

DERNIERS DÉVELOPPEMENTS DANS L'UTILISATION DES BÉTONS FIBRÉS ULTRA PERFORMANTS EN FRANCE

Sébastien BOUTEILLE, Jacques RESPLENDINO

Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) - Lyon

1. RÉSUMÉ

Le présent article présente des travaux de recherche et des structures en cours de réalisation en France, qui mettent en évidence la volonté d'innover en utilisant au mieux les possibilités techniques offertes par les Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP). Les concepteurs ont cherché à améliorer la préfabrication et/ou l'industrialisation des procédés de construction, ainsi que la pérennité des ouvrages.

Le premier projet est réalisé dans le cadre des Projets Nationaux BEFIM concernant les bétons de fibres métalliques et MIKTI consacré aux structures mixtes acier-béton. Un groupe de travail issu du groupe de travail AFGC SETRA sur les BFUP a mis au point un projet de dalle mixte en BFUP. L'article présente les principaux éléments de cette conception, ainsi que le programme expérimental de validation en cours de réalisation au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Sont présentés ensuite deux ponts routiers en cours de construction en France en 2005 :

- un pont à poutres précontraintes en BFUP surmontées par une dalle en béton armé ordinaire coulée sur des pré-dalles en BFUP,
- un passage supérieur sur autoroute de type poutre caisson précontrainte réalisée en BFUP.

L'article se termine par une présentation de la réalisation de la couverture de la gare de péage de Millau, qui constitue un des chantiers de BFUP les plus importants en volume et en complexité jamais réalisés.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL SUR UNE DALLE ORTHOTROPE EN BFUP

2.1. Présentation de l'ouvrage

L'ouvrage étudié comporte trois travées : 90 m – 130 m – 90 m. Il s'agit d'un bi poutre mixte à entretoises de 11 mètres de largeur utile. Les poutres sont espacées transversalement de 6,50 m (fig 1). La dalle est nervurée dans les deux directions. Elle est constituée d'éléments préfabriqués en BFUP de 2,50 mètres de longueur, 12 mètres de largeur (fig 2), précontraints dans les deux directions.

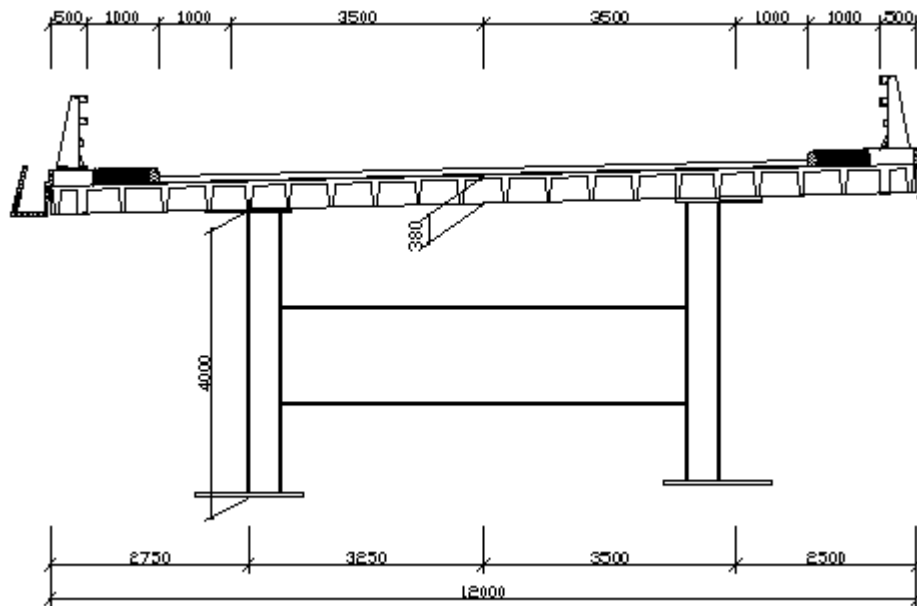


Figure 1 – Coupe transversale de l'ouvrage

Le phasage d'exécution prévoit successivement :

- le positionnement des éléments de dalle sur la charpente,
- la réalisation des connexions entre les éléments préfabriqués par des joints matés,
- la mise en précontrainte longitudinale de l'ensemble des éléments de dalle,
- la connexion de la dalle à la charpente,
- des dénivellations sur les appuis intermédiaires afin d'augmenter la compression dans la dalle.

Contrairement à ce que l'on constate pour les bétons traditionnels, le fluage et le retrait de dessiccation très faibles des BFUP rendent extrêmement efficace et intéressant la mise en précontrainte d'une dalle mixte avant connexion, ainsi que les opérations de dénivellations d'appuis après connexion à la charpente. L'intérêt de ce type de structure est de permettre une conception qui garantisse l'absence totale de fissuration de la dalle réalisée avec un matériau aux performances de durabilité par ailleurs tout à fait exceptionnelles.

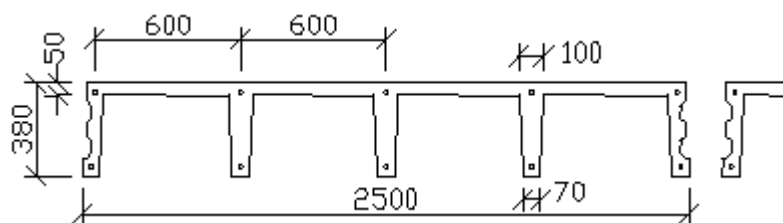


Figure 2 – Coupe longitudinale d'un élément préfabriqué de dalle

2.1.1. Flexion transversale et locale

L'étude sous l'action des charges locales a conduit à proposer une dalle de 5 cm d'épaisseur raidie dans les deux directions par des nervures qui conduisent à une hauteur totale constante de 38 cm. Ces nervures sont espacées d'environ 60 cm dans les deux directions.

La précontrainte transversale est réalisée par un câblage prétendu rectiligne constitué de deux unités T15S par nervure, le câble inférieur étant gainé dans les zones de moments transversaux négatifs (fig 3).

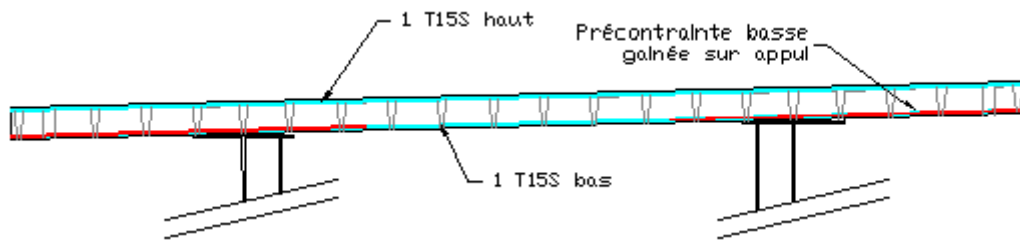


Figure 3 – Câblage transversal d'une nervure

2.1.2. Flexion longitudinale

Le calcul en flexion longitudinale a fait l'objet d'un calcul à court et à long terme en adaptant les hypothèses en fonction des caractéristiques mécaniques spécifiques des BFUP, qui varient suivant la présence ou non d'un traitement thermique.

