

**14 septembre 2005 à l'Isle d'Abeau (38)**  
**Les ouvrages en Béton Fibré à Ultra Haute Performance (BFUP)**  
**Application du BCV® sur le PS 34 de l'autoroute A51**

La délégation Rhône-Alpes de l'Association Française de Génie Civil a organisé le 14 septembre 2005 une journée sur le thème des Bétons Fibrés à Ultra haute Performance (BFUP) notamment sur le premier pont routier réalisé en BCV® (Béton Composite Vicat), le BFUP développé par le cimentier VICAT et le groupe VINCI. L'ouvrage s'inscrit dans le cadre de la réalisation autoroutière A51 sur le tronçon Coynelle - Col du Fau concédé à AREA. Il s'agit du passage supérieur (PS34) réalisé en caisson en BFUP précontraint isostatique de 50 m de portée.

Quatre conférences présentèrent aux 110 participants le matériau BFUP puis la conception et la réalisation de l'ouvrage de l'A51 en BCV®. La visite des laboratoires de Vicat et celle de l'usine de préfabrication Campenon Bernard Régions où sont réalisés les voussoirs (à Romagnieu) complétèrent la journée.



*Les participants, venus nombreux (plus de 110 personnes) pour découvrir ou redécouvrir les BFUP*

## Rappel du programme

- 9h30 Accueil des participants
- 9h45 Le Mot du Président  
*par Jacques MARTIN, Président de l'AFGC Rhône-Alpes*
- 10h00 Le point sur les BFUP  
*par Jacques RESPLENDINO (CETE de Lyon)*
- 10h30 Le BCV® : Présentation du matériau  
*par Yann LINGARD (Vicat) et Lionel LINGER (Vinci)*
- 11h00 La conception générale  
*par Alain CAPRA (Vinci CGP)*
- 11h20 Pause

- 11h30 La réalisation de l'ouvrage  
*par Emmanuel MALECOT (CBR) et Olivier DELAUZUN (CBR)*
- 12h00 La position du Maître d'Ouvrage AREA  
*par l'intermédiaire de Jacques MARTIN (SCETAUROUTE/EGIS)*
- 12h10 Discussion  
*animée par Jacques MARTIN*
- 12h20 Visite des laboratoires Vicat  
*par Gérard CHANLIAUD (Vicat)*
- 13h00 Repas pris sur place
- 15h00 Visite du site de préfabrication à Romagnieu (usine Campenon Bernard Régions)  
*par Céline DUMONT (CBR)*
- 16h30 Fin de la journée

## Les BFUP : rappel historique

Les Bétons Fibrés à Ultra Haute Performance sont relativement récents puisque les premiers travaux de recherche datent du début des années 90. Les premiers ouvrages réalisés ont été la passerelle de Sherbrooke en 1997 en BPR, ancien nom du Ductal® (le BFUP développé par Bouygues, Lafarge et Rhodia), les ponts routiers de Bourg-Lès-Valence en 2000-2001 construits en BSI® (le BFUP développé par Eiffage et le cimentier Sika) et des applications industrielles importantes réalisées dans les centrales nucléaires EDF de Cattenom et Civaux en 1997-1998 (Ductal® et BSI®). Suite à l'ensemble de ces travaux, des recommandations concernant ces nouveaux matériaux ont été publiées par l'AFGC et le SETRA en mai 2002. Ces recommandations ont pour objectif de mettre en place un référentiel en réponse aux besoins des différents partenaires, notamment pour permettre aux futurs maîtres d'ouvrage d'avoir recourt à ces matériaux. Parues en français et en anglais, les recommandations détaillent le comportement et les caractéristiques mécaniques des BFUP, proposent des méthodes de dimensionnement des structures et explicitent les performances en terme de durabilité de ce matériau. Ce document comporte également une importante bibliographie.

Des ouvrages ont ensuite été réalisés, en France où il est possible de citer la barrière de péage du Viaduc de Millau en BSI®, le pont de Saint Pierre la Cour en Mayenne (Ductal®), un projet de dalle en BFUP pour ponts mixtes mis au point dans le cadre du projet national MIKTI, mais également à l'étranger : passerelle de la Paix à Séoul, passerelle de Sakata Mirai au Japon, station de tramways de Shawnessy au Canada,

ouvrages en Ductal® de la FHWA® aux USA, passerelle de Papatoetoe en Nouvelle Zélande...

Un cadre réglementaire se met par ailleurs en place au niveau international : un groupe de travail a été créé en 2004 au sein de la Fédération internationale du béton (*fib*). Ce groupe a pour objectif de publier des recommandations au niveau international en s'appuyant notamment sur celles parues en France. Les recommandations *fib* sont attendues pour fin 2007.



