la gamme BSI®, comportant des fibres de polypropylène en plus de fibres d'acier (2,5% en volume). Des armatures de béton armé à haute adhérence de limite élastique 500 MPa ont été utilisées, de diamètre 8 et 12 mm pour des essais d'arrachement dans des éléments minces (enrobage de 20 ou 30 mm soit 2,5 diamètres) et de diamètre 12

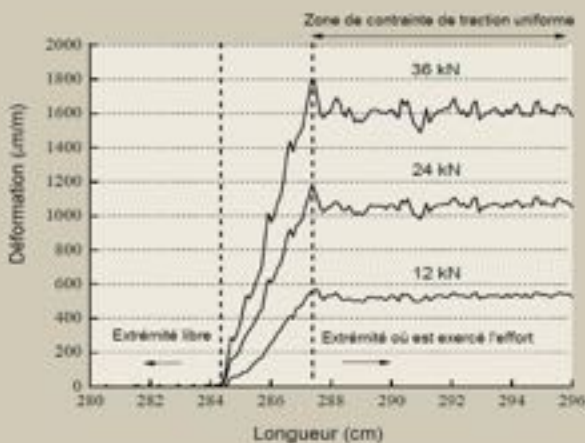
et 16 mm pour des essais en pleine masse (armature située à au moins 190 mm des parois). Ces deux types de corps d'épreuve ont été choisis, car la possibilité ou non de mobiliser un effet de confinement autour de l'armature au moment de son arrachement est apparue critique. Les longueurs de scellement choisies ont été de 8 diamètres dans les deux types d'essais, ainsi que de 4 diamètres pour les éléments minces et 2,5 diamètres pour les essais d'arrachement en pleine masse.

MONTAGE

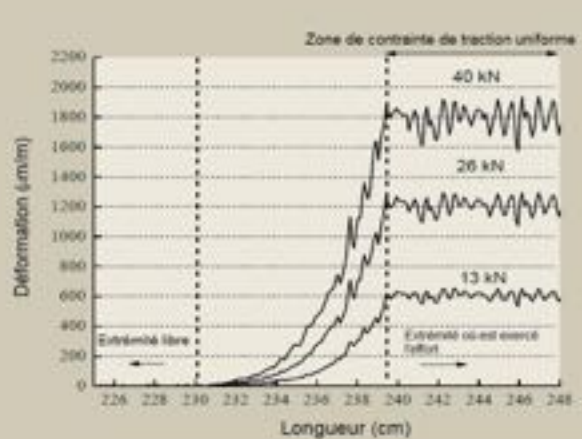
Les dispositions d'essai (figure 1), montrent pour les essais en pleine masse l'extraction des barres grâce à un vérin hydraulique prenant appui (grâce à un trépied pour limiter les éventuelles flexions) autour de chaque barre de chacun des quatre corps d'épreuve comprenant chacun six barres noyées. Pour les éléments minces, 28 plaques comprenant chacune une barre ont été testées sous une machine de traction associée à un montage de réaction

DÉFORMATIONS MESURÉES PAR FIBRES OPTIQUES LE LONG DE L'ARMATURE À DIFFÉRENTS PALIERS DE CHARGEMENT

a- Longueur de scellement courte



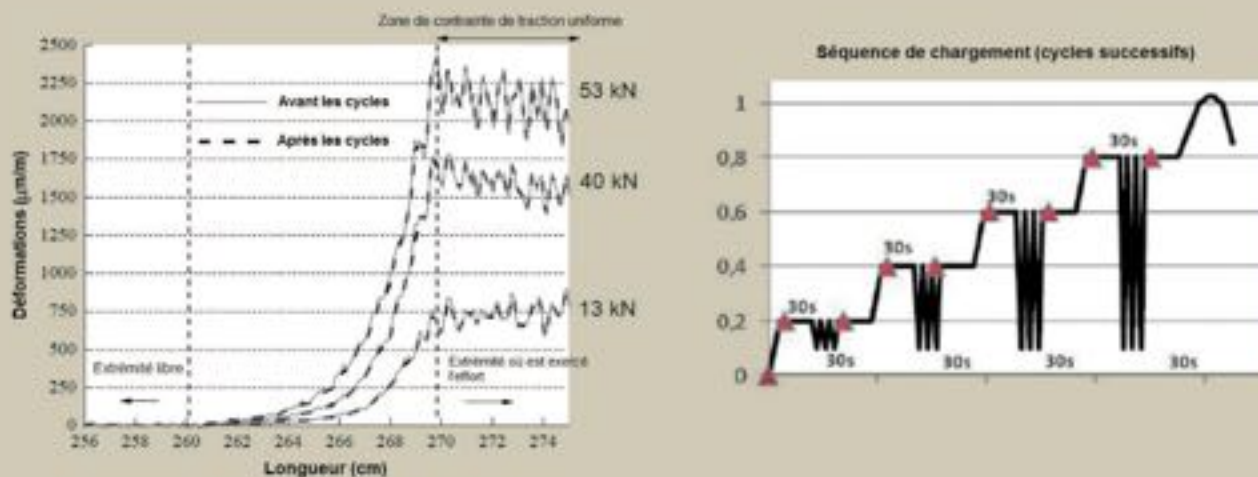
b- Barre pleinement ancrée avec un scellement de 8 diamètres



3

DÉFORMATIONS MESURÉES PAR FIBRES OPTIQUES LE LONG DE L'ARMATURE À DIFFÉRENTS PALIERS DE CHARGEMENT, AVANT ET APRÈS RÉALISATION DES CYCLES

(séquence de chargement illustrée en encart en proportion de la charge de ruine statique. Les triangles rouges représentent les paliers pour l'interrogation des fibres optiques)



© IFSTTAR

4

rigide. Pour toutes les géométries des corps d'épreuve, des essais monotones, des essais comprenant des paliers et des essais comprenant trois cycles de déchargement répétés à chaque palier d'effort d'arrachement ont été réalisés. Cette répétition était destinée à détecter un éventuel endommagement progressif de l'adhérence lors des cycles. L'essai monotone a permis d'obtenir l'effort d'arrachement de référence, les paliers des essais avec cycles de décharge étant définis par un effort maximal égal à 20, 40, 60 et 80 % de cette charge ultime et un effort minimal égal à 10 % de cette même valeur.

L'instrumentation des corps d'épreuve a été identique pour l'ensemble des essais : fibre optique fixée à l'armature, deux capteurs de déplacement mesurant le glissement relatif de l'armature par rapport à la surface du BFUP, au-dessus et en-dessous de l'éprouvette, et une mesure de déplacement global en partie basse. L'enregistrement des mesures classiques a été effectué en continu, alors que l'interrogation des fibres optiques, nécessitant plusieurs secondes, était faite lors de paliers de chargement.

PROPRIÉTÉS DU MATÉRIAU

Des essais de compression ont permis de déterminer la résistance, le module d'Young et le coefficient de Poisson du BFUP. Le comportement en traction a été caractérisé selon les recommandations de l'Afgc^[1], conduisant à une limite d'élasticité de 9,13 MPa en valeur caractéristique (10,65 MPa en valeur moyenne) et à une loi de comporte-

4- Déformations mesurées par fibres optiques le long de l'armature à différents paliers de chargement, avant et après réalisation des cycles (séquence de chargement illustrée en encart en proportion de la charge de ruine statique. Les triangles rouges représentent les paliers pour l'interrogation des fibres optiques).

4- Deformation measured by optical fibre along the reinforcing bars at various loading levels, before and after execution of the cycles (loading sequence illustrated in the insert in proportion to the static failure load. The red triangles represent the levels for interrogation of the optical fibres).

ment contrainte-ouverture de fissure identifiée par analyse inverse d'essais de flexion sur éprouvettes entaillées, (figure 2).

La loi de comportement en traction a été déterminée pour chaque type d'armature. L'effet de l'entaille ménagée pour la fixation des fibres optiques a été quantifié, il s'est avéré inférieur à 5 % pour les barres de diamètre 8 mm, de 2 % pour les barres de diamètre 12 mm, et négligeable pour les barres de diamètre 16 mm.

RÉSULTATS DES ESSAIS

COMPORTEMENT LOCAL CONTRAINTE - GLISSEMENT

L'analyse des déformations mesurées par les fibres optiques avec une résolution millimétrique (figure 3) aussi bien pour les essais monotones qu'avant et après cycles de chargement (figure 4) a permis de déterminer une courbe intrinsèque reliant la contrainte de glissement au déplacement relatif local entre l'armature et le BFUP, en particulier dans une phase de comportement élastique (très faible déplacement) et jusqu'à une valeur de plateau correspondant à l'initiation du glissement macroscopique mobilisant la contrainte ultime d'adhérence ultime (figure 5). Il est notable (figure 4) que les courbes restent identiques avant et après les chargements répétés.

MODES DE RUPTURE ET CONTRAINTE ULTIME D'ADHÉRENCE

Sauf pour quelques cas (détaillés en^[10] avec l'ensemble des résultats issus de

ces essais) la plastification des armatures a été atteinte dans les tests sur éléments minces, sauf pour les barres de diamètre \emptyset important, de faible longueur de scellement et d'enrobage faible. Néanmoins pour tous les essais correspondant à une faible longueur de scellement, la variation quasi-linéaire des déformations dans la barre permet d'identifier une contrainte d'adhérence uniforme ; dans ce cas, lorsqu'un glissement est observé en partie basse, on peut considérer que cette contrainte fournit une estimation de la contrainte ultime d'adhérence.

Pour les essais en pleine masse, la rupture a été atteinte par plastification de la barre pour des longueurs de scellement de $8 \emptyset$ et par glissement pour des longueurs de scellement de $2,5 \emptyset$. La contrainte ultime d'adhérence a ainsi atteint 53,2 MPa pour les barres HA12 et 57,7 MPa pour les barres HA16.

REPRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE

Les résultats de cette campagne s'intègrent utilement aux données de la littérature^{[3-6], [11]}, dans un diagramme représentant la contrainte ultime d'adhérence, normalisée par la racine carrée de la résistance moyenne en compression du BFUP, en fonction du rapport entre l'enrobage de la barre et son diamètre (figure 6). On note que pour cette campagne comme pour les données de la littérature, seuls ont été conservés les essais conduisant à une rupture par adhérence avec identification claire de la contrainte ultime. Une limite idéalisée du domaine correspondant à un ancrage effectif de la barre, \triangleright

en termes de contrainte appliquée, a été représentée sur ce graphe. Pour un enrobage supérieur à $4 \varnothing$, la contrainte ultime de cisaillement peut être prise égale à $3,5 f_c^{1/2}$. Pour un enrobage plus faible (néanmoins supérieur à \varnothing) on peut admettre que cette contrainte varie linéairement.

CALIBRATION DES RÈGLES DE CALCUL

ÉTAT DES LIEUX

Les recommandations de $A_{fgc}^{(1)}$ correspondent dans les cas testés (barres de limite élastique 500 MPa, BFUP de résistance caractéristique 180 MPa) à une longueur d'ancrage de 6 diamètres si l'on adopte un coefficient partiel $\gamma_c = 1,0$. Or le diagramme bilinéaire issu des essais correspond à une longueur d'ancrage de 10,7 diamètres lorsque l'enrobage vaut \varnothing , 7 diamètres lorsqu'il est de $1,5 \varnothing$, 5,3 diamètres lorsqu'il vaut $2 \varnothing$ et 2,7 diamètres au-delà de $4 \varnothing$. La préparation de la norme de calcul des structures en BFUP⁽⁹⁾ a donc été l'occasion de revenir aux formules de l'Eurocode 2, et de revoir leur adaptation aux BFUP en minimisant les formules modifiées et en ajustant principalement l'expression du terme α_2 (paragraphe 8.4.4) destiné à décrire l'influence de l'épaisseur d'enrobage. L'absence d'effet des chargements répétés observée dans les essais BAD-FOPS a en revanche permis de ne pas prendre de marge supplémentaire dans la calibration des formules au titre de la prise en compte d'effets dynamiques.

DÉMARCHE ADOPTÉE

Dans l'Eurocode 2 comme dans les recommandations $A_{fgc}^{(1)}$, le calcul de la longueur d'ancrage se fait en 3 étapes :

- Calcul de la contrainte ultime d'adhérence f_{bd} ;
- Calcul de la longueur d'ancrage de référence $l_{b,reqd}$;
- Calcul de la longueur d'ancrage de calcul, l_{bd} , qui tient compte d'une valeur plancher $l_{b,min}$.

L'expression de f_{bd} fait intervenir un coefficient η_1 relatif à la qualité des conditions d'adhérence et un coefficient η_2 lié au diamètre de la barre. En l'absence de données sur des barres de diamètre supérieur à 32 mm, il a été choisi de limiter les formules à des barres de diamètre inférieur ou égal à 32 mm, ce qui permet de considérer $\eta_2 = 1,0$. L'introduction de η_1 est par ailleurs associée au risque de vides sous armatures par ressuage interne des bétons ordinaires, en partie haute des éléments épais. Il a paru inapproprié d'envisager cette situation en BFUP compte tenu de la rhéologie, de la formulation et des conditions contrôlées de mise en œuvre. Enfin, la prise en compte d'un effet de confinement de l'armature par le BFUP, au-delà de l'amorçage d'une fissure, a été modifiée grâce au coefficient δ dont l'expression a été ajustée par rapport à⁽¹⁾.

L'expression de la longueur d'ancrage de référence dérive directement de l'équation d'équilibre d'un tronçon élémentaire d'armature et n'avait donc aucune raison d'être modifiée par rapport à l'Eurocode 2 et aux recommandations $A_{fgc}^{(1)}$. Les principaux ajustements apportés dans l'élaboration des formules de la norme NF P 18-710 portent donc sur l'expression de la longueur d'ancrage de calcul l_{bd} , avec :

- Un terme l_{tot} qui tient compte de l'incertitude de positionnement dans le calcul de la valeur plancher $l_{b,min}$;

- La modulation par le coefficient δ de $l_{b,min}$ pour tenir compte de l'éventuel complément d'effet de confinement apporté par un BFUP suffisamment ductile au-delà de la fissuration ;

→ Une modulation mieux ajustée de l'influence de l'enrobage, qui a conduit à revoir l'expression du coefficient α_2 issu de l'Eurocode 2. Les formules de la norme NF P 18-710⁽⁹⁾ sont donc les suivantes :

- Paragraphe 8.4.2 (2) :

$$f_{bd} = \eta \delta f_{ctk,el} / \gamma_c \quad (1)$$

avec :

$$\eta = 2,25 \text{ (armatures à haute adhérence)}$$

$$\delta = 1 + 0,4 \left[\frac{f_{ctm}}{K'_{global} f_{ctm,el}} \right] \leq 1,5$$

K'_{global} facteur d'orientation correspondant à la direction transversale à la barre.

- Paragraphe 8.4.3 (incluant la définition de $l_{b,reqd}$) inchangé.

- Équations du paragraphe 8.4.4 (1) modifiées comme suit :

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,reqd} + l_{tot} \geq l_{b,min} + l_{tot} \quad (2)$$

Coefficients α_1 , α_3 , α_4 et α_5 inchangés par rapport à la norme NFEN 1992-1-1.

Coefficient α_2 défini par :

$$1 \leq \alpha_2 = 2,6 - 0,4(c/\varnothing - 1) \leq 2,6 \quad (3)$$

avec :

c = épaisseur d'enrobage

\varnothing = diamètre nominal de l'armature.

$$l_{b,min} = \max(\varnothing; 10 \text{ mm}) \quad (4)$$

$$l_{b,min} = \max(0,3 l_{b,reqd}; (1/\delta - 0,15) \times 10 \varnothing; (1/\delta - 0,15) \times 100 \text{ mm}) \text{ pour les armatures tendues} \quad (5)$$

$$l_{b,min} = \max(0,7 l_{b,reqd}; (1/\delta - 0,15) \times 10 \varnothing; (1/\delta - 0,15) \times 100 \text{ mm}) \text{ pour les armatures comprimées} \quad (6)$$

5- Contrainte de cisaillement en fonction du glissement de l'armature.

a) Identification expérimentale directe issue des essais d'arrachement sur corps d'éprouve massifs.

b) Identification des phases de comportement.

5- Shear stress as a function of reinforcing bar slipping.

a) Direct experimental identification based on the pull-out tests on massive test specimens.

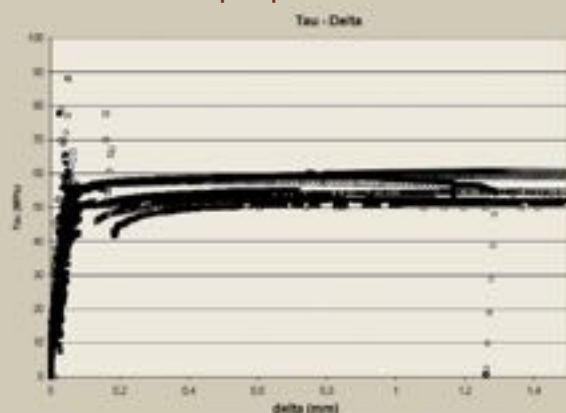
b) Identification of behaviour phases.

VALIDATION

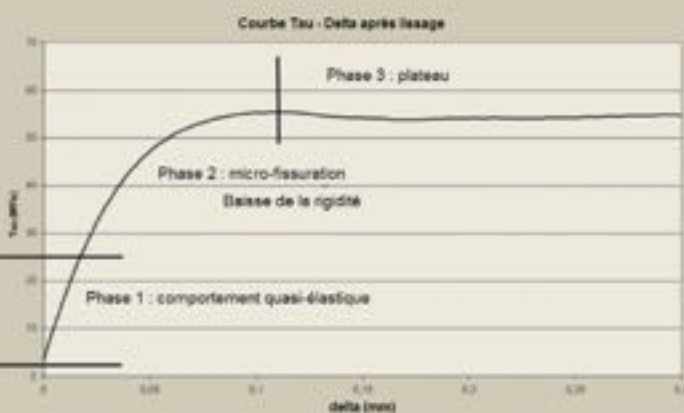
La comparaison de ces formules⁽⁹⁾ avec les résultats expérimentaux (tenant compte le cas échéant de la valeur plancher $l_{b,min}$) a été effectuée en utilisant les valeurs moyennes expérimentales des résistances, une contrainte de 500 MPa dans les armatures, et en prenant des coefficients partiels égaux à 1,0. Le diagramme bilinéaire issu des essais (figure 6), intégrant une forme de sécurité γ compris vis-à-vis des autres résultats de la littérature utili-

CONTRAÎNTE DE CISAILLEMENT EN FONCTION DU GLISSEMENT DE L'ARMATURE

a- Identification expérimentale directe issue des essais d'arrachement sur corps d'éprouve massifs

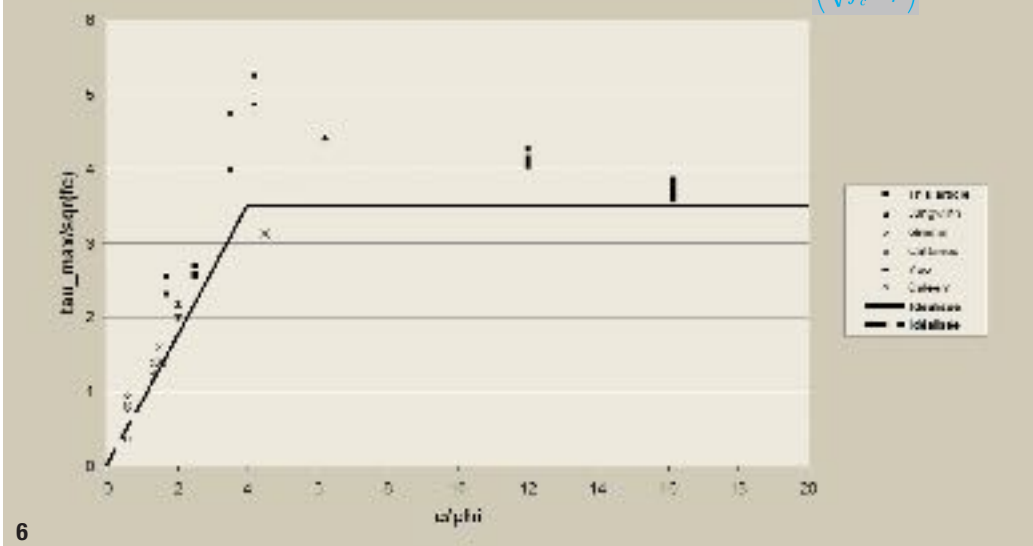


b- Identification des phases de comportement



RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET LIMITE IDÉALISÉE DU DOMAINE OÙ LES BARRES SONT ANCRÉES, DANS UN DIAGRAMME $\left(\frac{\tau_{\max}}{\sqrt{f_c}}; \frac{c}{\phi}\right)$

© IFSTTAR



sables [4-6], [12-13], a permis de réaliser des interpolations correspondant aux situations variées considérées en termes de diamètre d'armature et d'enrobage. On a pu définir pour chaque simulation, d'une part le rapport entre la contrainte ultime d'adhérence f_{bd} calculée, et la valeur dérivée de l'interpolation des résultats expérimentaux et, d'autre part, le rapport analogue pour la longueur d'ancrage de calcul l_{bd} . Ces deux rapports ne sont pas nécessairement égaux à cause de l'écrêtage par $l_{b,min}$ et de la valeur de α_2 . En se rapprochant de la démarche de calibrage des formules actuelles de l'Eurocode 2 [14], il est apparu que l'objectif souhaitable (et le plus pertinent vis-à-vis de la « sécurité pratique » attendue) était

6- Résultats expérimentaux et limite idéalisée du domaine où les barres sont ancrées, dans un diagramme

$$\left(\frac{\tau_{\max}}{\sqrt{f_c}}; \frac{c}{\phi}\right)$$

6- Experimental and idealised limit results of the domain in which the bars are anchored, in a diagram

$$\left(\frac{\tau_{\max}}{\sqrt{f_c}}; \frac{c}{\phi}\right)$$

d'assurer une valeur de 2,0 relativement homogène pour le rapport associé à la prédiction de l_{bd} . Cet objectif s'est avéré atteint, en particulier pour les valeurs relativement faibles de c/ϕ correspondant aux situations pratiques d'optimisation des ouvrages en BFUP et en notant que, dans les situations d'ancrage en pleine masse ($c/\phi > 4$), c'est le plus souvent la valeur plancher $l_{b,min}$ qui est déterminante. Ces formules [9] ont également été confrontées aux dispositions constructives recommandées par l'administration fédérale américaine pour l'utilisation de BFUP dans les joints de clavage entre poutres préfabriquées des tabliers de pont [15]. Il est apparu que les longueurs d'ancrage indiquées étaient tout à fait cohérentes avec les valeurs qui auraient été justifiées par application de la norme NF P 18-710 [9].

CONCLUSION

Le programme expérimental détaillé dans cet article a permis de compléter significativement les données disponibles pour justifier les dispositions de calcul de l'ancrage des armatures dans du BFUP dans des conditions variées de diamètre et d'épaisseur d'enrobage, en assurant une sécurité suffisante y

compris en cas de chargements cycliques répétés. Les résultats, dont la fiabilité est renforcée par les mesures locales de déformation réalisées à l'aide des capteurs à fibre optique, ont permis l'ajustement des formules de la norme NF P 18-710 en cours de publication. □

RÉFÉRENCES :

- [1] AFGC, "Ultra-high performance fibre-reinforced concretes. Recommendations", Paris, France, 2013.
- [2] Toutlemonde & Resplendino eds, UHPFRC 2013, RILEM PRO 87, 2013.
- [3] Reineck, K.J., Greiner, S., "Test on ultra-high performance fibre reinforced concrete designing hot-water tanks and UHPFRC-Shells", Int. symp. on UHPFRC, Kassel, 2004.
- [4] Jungwirth, J., 2006, "Zum tragerverhalten von Zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultrahochleistungs-Faserbeton", thèse de doctorat N°3429, EPFL, Lausanne.
- [5] Saleem, M.A., et al., 2013, "Development Length of High-Strength Steel Rebar in Ultrahigh Performance Concrete", J. of Mat. in Civ. Eng., Vol. 25 (8), pp. 991-998.
- [6] Yoo, D.Y., et al., 2014, "Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers", Composites Part B, Vol. 58, pp. 122-133.
- [7] Khadour, A., et al., "Distributed strain monitoring of reinforcement bars using optical fibers for SHM", CONSEC13, Nanjing, China, 2013.
- [8] Toutlemonde, F., et al., "Recent experimental investigations on reinforced UHPFRC for applications in earthquake engineering and retrofitting", UHPFRC 2013, RILEM PRO 87, 2013, pp. 597-606.
- [9] NF P 18-710 Calcul des structures en béton - Règles spécifiques pour les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP), AFNOR, Paris, 2015.
- [10] Marchand, P., et al. "Bond behaviour of reinforcing bars in UHPFRC: experimental investigation", Mat. & Struct., DOI 10.1617/s11527-015-0628-0, pub. online, 2015.
- [11] Cattaneo, S., Rosati, G., 2000, "Bond and splitting in high performance fiber reinforced concrete", BEFIB 2000, pp. 567-576.
- [12] Leutbecher, T., "Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHP-C)", Master Thesis, Kassel University, 2007.
- [13] Holschermacher, K., Weisse, D., Klotz, S., "Bond of reinforcement in ultra high strength concrete", int. symp. on UHP-C, Kassel, 2004, pp. 375-388.
- [14] CEB Comite Euro-International du béton - bulletin d'information n°217 - SELECTED JUSTIFICATION NOTES - April 1993.
- [15] Graybeal B., Design and construction of field-cast UHPC connections, FHWA technical note n° FHWA-HRT-14-084, oct. 2014.

LES PARTENAIRES

Les études évoquées ont été réalisées dans le cadre du projet BADIFOPS, soutenu par l'État dans le cadre du programme de recherche « concevoir et construire pour le développement durable » (C2D2) géré par la mission Génie civil et construction du Ministère en charge du développement durable, convention n°10 MGC S010. Les partenaires de ce projet sont : Ifsttar, Cstb, Eiffage Tp et Cerema (ex-Setra). Remerciements à A. Simon et E. Gérald (Eiffage), A. Khadour (Ifsttar) et aux équipes techniques Cstb et Ifsttar.

ABSTRACT

ANCHORING REINFORCING STEELS IN UHPFRC: SUBSTANTIATION OF THE DESIGN CODE

PIERRE MARCHAND, IFSTTAR - FLORENT BABY, IFSTTAR - PHILIPPE RIVILLON, CSTB - GRÉGORIE GÉNÉREUX, CEREMA - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR

The adhesion of passive reinforcements in UHPFRC was characterised experimentally on thin elements and in the mass, under repeated monotonic loading, using innovative optical fibre instrumentation. The results confirm a very small anchoring length, but increasing significantly for low coating values. The α_2 coefficient of the Eurocode formula was therefore calibrated so as to aim at uniform security of the design detailing for reinforced UHPFRC, irrespective of the coating value, for finalisation of the NF P 18-710 standard. □

ANCLAJE DE ARMADURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN EL HMAR: JUSTIFICACIÓN DE LAS REGLAS DE CÁLCULO

PIERRE MARCHAND, IFSTTAR - FLORENT BABY, IFSTTAR - PHILIPPE RIVILLON, CSTB - GRÉGORIE GÉNÉREUX, CEREMA - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR

La adherencia de armaduras pasivas sobre el HMAR se ha caracterizado experimentalmente en elementos delgados y a toda masa, bajo una carga monótona y repetida, con el apoyo de una instrumentación innovadora para fibras ópticas. Los resultados confirman una longitud de anclaje muy reducida, pero que aumenta significativamente con bajos valores de aglomerado. Así, se ha calibrado el coeficiente α_2 de la fórmula del Eurocódigo para lograr una seguridad homogénea de las disposiciones de diseño del HMAR armado, con independencia del valor del aglomerado, en el marco de la elaboración de la norma NF P 18-710. □

RUPTURE EN FLEXION DE PLAQUES TRIANGULAIRES EN BFUP : INVESTIGATION EXPÉRIMENTALE, ANALYSE DES MÉCANISMES ET DE LEUR DUCTILITÉ

AUTEURS : THOMAS GUÉNET, DOCTORANT, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, LABORATOIRE EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST), DOCTORANT EN COTUTELLE IFSTTAR / UNIVERSITÉ LAVAL - FLORENT BABY, INGÉNIEUR DE RECHERCHE AU LABORATOIRE EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST) - PIERRE MARCHAND, CHEF DU LABORATOIRE EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST), DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, DÉLÉGUÉ SCIENTIFIQUE, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST)

LES PLAQUES EN BFUP RAIDIES PAR DES NERVURES ARMÉES CONSTITUENT UN CONCEPT PROMETTEUR, DONT L'OPTIMISATION EST DIRECTEMENT ASSOCIÉE À LA POSSIBILITÉ D'ASSURER UN MODE DE RUPTURE DUCTILE. AFIN DE VALIDER UN OUTIL DE CALCUL TENANT EXPLICITEMENT COMPTE DES REPRISES D'EFFORT DE TRACTION APPORTÉES PAR UN RENFORCEMENT FIBRÉ ORIENTÉ ET DE DIRECTIONS DISTRIBUÉES, DES INVESTIGATIONS EXPÉRIMENTALES ONT ÉTÉ CONDUITES. UNE PREMIÈRE ANALYSE PAR LA MÉTHODE DES LIGNES DE RUPTURE A CONFIRMÉ L'IMPORTANCE DE CONSIDÉRER LA RÉPARTITION DES FIBRES ET L'ANISOTROPIE DU COMPORTEMENT POST-PIC DU MATÉRIAU.

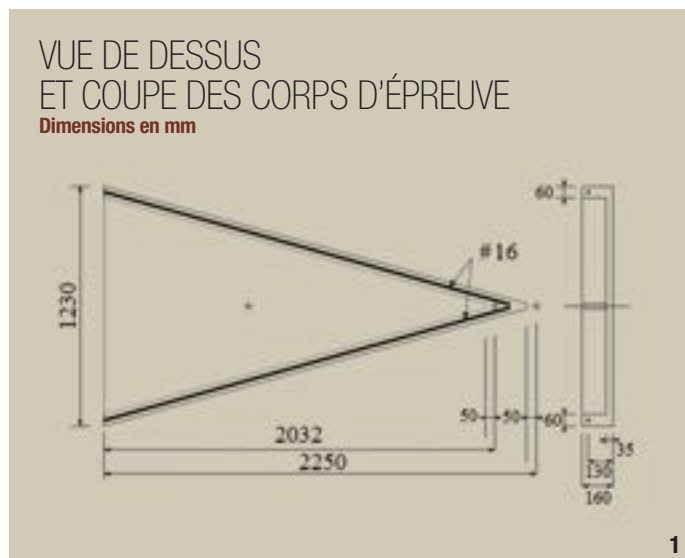
INTRODUCTION

À côté des structures précontraintes valorisant la résistance en compression du matériau et des éléments de portée modeste où seules les fibres contribuent à la reprise d'efforts post-fissuration, les plaques en BFUP raidies par des nervures armées constituent un concept prometteur, appliqué par exemple aux éléments de toiture de la villa Navarra^[1] ou du stade Jean Bouin^[2]. On manque cependant de données quantitatives permettant d'étayer le fonctionnement bidirectionnel des hourdis et la ductilité effective de tels éléments raidis. Un programme expérimental a été conçu et réalisé pour quantifier le comportement de plaques triangulaires en BFUP raidies par des nervures armées, tenant compte de l'orientation et de la quantité effective des fibres. Une présentation des résultats expérimentaux et une première analyse sont proposées.

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

CORPS D'ÉPREUVE ET PARAMÈTRES ÉTUDIÉS

Les corps d'épreuve de longueur 2,25 m, de largeur de base 1,23 m et



d'épaisseur de nervures 0,16 m pour une épaisseur nominale de hourdis de 35 mm (figure 1) ont été fabriqués en usine à partir de 2 compositions de BFUP comportant un pourcentage V_f de 1 % ou 2 % de fibres métalliques droites (tableau 1). Chaque nervure comprend une armature HA16 dont l'axe est situé à 130 mm de la surface supérieure du hourdis. Les élé-

ments ont été traités thermiquement à 2 jours d'âge pendant 48 heures dans une étuve à 90°C et 100 % d'humidité relative, de façon à stabiliser leurs dimensions et les propriétés du BFUP. Dix corps d'épreuve ont été fabriqués, en faisant varier le mode de coulage (figure 2). Pour le BFUP-2 % on a adopté le process A visant à favoriser une orientation isotrope des fibres dans le hourdis ; pour le BFUP-1 % on a adopté soit ce process A, soit le process B qui vise à orienter les fibres du hourdis parallèlement à la base du triangle.

Les triangles étant simplement appuyés sur leurs trois sommets, deux configurations d'essai ont été mises en œuvre (figure 3).

Dans un cas, la charge a été répartie en 4 points de chargement à l'aplomb des nervures armées, visant à produire une flexion de ces dernières avec une contrainte en fibre inférieure approximativement constante entre les points de chargement.

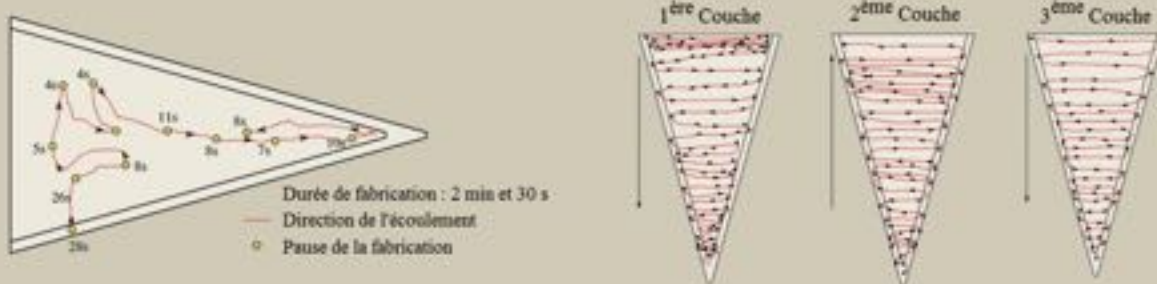
Dans l'autre cas, la charge a été concentrée au centre du hourdis, combinant la flexion transversale et longitudinale de cette plaque en BFUP non armé, la redistribution des efforts

1- Vue de dessus et coupe des corps d'épreuve - Dimensions en mm.

1- Plan and cross section view of the test specimens - Dimensions in mm.

PROCESSUS DE COULAGE ILLUSTRÉ PAR LE CHEMINEMENT DU POINT DE VERSEMENT

Process A (à gauche) et process B, recherchant une orientation parallèle à la base des triangles (à droite)



© IFSSTAR
2

2- Processus de coulage illustré par le cheminement du point de versement : process A (à gauche) et process B, recherchant une orientation parallèle à la base des triangles (à droite).

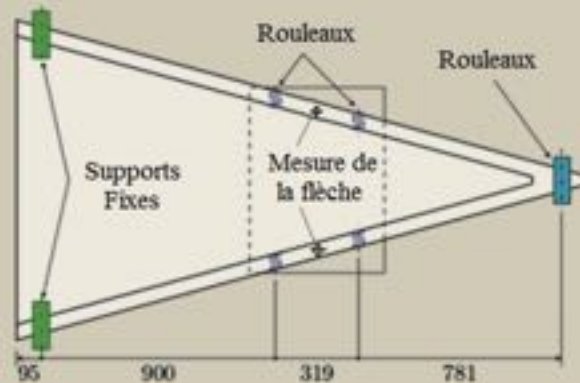
3- Configurations de chargement : flexion 4 points de chaque nervure (en haut), flexion au centre de la plaque (en bas).

2- Pouring process illustrated by the path of the pour point: process A (on the left) and process B, looking for an orientation parallel to the base of the triangles (on the right).

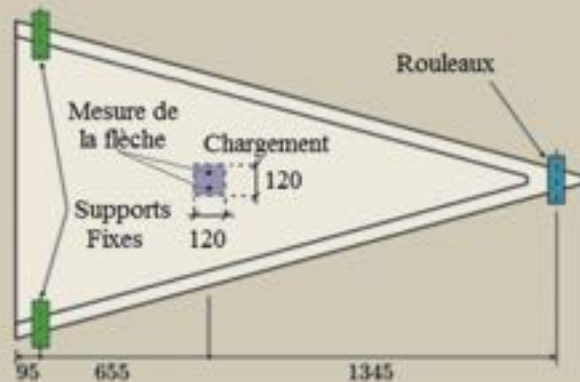
3- Load configurations: 4-point bending of each rib (top), bending in the centre of the plate (bottom).

CONFIGURATIONS DE CHARGEMENT

Flexion 4 points de chaque nervure



Flexion au centre de la plaque



© IFSSTAR
3

après formation d'un mécanisme de ruine (concentration des déformations selon des « lignes de rupture ») et la mobilisation progressive éventuelle des nervures armées. Le programme des essais selon ces différentes configurations et paramètres est récapitulé au tableau 2.

RÉSULTATS DES ESSAIS SUR ÉLÉMENTS TRIANGULAIRES

Les courbes représentant la force appliquée sur les triangles en fonction de la flèche (figure 4) mettent en évidence un comportement ductile plus ou moins marqué selon la configuration d'essai et le type de fibrage.

Lors des essais avec répartition de l'effort en 4 points sur les nervures, à l'exception de l'essai sur le triangle 2%-A-4pts-02 affecté par un défaut de mise en œuvre, le BFUP avec $V_f = 2\%$ conduit à une multi-fissuration finement répartie (espacement des fissures de l'ordre de $\frac{3}{4}$ de L_r) avant localisation des déformations sous forme d'une macro-fissure dans la zone de moment maximal, associée à la plastification de l'armature. Au contraire pour le BFUP avec $V_f = 1\%$, une fissuration multiple se produit, avec un effort résistant inférieur de 15%. Cependant, une fois la localisation intervenue dans les deux nervures, l'écart de capacité entre les différentes configurations se réduit, dans la mesure où le moment est principalement repris de la même façon par le BFUP comprimé du hourdis et du haut des nervures d'une part, et par les armatures tendues d'autre part. L'état des corps d'épreuve en fin d'essai est illustré figure 5.

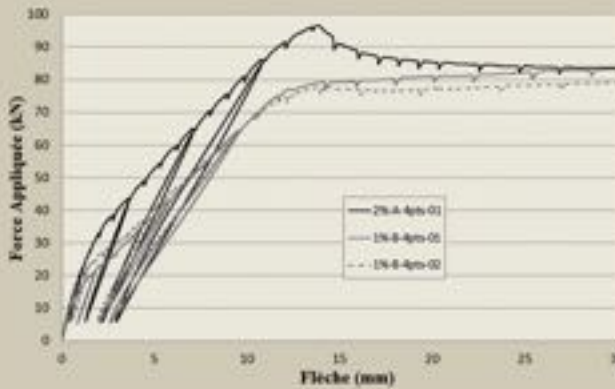
Pour les essais avec application de la charge au centre, l'effet de la variabilité de l'épaisseur du hourdis a été pris en compte en représentant l'effort appliqué divisé par le carré de l'épaisseur (figure 4).

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES DES BFUP UTILISÉS

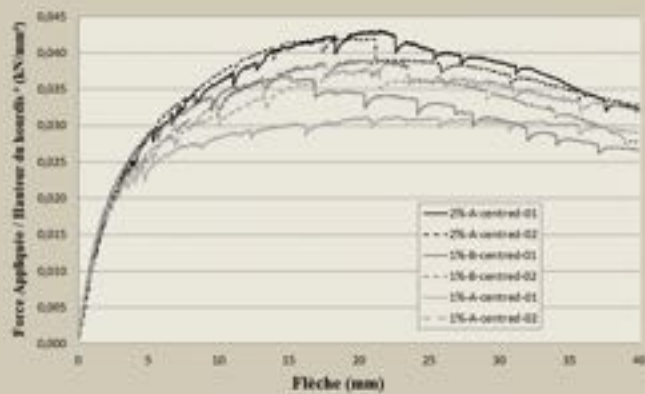
Désignation	f_{cm} sur cylindres Après traitement thermique (MPa)	Module d'Young Après traitement thermique (GPa)	Fibres d'acier droites $L_f - \Phi_f$ (mm)	V_f (%)
BFUP-1%	229	56,9	13 - 0,2	1
BFUP-2%	234	58,4	13 - 0,2	2

COURBES CHARGE-FLÈCHE

Essais de flexion 4 points sur nervures



Charge/h² - flèche pour les essais centrés



4- Courbes charge-flèche lors des essais de flexion 4 points sur nervures (à gauche) et charge/h² - flèche pour les essais centrés (à droite).

4- Load-deflection curve during 4-point bending tests on ribs (on the left) and load/h²-deflection curve for centred tests (on the right).

TABLEAU 2 : PROGRAMME D'ESSAIS SUR ÉLÉMENTS TRIANGULAIRES

Corps d'éprouve	Teneur en fibres	Mode de coulage	Configuration de chargement
2%-A-4pts-01	2%	Process A	Flex. 4 pts nervures
2%-A-4pts-02	2%	Process A	Flex. 4 pts nervures
1%-B-4pts-01	1%	Process B	Flex. 4 pts nervures
1%-B-4pts-02	1%	Process B	Flex. 4 pts nervures
2%-A-centré-01	2%	Process A	Charge centrée
2%-A-centré-02	2%	Process A	Charge centrée
1%-A-centré-01	1%	Process A	Charge centrée
1%-A-centré-02	1%	Process A	Charge centrée
1%-B-centré-01	1%	Process B	Charge centrée
1%-B-centré-02	1%	Process B	Charge centrée

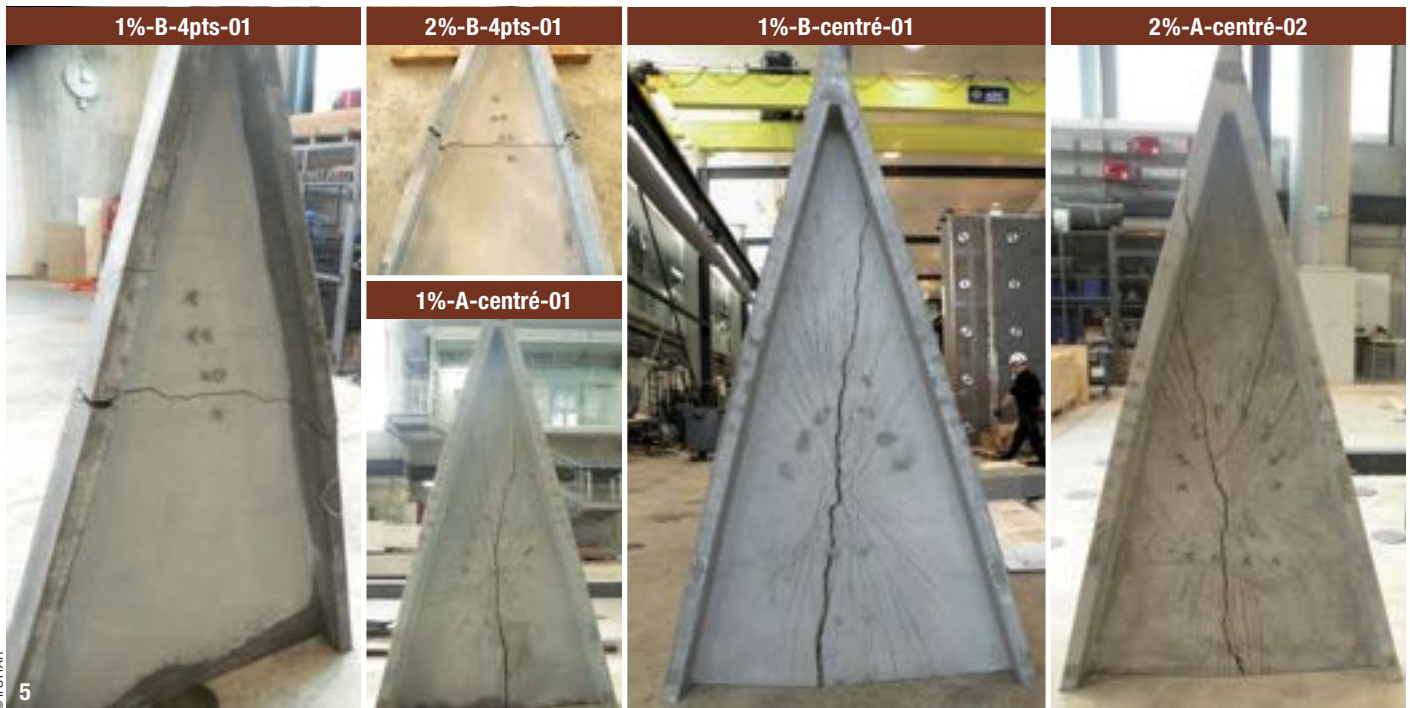
TABLEAU 3 : RÉSIDENCES ET FACTEURS D'ORIENTATION DANS LES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS ET ORIENTATIONS

BFUP et mode de coulage	Zone	Orientation (°)	Max courbe contrainte-flèche à α^2 (MPa)	Max courbe moyenne contrainte - flèche (MPa)	Facteur d'orientation
2%-A	Base du triangle	0	25,90	25,89	1,00
		45	22,93		0,89
		90	23,22		0,90
		135	36,58		1,41
	Pointe du triangle	0	24,85	24,38	1,02
		45	22,50		0,92
		90	28,47		1,17
		135	22,97		0,94
1%-B	Base du triangle	0	18,95	19,06	0,99
		45	18,76		0,98
		90	19,12		1,00
		135	20,30		1,06
	Pointe du triangle	0	16,51	14,86	1,11
		45	17,16		1,16
		90	13,58		0,91
		135	17,49		1,18
1%-A	-	0	22,77	19,09	1,19
		45	18,47		0,97
		90	16,26		0,85
		135	20,03		1,05

Le schéma de fissuration correspond d'abord à une fissuration fine rayonnante en sous-face tendue du hourdis, perpendiculaire aux tractions principales. L'atteinte de l'effort maximal correspond à la mise en place d'un mécanisme localisé à l'échelle de l'élément de structure sous forme d'un schéma de lignes de rupture en Y (figure 5). L'effort maximal obtenu dans cette configuration centrée avec les triangles où le BFUP comporte 2% de fibres est supérieur de 11% à celui des plaques 1%-B et de 19% à celui des plaques 1%-A.