En prenant l'hypothèse la plus défavorable d'un BFUP sans traitement thermique, la recherche d'une compression minimale résiduelle aux Etats Limites de Service sur appuis conduit à un câblage longitudinal constitué de $4 \times 7T15S$ sur chaque encorbellement, et $9 \times 7T15S$ en travée centrale (fig 4). Ce câblage est extérieur, disposé entre les nervures longitudinales. Il est filant tout le long de l'ouvrage afin de faciliter la conception des ancrages

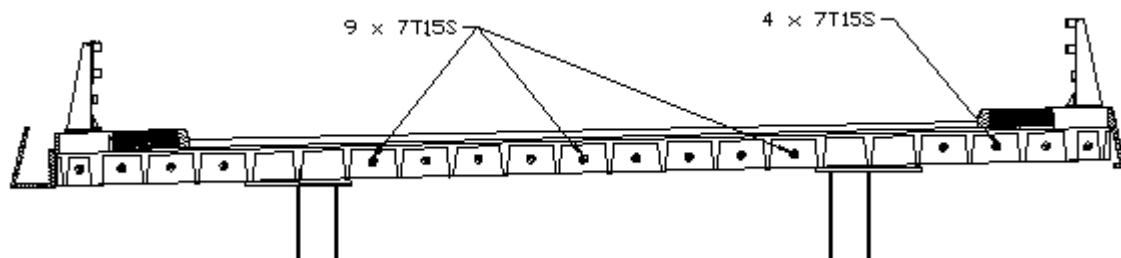


Figure 4 – Précontrainte longitudinale

2.1.3. Ancrage du dispositif de retenu

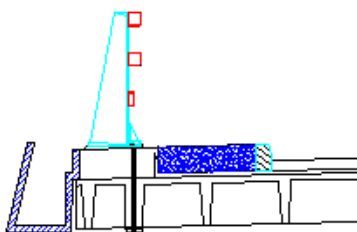


Figure 5 – Principe des ancrages de BN4

Le problème majeur soulevé par les différentes solutions étudiées est la liaison de la longrine d'ancrage de la BN4 à la dalle BFUP qui doit rester dans le cadre réglementaire de l'implantation des barrières de sécurité. La solution retenue est un ancrage précontraint de barrière métallique de type P conforme au Guide Technique GC – barrières de sécurité pour la retenue des poids lourds (fig 5).

2.1.4. Clavages entre les éléments préfabriqués et connexion de la dalle à la charpente métallique

Après études de différentes possibilités de fonctionnement, le groupe de travail du PN MIKTI a retenu une liaison de type joints matés entre les éléments préfabriqués et une connexion de la dalle à la charpente métallique par injection d'un mortier C80 entre les nervures longitudinales situées au-dessus des poutres métalliques (fig 6).

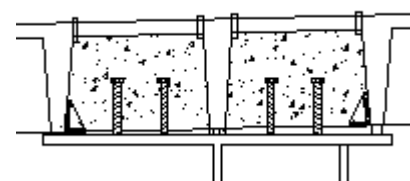


Figure 6 – Connexion dalle charpente

2.2. Programme d'essais en cours au LCPC

2.2.1. Objectif du projet expérimental

Un programme expérimental a été mis au point par le groupe de travail afin de valider la résistance locale en fatigue et à rupture la dalle, la résistance de la connexion à la charpente, ainsi que la résistance de la dalle vis-à-vis des efforts apportés par les dispositifs de retenu [7]. Le programme prévoit par ailleurs la réalisation d'essais de validation de dispositifs d'ancrage de précontrainte de taille adaptée aux performances des BFUP.

Les épreuves sur les éléments de dalles nervurés concernent en particulier :

- des essais de flexion locale en fatigue à proximité ou non du joint maté entre deux éléments,
- des essais de ruine locale menés sur le même principe que l'essai précédent (fig 7),
- un essai statique de rupture d'un montant de dispositif de retenu (fig 8).

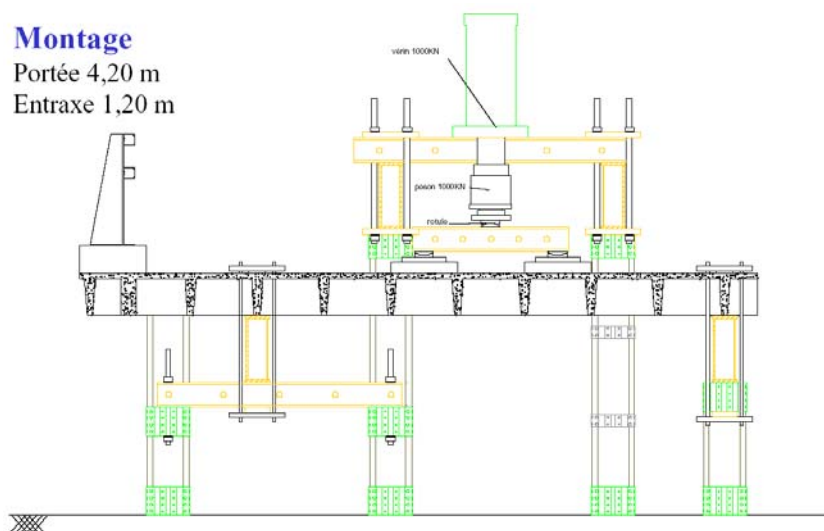


Figure 7 – Bâti pour les essais de flexion

Les essais sur des corps d'épreuves spécifiques :

- un essai de push-out sur les connecteurs,
- des essais de validation d'ancrages de précontrainte de taille réduite adaptée au BFUP (4T15S, 7T15S, 15T15S).

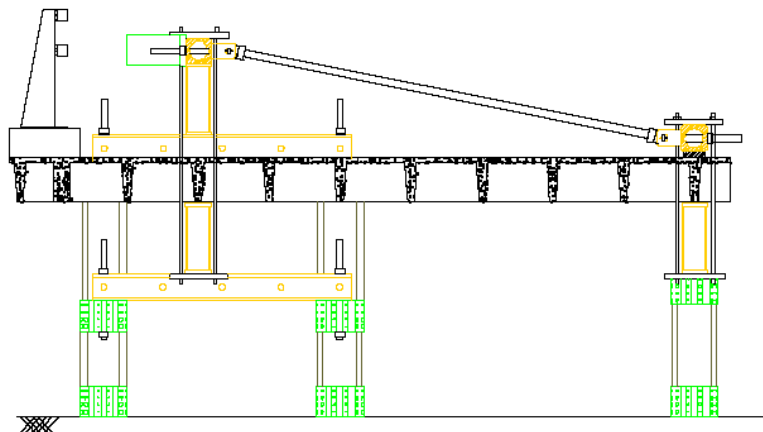


Figure 8 – Bâti pour essai de rupture du dispositif de retenu

Des calculs complémentaires aux éléments finis ont été menés durant l'élaboration du programme par le SETRA (S.Brisard) et le LCPC (L.Sorelli) pour appréhender au mieux les effets de flexion locale engendré par les essieux et étudier le comportement post pic des matériaux.

2.2.2. Fabrication des corps d'épreuves et dispositif d'essai



Photo 1 – Dalle d'essai Ductal® en cours de bétonnage.