*Salle de conférence chez Vicat (Isle d'Abeau)  
Allocution d'accueil de Jacques MARTIN,  
Président de la délégation*

## CARACTERISTIQUES DU MATERIAU

Les BFUP sont caractérisés par une résistance à la compression comprise entre 150 et 250 MPa. Le Béton Composite Vicat (BCV®), résultant d'une collaboration entre le Groupe Vicat, Vinci Construction Grands Projets et Campeon Bernard Régions, offre une résistance comprise entre 130 et 150 MPa mais une résistance supérieure à 150 MPa à un an.

Le principal intérêt de ces bétons est une grande ductilité et une résistance caractéristique en traction directe de l'ordre de 8 MPa obtenue grâce à un taux élevé, 2 à 2,5% en volume, de fibres métalliques très résistantes (de 12 à 20 mm de long pour 0,2 à 0,3 mm de diamètre). Ces fibres, différentes de celles d'un béton fibré traditionnel, peuvent permettre de se passer d'armatures passives étant donné qu'elles reprennent des contraintes de traction après fissuration de la matrice cimentaire. Elles peuvent être complétées par des fibres polymères.



*Les fibres, conditionnées en sac avant d'être ajoutées  
au prémix*

## Les manifestations régionales

Les BFUP offrent des performances au jeune âge élevées et de très bonnes caractéristiques physiques.

Pour le BCV® :

- résistance aux chocs - indice CNR - de 75 cm<sup>3</sup>,
- retrait de séchage à 28 jours inférieur à 600µm/m,
- chaleur d'hydratation à 72 heures de 250 joules/g.

Outre ces caractéristiques mécaniques remarquables, les BFUP présentent une excellente durabilité, possible grâce à la grande compacité de la matrice cimentaire (rapport E/C faible, 0,25 pour le BCV®).

Il est possible de citer :

- une grande tenue à l'écaillage et au gel air /dégel eau ou gel eau / dégel eau,
- une faible perméabilité au gaz (pour le BCV®, inférieure à 10<sup>-19</sup>m<sup>2</sup>),
- une carbonatation et alcali réaction très faibles,
- une diffusion des ions chlorures faible (BCV® : 3,5.10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup>/s).

Cette durabilité est très intéressante en milieu agressif.

Le choix a été fait de ne mettre en œuvre aucun traitement thermique pour le BCV®. Un traitement thermique permet notamment d'accélérer la maturation du béton et de concentrer le fluage et le retrait essentiellement pendant la phase de traitement thermique.

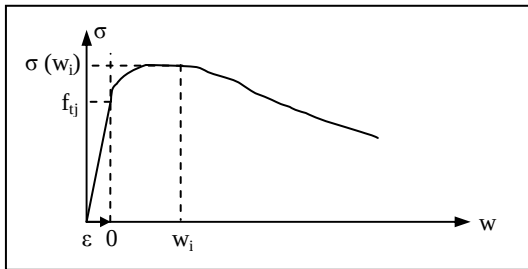
## ESSAIS DE CARACTERISATION DES BFUP

Différents essais ont été reconnus par le groupe de travail AFGC / SETRA afin de caractériser la résistance d'un BFUP. En effet, les caractéristiques de ce matériau dépendent de l'orientation des fibres donc du type de structure et de la mise en œuvre : les fibres tendent à s'orienter dans le sens de l'écoulement ou à être parallèles à la paroi au niveau des bords. On distingue les éléments minces et les éléments épais en fonction de leur portée, du rapport entre leur épaisseur et la longueur des fibres.

Les essais s'effectuent sur éprouvettes dont la taille dépend de la longueur des fibres. On peut mesurer la résistance en traction (F<sub>tj</sub>) de la matrice par un essai en traction directe ou par un essai en traction par flexion (4 points). Ces deux essais se font sur barreau non entaillé. La mesure de la résistance en traction par flexion, après fissuration, se fait sur barreau entaillé (flexion 3 points pour éléments épais). Ces essais permettent de tracer une courbe M - w et σ - w après l'utilisation de la méthode inverse.

