

LE DUCTAL : MATÉRIAU D'AVENIR, LE PONT DE SAINT PIERRE LA COUR

DUCTAL : A NEW MATERIAL, THE BRIDGE OF SAINT PIERRE LA COUR

Jacques HANOTEAU, Mouloud BEHLOUL, O. BAYARD - Lafarge Ciments

Jacques RESPLENDINO, Sébastien BOUTEILLE - CETE Rhône-Alpes

Lucien BOUTONNET, Stéphanie VILDAER - VSL International

Bruno RADIGUET, Stefan BERNHARD - Bouygues T.P.

N. PADOVAN - Quille

1. INTRODUCTION

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

Il a été construit au printemps 2005 par le groupement d'entreprises Quille (groupe Bouygues TP) pour le compte de Lafarge Ciment maître d'ouvrage.

Il s'agit d'un pont à poutres en I précontraintes par prétension en Ductal®, connectées à une dalle en béton armé ordinaire.

Après une description détaillée de l'ouvrage, l'article présente les essais effectués dans le cadre des épreuves d'études et de convenance du béton fibré ultra performant (BFUP) entrant dans la structure du tablier. Les lois contrainte-déformation utilisées sont définies et les principales propriétés du matériau sont décrites.

L'article aborde les principaux calculs et justifications conduits conformément aux recommandations AFGC-SETRA sur les BFUP, puis présente dans le détail l'ensemble des opérations de préfabrication des éléments de structure en BFUP, leur mise en œuvre et assemblage sur le site, jusqu'à l'achèvement et la réception de l'ouvrage.

1. INTRODUCTION

The bridge presented in this paper is located at a railway overpass by the Saint Pierre La Cour bypass in France's Mayenne region (north west).

It has been built during spring 2005 by the contractor Quille (Bouygues TP group) for the owner Lafarge Cements.

This bridge has precast prestressed I-girder beams made of Ductal®, connected to a traditional reinforced concrete slab.

After a detailed description of the bridge, the article presents all the design and suitability tests realized on the UHPFRC used for the girder.

The article tackles the main calculations and justifications according to the AFGC-SETRA recommendations on UHPFRC, then presents thoroughly all the stages of the making of the precast UHPFRC elements of the structure, their setting and assemblage on the site until the complete achievement and receipt of the bridge.

3. LE MATÉRIAU

Le Ductal® est un béton fibré ultraperformant (BFUP), développé par les Ciments Lafarge en partenariat avec le Groupe Bouygues. Les propriétés de ce matériau sont gouvernées par trois objectifs :

- Une résistance très élevée en compression (de l'ordre 180MPa) pour assurer une très grande résistance à la pénétration des agents agressifs.
- Une ductilité du matériau en traction évitant la rupture fragile des pièces fléchies. La contrainte caractéristique de rupture en traction directe du matériau est environ 8MPa.
- Un traitement thermique à température de l'ordre de 80°C pendant 48 heures pour assurer la stabilité dimensionnelle du matériau, retrait et fluage quasi nul.

Ces propriétés permettent d'éviter de disposer des armatures passives dans le matériau.

La composition de ces matériaux est complexe et recherche principalement une régularité granulométrique des éléments fins. Ces bétons sont très fortement dosés en ciment jusqu'à 700 kg/m³, et fumée de silice. Les éléments fins sont également très sélectionnés pour leur homogénéité granulométrique. Le dosage en eau est très faible et peut atteindre des valeurs E/Liant inférieures à 0.20. Les fibres métalliques sont en acier au carbone de l'ordre de 2000 MPa de limite élastique (de 0.13mm de diamètre et de 13mm de longueur), sont dosées à 2.5%. Pour permettre la mise en œuvre, un fluidifiant est ajouté. Ces matériaux sont généralement prédosés et prêt au malaxage avec appareils spécifiques (évitant l'accumulation des fibres). La mise en œuvre dans les poutres demande une procédure spécifique pour garantir la répartition des fibres.

Ce dosage calibré permet de s'affranchir de béton d'étude et de n'envisager que des essais de convenance qui ont pour objet de déterminer les principales caractéristiques du matériau utilisées dans les justifications structurelles. Ces essais sont réalisés conformément aux prescriptions et recommandations de l'AFGC et du SETRA.