Deux éléments de dalles nervurées d'environ 6 tonnes chacun ont été fabriqués à l'usine de préfabrication Hurks Béton située à Eindhoven en Hollande (photo 1). Ces éléments ont été réalisés en BSI®, le BFUP développé par le groupe Eiffage et la société Sika, et en Ductal® le BFUP développé par le cimentier Lafarge et les groupes Bouygues et Rhodia. Ces deux éléments ont été clavés et assemblés par post-tension pour simuler la compression longitudinale minimale résiduelle en service.

Les corps d'épreuves associés à la caractérisation des matériaux ont également été réalisés à cette occasion (photo 2).



Photo 2 - Coulage d'une alvéole

Suite à la réception des corps d'épreuve fin juin 2004 le LCPC a réalisé les opérations suivantes :

- Assemblage des deux corps d'épreuve sur le banc d'essais (photos 3 et 4),
- Clavage en BFUP BSI® (photo 5),
- Mise en tension de la précontrainte longitudinale,
- Ferraillage puis bétonnage de la longrine de BN4.

Dispositif d'essai mis en place au LCPC

Photo n°3 - Corps d'épreuve vu de dessous

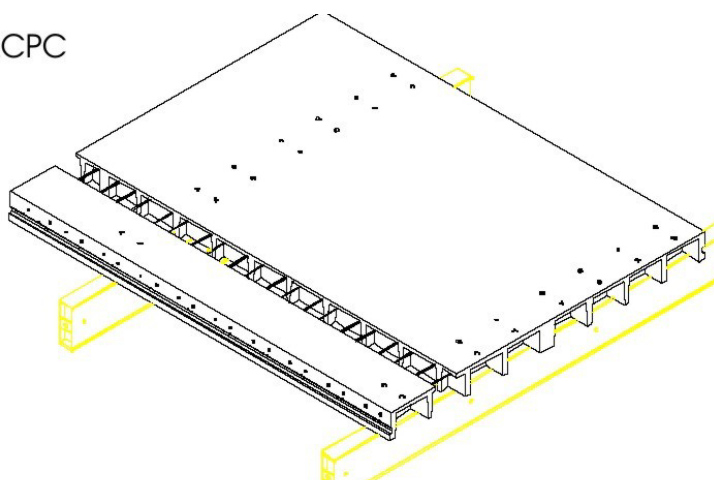


Photo n°4 - Mise en place des deux corps d'épreuve

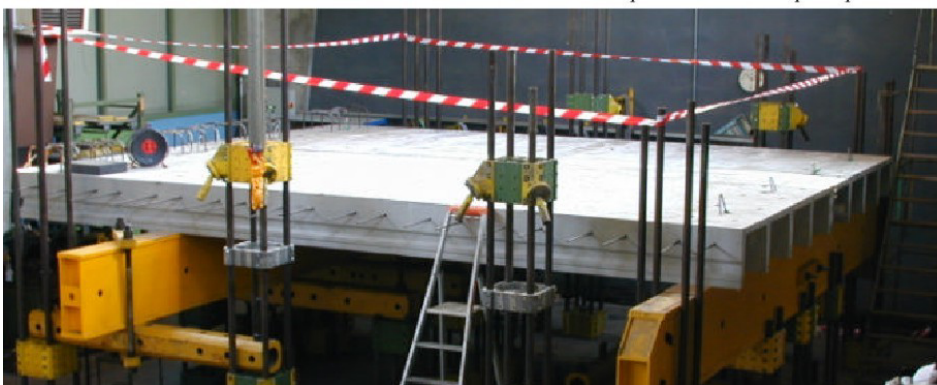


Photo n°5 - Clavage en BSI



2.2.3. Premiers résultats d'essais

Les essais de flexion ont démarré au mois d'avril 2005. Les premiers résultats seront connus à l'automne 2005.

3. EXÉCUTION D'UN PASSAGE SUPERIEUR AVEC DES POUTRES DE TYPE PRAD EN DUCTAL®

3.1. Présentation de l'opération

L'ouvrage est situé au droit du franchissement d'un embranchement ferroviaire par le contournement de Saint Pierre la Cour (Mayenne).

Il est construit par le groupement d'entreprises Quille (groupe Bouygues TP) pour le compte de Lafarge Ciment, Maître d'ouvrage.

La conception est réalisée par l'entreprise VSL, et le bureau d'études de Bouygues TP. Le CETE de Lyon effectue une mission de contrôle extérieur des parties d'ouvrage réalisées en BFUP.

L'ensemble des éléments préfabriqués en BFUP est réalisé par l'entreprise CPC dans son usine de Brive.

3.2. Caractéristiques générales de l'ouvrage

Il s'agit d'un pont routier isostatique de 19 m de portée, de 12,60 m de largeur, présentant un biais de 60 grades. L'ouvrage supporte une chaussée de 7,60 m, un trottoir de 1,25 m et une piste cyclable de 2,50 m. La chaussée d'épaisseur très importante est constituée d'une couche de GB3 d'épaisseur minimale 9 cm supportant une couche de 15 cm de Béton Auto Compacté et un revêtement BBTM de 2,5 cm.

Le tablier est constitué de poutres préfabriquées précontraintes par prétension en Ductal[®], connectées à une dalle en béton armé ordinaire coulé sur des prédalles en Ductal[®] (fig 9).

L'intérêt de la conception est d'une part de permettre un allégement de la structure en augmentant les élancements des poutres par rapport à une solution traditionnelle, d'autre part d'utiliser pleinement le BFUP pour ses performances en terme 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).

L'ensemble des hypothèses sur les matériaux et le dimensionnement de l'ouvrage sont conformes aux règlements français en vigueur et respectent les recommandations provisoires AFGC-SETRA sur les Bétons Ultra Performants.

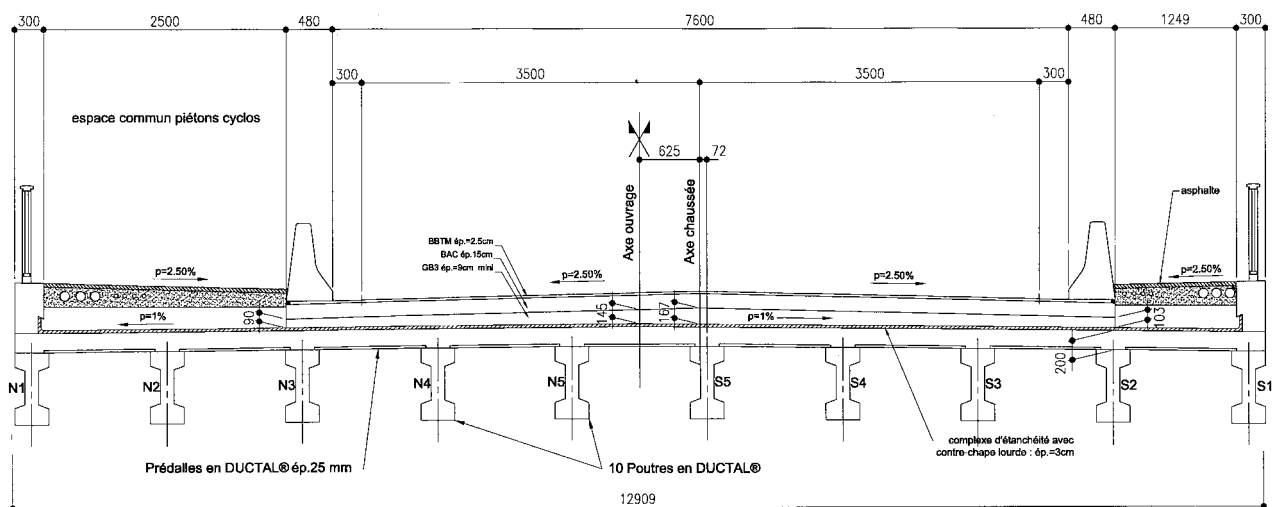


Figure 9 – Coupe transversale de l'ouvrage

3.3. Épreuves préalables à l'exécution : caractérisation du matériau

Les hypothèses générales concernant le matériau Ductal[®] ont été validées par les essais de convenances présentés ci-après, réalisés conformément aux dispositions des recommandations AFGC-SETRA sur les BFUP [1], [2], [3].