Enfin, il est nécessaire d'appliquer des facteurs correctifs aux résultats obtenus pour tenir compte des effets d'échelle, de parois et de la mise en œuvre. Le coefficient de mise en œuvre, noté K, est défini comme le rapport des résultats moyens obtenus sur l'élément taille réelle sur la moyenne des résultats sur

éprouvettes (pour le BCV® du PS34,  $K_{global} \approx 1,5$ ). Pour tenir également compte des effets locaux, des coefficients K locaux sont définis. Ils représentent le rapport de la valeur minimale pour chaque partie de la structure sur la moyenne des résultats sur éprouvettes. Il est important de connaître la résistance en traction des fibres pour les ouvrages de faible portée, ouvrages sans précontrainte pour lesquels les efforts de traction sont entièrement repris par les fibres mais également pour l'étude de la flexion transversale des ouvrages précontraints, l'étude de la traction dans les poutres PRAD...



*Loi de comportement en traction d'un BFUP*

#### MISE EN ŒUVRE DU BCV®

Le BCV® a une matrice minérale très compacte qui résulte d'un squelette granulaire optimisé ( $D_{max}$  de l'ordre de 2 à 3 mm), d'un rapport E/C faible (0,25) et de l'ajout d'un superplastifiant très dispersant.

Le prémix, livré en big-bags, est mélangé à l'eau, aux fibres et aux adjuvants dans un malaxeur classique de centrale à béton ou de préfabrication en adoptant la charge à la puissance de l'appareil. Le temps de malaxage est amélioré par l'utilisation d'un malaxeur possédant un train-vaseur.



*Le malaxeur du site de préfabrication à Romagnieu*

Un contrôle qualité rigoureux, avec des essais plus nombreux et plus fréquents que pour un béton traditionnel, est réalisé par Sigma Béton sur chaque voussoir préfabriqué à Romagnieu. Des essais sur BCV® frais servent à contrôler la température de l'air et du

## Les manifestations régionales

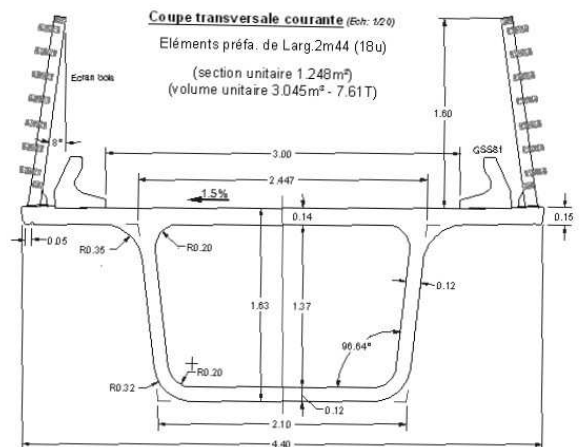
béton frais, le pourcentage d'air occlus (inférieur à 5%), la densité (inférieure à 2500 kg/m³), un test d'étalement est effectué (690 à 750 mm au cône DIN sans chocs). Un suivi de température, la maturométrie, permet de déterminer la fin de la période dormante du BCV® et donc d'estimer en temps réel le début du desserrage. Des essais sur BCV® durci sont également réalisés pour contrôler la résistance en compression et en flexion, mesurer le module d'élasticité (44GPa) et le retrait.



*Au laboratoire de Vicat : test d'étalement sur prémix non fibré, réalisé pour l'assemblé*

#### LA CONCEPTION DU PS34

Le PS34 est un ouvrage mono-travée de 48 mètres de portée, situé au dessus de l'A51. Le caisson, en BCV®, a une hauteur de 1,63 mètre pour une épaisseur de 12 à 14 cm. L'ouvrage comporte une seule voie de 3 mètres de large (classe 1). Le PS34 est destiné au passage de piétons, deux-roues et cavaliers mais il a été dimensionné avec des charges routières normales d'un ouvrage de 3<sup>ème</sup> catégorie (entretien, passage de véhicules communaux, etc...).



*Coupe transversale du PS34 de l'A51*

Lors de la conception, il est nécessaire de choisir une valeur du coefficient K en amont puisque, à ce stade, aucun élément taille réelle n'existe.



Les recommandations AFGC donnent une idée des valeurs qu'il est possible d'adopter en première hypothèse compte tenu des résultats obtenus notamment sur les ouvrages de Bourg-Lès-Valence. De ce coefficient dépend le prédimensionnement de la structure à partir duquel il est possible de réaliser un échantillon. Des essais sont réalisés à posteriori pour confirmer la valeur de ce coefficient de mise en œuvre.

Les voussoirs sur culées présentaient de fortes concentrations de contraintes de traction (liées à l'introduction de la précontrainte) sur un modèle éléments finis alors qu'un calcul manuel ne nécessitait pas de ferrailage supplémentaire. Ce voussoir est par ailleurs l'objet de gradients thermiques élevés en cours de prise. Il aurait fallu réaliser un élément test pour valider un des deux modèles mais il a été choisi de mettre directement en place un ferrailage passif pour reprendre les efforts donnés par le modèle éléments finis.