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS MATÉRIELLES DU BFUP

Le comportement en traction des différents BFUP utilisés a été caractérisé en flexion sur prismes moulés de dimensions 7 cm x 7 cm x 28 cm. La limite élastique et le comportement post-fissuration ont été déterminés. La courbe (moyenne de 6 essais) contrainte - flèche à mi-portée a été traitée par analyse inverse^[3-5] pour obtenir une courbe contrainte-déformation (supposant un



© IFSSTAR
5

5- Schémas de ruine pour les essais avec flexion 4 points des nervures (1%-B-4pts-01 ; 2%-A-4pts-01) et pour les essais avec flexion au centre de la plaque (1%-A-centré-01 ; 1%-B-centré-01 ; 2%-A-centré-02).

6- Courbe moyenne « contrainte équivalente de flexion - flèche au centre » issue de caractérisation en flexion 4 points sur prismes moulés (en haut) et courbe « contrainte de traction - déformation » obtenue par analyse inverse (en bas).

5- Failure diagrams for tests with 4-point bending of the ribs (1%-B-4pts-01; 2%-A-4pts-01) and for tests with bending in the centre of the plate (1%-A-centred-01; 1%-B-centred-01; 2%-A-centred-02).

6- Mean "equivalent bending stress-centre deflection" curve resulting from the characterisation by 4-point bending on moulded prisms (top) and "tensile stress-deformation" curve obtained by inverse analysis (bottom).

comportement écouissant) y compris pour le BFUP de $V_f = 1\%$ (figure 6). Les essais sur prismes moulés ne pouvant pas rendre compte de l'effet de l'orientation des fibres dans l'élément, le comportement des différents BFUP a été identifié sur des prismes sciés dans le hourdis d'éléments triangulaires sumuméraires où la mise en place du BFUP avait suivi le même pro-

cess. Compte tenu de la mise en place du BFUP et du chargement ultérieur, on a pu distinguer le comportement du matériau dans la base du hourdis et celui du BFUP dans la pointe, selon des orientations de 0° , 45° , 90° et 135° . Selon chaque direction, six prismes de dimensions $60\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ ont été sciés et testés en flexion quatre points (portée de 210 mm). À partir de

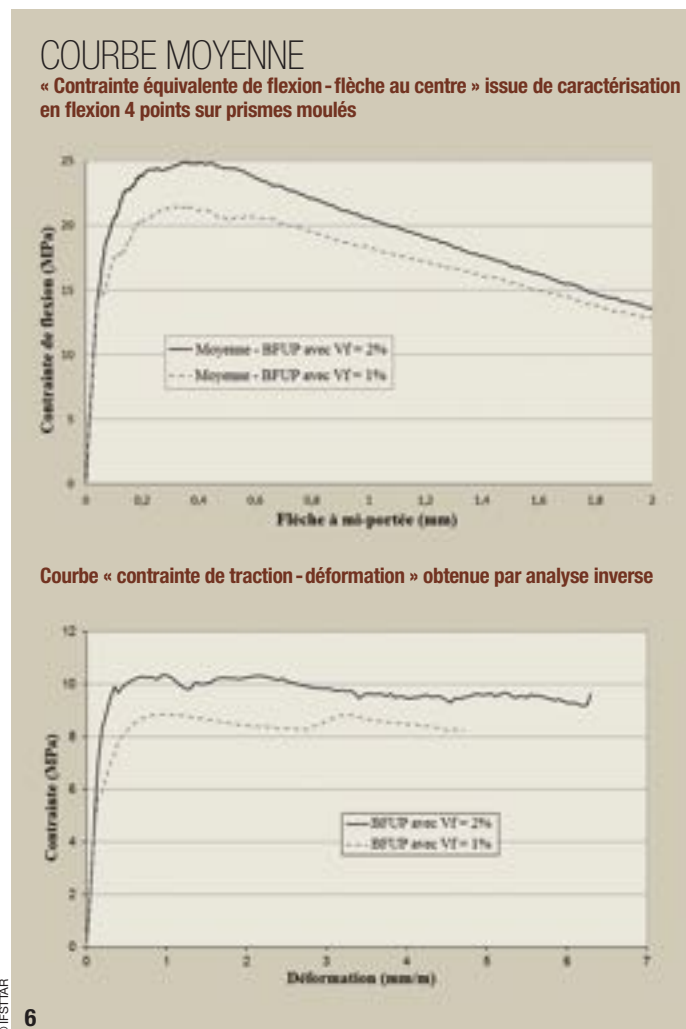
la courbe moyenne « contrainte équivalente de flexion - flèche à mi-portée » selon chaque direction α , un facteur d'orientation a été déterminé en divisant la contrainte au pic de la courbe correspondant à cette direction α par la contrainte au pic de la courbe correspondant à la moyenne de toutes les orientations. Les valeurs obtenues sont récapitulées au tableau 3.

Enfin, pour l'analyse des essais avec charge appliquée au centre du hourdis, des courbes contrainte - ouverture de fissure ont été déterminées par analyse inverse^[6] des essais de flexion sur prismes sciés dans les différentes directions 0° , 45° , 90° et 135° , conduisant aux relations illustrées figure 8 qui mettent en évidence la contribution des fibres selon leur orientation et leur distribution résultant du process de mise en œuvre du BFUP.

MODÉLISATION ANALYTIQUE ESSAIS AVEC FLEXION DES NERVURES

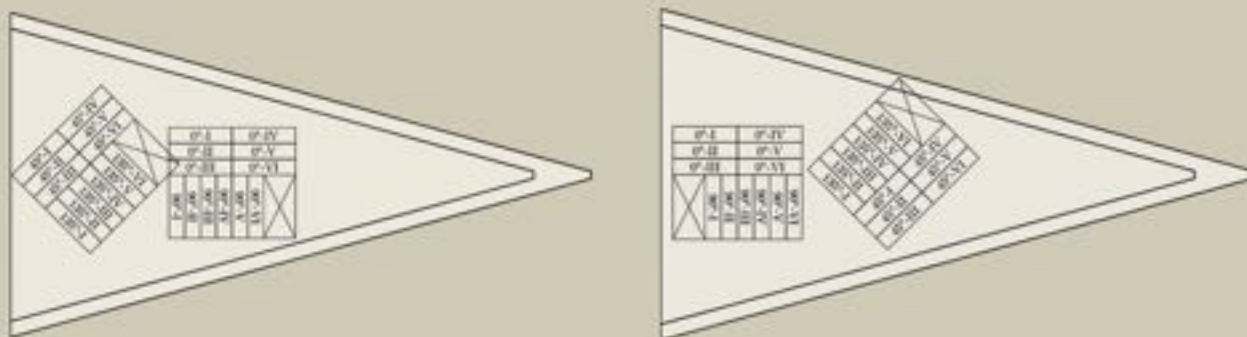
La modélisation de ces essais a utilisé en première approche les lois contrainte-déformation illustrées figure 6, en supposant que l'orientation des fibres dans les nervures (de largeur 60 mm) diffère peu de celle présente dans les prismes moulés. On fait l'hypothèse d'une adhérence parfaite de l'armature dans le BFUP, l'armature est supposée avoir un comportement élastique parfaitement plastique avec une limite d'élasticité de 564 MPa (déterminée expérimentalement).

Le résultat des calculs surestime la résistance et la rigidité expérimentales des corps d'épreuve (figure 9). Cet écart est probablement dû au fait que la présence des armatures perturbe la distribution des fibres dans les nervures, conduisant à une contribution effective moins favorable du BFUP. ▽



© IFSSTAR
6

PLAN DE PRÉLÈVEMENT DE PRISMES SCIÉS SUR ÉLÉMENTS TÉMOINS



7

L'écart accru avec le BFUP de $V_f = 1\%$ s'explique aussi par la prise en compte d'un comportement supposé écrouissant, alors qu'une approche utilisant une loi contrainte-ouverture de fissure et une loi d'interface avec l'armature « contrainte de cisaillement - glissement » seraient plus appropriées.

ESSAIS AVEC CHARGE APPLIQUÉE AU CENTRE DU HOURDIS

La modélisation de ces essais a été effectuée en appliquant la méthode des lignes de rupture, sur la base du schéma de ruine effectivement observé expérimentalement.

Les triangles sont supposés constitués de plaques rigides délimitées par les lignes où se concentre la déformation plastique, au fur et à mesure que le déplacement δ au point de chargement augmente. L'effort est calculé en égalisant le travail de la force appliquée et l'énergie dissipée par les efforts internes. Ceux-ci sont issus des relations moment - rotation calculées à partir des relations contrainte - ouverture de fissure (figure 8) et affectées d'un facteur d'orientation adapté à la direction de la ligne de rupture considérée. La partie élastique du comportement du hourdis et la flèche due au comportement en flexion longitudinale sont ajoutées à la flèche due aux mouvements des lignes de rupture pour permettre une comparaison directe avec les résultats expérimentaux (figure 10).

Les principaux termes de cette comparaison sont récapitulés au tableau 4. La prévision de l'effort appliqué maximal est satisfaisante, en revanche la flèche réelle est sensiblement sous-évaluée, en particulier parce que la multi-fissuration en flexion précédant la localisation n'est pas prise en compte, comme déjà observé dans une situation analogue [7].

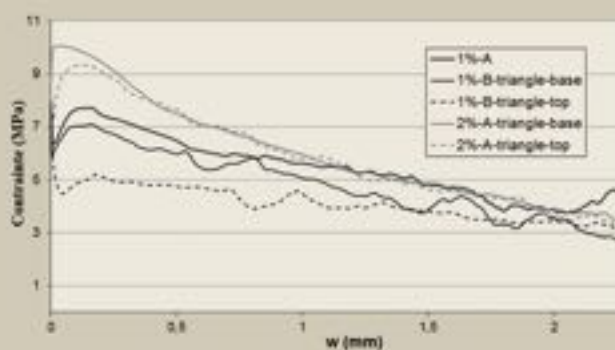
7- Plan de prélèvement de prismes sciés sur éléments témoins.

8- Relations contrainte - ouverture de fissure obtenues par analyse inverse, selon le type de BFUP, le mode de coulage et la position dans l'élément.

7- Sampling plan for sawed prisms on control members.

8- Stress/crack opening relations obtained by inverse analysis, depending on the type of UHPFRC, the pouring method and the position in the member.

RELATIONS CONTRAINTE - OUVERTURE DE FISSURE OBTENUES PAR ANALYSE INVERSE selon le type de BFUP, le mode de coulage et la position dans l'élément



8

CONCLUSION

Des essais de flexion réalisés sur des plaques triangulaires en BFUP raidies par des nervures armées ont été réalisés, dans différentes configurations mettant en évidence le comportement structural plus ou moins ductile de ces éléments.

Le comportement du BFUP a été identifié sur éprouvettes moulées et sur prismes sciés dans les différentes

directions pertinentes par rapport au mode de coulage du hourdis.

L'analyse des résultats souligne la nécessité, en particulier en flexion centrée, de tenir compte de la contribution effective du BFUP tendu selon les différentes directions.

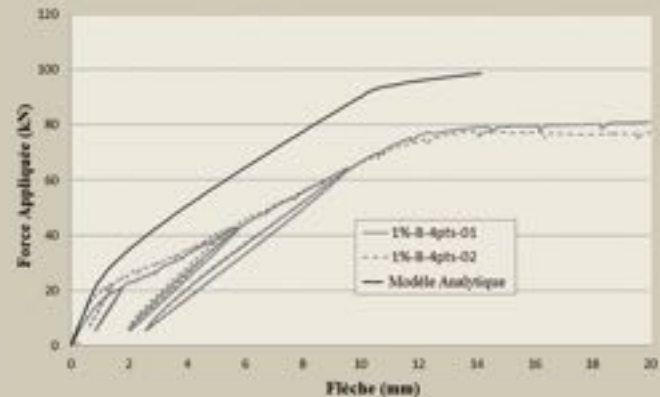
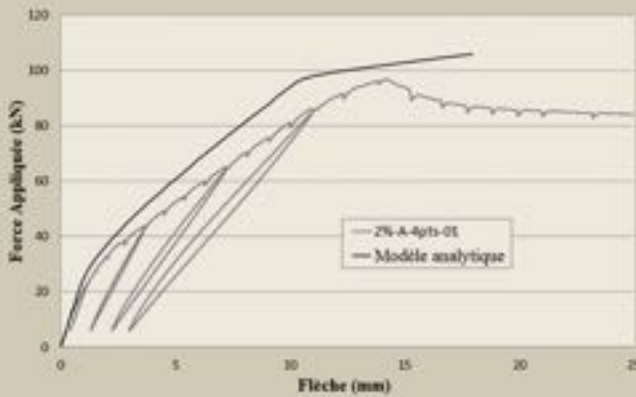
Des modèles avancés [8] doivent pouvoir être qualifiés sur la base de leur capacité à reproduire les résultats de ce programme d'essais. □

TABLEAU 4 : ESSAIS DE FLEXION AVEC CHARGE AU CENTRE DU HOURDIS. COMPARAISON ESSAIS - CALCUL ANALYTIQUE

		Résultats des essais		Calcul analytique	
		Force max. /h ² (kN/mm ²)	Flèche au pic d'effort (mm)	Force max. /h ² (kN/mm ²)	Flèche au pic d'effort (mm)
2%-A-centré	2%-A-centré-01	0,04302	21,0	0,03919	6,7
	2%-A-centré-02	0,04196	20,7		
1%-B-centré	1%-B-centré-01	0,03665	15,1	0,03187	5,7
	1%-B-centré-02	0,03915	20,7		
1%-A-centré	1%-A-centré-01	0,03121	21,9	0,03020	5,9
	1%-A-centré-02	0,03785	20,9		

COMPARAISON RÉSULTATS D'ESSAI - CALCUL ANALYTIQUE

Courbes effort-flèche correspondant aux essais de flexion 2%-A-4pts (à gauche) et 1%-B-4pts (à droite)



© IFSTTAR
9

RÉFÉRENCES :

- [1] Ricciotti R., Ricciotti R., Mazzacane P., "The Enrico Navarra Gallery", Designing and Building with UHPFRC, Toutlemonde & Resplendino eds, ISTE, 2011, pp. 79-86.
- [2] Mazzacane P., Ricciotti R., Lamoureux G., Corvez D., "Roofing of the stade Jean Bouin in UHPFRC", UHPFRC 2013, RILEM PRO 87, pp. 59-68.
- [3] NF P18-470, 2015, "Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Spécification, performance, production et conformité", Afnor, décembre.
- [4] Resplendino J., Marchand P. et al. (2013) "Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations", AFGC, édition révisée.
- [5] Baby F., Graybeal B., Marchand P., Toutlemonde F., 2013, "UHPFRC tensile behavior characterization: inverse analysis of four-point bending test results", Materials and Structures, Vol. 46 (8), 1337-1354.
- [6] Baby F., Graybeal B., Marchand P., Toutlemonde F., "Identification of UHPFRC tensile behaviour: methodology based on bending tests", UHPFRC 2013, RILEM PRO 87, pp. 649-658.
- [7] Marchand P., Baby F., Al Khayer W., Attrach M., Toutlemonde F., 2012, "Modelling flexural tests on UHPFRC thin-walled structures", Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proc. HIPERMAT 2012, Kassel, 7-9 mars, Kassel University Press, n°19, Schmidt et al. eds, pp. 757-764.
- [8] Guénet T., Sorelli L., Corvez D., Bastien J., Toutlemonde F., Ferrier E., Michel L., "Analysis of a UHPFRC footbridge with a deck slab under bending by a novel fracture-micromechanics FEM model", UHPFRC 2013, RILEM PRO 87, pp. 519-528.

9- Comparaison résultats d'essai - calcul analytique : courbes effort-flèche correspondant aux essais de flexion 2%-A-4pts (à gauche) et 1%-B-4pts (à droite).

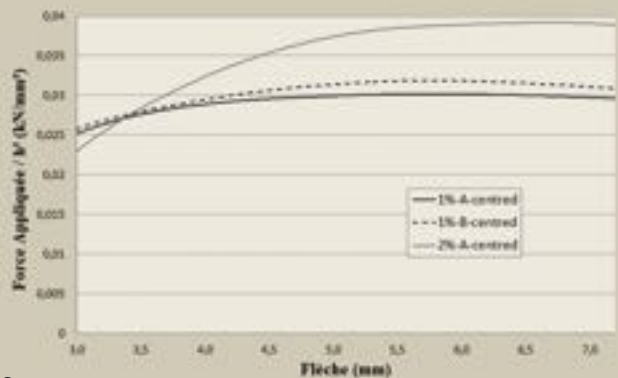
10- Prédiction analytique des courbes effort/h² - flèche correspondant aux essais de chargement au centre du hourdis.

9- Comparison of test results with analytic calculations: force-deflection curves corresponding to the 2%-A-4pts bending test (left) and the 1%-B-4pts bending test (right).

10- Analytical prediction of the force/h²-deflection curves corresponding to the loading tests in the centre of the top slab.

PRÉDICTION ANALYTIQUE DES COURBES EFFORT/H² - FLÈCHE

correspondant aux essais de chargement au centre du hourdis



© IFSTTAR
10

LES PARTENAIRES

Les études retracées ont été réalisées dans le cadre d'un partenariat entre Lafarge et l'Ifsttar, accompagnant la thèse de Thomas Guénet réalisée en cotutelle Ifsttar - Université Laval sous la direction de François Toutlemonde et du professeur Luca Sorelli.

Ont également contribué Dominique Corvez et † Gilles Chanvillard pour la définition du programme et Sébastien Bernardi pour son suivi.

Les corps d'épreuve ont été fabriqués dans l'usine de Vendargues de Bonna-Sabia, le montage des essais et la préparation des mesures ont été réalisés par l'équipe technique du laboratoire Emms de l'Ifsttar.

ABSTRACT

BENDING FAILURE OF TRIANGULAR PLATES IN UHPFRC: EXPERIMENTAL INVESTIGATION, ANALYSIS OF MECHANISMS AND THEIR DUCTILITY

THOMAS GUÉNET, IFSTTAR - FLORENT BABY, IFSTTAR - PIERRE MARCHAND, IFSTTAR - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR

UHPFRC plates with reinforced ribs are a promising concept, employed for example for roofing elements of Villa Navarra or the Jean Bouin Stadium. The optimisation of such designs, in terms of thickness, fibre rate and reinforcing bars, is directly related to the possibility of ensuring a ductile failure mode. A finite-element calculation tool has been developed which explicitly takes into account the tensile force absorption provided by oriented dispersion fibrous strengthening, and the experimental investigations described in this article should be able to validate it. □

RUPTURA EN FLEXIÓN DE PLACAS TRIANGULARES DE HMAR: INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL, ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS Y DE SU DUCTILIDAD

THOMAS GUÉNET, IFSTTAR - FLORENT BABY, IFSTTAR - PIERRE MARCHAND, IFSTTAR - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR

Las placas de HMAR con nervios armados constituyen un concepto prometedor, que por ejemplo se ha empleado en elementos del tejado la Villa Navarra o del estadio Jean Bouin. La optimización de estos diseños, en términos de espesor y de nivel de fibras y refuerzo, está directamente asociada a la posibilidad de garantizar un modo de ruptura dúctil. Se ha creado una herramienta de cálculo para los elementos acabados que tiene explícitamente en cuenta la absorción de esfuerzos de tracción aportada por un refuerzo de fibra orientado y de direcciones distribuidas, y los estudios experimentales descritos en este artículo deben permitir validarla. □



1
© EIFFAGE

LA PASSERELLE DU CANNET DES MAURES

AUTEURS : PATRICK DAL PALU, CHEF DE L'UNITÉ OUVRAGES D'ART, BG INGÉNIEURS CONSEILS SAS - CHRISTOPHE CHÉRON, ARCHITECTE, LAVIGNE & CHÉRON ARCHITECTES - MARCO NOVARIN, CHEF DU SECTEUR ÉTUDES OUVRAGES D'ART, EIFFAGE INFRASTRUCTURES / DIRECTION DES MOYENS D'INGÉNIEURIE - FRÉDÉRIC PASTOR, CHARGÉ D'AFFAIRES, EIFFAGE INFRASTRUCTURES / DIRECTION DES MOYENS D'INGÉNIEURIE - ALAIN TASSEL, DIRECTEUR D'EXPLOITATION, EIFFAGE GÉNIE CIVIL, AGENCE DE CARROS

LA PASSERELLE DU CANNET-DES-MAURES EST UN OUVRAGE EN BFUP FRANCHISSANT LA LIGNE FERROVIAIRE MARSEILLE-VINTIMILLE QUI SÉPARE LA COMMUNE EN DEUX SECTEURS. ELLE PERMET DE CONNECTER LE CENTRE-VILLE À UN PARC DE LOISIRS. CETTE PASSERELLE EN BSI® SE DISTINGUE PAR SA SECTION MONOLITHIQUE EN "U" DONT LE GARDE-CORPS EST RENDU STRUCTUREL POUR ÉVITER DES SUPERSTRUCTURES RAPPORTÉES NÉCESSITANT DE L'ENTRETIEN. LES VOUSOIRS CONJUGUÉS PRÉFABRIQUÉS ONT ÉTÉ ASSEMBLÉS HORS SITE ET MIS EN PLACE PAR GRUTAGE EN UNE « OPÉRATION COUP DE POING ». AINSI, LA DURÉE DES TRAVAUX A-T-ELLE ÉTÉ RÉDUITE À LA SEULE RÉALISATION DES APPUIS.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Il s'agit d'un ouvrage isostatique de 34 m de portée et de 2,50 m de largeur utile (figure 1). Il est composé de quatorze voussoirs courants de 2,35 m de long et de deux voussoirs d'about de 1 m, pour une longueur totale de 35 m. Ces voussoirs sont du type à joints conjugués-collés et précontraints par post-tension.

L'axe en plan de la passerelle est rectiligne et son profil en long décrit un rayon parabolique de 415 m avec sommet à mi-travée, permettant des pentes de moins de 4% aux extrémités, afin d'être conforme aux exigences réglementaires vis-à-vis de l'accessibilité aux personnes à mobilité réduite. À l'interface des voussoirs se trouvent des clés de cisaillement, qui, combinées

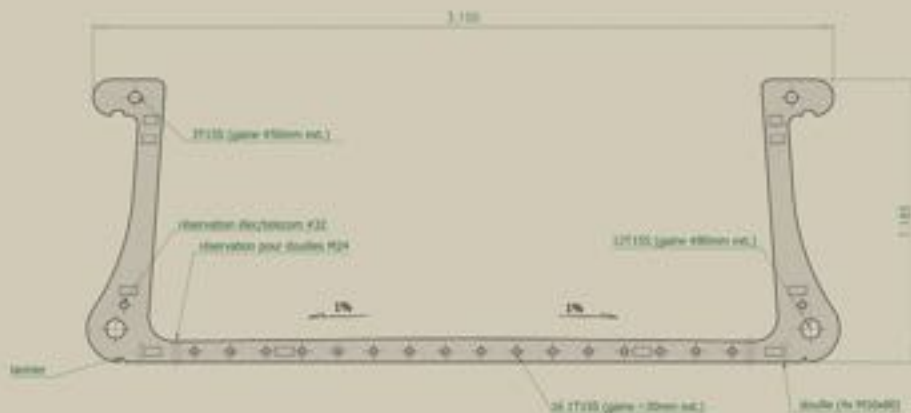
1- La passerelle dans son environnement.

1- The foot bridge in its environment.

à un collage en époxy et à une précontrainte post-tendue des voussoirs, permettent de donner à cet assemblage d'éléments distincts un comportement monolithique d'ensemble.

La précontrainte est composée de 46 torons au total, de classe 1860 TBR (2x12T15S en partie inférieure des âmes, 2x3T15S en partie supérieure des âmes et 16x1T15S dans

LA SECTION-TYPE DU TABLIER, AVEC SES NOMBREUSES RÉSERVATIONS



2

2- La section-type du tablier, avec ses nombreuses réservations.

3- Un voussoir en usine après décoffrage, avec son système de contreventement.

4- Le brèlage des deux premiers voussoirs sur la structure provisoire de l'aire d'assemblage.

2- Typical cross section of the deck, with its numerous grout pockets.

3- A segment in factory after formwork removal, with its wind bracing system.

4- Lashing of the first two segments on the temporary structure in the assembly area.



3



4

le hourdis inférieur) et elle est protégée par l'injection des gaines métalliques rigides au coulis de ciment. Des ajournements architecturaux judicieusement placés dans les âmes autorisent des vues au travers de la passerelle. Par ailleurs, avec sa couleur ocre teintée dans la masse recouverte d'un vernis protecteur, la passerelle s'insère

harmonieusement dans son environnement. Un éclairage par barreaux de LED intégré à la structure au niveau de ses âmes permet le balisage nocturne du cheminement. Avec une section courante (figure 2) d'environ 0,6 m²/m soit approximativement 1,65 t/m, le tablier pèse une soixantaine de tonnes. Cette légèreté

de la structure consécutive aux performances mécaniques du matériau BFUP permet de faibles épaisseurs structurelles (épaisseur moyenne de 12 cm avec un minimum de 8 cm) et des gains sur la manutention et les fondations. Les appuis sont, quant à eux, constitués par des portiques en acier S355 de type Corten (avec 2 fûts métalliques

de section tubulaire Ø610x14,2 mm, d'entraxe 2,70 m, reliés en tête par une traverse de section rectangulaire 450x250x12,5 mm). Ils sont obturés en tête par une plaque raidie supportant des appareils d'appui en caoutchouc fretté 200x200x4 (8+3). Les fondations sont des semelles superficielles en béton armé de dimensions 5x2,70x0,80 m surmontées chacune de deux massifs 1,05x1,05 m recevant les fûts métalliques. De part et d'autre de la passerelle, un escalier métallique, également en acier Corten, avec marches en béton et un ascenseur vitré dans une gaine en verre agrafé sur une structure métallique permettent l'accès à la passerelle.

LE PARTI ARCHITECTURAL

Si les superstructures et les équipements de la passerelle brillent par leur discrétion, c'est qu'ils sont fondus dans la structure. La plupart des émergences visuelles habituelles ont été traitées comme des prolongements du tablier, ou comme des éléments constitutifs internes.

C'est le cas évident des garde-corps, qu'il est difficile de classer comme structure ou superstructure. Il en va de même pour le traitement anti-dérapant du sol, qui est obtenu par des engravures dans la surface du BSI® et non par l'ajout d'un revêtement comme c'est l'habitude. L'éclairage LED est, quant à lui, enchâssé dans le béton dans lequel il a été coulé ; il est lui aussi indissociable de la structure. L'alimentation électrique de la passerelle et des ascenseurs, ainsi que le câblage réseau pour la communication avec ces derniers, passent par des réservations dans les voussoirs.

Il n'est donc rien qui transparaisse ou paraisse comme un simple équipement. La structure s'adapte et s'efface au besoin. Lorsqu'en plus des réservations pour les réseaux et l'éclairage on retire à la section en BSI® l'encombrement des câbles de précontrainte, il ne reste qu'une portion congrue de béton, juste de quoi enrober tous ces organes internes et leur permettre de former un tout.

PRÉFABRICATION DES VOUSSOIRS

Les voussoirs ont été préfabriqués en usine à Neuchâtel en Suisse. Afin de permettre le réemploi d'un même moule, le profil parabolique contre-fléché de l'ouvrage a été approximé de manière à ce que l'angle entre deux voussoirs courants soit toujours identique ; ▷



5

© EIFFAGE

le léger écart angulaire ainsi créé par rapport au profil théorique est rattrapé au niveau des voussoirs d'about.

Il a été choisi de couler les voussoirs à l'envers (figure 3), pour permettre un bon écoulement du béton et favoriser la diffusion des fibres dans les deux directions du plan de la dalle.

Le premier voussoir réalisé a servi de coffrage au deuxième, au niveau de leur surface de contact, et ainsi de suite de proche en proche, deux à deux. Cette méthode garantit une bonne conjugaison des voussoirs et en particulier des clés de cisaillement mâles et femelles.

Une structure provisoire assurait le raidissement des voussoirs pendant leur bétonnage.

Le décoffrage s'effectuait une fois atteinte une résistance de 100 MPa. Les voussoirs étaient alors retournés grâce à des fixations prévues à cet effet, puis munis d'une structure de contreventement, sorte de tuteur figeant leur géométrie et prévenant les déformations qu'un élément aussi élancé est susceptible de connaître à court terme sous l'effet du retrait et du fluage ; cette structure intégrait des dispositifs de levage pour la manutention future, ainsi que des fixations pour le brèlage opéré sur l'aire d'assemblage.

ASSEMBLAGE ET MISE EN PRÉCONTRAINTÉ DU TABLIER

Afin de limiter la part des opérations à effectuer au-dessus des voies SNCF,

l'assemblage des voussoirs constitutifs du tablier et leur mise en précontrainte s'est faite sur une aire d'assemblage située à proximité de l'emplacement définitif de la passerelle (figure 4).

Une structure provisoire a été mise en place dans ce but.

Elle se composait de tours d'étalement supportant des HEB 160 dont le profil approximait celui de la passerelle à une contre-flèche près.

Les voussoirs étaient posés sur cette structure par l'intermédiaire de patins libres de se déplacer longitudinalement.

L'opération d'assemblage s'est déroulée comme suit :

- 1- Pose d'un premier voussoir à mi-travée ;
- 2- Pose d'un voussoir voisin ;
- 3- Application de la résine époxy sur les deux parements destinés à être mis en contact. Cette opération pouvait être réalisée sous un abri chauffé si la température extérieure le nécessitait ;
- 4- Mise en contact des deux voussoirs grâce à un système de brèlage ;
- 5- Reprise au stade 2 avec un voussoir symétrique ;
- 6- Une fois l'ensemble des voussoirs collés et brêlés, une partie des câbles de précontrainte inférieurs est tendue, de manière progressive et symétrique ;
- 7- L'étalement est déposé maintenant que le tablier s'est décollé de ses appuis provisoires ;

5- Levage du tablier.

5- Lifting the deck.

8- Les câbles de précontrainte supérieurs sont en partie tendus afin de recomprimer la fibre supérieure du tablier. Les câbles inférieurs et supérieurs restants sont mis en tension progressivement ;

9- Les gaines des câbles sont injectées et les ancrages de précontrainte cachetés.

Le tablier complet est prêt à être levé et déplacé jusqu'à son emplacement définitif (figure 5).

LEVAGE ET POSE DU TABLIER SUR SES APPUIS DÉFINITIFS

La pose du tablier (figure 6) devait se faire sous interruption de trafic et consignation des caténaires, opération longuement planifiée à l'avance.

Une procédure de levage a ainsi été soumise au visa de la SNCF comme préalable au démarrage des travaux. L'élançement du tablier imposait, pour son levage, l'utilisation d'un palonnier fabriqué sur mesure.

La charge totale à lever était ainsi de 84 t en tenant compte des coefficients de sécurité exigés par la SNCF,

à déplacer sur une distance de 35 m. Ces paramètres, ainsi que la disponibilité du matériel à la date de l'opération, ont conduit à l'utilisation d'une grue treillis sur porteur d'une capacité de 750 t, dont le positionnement et le sens de rotation ont été pratiquement dictés par l'exiguïté du site, entre un hangar, un poste de transformateur, une route en service et le tablier en attente sur son aire d'assemblage.

La livraison des éléments de cette grue a nécessité une logistique importante et s'est étalée sur une dizaine de jours ; son montage a, quant à lui, duré une semaine.

Après plusieurs mois de préparation, le montage effectif de la passerelle sur site s'est déroulé en une semaine :

→ Lundi 16 et mardi 17 mars 2015 : assemblage des auvents de protection caténaires et réception par la SNCF ;

→ Mercredi 18 mars : livraison et pose des piles de la passerelle et pose d'une charpente d'escalier permettant de contreventer l'ensemble ;

→ Vendredi 20 mars : essais de levage du tablier et réception du dispositif de levage ;

→ Samedi 21 mars, après une dernière vérification de tous les éléments de la procédure de levage, le feu vert est donné à 8 h pour lancer, en présence d'un public nombreux, cette opération qui s'achèvera avec succès trois heures plus tard (figure 7).



6

© EIFFAGE

CONDUITE DES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Le tablier de l'ouvrage a fait l'objet d'une modélisation 3D, à la fois pour son dessin et pour son calcul.

Il était en effet important de disposer d'une bonne vision de la géométrie des pièces. Travailler en 3D a permis de sculpter précisément certains détails complexes, comme les fruits des ajourenements des treillis et de proposer au pré-fabricant une définition complète qu'il a pu directement réexploiter pour réaliser les moules dans lesquels ont été coulés les voussoirs.

6- Déplacement du tablier dans un environnement très contraint.

7- Pose du tablier sur ses appuis définitifs.

6- Moving the deck in a very constrained environment.

7- Placing the deck on its permanent supports.

La 3D s'est également avérée cruciale lorsqu'il s'est agi de réaliser les plans des abouts du tablier, où doivent cohabiter dans un volume réduit les ancrages des câbles de précontrainte, le joint de dilatation et les câbles des réseaux de courants fort et faible traversant l'ouvrage.

À partir de ce travail a été élaboré un modèle de calcul ST1. Ce logiciel a été choisi pour sa capacité à traiter les effets de la précontrainte et du fluage avec des lois de comportement des matériaux adaptables, ainsi que pour sa polyvalence.

L'étude de l'ouvrage en service, mais également l'étude sismique et l'étude des modes propres sous charge de foule, ont en effet pu être réalisées avec un modèle unique.

Les justifications du BFUP du tablier ont été menées conformément aux recommandations Afcg de juin 2013 relatives aux BFUP, compatibles avec les Eurocodes.

La spécificité de ce cadre réglementaire concerne notamment la prise en compte de la résistance en traction post-fissuration du béton fibré.

Pour la réalisation de la passerelle, la formule du BSI® retenue présente les caractéristiques suivantes :

- Résistance caractéristique à la compression à 28 jours :
 $f_{ck} = 160 \text{ MPa}$;
- Résistance caractéristique à la traction à 28 jours de la matrice :
 $f_{ctk,el} = -8,5 \text{ MPa}$;
- Plateau de première fissuration :
 $f_{ctfk} = \sigma_f(w=0,4 \text{ mm}) = -8,5 \text{ MPa}$;
- Valeur moyenne du module d'Young à 28 jours :
 $E_{cm} = 58 \text{ GPa}$;
- Fluage propre et de dessiccation (chargement à $t_0 = 7$) :
 $\phi(\infty, t_0) = 1$;
- Poids volumique :
 $\rho = 27,5 \text{ kN.m}^{-3}$.

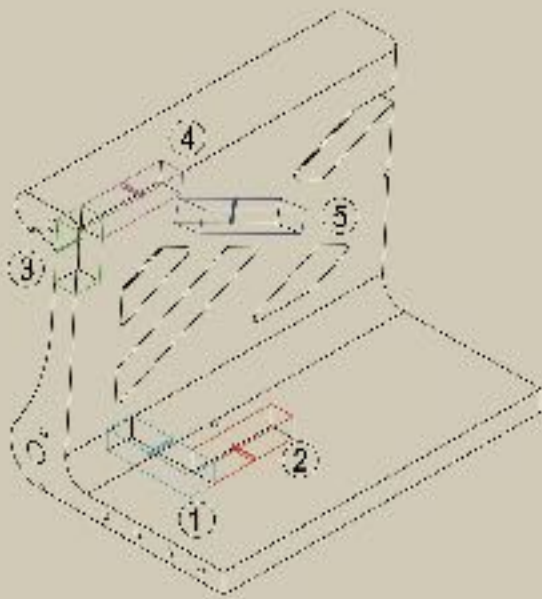
L'absence de fretage dans les zones d'introduction de la précontrainte a été validée expérimentalement par des essais réalisés en laboratoire sur des blocs d'ancrage en BSI®.



© GABY

7

ZONES DE PRÉLÈVEMENT DES ÉPROUVETTES



8

© EIFFAGE

Dans le cadre des épreuves de conformance, un élément témoin (figure 8) représentatif de l'ouvrage réel a été réalisé dans le but de valider les moyens et méthodes de bétonnage et de mesurer le coefficient K relatif à la dispersion sur l'orientation de fibres. Le tableau 1 présente les coefficients K mesurés sur les échantillons prélevés sur le prototype.

En dehors de la caractérisation du BFUP par des essais, le comportement d'ensemble de la passerelle a fait l'objet d'une validation par des épreuves de chargement statiques et dynamiques.

Les essais statiques ont révélé des flèches comparables à celles déterminées par le calcul.

8- Zones de prélèvement des échantillons.

8- Test specimen sampling areas.

TABLEAU 1 : COEFFICIENTS K MESURÉS SUR LES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS SUR LE PROTOTYPE

Zone de prélèvement d'échantillons	K _{global}	K _{local}
1	1,15	1,32
2	1,00	1,26
3	1,27	1,83
4	1,00	1,00
5	1,32	1,57

Il en est de même pour les épreuves dynamiques qui concluent à un premier mode propre vertical aux alentours de 2,3 Hz, conformes aux valeurs attendues ; cette fréquence se situe bien en dehors des plages d'inconfort d'une passerelle de catégorie III (foule peu dense) et devant répondre à un critère de confort moyen.

Le coefficient d'amortissement structural mesuré lors de ces essais est enfin de 0,4.

CONCLUSION

L'emploi du BFUP pour la réalisation de cette passerelle, et grâce aux performances mécaniques du matériau, rend possible un concept de tablier élancé caractérisé par une section en U épurée, esthétique et d'une grande finesse. La légèreté de la structure favorise une mise en œuvre facile et une exécution rapide. Enfin, la grande durabilité du BFUP laisse entrevoir un coût d'entretien et de maintenance réduit. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

BSI® : 22,5 m³

PRÉCONTRAINTÉ PAR POST-TENSION : 16 mono-torons T15S, 2 câbles 3T15S et 2 câbles 12T15S

CHARPENTE DES APPUIS : 21 t d'acier Corten

FONDACTIONS DES APPUIS : 50 m³ de béton C30/37 et 3 t d'armatures B500B

AUVENTS DE PROTECTION CATÉNAIRE : 35 m

TERRASSEMENTS : 250 m³

ASCENSEURS : deux ascenseurs vitrés de capacité 8 personnes/630 kg

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : commune du Cannet des Maures

ARCHITECTE : Lavigne & Chéron Architectes

MAÎTRE D'ŒUVRE : BG Ingénieurs Conseils

GROUPEMENT DE CONSTRUCTION :

- Eiffage Génie Civil, agence de Carros (mandataire)
- Via Pontis

PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS ET FOURNISSEURS :

- Études d'exécution du tablier et des fondations : Eiffage Infrastructures Dmi/Biep
- Préfabrication des voussoirs : Mfp
- Étude, fabrication et pose de la charpente et de la serrurerie : Van Eycken
- Manutention et pose du tablier de la passerelle : Dufour
- Fourniture et pose des deux ascenseurs : Emr
- Lot électricité : Eiffage Énergie, agence de Nice

ABSTRACT

LE CANNET-DES-MAURES FOOT BRIDGE

PATRICK DAL PALU - CHRISTOPHE CHÉRON, LAVIGNE & CHÉRON ARCHITECTES - MARCO NOVARIN, EIFFAGE - FRÉDÉRIC PASTOR, EIFFAGE - ALAIN TASSEL, EIFFAGE

The Cagnet-des-Maures foot bridge is a structure in UHPFRC crossing the Marseille-Ventimiglia line which separates the municipality into two sectors. It connects the town centre to a leisure park. This foot bridge in BSI® (special industrial concrete) is distinguished first by its monolithic "U" section with a guard rail that is integrated into the structure to avoid added-on superstructures requiring maintenance. Secondly, the work period is reduced solely to the time for execution of the supports, since the combined segments are prefabricated in factory, assembled off-site and moved into position by crane handling in a single swift operation. □

LA PASARELA DEL CANNET-DES-MAURES

PATRICK DAL PALU - CHRISTOPHE CHÉRON, LAVIGNE & CHÉRON ARCHITECTES - MARCO NOVARIN, EIFFAGE - FRÉDÉRIC PASTOR, EIFFAGE - ALAIN TASSEL, EIFFAGE

La pasarela del Cagnet-des-Maures es una obra en HMAR que cruza la línea Marsella-Vintimille que separa el municipio en dos sectores. Permite conectar el centro de la ciudad con un parque de ocio. Esta pasarela de BSI® se distingue en primer lugar por su sección monolítica en "U", cuya barandilla es estructural para evitar superestructuras añadidas que precisan mantenimiento. Asimismo, se caracteriza por una duración de las obras que se limita a la mera realización de los apoyos gracias a la prefabricación en fábrica de segmentos combinados, su ensamblaje fuera de la fábrica y su instalación mediante grúas en una operación "relámpago". □

À CHAQUE CHANTIER, SA SOLUTION CERMIX



CERMIX Mortiers Spéciaux
vous accompagne sur tous vos
chantiers dédiés aux bâtiments :

-  **SCC308** Micro-béton de scellement
et de calage gros : mini 50 mm
-  **REP313** Mortier de reprofilage
2 à 10 mm
-  **IMP401** Peinture époxydique
bi-composants en phase aqueuse

PLUSIEURS TYPES DE CHIMIE SONT
DISPONIBLES :

- Ciment
- Polyurethane
- Epoxy
- Poly-Méthyl-Méthacrylate
(PMMA)



© 2015 CERMIX - Illustrations non contractuelles à caractère d'ambiance. Photos : Fotolia.
Groupe COFRAC CERMIX : 51 Rue de la Belle Croix, 62240 DESYRES

Conseils et assistance techniques sur toutes les phases du chantier !

www.cermix-mortiers-speciaux.com

GRUPE COFRAC



Membre du Réseau Congés Intermédiaires BTP

CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

Nos missions :

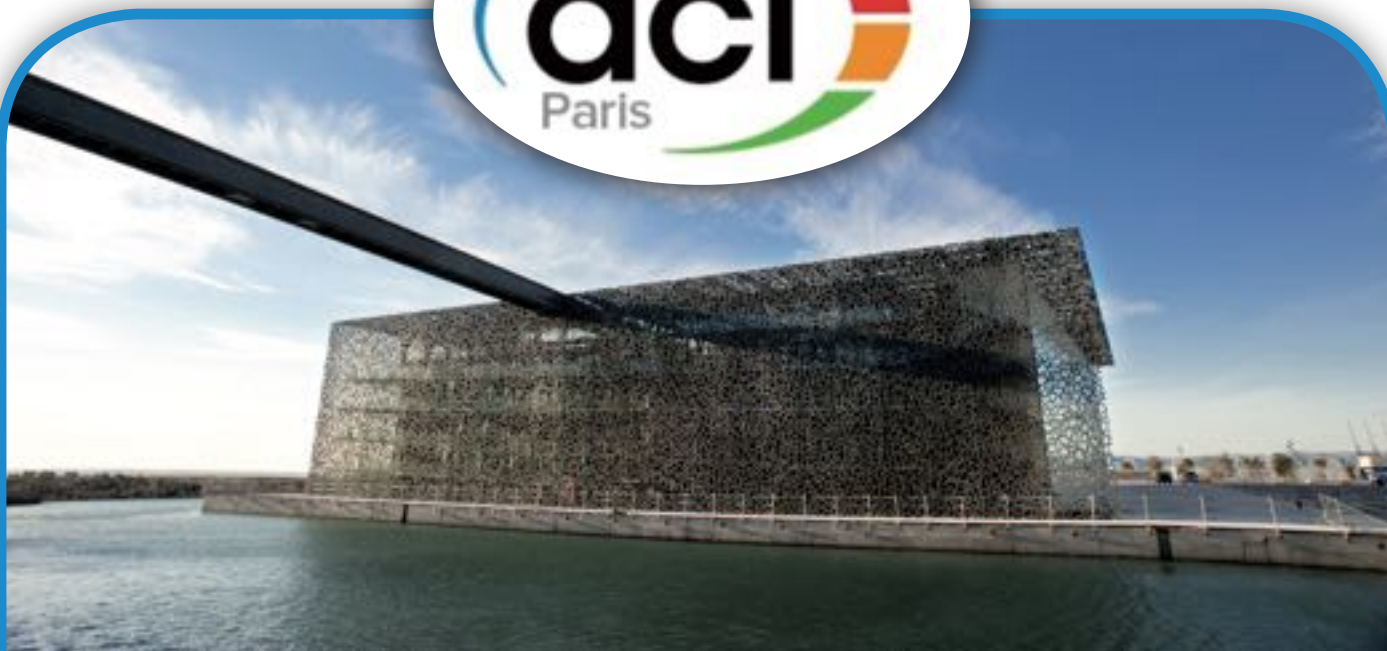
- assurer le service des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics
- procéder au remboursement des indemnités de chômage-intempéries versées par les employeurs de la Profession.