La compression est vérifiée de manière usuelle sur éprouvettes cylindriques de dimensions réduites (7x14cm).

Le type d'essai pour la détermination de la résistance en traction dépend de l'élément structurel considéré.

Pour les dalles minces on fait un essai par flexion 4 points sur éprouvettes plates non entaillées, prélevés dans un élément et de la même épaisseur que les pièces réelles (dimensions des échantillons 640x360x25mm).

3. THE MATERIAL

The Ductal® is a ultra high performance concrete with fibers (UHPFRC), designed by LAFARGE Group and Bouygues Group in early 90's. The material properties have been governed by three targets:

- *A very high strength in compression (about 180 MPa) to ensure a extreme compact material for the resistance to aggressive agents attack.*
- *A ductility of the material under tension in order to avoid sudden failure of flexural members (brittleness). The characteristic resistance to direct tension is about 8 MPa.*
- *A thermal treatment at temperatures about 80°C during 48 hours to suppress shrinkage and to reduce creep to almost zero.*

These properties allow the designer to avoid passive structural reinforcement.

The mix design of these materials is of high complexity and is principally based on a regularity of the lower-range granulometry. There is a very high percentage of cement (up to 700 kg/m³) and silica fume. Very fine elements are carefully selected for their homogeneity. Water content is very low with values of Water/Binder inferior to 0.20. Metal fibers are made out of carbon steel with a yield strength of about 2000MPa (diameter is 0.13mm and length is 13mm). The fiber content is 2.5 per cent. To allow placement a plasticizer is added. Generally these materials are made from premixed ingredients and prepared in specific machines assuring a homogeneous mix to provide a regular distribution of the fibers in the material). Special procedures exist for the pouring process of the beams in order to meet these requirements.

Existing premix allow the restriction of the required testing of the material: principal characteristics of the material to be used in structural calculations are obtained by suitability tests. These tests are carried out following the recommendations of AFGC and SETRA.

Compression strength is checked in regular way on cylindrical samples (reduced dimensions (7x14cm)).

The type of test for the establishment of tension resistance depends on the considered structural element.

The precast panels are tested by flexure on 4 points on un-notched specimens. The specimen is obtained from a real panel (same thickness) and has the dimensions 640x360x25mm.

Pour les poutres la résistance en traction de la matrice cimentaire f_{ij} est déterminée par des essais de flexion 4 points sur 6 éprouvettes non entaillées 7x7x28cm. La résistance en traction après fissuration est obtenue par l'application de la méthode inverse sur des essais de flexion 3 points sur des prismes entaillés 7x7x28cm.

Pour les caractéristiques de cisaillement des essais sur éprouvettes carottées sur un élément de poutre d'essai ont permis d'estimer le coefficient K. Le coefficient K permet d'intégrer l'orientation des fibres, avec l'influence sur les résistances en traction.

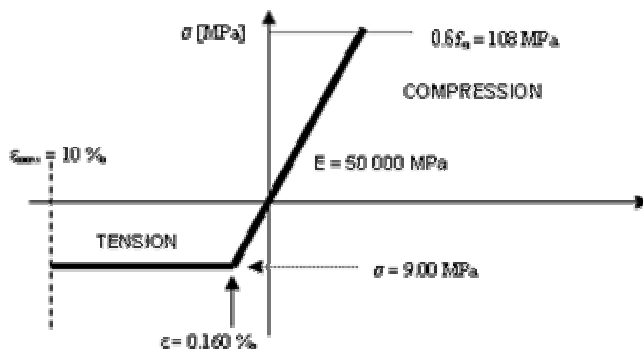
4. LES HYPOTHÈSES DE CALCUL

Les règles de calcul utilisées pour la justification sont issues des recommandations provisoires éditées par LE SETRA et l'AFGC sur les BFUP.