Outre les éprouvettes de caractérisation pour les éléments de poutres et les éléments de dalle mince les corps d'épreuves suivants ont été réalisés :

- un élément de poutre de 3m de long pour la détermination du coefficient K,
- un élément de pré-dalle de dimension réelle de 25mm d'épaisseur,
- un élément de pré-dalle de dimension réelle de 30 mm d'épaisseur.

L'ensemble corps d'épreuve a été confectionné dans les conditions d'exécution de l'ouvrage chez le préfabricant CPC à savoir :

- Coulage dans l'usine de préfabrication
- Cure de la poutre dans le coffrage à 40°C pendant 18 heures
- Traitement thermique par étuvage à une température entre 80° et 90°C et HR>90% durant 48h

Les différents essais ont été réalisés par le Laboratoire Central de Recherche de Lafarge de Saint Quentin Fallavier (Isère).

3.3.1. Essais de flexion 4 points : contrainte de première fissuration

Les essais de flexions 4 points sont réalisés sur 6 éprouvettes de dimensions 7x7x28.

Ces essais pilotés en déplacement ont donné les résultats indiqués sur les courbes ci-contre (fig 10).

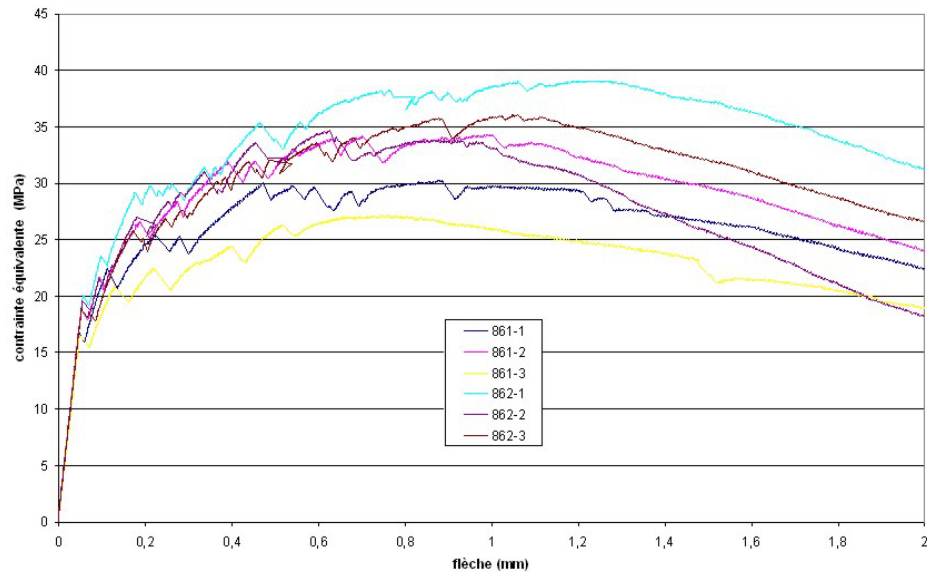


Figure 10 – F_{tj} – Résultats flexion 4 points ➤

La contrainte de flexion caractéristique de première fissuration est de 16 MPa. La prise en compte de l'effet d'échelle (facteur de 0,609 pour une section de 7x7) conduit à une résistance caractéristique en traction directe de 9,7 MPa.

3.3.2. Essais de flexion 3 points : détermination de la résistance post fissuration

Les essais de flexions 3 points ont été réalisés sur 5 éprouvettes entaillées de dimensions 7x7x28 (fig 11).

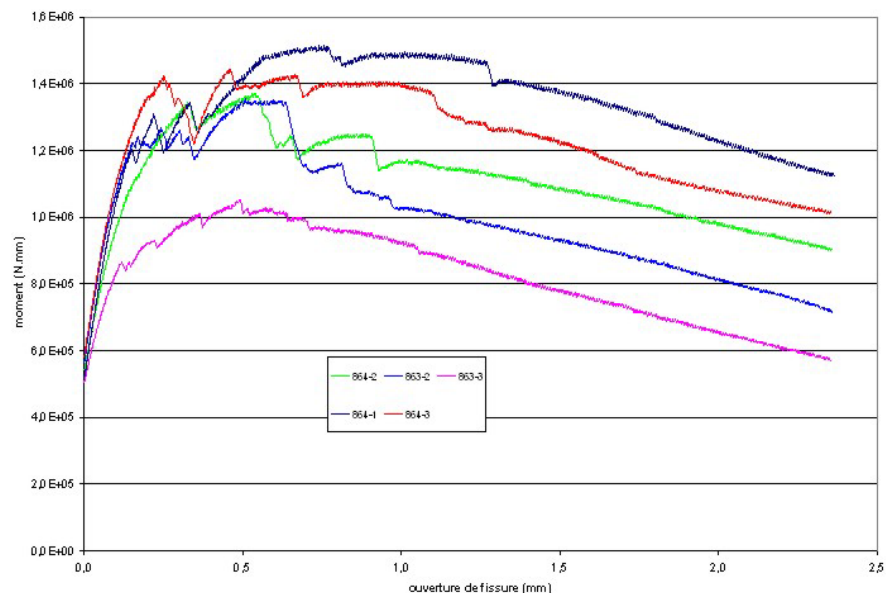


Figure 11 - obt – Résultats flexion 3 points ➤

L'application de l'analyse inverse de ces courbes permet d'extraire le comportement moyen post fissuration des échantillons, et conduit à une contrainte caractéristique à 0,3 mm d'ouverture de fissure égale à 7,5 MPa, une contrainte caractéristique à 1%.h d'ouverture égale à 7,5 MPa.

La loi de comportement caractéristique en traction directe du Ductal® est alors linéarisée par segments, et écartée à 7,5 MPa pour tenir compte du comportement adoucissant du matériau.

3.3.3. Essais de convenance sur l'élément de poutre de 3 m (calcul du coefficient K)

L'élément témoin de poutre a été fabriqué par CPC courant novembre 2004. Par défaut de disponibilité du banc de précontrainte cet élément témoin n'a pas été précontraint mais on a disposé des barres d'aciers d'un diamètre identique aux torons prévus (photo 6).