La CNETP regroupe **7 400 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à plus de **270 000 salariés**.

Nos coordonnées :

- **Par courrier :**
31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09
- **Par Internet :** www.cnetp.fr
- **Par mail :** sur www.cnetp.fr, lien [nous contacter](#)
- **Par téléphone :**
 - pour les entreprises : 01.70.38.07.70
 - pour les salariés : 01.70.38.07.77
- **Serveur vocal (24h/24) :** 01.70.38.09.00





Le chapitre ACI de Paris a relayé en 2015 le prix organisé par l'American Concrete Institute : « ACI Excellence in Concrete Construction Award ». Le prix récompense des réalisations achevées depuis moins de 3 ans à la date de soumission, mettant en œuvre de façon exemplaire des technologies innovantes et un usage innovant du béton, en réponse aux enjeux économiques, environnementaux et esthétiques, dans les **6 catégories** suivantes :

- **Bâtiments de faible hauteur** (moins de 3 étages),
- **Bâtiments de grande hauteur** (plus de 3 étages),
- **Chaussées et dallages** (« flatwork »),
- **Génie civil** (« infrastructure », incluant notamment les ponts et les ouvrages de réseaux),
- **Béton décoratif**,
- **Réparation/restauration**.

En 2015, les 2 projets nominés par le chapitre ACI de Paris ont été primés, dans les catégories « **low rise building** » (**le MuCEM**) et « **Decorative concrete** » (**le stade Jean Bouin rénové**). Ces réalisations ont été présentées lors d'une cérémonie de gala lors de la convention ACI d'automne 2015 et il est prévu qu'ils bénéficient d'une visibilité dédiée grâce aux supports de l'ACI (notamment revue « concrete international » distribuée à plus de 10 000 exemplaires).



Cette année, le chapitre ACI de Paris relaie à nouveau le « ACI Excellence in Concrete Construction Award ». Il a fait appel en octobre-novembre 2015 à l'ensemble de la communauté technique d'Europe francophone pour soumettre des propositions de projets éligibles à l'édition 2016 de ce prix. La remise publique des récompenses se fera lors de la convention ACI d'automne en octobre 2016 sur la base de dossiers remis avant le 15 février 2016. Deux dossiers au maximum peuvent être transmis par le chapitre ACI de Paris (qui couvre l'Europe francophone), et qui seront nous l'espérons couronnées d'un succès au moins équivalent à celui de 2015 !



1

© MINISTRY OF TRANSPORTATION OF ONTARIO (OR MTO)

RÉHABILITATION D'INFRASTRUCTURES : LE POINT SUR LES JOINTS DE CLAVETAGE EN BFUP

AUTEUR : DOMINIQUE CORVEZ, DIRECTEUR AMÉRIQUE DU NORD, LAFARGE DUCTAL®

1- Pont de la rivière Nipigon, Canada. L'ensemble des éléments préfabriqués du tablier (segments longitudinaux et joints transversaux de fixation aux poutres et poutrelles en acier) sont connectés avec des joints de clavetage en Ductal® qui assurent son intégrité.

1- Bridge over the Nipigon River, Canada. All the prefabricated deck elements (longitudinal segments and transverse joints for attachment to the steel beams and joists) are connected with Ductal® keying joints which ensure the deck's integrity.

SUR LES 70 000 PONTS DU CONTINENT NORD-AMÉRICAIN QUI DOIVENT ÊTRE RÉNOVÉS DANS LES DIX PROCHAINES ANNÉES, UNE CENTAINE L'ONT DÉJÀ ÉTÉ AVEC LA TECHNIQUE DES JOINTS DE CLAVETAGE EN BFUP. DENSIFICATION DU TRAFIC, PRISE EN COMPTE DES ZONES SISMIQUES, CLIMATOLOGIE EXTRÊME, AUTANT D'ENJEUX QUI ONT CONDUIT LA FHWA (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION) À TESTER ET APPROUVER LA FACILITÉ ET LA RAPIDITÉ DE MISE EN ŒUVRE DES BFUP, LA DURABILITÉ DE LEURS PERFORMANCES, L'ÉCONOMIE DE RESSOURCES ET DE PROJET QU'ILS POURRAIENT FAVORISER.

Un grand nombre des ponts du réseau des « Interstates » ont été conçus dans les années 60 sous l'impulsion du président Eisenhower où le trafic n'avait aucune commune mesure avec celui d'aujourd'hui. Leur réhabilitation est une priorité de la Federal Highway Administration (FHWA) qui teste depuis de longues années les solutions lui permettant de gérer un triple défi : mise en sécurité, maîtrise des flux et pérennité de ses infrastructures dans une double

recherche de performances, technique et économique (figure 1).

Lafarge travaille depuis plus de 10 ans au développement d'une solution de joint de clavetage en partenariat avec la FHWA. De nombreux essais, tant dans les centres de recherche de l'industriel qu'au sein de ceux de la FHWA ainsi que sur des sites pilotes, ont été réalisés pour valider une solution aujourd'hui déployée sur près de 130 ponts aux États-Unis et Canada dont les 2/3 rien que sur les deux dernières années.

C'est forts de ces retours d'expérience de la FHWA que de très nombreux États ont adopté cette technologie et qu'autant de « State DOT » (Department of Transportation) au niveau de chaque État ont contactés les équipes Ductal® pour envisager des collaborations sur cette technologie (figures 2 et 3). Avec, en perspective, la capacité à répondre aux enjeux d'une économie ne pouvant plus faire aucune concession à la durabilité et la sécurité des infrastructures.

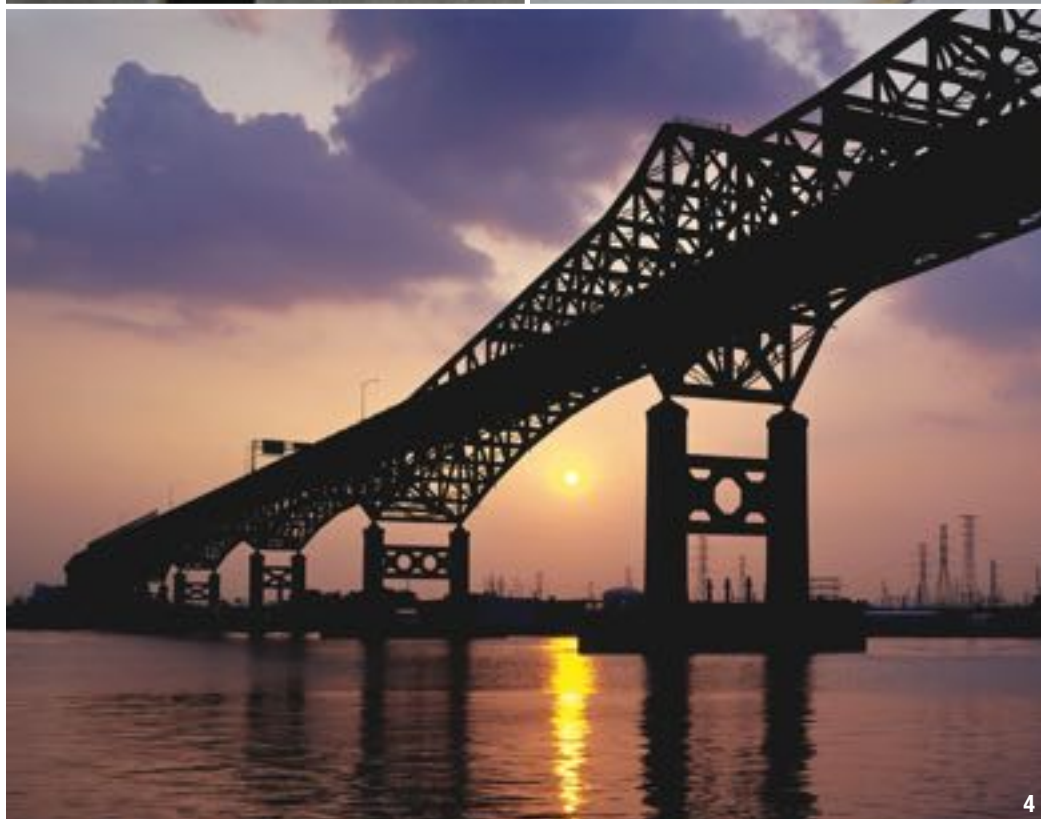


2



3

© MÈDIATHÈQUE LAFARGE



4

© MÈDIATHÈQUE LAFARGE - RON SAARI

RECHERCHE DE PERFORMANCES TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES

Selon l'expérience acquise, cette solution s'avérerait globalement pertinente pour rénover une majorité des 70 000 ponts américains déclarés structurellement obsolètes par l'utilisation de solutions préfabriquées. La FHWA s'est ainsi fixé l'objectif d'utiliser la préfabrication sur ¼ des réhabilitations d'ici 2020, solution constructive où la technique de joint de clavetage BFUP

est particulièrement pertinente. Mais qu'en est-il en France ?

Plusieurs raisons semblent pouvoir expliquer le manque d'expérimentation de cette technique sur les ouvrages d'art dans l'hexagone. Une certaine réticence à l'utilisation des nouveaux matériaux ? Les modes de dévolution des chantiers peu favorables aux variantes ? Le coût supposé de cette technique ? Une méconnaissance des recommandations de l'Afgc ? Les experts s'accor-

dent à penser cependant que la future transformation de celles-ci en normes fera faire un grand pas réglementaire à cette solution.

L'un d'entre eux confiait même récemment qu'ayant été conduit à superviser les chantiers d'un très grand nombre d'ouvrages mixtes avec des dalles préfabriquées, il aurait été heureux de pouvoir mettre à profit tous les avantages des BFUP : ferrailages simplifiés grâce à la présence des fibres, fluidité et

2- La rénovation et réparation des très nombreux ponts construits dans les années 70-80 nécessitera d'augmenter de façon substantielle dans les années à venir les budgets d'entretien et de maintenance des ouvrages d'art pour conserver le niveau de service actuel.

3- Pont de Rainy Lake, Ontario, Canada. Coulage du joint de clavetage, une solution « coulé sur place » efficace pour les systèmes de pont préfabriqués.

4- Pont de Pulaski Skyway, États Unis. Pour la rénovation de ce pont en métal supportant un trafic de plus de 70 000 véhicules/jour, 10 000 t de Ductal® ont été coulées sur place.

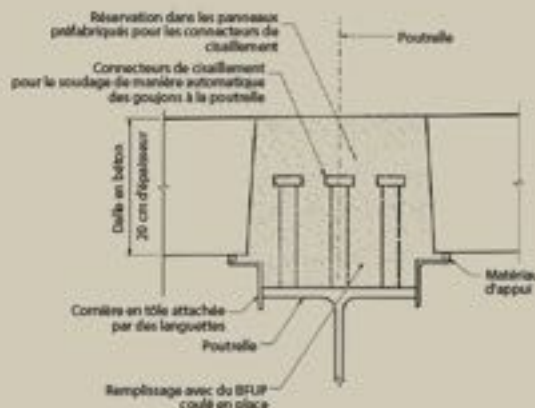
2- For renovation and repair of the very numerous bridges built in the 1970s and '80s, bridge maintenance and repair budgets will have to be increased substantially in the coming years to maintain the current service level.

3- Rainy Lake Bridge, Ontario, Canada. Pouring the keying joint, an efficient "cast-in-situ" solution for prefabricated bridge systems.

4- Pulaski Skyway Bridge, United States. For the renovation of this metal bridge carrying traffic of more than 70,000 vehicles/day, 10,000 tonnes of Ductal® were cast in situ.

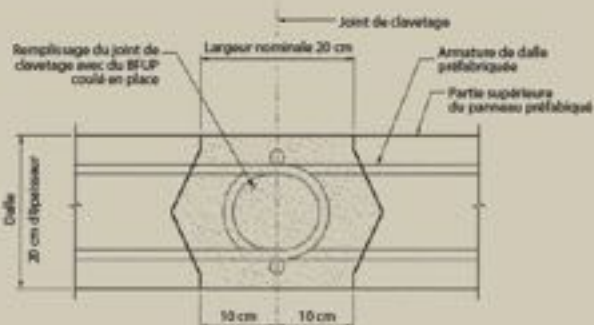
PONT DE PULASKI

Coupe type sur poutrelle



PONT DE PULASKI

Coupe transversale d'un joint de clavetage en BFUP



© MEDIATHÈQUE LAFARGE

5

WAMPUM - PENNSYLVANIE : UNE RÉNOVATION COMPLÈTE EN 7 JOURS CHRONO

Dans ce cas de figure (figures 6 et 7), le BFUP est utilisé pour relier les trois superstructures et les trois dalles d'approche. Les éléments préfabriqués de la superstructure sont des unités modulaires composées d'un revêtement de tablier pleine hauteur, supporté par deux poutres en acier en I. Les dalles d'approche étaient également des dalles préfabriquées complètes. Tout l'enjeu fut de trouver la solution la plus rapide sans compromettre la qualité. Recourir au béton BFUP présentait l'avantage de répondre aux exigences de rapidité en raccordant de façon pérenne les unités modulaires préfabriquées et les dalles d'approche préfabriquées. Ductal® a été utilisé en conjonction avec des aciers en recouvrement pour réaliser un joint plus résistant que les éléments raccordés. Il transfère le moment de torsion et les contraintes de cisaillement à travers le joint - ce qui répondait au souci du maître d'ouvrage de limiter les déformations différentielles pouvant générer des fissures longitudinales. Les propriétés du matériau proposé se sont d'ailleurs avérées supérieures à celles de durabilité que le maître d'ouvrage avait envisagées. Dans un État où l'on utilise beaucoup de sel de déneigement, l'imperméabilité quasi absolue du BFUP a constitué un avantage décisif.

6 & 7- Pont de Wampum, États Unis. Le projet a consisté à remplacer le pont à arc unique en béton structurellement fragilisé par un nouvel ouvrage comprenant trois modules préfabriqués accolés de 23,7 m de long en BPUP.

6 & 7- Wampum Bridge, United States. The project involved replacing the structurally weakened concrete single arch bridge with a new structure comprising three attached UHPFRC prefabricated modules 23.7 m long.

granulométrie fine, prise rapide, ... Autant d'atouts qui, de son point de vue, font de ces bétons, un matériau idéal pour ce type de joints.

Un point de vue partagé par les autorités américaines mais aussi canadiennes qui ont utilisé la technique des joint de clavetage dans au moins quatre grands cas de figure en rénovation mais aussi pour la conception de nouveaux ouvrages d'art.

DES RÉNOVATIONS DURABLES

Le premier cas de figure peut s'illustrer par la rénovation durable - nouveau design avec une durée de vie supérieure à 100 ans - des tabliers du Pulaski Skyway, un pont en métal supportant le trafic quotidien de plus de 70 000 véhicules qui traverse la Passaic River en deux travées principales de 170 m de long. Une rénovation qui a nécessité de couler *in situ* un volume total de 10 000 t de Ductal® prescrit (figure 4).



6



7

© LOUIS RUIZZI & WAMPUM ; PENNSYLVANIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION



8
© MÉDIATHÈQUE LAFARGE

Le choix des joints de clavetage en Ductal® s'est opéré après avoir validé leur résistance et leur étanchéité sur plus de 2 millions de passages d'essieu en circuit de fatigue.

Plus résistant que les panneaux qu'il assemble, le joint en Ductal® transforme ainsi en point de résistance ce qui devrait être un point de faiblesse (figure 5).

Tel est du moins le constat effectué par l'entreprise en charge de la réhabilitation qui a choisi d'étendre cette solution initialement prévue uniquement pour les joints de clavetage aux jonctions des poutres maîtresses en acier avec le tablier. Le Ductal® se serait ici avéré plus rentable que la solution MMA (Méthacrylate de méthyle) envisagé au départ.

Une solution d'autant plus économique qu'elle est d'une grande simplicité de mise en œuvre sur site et que sa durabilité prévisionnelle se compte en siècles.

Pour garantir cette facilité de mise en œuvre, même sur un chantier de cette ampleur, l'industriel a mis en place une offre de service global qui, au-delà de la fourniture des matières premières (premix, fibres, adjuvants), propose une assistance technique spécialisée sur site pour le contrôle qualité, ainsi que la fourniture d'une variété de malaxeurs spécifiques garantissant et simplifiant toutes les phases du chantier.

LIMITER LA GÊNE À L'USAGER

Le deuxième cas de figure qui motivait les recherches des maîtres d'ouvrage nord-américains est celui de la limitation de la gêne à l'utilisateur. Priorité des gestionnaires des routes, ils sont de plus en plus nombreux à exiger le recours aux techniques de construction dite ABC (Accelerated Bridge Construction). Proposer une rénovation ultra rapide est le challenge relevé à Wampum (voir encadré), mais aussi pour l'Interstate 84, un axe majeur reliant

8 & 9- Mission Bridge, Colombie Britannique.
Avant : colonnes à remettre à niveau.

8 & 9- Mission Bridge, British Columbia.
Before: columns to be upgraded.

l'État de New York à la Pennsylvanie. En optant pour la solution des panneaux de tablier préfabriqués avec joints en Ductal® à la place du tablier en béton coulé sur site, l'entreprise maître d'œuvre a pu gagner des semaines sur le calendrier, avec, à la clé, une réduction des coûts pour le maître d'ouvrage (New York State Dept. of Transportation) et une moindre gêne occasionnée à la circulation. Les équipes Ductal®, en collaboration avec l'entreprise Tully Construction et le préfabricant Fort Miller, viennent ainsi de remporter la rénovation de la Major Deegan Highway, axe majeur de New York traversant le Bronx, initialement prévue « coulé en place ». Governor Cuomo, le gouverneur de l'État de New York, a lui-même salué cette solution permettant de réduire le temps du chantier de deux ans.

Au-delà de chantiers ultra rapides, les nouvelles contraintes de sécurité et le vieillissement des structures devraient mettre en valeur les atouts des joints de clavetage en France. La rénovation et la réparation des très nombreux ponts construits dans les années 70-80 devrait impliquer une augmentation substantielle dans les années à venir des budgets d'entretien et de maintenance des ouvrages d'art pour conserver le niveau de service actuel.

ENJEUX SISMIQUES : LA RÉHABILITATION DE MISSION BRIDGE CONJUGUE PERFORMANCE ET ÉCONOMIE

Ouvert à la circulation en 1973, le Mission Bridge est un pont à quatre voies d'un kilomètre situé dans une zone à forte sismicité. Sa réhabilitation en Ductal® lui permet d'être aujourd'hui aux normes sismiques et d'assurer le désenclavement de la zone touchée par une catastrophe.

Après avoir envisagé plusieurs solutions techniques qui se sont avérées soit insuffisamment performantes au regard de l'enjeu sismique, soit trop coûteuses, le ministère des Transports et des Infrastructures de la Colombie Britannique et les ingénieurs d'Associated Engineering se sont tournés vers une solution de chemisage en Ductal® (figures 8, 9, 10 et 11).

Outre l'avantage de permettre une substantielle économie de 1,5 million de dollars canadiens, Ductal® assurait une capacité de résistance aux séismes exceptionnelle, en apportant de la rigidité à la nouvelle structure monolithique tout en optimisant l'apport de matière. L'occasion aussi de prouver l'efficacité d'une nouvelle application aux autres maîtres d'ouvrage, ingénieurs et entrepreneurs de l'Ouest canadien particulièrement exigeants et vigilants sur la problématique sismique.

Pour assurer un coulage en continu et ainsi minimiser les reprises de bétonnage, Lafarge a mis à disposition sa centrale locale de béton prêt à l'emploi d'Abbotsford (Colombie britannique) pour mélanger et approvisionner au total 18 m³ de Ductal® à l'aide de deux camions toupies et quatre rotations. Cette démarche a été préférée à l'emploi de malaxeurs mobiles sur chantier. Le coffrage a ensuite été rempli par le haut à l'aide d'une trémie classique et l'ensemble de l'opération de coulage a été terminée en une journée.



9
© MÉDIATHÈQUE LAFARGE



10



11

La solution Ductal® pourrait ainsi notamment permettre de reprendre les rives de tabliers existants avec des dalles préfabriquées pour assurer l'ancrage des nouvelles barrières de sécurité, conformes aux normes européennes, sans ajouter de poids. De même cette technique de joint de clavetage devrait également trouver un débouché naturel dans les remplacements de joints de chaussée.

Le troisième cas de figure vise à répondre aux problématiques sismiques. La réhabilitation du Mission Bridge en Colombie Britannique démontre combien le BFUP s'affirme comme une solution rassurante dans les zones à fort risque tout en restant très économique (voir encadré).

Enfin le dernier cas de figure est inhérent à une climatologie extrême sur un territoire à l'échelle d'un continent. Dans cette perspective, le cas du pont de Firebag en Alberta (Canada) (traversé de 80 m de longueur) illustre la capa-

10- Mission Bridge, Colombie Britannique. Livraison et malaxage du BFUP par camions toupie de béton prêt à l'emploi.

11- Mission Bridge, Colombie Britannique. Après : colonne achevée avec chemisage en Ductal®.

10- Mission Bridge, British Columbia. Delivery and mixing of UHPFRC by ready-mix concrete trucks.

11- Mission Bridge, British Columbia. After: completed column with Ductal® casing.

cité des BFUP à être produits sur site dans les endroits les plus reculés tels que les « Ice Roads » objets de nombreux documentaires relatant les difficultés d'accès de ces zones. Mais aussi celle d'implémenter les techniques avec les entreprises pour le couler malgré des températures en dessous de zéro degré Celsius.

LA RAPIDITÉ DE CONSTRUCTION FACTEUR D'INNOVATION ?

Ayant désormais prouvé leur pertinence pour de très nombreux cas de figure en réhabilitation d'ouvrages d'art sur des ponts de toute taille et dans des configurations très variées, les BFUP peuvent-ils démontrer le même intérêt pour la conception des ouvrages neufs ? Si une conception entièrement en BFUP n'est certes pas encore à l'ordre du jour, le marché nord-américain s'oriente, quant à lui, de plus en plus vers des conceptions de ponts mixtes avec des tabliers préfabriqués permettant de

répondre à un enjeu économique fort : la rapidité de construction. L'exemple du pont de Nipigon en Ontario éclaire ce nouvel aspect des constructions en BFUP. Première structure à haubans sur la Transcanadienne, ce nouveau pont de quatre voies en deux travées vient se substituer à l'ancienne structure, inadaptée à une réhabilitation.

Le nouveau pont s'articule de chaque côté de trois tours en béton préfabriquées sur lesquelles sont accrochés des câbles supportant les 252 m de tablier. L'ensemble des éléments longitudinaux et joints transversaux de fixation aux poutres et poutrelles en acier sont connectés avec des joints de clavetage en BFUP qui assurent son intégrité. Ici, le joint en Ductal® offre le double avantage de garantir l'étanchéité du tablier et de créer une membrane structurelle monolithique, le joint étant lui-même plus résistant que les pièces préfabriquées jointes par le Ductal®. □

ABSTRACT

RENOVATION OF INFRASTRUCTURE: AN UPDATE ON UHPFRC KEYING JOINTS

DOMINIQUE CORVEZ, LAFARGE DUCTAL®

After 10 years' research and development carried out jointly with the FHWA (Federal Highway Administration), there is experience feedback on the UHPFRC keying joint solution demonstrating its effectiveness for the renovation of all types of bridges, but also for new structure design. Based on examples developed on the North American continent, this article describes in detail the advantages of this solution, with regard to seismic stresses, extreme climate conditions, accessibility, construction site scheduling and project economics. This is an opportunity to consider how this technique could be adapted to the challenges of the French market, notably for bridge maintenance. □

REHABILITACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS: ANÁLISIS DE LAS JUNTAS DE ANCLAJE EN HMAR

DOMINIQUE CORVEZ, LAFARGE DUCTAL®

Tras 10 años de investigación y desarrollo en colaboración con la FHWA (Federal Highway Administration), la solución de junta de anclaje en HMAR ha demostrado su eficacia en la renovación de todo tipo de puentes, así como en el diseño de nuevas construcciones. Sobre la base de ejemplos desarrollados en el continente norteamericano, este artículo detalla las ventajas de esta solución (conformidad con las restricciones sísmicas, de climatología extrema, de accesibilidad, de programación de obra, de economía de proyecto), al tiempo que brinda la ocasión de analizar cómo esta técnica podría adaptarse a los desafíos del mercado francés, en especial para el mantenimiento de las obras de fábrica. □



1

© EIFFAGE

DES PARALUMES EN BFUP À L'ENTRÉE DU TUNNEL DU VIEUX PORT À MARSEILLE

AUTEURS : ALAIN SCHMITT, INGÉNIEUR CHARGÉ D'AFFAIRES, SETEC TPI - JACQUES RESPLENDINO, DIRECTEUR, SETEC TPI - NICOLAS BENNATI, INGÉNIEUR TRAVAUX, EIFFAGE GÉNIE CIVIL MÉDITERRANÉE - BRUNO DIMANCHE, CHEF D'AGENCE, EIFFAGE GÉNIE CIVIL MÉDITERRANÉE - ALAIN SIMON, CHEF DE SECTEUR, DIRECTION DES MOYENS D'INGÉNIERIE, EIFFAGE INFRASTRUCTURES

LE PROJET DE PARALUME S'INSCRIT DANS LE CONTEXTE GÉNÉRAL DES TRAVAUX D'AMÉNAGEMENT DU BOULEVARD DU LITTORAL ET DES TRAVAUX DE MISE EN CONFORMITÉ DU TUNNEL VIEUX-PORT. L'OPÉRATION CONSISTE À METTRE EN ŒUVRE PRÈS DE 90 POUTRES PRÉCONTRAINES EN BFUP REMPLISSANT LA FONCTION DE PARALUME, EN COUVERTURE DE LA TRÉMIE EXISTANTE ENTRE LA SORTIE DU TUNNEL JOLIETTE ET L'ENTRÉE DU TUNNEL VIEUX PORT.

LE PROJET

Le projet de paralume porté par la Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole (CUMPM) s'inscrit dans le contexte général des travaux d'aménagement du boulevard du Littoral (figure 1) et des travaux de mise en conformité du tunnel du Vieux Port. Lors des travaux de mise en conformité du tunnel du Vieux Port, les paralumes existants entre le tunnel de la Joliette et celui du Vieux Port ont été démontés (figure 2). Il s'agissait d'éléments en

charpente d'aluminium dont l'état après démontage ne permettait ni leur recon-ditionnement ni leur remise en place comme prévu initialement. Le maître d'ouvrage a alors recherché à remplacer l'ancienne structure par un nouvel ouvrage qui réponde à trois objectifs :
→ Jouer le rôle de paralume en évitant l'éblouissement des automobilistes en sortie de tunnel, tout en assurant la transparence aéraulique nécessaire pour éviter tout impact et interférence entre les systèmes de

ventilation du tunnel du Vieux Port et celui de la Joliette, situés de part et d'autre de la trémie ;

- Assurer une fonction acoustique permettant de diminuer efficacement les nuisances sonores pour les riverains ;
- Bien que l'ouvrage soit en dehors d'une section de tunnel, garantir une résistance minimale de l'ouvrage au feu (tenue minimale de 1 h sous feu ISO imposée par la Brigade des Marins Pompiers de Marseille).

1- Vue d'ensemble de la trémie à la fin des travaux.

1- General view of the tunnel approach at end of works.

2- Vue d'ensemble de la trémie avant le démarrage des travaux.

3- Implantation de la trémie.

2- General view of the tunnel approach before start of works.

3- Location of tunnel approach.



© EIFFAGE
2

Ces exigences, couplées au fait que l'ouvrage consiste à réaliser une série importante de poutres, ont conduit le maître d'ouvrage à opter pour une solution de paralames en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP).

La maîtrise d'œuvre de l'opération a été confiée à la société Setec Tpi associée à l'architecte André Mascarelli.

LES ÉTUDES D'AVP ET DE PROJETS

L'opération consiste à mettre en œuvre 90 poutres précontraintes en BFUP en couverture de la trémie existante (figure 3).

Les diverses étapes de la conception (AVP puis PRO) ont conduit au dimensionnement de poutres précontraintes

par pré-tension, en forme de oméga renversé incliné à 45°.

L'épaisseur, le nombre et l'espacement des omégas ont été déterminés de façon à éviter toute contamination entre les systèmes de ventilation des tunnels adjacents. Cette absence d'impact a été étudiée et justifiée par des études aérauliques en phase PRO, de

même que l'impact sur l'éclairage de l'ouvrage.

En outre, le groupement de maîtrise d'œuvre a fait appel au bureau d'études Cia-Acoustique pour estimer, justifier et mesurer l'efficacité acoustique du système dans l'environnement de l'ouvrage. Des mesures d'ambiance sonore, avant et après travaux, ont permis de confirmer les estimations faites en phase projet. Elles ont montré que les poutres en BFUP munies d'absorbants phoniques (laine de roche) avaient permis de diminuer de façon significative les nuisances sonores aux abords immédiats de l'ouvrage (baisse de 4 à 7 dB(A)).

Pour garantir la résistance au feu de l'ouvrage, la conception a prévu la mise en œuvre d'une formulation de BFUP résistant au feu, ainsi que la justification de l'absence de risque d'écaillage, en phase travaux au stade des épreuves de convenueance.

Les calculs effectués en phase PRO sur la base des recommandations Afgc 2013 ont montré l'aptitude de l'ouvrage à respecter les exigences imposées par le maître d'ouvrage (1 h sous feu ISO) ▷

IMPLANTATION DE LA TRÉMIE



Emplacement de la trémie

© EIFFAGE

3

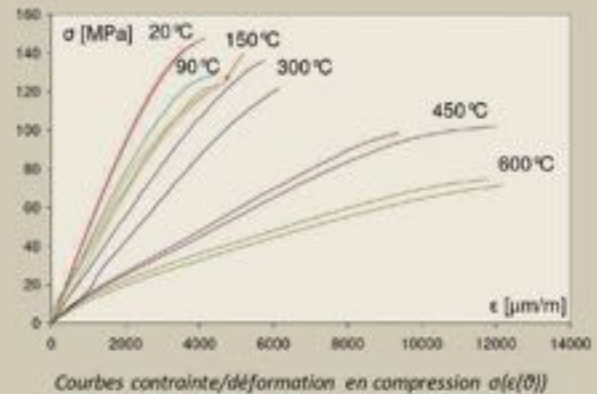
et l'efficacité vis-à-vis de cette résistance, des panneaux en laine de roche incorporés dans les poutres en BFUP. Ces panneaux jouent un double rôle : absorption phonique et protection au feu de l'âme des poutres dont l'épaisseur n'est que de 5 cm.

LE BSI FORMULE FEU

Compte-tenu de l'exigence particulière de tenue au feu de ce projet (stabilité au feu ISO 834 pendant 1 heure), une formule Feu du BSI a été utilisée. Elle est basée sur l'association de deux types de fibres : l'une métallique pour apporter la résistance en traction du matériau, l'autre en polypropylène pour prévenir l'écaillage lorsque le matériau est soumis à de très hautes températures. Sa composition est décrite sur le tableau 2.

L'évolution des propriétés mécaniques du BSI, en fonction de la température, a été mesurée au laboratoire feu du Cstb. La figure 4 présente des courbes expérimentales obtenues pour la détermination de la résistance en compression (pics des courbes) et du module de déformation (pentes des courbes). On peut remarquer par exemple, qu'à 600°C, le BSI présente encore une résistance en compression aussi élevée que celle d'un BHP, avec plus de 60 MPa. En termes de stabilité du matériau, des essais conduits jusqu'à des températures de 1300°C (température typique d'un feu de tunnel, dit « Hydrocarbure Majoré »), ont permis de vérifier l'absence d'écaillage du BSI. Les propriétés de transfert thermique du matériau ont également été déterminées, afin de pouvoir simuler les champs de températures dans la

RÉSISTANCE EN COMPRESSION ET MODULE DE DÉFORMATION DU BSI® EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE



structure, à chaque instant du scénario de feu exigé. Pour cela, la connaissance de trois propriétés, fonction de la température, est nécessaire : la conductivité thermique (λ), la chaleur spécifique (C) et la masse volumique (ρ). Des essais sur planchettes de BFUP selon la méthode du fil chaud, couplés à des essais de suivi de perte de masse sur éprouvettes cylindriques, ont été réalisés. Les résultats ainsi obtenus ont ensuite été affinés par méthode inverse : calage des propriétés de transfert à partir d'enregistrements de températures dans l'épaisseur d'une éprouvette en fonction du temps (figure 5).

LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Les études d'exécution ont été réalisées par la Direction des Moyens d'Ingénierie (DMI) d'Eiffage Infrastructures et ont

4- Résistance en compression et module de déformation du BSI® en fonction de la température.

5- Calage des propriétés de transfert par méthode inverse.

4- Compressive strength and modulus of deformation of BSI® (special industrial concrete) versus temperature.

5- Calibration of transfer properties by inverse method.

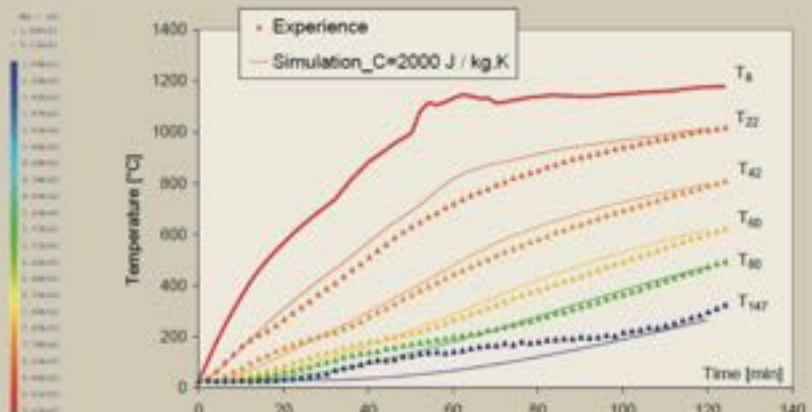
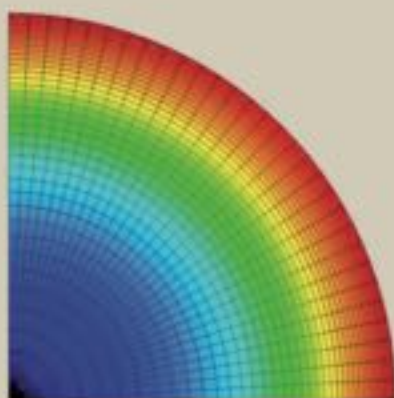
été contrôlées par Setec Tpi à Vitrolles. Elles ont été conduites suivant les nouvelles recommandations de l'Afgc sur les BFUP, publiées en 2013.

La section courante des paralumes est en oméga, avec des âmes d'épaisseur 5 cm (figure 6). Elle est inclinée à 45° afin de former un écran vis-à-vis des rayons du soleil qui frappent la trémie et gênent la visibilité des automobi-

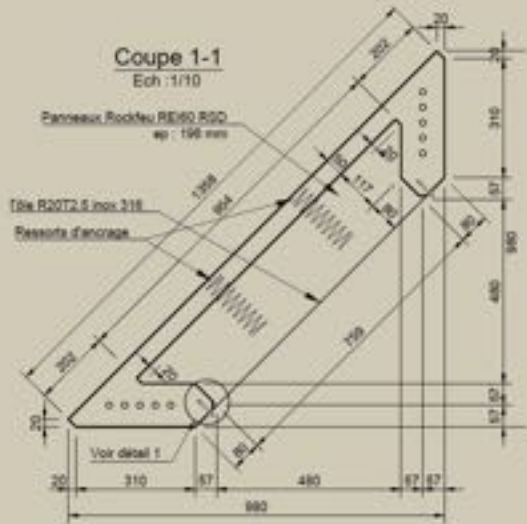
TABLEAU 1 : ÉPREUVES DE CONVENANCES : VÉRIFICATION DES COEFFICIENTS K

	K_{global}	K_{local}
Série L	1.30	1.47
Série T	1.00	1.14
Série R	1.00	1.62
Projet	1.35	1.75

CALAGE DES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT PAR MÉTHODE INVERSE



SECTION COURANTE DES PARALUMES



6

6- Section courante des paralumes.

7- Optimisation de la précontrainte en fonction des portées.

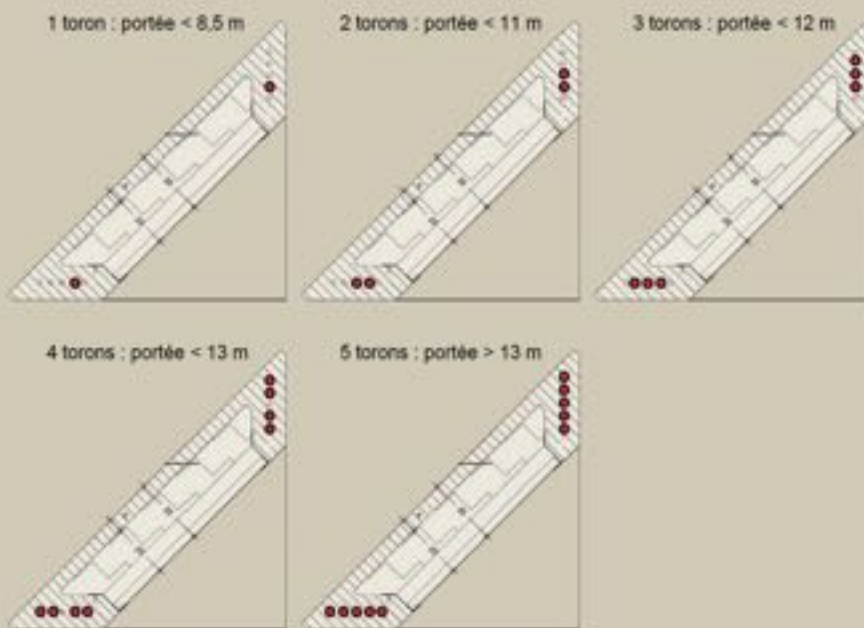
8- Champ de température en section courante après 60 minutes de feu ISO.

6- Standard section of louvre grids.

7- Optimisation of prestressing according to span lengths.

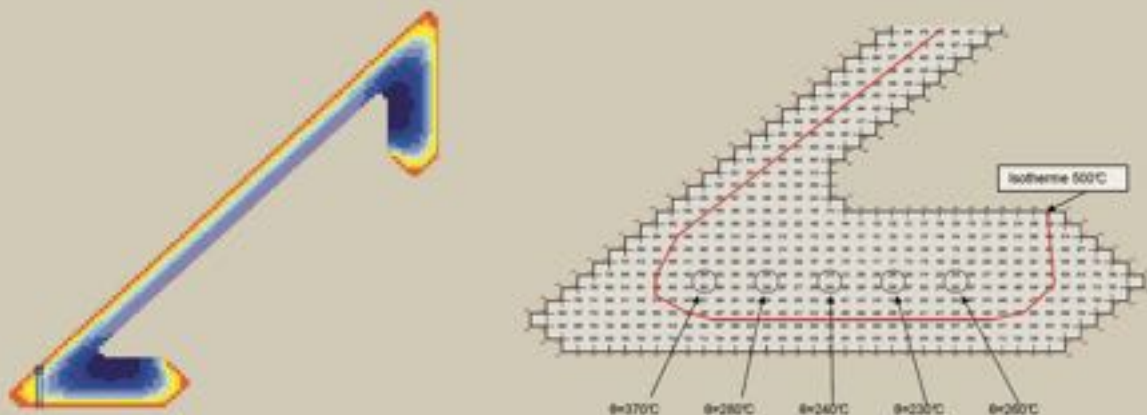
8- Temperature field in standard section after ISO 60-minute fire.

OPTIMISATION DE LA PRÉCONTRAINTE EN FONCTION DES PORTÉES



7

CHAMP DE TEMPÉRATURE EN SECTION COURANTE APRÈS 60 MINUTES DE FEU ISO



8

listes à l'entrée du tunnel du Vieux Port. Compte-tenu de la largeur de la trémie, une solution de poutres précontraintes par fils adhérents a été retenue. Afin de conserver la même section pour les 90 paralumes alors que leur portée varie de 2 m à 14,50 m, une optimisation de la précontrainte a été entreprise. Cinq plages de portée ont été retenues (figure 7), permettant une variation de 2x1 à 2x5 torons T15s par poutre. Comme fréquemment avec les structures fléchies en BFUP, les performances en traction du matériau ($f_{ctk} = 7,5$ MPa) sont exploitées dans le dimensionnement des sections, alors qu'il n'en est rien en compression ! À titre d'exemple, à l'ELS caractéristique la contrainte de traction maximale est de 6,6 MPa en travée, tandis que la contrainte maximale en compression n'est que de 26 MPa en travée et 34,1 MPa en zone d'about. Pour mémoire, cette formule de BSI présente une résistance caractéristique en compression à 28 jours de 150 MPa. Pour les calculs de vérification de la stabilité au feu, la méthode de l'isotherme 500°C de l'Eurocode a été appliquée. Une simulation de l'échauffement de la structure après une heure de feu ISO permet, dans un premier temps, de positionner la courbe d'isotherme 500°C (figure 8). À partir de cette dernière, les capacités résistantes des sections sont calculées, sans oublier l'influence de la température sur les différents câbles de précontrainte.

LES ÉPREUVES DE CONVENANCE

Conformément aux recommandations de l'Afgc sur les BFUP, un prototype des futurs paralumes a été réalisé avant le démarrage de la production (figure 10), ▷

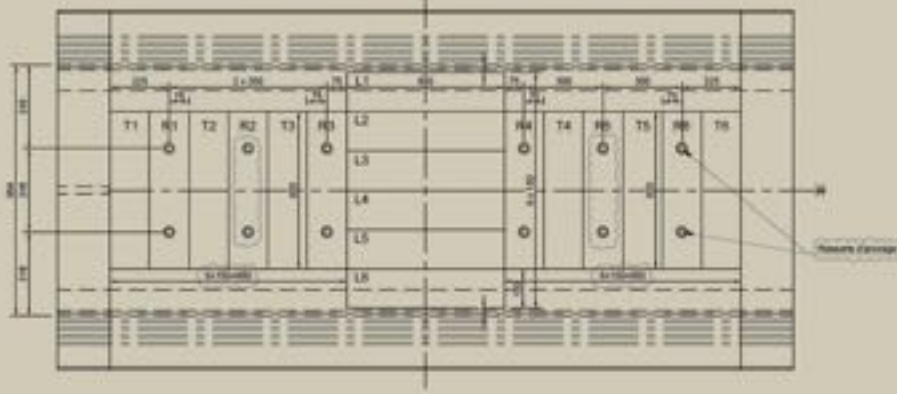
pour vérifier les coefficients K relatifs à l'orientation et à la répartition des fibres dans la structure, pris en compte dans les calculs de dimensionnement. Plusieurs séries d'éprouvettes de dimensions 150x50x600 mm³ ont été prélevées par sciage du prototype (figure 9). S'agissant d'éléments minces (épaisseur 5 cm), ces éprouvettes ont été testées sans entaille, en flexion 4 points. La réalisation du prototype a permis également la mise au point du moule et la validation du mode de bétonnage, compte-tenu notamment des triangles d'about. Les nombreux aspects techniques particuliers de cette conception originale ont été validés lors de ces convenances : gestion du retrait gêné, dispositif de maintien des panneaux acoustiques de laine de roche (poussée d'Archimède), forme et tenue mécanique de la tôle perforée en inox 316, fixation des panneaux acoustiques au BFUP durci par ressorts métalliques en attente...