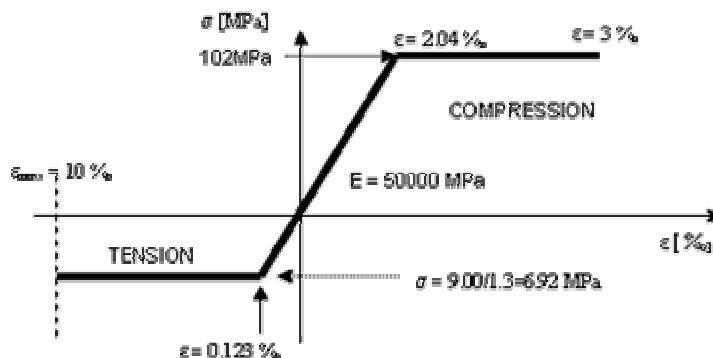
Nous donnons ci-après les lois contrainte déformation aux ELS et aux ELU pour chaque élément de structure.

Il s'agit d'une loi adoucissante conforme aux prescriptions de l'AFGC et du SETRA. On peut négliger la partie descendante du palier de traction pour les éléments minces compte tenu de leur faible épaisseur.

Prédalles (ELS) :



Prédalles (ELU) :



Flexural tests on 4 points are carried out for the beams in order to obtain values for the tension strength of the cement matrix. The tests are realized on 6 prismatic un-notched samples of 7x7x28cm. Furthermore flexure tests on 3 points (notched specimens) are carried out to determine the tension resistance for post-cracking.

Shear resistance is obtained out of drilled in-situ samples from a test beam. A coefficient K is estimated which allows considering the influence of the orientation of the fibers on the tension resistance of each element.

4. DESIGN ASSUMPTIONS

The design follows the Interim recommendations for Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes edited by SETRA and AFGC.

We give hereafter the stress-strain relationship at SLS and ULS limit states, for both types of structural elements.

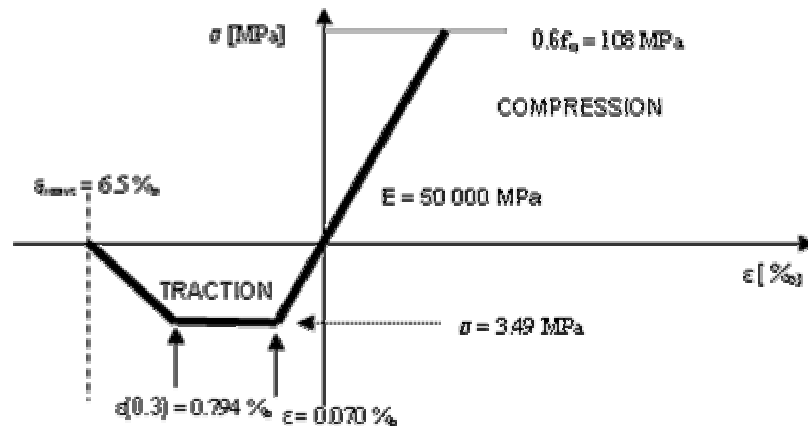
A strain-softening law is used (following the recommendations of AFGC and SETRA). The descending part of the tension yield curve can be neglected for the thin precast panel because of their small thickness.

Precast panels (SLS):

Precast panels (ULS) :

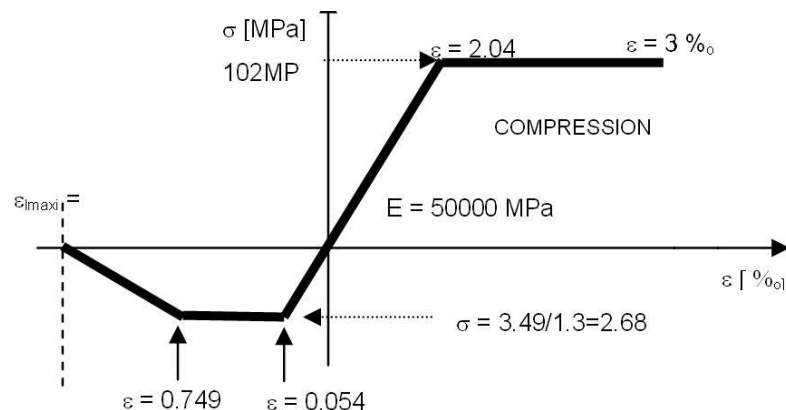
Poutres (ELS)

Precast Beams (SLS)



Poutres (ELU)

Precast Beams (ULS)



Les propriétés des poutres en traction sont fortement influencées par la limitation de la largeur des fissures à 0.3 mm et par les dimensions de la pièce se traduisant par un coefficient d'abattement K ($K=2.15$ obtenu par les essais), pris sur la contrainte de traction des poutres égal à 7.5 MPa.