Photo 6 – Élément de poutre témoin

Cet essai n'a ainsi pas permis d'apprécier les phénomènes de diffusion de précontrainte, mais a été représentatif en ce qui concerne la caractérisation du BFUP et la détermination du facteur K d'orientation des fibres déterminé conformément aux recommandations sur les BFUP [2], et aux dispositions retenues lors des ouvrages de Bourg Lès Valence ([4], [5], [6]). Ce coefficient a été calculé à partir des résultats d'essais obtenus sur les prélèvements représentés sur la figure 12.

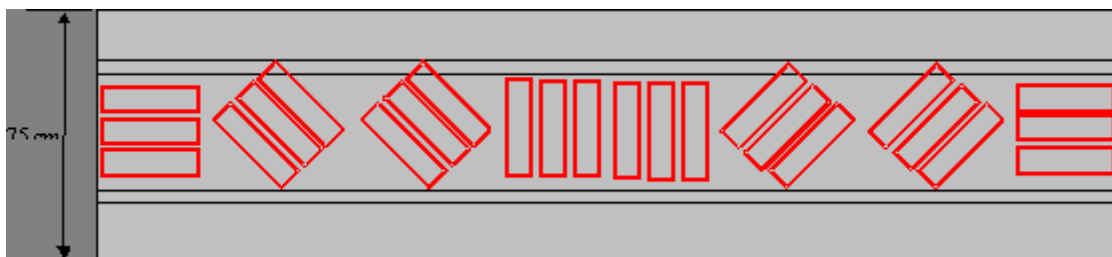


Figure 12 – Prélèvements sur l'élément témoin

Les essais sur prélèvements de l'élément témoin ont conduit aux résultats suivants :

- $K=1,34$ pour le cisaillement et les efforts généraux,
- $K=1,81$ pour les justifications locales de diffusion de précontrainte.

L'essai a par ailleurs permis d'affiner les dispositions prévues pour la mise en œuvre du béton.

3.3.4. Essais sur dalles minces

Des essais de flexion 4 points ont été réalisés sur deux épaisseurs de plaque (25 et 30 mm) en prélevant des éprouvettes dans les corps d'épreuves (photos 7 et 8) conformément aux dispositions des recommandations AFGC-SETRA concernant les éléments minces. Ces essais ont permis de confirmer que l'épaisseur de 25 mm était admissible avec une contrainte caractéristique de traction équivalente à la rupture de 15,5 MPa.

Des essais laboratoire sur un béton d'étude ont également été réalisés. Les contraintes homogénéisées obtenues sont sensiblement supérieures aux résultats des essais de convenance.

Pour des épaisseurs de plaques de 25, 30, 35 mm les contraintes caractéristiques sont respectivement : 23.7, 26.6 et 16.2 MPa. Cette différence s'explique vraisemblablement par la méthode de coulage réalisée à partir d'un côté sur plan incliné pour les éprouvettes laboratoires ce qui favorise l'orientation des fibres.



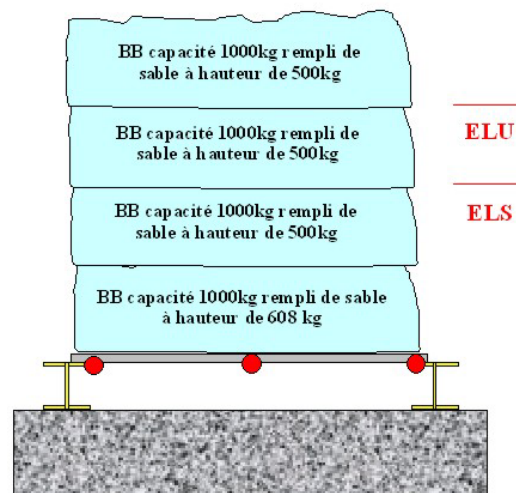
Photo 7 - Coulage de l'élément témoin de pré-dalle rectangulaire *Photo 8 - Élément témoin de pré-dalle biaise*

Outre les essais de caractérisation sur les prélèvements, les pré-dalles de 25 mm d'épaisseur ont subi une épreuve de chargement réelle à l'usine de préfabrication CPC (fig 13) avec les résultats suivants :

Cas de charge	Mesure de la Flèche
ELS (1108kg)	7 mm
Déchargement	Pas de flèche résiduelle
ELU (1608kg)	18 mm

Rupture obtenue pour le chargement présenté ci-contre.

Figure 13 – Dispositif d'essais de chargement des pré-dalles ➤

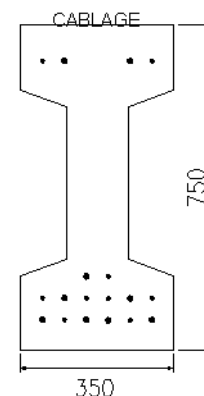


3.4. Dimensionnement du tablier de l'ouvrage

La flexion générale de l'ouvrage a été étudiée à l'aide d'un modèle grille de poutre 3D complété par l'utilisation d'un logiciel prenant en compte la loi de comportement non linéaire du Ductal® établie suite aux essais de convenance.

Chaque poutre comporte 14 torons T15S dans le talon et 4 torons en partie haute de la poutre (fig 14).

Figure 14 – Coupe transversale d'une poutre ➤



L'étude de la diffusion locale de précontrainte aux abouts a permis de définir trois sections successives d'ancrage des torons avec des longueurs de gainage de un ou deux mètres suivant les torons, ainsi qu'une résistance minimale à la compression de 80 MPa pour la mise en tension des câbles.

Les aciers de connexion poutre dalle en béton traditionnel sont réalisés à l'aide de cages d'armature pré-assemblées sur une longueur d'environ 2,00 m. (fig 15 et 16)

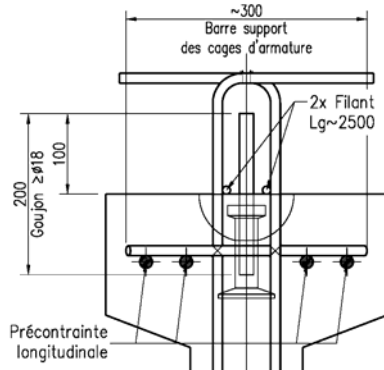


Figure 15 – Conception des connecteurs

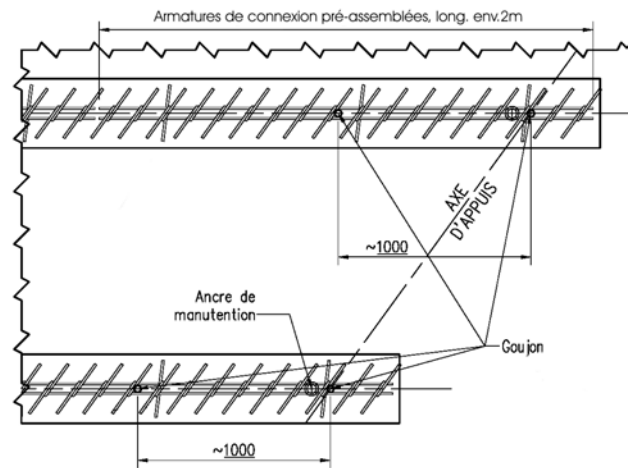


Figure 16 – Conception des connecteurs

Le dimensionnement de l'ouvrage a été l'objet d'une attention particulière sur la torsion induite dans les poutres du fait du biais prononcé du tablier, et de l'absence d'entretoises sur culées. Le dispositif de stabilisation provisoire des poutres en phase de bétonnage a fait l'objet d'une conception spécifique visant à limiter toute torsion dans les poutres sous le poids du béton frais.