Le prototype a été précontraint par 2x3 torons T15s, dès l'obtention d'une résistance en compression du béton de 100 MPa. Un cycle de 48 h a pu ainsi être validé pour la préfabrication des 90 éléments.

Les coefficients K ont été déterminés en comparant les résultats obtenus sur les éprouvettes sciées à ceux obtenus sur les éprouvettes de référence, bétonnées le même jour que le prototype. Les hypothèses considérées au stade des études d'exécution, à savoir $K_{global} = 1,35$ et $K_{local} = 1,75$ ont pu être confirmées grâce aux épreuves de convenance (tableau 1).

Par ailleurs compte tenu des exigences de résistance au feu, les épreuves de convenance devaient montrer l'aptitude des éléments à résister au problème d'écaillage :

REPÉRAGE DES ÉPROUVETTES À PRÉLEVER DANS LE PROTOTYPE DE PARALUME



9

© EIFFAGE

→ Soit par la réalisation d'un essai d'écaillage conduit sur un élément témoin ;

→ Soit sur la base d'essais déjà réalisés sur des éléments similaires (éléments de forme similaire soumis à des sollicitations d'efforts et de température équivalentes), complétés par la fourniture d'un avis de chantier établi par un laboratoire agréé confirmant la représentativité des essais réalisés par rapport à la structure étudiée.

Le BSI ayant fait l'objet de nombreuses études et nombreux essais à hautes

températures sur des corps d'épreuve utilisant la même formulation résistante au feu que celle prévue sur les paralumes, un avis de chantier du CSTB a pu être établi pour confirmer l'absence de risque d'écaillage significatif sur la structure.

LA PRÉFABRICATION

La préfabrication des 90 éléments en BSI a été réalisée par Hürks Beton dans son usine de Veldhoven au Pays-Bas (figure 11). Le cycle de production a été organisé de façon à réaliser un élément par jour : 2 moules ont été utilisés et

9- Repérage des éprouvettes à prélever dans le prototype de paralume.

10- Bétonnage du prototype dans l'usine de préfabrication.

11- Moule dans l'usine de préfabrication.

12- Transport des paralumes.

9- Identification of test specimens to be sampled in the prototype louver grid.

10- Prototype concreting in prefabrication plant.

11- Mould in prefabrication plant.

12- Transport of louver grids.

TABLEAU 2 : COMPOSITION DE LA FORMULE FEU DU BSI®

Composition pour 1 m ³		
Prémix BSI	2 296 kg	+/- 2%
Super-plastifiant	56 kg	+/- 5%
Eau ajoutée	208 kg	+/- 2%
Fibres métalliques droites (Lf = 20 mm Φ = 0.3 mm)	195 kg	+/- 2%
Fibres de polypropylène (Lf = 12 mm Φ = 18 μ m)	3 kg	+/- 2%



10

© HÜRKS BETON



11

© HÜRKS BETON



12

© EIFFAGE



13
© EIFFAGE

une cadence de 2 jours par moule a été respectée. Cette dernière était notamment conditionnée par la nécessité d'avoir une résistance en compression de 100 MPa pour la mise en précontrainte des éléments.

Compte-tenu de la grande variabilité de la longueur des éléments (de 2 m à 14,50 m) et de leur angularité aux abouts, 9 familles de géométries ont été retenues : d'un côté des moules, une joue fixe présentant une certaine angularité et, de l'autre, une joue mobile (pour ajuster la longueur des paralumes) présentant une autre angularité (les bords de la trémie n'étaient ni rectilignes, ni parallèles).

Dans le but d'avoir une section unique pour l'ensemble des paralumes, quelle que soit leur portée, 5 familles de précontraintes ont été mises en œuvre : de 2x1T15s à 2x5T15s. À partir de 2x4T15s un gainage partiel des câbles aux abouts a été réalisé, de façon à étager l'introduction de la précontrainte et limiter les contraintes dans le matériau. Tous les éléments ont été acheminés

13- Pose des paralumes au moyen d'une grue automotrice de 70 t.

13- Placing louvre grids with a 70-tonne self-propelled crane.

par camion (figure 12) depuis l'usine de préfabrication jusqu'à un site de stockage à Fos-sur-Mer, non loin du chantier à Marseille. Il n'était évidemment pas envisageable de stocker les paralumes en ville.

LE CHANTIER

Pendant la préfabrication des paralumes en usine, les travaux préparatoires ont été effectués sur le site marseillais : implantation et réalisation des

bossages d'appui sur les corniches existantes, à raison de 10 bossages par nuit.

Non loin de là, sur le site de stockage à Fos-sur-Mer, les paralumes étaient réceptionnés au fur et à mesure de la production et faisaient l'objet des dernières finitions avant d'être livrés à Marseille pour leur pose. Un léger ponçage de la surface libre de bétonnage a été effectué avant l'application de la peinture anti-graffiti correspondant au choix architectural.

Enfin les tôles perforées en acier inoxydable ont été fixées devant l'isolant acoustique.

Les paralumes ont finalement été mis en place au moyen d'une grue automotrice de 70 t (figure 13), placée sur la chaussée supérieure neutralisée de nuit. 10 éléments ont pu être posés chaque nuit, y-compris mise en place des appareils d'appui en néoprène (1 appui côté Est et 2 appuis côté Ouest) et fixation des taquets anti-cheminement en acier inoxydable, scellés dans les corniches. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole

MAÎTRE D'ŒUVRE : Setec Tpi

ARCHITECTE : André Mascarelli

CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Veritas

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Eiffage Génie Civil Méditerranée

PRÉFABRICATION : Hürks Beton

BUREAU D'ÉTUDES : Eiffage Infrastructures Direction des Moyens d'Ingénierie

TRAVAUX : Eiffage Génie Civil Méditerranée

ABSTRACT

UHPFRC TUNNEL PORTAL LOUVRE GRIDS AT THE ENTRANCE TO THE VIEUX-PORT TUNNEL IN MARSEILLE

ALAIN SCHMITT, SETEC TPI - JACQUES RESPLENDINO, SETEC TPI - NICOLAS BENNATI, EIFFAGE - BRUNO DIMANCHE, EIFFAGE - ALAIN SIMON, EIFFAGE

The tunnel portal louvre grid project is part of the general improvement works on the Boulevard du Littoral and upgrading work on the Vieux-Port Tunnel. The operation involves setting up around 90 prestressed UHPFRC beams to act as louvre grids on the roof of the existing tunnel approach between the Joliette Tunnel exit and the entrance of the Vieux-Port Tunnel. After describing the main design features of this structure, emphasising in particular the fire resistance and noise protection aspects, the article describes in detail the detailed design and the structure production and setting up operations. □

DEFLECTORES DE LUZ EN HMAR EN LA ENTRADA DEL TÚNEL VIEUX-PORT DE MARSELLA

ALAIN SCHMITT, SETEC TPI - JACQUES RESPLENDINO, SETEC TPI - NICOLAS BENNATI, EIFFAGE - BRUNO DIMANCHE, EIFFAGE - ALAIN SIMON, EIFFAGE

El proyecto de deflector de luz se inscribe en el contexto general de las obras de rehabilitación de la ronda litoral y de las obras de adecuación del túnel Vieux-Port. La operación consiste en instalar unas 90 vigas pretensadas en HMAR que cumplen la función de deflector de luz que cubre el hueco existente entre la salida del túnel Joliette y la entrada del túnel Vieux-Port. Tras una presentación de los principales elementos de diseño de esta construcción, haciendo especial hincapié en los aspectos de resistencia al fuego y de protección acústica, el artículo detalla los estudios de ejecución y las operaciones de fabricación e instalación de la obra. □

COQUES ET RÉSILLES EN BSI® HABILLENENT L'USINE D'ÉPURATION SEINE AVAL - PROJET BIOSAV

AUTEURS : AMÉLIE BOUHOURS, CHARGÉE D'AFFAIRES AU DÉPARTEMENT BSI, EIFFAGE INFRASTRUCTURES -
JÉRÉMIE BAUMGARTNER, CHARGÉ D'AFFAIRES AU DÉPARTEMENT PRÉCONTRAINTÉ, EIFFAGE INFRASTRUCTURES

LE PROJET DE MISE AUX NORMES DE LA STATION D'ÉPURATION SEINE AVAL D'ACHÈRES, COMPREND LA RÉALISATION DE PLUSIEURS BASSINS DE BIOFILTRATION BIOSTYR®. LA COUVERTURE DE CES BASSINS, D'UNE SURFACE TOTALE DE 7 000 M² EST RÉALISÉE PAR DES ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS EN BSI®. CE MATÉRIAU ULTRA-PERFORMANT A ÉTÉ RETENU PAR L'ARCHITECTE LUC WEIZMANN POUR SES CARACTÉRISTIQUES EXCEPTIONNELLES, PERMETTANT DE CONCEVOIR UNE STRUCTURE D'UNE GRANDE FINESSE, ESTHÉTIQUE ET OFFRANT UNE TRÈS BONNE RÉSISTANCE EN MILIEU AGRESSIF.



1
© EIFFAGE

INTRODUCTION

Le projet BIOSAV pour mise aux normes de la station d'épuration Seine Aval d'Achères, réalisé dans le cadre d'un marché en conception-réalisation, a été confié par le Siapp au groupement Eiffage Tp - Vinci - Otv - Degremont - Lwa - Lelli. Ce projet fait suite à une première opération similaire appelée DERU

pour laquelle les mêmes types d'éléments préfabriqués en BSI® avaient été conçus et confectionnés au cours de l'année 2010⁽¹⁾. La couverture de ces bassins (figure 2), d'une surface totale de 7 000 m², est réalisée par la mise en place de 352 coques préfabriquées courbes précontraintes par post-tension en BSI®.

1- Stockage
des coques
courbes.

1- Storage
of curved
shells.

LE MATÉRIAU BSI® (BÉTON SPÉCIAL INDUSTRIEL)

Le BSI®, Béton Fibré à ultra Hautes Performances (BFUP), est un matériau développé et breveté par le groupe Eiffage. Pour la réalisation de la couverture des BIOSTYRS®, la formule du BSI® retenue présente les caractéristiques données dans le tableau 1.



© NICOLAS BOREL

2

C'est pour ses caractéristiques mécaniques et physiques exceptionnelles que le BFUP BSI® a été choisi pour réaliser les éléments préfabriqués, couvertures et habillages décoratifs périphériques, des bassins BLOSTYRS®. Son exceptionnelle résistance mécanique permet d'obtenir un élanement très important pour la structure de la couverture.

La présence de fibres métalliques permet de s'affranchir de tout acier passif, tout en conservant une importante ductilité (figure 3). Il devient ainsi possible de réaliser des parois à rôle structurel extrêmement minces (5 cm).

Sa structure à pores fermés et sa résistance aux agents agressifs offre à ce matériau une grande pérennité, même dans des milieux agressifs et acides.

2- Maquette des coques et résilles (projets DERU & BIOSAV).

3- Loi de comportement du BSI®.

2- Model of the shells and lattices (DERU & BIOSAV projects).

3- Behaviour pattern of BSI®.

La forte proportion de fines permet l'obtention d'une grande qualité de parement.

LA CONCEPTION DE LA STRUCTURE

Cette structure aérienne en BFUP BSI® est constituée de 352 coques courbes en forme de vagues, de 176 cadres

supports ainsi que des 98 résilles habillant la façade.

Les coques sont préfabriquées et précontraintes par post-tension en atelier, avant d'être livrées puis posées sur le site de Seine Aval.

LES COQUES COURBES

Les coques courbes présentent une dimension en plan de 11,83 x 1,8 m² et leur profil longitudinal est en forme de vague de 2,90 m d'amplitude.

Leur schéma statique est celui d'une poutre isostatique de 10,63 m de portée.

La section courante est constituée d'une dalle nervurée, avec un hourdis mince de 5 cm d'épaisseur, et une nervure centrale de 25 cm de hauteur totale, soit un élanement de 1/42, et une épaisseur équivalente de 81 mm soit L/ép. = 131).

La grande finesse de la section est rendue possible grâce aux performances mécaniques du BFUP et notamment sa ductilité en traction qui permet de s'affranchir d'armature passive.

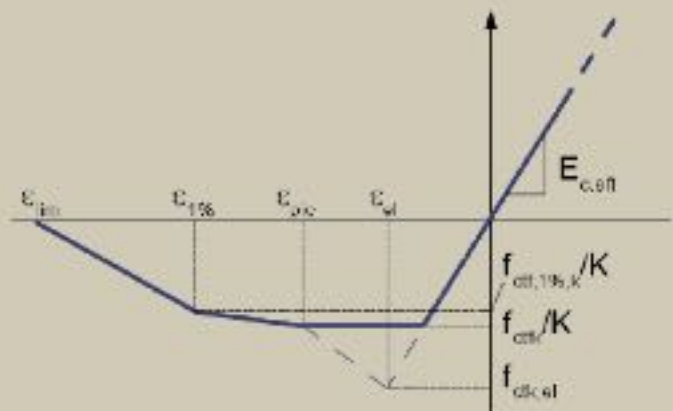
La précontrainte est constituée de 3 monotorons gainés-graissés du procédé DSI, dont le tracé suit la forme courbe de la coque. ▷

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU BSI®

Densité sur béton durci	ρ	2,75 t/m ³
Résistance caractéristique en compression à 28j	f_{ck}	160 MPa
Résistance caractéristique en traction à 28j de la matrice	$f_{ctk,el}$	8,5 MPa
Résistance caractéristique en traction à 28j du matériau fibré	f_{ctk}	8,5 MPa
Valeur moyenne du module d'Young à 28j	E_{cm}	58 GPa
Fluage propre et de dessiccation (chargement à t1 = 48h)	$\varphi(\infty, t0)$	1

LOI DE COMPORTEMENT DU BSI®

Caractéristiques du béton		
0.6 Fck	96	MPa
fctk,el	8	MPa
Fctk/K	6.3	MPa
Fctf 1%/K	5.8	MPa
Ec	58000	MPa
Eps el	0.0109%	
wpic	0.4	mm
H	0.1	m
w(1%)	1.00	mm
Eps(1%)	0.614%	
lc	0.17	m
Eps pic	0.254%	
Eps lim	3.000%	



© EIFFAGE

3

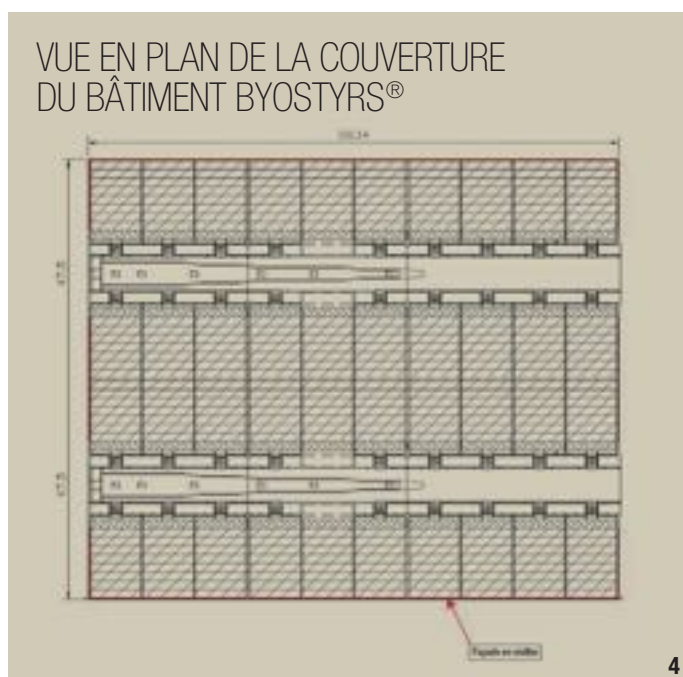
La mise en tension s'effectue à l'extrémité inférieure de la coque, l'ancrage supérieur étant de type passif noyé dans le BSI®. La précontrainte est mise en œuvre en usine par la division précontrainte de Via Pontis du groupe Eiffage.

La structure étant précontrainte exclusivement dans le sens longitudinal, les principes de justification diffèrent selon que l'on s'intéresse au fonctionnement transversal ou bien longitudinal de la structure.

Les justifications de la structure ont été menées conformément aux recommandations de 2013 relatives aux BFUP. Dans le sens longitudinal, la justification de la structure précontrainte est assurée en limitant les tractions, à l'ELS caractéristique, à la résistance en traction de la matrice.

Dans le sens transversal, et en l'absence d'aciers conventionnels, la justification du hourdis de 5 cm est assurée par la prise en compte de la résistance en traction post-fissuration du béton fibré.

La morphologie complexe des zones d'about des coques courbes, intégrant les consoles d'appui et la zone d'introduction de la précontrainte, est le fruit d'une étude réalisée conjointement par Eiffage Tp, Via Pontis et l'architecte



Luc Weizmann. Le traitement particulier de cette zone vise à assurer un raccord esthétique entre le bloc d'ancrage de la précontrainte et la section courante de la coque, tout en garantissant la diffusion des efforts concentrés et une transmission correcte des réactions d'appui.

Dans les zones d'about, les coques courbes ont la particularité de ne pas être directement appuyées sur leur nervure.

Elles se terminent en chacune de leurs extrémités par une console non précontrainte, correspondant à un simple épaissement du hourdis

4- Vue en plan de la couverture du bâtiment BYOSTYRS®.

5- Vue en élévation du bâtiment BYOSTYRS®.

6- Vue 3D de la zone d'about.

7- Section transversale de la coque courbe.

8- Élévation des cadres.

4- Plan view of the BYOSTYRS® building roof.

5- Elevation view of BYOSTYRS® building.

6- 3D view of end zone.

7- Cross section of curved shell.

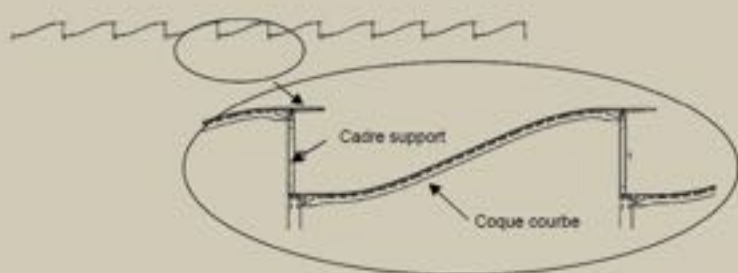
8- Elevation view of frames.

© EIFFAGE

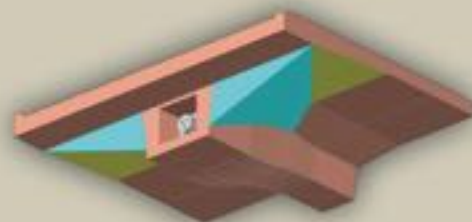
© EIFFAGE

© EIFFAGE

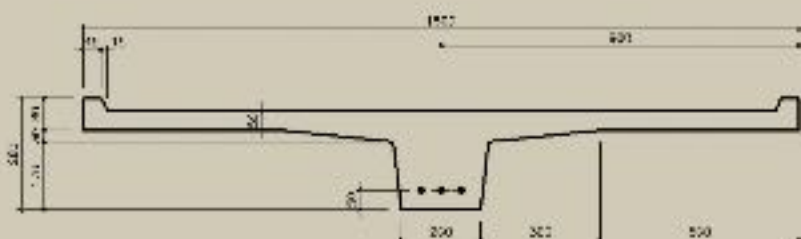
VUE EN ÉLÉVATION DU BÂTIMENT BYOSTYRS®



VUE 3D DE LA ZONE D'ABOUT



SECTION TRANSVERSALE DE LA COQUE COURBE



ÉLÉVATION DES CADRES

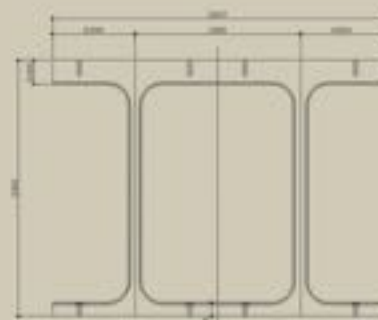


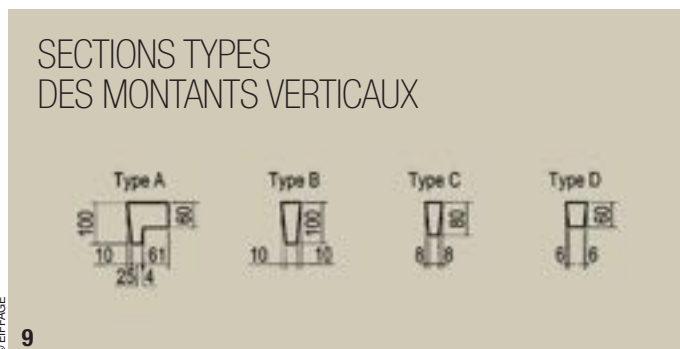
TABLEAU 2 : VALEURS OBTENUES POUR LE COEFFICIENT K À L'ISSUE DES ESSAIS DE TRACTION PAR FLEXION

	Section courante	Consoles d'appui
Effets globaux	K = 1,20	K = 1,35
Effets locaux	K = 1,65	K = 1,75

9- Sections types des montants verticaux.
10- Vue 3D des résilles.

11- Prototype après prélèvement des prismes.

9- Typical cross sections of uprights.
10- 3D view of lattices.
11- Prototype after prism sampling.



© EIFFAGE

de 50 à 94 mm. Cela est rendu possible par la prise en compte de la contribution mécanique des fibres métalliques.

Cette disposition a été validée, dans le cadre des épreuves de convenance, à l'aide d'essais en laboratoire sur des échantillons prélevés dans un prototype de la coque à l'échelle 1. L'absence de fretage dans les zones

d'introduction de la précontrainte avait déjà été validée expérimentalement dans le cadre du projet de la DERU.

Un essai sur bloc d'ancrage en BSI®, réalisé en laboratoire, conformément à l'ETAG 013 et aux recommandations sur les BFUP, avait permis de mettre en évidence un coefficient de sécurité à la rupture d'environ 3.

LES CADRES SUPPORTS

Les coques courbes sont appuyées en leur extrémité supérieure sur des cadres supports en BSI®. Ces cadres sont préfabriqués sans aucune armature active ni passive.

Les montants verticaux de ces cadres présentent une section transversale de 12x18 cm² pour une hauteur libre de 2,8 m (figure 8).

LES RÉSILLES DE FAÇADE

La façade du bâtiment des BIOSTYR® est constituée par une résille en BSI® de 300 m (figures 9 et 10).

Les montants verticaux qui forment la résille sont solidarités à leurs extrémités par deux poutres.

La poutre inférieure est appuyée directement sur le voile périphérique des bassins, tandis que la poutre de couronnement est maintenue par les cadres supports des coques courbes, formant ainsi une poutre de 10,63 m de portée destinée à reprendre les actions horizontales agissant sur les montants.

Chaque tronçon de résille de 10,63 m est constitué de 3 panneaux préfabriqués réalisés à partir d'un contre-moule unique.

La continuité des poutres de couronnement entre chaque panneau élémentaire est assurée par des assemblages métalliques destinés à assurer la transmission des moments de flexion induits par les actions horizontales.

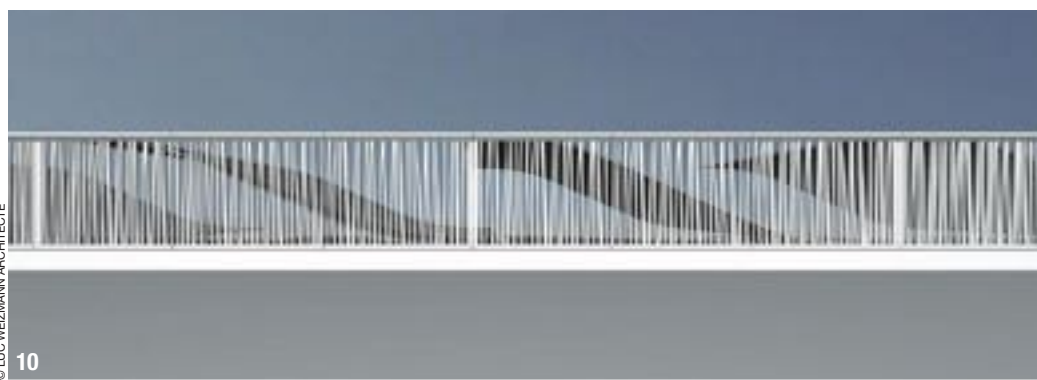
LES ÉPREUVES DE CONVENANCE

L'application des recommandations Afgc-Setra relatives aux BFUP, nécessite de réaliser un certain nombre d'essais préliminaires visant à vérifier que les matériaux et matériels utilisés sont conformes aux hypothèses de l'étude. Dans ce cadre, un élément témoin représentatif de l'ouvrage réel a été réalisé dans le but de valider les moyens et méthodes de bétonnage et de mesurer le coefficient K relatif à la dispersion sur l'orientation de fibres. Dans le cas des coques courbes, les prismes prélevés dans l'élément témoin, ont permis de vérifier le comportement du matériau dans deux zones caractéristiques de la structure : en section courante et dans les consoles d'appui.

Les valeurs obtenues pour le coefficient K à l'issue des essais de traction par flexion sont données dans le tableau 2 et sont conformes aux prévisions de calcul.

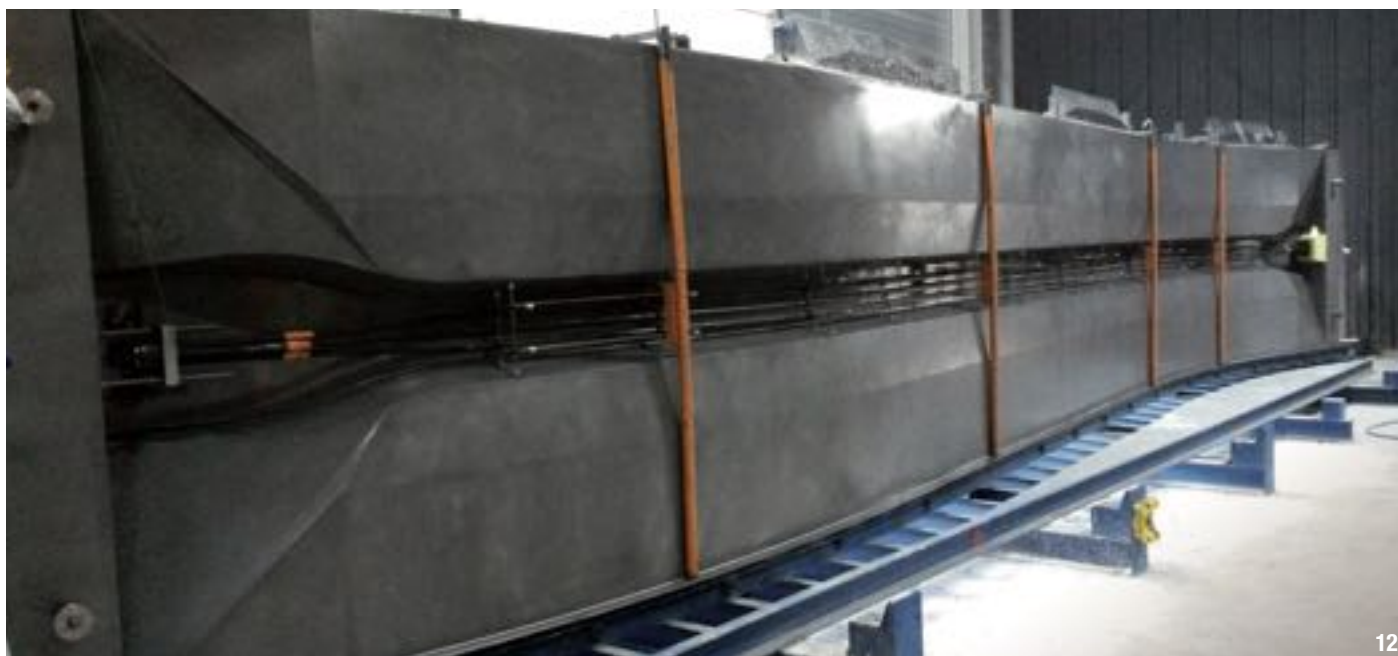
PRÉFABRICATION ET POSE DES ÉLÉMENTS EN BSI® LES COQUES COURBES

Le comportement auto-nivelant du BSI®, associé à la forme de la coque ainsi qu'au souhait de l'architecte d'obtenir une finition de qualité sur les deux faces du hourdis, excluaient la solution du coulage à plat. C'est pour cette raison que l'élément est bétonné verticalement, sur tranche.



© LUC WEIZMANN ARCHITECTE

© EIFFAGE



12 © EIFFAGE

Compte tenu du délai d'approvisionnement du chantier, 2 moules ont été fabriqués.

Au vu des dimensions, des formes géométriques, des précisions géométriques requises et du nombre de réemplois, les moules sont métalliques (figure 12). Les détails comme les chanfreins et les fruits ont été étudiés pour permettre un démoulage aisé, sans épaufrure.

Le bétonnage est réalisé sans vibration ni étuvage.

Le démoulage et la manutention de la coque jusqu'à son lieu de stockage sont autorisés dès que la résistance atteint 35 MPa.

Le BSI présente une résistance à jeune âge très élevée sans traitement thermique : 80 MPa à 18h d'âge. Cette capacité permet au pré-fabricant AAB (Atelier Artistique du Béton) une rotation quotidienne de démoulage, coffrage, bétonnage.

Les coques sont mises en stockage en extérieur après stabilisation de leur température interne avec le milieu extérieur (figure 1).

À 10 jours d'âge et 130 MPa de résistance, ces coques peuvent être mises en tension.

Les coques courbes sont transférées sur chantier par camion, où elles sont retournées en position horizontale grâce à un basculeur avant d'être posées à la grue, avec un palonnier.

LES CADRES

Les cadres supports sont coulés à plat dans un moule métallique avec une cadence quotidienne.

Ils sont transportés à plat puis redressés sur chantier au moyen d'une sangle de levage fixée autour de leur poutre supérieure.

LES RÉSILLES

Les 98 différents panneaux de résille constituant la façade du bâtiment

12- Coffrage coque courbe.

13- About coque.

12- Curved shell formwork.

13- Shell end piece.



13

© EIFFAGE

BIOSTYR® sont réalisés à partir d'un contre moule unique manufacturé en bois de 5 m de longueur, sur lequel deux moules en silicone ont été modélisés. La réalisation des différents panneaux de résille de 3 à 4 m de long est rendue possible en positionnant des arrêts de bétonnage à des cotes prédéterminées dans les moules en polyuréthane.

Le décoffrage peut être réalisé dès que la résistance en compression atteint la valeur de 80 MPa (soit après 24h environ), critère contraignant pour éviter la fissuration de flexion des brins les plus fins lors de la phase de démoulage.

Les résilles sont stockées et livrées à plat. Un releveur redresse les résilles sur site pour la pose.

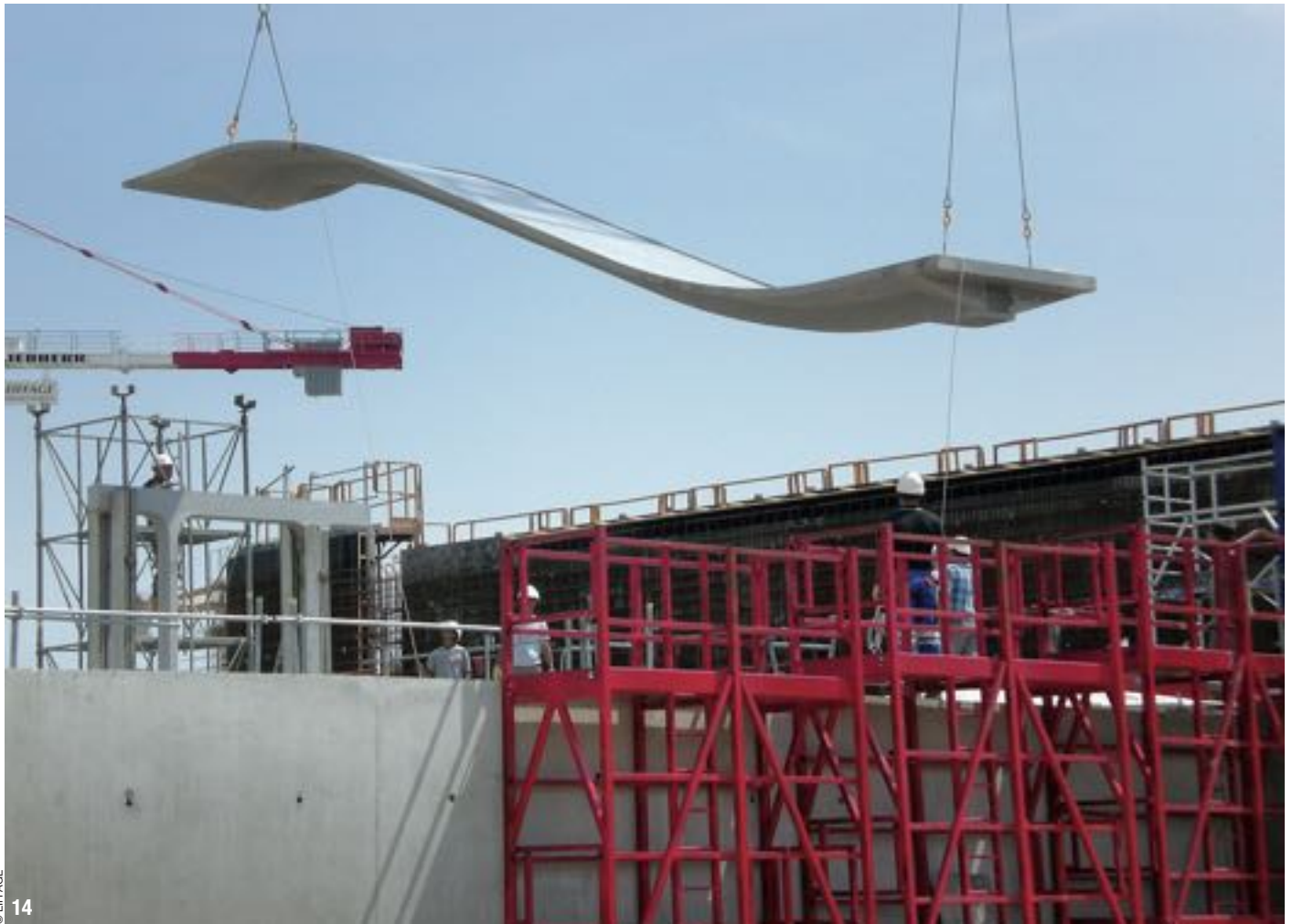
CONCLUSION

Grâce à leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, l'emploi des BFUP permet de réduire notablement les quantités de matière utilisée.

La présence systématique de fibres assurant, à elle seule, la ductilité du matériau, la réalisation de formes complexes et innovantes de faible épaisseur en BFUP est possible.

Les BFUP sont caractérisés par une grande durabilité, une faible porosité et une compacité maximale. Ces propriétés permettent de garantir la pérennité des ouvrages y compris dans des milieux très agressifs.

Enfin, leur teneur élevée en éléments fins, associée à un caractère auto-plaçant permet l'obtention de parements de haute définition.



Dans le cadre du projet BIOSAV, l'architecte a ainsi pu créer des éléments préfabriqués en BSI® utilisant l'ensemble de ses performances. C'est-à-dire propriétés mécaniques, esthétiques et de grande durabilité. □

1- Delplace G., Hajar Z., Simon A. et al., *Usine Seine Aval DERU Les coques préfabriquées en BSI®* - GC'2011 Paris, Mars 2011.

14- Pose d'une coque courbe.

14- Placing a curved shell.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Siaap

MAÎTRE D'ŒUVRE - ARCHITECTE : Luc Weizmann Architecte

FOURNITURE BFUP/BSI ET PRÉFABRICATION : Eiffage Infrastructures
Département BSI et Atelier Artistique du Béton

VOLUME BSI : 800 m³

ABSTRACT

BSI® SHELLS AND LATTICES FORM CLADDING FOR THE SEINE AVAL SEWAGE TREATMENT PLANT - BIOSAV PROJECT

AMÉLIE BOUHOURS, EIFFAGE - JÉRÉMIE BAUMGARTNER, EIFFAGE

The BIOSAV Project for retrofitting of the Seine Aval sewage plant, performed under a Design and Build contract, comprises the execution of several BIOSTYR® biofiltration ponds. The cover for these ponds, of total area 7,000 m², is executed by placing in position 352 curved prefabricated shells prestressed by post-tensioning, made of BSI®, the ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC) from Eiffage. This ultra-high-performance material was selected by the architect Luc Weizmann for its exceptional properties, making it possible to design a structure of great refinement, attractive and offering very good resistance in an aggressive environment. This is a significant quality, because the ullage space of the BIOSTYR® ponds is laden with H₂S. □

REVESTIMIENTO DE CONCHAS Y REJILLAS EN BSI® PARA LA PLANTA DEPURADORA DE SEINE AVAL - PROYECTO BIOSAV

AMÉLIE BOUHOURS, EIFFAGE - JÉRÉMIE BAUMGARTNER, EIFFAGE

El proyecto BIOSAV de adecuación a las normas de la estación depuradora de Seine Aval, llevado a cabo en el marco de un contrato de diseño-realización, incluye la construcción de varios estanques de biofiltración BIOSTYR®. La cubierta de estos estanques, de una superficie total de 7.000 m², se ha realizado instalando 352 conchas curvadas prefabricadas pretensadas por post-tensión en BSI®, el hormigón de muy alta resistencia reforzado con fibras (HMAR) de Eiffage. Este material ultra-eficiente ha sido elegido por el arquitecto Luc Weizmann por sus características excepcionales, que permiten diseñar una estructura de una gran finura, estética y con una excelente resistencia en medio agresivo, calidad notable dado que el cielo gaseoso de los estanques BIOSTYR® está cargado de H₂S. □



1

© ATELIER D'ARCHITECTURE EMMANUEL NEBOUT

APPLICATIONS ARCHITECTONQUES EN BFUP : UNE PALETTE DE SOLUTIONS INFINIE

AUTEURS : KELLY HENRY, RESPONSABLE PROJETS ARCHITECTURE AMÉRIQUE DU NORD, LAFARGE DUCTAL® - ROMAIN DELPONT, RESPONSABLE PROJETS INTERNATIONAUX, LAFARGE DUCTAL® - ALEXANDRO GUITTON, DIRECTEUR SUPPLY CHAIN, LAFARGE DUCTAL®

LES BFUP NE CESSENT DE SE RÉINVENTER POUR RÉPONDRE AUX ESPOIRS QUE LEURS PERFORMANCES SUSCITENT AUPRÈS DES CONCEPTEURS, BUREAUX D'ÉTUDES, PRÉ-FABRICANTS ET MAÎTRES D'OUVRAGE. C'EST SUR LA BASE DU PARTAGE DES EXPÉRIENCES QUE DUCTILITÉ, RÉSISTANCE, FINESSE, TAUX DE VIDE, TAILLE DES PANNEAUX, QUALITÉ ET VARIÉTÉ DE FINITION ONT ÉTÉ ÉPROUVÉES CES DERNIÈRES ANNÉES. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT EN LABORATOIRE ET SUR CHANTIER CONFIRMENT AU QUOTIDIEN L'ÉQUILIBRE ANNONCÉ ENTRE PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET STRUCTURELLES ET INSPIRATIONS ESTHÉTIQUES.

Très vite assimilés à des matériaux de haute technicité, les BFUP révèlent à chaque nouvelle réalisation leur potentiel d'innovation pour de nouvelles applications architecturales. Réunissant des propriétés physiques et mécaniques jusqu'alors inconnues, ils se sont imposés dans de nombreux projets qui se seraient avérés difficiles à réaliser avec des solutions traditionnelles. L'exploration de leurs performances a suscité des conceptions de plus en plus créatives, de plus en plus légères, de plus en plus fines. Avec désormais des réalisations rassurantes pour les maîtres d'ouvrages et qui servent de références pour les concepteurs.



2

© PIERRE SCHWARTZ

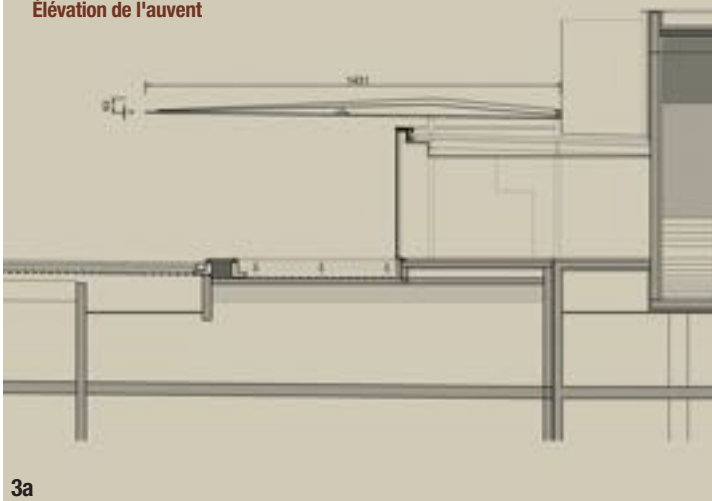
1 & 2- Multiplex cinématographique de Rodez : un auvent de 9,50 m de porte-à-faux en Ductal® incrusté de LEDs.

1 & 2- Multiplex cinema in Rodez: a 9.50-metre cantilever canopy in Ductal® incrustated with LEDs.

250 M² DE DUCTAL® EN PORTE-À-FAUX

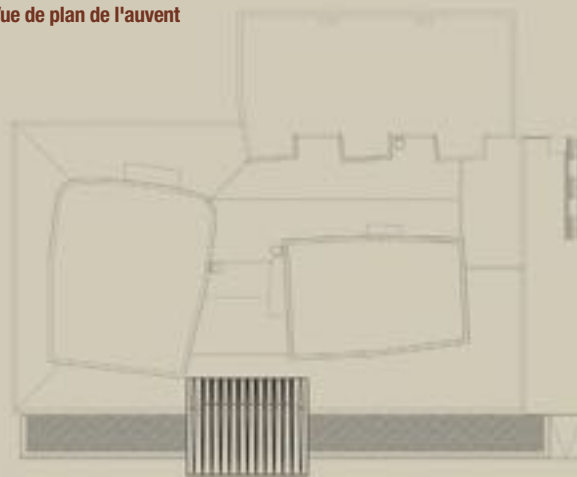
Élévation de l'auvent

© ATELIER D'ARCHITECTURE EMMANUEL NEBOUT



3a

Vue de plan de l'auvent



3b

3- 3a : 250 m² de Ductal® en porte-à-faux - Élévation. 3b : Vue de plan.

3- 3a: 250 m² of Ductal® in cantilever - Elevation view. 3b: Plan view.

Ces derniers n'hésitent plus à répondre aux appels d'offres avec des pièces aux formes géométriques complexes ou bénéficiant de courbures et de variété de surfaces qui s'affranchissent de bien des contraintes dévolues aux bétons classiques (figures 1 & 2).

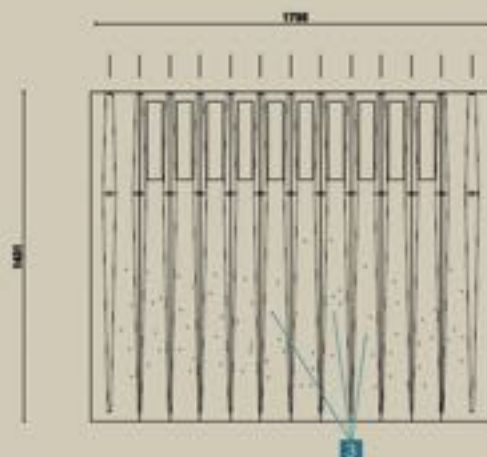
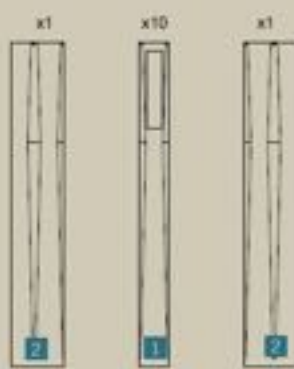
LES NOUVELLES FONCTIONS DE LA FAÇADE

Les nouvelles fonctions que la façade se doit d'assurer - démultiplication de bâtiment à forte valeur ajoutée sur le plan de l'image - ITE - allègement des ressources à performances égales - faible empreinte écologique inhérente à une ACV calculée sur le long terme, etc. - ont conduit les architectes à exiger du BFUP des performances globales tant en termes d'esthétique que de durabilité, de résistance, de mise en œuvre, de respect environnemental.