La méthode de coulage nécessite également réflexion : le coulage s'effectue verticalement en un point (au niveau du hourdis supérieur) mais la jonction des deux flux (dans le hourdis inférieur) ne se fait pas entièrement. Au niveau du front de flux, des techniques de mélange en place ont été essayées mais écartées, ne donnant pas des résultats positifs et étant difficile à mettre en œuvre, au profit d'un ferrailage de couture. Le pompage se fait avec une pompe à vis sans fin, à petit débit, régulier, pour éviter la formation de bulles d'air.

### LA PREFABRICATION DES VOUSSOIRS ET L'ASSEMBLAGE

Les 22 voussoirs, parmi lesquels deux voussoirs déviateurs, deux voussoirs sur culées et deux voussoirs garde-grève, sont préfabriqués sur le site de Romagnieu.



*Un voussoir courant à l'usine de préfabrication de Romagnieu*

Toutes les faces sont coffrées étant donné la texture du matériau et la forme des voussoirs. Un système de vérins et de bielles a été mis en place pour permettre un décoffrage aisé du coffrage central.



*Le coffrage central monolithique avec bielles*

Le rythme moyen est de 48 heures pour réaliser un voussoir. Même si le coulage est très rapide (40 minutes), la période latente du BCV® ne permet pas un rythme beaucoup plus élevé, d'autant plus qu'il faut préparer les coffrages suivants avec les joints pour le voussoir conjugué. La préfabrication a débuté par les deux voussoirs centraux. Deux postes de préfabrication ont été mis en place dans l'usine : le premier voussoir central est coulé sur un poste, le deuxième sur l'autre poste, puis les voussoirs conjugués sont coulés alternativement (un seul coffrage existe) à la verticale du premier voussoir et ainsi de suite jusqu'aux culées.



*Deux voussoirs conjugués sur un poste de préfabrication*

Les parements des voussoirs du PS34 sont innovants aussi bien en terme de couleur qu'en texture mais surtout par l'absence de revêtements sur le hourdis supérieur. Une matrice imitation bois a été choisie pour les âmes et le hourdis inférieur et un aspect granuleux pour le hourdis supérieur qui fera directement office de chaussée sans étanchéité ni revêtement supplémentaire. La matrice polypropylène est recouverte de cire pour permettre un décoffrage aisé.

Les BFUP donnent des états de surface remarquables si le coffrage est sans défaut. Mais il est difficile d'obtenir un parement parfait avec une matrice car la moindre imperfection au niveau de la matrice se retrouve sur le voussoir étant donné que les BFUP reproduisent fidèlement les plus petits détails.



*La matrice (à gauche) et le voussoir (à droite)*

Après l'étape de la préfabrication, les voussoirs vont être transportés sur le site, assemblés sur place, au sol, avec la mise en œuvre de la précontrainte définitive extérieure au béton (6 câbles 19T15). Puis, l'ouvrage ainsi assemblé sera mis en place à la grue en une seule phase de levage et de rotation sur des appuis provisoires. Ce système évite l'utilisation d'étais et le travail en hauteur mais n'est envisageable que si l'ouvrage est suffisamment léger (ce qui est le cas pour le PS34 avec ses 195 tonnes). Il faut noter que la section du tablier a été réalisée comme si l'ouvrage n'était pas déversé, c'est seulement lors de sa pose sur les appareils d'appuis définitifs qu'il respectera le dévers transversal de 1,5%. Hors conférence, cette mise en place s'est déroulée le 15 décembre 2005, avec une grande manifestation de communication nationale (presses techniques, presses régionales et télévisées), dont la présence de la neige n'a pas gêné le bon déroulement ! L'imposante grue de manutention affichait une capacité de levage de 900t (peu d'exemplaires de ce modèle existent à l'échelon européen) et l'opération technique et remarquable s'est déroulée à la perfection.



*Les partenaires de la manifestation du 15/12/2005*



*Le démarrage de l'opération, la grue en action*



*Après la phase de rotation*



*La mise sur appuis provisoires*

### LES ATOUTS D'UNE SOLUTION BFUP ET LES PERSPECTIVES POUR CE MATERIAU

Le Maître d'Ouvrage du PS34, AREA et son Maître d'œuvre SCETAUROUTE, ont accepté la proposition de l'entreprise de réaliser l'ouvrage en Béton Fibré Ultra Performant sous réserve que cette solution n'entraîne ni surcoût ni délai supplémentaire et qu'un contrôle externe du groupement Vinci/VICAT soit réalisé par le CETE DOA de Lyon.