3.5. Préfabrication poutres et pré-dalles

La préfabrication des prédalles (photos 9) est intervenue en mars 2005.



Photos 9 – Coulage des prédalles

Des inserts permettent le transport et le stockage de éléments (photos 10).



Photos 10 – Manutention des prédalles

Le coulage des poutres s'est effectué à la goulotte par passes horizontales successives afin de limiter les écoulements (photos 11).

Les coffrages sont calorifugés afin de garantir une température d'environ 40°C jusqu'à la prise du béton. Une fois les câbles tendus et les poutres décoffrées, le traitement thermique est réalisé par bâchage des poutres sous une atmosphère saturée en humidité et une température comprise entre 80 et 90°C.



Photos 11 – Coulage des poutres

Sur site, les poutres sont mises en œuvre de façon traditionnelle à la grue (photos 12). La conception de l'ouvrage permet une réalisation du tablier dans des délais réduits, et limite la gêne au trafic sous l'ouvrage : pose des poutres, des pré dalles coffrantes, mise en œuvre du ferrailage et bétonnage sous la protection des prédalles..



Photos 12 – Mise en place des poutres à la grue

4. PASSAGE SUPÉRIEUR SUR L'AUTOROUTE A51, RÉALISÉ EN CAISSON PRÉCONTRAIT EN BCV®

4.1. Présentation de l'opération

Cet ouvrage est le passage supérieur n°34 dit 'Cr de la Chabotte' du projet autoroutier A51, Section Coynelle/Col du Fau. Il est réalisé en BCV®, le BFUP développé par le cimentier Vicat et le groupe Vinci. Il est construit par l'entreprise Campenon Bernard Régions (groupe Vinci) pour le compte de la société AREA maître d'ouvrage, assistée par le bureau d'ingénierie SCETAUROUTE maître d'œuvre et qui assure l'assistance au maître d'ouvrage pour cet ouvrage.

L'ensemble du projet fait l'objet d'un contrôle externe par le CETE de Lyon.

4.2. Description générale de l'ouvrage

L'ouvrage est un pont routier isostatique de 47,40 m de portée, de type caisson en béton précontraint (fig 17).



Figure 17 - Élévation générale de l'ouvrage

Il supporte une chaussée de troisième classe de trois mètres de largeur utile.

Le caisson a une hauteur constante égale à 1,60 m.

Le hourdis supérieur a une largeur totale de 4,40 m et une épaisseur constante égale à 14 cm. Les âmes et le hourdis inférieur ont une épaisseur constante égale à 12 cm (ig 15).

Aucune armature passive ou active n'arme les voussoirs en BFUP qui sont précontraints longitudinalement par une précontrainte extérieure filante réalisée au moyen de 6 câbles de type 19 T15S.

Le tablier est réalisé au moyen de 22 voussoirs préfabriqués réalisés à joints conjugués collés :

- 18 voussoirs courants ont une longueur de 2,44 m,
- les déviateurs de la précontrainte extérieure sont réalisés au moyen de deux voussoirs spéciaux de 0,50 m de longueur,
- les voussoirs d'about sur culée de 2,04 m de longueur ont une géométrie spécifique permettant d'assurer l'ancrage des câbles de précontrainte extérieure.

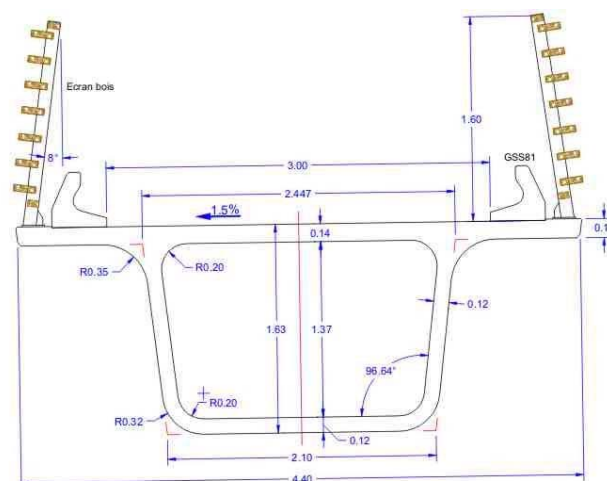


Figure 18 – Section transversale de l'ouvrage

Concernant les équipements, l'ouvrage est bordée par deux séries de bordures GSS81 complétées par des écrans en bois assurant la protection visuelle nécessaire au passage des cavaliers et du bétail qui empruntent le chemin rural.

Profitant des performances remarquables du BCV® en terme de durabilité, et du fait que les joints conjugués collés entre les éléments sont très fortement comprimés, il est prévu de ne mettre en œuvre ni étanchéité ni couche de roulement sur l'ouvrage, ce qui est une première pour un pont routier en France.

L'extrados de l'ouvrage est pour cela coffré avec une matrice spéciale procurant une grande rugosité nécessaire pour assurer l'adhérence des véhicules.

Les garde-grèves sont des faux voussoirs prolongeant la forme du caisson jusqu'à rencontrer le talus. Ceux-ci restent démontables pour permettre une intervention ultérieure sur la précontrainte et une visitabilité de l'intérieur du caisson malgré sa hauteur réduite.

4.3. Fabrication de l'ouvrage

Les voussoirs sont réalisés dans l'usine de préfabrication de l'entreprise Campenon Bernard Régions à Romagnieu (Isère) qui est équipée d'une unité de malaxage de grande puissance spécialement adaptée aux BFUP.

Chaque voussoir est coulé verticalement sur le voussoir adjacent.

La fabrication commence par le voussoir situé au centre de l'ouvrage, ce qui permet de progresser vers les voussoirs d'extrémité avec deux postes de bétonnage distincts.

Après la préfabrication, les voussoirs sont amenés sur le site sur une plateforme d'assemblage préparée le long de la plateforme autoroutière. Ils sont collés et assemblés entre eux, au sol, par une précontrainte provisoire, puis après est mise en œuvre la précontrainte définitive.

L'ensemble de l'ouvrage (soit 192 T) est levé par une grue treillis et posé sur ses appuis en une seule opération, minimisant ainsi l'impact sur la plateforme, les appuis ayant été préalablement réalisés.

Les seules opérations restant alors sont le calage supérieur des appareils d'appuis par injection de BCV, les joints de chaussée, le collage des bordures et la pose des écrans.

4.4. Intérêt de la solution en BFUP

Par rapport à un PS classique, la solution en BCV® procure un gain important sur les matériaux (80 m³ de BCV® au lieu de 200 m³ de béton B35). Cette solution permet de supprimer les deux piles intermédiaires qui posaient un réel problème esthétique compte tenu de la brèche.

La réalisation de l'ouvrage est par ailleurs sécurisée avec la suppression de tous les étalements et les problèmes classiques de sécurisation au montage / démontage.

Au niveau économique, cette solution devient intéressante si on amortit les outils coffrant de la préfabrication sur deux ou trois ouvrages du même type, ce qui permet par ailleurs de baisser le coût du matériau employé dans une logique de production industrielle..

Le dernier intérêt est bien sûr le délai d'exécution qui est réduit de plus d'un mois par rapport à un PS classique.