Les exemples de parements ou de revêtements se multiplient. Ils ont fait progresser la recherche sur les BFUP dans des domaines aussi divers que les technologies de production, de résistance à l'abrasion, de double face de finition comparable, de résilles aux taux de vide impressionnants, etc.

Détail des éléments en Ductal® de l'auvent

Plan de composition de l'auvent



- 1 Éléments courants avec demi-nervure sur chaque bord
- 2 Éléments d'about avec nervure centrale et demi-nervure latérale
- 3 Réservations pour intégration de l'éclairage par LED

3c

© ATELIER D'ARCHITECTURE EMMANUEL NEBOUT

Pour beaucoup, l'avènement des BFUP n'est pas uniquement une « innovation matériau » mais l'ouverture sur de nouveaux concepts architecturaux différents au plan esthétique comme au plan structurel.

ALLIER TECHNOLOGIE ET ESTHÉTISME

La résistance à la compression d'un BFUP peut atteindre aisément 200 MPa et sa résistance à la traction 40 MPa. L'intégration à la pâte d'un dosage adapté de fibres métalliques, voire en inox, organiques ou de verre, élimine dans la plupart des cas, la nécessité des armatures passives. La compacité du matériau, sa ductilité, sa fluidité,

sa rapide montée en résistance, sa propension à reprendre l'empreinte de tous types de moules, sa capacité à être teinté dans la masse, sa compacité favorisant son étanchéité, constituent autant de caractéristiques qui, associées à ses propriétés mécaniques, permettent de gagner en élégance mais aussi en poids et en volume.

Ne s'y sont pas trompés les architectes de toute renommée, qui ont exploré ces performances en imaginant des éléments plus fins, des portées plus longues, des porte-à-faux improbables ou des résilles de très grande légèreté. Et ce d'autant plus que les BFUP présentent également des caractéristiques améliorées en terme de durabilité

comme la résistance aux chlorures, à l'abrasion, aux chocs et plus généralement aux agents agressifs en tout genre. Autant de performances mécaniques et rhéologiques exceptionnelles qui les rendent éco-efficaces par l'économie de matière et de traitement.

De nombreuses réalisations utilisant un BFUP pour ses performances à la fois structurelles et esthétiques ont vu le jour en Europe et en Amérique du Nord, notamment sous l'impulsion du précurseur en matière de BFUP : le Ductal® de Lafarge.

Quelques projets sélectionnés pour les différentes techniques mises à profit démontrent le large éventail de possibilité que ce matériau a ouvert. ▶



4a

© DAVIS BRODY BOND

Pour l'architecte Emmanuel Nebout, concepteur du multiplex cinématographique de Rodez, les BFUP constitueraient une innovation majeure de l'ingénierie mécanique, une de celles qui modifient profondément les capacités et les possibilités de faire autrement.

STRUCTURES EN PORTE-À-FAUX À RODEZ : UNE LAME ÉTANCHE EN DUCTAL® INCRUSTÉE DE LED POUR ABRITER LES CINÉPHILES

C'est après avoir envisagé plusieurs solutions techniques, qu'il a choisi le Ductal® pour l'auvent accueillant les cinéphiles de la ville du peintre Soulages (figures 3a, 3b & 3c).

Seules les performances mécaniques du BFUP pouvaient permettre d'obtenir une telle finesse en apportant simultanément l'étanchéité requise par un abri dans une région où la neige peut être, en hiver, aussi agressive que le soleil estival.

Son projet de Multiplex intègre en façade un auvent de 9,50 m de porte-à-faux - un record ! - avec à peine 4 cm d'épaisseur en Ductal® incrusté de LEDs.

Les 250 m² de porte-à-faux constitués de 12 éléments préfabriqués en Ductal® reposent ainsi sur deux éléments porteurs. Une file arrière reprend les efforts de soulèvement, l'autre, plus en avant, fonctionne en compression. L'auvent est composé de 12 pièces boulonnées sur la structure métallique du bâtiment. Dix éléments sont identiques (1,31 x 14,31 m), présentant une demi-nervure sur chaque bord. Deux éléments d'about (2,11 x 14,31 m) comportant une nervure centrale et une demi-nervure latérale les complètent :

elles ont été conçues avec un débord latéral de 80 cm afin que les nervures de 63 cm de hauteur ne puissent être vues depuis le pignon. Les nervures comportent des armatures métalliques passives. Lors du coulage des plaques, les fers en attente ont été pris par le Ductal®. Le bon accrochage des nervures avec la plaque et l'uniformité en teinte et texture du Ductal® garantissent la parfaite unité des éléments pour un effet monobloc. Les éléments ont été coulés nervure en haut pour garantir une excellente qualité de rendu de la sous-face.

UN TOIT TERRASSE DE 44 MM D'ÉPAISSEUR

Un autre auvent spectaculaire conçu par l'agence Davis Brody Bond pour le centre polyvalent à Washington DC, illustre tout à la fois le gigantisme et

4- 4a : G8 WAY (Washington DC) Agence Davis Brody Bond. Un toit terrasse de 44 mm d'épaisseur. 4b : Une toiture en Ductal® de 120 m de long, 8 m de haut et 18 m de portée.

4- 4a: G8 WAY (Washington DC), Davis Brody Bond Agency. A flat roof 44 mm thick. 4b: A Ductal® roof 120 m long, 8 m high and of span length 18 m.

l'élégance que favorisent les BFUP en utilisant la rapidité de mise en œuvre du Ductal® (figures 4a et 4b). Semblable à une sculpture, le toit (122 m de long sur 7,6 m de haut) est d'une épaisseur d'à peine 44 mm. Il supporte également une vaste terrasse d'environ 1 500 m². La géométrie stricte des panneaux préfabriqués a été rendue possible par la fluidité du Ductal®. Construit pendant l'été 2013, le chantier de ce bâtiment a été mené à un rythme record. Une rapidité encore jamais atteinte avec des solutions préfabriquées puisque 19 jours seulement ont été nécessaires à la production de 181 panneaux en Ductal® (de 0,6 à 2,7 m de large et de 2,1 à 4,3 m de long), représentant une surface de 2 884 m².

Mais si les BFUP permettent la conception et la production de pièces en béton de très faible épaisseur, ils offrent éga-



4b

© DAVIS BRODY BOND

5- Grâce à sa ductilité et à ses performances de résistance, aucune armature n'a été nécessaire, ce qui a permis d'appliquer aux panneaux, un rayon de courbure élevé.

6- L'Atrium à Victoria (Canada) (l'agence D'Ambrosio Architecture + Urbanism). Assurer la continuité des surfaces entre extérieur et intérieur.

5- Thanks to its ductility and its resistance properties, no reinforcing bars were necessary, thus making it possible to apply a large radius of curvature to the panels.

6- The Atrium in Victoria (Canada) (D'Ambrosio Architecture + Urbanism Agency). Ensuring surface continuity outdoors and indoors.

lement la possibilité de réaliser des éléments de façades dimensionnés avec des rayons de courbure qu'il aurait été impossible de réaliser avec des systèmes traditionnels.

L'ATRIUM À VICTORIA (CANADA) : TOUT EN COURBURES

Situé au centre-ville de Victoria au Canada, l'Atrium est un ensemble de 20400 m² de bureaux et de surfaces commerciales. Sa construction révèle les nombreux avantages techniques et architecturaux rendu possible par le système de revêtement préfabriqué en Ductal®.

La conception de l'architecte Franc d'Ambrosio, de l'agence D'Ambrosio Architecture + Urbanism, s'articule autour d'un atrium ouvert de sept étages, aux murs intérieurs ondulés contrastant avec les lignes droites de sa façade côté rue. L'équipe de conception souhaitait que le revêtement de la façade soit le même que celui de l'atrium intérieur.

Un défi si l'on considère les courtes ondulations radiales successives de la façade qui auraient nécessité l'assemblage d'un système de panneaux découpés sur mesure mais laissant apparaître des jointures et des écarts

peu esthétiques et inefficaces en matière d'économie d'énergie.

L'utilisation du Ductal® présentait plusieurs avantages.

Esthétiques tout d'abord, en assurant la continuité des surfaces entre extérieur et intérieur. Grâce à sa ductilité et à ses performances de résistance, aucune armature n'a été nécessaire, ce qui a permis d'appliquer aux panneaux un rayon de courbure élevé.

Chaque courbe de la façade a pu être conçue d'un seul bloc, évitant ainsi les écarts disgracieux entre les panneaux (figures 5 et 6).

1 200 panneaux, d'une épaisseur inférieure à 20 mm, ont été réalisés à partir de trois moules différents.

L'efficacité énergétique annoncé par les BFUP a, dans ce cas été optimisée par l'utilisation du Ductal® blanc. Présentant un rapport poids/résistance/épaisseur exceptionnel, les panneaux en Ductal® ont permis non seulement de mettre en œuvre un rayon de courbure important mais également de réduire l'épaisseur des murs externes. Un gain d'espace à l'intérieur des murs qui a d'ailleurs facilité le déplacement du système de climatisation. Le gain de poids a permis de réduire la taille de la structure et d'abaisser la réponse aux exigences en matière de composants parasismiques. Un avantage décisif pour une ville confrontée à l'un des taux d'activité sismique les plus élevés du Canada.

Au-delà de la finesse et de l'élancement des structures imaginées par les architectes, les BFUP ont aussi permis d'explorer des pistes de traitements de façade jusqu'ici exclusivement dévolues à d'autres matériaux.





7a

© BEARCH

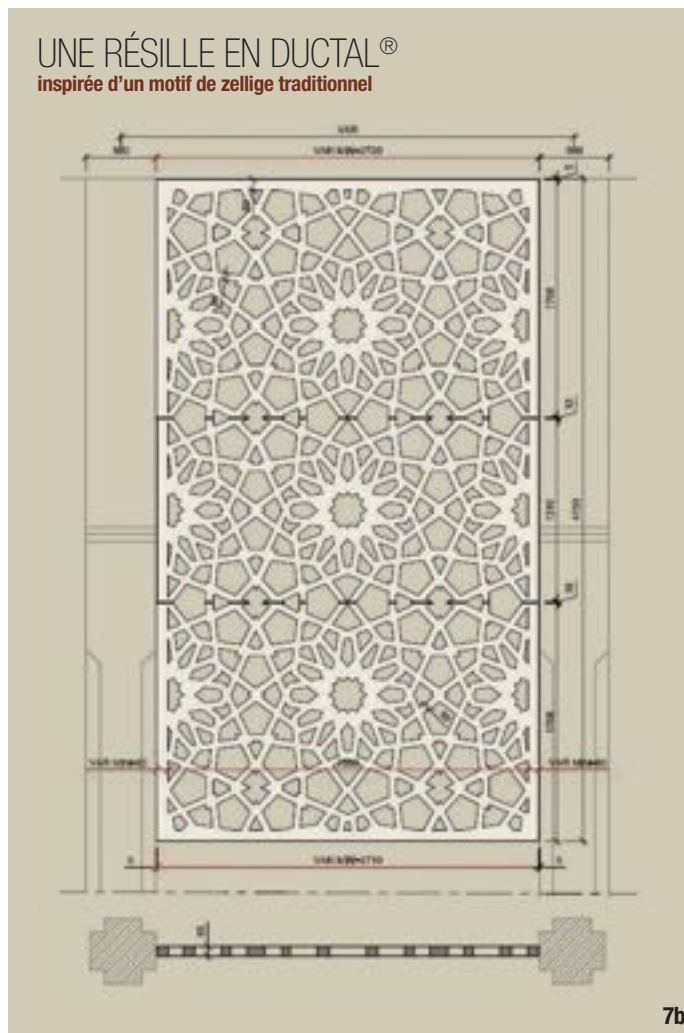
C'est notamment le cas des résilles en double peau traditionnellement plutôt conçues en métal, en acier peint ou en fonte, mais restant difficiles d'entretien et d'une fabrication coûteuse. Les BFUP sont venus apporter une excellente alternative pour créer des éléments en béton décoratifs aux motifs complexes et originaux, moulés à froid, nécessitant peu d'entretien, à la fois esthétiques et durables.

RÉSILLES ET PANNEAUX PERFORÉS : RÉINVENTER LES MOUCHARABIEHS MAROCAINS

Avec ses 1 600 m² de moucharabieh en façade, le réaménagement de l'aéroport de Rabat-Salé conçu par l'architecte Zhor Jaidi Bensouda de l'agence Klarte International, ont repoussé les limites du possible pour une résille (figure 8). Jouant simultanément un rôle d'enveloppe et de brise-soleil, des panneaux en Ductal[®] FO blanc (Fibres Organiques) de 1,75 m de large, et de 3,75 m à 5,25 m de haut pour une épaisseur de 10 cm, présentent un taux de vide de 70 % !

La nouvelle gare de Casa-Port imaginée par les agences Arep et Groupe3 Architecte se joue, quant à elle, de la luminosité méditerranéenne, à l'ouest grâce à un immense moucharabieh protégeant le hall voyageurs, et sur le côté, par un linéaire de brise-soleil en L tous réalisés en Ductal[®]. Pour cette réalisation, les architectes ont joué sur toutes les qualités du Ductal[®] mettant tour à tour à profit minéralité, durabilité, résistance aux sels marins, performances pour concevoir des éléments très élancés et d'une grande finesse (figure 9).

Pour le moucharabieh de l'immense façade, au-delà de la capacité à supporter un coefficient de vide de plus de 40 %, c'est la durabilité et la pérennité dans le temps qui a influé sur le choix du matériau. Contrastant avec



7b

© C&E INGÉNIERIE DES STRUCTURES

les immeubles avoisinants tout aussi récents et subissant déjà la pollution du centre-ville, la clarté du Ductal[®] FO blanc donne toute sa personnalité à cette façade.

Pour les brise-soleil, la complexité résidait dans le fait que les architectes souhaitaient une qualité de finition parfaite sur toutes les faces, ce qui a rendu nécessaire un coulage vertical de ces éléments par le préfabricant Bearch.

Un système d'accrochage a été développé pour permettre un réglage 3D de ces éléments très élancés (4 m de long, 18 cm de large et 2,5/3,5 cm d'épaisseur) décalés de la coursière de nettoyage des surfaces vitrées.

C'est la résistance à la flexion qui a été tout aussi déterminante dans le choix de ce matériau pour l'aménagement de la terrasse abritant le carré VIP de la boîte de nuit de l'Hôtel Jardin des Roses

7- 7a : Aucune ligne de rigidité pour cette résille conçue pour l'Hôtel Jardin des Roses Sofitel à Rabat (Architecte Karim Chakor). 7b : Une résille en Ductal[®] inspirée d'un motif de zellige traditionnel.

7- 7a: No stiffness line for this lattice designed for the Jardin des Roses Sofitel Hotel in Rabat (architect Karim Chakor). 7b: A Ductal[®] lattice inspired by a traditional zellige pattern.

Sofitel à Rabat. Conçue par l'architecte Karim Chakor, cette nouvelle résille présente la particularité de n'avoir aucune ligne de rigidité (figures 7a et 7b).

FAIRE PROFITER TOUS LES BÂTIMENTS DES PERFORMANCES DES BFUP

Autant de conceptions très spécifiques qui ont pour point commun d'enrichir l'expérience acquise au fil des projets sur ces matériaux. D'approfondir aussi l'identification des attentes des architectes et des poseurs pour des solutions qui profiteraient des performances esthétiques et mécaniques des BFUP tout en affichant une économie de projet adaptée au plus grand nombre de bâtiments.

C'est dans cette perspective que, fort de sa R&D validée par de nombreuses réalisations iconiques sur mesure, Lafarge a lancé cette année une offre

8- Aéroport de Rabat-Salé Maroc (architecte Zhor Jaidi Bensouda - agence Klarte International). 1 600 m² de moucharabieh en façade, une résille en ductal® présentant un taux de vide de 70 %.

9- Gare de Casaport Maroc (architecte Agence Arep) : le choix du BFUP s'impose pour la durabilité et la pérennité. Résille au coefficient de vide de plus de 40 %.

8- Rabat-Salé Airport, Morocco (architect Zhor Jaidi Bensouda - Klarte International Agency). 1600 m² of mashrabiya on the facade, a Ductal® lattice having a 70% void fraction.

9- Casaport Station, Morocco (architect: Arep Agency): UHPFRC was the obvious choice for its durability and permanence. Lattice with a void factor of more than 40%.



© MÉDIATHÈQUE LAFARGE - ZHOR JAIDI BENSOUDA



© AREP - BEARCH - MÉDIATHÈQUE LAFARGE



© JACQUES RIPAUT ARCHITECTURE - MÉDIATHÈQUE LAFARGE

de parements ou de bardages en Ductal® destinée à répondre aux besoins façades des bureaux, logements collectifs (figure 10), centres commerciaux et bâtiments publics tant pour des constructions neuves que pour des rénovations d'un parc immobilier vieillissant. Une vraie révolution pour tous les créateurs à la recherche d'une alternative minérale aux solutions de parements traditionnelles avec en prime les atouts d'un béton fibré à ultra-hautes performances. □

10- Résidence étudiante de 65 logements (Jacques Ripault architecture). Les atouts du Ductal® pour répondre aux besoins façades des bureaux, logements collectifs, centres commerciaux et bâtiments publics en neuf comme en rénovation.

10- 65-unit student residence (Jacques Ripault Architecture). The key qualities of Ductal® to meet the facade needs of offices, condominiums, shopping malls and public buildings, for both new building and renovation projects.

ABSTRACT

UHPFRC ARCHITECTONIC APPLICATIONS: AN INFINITE RANGE OF SOLUTIONS

KELLY HENRY, LAFARGE DUCTAL® - ROMAIN DELPONT, LAFARGE DUCTAL® - ALEXANDRO GUITTON, LAFARGE DUCTAL®

Ductility, strength, refinement, void fraction, panel size, finish quality and variety, durability: *the properties of UHPFRC are arousing growing interest among designers, engineering offices and prefabricators. Reassured by the growing number of increasingly large projects, increasingly innovative construction techniques and increasingly diverse applications, clients no longer hesitate to follow designers who, from the United States to Morocco and from France to Middle East countries, are inventing a more sustainable architecture with UHPFRC. Canopies with an astonishing cantilever, double-skin lattices, flat roofs, sun screens, curved facings, but also cladding in UHPFRC demonstrate each day the potential of Ductal® for new buildings and for renovation, with offers adapted to the needs.* □

APLICACIONES ARQUITECTÓNICAS EN HMAR: UNA GAMA INFINITA DE SOLUCIONES

KELLY HENRY, LAFARGE DUCTAL® - ROMAIN DELPONT, LAFARGE DUCTAL® - ALEXANDRO GUITTON, LAFARGE DUCTAL®

Ductilidad, resistencia, finura, contenido de huecos, tamaño de los paneles, calidad y variedad de acabados, durabilidad, *las prestaciones de los HMAR suscitan un interés creciente entre los diseñadores, los gabinetes de estudio y los pre-fabricantes. Tranquilizados por la multiplicación de realizaciones cada vez más importantes, de modos constructivos cada vez más innovadores y de aplicaciones cada vez más diversas, los promotores ya no dudan en aceptar las propuestas de los diseñadores que, de Estados Unidos a Marruecos y de Francia a los países de Oriente Medio, inventan una arquitectura más sostenible utilizando HMAR. Sorprendentes marquesinas en voladizo, rejillas en doble piel, azoteas, cortasoles, paramentos curvados y revestimientos en HMAR demuestran a diario el potencial de Ductal® en las obras de nueva construcción y renovación, con ofertas adaptadas a las necesidades.* □



ÉLÉMENTS ARCHITECTONIQUES EN BSI®

AUTEURS : VINCENT EXPERT, RESPONSABLE DU DÉPARTEMENT BSI, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - SANDRINE CHANUT, CHARGÉE DE MISSION BÉTON, DIRECTION SCIENTIFIQUE & TECHNIQUE GÉNIE CIVIL, EIFFAGE INFRASTRUCTURES

LES PROPRIÉTÉS EXCEPTIONNELLES DES BÉTONS FIBRÉS À ULTRA HAUTES PERFORMANCES PERMETTENT D'ENVISAGER DIVERSES APPLICATIONS COMME, PAR EXEMPLE, LA CONFECTION D'ÉLÉMENTS ARCHITECTONIQUES FINS ET AJOURÉS QUI NE PEUVENT ÊTRE RÉALISÉS EN BÉTON TRADITIONNEL. L'EXTRÊME FINESSE DES BFUP, ASSOCIÉE À UNE RÉSISTANCE ÉLEVÉE, AUTORISE LA FABRICATION DE PIÈCES AUX DESSINS COMPLEXES TELS QUE LES RÉSILLES TOUT EN CONSERVANT UNE FAIBLE ÉPAISSEUR.

ÉCOLE DES ARTS DE CARCASSONNE

(Architecte : atelier J.Ripault et D.Duhart)

L'École des Arts de Carcassonne accueille près de 1 200 élèves qui se répartissent dans les espaces culturels dédiés à la musique, la danse, les arts plastiques, l'art dramatique (théâtre et cinéma), la photographie et l'image. Cette école d'art, située au sud-ouest de Carcassonne, fait pendant à la Cité et s'inscrit dans les méandres des voies d'entrée de ville. Le projet est rassemblé dans une conque par sa façade curviligne et infléchie, de couleur blanche, et entourée d'un théâtre extérieur.

Les éléments préfabriqués constituant la façade courbe, sont de couleur

blanche, avec un aspect matricé de type « bambou » (figure 1). Ce sont des pièces de largeur constante de 85 cm, et de hauteur variable pouvant aller jusqu'à 2,60 m. L'épaisseur de 35 mm, commune à tous les panneaux, a été validée par le calcul dans la partie pleine sans tenir compte de la matière rapportée par le matriçage. Ce sont ainsi près de 1 200 m² et 750 panneaux qui ont été mis en œuvre sur cette façade.

L'architecte a choisi un montage à lignes brisées avec un système de pianotage, nécessitant un calepinage précis des éléments et une exacte position des pièces de fixation. L'isolation thermique est complétée par un pare-pluie mis en œuvre avant la pose.

Le procédé de construction de ces panneaux préfabriqués est le même pour tous types d'éléments plats. Ceux-ci sont coulés en atelier dans des moules rigides constitués de matrices en polyuréthane fabriquées spécialement aux cotes désirées. La face coffrée reproduit, au démoulage, l'aspect du dessin voulu et la face non vue est talochée finement. L'incorporation de douilles pour le décoffrage et le levage se fait après coup, alors que le béton est encore frais. Les pièces restent en moyenne 48 à 72 h dans l'atelier avant d'être stockées dans des racks spéciaux sur l'aire prévue à cet effet, en vue du chargement pour leur livraison sur le site. Du fait des surfaces de panneaux limitées et compte tenu

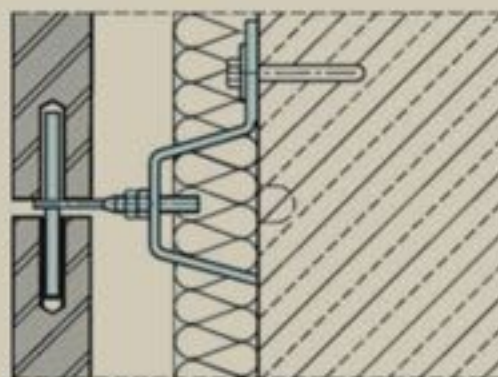
des faibles poids unitaires (inférieurs à 260 kg), l'utilisation d'un système de fixation standard a pu être adopté. Ce système, que l'on appelle « agrafage », est utilisé pour la fixation des pierres de façade. Le principe retenu (figure 2) est d'assembler deux panneaux successifs avec une seule paire de consoles de fixation. Cela permet, à la fois, de limiter le nombre d'attaches et de garantir un alignement continu entre deux éléments.

Ce principe nécessite, par contre, un tracé préalable sur la façade pour un bon positionnement en fonction du calepinage. Des réglages sur les consoles restent toutefois toujours possibles pour s'affranchir des aléas de perçement et de pose sur la paroi. ▷

PRINCIPE DE FIXATION

1- Éléments de façade matricés de type « bambou ».
2- Principe de fixation.

1- "Bamboo" type matrix facade elements.
2- Mounting principle.



© EIFFAGE

2



3

RECTORAT DE DIJON

(Architecte : Rudy Ricciotti)

Les cinq sites administratifs de l'académie de Dijon, dispersés jusque-là sur cinq lieux différents, sont maintenant regroupés en un même lieu, dans un immeuble de huit étages de plus de 11 000 m² qui reçoit près de 600 personnes.

Le bâtiment s'insère dans un contexte urbain archétype : une périphérie urbaine et un secteur tertiaire. C'est un Immeuble Grande Hauteur (IGH) qui exploite au maximum la hauteur du volume disponible.

Il est composé de façades en pierres agrafées, d'un blanc lumineux, avec de larges bandeaux vitrés qui viennent zébrer cette carapace minérale et permettent un champ de vision panoramique depuis l'intérieur des bureaux. La particularité des éléments de façade en BSI blanc (figure 3) est qu'ils sont tous différents du fait de la géométrie particulière voulue par l'architecte entre les parties vitrées, elles-mêmes biaisées.

Ce sont près de 1 100 panneaux d'une largeur unique de 2,60 m et de hauteur allant jusqu'à 5,20 m qui ont été

3- Panneaux de façade en BSI® blanc.

4- Modélisation 3D d'un panneau.

5- Essai de chargement.

3- Facade panels in white BSI®.

4- 3D model of a panel.

5- Loading test.

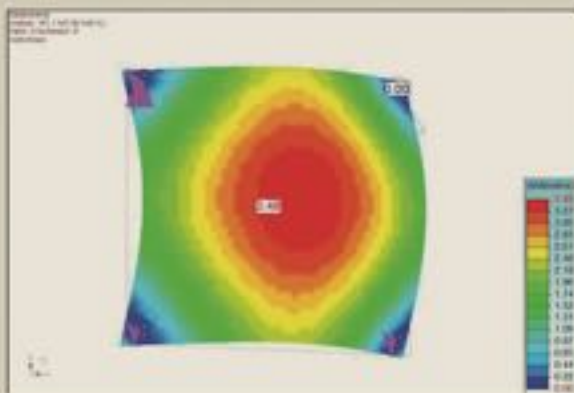
préfabriqués ; le tout totalisant près de 4 000 m².

L'épaisseur variait de 35 mm pour un panneau standard de dimension inférieure à 2,70 m jusqu'à 70 mm pour les plus grands panneaux.

Des panneaux courbes quart-de-rond sont venus compléter l'ensemble pour adoucir les angles extérieurs du bâtiment. Des études spécifiques ont été menées pour la justification de ce bardage en béton sur un immeuble de grande hauteur.

Les effets du vent en termes de pression, mais aussi en termes de dépres-

MODÉLISATION 3D D'UN PANNEAU



4



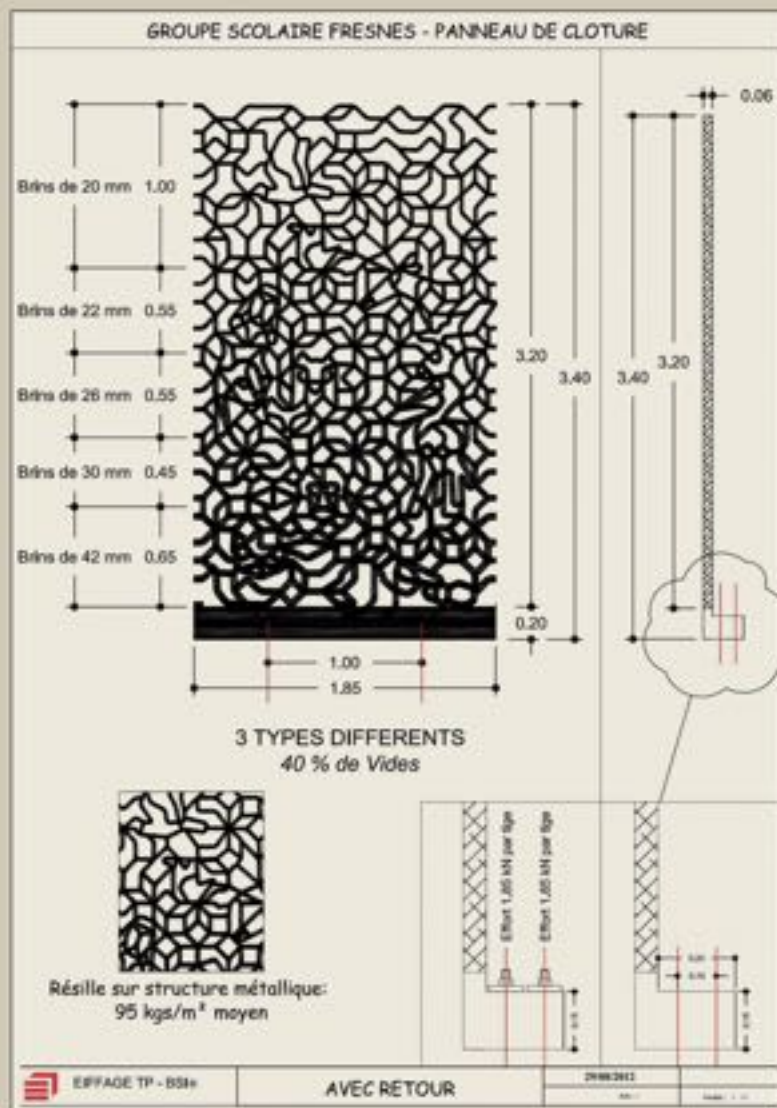
5



© EIFFAGE

6

DÉTAIL D'UN PANNEAU



6- Éléments de clôture en BSI® blanc.
 7- Détail d'un panneau.

6- Closing elements in white BSI®.
 7- Detail of a panel.

sion, ont été dimensionnants pour ces plaques minces.

Les panneaux ont été modélisés aux éléments finis à l'aide d'un modèle de calculs 3D (figure 4) dont les plaques sont constituées d'éléments finis surfaciques. Les appuis sont ponctuels, rigides et/ou élastiques et le comportement du matériau BFUP est supposé élastique linéaire.

Pour compléter et valider les calculs théoriques à l'aide de la modélisation 3D ainsi que les épaisseurs à prendre en compte, un essai de chargement statique réparti (par analogie au vent) a été réalisé sur une plaque en BSI, afin de déterminer son comportement sous l'effet du vent. L'essai a eu lieu dans le Laboratoire Structures du Département sécurité, structures et feu au Cstb de Marne-la-Vallée (figure 5).

Les pressions de vent normal prises en compte sont de 68 daN/m² pour la pression et de -50 daN/m² pour la dépression.

© EIFFAGE

7



8



9



10

© EIFFAGE

Dans un premier temps, l'application du chargement repart est réalisée à l'aide de sacs de ciment de 25 kg disposés uniformément sur la surface de la plaque pour appliquer la charge de 68 daN/m², soit 425 kg sur la surface de la plaque (S=6,24 m²). La charge est maintenue pendant 10 mn avant déchargement et les déplacements résiduels sont alors mesurés pendant 1 mn. La flèche mesurée est de 4 mm au centre de la plaque et un retour quasi au zéro est constaté après déchargement (0,5 mm).

Dans un second temps, pour atteindre le chargement à la ruine, une charge supplémentaire à celle des sacs de ciments est appliquée par l'intermédiaire d'un vérin hydraulique.

Le chargement à la ruine est ensuite réalisé par transmission d'effort du vérin, via un système de palonnier réalisé à l'aide de bastaings et qui permet la transmission de manière répartie sur les deux rangées de sacs de ciment. La charge de ruine mesurée est de 1086 daN, soit 174 daN/m², et donc

plus de 2,5 fois la charge normale. Le procédé de construction de ces panneaux préfabriqués est le même pour ceux de l'École des Arts de Carcassonne. Ceux-ci sont coulés en atelier dans des moules rigides métalliques de 2,60 m de large, avec réglages biais des arêtes de coulage pour les arêtes supérieures. La face coffrée est parfaitement lisse et plane et la face non vue est talochée finement. L'incorporation de douilles et de rails pour le décoffrage, le levage et la fixation définitive se fait ensuite, alors que le béton est encore frais.

Les pièces restent en moyenne 48 à 72 h dans l'atelier avant d'être stockées dans des racks spéciaux sur l'aire prévue à cet effet, en vue du chargement pour livraison.

Le système d'accroche sur la façade, du fait de charges très lourdes et hors normes par rapport aux pierres agrafées, a été, contrairement à Carcassonne, étudié et réalisé sur mesure. C'est un principe d'enclenchement par le dessus qui a été adopté. Deux points

8- Garde-corps du projet « La Mantilla ».
9- Bétonnage d'un élément préfabriqué.
10- Prototype pour test.

8- Parapet for the "La Mantilla" project.

9- Concreting a prefabricated element.

10- Test prototype.

de fixation posés dans la continuité. Les inserts incorporés dans les plaques (douilles ou rails) ont fait l'objet d'essais à l'arrachement et au cisaillement au Cstb, afin de valider la tenue de ces pièces aux efforts.

Tout type de fixation peut être associé à ces inserts, ce qui permet de mettre en place des panneaux dans des positions de sous-faces, comme cela a été localement le cas au Rectorat.

**ÉCOLE DE FRESNES
(Architecte : Chartier Dalix)**

Le projet réalisé est un groupe scolaire situé dans la ZAC de la Ceraisaie à Fresnes. Ce bâtiment de type R+2, de 3800 m² utiles environ, est composé de classes de maternelle, de classes élémentaires, d'un accueil de loisirs à R+1, et d'une salle de sport semi-enterrée.

Un élément de clôture sépare le groupe scolaire de l'espace public sur tout le périmètre de la parcelle. Ouvrage minutieux et enveloppant, constitué de BSI blanc à fibres synthétiques (figure 6),

de fixation en partie supérieure et deux points de retenue anti-soulèvement en partie inférieure ont été nécessaires. L'objectif principal est de ne pas brider le panneau et de le laisser travailler à la dilatation et aux efforts.

Le système a été conçu par l'entreprise de pose, qui l'associait aux élé-

il évoque une maille, à première vue aléatoire, dont les brins entremêlés cachent en réalité des centaines d'animaux.

C'est une longueur 300 m constituée de 134 panneaux qui entoure les quatre faces du terrain par un béton « qui fait dans la dentelle ».

Chaque panneau (figure 7) a 1,85 m de large et jusqu'à 3,20 m de haut.

Les pourcentages de vide se réduisent en allant vers le bas des panneaux pour donner plus d'inertie au porte-à-faux, les épaisseurs des brins ont été calculées en conséquence.

La complexité du dessin et l'enchevêtrement des brins nécessitait l'emploi d'un moule silicone, plus souple et donc plus facilement « démontable » qu'un moule polyuréthane plus rigide. L'utilisation de chaque moule était par contre plus réduite en nombre de réemplois du fait d'une plus grande fragilité.

La clôture ayant 3 types de dessins différents, 3 moules ont été nécessaires pour réaliser les 134 panneaux, soit 45 réemplois pour chacun.

LA MANTILLA À MONTPELLIER (Architecte : Jacques Ferrier / A+ Architecture)

La Mantilla doit son nom à la mantille blanche qui habille ses façades, signant l'image architecturale de cet ensemble immobilier qui compte 7 bâtiments organisés autour d'un îlot central, de 2 000 m² d'espaces verts, 32 000 m² de surfaces de plancher, 407 logements, près de 5 900 m² de commerces en rez-de-chaussée et un immeuble de 3 500 m², avec en-dessous, trois niveaux de parking.

Il y a, dans ce projet, la marque d'un geste architectural fort et résolument contemporain, grâce à une résille ajourée qui court le long des loggias et des balcons. La difficulté principale se trouve dans la réalisation de ces garde-corps fins et ouverts, à la fois esthétiques et structurels.

Le choix de l'architecte s'est porté sur 3 motifs différents ayant chacun 4 pourcentages de vide distincts (figure 8). Cela conduit à 12 dessins différents avec 12 types de moules en polyuréthane.

Compte tenu du nombre de panneaux et du planning d'exécution, 16 moules ont été nécessaires.

En tout, ce sont 1 150 panneaux totalisant près de 4 000 m de garde-corps qui ont été réalisés en BSI blanc avec fibres synthétiques (figure 9).

La difficulté de cette opération résidait dans le maintien de ces garde-corps dont les résilles faisaient 5 cm d'épaisseur.

Le principe adopté a été de venir fixer les poteaux BSI à l'arrière des panneaux. Ces poteaux étaient fixés après coup dans la mesure où les positions étaient différentes selon les motifs rencontrés.

La justification par le calcul, menée par le Bureau d'Études d'Eiffage Infrastructures, a conduit à la réalisation de poteaux 10x8 cm avec platine intégrée pour fixation sur le balcon.

Les efforts appliqués étaient de 60 daN/m à une hauteur standard de 1,10 m. Les poteaux étaient espacés tous les mètres.

La validation a été faite en usine (figure 10) avec un essai « au sac » (traduisant un choc d'au moins 700 J) pour s'assurer de la conformité de l'élément réalisé avec les calculs.

Les pressions de vent, tenant compte de la zone ainsi que des effets de site, de hauteur et de trainée sont de 125 daN/m².

Une validation des résilles sous cette contrainte a été faite sur le motif le plus ajouré, donc le plus faible, par chargement uniforme dans un laboratoire agréé.

Près de 9 mois de fabrication ont été nécessaires pour la réalisation et l'acheminement de la totalité des garde-corps à Montpellier.

CONCLUSION

Les réalisations présentées dans cet article sont de parfaits exemples montrant que ce type de produit BSI est idéalement adapté à tout projet que le béton traditionnel ne saurait satisfaire, à savoir donner une dimension miné-

rale à des éléments de grande taille et de faible épaisseur, avec divers motifs plus ou moins complexes, tout en pouvant jouer sur l'aspect du parement par l'utilisation de matrices, ainsi que sur la couleur par l'ajout de pigments minéraux dans la masse. □

FICHES D'IDENTITÉ

ÉCOLE DES ARTS DE CARCASSONNE

MAÎTRE D'OUVRAGE : Communauté d'Agglomération du Carcassonnais
MANDATAIRE DU MO : C.P. & O

ARCHITECTE : Atelier J. Ripault et D. Duhart

CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Cete Apave Sud Europe

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Eiffage Construction Roussillon

PARTENAIRE PRÉFABRICANT : Atelier Artistique du Béton - Aab

CHIFFRES CLÉS : 750 panneaux BSI – 1 190 m²

RECTORAT DE DIJON

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ministère de l'Éducation Nationale

CONDUITE D'OPÉRATION : DDT Côte d'Or

ARCHITECTE : Rudy Ricciotti

CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Qualiconsult

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Eiffage Construction Côte d'Or

PARTENAIRE PRÉFABRICANT : Atelier Artistique du Béton - Aab

CHIFFRES CLÉS : 1 090 panneaux BSI – 3 870 m²

ÉCOLE DE FRESNES

MAÎTRE D'OUVRAGE : Semaf / Valophis Habitat

ARCHITECTE ET MOE : Chartier Dalix Architectes

CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Batiplus

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Outarex

PARTENAIRE PRÉFABRICANT : Atelier Artistique du Béton - Aab

CHIFFRES CLÉS : 134 panneaux BSI – 700 m²

LA MANTILLA

MAÎTRE D'OUVRAGE : Bouygues Immobilier / Pragma / Sogeprom

ARCHITECTE ET MOE : Jacques Ferrier Architecte / A+ Architecture

CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Qualiconsult

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Fondeville

PARTENAIRE PRÉFABRICANT : Atelier Artistique du Béton - Aab

CHIFFRES CLÉS : 1 153 panneaux BSI – 5 808 m²

ABSTRACT

ARCHITECTONIC ELEMENTS IN BSI® (SPECIAL INDUSTRIAL CONCRETE)

VINCENT EXPERT, EIFFAGE - SANDRINE CHANUT, EIFFAGE

Several recent projects in the building sector have promoted the use of white synthetic-fibre BSI® (special industrial concrete) to clad facades with large thin elements and for the execution of thin openwork parts such as lattices or "mashrabiya". Due to an extremely dense microstructure, their cement matrix constitutes an environment practically impervious to air and the ingress of liquids, thereby contributing to a significant improvement in external waterproofing of the facades. □

ELEMENTOS ARQUITECTÓNICOS EN BSI®

VINCENT EXPERT, EIFFAGE - SANDRINE CHANUT, EIFFAGE

En el ámbito de la construcción, varias obras recientes han destacado el uso del BSI® blanco con fibras sintéticas para revestir las fachadas con elementos de gran tamaño y bajo espesor, así como para realizar piezas finas caladas de tipo rejillas o celosías. Gracias a su estructura extremadamente densa, su matriz de cemento constituye un medio casi impermeable al aire y a la penetración de líquidos, lo cual mejora significativamente la estanqueidad exterior de las fachadas. □



RÉHABILITATION : 45 MM DE BFUP POUR RENFORCER LE COMPORTEMENT STRUCTURAL DES VIADUCS DE CHILLON

AUTEURS : SÉBASTIEN BERNARDI, DIRECTEUR TECHNIQUE, LAFARGE DUCTAL® - DAMIEN JACOMO, RESPONSABLE PROJETS GÉNIE CIVIL, LAFARGE DUCTAL®

PRESQUE 50 ANS APRÈS SA MISE EN SERVICE, LE DOUBLE VIADUC DE CHILLON (SUISSE) VIENT DE BÉNÉFICIER D'UNE RÉNOVATION DE GRANDE AMPLEUR. OUTRE UNE MISE EN CONFORMITÉ AVEC LES NOUVELLES NORMES SISMIQUES, CE CHANTIER A EU POUR OBJECTIF DE RÉPARER LES EFFETS DES INFILTRATIONS D'EAU ET DE RENFORCER LE COMPORTEMENT STRUCTURAL GLOBAL SUITE À LA DÉTECTION DE RÉACTION ALCALI-GRANULATS (RAG) DANS LE BÉTON EXISTANT. UN NOUVEAU TABLIER EN DUCTAL® DE 45 MM D'ÉPAISSEUR APPORTE UNE RÉPONSE À L'ENSEMBLE DE CES ENJEUX.

Surplombant le lac Léman, les viaducs de Chillon comptent parmi les ouvrages d'art les plus spectaculaires du réseau autoroutier suisse depuis leur ouverture à la circulation en 1969 (figures 1 & 2). Un pont autoroutier qui a subi au cours des dernières années de sérieuses dégradations mécaniques dues notamment à une intensification du trafic d'environ 50 000 véhicules/jour avec des pointes pouvant atteindre 7 300 véhicules/heure.

En 2009, son inspection a démontré que de nombreuses infiltrations d'eau avaient pénétré le béton et corrodé les armatures. Par ailleurs, n'étant plus conforme aux normes antisismiques actuelles, l'ouvrage nécessitait une intervention de grande envergure qui impliquait le changement du système statique et des appuis de certaines piles. C'est dans cette perspective que la maîtrise d'ouvrage, l'Office fédéral des routes (Ofrou), a décidé la réhabilitation de l'ouvrage.

1- Un nouveau tablier en Ductal® de 45 mm d'épaisseur pour éviter un remplacement de l'ouvrage à moyen terme.

1- A new Ductal® deck 45 mm thick to avoid replacement of the structure in the medium term.

Au cours de tests effectués lors cette première série de travaux en 2012, le maître d'ouvrage constate une diminution de la résistance à l'arrachement du mortier de réparation. Des vérifications microscopiques indiquent qu'il s'agit d'une réaction alcali-granulats (RAG) en phase d'initiation.

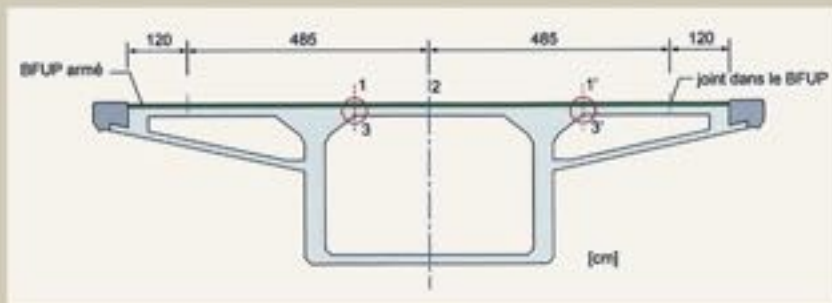
RÉNOVATION OU DÉMOLITION ?