Les BFUP rendent possible la conception d'ouvrages plus élancés avec des portées plus grandes donc moins d'appuis, ce qui peut être avantageux dans une perspective d'élargissement de la route. Le BFUP a également permis un gain de matière (section de caisson BFUP plus de 3 fois plus faible qu'une section classique pour le PS34) qui s'accompagne d'un gain de charges permanentes. Cette diminution de poids propre peut être très avantageuse lorsque la nature du sol nécessite des fondations profondes. Mais les BFUP ne sont pas obligatoirement mis en œuvre sur l'ensemble d'un ouvrage. Il peut être, dans certains cas, plus judicieux de les utiliser en complément d'un béton classique sur des zones bien précises d'un ouvrage (zones en contact avec l'extérieur, zones exposées à un milieu agressif).

L'absence ou la diminution du nombre d'armatures d'acier facilitent l'exécution et aboutissent à un gain de temps. La préfabrication permet de limiter

l'intervention sur le site et l'assemblage au sol d'avoir un chantier plus sécurisé sans travail en hauteur.

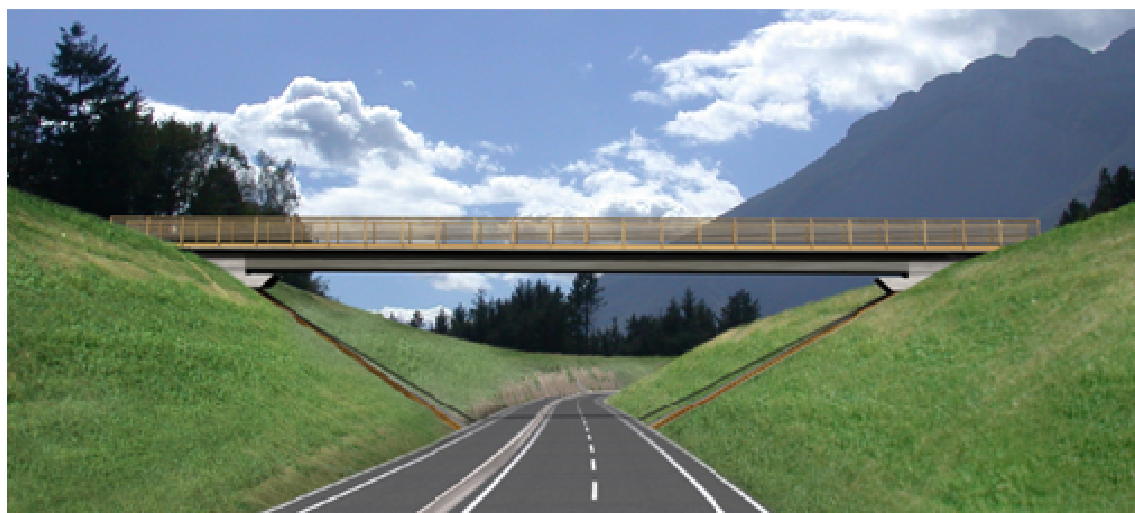
De plus, la durabilité du matériau (notamment sa faible porosité et perméabilité) donne la possibilité de limiter les superstructures (pas d'étanchéité, ni de chaussée sur le PS34) et diminue les coûts de maintenance. Les différentes possibilités de parement (liberté de formes, aspects de surface...) et leur qualité permettent de s'intégrer dans l'environnement, par exemple dans un paysage naturel : l'ouvrage de l'A51 est à l'entrée du Vercors dans le sens Grenoble=>Sisteron et le Trièves dans l'autre sens. Enfin, les BFUP offrent une pérennité bien supérieure à celle d'un béton classique.

En conclusion, avec la réalisation du PS34, un troisième BFUP, le BCV®, acquiert une expérience solide qui devrait renforcer le développement de ces matériaux dans les années à venir.

Il est important de noter que cet ouvrage a reçu le prix spécial en régional et le prix matériaux en national lors des jurys des prix de l'innovation du groupe VINCI 2005.

*Compte-rendu rédigé par Amandine CHAMBOSSE  
élève de 4<sup>ème</sup> année à l'INSA GCU de Lyon  
et complété par Jacques MARTIN (AFGC-RA)*

Crédits photos : SCETAUROUTE, CETE DOA Lyon, CBR, Amandine CHAMBOSSE.



*Photomontage du PS 34*