4.5. Dimensionnement de l'ouvrage

Le dimensionnement du tablier réalisé par le Bureau d'Etude Vinci construction grands projets est conforme aux Recommandations de l'AFGC [2]. Il intègre les justifications suivantes :

- calcul en flexion longitudinale
- effort tranchant
- ancrage de la barrière
- justifications locales (Déviateur, Voussoirs Sur Culée).

Le dimensionnement dans le cadre des études d'exécution est réalisé par le bureau d'étude COGECI (Lyon). L'ouvrage a fait l'objet d'une modélisation spatiale complète aux éléments finis.

4.6. Caractérisation du matériau

Les épreuves d'études et de convenance sont en cours de réalisation au printemps 2005.

Au niveau des épreuves de convenance, l'entreprise a engagé une campagne importante pour valider les diverses formulations possibles, les méthodes de mise en oeuvre du béton (à la goulotte fixe ou mobile, à la pompe), et ainsi pouvoir déterminer le coefficient d'orientation K des fibres, et valider les matrices de coffrage envisageables pour les divers parements.

Dans l'attente de la confection des coffrages définitifs, plusieurs mini voussoirs d'essais de petite dimension ont été réalisés, ainsi que divers panneaux permettant de tester les matrices de coffrage. Deux voussoirs d'essai de grandeur réelle sont ensuite confectionnés pour déterminer la valeur du coefficient K à prendre en compte dans les calculs.

La synthèse de l'ensemble de ces études qui sont en cours de réalisation ne peut pas être présentée dans le cadre de cet article, et fera l'objet de publications ultérieures.

5. LA GARE DE PÉAGE DU VIADUC DE MILLAU, EN BSI®

La coque mince de la gare de péage du viaduc de Millau est réalisée en BSI®, le Béton Fibré Ultra-Performant développé par le groupe Eiffage et la société Sika.

Située à 6km environ au nord du viaduc, dans un site naturel exceptionnel, la conception de la gare de péage a été guidée par la volonté d'une part de créer un signal fort pour l'utilisateur de l'A75, d'autre part de mettre en évidence les nouvelles possibilités offertes par les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP).

L'architecte Michel HERBERT s'est ainsi inspiré du caractère aérien du site et a dessiné une feuille flottant au-dessus des Causses, dont la section transversale caissonnée n'est pas sans rappeler la forme des voiles de parapentes qui survolent la région.

5.1. Description de l'ouvrage

L'ouvrage mesure 98 m de long pour 28 m de large. Sa géométrie est une forme gauche à génératrices hélicoïdales. Il repose sur 48 poteaux métalliques répartis en 4 files (photo 13).

La coque est constituée de deux hourdis minces de 10 cm d'épaisseur reliés par 12 âmes-poutres précontraintes longitudinalement par post tension. Hormis les zones sur appuis l'ensemble de la structure est alvéolé, et présente une épaisseur maximale de 85 cm.

La structure a été construite selon la méthode des voussoirs préfabriqués à joints conjugués collés (53 au total), assemblés sur un cintre par une précontrainte longitudinale.

Pour confectionner l'ensemble des éléments (53 au total) avec un seul moule, le choix s'est porté sur un moule gauche unique avec une préfabrication en conjugaison verticale.



Photo 13 : Vue d'ensemble de l'ouvrage

5.2. Les études d'exécution

Compte tenu de la complexité de la structure, une conception 3D assistée par ordinateur a été entreprise sur le logiciel Inventor (fig 19).

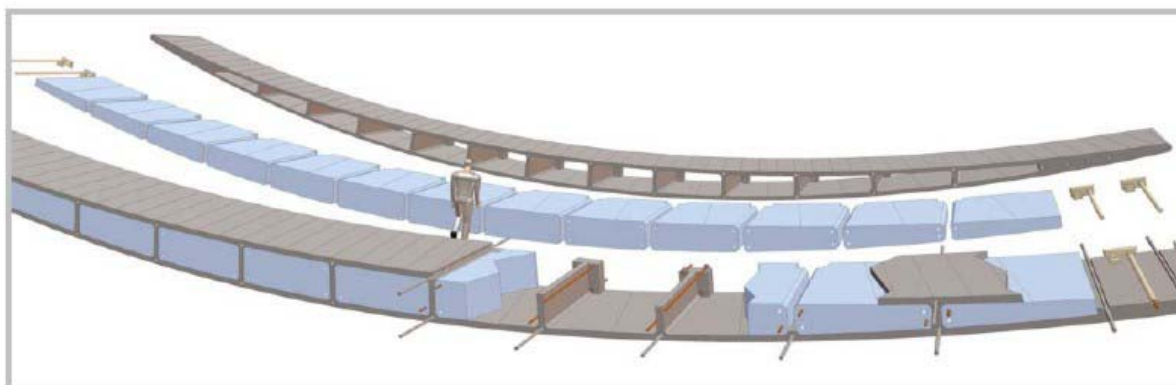


Figure 19 : Décomposition d'un voussoir sur Inventor

Cette démarche a permis de concevoir les assemblages entre les voussoirs en objets 3D gauches, de générer les fichiers pour le pilotage des outils de découpe à commande numérique des alvéoles intérieures en polystyrène, et enfin de générer les modèles de calculs aux éléments finis volumiques sous le logiciel ANSYS (fig 20).

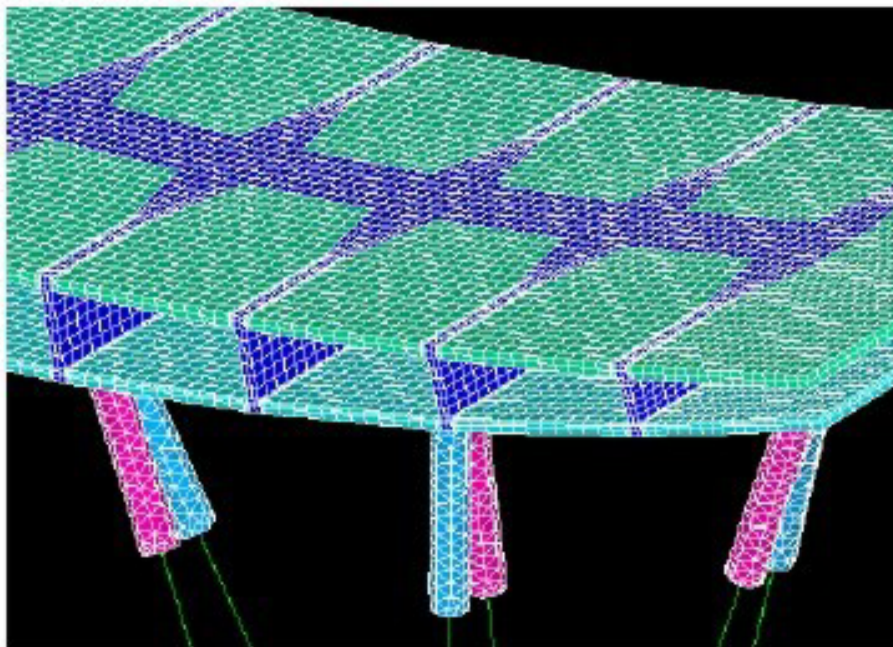


Figure 20 : Détail sur appuis d'un modèle volumique

A partir des sollicitations issues du logiciel aux éléments finis, les justifications relatives à la coque ont été conduites selon les règles spécifiques aux BFUP [2], en distinguant les deux fonctionnements principaux de l'ouvrage :

- dans le sens longitudinal selon la classe I du BPEL (ouvrages constitués de voussoirs préfabriqués) pour laquelle aucune traction n'est tolérée dans les conditions des états limites de service,
- dans le sens transversal selon la classe IV des règles BFUP qui correspond à l'absence d'aciers passifs et de précontrainte.