Cette réaction observable en Suisse sur de nombreux ouvrages en béton climatiquement très exposés se traduit par

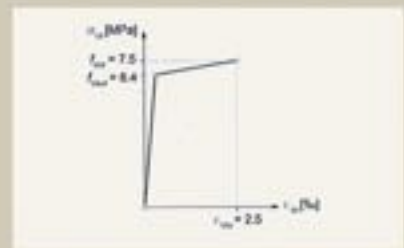


2

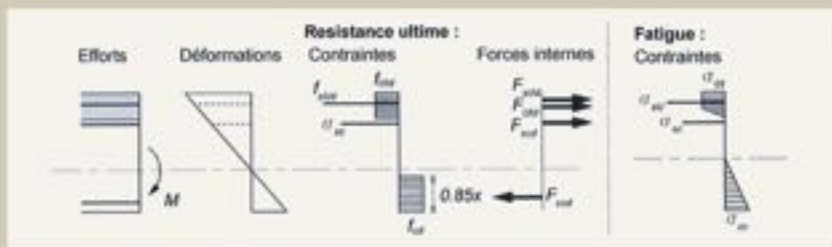
RÉSISTANCE DE LA DALLE RENFORCÉE AVEC DU BFUP ARMÉ



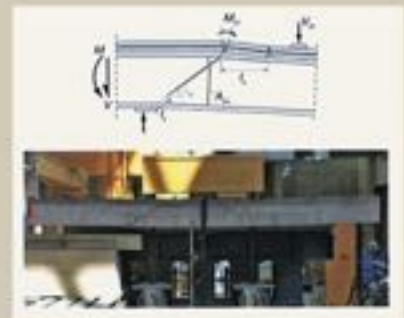
A Viaduc de Chillon avec la dalle de roulement renforcée au moyen du BFUP armé avec indication de la largeur des étapes de coulage du BFUP



B Loi de comportement à la traction du BFUP (valeurs de dimensionnement)



C Analyse de la section composée en flexion simple (BFUP sollicité en traction)



D Mode de rupture par effort tranchant d'un élément composé BFUP-béton

3

2- Un des ouvrages d'art les plus spectaculaires du réseau autoroutier suisse supportant un trafic de 50 000 véhicules/jour.

2- One of the most spectacular engineering structures on the Swiss motorway network carrying a traffic of 50,000 vehicles/day.

une réaction chimique entre certains granulats siliceux et les alcalins actifs dans la pâte de ciment, en présence d'humidité dans le béton. La RAG provoque une augmentation volumique

CONFRONTER EN PERMANENCE LA THÉORIE ET LA PRATIQUE POUR LEVER UNE A UNE LES CONTRAINTES

Les premières contraintes étaient liées aux volumes à appliquer dans un délai extrêmement court. En huit mois, Walo Bertschinger a su développer une machine qui puisse répondre à ces enjeux pour assurer une pose industrialisée. La résistance, l'adhérence du BFUP à son support, la précision de pose constituaient des contraintes de qualité. L'accompagnement de Lafarge a été précieux pour régler les exigences liées à la consistance et à la résistance du BFUP.

Enfin les exigences logistiques liées aux grandes quantités de matériaux à apporter sur le chantier ont été levées par le choix d'un transport en vrac. Tous les matériaux sont donc arrivés en composants séparés, ce qui n'est pas habituel.

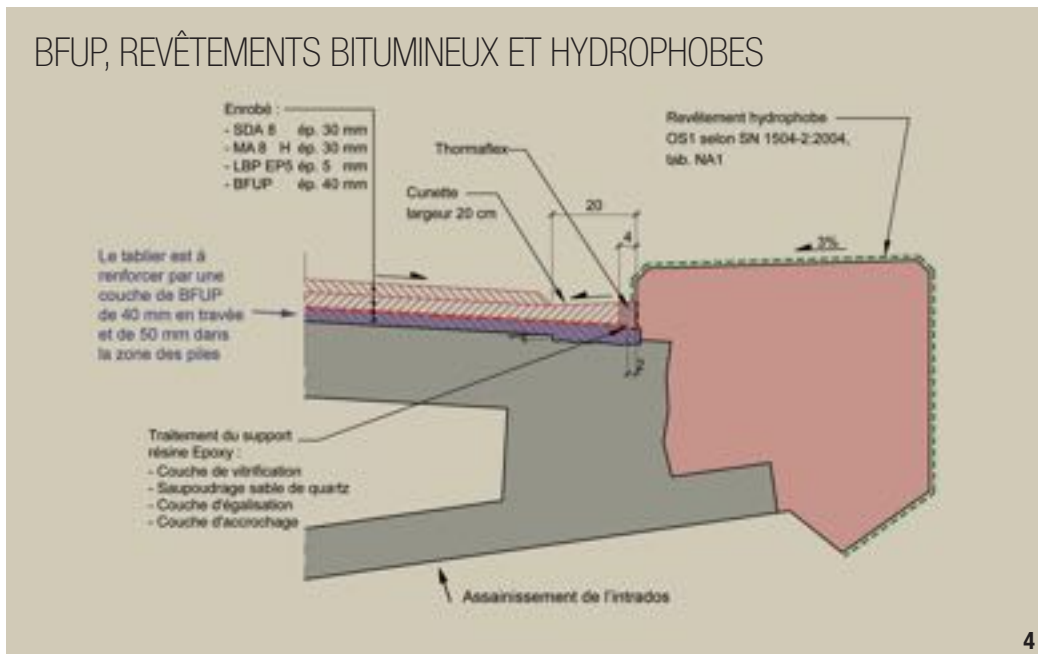
Une autre contrainte était liée au transport du BFUP. Il est en effet, difficile d'assurer la qualité d'un BFUP après une heure de transport, surtout en été avec des températures qui peuvent être élevées. Des essais de transport sur une heure ont d'ailleurs été réalisés avec des résultats peu concluants. De plus, l'entreprise devait se prémunir contre le risque de rupture de la chaîne logistique sur une autoroute très fréquentée. La centrale *in situ* est dès lors apparue à Walo Bertschinger comme la solution qui permettait d'optimiser la souplesse de gestion du chantier.

du béton pouvant engendrer, dans un premier temps, une perte de résistance à la traction puis des fissures réduisant considérablement les résistances mécaniques du béton.

Ce phénomène lent, qui n'apparaît que 20 à 40 ans après la construction de l'ouvrage, peut être accéléré en présence de facteurs aggravants tels que des taux d'humidité élevés, des variations thermiques et des sollicitations mécaniques trop importantes, des cycles gel/dégel ou encore la présence de sels de déverglaçage.

Après avoir diagnostiqué que la RAG était en phase d'initiation ou de transition dans presque tous les éléments de l'ouvrage avec un risque de développement accéléré des dégradations, les experts se sont prononcés pour des mesures de renforcement à court terme afin de bénéficier d'un support encore relativement sain. Ceci afin d'éviter un remplacement de l'ouvrage à moyen terme.

BFUP, REVÊTEMENTS BITUMINEUX ET HYDROPHOBES



Afin d'adoucir les effets néfastes de la RAG, il était impératif de supprimer toute possibilité d'apport d'eau dans le béton, de diminuer les contraintes dues au trafic par une augmentation de la résistance de la dalle à la flexion, à l'effort tranchant et à la fatigue ainsi que de limiter les flèches du tablier dans le sens longitudinal.

L'ÉTANCHÉITÉ EN QUESTION

Les recherches menées depuis 15 ans à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Epfl) sous la direction d'Eugen Brühwiler, directeur du laboratoire

de maintenance construction et sécurité des ouvrages, et mandaté par l'Ofrou en tant qu'expert sur le projet, ont permis de mettre en lumière l'important potentiel d'amélioration de la résistance à la flexion, à l'effort tranchant et à la fatigue d'une dalle en béton renforcée d'une couche de BFUP. Étanche, ce matériau se soustrait aux dommages traditionnellement subis par les bétons classiques : RAG, corrosion des armatures, gel...

Composé d'une grande quantité de micro-fibres d'acier à très haute limite élastique, ce matériau composite très

compact et très dense est totalement imperméable à l'eau et ne se fissure pas à l'état de service. Étant 6 fois plus résistant à la compression et environ 4 fois plus à la traction, le BFUP assure une résistance mécanique exceptionnelle par rapport à celle du béton classique. Des propriétés mécaniques qui permettent de gagner en poids et d'appliquer le BFUP en couche de faible épaisseur. Des essais réalisés à l'École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg (Heia-Fr) ont ainsi démontré une augmentation de la résistance ultime d'une dalle renforcée d'une couche

4- La surface de la dalle de roulement présente des pentes maximales pouvant atteindre 7%. Une contrainte qui requiert une ouvrabilité adaptée du BFUP afin d'éviter les écoulements et la disparité des épaisseurs imposées.

5- Des contraintes de délais imposées par un ouvrage d'art connaissant un trafic de 50 000 véhicules/jour.

4- The surface of the wearing slab has maximum slopes of up to 7%. This constraint requires suitable workability of the UHPFRC to prevent flow and disparity of the required thicknesses.

5- Completion time constraints required for a structure carrying a traffic of 50,000 vehicles/day.





© MONOD-PIGUET & ASSOCIÉS INGÉNIEURS CONSEILS SA

6

6- La pose de 2400 m³ de BFUP sur une surface d'une ampleur encore jamais atteinte a été rendue possible notamment par la conception par Walo Bertschinger d'une machine spécialement développée pour ce projet et permettant une cadence pouvant atteindre 80 m³/jour soit environ 1800 m²/jour.

6- The placing of 2,400 cu.m of UHPFRC on a surface area of a size never yet achieved was made possible in particular by Walo Bertschinger's design of a machine specially developed for this project, allowing a production rate of up to 80 cu.m/day, or about 1,800 sq.m/day.

BFUP de 50 % à 70 %, le maintien d'un comportement structural de l'élément renforcé et des modes de rupture ductiles lorsque la résistance ultime est atteinte. Une solution innovante qui a permis de réorienter le projet de réhabilitation des viaducs de Chillon (figure 3). Dans cette perspective, l'Ofrou épaulée

de l'expertise de l'Eplf, a validé les exigences à respecter par le BFUP sur la base d'un cahier des charges technique à la pointe du savoir dans ce domaine. Après avoir procédé à des essais sur site, des solutions proposées par plusieurs industriels dont Lafarge et des essais en laboratoire, l'Ofrou a validé

INDUSTRIALISER LA POSE : UNE MACHINE INÉDITE

La pose de 2 400 m³ de BFUP sur une surface d'une ampleur encore jamais atteinte a été rendue possible par la mécanisation des moyens mis en œuvre.

Créée à partir du châssis d'une finisseuse utilisée pour bétonner les dalles de l'aéroport de Zurich, la machine de pose conçue par Walo Bertschinger à cette occasion possède une poutre de pose de largeur modulable et elle est équipée d'une puissante rampe de vibrateurs. Le réglage du niveau de pose est asservi et la machine corrige en temps réel l'assiette de pose dans toutes les directions. Un répartiteur fonctionnant avec une vis sans fin dispose le BFUP devant la machine sur la largeur de la bande de pose qui, selon les besoins, varie de 120 à 600 cm. La répartition du BFUP est affinée par une sorte de balai, juste avant sa mise en place définitive à l'aide de la poutre de pose et de ses puissants vibrateurs. La cure, d'une durée de cinq jours, débute immédiatement après la mise en place du BFUP et consiste en l'application d'un film plastique. Afin de définir les cadences de bétonnage, la largeur de la pose a été adaptée à la capacité de production du BFUP. Cette machine, spécialement développée pour ce projet et mise en place en cinq semaines seulement, aura permis d'accéder à une cadence pouvant atteindre 80 m³/jour soit environ 1800 m²/jour.

la proposition de l'équipe Ductal® dont la formule répondait aux contraintes spécifiques du projet : résistance en traction, tenue à la pente et facilité de mise en œuvre.

UNE PREMIÈRE MONDIALE

Afin de développer pour les viaducs de Chillon un BFUP sur mesure, l'assurance qualité du matériau a été principalement basée sur les indications de l'annexe B du cahier Technique SIA 2052 (projet de consultation). Cette procédure de contrôle destinée au béton traditionnel a donc dû être adaptée aux spécificités du BFUP mis en œuvre à Chillon.

La formulation du Ductal®, appliquée en une seule fine couche de 45 mm en moyenne sur l'ensemble de la surface des tabliers, permet ainsi de renforcer la dalle de roulement à la flexion (longitudinale et transversale), à l'effort tranchant, au poinçonnement et la fatigue, renforçant de ce fait le comportement global de l'ouvrage (figure 4). Elle assure de plus un rôle d'étanchéité en empêchant l'apport d'eau dans le support contaminé par la RAG et a une influence positive sur l'évolution des déformations. L'utilisation de BFUP sur les viaducs de Chillon constitue une première mondiale tant par la surface à recouvrir que les volumes à fabriquer et à mettre en place dans un délai très restreint afin de réduire autant que possible l'impact sur le trafic (figure 5). Pour cette mise en œuvre de 2 400 m³ de BFUP sur une surface de 50 000 m² en deux phases de 1 200 m³ chacune (6 semaines en été 2014 - 5 semaines à l'été 2015), l'entreprise Walo Bertschinger a développé une machine de pose industrielle adaptée aux spécificités du BFUP et capable de répartir de façon homogène les 40 à 50 mm de BFUP sur la dalle de roulement (figure 6). Pour le renforcement des dalles du viaduc, le BFUP frais devait disposer d'une certaine fluidité tout en s'adaptant à la géométrie de l'ouvrage. En effet, à Chillon la surface de la dalle de roulement présente des pentes maximales pouvant atteindre 7 %. Une contrainte qui requiert une ouvrabilité adaptée du BFUP afin d'éviter les écoulements et la disparité des épaisseurs imposées. Des exigences contradictoires quant à la consistance du BFUP frais qui ont conduit Lafarge à développer une formulation de BFUP thixotrope dont l'adjuvantation a été étudiée pour tenir compte des températures ambiantes pouvant fortement varier en été.

Tout au long de cette réalisation, l'industriel a accompagné l'entreprise et le maître d'ouvrage pour valider sa solution, la mise en œuvre et le suivi qualité sur chantier. La formulation du Ductal® NaG3 FM Thixotrope se distingue par un taux de fibres renforcé afin d'obtenir un comportement écrouissant en traction et par une ouvrabilité adaptée qui permet de tenir sur des pentes jusqu'à 10%.

Bien que le BFUP assure l'étanchéité de la dalle, il a été décidé d'appliquer un bitume polymère PBD. Cette couche de 5 mm de PBD assure également l'adhérence de l'asphalte coulé MA-H au BFUP, une solution flottante risquant d'entraîner un cloquage. Une application qui permet en outre de réduire l'épaisseur du BFUP en assurant une protection des armatures dont l'enrobage théorique aurait été localement insuffisant.

**FABRICATION IN SITU :
SIMPLIFIER TOUS LES PROCESS**

Dans cette même logique de garantie de rendement, l'entreprise Walo Bertschinger a fait le choix d'installer sur le chantier une centrale dédiée au malaxage du Ductal® (figure 7). Seule une production in situ pouvait en effet répondre à de tels objectifs de rendement. Un choix qui a également permis d'apporter des solutions aux problèmes logistiques liés au transport et aux conditions météorologiques. Équipée de silos de stockage pour le sable et le Premix, d'un chargeur-doseur pour les fibres métalliques et de deux malaxeurs d'une capacité de 2,5 m³ chacun, la centrale a produit jusqu'à 80 m³/jour. Le transport du Ductal® de la centrale à la machine de pose est assuré par des dumpers de 1,2 m³.

7- Walo Bertschinger a fait le choix d'installer sur le chantier une centrale dédiée au malaxage du Ductal®. Seule une production in situ pouvait répondre aux objectifs de rendement du maître d'ouvrage.

7- Walo Bertschinger chose to set up on the construction site a plant devoted to Ductal® mixing. Only in-situ production could meet the client's output objectives.

L'assainissement des viaducs touche à sa fin avec une deuxième phase de travaux sur le viaduc côté montagne. Pour l'Ofrou, il s'agit d'un chantier pilote avec une solution qui pourrait être envisagée pour une série d'autres projets de réparation de ponts échelonnés jusqu'en 2025. Cette technologie innovante suscite également l'intérêt de nombreux pays confrontés à des problèmes de durabilité dans leurs ouvrages de génie civil. On compte déjà des projets en cours en France, Allemagne, Canada, Chine et Japon, où un pont-route d'une longueur de 120 mètres est actuellement réhabilité au moyen du BFUP. □



© MONOD-PIGUET & ASSOCIÉS INGÉNIEURS CONSEILS SA

REPÈRES

- Longueur 2,2 km
- Largeur 2 fois 12 m
- Surface de Ductal® coulé : 50 000 m²
- Une flèche de 20 mm au passage des camions
- Augmentation du trafic : + 10 % en 3 ans, transports autorisés passé de 28 t à 40 t
- Entreprise : Walo Bertschinger
- Maîtrise d'ouvrage : Ofrou
- Assistance à maîtrise d'ouvrage : Epfl et Monod - Piguet et associés ingénieurs conseils

ABSTRACT

RENOVATION: 45 MM OF UHPFRC TO ENHANCE THE STRUCTURAL BEHAVIOUR OF THE CHILLON VIADUCTS

SÉBASTIEN BERNARDI, LAFARGE DUCTAL® - DAMIEN JACOMO, LAFARGE DUCTAL®

After 10 years' research and development carried out jointly with the FHWA (Federal Highway Administration), there is experience feedback on the UHPFRC keying joint solution demonstrating its effectiveness for the renovation of all types of bridges, but also for new structure design. Based on examples developed on the North American continent, this article describes in detail the advantages of the solution, with regard to seismic stresses, extreme climate conditions, accessibility, construction site scheduling and project economics. This is an opportunity to consider how this technique could be adapted to the challenges of the French market in particular, for bridge maintenance. □

REHABILITACIÓN: 45 MM DE HMAR PARA REFORZAR EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOS VIADUCTOS DE CHILLON

SÉBASTIEN BERNARDI, LAFARGE DUCTAL® - DAMIEN JACOMO, LAFARGE DUCTAL®

Tras 10 años de investigación y desarrollo en colaboración con la FHWA (Federal Highway Administration), la solución de junta de anclaje en HMAR ha demostrado su eficacia en la renovación de todo tipo de puentes, así como en el diseño de nuevas construcciones. Sobre la base de ejemplos desarrollados en el continente norteamericano, este artículo detalla las ventajas de esta solución (conformidad con las restricciones sísmicas, de climatología extrema, de accesibilidad, de programación de obra, de economía de proyecto), al tiempo que brinda la ocasión de analizar cómo esta técnica puede adaptarse a los desafíos del mercado francés, en especial para el mantenimiento de las obras de fábrica. □

RÉPARATION DU PONT D'ILLZACH PAR LE PROCÉDÉ ORTHODALLE : SUIVI DE L'ÉVOLUTION DE L'OUVRAGE

AUTEURS : G. GÉNÉREUX, INGÉNIEUR D'ÉTUDES EN OUVRAGE D'ART, CEREMA/DTeclTM - D. CHAMPENOY, SPÉCIALISTE OUVRAGE D'ART, CEREMA/DTerEst - D. PRYBYLA, LABORATOIRE DE NANCY, CHEF DU GROUPE OUVRAGES D'ART, CEREMA/DTerEst - S. FYON, RESPONSABLE DU PATRIMOINE OUVRAGES D'ART, DÉPARTEMENT 68 - Z. HAJAR, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE & TECHNIQUE, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - D. BITAR, CHEF DE SERVICE ÉTUDES, CTCM

LE PONT D'ILLZACH COMPORTE UN TABLIER MÉTALLIQUE EN DALLE ORTHOTROPE QUI A ÉTÉ RÉPARÉ EN 2011 PAR LA MISE EN ŒUVRE D'UN REVÊTEMENT MINCE EN BFUP, SELON LE PROCÉDÉ INNOVANT « ORTHODALLE ». IL FAIT L'OBJET D'UN PROGRAMME DE SUIVI EXPÉRIMENTAL BASÉ SUR DES INSPECTIONS, DES ESSAIS DE CHARGEMENT AVEC MESURES DE DÉFORMATION, L'ÉTUDE DU VIEILLISSEMENT ET DES CALCULS COMPLÉMENTAIRES DE LA STRUCTURE RENFORCÉE.



© CEREMA - DTeclTM
1

INTRODUCTION

La réparation du pont de la RD201 sur le canal de Huningue à Illzach, ouvrage géré par le Conseil départemental du Haut-Rhin, a été l'occasion d'expérimenter le procédé Orthodalle sur ouvrage réel. Ce procédé, déclaré lauréat de la Charte Innovation Routière 2010, propose une technique innovante de renforcement de tablier de pont métallique en dalle orthotrope à l'aide d'un revêtement mince structural en béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) en

lieu et place du revêtement bitumineux. Un précédent article a été publié dans *Travaux* n° 888 - mai 2012 (Haasman B. - Fyon S. et al. "Réparation du pont de la RD 201 sur le canal de Huningue à Illzach").

L'ouvrage (figure 1) dont la mise en service date de 1970 se compose d'une travée isostatique constituée d'un tablier à poutres latérales de type Warren de 106 m de longueur encadrant un platelage de type orthotrope. Les dégradations constatées portaient

1- Le Pont d'Illzach.

1- Illzach Bridge.

essentiellement sur le platelage à la jonction auget/pièce de pont alors que les poutres porteuses principales étaient en bon état de conservation. De ce fait, la solution de réparation la

plus appropriée consiste à accroître fortement la rigidité du platelage supérieur en lui connectant une dalle mince en BFUP. L'inertie étant sensiblement accrue, les efforts de flexion longitudinale sont repris de façon non négligeable par la dalle en BFUP et les contraintes à la jonction auget/pièce de pont sont ainsi notablement réduites. Cette solution a été appliquée en combinant la préfabrication et le clavage en place des éléments préfabriqués (figure 2). ▷



2a



2b

© EIFFAGE

Le revêtement en BSI® est constitué de 66 dalles préfabriquées de dimensions 3,45 m x 2,70 m en plan et de 5 cm d'épaisseur, disposées longitudinalement sur 2 files.

La partie coulée en place est constituée de bandes longitudinales de clavage au nombre de 3 (une centrale de 30 cm et deux latérales de 20 cm de large), ainsi que des bandes transversales de clavage de 60 cm de large, axées sur les pièces de pont.

La dalle BFUP est connectée au platelage à l'aide de goujons soudés Nelson de très faibles dimensions ($\varnothing = 13$ mm, $h = 25$ mm) disposés dans les bandes de clavage et dans les poches des éléments préfabriqués.

Les travaux de réparation ont eu lieu sur une durée totale de 2 mois en juillet et août 2011 pendant une fermeture complète de l'ouvrage à la circulation. La mise en œuvre de ce nouveau

procédé est accompagnée, comme le prévoit la charte d'innovation routière du MEDDE, d'un programme d'expérimentation et de suivi, qui consiste à s'assurer du bon comportement dans le temps de l'ouvrage réparé, grâce aux suivis scientifiques et techniques assurés par les experts du Réseau Scientifique et Technique du MEDDE. Ce suivi se traduit par des inspections détaillées périodiques ciblées ainsi que par des relevés de mesures *in situ* lors d'essais de chargements notamment. Un comité de suivi constitué de représentants de l'entreprise Eiffage Infrastructures (ex-Eiffage TP), du CTICM, du Conseil départemental du Haut Rhin et de la DTerEst du Cerema (ex-CETE de l'Est), et piloté par la DTecITM du Cerema (ex-Setra), devra donner ses conclusions sur la validité du procédé au minimum après 5 ans de mise en service.

2- Travaux de réparation - Pose des dalles préfabriquées.

3- Instrumentation du platelage.

2- Repair work - Placing prefabricated slabs.

3- Decking instrumentation.

après travaux et une visite annuelle conjointe entre le Cerema et le Conseil Départemental du Haut-Rhin ont été réalisées. Le comportement de la couche de roulement fait également l'objet d'un suivi. Le protocole de suivi de l'ouvrage prévoyait deux grandes étapes : à la remise en service et cinq ans après.

Le programme de suivi est le suivant :

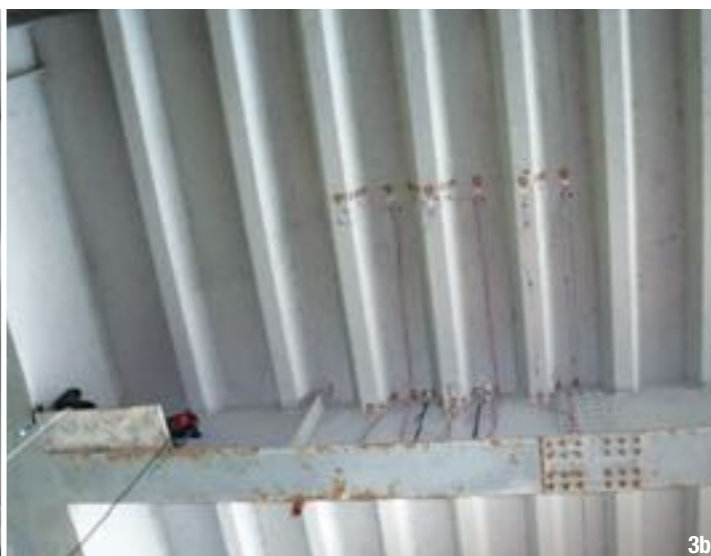
- Inspection détaillée de l'ouvrage ;
- Épreuves de chargement statique et dynamique ;
- Instrumentation d'une zone d'about de l'ouvrage ainsi que la zone de milieu de travée sur un ensemble de trois augets situés à l'aplomb d'une file de roues de poids lourd ;
- Instrumentation de la section de mi-travée des poutres porteuses avec des jauges extensométriques (en membrure supérieure et inférieure), ainsi qu'avec des sondes de température ;

SUIMI EXPÉRIMENTAL DE L'OUVRAGE

La solution proposée par Eiffage Infrastructures étant nouvelle et innovante, l'ouvrage d'Illzach fait l'objet d'un suivi bien particulier. Ainsi, depuis sa remise en service en 2011, une inspection détaillée, des épreuves de chargement



3a



3b

© CEREMA DTEREST

4- Exemple d'une courbe de contrainte relevée par une jauge.

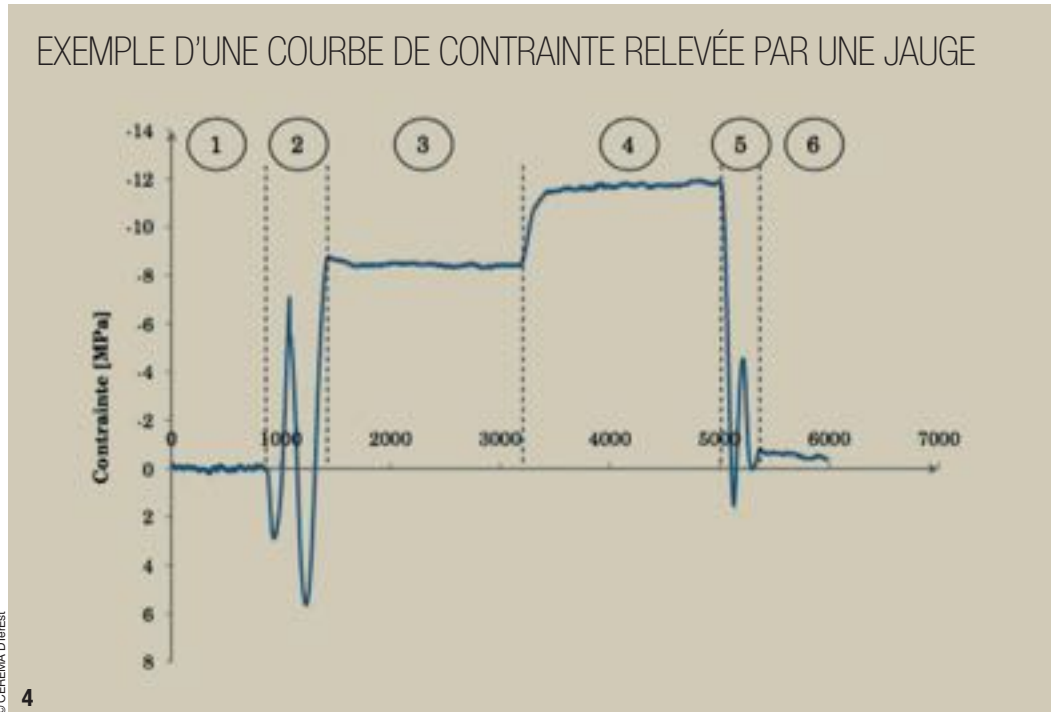
5- Réalisation des essais d'adhérence (NF P 98-282) et détermination de la profondeur de macrotexture (NF EN 13036-1).

6- Mesure d'adhérence au pendule SRT (norme NF EN 1436+A1, annexe « D »).

4- Example of a stress curve recorded by a gauge.

5- Performance of adhesion tests (NF P 98-282) and determination of the macrotexture depth (NF EN 13036-1).

6- Adhesion measurement by SRT pendulum (NF EN 1436+A1 standard, Appendix "D").



→ Instrumentation de la section de mi-travée de la pièce de pont située à mi-travée avec des jauges extensométriques (en membrure supérieure et inférieure), ainsi qu'avec des sondes de température ;

→ Instrumentation de l'about de l'ouvrage pour détecter d'éventuels glissements entre la dalle BFUP et le platelage ;

→ Relevé de la déformation globale de l'ouvrage (à mi-travée) et locale (à mi-travée de flexion de la pièce de pont située à mi-travée de l'ouvrage).

Au total, 72 jauges de déformations ont été collées en intrados de l'ouvrage et sur les poutres principales (figure 3). Les épreuves de chargement ont été conduites avant et après réparation afin

d'évaluer le comportement de l'ouvrage renforcé.

À mi-travée, le pont a été chargé par 6 camions tandis que 2 camions ont suffi pour l'étude des sections d'about.

Différentes configurations des camions d'épreuves ont été testées dans le but de produire les efforts extrêmes dans les sections instrumentées. ▶





7- Vue infrarouge mettant en évidence les zones des bandes de clavage).
8- Frise synthétisant les interventions sur le pont d'Illzach.

7- Infrared view highlighting keying strip areas.
8- Strip summarising work performed on Illzach Bridge.

7

D'un cas de charge à un autre les camions étaient décalés transversalement de 300 mm. Cette disposition a permis de solliciter chaque auget, la liaison entre augets/platelage et augets/pièces de pont dans le but d'analyser les charges sollicitantes vis à vis de la fatigue. Plusieurs plages de valeurs peuvent être visualisées sur la figure 4 :

- 1- Zéro : pont non chargé ;
- 2- Entrée des camions sur le pont : effets dynamiques ;
- 3- Pont chargé : charge à mi-travée ;
- 4- Pont chargé : charge sur la pièce de pont n°2 ;

5- Sortie des camions : effets dynamique ;
6- Remise à zéro : contraintes résiduelles (très faibles).

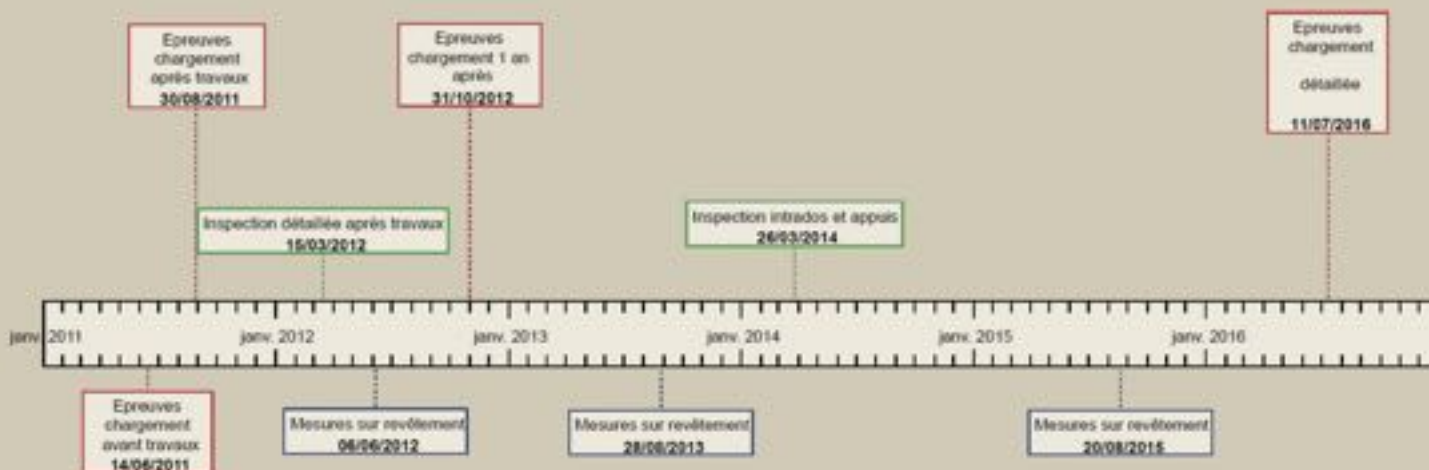
L'objectif est de vérifier la pérennité de la connexion entre les dalles BFUP et le platelage métallique, mais aussi d'analyser le fonctionnement mécanique réel de l'ouvrage par rapport au fonctionnement théorique mis en évidence à l'occasion des études d'exécution par les modèles de calcul aux éléments finis. Il s'agit également d'étudier le comportement mécanique avant et après

renforcement de manière à évaluer la durée de vie résiduelle de l'ouvrage réparé et d'étudier le comportement mécanique dégradé de l'ouvrage dans l'hypothèse de la rupture d'un auget. Les principales conclusions tirées des épreuves de chargement faites avant et après réparation du tablier sont :

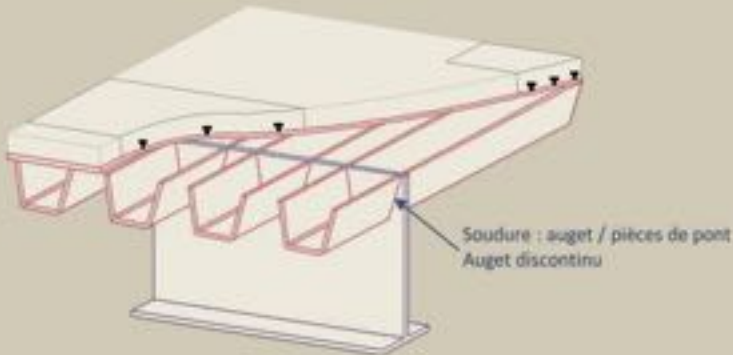
→ Le fonctionnement global de la structure sous charge statique n'est pas modifié. Les contraintes et les flèches des poutres principales sont sensiblement les mêmes avec une légère diminution de la flèche de l'ordre de 2% ;

→ La flexion longitudinale des pièces de pont est réduite : la connexion des dalles BFUP au droit des bandes de clavage est excellente ;
→ L'évaluation du fonctionnement local des augets est particulièrement difficile : les écarts de position des roues entre théorie et pratique, puis entre les deux épreuves de chargement induisent des différences de comportement local de la structure qu'il est très difficile d'appréhender. Ainsi, seules des tendances peuvent être déduites des mesures :

FRISE SYNTHÉTISANT LES INTERVENTIONS SUR LE PONT D'ILLZACH



LOCALISATION DES FISSURES AUGETS/PIÈCES DE PONT

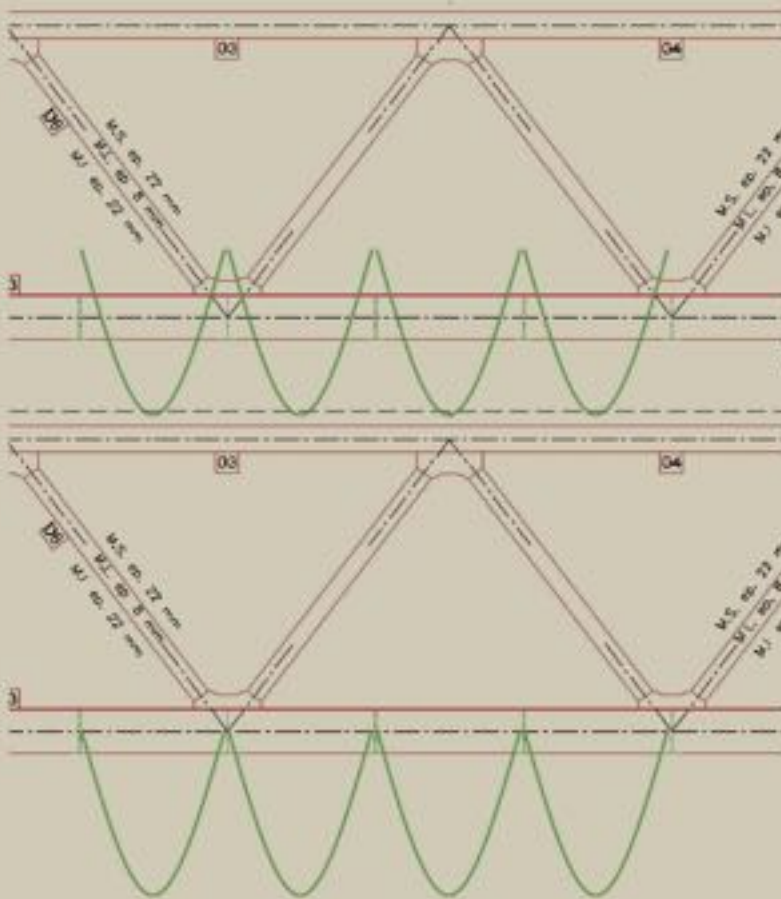


© CEREMA DTreEst

9a

9b

FONCTIONNEMENT DES AUGETS



Fonctionnement initial : augets continus

Flexion locale : reprise par les augets.
Moment positif entre pièces de ponts et négatif au droit des pièces de ponts (hyperstatique)

Fonctionnement actuel : augets isostatiques

Flexion locale : reprise par les augets et le BFUP.
Moment positif entre pièce de pont et nul au droit des pièces de ponts (hyperstatique)

© CEREMA DTreEst

10

- les dalles BFUP semblent mieux répartir les efforts vers les augets adjacents,
- l'axe neutre semble se situer dans le BFUP, ce qui confirme la bonne connexion du BFUP au platelage,
- les contraintes transitant dans les augets semblent diminuer de 30 %,
- les contraintes transitant dans le platelage semblent diminuer de 50 %.

9- Localisation des fissures augets / pièces de pont.

10- Fonctionnement des augets.

9- Location of U-shaped beams / bridge supports.

10- Functioning of U-shaped beams.

Le même protocole d'essais sera reconduit en 2016 afin d'évaluer le comportement de la réparation après cinq années d'exploitation.

La couche de roulement présente un enjeu important de sécurité. À ce jour, il y a peu de retour d'expérience de chaussée béton revêtue par un système de résine gravillonnée.

Ces systèmes sont très couramment mis en œuvre sur les trottoirs, mais le trafic et donc les sollicitations ne

sont absolument pas comparables. Ce complexe fait en outre office de chape d'étanchéité de l'ouvrage.

C'est la raison pour laquelle plusieurs essais ont été réalisés afin de caractériser le vieillissement de la couche de roulement.

Ces essais ont porté sur l'adhérence du complexe d'étanchéité selon la norme NF P 98-282 et la profondeur de macrotexture (PMT selon la norme NF EN 13036-1).

Des mesures de glissance au pendule SRT (norme NF EN 1436+A1, annexe « D ») ont également été menées mais à une fréquence moindre. Compte tenu de l'absence de seuil significatif d'un vieillissement de la chaussée pour la profondeur de macrotexture et l'adhérence au pendule SRT, des essais ont été menés sur les enrobés situés hors ouvrage à titre de comparaison.

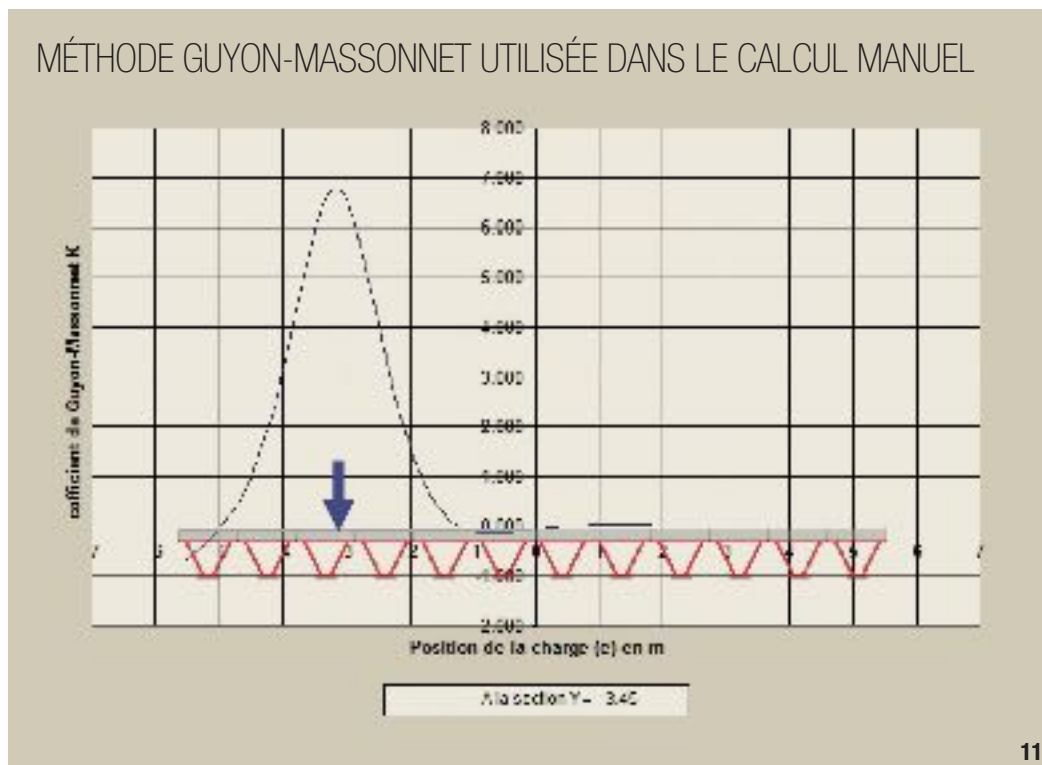
Une reconnaissance effectuée à la caméra infrarouge a précédé les essais d'adhérence, afin de localiser de manière précise la nature du support rencontré et notamment l'emplacement des zones de clavage. Des clichés infrarouge ont également été pris afin d'observer le comportement des bandes de clavage collées aux interfaces BSI préfabriqué/BSI coulé en place.

La synthèse des résultats obtenus est donnée dans le tableau 1.

Hors zone de clavage, les résultats obtenus sont très bons et l'adhérence reste stable depuis la réparation.

Par contre, sur les zones de clavage (figure 7), les résultats confirment les observations réalisées par thermographie infrarouge : les bandes se décolent sous l'action du trafic.

Ainsi, l'un des premiers retours d'expérience montre qu'il faut éviter de ponter avec des bandes les interfaces BSI préfabriqué/BSI coulé en place.



11

© CEREMA D'Ile-de-France

La frise (figure 8) synthétise le suivi dont fait l'objet l'ouvrage.

CALCUL EN MODE DEGRADÉ

Lors des réflexions préalables à la mise en œuvre du procédé Orthodalle sur le

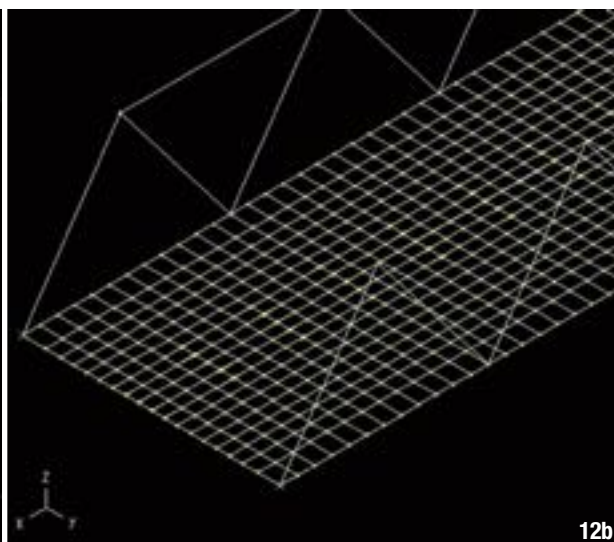
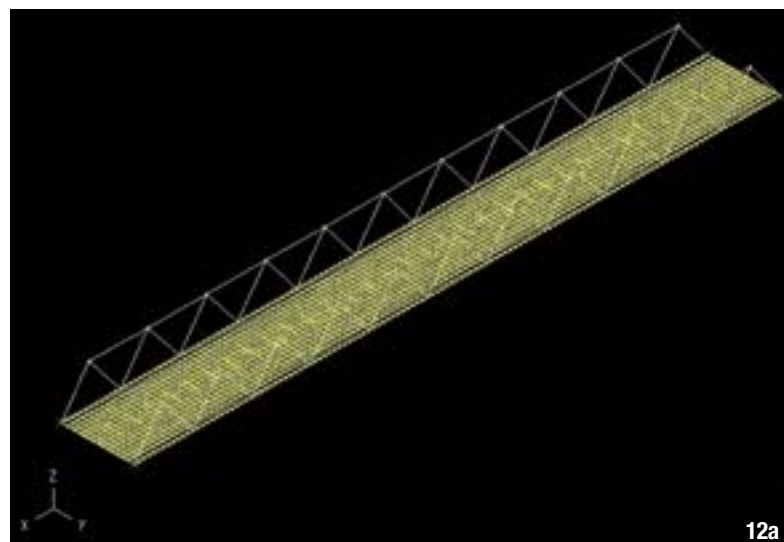
pont d'Illzach, la question de la réparation des fissures augets/pièces de pont existantes a été posée. Malheureusement pour des raisons financières, ce confortement sur les augets n'a pas pu être effectué en même temps.

11- Méthode Guyon-Massonnet utilisée dans le calcul manuel.
12- Modèle ST1 3D du pont d'Illzach.

11- Guyon-Massonnet method used in manual calculation.
12- ST1 3D model of Illzach Bridge.

TABLEAU 1 : SYNTHÈSE DES RÉSULTATS OBTENUS

Essais d'adhérence	Contrainte de traction moyenne (MPa) - 2015	Contrainte de traction moyenne (MPa) - 2013	Contrainte de traction moyenne (MPa) - 2012
Hors zone de clavage	3,9	3,65	3,2
Sur zone de clavage	Non réalisé	1,65	2,5



© CEREMA D'Ile-de-France

13- Exemples de contraintes données par le modèle ST1 3D.

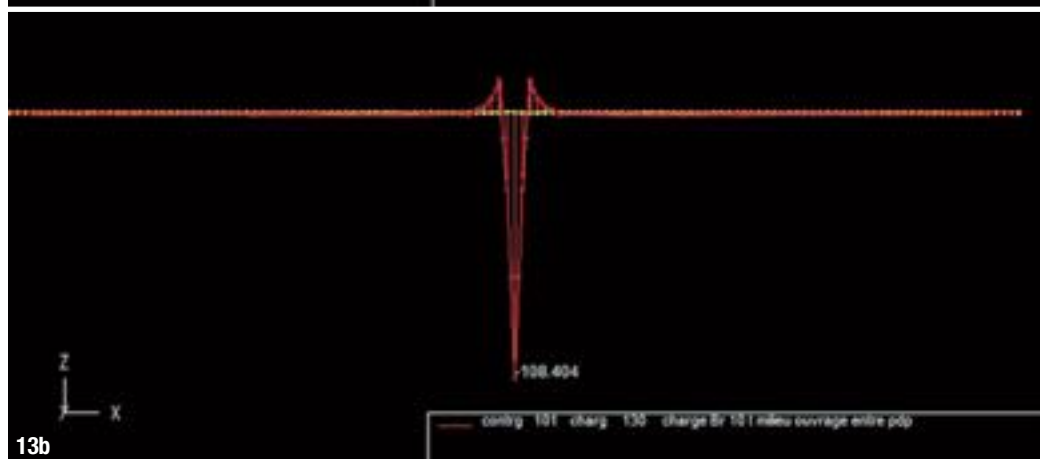
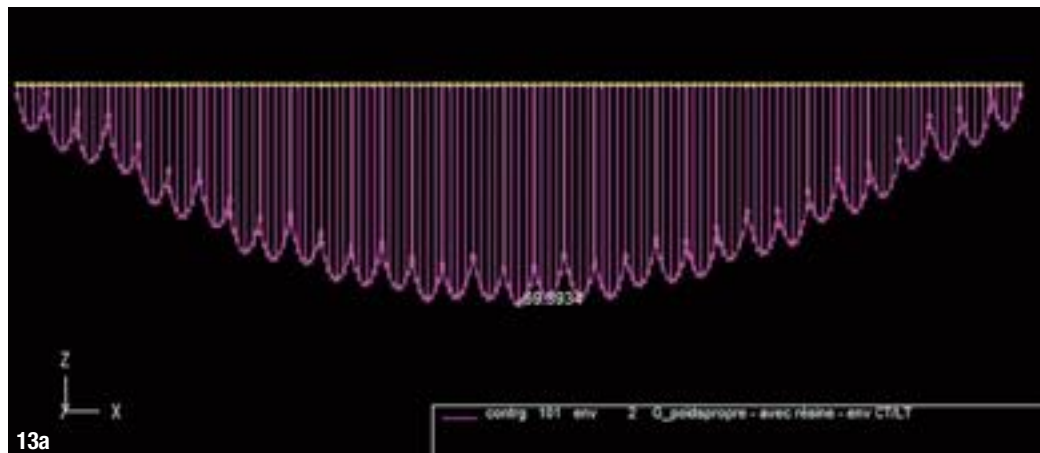
14- Répartition transversale donnée par le modèle ST1 3D.

13- Exemples of stresses given by the ST1 3D model.

14- Transverse distribution given by the ST1 3D model.

Afin d'évaluer l'effet de ce décalage dans le temps du confortement des liaisons augets/pièces de pont (les augets étant discontinus au droit des pièces de pont), le comité de suivi du pont d'Illzach a évalué le fonctionnement de l'ouvrage en mode dégradé, c'est-à-dire sans le confortement des soudures augets/pièces de pont. La présente partie décrit les justifications principales qui ont été effectuées sur le pont en mode dégradé, c'est-à-dire une justification de l'ouvrage à l'ELU et notamment en flexion locale (flexion d'un auget entre deux pièces de pont) et une justification du platelage en fatigue au niveau de la pièce de pont.

À noter que pour la flexion ELU, un double calcul a été effectué : un calcul « manuel » effectué par la DTerEst du



Cerema et un calcul utilisant un modèle ST1 3D effectué par la DTecITM du Cerema (le modèle ST1 3D ayant été construit lors des études d'exécution de la réparation en 2011).

La note de calcul d'origine des augets considère des augets continus sim-

plement appuyés sur chaque pièce de pont (système hyperstatique).

La rupture des soudures augets/pièces de pont supprime cette hyperstaticité et chaque auget fonctionne isostatiquement entre les pièces de pont. Le règlement de charges utilisé est

celui de l'époque de la construction, c'est-à-dire le fascicule 61 titre II de 1971, les forces ponctuelles comme les surcharges nécessitent de connaître la proportion de la charge reprise par l'auget le plus sollicité et par ses voisins. Pour ce faire, la méthode de Guyon-Massonnet a été utilisée dans le calcul manuel. L'auget étudié est celui qui est le plus sollicité par le trafic, c'est-à-dire celui qui est le plus proche du trottoir. Le modèle ST1 3D utilisé par la DTecITM du Cerema est illustré par la figure 12.

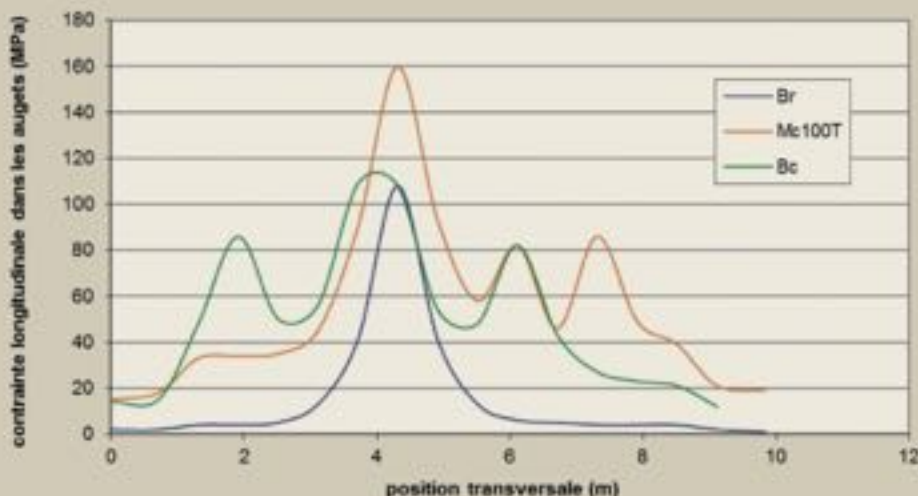
Il faut noter que le modèle a été décliné selon plusieurs fonctionnements : état initial (sans BFUP), état renforcé (avec BFUP) avec un fonctionnement hyperstatique des augets, état renforcé (avec BFUP) avec un fonctionnement isostatique des augets.

Des exemples de résultats donnés par le modèle ST1 3D sont donnés sur la figure 13.

Le modèle ST1 3D a également permis de déterminer une répartition transversale des contraintes entre les augets (figure 14), et de comparer cette dernière avec les résultats de la méthode Guyon-Massonnet.

En ce qui concerne la justification de la liaison auget/pièce de pont en fatigue, ▷

RÉPARTITION TRANSVERSALE DES CONTRAINTES ENTRE LES 17 AUGETS DU MODÈLE ST1 3D



le principal risque pour ce type de disposition constructive (auget discontinu au droit des pièces de pont) est de voir remonter la fissure auget/pièce de pont dans la tôle de platelage et d'avoir une ruine locale du tablier, dangereuse pour les usagers du pont.

La présence du BFUP permet d'éviter la création de trous sur la chaussée comme celui montré sur la figure 15 et donc d'éviter un danger important pour les usagers du pont.

La fissuration auget/platelage a été traitée dans les documents d'exécution et étudiée dans le groupe de travail Orthoplus.

Ainsi une durée de vie de 20 ans suivant l'Eurocode est assurée. On s'intéresse ici au risque de fissuration de la tôle de platelage au droit de la pièce de pont.

Pour estimer la durée de vie résiduelle en fatigue sans confortement de la liaison auget/pièce de pont (détail de classe 80), nous avons :

→ Mesuré le nombre et la masse des poids lourds (PL) circulant sur l'ouvrage ;

→ Réalisé une modélisation aux éléments finis de la zone pièce de pont/auget pour évaluer finement les contraintes en prenant en compte notamment une connexion partielle et une plastification possible du BFUP (étude basée sur le convoi FLM3 des Eurocodes).

Pour compter et peser les PL sur l'ouvrage, une station SATL (Surveillance Automatique du Trafic Lourd) a été installée pendant 2 mois par la Division Métrologie de la DTerEst de Cerema. Les résultats sont synthétisés sur la figure 16.



15

© CEREMA DTerEst

Ce trafic correspond à un nombre de PL observé de 330 000 par an avec une masse moyenne en puissance 5 de :

$$Q_{5m} = \sqrt[5]{\frac{\sum n_i Q_i^5}{\sum n_i}} = 20,2 \text{ t.}$$

Il y a lieu de pondérer cette masse par 1,1 pour prendre en compte la marge d'erreur de la station STATL. Ce trafic est faible en nombre ainsi qu'en intensité. Au sens de l'Eurocode 3, le coefficient de trafic λ_2 est alors égal à :

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m5}}{48 \text{ tonnes}} \sqrt[5]{\frac{N_{obs}}{500000}} = 0,42.$$

Trois augets ont ensuite été modélisés à l'aide d'éléments plaques et en utilisant les symétries de l'ouvrage.

15- Exemple de fissure du platelage au droit d'une pièce de pont.

16- Résultat du comptage et pesage des PL sur le pont d'Ilzsch.

15- Example of decking crack at the level of a support.

16- Result of HGV metering and weighing on Ilzsch Bridge.

Le cas de charge étudié est celui donnant le plus de courbure sur la tôle de platelage au droit de la pièce de pont, c'est-à-dire lorsque les essieux du PL se situent de part et d'autre de la pièce de pont.

La connexion locale est modélisée par des petites poutres dont l'inertie est calculée pour obtenir la raideur de la connexion. Le contact des zones non connectées est assuré par des barres bi-articulées entre la plaque BFUP et la plaque acier. Ce modèle permet d'évaluer l'étendue de contrainte dans la tôle de platelage au droit de la pièce de pont.

Les conclusions des différents calculs en mode dégradé sont les suivantes :

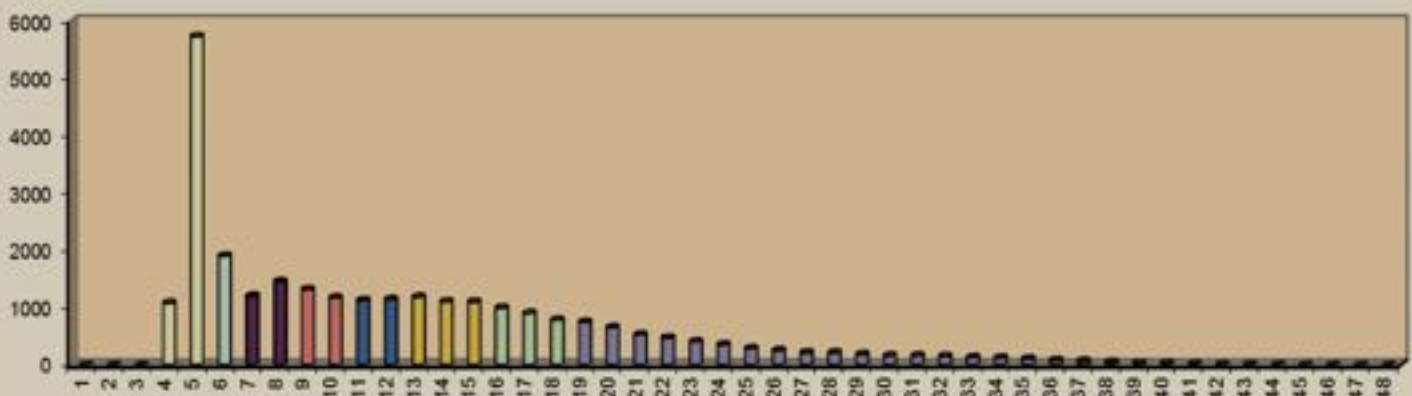
→ Flexion générale : on note des dépassements de contraintes de l'ordre de 10 % sur une méthode manuelle élastique analogue à celle utilisée à l'époque de la construction. Cependant, un modèle à barres plus complexe en 3D a permis de voir que la répartition transversale était meilleure. Les dépassements de contraintes subsistent (7 %) mais sont justifiés par un calcul plastique.

→ Situation accidentelle : le calcul en flexion dans le cas où un auget se serait dessoudé sur toute sa longueur a été fait. L'ouvrage est justifié en flexion en considérant la plastification des matériaux.

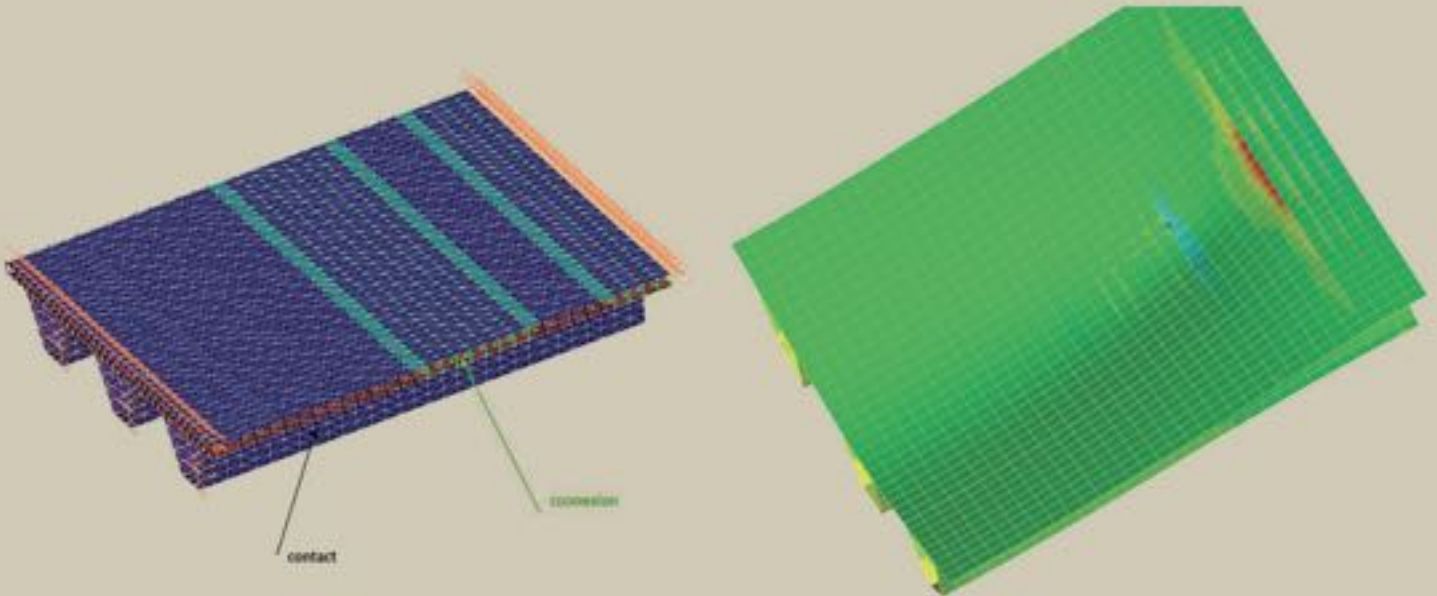
→ Vérification locale du platelage avec auget dessoudé : le platelage est justifié sous LM1. Le BFUP plastifie mais reste dans les limites admissibles ainsi que les contraintes dans le platelage.

→ Fatigue du platelage : la durée de vie résiduelle ($\gamma_{M1} = 1$ avant le BFUP

DÉBITS PAR CLASSE DE POIDS SUR LE POND D'ILLZSCH



MODÈLE ÉLÉMENTS FINIS UTILISÉ POUR LE CALCUL À LA FATIGUE ET EXEMPLE DE RÉSULTAT



17

© CEREMA DTerEst

et 1,35 après) et avec trafic réel de la liaison platelage/pièces de pont est de 23 ans.

- Le trafic est nettement plus faible que celui du viaduc de Richemont ($Q_{5m} = 32$ tonnes) (portant l'A31), qui a subi une rupture locale du platelage par fatigue.
- L'étude et le confortement de l'assemblage auget/pièce de pont pourra être décalé dans un avenir proche (par exemple pour la remise en peinture du tablier).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Suite à la réparation de l'ouvrage par le procédé Orthodalle effectuée en 2011, un suivi complet et régulier de

l'ouvrage a été fait, qui s'est traduit par des relevés visuels, des essais et des calculs ayant pour but de contrôler le comportement de l'ouvrage.

17- Modèle éléments finis utilisé pour le calcul à la fatigue et exemple de résultat.

17- Finite element model used for fatigue design and example of the result.

À ce jour, nous pouvons constater un bon comportement dans le temps de l'ouvrage réparé.

Les mesures effectuées ont montré que les contraintes dans le platelage ont été sensiblement diminuées, le revêtement en BFUP semble jouer pleinement son rôle.

En outre, le relevé visuel de l'intrados réalisé en mars 2014 ne montre pas l'apparition de nouvelles fissures, ni l'évolution des fissures existantes.

Les calculs de l'ouvrage en mode dégradé ont également montré que, même sans reboucher les fissures, l'ouvrage a un comportement et une durée de vie jugés satisfaisants.

Il est d'ores et déjà possible de tirer quelques enseignements sur des points

plus mineurs de la réparation, comme le fait que l'utilisation de bandes de pontage n'est finalement pas la solution idéale vis-à-vis de l'adhérence entre le BFUP et le revêtement résineux. L'année 2016 sera une année particulièrement intéressante pour l'ouvrage, car une nouvelle campagne de mesures est programmée : nouvelle inspection détaillée mettant l'accent sur le relevé de fissures de l'intrados, essais de chargement statique et dynamique avec mesures des contraintes et mesures sur le revêtement.

À la fin de l'année 2016, le comité de suivi de l'ouvrage devrait ainsi être en mesure de se prononcer sur l'efficacité du procédé Orthodalle. □

ABSTRACT

REPAIR OF ILLZACH BRIDGE BY THE ORTHODALLE PROCESS: MONITORING OF THE BRIDGE'S EVOLUTION

G. GÉNÉREUX, CEREMA/DTedTM - D. CHAMPENOY, CEREMA/DTerEst - D. PRYBYLA, CEREMA/DTerEst - S. FYON - Z. HAJAR, EIFFAGE - D. BITAR, CTCIM

Illzach Bridge has an orthotropic-slab steel deck which was repaired in 2011 by applying a thin UHPFRC coating, using the innovative "Orthodalle" process. It is the subject of an experimental programme comprising several parts: detailed inspections, deformation measurements during loading tests, investigations regarding coating ageing, analyses and additional calculations for the reinforced structure. The article outlines the main results and lessons learned, and indicates the prospective evolution of the bridge in the coming years. □

REPARACIÓN DEL PUENTE DE ILLZACH UTILIZANDO LOSA ORTOTRÓPICA: SEGUIMIENTO DE LA EVOLUCIÓN DE LA OBRA

G. GÉNÉREUX, CEREMA/DTedTM - D. CHAMPENOY, CEREMA/DTerEst - D. PRYBYLA, CEREMA/DTerEst - S. FYON - Z. HAJAR, EIFFAGE - D. BITAR, CTCIM

El puente de Illzach cuenta con un tablero metálico en losa ortotrópica que fue reparado en 2011 mediante la aplicación de un revestimiento fino de HMAR, utilizando el innovador procedimiento de la losa ortotrópica. Ha sido objeto de un programa experimental dividido en varios capítulos: inspecciones detalladas, medición de las deformaciones durante las pruebas de carga, estudios del envejecimiento del revestimiento, análisis y cálculos complementarios de la estructura reforzada. El artículo expone los principales resultados y lecciones extraídas, e indica las perspectivas de evolución de la obra durante los próximos años. □



1

© BORIS COUSIN, FREYSSINET

HAMMERSMITH FLYOVER : CHIRURGIE À CŒUR OUVERT

AUTEUR : BORIS COUSIN, DIRECTEUR DE TRAVAUX, FREYSSINET

À LONDRES, LE PONT-ROUTE DE HAMMERSMITH EST UN LIEN VITAL ENTRE L'OUEST ET LE CENTRE, SURVOLANT HUIT ROUTES ET QUATRE VOIES FERRÉES. OUVRAGE EN BÉTON PRÉFABRIQUÉ ACHEVÉ EN 1961 ET LONG DE 630 M, IL A ÉTÉ MIS EN PÉRIL EN 2011 PAR LA CORROSION DE SES ARMATURES DE PRÉCONTRAINTE. DEUX PHASES DE TRAVAUX ONT PERMIS DE SUPPLANTER LA PRÉCONTRAINTE D'ORIGINE, SANS INTERROMPRE LA CIRCULATION, À LA MANIÈRE D'UNE FORMIDABLE OPÉRATION DE CHIRURGIE. LE DÉFI A ÉTÉ RELEVÉ GRÂCE À DE SOLIDES INNOVATIONS ET UNE COOPÉRATION INTENSE DES NOMBREUX ACTEURS IMPLIQUÉS. RETOUR SUR DEUX ANS DE TRAVAUX AMBITIEUX ET COMPLEXES.

Zone de toute première importance à l'échelle mondiale, l'agglomération londonienne dépend étroitement de la qualité de son réseau de transport, tant pour assurer la qualité de vie de ses habitants que pour servir son activité économique. Le pont-route de Hammersmith est une pièce essentielle du dispositif de circulation car il permet à l'A4, en provenance de l'ouest et de l'aéroport d'Heathrow, de pénétrer vers le centre en évitant le giratoire de Ham-

mersmith, soit pas moins de huit routes et quatre voies ferrées. L'expérience a montré, en 2011, que sa fermeture peut mener à un chaos routier qui se répercute à des dizaines de kilomètres à la ronde.

DES DÉSORDRES STRUCTURELS SÉVÈRES UNE CONSTRUCTION INNOVANTE

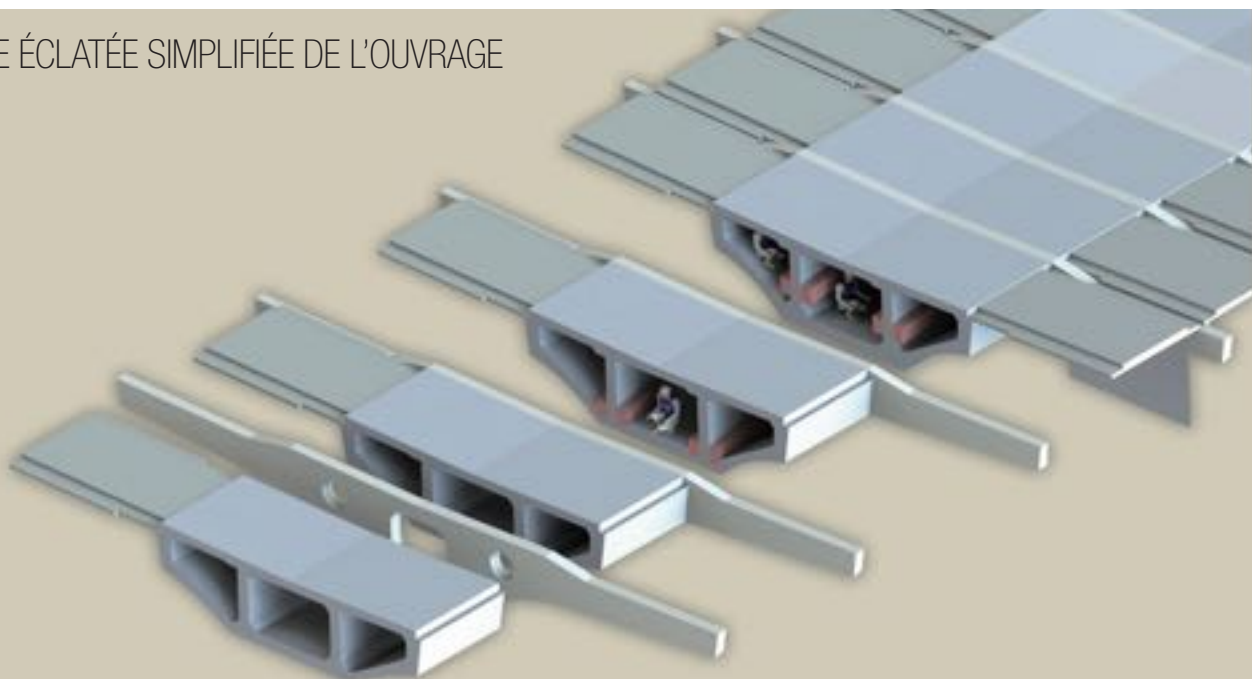
En 1961, à son achèvement, le pont-route de Hammersmith (« Hammersmith Flyover » ou « HFO ») est une

1- Mise en tension d'une paire de câbles de continuité.

1- Tensioning a pair of continuity cables.

structure innovante. Construit en béton préfabriqué et post-contraint, il est à la pointe des technologies de l'époque. Un système de chauffage intégré à la chaussée doit assurer un déneigement efficace et sûr. Cependant certains détails technologiques se révéleront discutables : les ancrages des câbles se trouvent immédiatement sous la chaussée et les câbles sont simplement noyés après tension dans des boîtes en mortier coulées en place. Le coût de fonctionnement faramineux du système

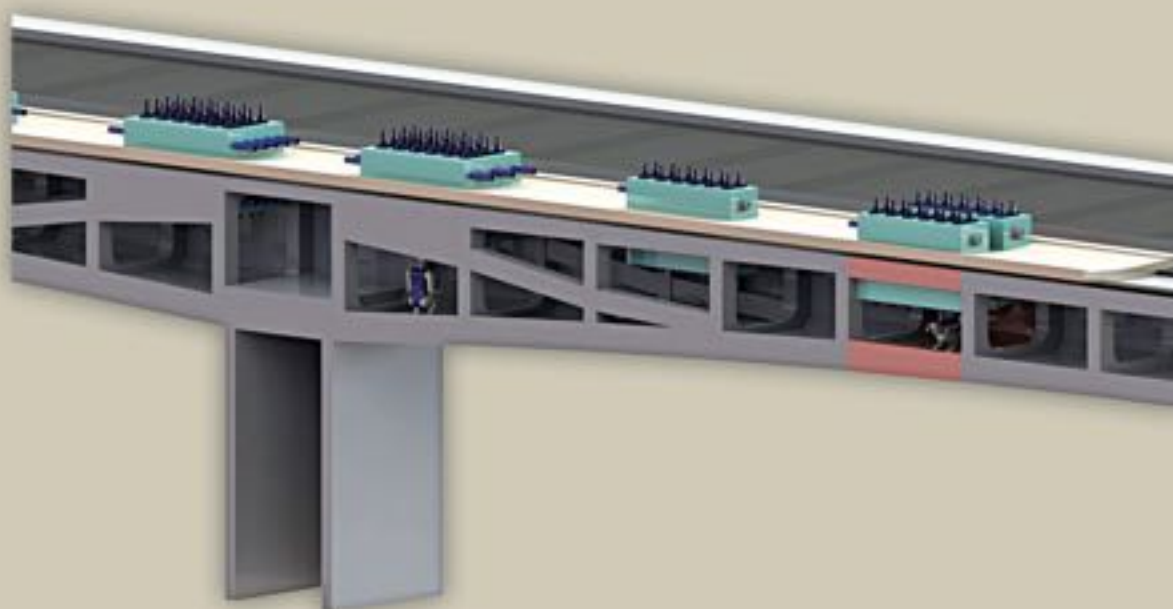
VUE ÉCLATÉE SIMPLIFIÉE DE L'OUVRAGE



© BORIS COUSIN, FREYSSINET

2

VUE SYNTHÉTIQUE DES TRAVAUX DE 2012 - PHASE 1



© BORIS COUSIN, FREYSSINET

3

de chauffage provoque son arrêt dès 1963, marquant le retour aux pratiques habituelles de salage en cas de gel.

DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

La figure 2 illustre les caractéristiques structurelles principales de l'ouvrage. Un caisson à quatre âmes, de hauteur faiblement variable, constitue la colonne vertébrale du pont. La chaussée est portée par des consoles intercalées entre les voussoirs reliées entre elles par des dalles préfabriquées. Les 16 travées

2- Vue éclatée simplifiée de l'ouvrage.

3- Vue synthétique des travaux de 2012 - Phase 1.

2- Simplified exploded view of the structure.

3- Overall view of the 2012 works - Phase 1.

mesurent en moyenne 40 m, pour une longueur totale de 630 m. Les voussoirs sont longs de 10 ft (3 m) et un joint de mortier épais (3", 75 mm) est coulé en place pour compenser les imperfections géométriques - le procédé des voussoirs conjugués n'était pas connu à l'époque. Le pont est constitué de deux sections droites (250 et 380 m), encastées en culée et reliées par un joint de dilatation. Les voussoirs sur pile sont encastés sur celles-ci et, en conséquence, les piles reposent sur

des appareils d'appui à rouleaux, situés 1,5 m sous le niveau du sol.

IDENTIFICATION DU PROBLÈME

Les infiltrations d'eau à travers un système de câbles à l'étanchéité insuffisante ont provoqué une importante corrosion des armatures de précontrainte. La perte d'une proportion importante de la précontrainte aurait conduit à la chute d'un ou plusieurs voussoirs - uniquement tenus par frottement - et à la ruine probable de l'ouvrage. ▷



© BORIS COUSIN, FREYSSINET

En 1999, l'ouvrage passe sous l'autorité de Transport for London, autorité organisatrice des transports londoniens, et des examens plus poussés démontrent la réalité de cette corrosion. À partir de 2006, un dispositif de surveillance acoustique permet de quantifier les ruptures de fils et donc d'évaluer plus précisément la vitesse de dégradation de la précontrainte.

En décembre 2011, six mois avant les Jeux Olympiques, alors que des solutions de renforcement sont déjà à l'étude, des analyses plus poussées mettent subitement en évidence un

risque structurel imminent et le pont est fermé à la circulation le 23 décembre, provoquant de très sévères embouteillages à la veille de Noël. Après trois semaines, et grâce à quelques étais, il peut être ouvert partiellement : une voie dans chaque sens pour les véhicules légers uniquement.

2012 : PHASE 1, REPARATIONS PARTIELLES COURSE CONTRE LA MONTRE

Le pont constituait une artère clé pour les Jeux Olympiques et devait donc être pleinement ouvert à temps. Les solu-

tions alors à l'étude ont été modifiées et finalisées rapidement pour renforcer localement cinq des quinze piles en un temps record. Les travaux de « phase 1 » ont consisté en la réalisation de 40 bossages coulés en place de part et d'autre de la dalle supérieure du caisson. Ces bossages permettent d'ancrer des câbles unité 19C15 qui apportent environ 4 000 t d'effort de précontrainte en fibre supérieure (figures 3 et 4).

RÉ-OUVERTURE DANS LES TEMPS

40 bossages, 500 barres et 30 t de toron de précontrainte ont été livrés, installés et tendus en à peine quatre mois. Les problématiques d'accès et de temps ont été cruciales pour assurer la sécurité des opérations. La livraison en temps et heure des travaux a permis de rendre le pont à la circulation normale pour les Jeux.

2013-2015 : PHASE 2, REMPLACEMENT COMPLET DE LA PRÉCONTRAITE

CLÉS DE LA CONCEPTION : ESPACE ET SÉCURITÉ

La problématique est simple dans sa formulation : rendre la précontrainte existante inutile, conserver les gabarits routiers existants et ne pas interrompre la circulation sur l'ouvrage pendant les travaux. Deux facteurs essentiels ont influencé la quantité de précontrainte. D'une part l'ouvrage rénové devait être conforme aux Eurocodes en vigueur - sauf impossibilité technique avérée - d'autre part, les emplacements naturels d'excentricité maximale pour la précon-

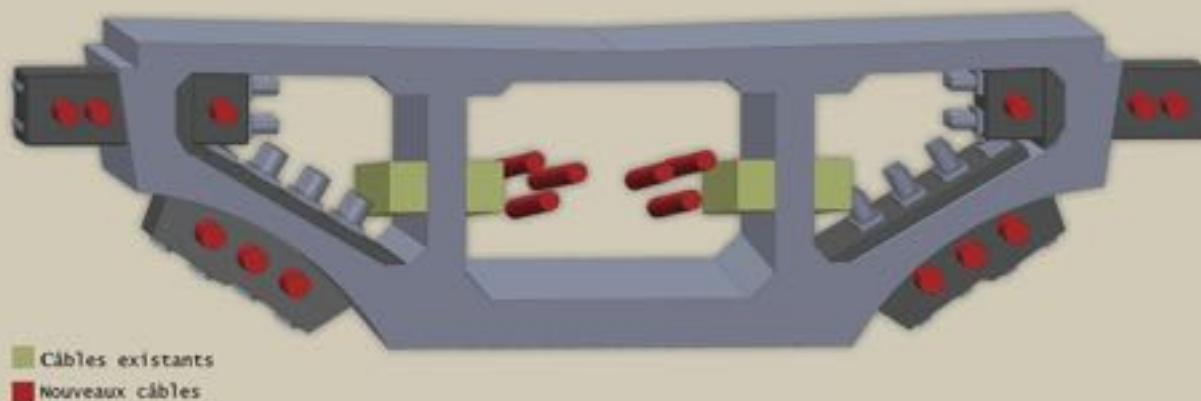
4- Travaux de « Phase 1 ».

5- Vue synthétique de la solution complète - Phase 2.

4- "Phase 1" works.

5- Overall view of the complete solution - Phase 2.

VUE SYNTHÉTIQUE DE LA SOLUTION COMPLÈTE - PHASE 2



■ Câbles existants
■ Nouveaux câbles



6

© BORIS COUSIN, FREYSSINET

trainte sont déjà occupés par l'existant. En conséquence, la compression totale à imposer est très supérieure à la compression existante, dans un espace disponible très restreint.

La solution a pu être développée grâce à une structure contractuelle impliquant l'entreprise générale Costain et son sous-traitant Freyssinet, très en amont dans la conception afin d'utiliser pleinement les technologies disponibles et d'assurer la faisabilité de la solution. Le nouveau système de précontrainte s'appuie sur deux familles de câbles : « courts » et « longs » (figure 5).

CÂBLES COURTS : BOSSAGES BFUP HYPER-COMPACTS

Ces câbles apportent la précontrainte à l'échelle d'une travée - en fibre inférieure - ou d'une pile - en fibre supérieure - (figure 6). Ils sont ancrés à l'aide de bossages en béton fibré à ultra-haute performance (BFUP).

Le choix de ce matériau permet aux bossages d'être suffisamment compacts pour maintenir les gabarits routiers. La majorité d'entre eux, soit 192, a été préfabriquée, ce qui a permis un niveau de qualité et une esthétique inégalables sur chantier. Chaque voussoir recevant un bossage est renforcé par une dalle interne coulée en place, elle aussi en BFUP. Elle permet un renforcement local et une répartition des efforts malgré une épaisseur réduite à 100 mm.

6- Câbles courts extérieurs.

6- Short external cables.

Pour ces câbles, un système de précontrainte nouveau a été développé : hybride d'un câble traditionnel et d'un hauban, le système dit « Plug'n Play » conjugue les avantages des deux systèmes. La partie courante du câble n'est pas injectée, permettant des gains substantiels en temps et une minimisation des risques pendant les opérations. Les câbles installés en 2012 durant la phase 1 font partie intégrante de la solution.

Les câbles courts représentent environ 30% de l'effort de précontrainte mais environ 70% du travail à fournir.

CÂBLES LONGS : LONGUEURS EXTRÊMES SUR GROSSES UNITÉS

L'indispensable précontrainte de continuité est assurée par des câbles traditionnels installés dans la cellule centrale et injectés à la cire pétrolière après tension. Dans une section donnée, six câbles de forte puissance (37C15) sont nécessaires. Le transfert de près de 4 500 t d'effort à une structure existante à des emplacements non

prévus à cet effet est particulièrement complexe. Aussi a-t-il été décidé de supprimer tout ancrage intermédiaire et d'installer des câbles d'un seul tenant. En conséquence la longueur des câbles atteint 385 m mais la circulation à l'intérieur de l'ouvrage reste possible (figure 7). La capacité de Freyssinet à installer des armatures d'une telle longueur a joué un rôle déterminant pour livrer les travaux à la date prévue.

LES TÂCHES PRINCIPALES

L'installation du nouveau système a commencé par les câbles courts. Des analyses topographiques complexes sont nécessaires pour assurer un parfait alignement de ceux-ci.

Les dalles de renfort en BFUP sont ensuite coulées grâce à un atelier mobile de malaxage permettant un contrôle rigoureux de la mise en œuvre du BFUP. Après carottage, les bossages préfabriqués sont levés à l'aide d'un engin de levage inventé pour l'occasion. Pour assurer leur mise en place précise, il fallait pouvoir les manipuler avec six degrés de liberté, jusqu'à 7 m de hauteur, à la manière d'une main. D'une capacité de 2,5 t, cette main hydraulique permet des levages sûrs, précis et rapides (figure 8). Les câbles courts peuvent alors être mis en place et tendus toron par toron, suivant une séquence bien précise. Des jauges de déformation assurent en temps réel la surveillance de la structure. Si l'installation des câbles longs est

plus traditionnelle, la mise en place des déviateurs en acier à l'intérieur de l'ouvrage s'est révélée délicate. 130 t d'acier ont été amenées par des portes ménagées pour l'occasion dans cinq des piles. Après la mise en tension de 30% des câbles longs il était nécessaire de désactiver une partie de la précontrainte existante afin d'éviter un excès de compression. Cette désactivation a pu être réalisée sans interruption de la circulation sur l'ouvrage, grâce à des opérations de carottage d'une précision chirurgicale. Une fois la dissipation d'énergie confirmée, le reliquat des câbles longs a pu être tendu et ces câbles injectés à la cire. Environ 40 000 L de cire ont été nécessaires pour les seuls câbles longs.

UNE RÉNOVATION COMPLÈTE

La précontrainte est le point clé de la rénovation du pont, mais les travaux ont couvert de nombreux autres éléments, en particulier le changement des appareils d'appui, le changement du joint de dilatation, la mise à niveau des évacuations d'eau et une reprise complète de l'étanchéité et du revêtement de chaussée.

LES CONTRAINTES OPÉRATIONNELLES

Les opérations ont été contraintes par l'environnement urbain très dense entourant l'ouvrage. Aucune fermeture du pont ne devait être causée par les travaux de précontrainte. ▷

Les routes passant sous l'ouvrage ne pouvaient être fermées, partiellement ou complètement, que la nuit après 22h30 et rendues à la circulation avant 6h, contraignant fortement l'accès à l'ouvrage.

Le travail à l'intérieur de l'ouvrage était particulièrement difficile en raison de l'exiguïté de l'espace. La cellule centrale offre 1,4 à 1,9 m de hauteur, et les cellules extérieures, de forme triangulaire, n'offrent qu'un espace de travail très restreint.

L'espace disponible pour les installations de chantier était fortement limité par l'obligation de maintenir toutes les circulations piétonnes et la densité du réseau routier sous l'ouvrage. Cet espace était partagé entre les cotraitants, obligeant à une coordination exemplaire.

UN DÉFI RELEVÉ GRÂCE À L'INNOVATION

La solution proposée, conçue et mise en œuvre par Freyssinet repose sur plusieurs innovations fondamentales qui ont rendu possible une réponse positive aux attentes du maître d'ouvrage, lequel a soutenu ces nouveaux procédés en dépit des risques inhérents à leur utilisation. Ces risques ont été



© BORIS COUSIN, FREYSSINET

intelligemment maîtrisés par la réalisation d'une maquette d'une portion de travée à l'échelle 1, en béton et en bois. Cette maquette a été un support précieux pour démontrer la pertinence des solutions, tester les machines spécialement conçues et former les équipes aux procédés principaux.

**7- Câbles longs
en cellule centrale.**

**7- Long cables
in central bay.**

Les bossages ont la double particularité d'être construits en BFUP et d'être préfabriqués. Le transfert des efforts de précontrainte au BFUP a fait l'objet d'une campagne d'essais normalisés pour chaque unité et dans chaque configuration. L'interface entre le bossage et le béton existant a également été testée sur des maquettes à l'échelle 2/3, validant ainsi le coefficient de frottement choisi. Le clouage des bossages se fait grâce à des « Freyssibars+ », 30 % plus puissantes à diamètre égal que des barres traditionnelles. La combinaison de ces éléments a permis de construire des bossages esthétiquement aboutis, d'une grande qualité de fabrication et de les installer rapidement dans l'environnement urbain du chantier. Ce choix fort a été l'un des piliers de la sécurité du chantier, en réduisant fortement les risques liés au travail en hauteur et à proximité de la circulation.

La petite taille des pièces en BFUP coulées en place et le comportement très particulier du béton frais ont obligé l'équipe à inventer et fabriquer une pompe spéciale permettant un débit très faible mais une grande puissance. C'est une seringue hydraulique de 150 L de capacité qui a placé 60 m³ (232 pièces) de BFUP dans l'ouvrage

LE BFUP LAFARGE CONJUGUE PERFORMANCES ET SAVOIR-FAIRE

AUTEURS : SÉBASTIEN BERNARDI, DIRECTEUR TECHNIQUE, LAFARGE DUCTAL® - DAMIEN JACOMO, RESPONSABLE PROJET GÉNIE CIVIL, LAFARGE DUCTAL®

Les bétons fibrés à ultra-hautes performances de la gamme Ductal® sont particulièrement bien adaptés aux projets de génie civil. Ils offrent une résistance, une durabilité et une ductilité extrêmement élevées, associées à une esthétique de grande qualité.

Très résistants au gel-dégel, à la carbonatation et à la pénétration de l'ion chlorure, ils sont spécifiquement adaptés pour la construction dans des environnements agressifs.

Mais le choix de Ductal® en particulier est aussi lié à une prise en compte globale des besoins de l'ensemble des parties associées sur le projet. Au-delà de la formule anti-feu proposée pour les ancrages extérieurs, Lafarge a également travaillé, sur place, en Angleterre, avec un préfabricant, Thorp, licencié et formé à l'utilisation de Ductal®. Ce préfabricant a été en mesure de fournir des pièces en respectant des tolérances très strictes.

L'utilisation de BFUP comme élément clé du nouveau système de précontrainte a été une innovation dans le domaine de la post-tension et une première au Royaume-Uni.

D'autres matériaux avaient été envisagés mais le poids et les difficultés d'installation liées au passage pour aller à l'intérieur des caissons ont eu raison de ces différentes hypothèses et orienté le choix vers la solution en BFUP. Tous les éléments de coffrage étaient introduits dans le caisson en pièces détachées, puis montés. Les parties transparentes permettaient de suivre avec précision le coulage.