En complément de ces études, des essais en vraie grandeur ont été réalisés pour valider la pertinence des hypothèses : essais d'ancrage de la précontrainte (unités DSI 12T15S) et des barres de clouage provisoires, bétonnages de plusieurs prototypes de voussoirs à partir desquels de nombreux prélèvements ont été testés, etc.

5.3. Le matériau BSI®

Le BSI® mis en œuvre sur le chantier de Millau est le fruit d'un développement et d'une expérience de près d'une dizaine d'années de l'entreprise Eiffage qui est notamment intervenue sur la réalisation de poutres des centrales nucléaires de Cattenom et Civaux (1998-1999), et a réalisé les deux premiers ponts routiers mondiaux construits en BFUP à Bourg-Lès-Valence en 2000-2001.

La composition et les caractéristiques du BSI® rappelées ci-dessous (tableau 1) confère à ce BFUP un caractère auto-plaçant, avec un rapport eau/liant de 0.19. Il présente une durée pratique d'utilisation (DPU) de 2 heures, indispensable pour pouvoir réaliser le bétonnage de pièces complexes de grand volume.

La mise en œuvre sur chantier est faite à partir du prémix Ceracem (pré-mélange des constituants secs) livré en big-bags de 1.2 tonnes, produits et contrôlés en usine (SIKA).

COMPOSITION POUR 1m³		CARACTERISTIQUES	
Prémix Ceracem (ciment, fumée de silice, granulats...)	2355 kg	Résistance en compression à 28 j	165 MPa
Superplastifiant SIKA	45 kg	Résistance en traction à 28 j	8.8 MPa
Eau ajoutée	195 kg	Module d'Young à 28 j	65 GPa
Fibres métalliques droites (Lf=20 mm Φ=0.3 mm)	195 kg	Coefficient de Poisson	0.2
		Coefficient de fluage	1
		Densité	2.80 t/m³
		Taux volumique de fibrage	2.5 %
		Durée Pratique d'Utilisation	2 heures
		Autoplaçant	

Tableau 1 : Composition du BSI®

5.4. Le chantier

Situé à proximité du futur ouvrage, le site de préfabrication des voussoirs comportait une centrale à béton équipée spécialement : malaxeur puissant à double train valseur, trémie d'alimentation et de pesage des fibres, dispositif de réception et de vidange des big-bags...

La cellule de préfabrication permettait de bétonner un voussoir sur le précédent placé en contre-bas et servant de contre-moule, avec un rythme moyen de 2.5 voussoirs par semaine. Ce cycle a pu être respecté grâce à un suivi maturométrique de la prise du béton en différents points particuliers des voussoirs.

Les voussoirs ont été acheminés au pied du cintre au moyen d'un plateau multi-roues, puis pris en charge par une grue à chenille équipée d'un palonnier basculeur à double C (photo 14). Ils ont été retournés puis reposés au sol pour l'enfilage des barres de clouage (précontrainte provisoire). Pendant ce temps la colle pour voussoir était appliquée sur la tranche du voussoir précédemment posé sur le cintre.

Restait alors à présenter chaque nouveau voussoir en vis-à-vis du précédent (levage et rotation dans l'espace) et à appliquer la précontrainte provisoire pour libérer la grue. Les 53 éléments ont ainsi été posés à l'avancement avec un rythme moyen de deux voussoirs par jour.



Photo 14 : Levage et retournement d'un voussoir

Une fois le dernier voussoir en place, la précontrainte définitive a été appliquée : 28 câbles DSI 12T15S tendus par phases.

L'ensemble de l'ouvrage ainsi constitué a été décintré au moyen de 32 vérins plots situés en pied de poteaux couplés par paires et pilotés en déplacement.

Enfin un essai de chargement grandeur nature par 271 big-bags de 1 tonne chacun, pendant 48 heures, simulant les charges de vent et de neige, a permis de vérifier et contrôler la stabilité de la structure.

5.5. Conclusion – retour d'Expérience

Ce chantier a permis à l'entreprise Eiffage de faire fortement avancer sa compétence sur les conditions de mise en œuvre des bétons fibrés à ultra-hautes performances ainsi que sur les contraintes qu'ils imposent au stade de la conception.

Un retour d'expérience suite à la réalisation de cet ouvrage a été fait au sein du groupe de travail AGFC sur les BFUP.

Les principaux éléments de ce retour d'expérience sont détaillés ci-dessous.

Les BFUP sont capables de réaliser des formes minces et complexes travaillant en membrane.

Les BFUP sont des matériaux écrouissant en flexion simple, mais adoucissant en traction pure. Tout fonctionnement en membrane en traction nécessite soit de réaliser des pièces précontraintes soit de conserver une réserve significative par rapport à la résistance en traction.

La présence de coffrage perdu peut augmenter les effets des gradients thermiques sur des voiles minces en cours de fabrication. Suivant les conditions climatiques, et la complexité des pièces réalisées, il peut être nécessaire de prévoir des dispositifs particuliers de contrôle thermique permettant de limiter les effets de ces gradients.

La réalisation de pièces préfabriquées de grande dimension nécessitent des dispositions particulières pour les opérations de manutention et d'assemblage.

6. RÉFÉRENCES

- [1] AFREM – BFM (1995) Recommandations sur les méthodes de dimensionnement, les essais de caractérisation, de convenance et de contrôle. Eléments de structures fonctionnant comme des poutres, décembre 1995
- [2] 'Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances', Recommandations provisoires, Association Française de Génie Civil, January, 2002.
- [3] Chanvillard G., Characterisation of fibre reinforced concrete mechanical properties : a review, conférence plénière, Fifth International Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concretes, BEFIB'2000, Ed. P. Rossi and G. Chanvillard, Lyon, pp. 29-50
- [4] Resplendino J., Roy J.M., Petitjean J., Blondeau P., Hajar Z., Simon A., Thibaux T., "Ouvrages innovants de Bourg-lès-Valence", *Revue Travaux*, No.783, pp. 42-47
- [5] Thibaux T., Tanner J.A., "Construction des premiers ponts français en béton fibré à ultra hautes performances/construction of the first french road bridges in ultra high performance concrete", in *La technique française du Béton*, AFGC, The first fib congress 2002, Osaka 2002.
- [6] Hajar Z., Simon A., Lecointre D., Petitjean J., "Construction of the first road bridges made of UHPC", 3rd International Symposium on HPC, Orlando 2003.
- [7] Toutlemonde F., Resplendino J., Sorelli L., Bouteille S., Brisard S, (2005) Innovative design of Ultra-high Performance Fiber-reinforced concrete ribbed slab : experimental validation and preliminary detailed analyses, communication acceptée au 7th International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete, Washington D.C. (USA), june 20-22, 2005.