Toutes les performances mécaniques du BFUP ont été alors mises à profit pour réaliser des bossages (blocs d'ancrages) d'une taille adaptée à l'espace confiné à l'intérieur des caissons. 40 blocs d'ancrage, ont ainsi été fabriqués *in situ*, en formule Ductal® classique, sans traitement thermique particulier, contrairement aux ancrages préfabriqués. Par ailleurs, près de 200 dalles de renfort, également réalisées *in situ*, ont été posées pour servir de renfort local du caisson et accueillir à l'extérieur les bossages préfabriqués. Cette solution du BFUP coulé sur site minimisait ainsi le volume des ancrages intérieurs dans des espaces confinés tout en assurant une reprise de charge importante. Ici l'enjeu sécurité a confirmé tout l'intérêt d'un béton qui se coule facilement et rapidement.

Les deux modes de fabrication (préfabriqué et coulé sur place) correspondaient ainsi à deux problématiques différentes auxquelles le BFUP permettait de répondre.

L'expérience des équipes Lafarge a permis, non seulement de travailler en étroite collaboration avec le préfabricant, mais aussi d'assurer la formation des équipes de Freyssinet en Angleterre. Des essais de conformance avec des maquettes à l'échelle 1 ont été réalisés pour développer et valider les solutions techniques.

L'équipe de Ductal® a mis en place un contrôle qualité rigoureux afin d'assurer un suivi de projet en adéquation avec les exigences du client pour les éléments préfabriqués comme pour ceux réalisés sur place.



© BORIS COUSIN, FREYSSINET

8

avec une grande précision et un faible gaspillage.

Mentionné précédemment, l'engin de levage des bossages est la clé des opérations d'installation des câbles courts. Conçue en France et certifiée des deux côtés de la Manche, cette machine comporte deux éléments principaux :

8- « Main de levage » montée sur fourches.

8- Fork-mounted "lifting hand".

une remorque à ciseaux et une tête d'ajustement. La remorque porte les stabilisateurs, la motorisation et une table de levage hydraulique de forte capacité. Compacte, elle est remorquée en position au début de l'opération. La tête d'ajustement saisit le bossage et dispose des six degrés de liberté

nécessaires pour garantir l'alignement du bossage avec les carottages. Cette tête peut également être utilisée seule, sur un engin à fourche, pour le cas où aucun accès n'est possible à la verticale d'un bossage, comme ce fut le cas au-dessus des voies du métro. La combinaison de ces éléments a permis des levages rapides et précis malgré le bref temps imparti chaque nuit lors des fermetures de routes.

CONCLUSION

Le pont-route de Hammersmith s'est révélé être un cas d'une extrême complexité technique et opérationnelle. Cette complexité a naturellement créé une très forte interdépendance entre le maître d'ouvrage, l'entreprise générale, le bureau d'étude et le sous-traitant expert.

La gestion de projet mise en place, en impliquant profondément ces acteurs dont les équipes ont travaillé en étroite collaboration, a permis de déployer une solution unique, digne d'une opération chirurgicale, innovante et à la pointe de la technologie. Ainsi la réparation du pont-route de Hammersmith est-elle un archétype de réparation réussie, au service du maître d'ouvrage, des usagers et de la sécurité. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 192** bossages en BFUP préfabriqués
- 2 000** carottages dans la structure
- 1 500** barres de clouage : 40 t
- 156** câbles de précontrainte extérieure
- 3 600** m de câbles injectés à la cire pétrolière
- 54** déviateurs métalliques internes

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE :** Transport for London (TfL)
- ENTREPRISE GÉNÉRALE :** Costain
- BUREAUX D'ÉTUDE :** Ramboll & Parsons Brinckerhoff
- BUREAU DE CONTRÔLE :** Flint & Neill
- EXPERT PRÉCONTRAINTE ET TRAVAUX SPÉCIAUX :** Freyssinet
- FOURNISSEUR DU BFUP :** Lafarge Ductal®

ABSTRACT

HAMMERSMITH FLYOVER: OPEN-HEART SURGERY

BORIS COUSIN, FREYSSINET

The challenge was to replace all the prestressing of a 630-metre bridge without suspending traffic. It was met using an innovative approach and through perfect collaboration between the numerous players involved. For this made-to-measure prestressing system, by designing and prefabricating UHPFRC anchor blocks it was possible to obtain the necessary compactness. Installation of the parts by a machine invented for the project ensured speed of operation. Very long cables ensured prestressing continuity. In a very dense urban environment, the design options chosen helped ensure the safety, speed of execution and quality of the works. Expertise in cutting-edge technology combined with project management closely involving the main subcontractors made it possible to deliver to the Client a product in line with their expectations. □

HAMMERSMITH FLYOVER: CIRUGÍA A CORAZÓN ABIERTO

BORIS COUSIN, FREYSSINET

Sustituir el conjunto del pretensado de un puente de 630 metros sin interrumpir la circulación: el reto ha sido superado gracias a un enfoque innovador y a una perfecta colaboración entre los numerosos actores implicados. Diseñar y prefabricar resaltes de HMAR ha permitido obtener la compacidad necesaria para este sistema de pretensado a medida. La instalación de las piezas utilizando una máquina inventada para la obra ha agilizado las operaciones. Unos cables muy largos mantienen la continuidad del pretensado. En un entorno urbano muy denso, las opciones de diseño han privilegiado la seguridad, la rapidez de ejecución y la calidad de los trabajos. El dominio de técnicas punteras, combinado con una gestión del proyecto basada en una amplia implicación de los principales subcontratistas, ha permitido entregar al promotor un producto conforme a sus expectativas. □

INVESTIGATIONS À 10 ANS SUR LE MATÉRIAU DES OUVRAGES EN BFUP DE BOURG-LES-VALENCE

AUTEURS : FRANÇOIS TOUTLEMONDE, DÉLÉGUÉ SCIENTIFIQUE, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST) - FLORENT BABY, INGÉNIEUR DE RECHERCHES DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, LABORATOIRE EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST) - LÉNAÏC BARON, TECHNICIEN SUPÉRIEUR, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, LABORATOIRE EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES, IFSTTAR (UNIVERSITÉ PARIS-EST) - GRÉGORY GÉNÉREUX, CHARGÉ D'ÉTUDES, DIRECTION TECHNIQUE INFRASTRUCTURES TRANSPORTS ET MATÉRIAUX, CENTRE DES TECHNIQUES D'OUVRAGES D'ART, CEREMA

DES INVESTIGATIONS ONT ÉTÉ MENÉES SUR LE MATÉRIAU UTILISÉ POUR LA CONSTRUCTION DES PREMIERS OUVRAGES D'ART ROUTIERS EN BFUP, ÂGÉ DE PLUS DE 10 ANS. LES CAROTTES PRÉLEVÉES ONT NOTAMMENT PERMIS DE VÉRIFIER LA POROSITÉ, LA MASSE VOLUMIQUE, LE MODULE D'YOUNG ET LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION ET DE S'ASSURER DU MAINTIEN DANS LE TEMPS DU COMPORTEMENT EN TRACTION. COMPLÉTANT L'INSPECTION DÉTAILLÉE DE CES OUVRAGES QUI N'ONT FAIT L'OBJET D'AUCUNE MAINTENANCE IMPORTANTE, LES INVESTIGATIONS PERMETTENT D'ATTESTER L'ABSENCE DE VIEILLISSEMENT DÉFAVORABLE DU BFUP *IN SITU*.



LES PASSAGES SUPÉRIEURS EN BFUP DE BOURG-LÈS-VALENCE

Les passages supérieurs OA4 et OA6 situés sur la déviation de Bourg-lès-Valence^[1] sont les plus anciens ponts routiers en BFUP connus au monde. Ils ont été réalisés en 2001 par l'entreprise Quillery (qui a maintenant fusionné au sein du groupe Eiffage). Le tablier est constitué de BSI®-Cera-cem. Les propriétés du matériau ont été déterminées par application pilote des recommandations de l'Afgc sur les BFUP qui étaient alors tout juste en voie de publication. En particulier, une résistance caractéristique en compression de 180 MPa a été adoptée pour le projet, un module d'Young

de 65 GPa, et le comportement en traction a pu être caractérisé par une résistance caractéristique de 9,1 MPa et une contrainte post-pic moyenne de 7,9 MPa correspondant à une ouverture de fissure de 0,3 mm^[2]. Chaque travée est composée de 5 poutres préfabriquées précontraintes par pré-tension, parallèles et en forme de Pi, clavées longitudinalement sur site par du BSI® coulé en place (figure 1).

Depuis leur ouverture au trafic en 2002, ces ponts n'ont fait l'objet d'aucune intervention d'entretien importante. Après une décennie, il est apparu intéressant de documenter l'expérience du vieillissement *in situ* du BFUP sur la base de ces ouvrages, en complément

1- Passages supérieurs en BFUP de Bourg-lès-Valence en cours d'achèvement.

1- UHPFRC overpasses of Bourg-lès-Valence undergoing completion.

supérieurs, pour mesure des caractéristiques *in situ* à long terme. L'article décrit les enseignements tirés de ces mesures, réalisées sur le matériau âgé d'une douzaine d'années.

Les deux ouvrages ont également fait l'objet d'une inspection détaillée en avril 2012, soit 11 ans après la réalisation des travaux de structure.

Ils apparaissent globalement en état correct, sans signe visible de dégradation des tabliers (figure 2). L'élégance visuelle du franchissement élané de la déviation de Bourg-lès-Valence (RN7 à 2 fois 2 voies) a été conservé. L'absence de correction de défauts initiaux et l'absence de maintenance ont conduit à des écaillages locaux

de ce qui avait par exemple pu être fait sur les poutrelles de l'aéroréfrigérant de la centrale de Cattenom^[3]. Des éprouvettes ont pu être carottées dans les entretoises d'about d'un des passages



et à des désordres mineurs couramment causés par le ruissellement des eaux sur les culées, constituées de béton ordinaire (figure 3a). L'humidité persistante et la condensation aux extrémités inférieures des semelles des poutres en BFUP a provoqué une corrosion des fibres métalliques en surface (figure 3b). Néanmoins ce défaut esthétique est limité, la plupart des parements en BFUP sont restés gris et brillants (figure 4). Il n'est pas apparu de fissuration significative aux joints de BFUP coulé en place entre les poutres préfabriquées.

En lien avec ces inspections à 10 ans, les flèches des deux ouvrages ont été relevées sous faible gradient thermique et comparées aux mesures de 2002. Les évolutions sont de moins de 6 mm alors que les écarts entre valeurs mesurées et calculées en fin de réalisation des ouvrages variaient de 15 à 30 mm, principalement à cause des incertitudes concernant le fluage et l'identification des effets thermiques lors des mesures.

2- Vue générale des ouvrages en service.

3- a) Effet des condensations et stagnations d'eau sur culées. b) Corrosion de surface des fibres, limitée aux arêtes et aux extrémités des sous-faces des semelles des poutres.

2- General view of the structures in service.

3- a) Effect of condensation and stagnation of water on abutments. b) Surface corrosion of the fibres, limited to the edges and ends of the girder flange undersides.

PRÉLÈVEMENTS DE CAROTTES ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Les poutres préfabriquées en Pi constituant la structure résistante du tablier pouvaient difficilement faire l'objet de prélèvements.

Ceux-ci ont donc été réalisés dans les entretoises sur appui, coulées en place, qui ne comportent pas d'aciers de précontrainte et n'ont qu'un ferrailage relativement léger.

Seul l'ouvrage OA6 a pu faire l'objet de prélèvements par carottage, à la fois dans l'entretoise sur pile centrale et dans celle sur culée (figures 5 & 6). Les carottes prélevées avaient une longueur d'environ 200 mm et un diamètre de 94 mm.

La désignation des prélèvements (figures 7 & 8) distingue la face extérieure attaquée par le carottier (« e ») de la face de sortie (« s »).

Les extrémités des carottes ont été sciées à sec et les échantillons 2, 4 et 5 ont été sur-carottés pour pallier leur défaut géométrique.

Les fibres sont apparues saines (non corrodées) sur toutes les surfaces visibles des prélèvements.

Compte tenu de la quantité de matériau disponible, il a été choisi de ne pas vérifier l'absence de carbonatation, qui représente à 10 ans déjà pour les bétons à hautes performances un risque très faible. La régularité de la géométrie des carottes 1, 3 et 6 a conduit à les retenir pour la réalisation des essais de compression, après rectification des faces pour assurer l'orthogonalité de celles-ci avec l'axe des cylindres (figure 8). Les chutes ont été conservées pour effectuer les mesures de porosité. La partie centrale des cylindres 2, 4 et 5 a été sciée de façon à disposer de 6 échantillons d'éclatement proche de 1, adaptés à la réalisation d'essais de traction directe^[4]. Les disques prélevés du côté « e » (face exposée à de possibles projections de sels de déverglaçage) ont été utilisés pour dosages de chlorures, afin d'identifier un éventuel gradient de concentration.



La porosité accessible à l'eau a été mesurée selon la norme française^[6], à l'exception de la durée de remouillage des éprouvettes portée à 72 heures au lieu de 48 heures. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 1.

La masse des échantillons était comprise entre 390 g et 490 g, d'où une erreur de répétabilité (mesures successives sur le même échantillon) limitée à 0,2%.

Bien que les échantillons aient été conservés sans protection, leur degré de saturation apparaît élevé, ce qui confirme la faible perméabilité du BFUP à l'eau et à la vapeur. Le séchage s'est en effet avéré très limité tant pour les disques de 20 mm d'épaisseur (1e, 1s, 3e, 6s) que pour l'échantillon 4ccs (cylindre creux d'une épaisseur limitée à 5 mm). On considère généralement que l'état hydrique est stabilisé pour une variation relative de masse inférieure à 0,05% par jour. Contrairement au cas des bétons ordinaires, ce critère conventionnel est atteint au bout d'un temps assez long pour les BFUP, comme l'illustre la figure 9, et ne correspond pas nécessairement à la fin du séchage.

Les mesures du tableau 1 confirment par ailleurs la densité élevée du BSI[®] employé ici, qui s'explique à la fois par

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU BFUP ÂGÉ DE 12 ANS

Échantillon	Porosité (%)	Degré de saturation	Masse volumique initiale (kg/m ³)	Masse volumique apparente (kg/m ³)
1e	8.2	0.90	2 813	2 740
1s	7.8	0.89	2 838	2 769
3e	6.8	0.92	2 862	2 799
6s	7.6	0.91	2 840	2 771
4ccs (cylindre creux)	11.8	0.86	2 875	2 773
Moyenne (sans 4ccs)	7.6	0.91	2 838	2 770

la teneur élevée en fibres et par le type de granulats.

En termes de porosité, la valeur absolue moyenne de 7,6% se situe dans l'ordre de grandeur attendu. Le résultat isolé élevé obtenu pour l'échantillon 4ccs s'explique probablement par la microfissuration de surface des surfaces cylindriques carottées, et par l'absence d'effet de paroi (favorable aux autres mesures).

La teneur en ions chlorure libres a été mesurée selon le protocole recommandé en^[6], sur poudre obtenue par grignotage de disques correspondant à des couches successives à partir de la surface des prélèvements (échantillons 4ee1 à 4ee3 et 5ee1 à 5ee3, de 94 mm de diamètre et environ 7 m d'épaisseur), et à des échantillons

4- Parements des poutres en Pi.

5- Prélèvement des carottes dans l'entretoise sur culée de l'OA6.

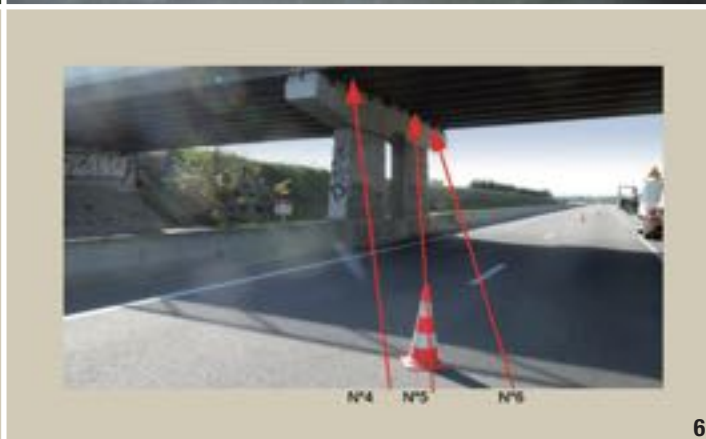
6- Prélèvement des carottes dans l'entretoise sur pile de l'OA6.

4- Underpass girder facings.

5- Taking core samples in the cross tie on OA6 abutment.

6- Taking core samples in the cross tie on OA6 pier.

représentatifs du cœur des pièces (2ccs, 5ccs). Pour toutes les déterminations (tableau 2), la teneur mesurée est proche de la précision de la méthode (inférieure à 0,02 g/100 g). Il faut noter que les ouvrages de Bourg-lès-Valence sont situés en zone de salage fréquent avec un gel modéré d'après la norme NF EN 206/CN de décembre 2014, mais que le salage de l'itinéraire franchi est probablement resté inférieur à 10 jours par an en moyenne sur les 10 années concernées. Quoiqu'il en soit, il apparaît clairement que les ions chlorure n'ont pas pénétré dans les parties exposées des poutres et entretoises en BFUP, le risque de corrosion des fibres, des armatures et des câbles à l'intérieur des parties en BFUP du tablier est donc négligeable.



© IIFSTAR
© CEREMA



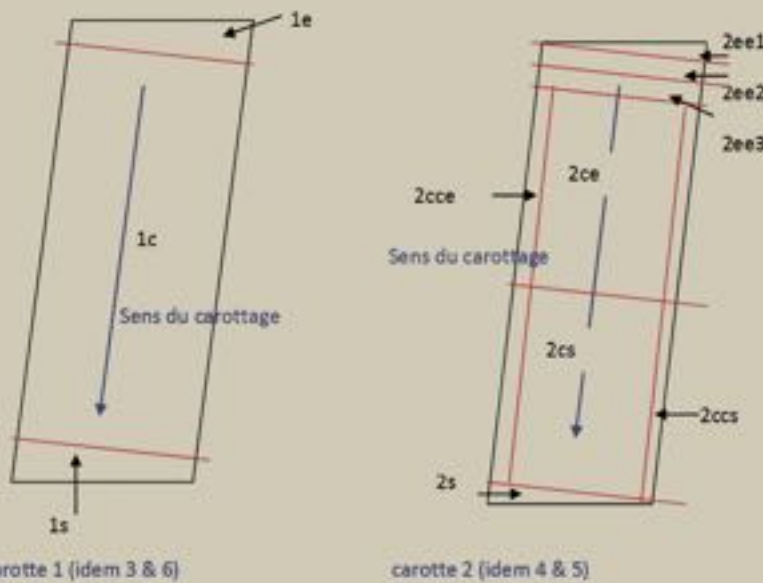
© IFSTTAR

7a

7b

7c

PRÉPARATION DES CAROTTES POUR ESSAIS MÉCANIQUES, PHYSIQUES ET CHIMIQUES



© IFSTTAR

8

7- Aspect visuel des carottes et de la zone de prélèvement. Absence de corrosion des fibres.

8- Préparation des carottes pour essais mécaniques, physiques et chimiques.

7- Visual appearance of core samples and the sampling area. Absence of fibre corrosion.

8- Preparation of core samples for mechanical, physical and chemical tests.

TABLEAU 2 : RÉSULTATS DU DOSAGE DES CHLORURES LIBRES (en g d'ions Cl^- rapportés à 100 g de BFUP sans fibres)

Échantillon	4ee1	4ee2	4ee3	5ee1	5ee2	5ee3	2ccs	5ccs
Teneur en Cl^-	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.01	<0.01	0.01	<0.01

TABLEAU 3 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU BSI® TESTÉ À 12 ANS D'ÂGE

Échantillon	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Charge maximale (kN)	Résistance en compression (MPa)
1c	73,6	0,192	1 863,8	270,0
3c	73,9	0,201	1 852,6	271,3
6c	72,5	0,195	1 714,3	250,2
Moyenne	73,3	0,196	1 810,2	263,8

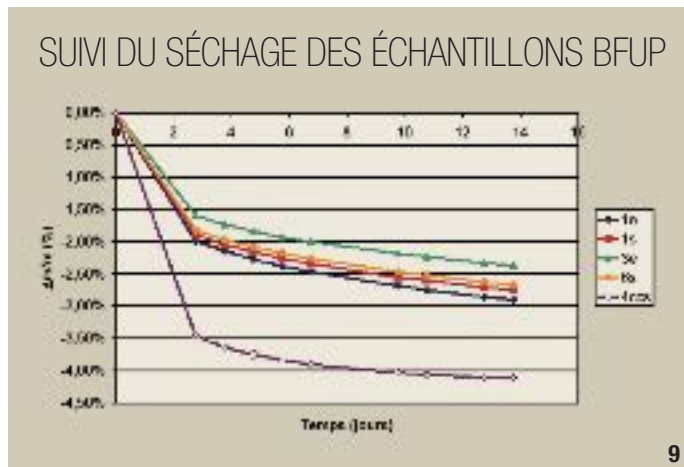
PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES EN COMPRESSION

Les cylindres 1c, 3c et 6c ont une hauteur d'environ 150 mm pour un diamètre de 94 mm. Avec cet élanement, l'effet de fretage des extrémités lors de l'essai de compression, et la surestimation de résistance qui en découle, peuvent être négligés.

Le module d'Young a été déterminé en suivant le mode opératoire LPC^[7], au cours de trois cycles de chargement appliqués à une vitesse de 0,3 kN/s entre des niveaux de charge de 70 kN et 419 kN correspondant à 5% et 30% de la charge de ruine estimée. ▷

Les déformations ont été mesurées dans les directions longitudinales et transversales. Puis, après que l'extensomètre a été enlevé, chaque corps d'éprouve a été chargé jusqu'à rupture (figure 10). Les résultats sont récapitulés dans le tableau 3.

Le coefficient de Poisson obtenu est proche de la valeur attendue et généralement admise de 0,2. Le module d'Young mesuré est élevé, par comparaison à la valeur de calcul de 65 GPa admise pour le BSI® à 28 jours. Ce résultat pourrait s'expliquer par la poursuite de l'hydratation du BFUP *in situ*, pourvu que de l'eau continue à être fournie, ce qui est possible ici au cœur des entretoises (plutôt massives) en BFUP, et serait cohérent avec la masse volumique et le degré de saturation également élevés. Ces résultats pourraient être mis en relation avec les faibles effets du fluage observés. Ainsi les poutres précontraintes ont conservé une contreflèche vers le haut, alors qu'avec les caractéristiques de fluage mesurées en laboratoire (sur le BFUP âgé de 2 et 28 jours et dans une atmosphère à



50% d'humidité relative) les pertes de précontrainte auraient été plus importantes, conduisant à une annulation de la contreflèche. Enfin, à 12 ans d'âge, la résistance en compression mesurée sur le BSI® dépasse de plus de 20% la résistance moyenne à 28 jours considérée généralement pour ce matériau^[2]. L'élanement (1,6 au lieu de 2) et l'effet

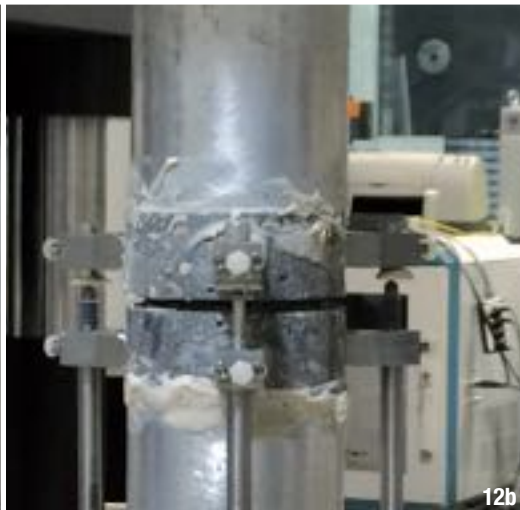
d'échelle (diamètre de 94 mm au lieu de 110 mm sur le corps d'éprouve de référence) peuvent en partie expliquer ce résultat. Un biais peut également intervenir entre cette détermination sur cylindres carottés, et la détermination sur cylindres moulés, à cause de l'ancrage des fibres en partie extérieure du cylindre et des éventuels effets de paroi. Néanmoins tous ces effets

9- Perte relative de masse par séchage des éprouvettes de BFUP, en fonction du temps en jours (disques de 20 mm d'épaisseur sauf 4ccs d'épaisseur 5 mm). Le critère conventionnel de stabilisation de la masse est tout juste atteint au bout de 14 jours.

10- Exemple de faciès de ruine après essai de résistance en compression.

11- Corps d'éprouve testé en traction directe (1^{er} série d'essais) après rupture dans le joint de colle.

12- Essai de traction directe sur éprouvettes entaillées (2^e série d'essais).



9- Relative weight loss due to drying of UHPFRC test specimens, versus time in days (discs 20 mm thick except 4ccs specimens 5 mm thick).

The conventional mass stabilisation criterion is just reached after 14 days.

10- Example of failure pattern after compressive strength test.

11- Test specimen tested in direct tension (1st test series) after failure in the adhesive joint.

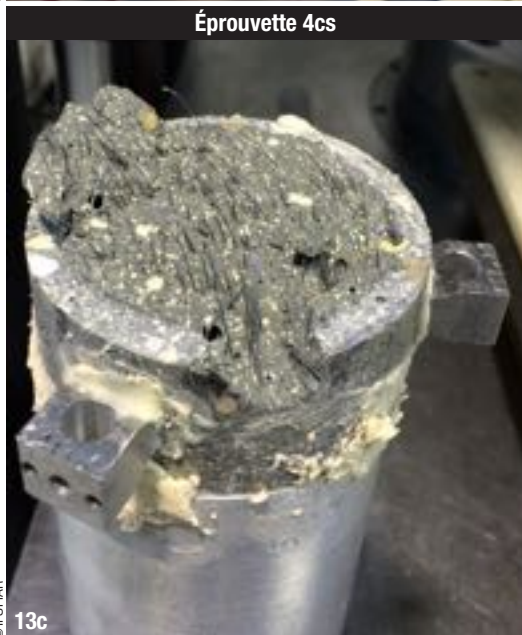
12- Direct tensile test on notched test specimens (2nd test series).



13a



13b



13c



13d



13e

13- Faciès de rupture des éprouvettes entaillées testées en traction directe (2^e série d'essais de traction directe).

13- Failure pattern of notched test specimens tested in direct tension (2nd direct tensile test series).

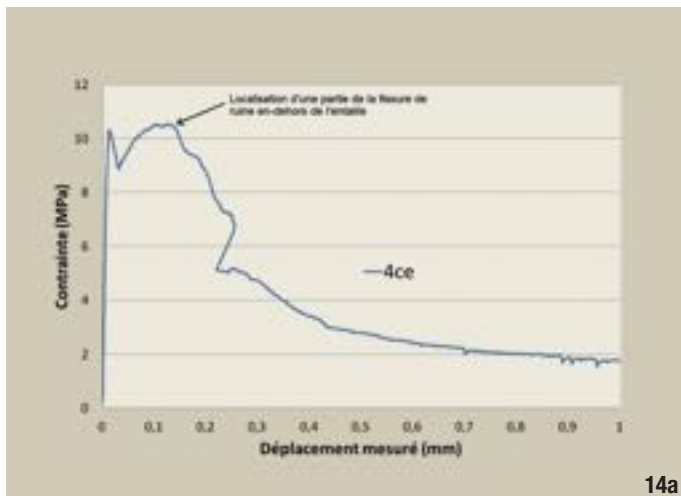
semblent insuffisants pour expliquer la totalité de l'écart de résistance, et il est probable qu'une poursuite de l'hydratation intervienne également, comme cela avait été observé sur le Ductal[®] des poutrelles de Cattenom à 10 ans^[3]. Ces résultats confirment donc la sécurité associée aux recommandations de l'Afgc et à la future norme de calcul des BFUP en termes de détermination de la valeur de calcul de la résistance en compression f_{cd} [2, 8, 9].

COMPORTEMENT EN TRACTION

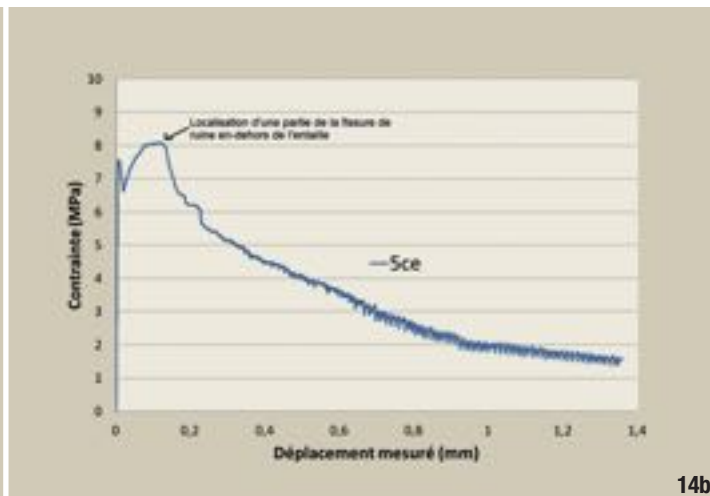
Pour la conception des deux ouvrages de Bourg-lès-Valence, la résistance post-fissuration du BFUP n'a pas été nécessaire à la justification en flexion longitudinale, compte tenu d'une conception utilisant la précontrainte « en classe II »^[2]. En revanche la capacité de reprise d'efforts de traction post-fissuration a été essentielle pour vérifier la résistance des tabliers en flexion transversale, ces derniers ne comportant dans cette direction ni précontrainte ni armatures passives (hors zones de clavage).

La caractérisation du comportement en traction du BFUP lors de la construction de ces ouvrages a constitué l'une des premières applications pilotes de la méthode détaillée dans les recommandations de l'Afgc^[2] : identification de la limite de linéarité par analyse d'un essai de flexion 4 points sur éprouvette prismatique non-entaillée, et détermination du comportement post-fissuration par analyse inverse d'un essai de flexion 3 points sur éprouvette prismatique entaillée. Les valeurs associées à cette caractérisation initiale du BSI[®] sont une résistance caractéristique en traction de 9,1 MPa et une contrainte post-pic moyenne de 7,9 MPa correspondant à une ouverture de fissure de 0,3 mm. Une dizaine d'années plus tard, il s'est avéré impossible d'extraire des prismes de l'ouvrage pour réaliser des essais similaires, et il a fallu utiliser au mieux les cylindres prélevés par carottage. L'essai de fendage étant inadéquat pour obtenir le comportement post-fissuration des bétons renforcés de fibres, il a été choisi de réaliser des essais de traction directe, en application des recommandations de l'Afrem sur les bétons de fibres^[4].

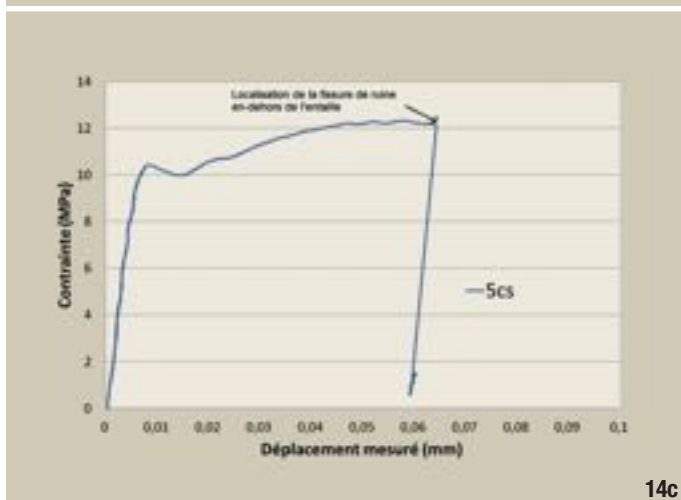
Ces essais ont été réalisés sur les six cylindres 2ce, 2cs, 4ce, 4cs, 5ce, 5cs, dont une face au moins était affectée par l'effet de paroi contribuant à une orientation préférentielle des fibres parallèlement à l'une des bases du cylindre.



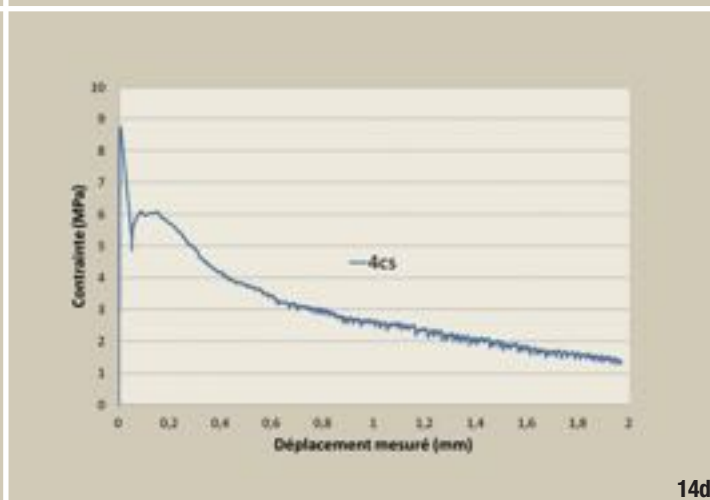
14a



14b



14c



14d

De ce fait, tous les corps d'éprouve (qui n'avaient pas été préalablement entaillés) ont atteint la rupture de façon au moins partielle dans l'une des interfaces de colle en extrémité de l'éprouvette (figure 11), avec une contrainte moyenne de l'ordre de 6 à 7 MPa. Ce résultat constitue une estimation par défaut de la résistance de la matrice du BFUP, peu précise à cause de la variabilité de la surface de rupture, et ne permet pas d'estimer la contribution des fibres au comportement en traction post-fissuration.

Il a donc été décidé de récupérer les éprouvettes, d'en rectifier à nouveau les faces d'appui, de réaliser une entaille à mi-hauteur, et de réaliser de nouveaux essais de traction directe sur ces éprouvettes entaillées, en disposant un bourrelet de colle destiné à renforcer localement les sections d'extrémité dont les fibres sont mal ancrées ou inefficaces car perpendiculaires à la direction de traction par effet de paroi. Compte tenu de son endommagement lors du premier essai l'éprouvette 2cs n'a pas pu être réutilisée. Pour les 5 éprouvettes restantes, de hauteur comprise entre

58 et 70 mm, le diamètre extérieur du cylindre est compris entre 74,04 mm et 74,35 mm (section totale d'environ 43 cm²), la profondeur de l'entaille varie de 6,3 à 6,5 mm (section résiduelle de la zone entaillée comprise entre 29,3 et 29,7 cm²), l'épaisseur de l'entaille étant comprise entre 2,7 et 3,1 mm.

L'entaille a été instrumentée par des capteurs de déplacement montés en extensomètres sur trois génératrices (figure 12). On a donc directement accès à l'ouverture de fissure dont on espère l'initiation préférentielle dans le plan de l'entaille. L'asservissement des essais a porté sur le déplacement

14- Courbes « contrainte - déplacement relatif (moyenne des trois extensomètres) » pour les éprouvettes 4ce, 5ce, 5cs et 4cs.

14- "Stress-relative displacement curves (average of the three extensometers)" for test specimens 4ce, 5ce, 5cs and 4cs.

du vérin à une vitesse de 1 µm/s. Les ruptures obtenues pour les cinq éprouvettes sont récapitulées dans le tableau 4 et illustrées figure 13.

Pour l'éprouvette 2ce, la rupture a eu lieu dans le BFUP en dehors de l'entaille. La contrainte maximale obtenue (rapportée à la section entaillée), qui représente un minorant de la résistance, est égale à 10,83 MPa. Pour les autres éprouvettes, les enregistrements des courbes « contrainte (ramenée à la surface réduite de la section entaillée) - déplacement relatif moyen des lèvres de l'entaille » sont représentés figure 14. Pour les éprouvettes 4ce, 5ce et 5cs, l'initiation de la fissure a eu lieu au niveau de l'entaille.

Toutefois en raison du caractère écrouissant du BFUP au niveau de cette section, une autre fissure de ruine s'est créée dans le prolongement de la fissure existante.

Seule la partie de la courbe « contrainte - ouverture de fissure » avant localisation de la fissure de ruine est directement exploitable. En effet, une fois la fissure de ruine localisée, une partie de celle-ci n'est pas pontée par les

TABLEAU 4 : TYPE DE RUPTURE OBTENUE (2^e campagne d'essais de traction directe)

Éprouvette	Initiation de la fissuration	Type de rupture
2ce	Hors entaille	BFUP : hors entaille
4ce	Dans l'entaille	BFUP : mixte entaille/hors entaille
4cs	Dans l'entaille	BFUP : entaille
5ce	Dans l'entaille	BFUP : mixte entaille/hors entaille
5cs	Dans l'entaille	BFUP : hors entaille

extensomètres et la surface de fissuration est nettement supérieure à la surface de la section entaillée. Pour l'éprouvette 4cs, la fissure de ruine a localisé dans l'entaille. L'ensemble de la courbe « contrainte-ouverture de fissure » peut alors être déterminée pour cette éprouvette.

Le tableau 5 récapitule les contraintes maximales obtenues (en considérant la section entaillée), qui représentent un minorant de la résistance de la section. La valeur moyenne est de 10,1 MPa. En conclusion de ces deux séries d'essais de traction directe, il apparaît que la détermination a posteriori du comportement en traction du BFUP a été difficile compte tenu des contraintes géométriques de prélèvement et de l'orientation des fibres dans les carottes, qui ne permettent pas de contrôler la position de la fissure ni sa propagation, d'où l'impossibilité d'obtenir de façon directe et rigoureuse une courbe contrainte/ouverture de fissure qui puisse être comparée à la donnée de calcul. Les résistances obtenues semblent néanmoins supérieures aux valeurs de f_{tj} et σ_{bt} utilisées lors du dimensionnement de l'ouvrage, et n'apparaissent pas inférieures aux valeurs correspondantes obtenues à 28 jours. En termes de ductilité, les résultats obtenus sont satisfaisants à l'exception des cas où les fibres sont orientées dans le plan de la fissure (le résultat est similaire pour des essais à 28 jours).

CONCLUSION

Les passages supérieurs OA4 et OA6 de la déviation de Bourg-lès-Valence, premiers ouvrages d'art routiers dont le tablier a été réalisé entièrement

en BFUP, ont pu faire l'objet 10 ans après leur construction d'investigations sur carottes en plus d'une inspection détaillée. En-dehors d'une corrosion de surface des fibres aux extrémités inférieures des talons de poutres dont l'environnement est très humide, aucune dégradation du matériau n'est observée, et aucune pénétration d'ions chlorure ne peut être mise en évidence. À partir des mesures réalisées sur cylindres carottés, le module d'Young et la résistance en compression atteignent en moyenne 73 GPa et 264 MPa, ce qui dénote un accroissement très

sensible des propriétés par rapport à celles mesurées à 28 jours, et peut probablement s'expliquer par la poursuite *in situ* de l'hydratation. Sans qu'on puisse en tirer explicitement une loi de comportement réactualisée, les essais de traction directe réalisés sur carottes entaillées ont permis de contrôler l'initiation de la fissuration dans la section entaillée, ce qui permet de considérer que le début de la courbe fournit une estimation raisonnable de la résistance, avec une valeur moyenne de 10,1 MPa. Sauf dans un cas manifeste d'orientation défavorable des fibres le compor-

tement s'est avéré peu fragile (palier d'effort ou faible redescende).

Ces résultats conduisent donc à écarter à ce stade l'éventualité d'une dégradation des performances du matériau. Il sera recherché à l'avenir la possibilité de reproduire des investigations de ce type sur d'autres ouvrages anciens en BFUP, et si possible en prélevant des prismes, permettant des essais et une analyse moins aléatoire des résultats de traction, et en recherchant des faces très sévèrement exposées aux chlorures, afin de confirmer quantitativement l'excellente durabilité du BFUP. □

TABLEAU 5 : CONTRAINTE MAXIMALE OBTENUE (2^e campagne d'essais de traction directe)

Éprouvette	2ce	4ce	4cs	5ce	5cs
Contrainte max (MPa)	10,83	10,53	8,74	8,09	12,33

INTERVENANTS ET PARTENARIAT

Partenariat entre l'Ifsttar et le Cerema autour du suivi d'un ouvrage d'art construit dans le cadre de la charte de l'innovation, avec, en plus des auteurs, l'appui ou la participation de :

- Jacques Resplendino, Setec tpi, animateur du groupe de l'Afgc sur les BFUP
- Thierry Thibaux, Alain Simon et Ziad Hajar, Eiffage Tp
- Didier Brazillier, Direction interdépartementale des Routes Centre-Est
- Pierre Roenelle, anciennement Direction territoriale Centre-Est - Laboratoire de Lyon, Cerema
- ainsi que, à l'Ifsttar : Pierre Marchand, Romain Lapeyrère, Renaud-Pierre Martin, Sandrine Ramanich, Jean-Claude Renaud
- et au Cerema : Fabienne Ménissier, Serge Hamparian, Sylvie Arnaud

RÉFÉRENCES :

- [1] Hajar Z., Simon A. et al., 'Construction of the first road bridges made of UHPFRC', 3rd International Symposium on HPC, Orlando, 2003.
- [2] AFGC-Sétra, Documents scientifiques et techniques, « Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations provisoires », 2002.
- [3] Toutlemonde F. et al., 'Field demonstration of UHPFRC Durability. Girders shown to perform well in a cooling tower', Concrete International, November 2010, 39-45.
- [4] Rossi P. et al., 'Les bétons de fibres métalliques. Recommandations sur les méthodes de dimensionnement, les essais de caractérisation, de convenue et de contrôle. Eléments de structures fonctionnant comme des poutres', AFREM, journée technique, Déc. 1995.
- [5] NF P 18-459, Norme française, Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique, 2010.
- [6] Chaussadent T., Arliguie G., 'AFREM test procedures concerning chlorides in concrete: extraction and titration methods', Materials and Structures 32, Avril 1999, 230-234.
- [7] Torrenti J.-M. et al., 'Projet de processus d'essai pour la détermination du module de déformation longitudinale du béton', Bull. LPC, n° 220, 1999, 79-81.
- [8] AFGC, Documents scientifiques et techniques, « Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations », Édition révisée, 2013.
- [9] NF P 18-710, Norme française, Complément national à l'Eurocode 2. Calcul des structures en béton : règles spécifiques pour les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP), 2015.

ABSTRACT

INVESTIGATIONS AT 10 YEARS ON THE MATERIAL OF THE UHPFRC STRUCTURES AT BOURG-LES-VALENCE

FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR - FLORENT BABY, IFSTTAR - LÉNAÏC BARON, IFSTTAR - GRÉGORIE GÉNÉREUX, CEREMA

Investigations were carried out on the material used for the construction of one of the first UHPFRC road structures, aged more than 10 years old. Core samples were taken on one of the overpasses of the Bourg-lès-Valence deviation to verify the Young's modulus, porosity, density and compressive strength and check the persistence of its tensile properties over time. Supplementing the detailed inspection of these structures, which had undergone no significant maintenance, the investigations attested that there was no unfavourable ageing of the UHPFRC *in situ*. In particular, the compressive strength on core samples has apparently increased by about 15% and the direct tensile strength (10.1 MPa on average) remains compatible with the design values used. □

ESTUDIOS SOBRE EL MATERIAL DE LAS CONSTRUCCIONES EN HMAR DE BOURG-LES-VALENCE TRANSCURRIDOS 10 AÑOS

FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR - FLORENT BABY, IFSTTAR - LÉNAÏC BARON, IFSTTAR - GRÉGORIE GÉNÉREUX, CEREMA

Se han realizado estudios sobre el material utilizado para la construcción de unas de las primeras obras de fábrica viales en HMAR, de más de 10 años de antigüedad. Los testigos extraídos en uno de los pasos superiores de la desviación de Bourg-lès-Valence han permitido comprobar el módulo de Young, la porosidad, la densidad y la resistencia en compresión y garantizar que el comportamiento en tracción se mantenga a lo largo del tiempo. Para completar la inspección detallada de estas construcciones, que no han sido objeto de ningún mantenimiento destacable, los estudios permiten certificar la ausencia de obsolescencia desfavorable del HMAR *in situ*. En particular, la resistencia en compresión sobre testigos parece haber aumentado en torno al 15% y la resistencia en tracción directa (10,1 MPa en promedio) sigue ajustándose a los valores utilizados para el cálculo. □

VICAT LES BÉTONS CRÉATIFS

WWW.VICAT.FR

SMART 

INNOVANT, UNIQUE ET MINÉRAL

Intelligence et élégance d'un béton fibré ultra-hautes performances, aux propriétés étonnantes, conçu pour des réalisations structurelles, architecturales et design.

VICAT ► POUR CONSTRUIRE ENSEMBLE