Les caractéristiques à long terme du matériau sont les suivantes :

Un retrait nul et un coefficient de fluage après traitement thermique égal à 0.3.

Ces propriétés ont permis de déterminer les coefficients d'équivalence pris en compte pour le hourdis coulé en place en béton normal ($f_{c28} = 40$ MPa). C'est la même méthode que celle utilisée pour les ponts mixtes.

Sous les charges permanentes $n = 3.07$

Sous les surcharges routières $n = 1.33$

L'ouvrage a été conçu sans entretoises.

The properties of the beams under tension are strongly influenced by the limited crack-width (0.3mm) and by the fiber orientation coefficient K ($K=2.15$ according to test values) to be applied with $1/K$ on the characteristic tension resistance of the beams found at 7.5 MPa.

The long-term characteristics of the material are as follows :

No shrinkage and creep coefficient after thermal treatment 0.3.

These characteristics allow the determination of the ratio n between Young's Modulus of the UHPFRC of the beams and the ordinary concrete of the deck ($f_{c28} = 40$ MPa). The same method as for composite bridges is used.

Under permanent loads $n = 3.07$

Under short term loads $n = 1.33$

The bridge is designed without crossbeams linking the longitudinal beams at the abutments.

Compte tenu du biais il a été proposé de faire un calcul de grillage de poutres croisées qui avait pour objet :

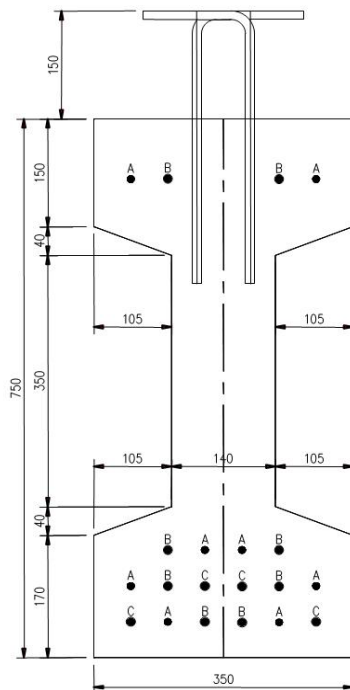
- de déterminer les moments longitudinaux, efforts tranchants des poutres
- de déterminer les flexions de la dalle,
- de donner les valeurs des moments de torsion dans les poutres afin de justifier les appareils d'appui et les poutres.

Les poutres ont été entretoisées provisoirement entre elles pour bloquer les rotations d'axe longitudinal d'extrémité pendant le coulage de la dalle. Les prédalles ont été justifiées avec les surcharges du fascicule 65A définissant une surcharge de 500 kg/m² en sus du béton frais. Cette condition a pu être justifiée grâce aux tests réalisés qui ont fait apparaître une résistance en traction de ces éléments de 9 MPa.

Because of the position at an angle of 54° it was decided to establish a grid-type structural model which helped to:

- *determine longitudinal flexural moments and shear forces of the beams*
- *determine the flexions of the slab*
- *find the torsion moments of the beams in order to design the bearings and the beams accordingly.*

The beams are stabilized temporarily during casting of the deck slab in order to limit rotations of the end of the beams around the longitudinal axis. The precast panels are checked according to French rules « fascicule 65A » which require a loading of 500kg/m² (to take into account fresh concrete weight during pouring process). Because of good test results on the precast panels (tension resistance of 9 MPa) this loading condition was satisfied.



5. LES RÉSULTATS

Les prédalles ont été validées avec une épaisseur de 25mm. Aux extrémités un appui provisoire a permis d'éviter un épaississement. Les arrêtes transversales des prédalles ont été chanfreinées pour valider l'enrobage des armatures de la dalle.

La compression aux ELU des poutres atteint 76 MPa, en traction on atteint le palier plastique.

5. RESULTS

The planned precast panel thickness of 25mm was confirmed. Temporary supports made it possible not to thicken the panels at both ends of the deck. Bevels form the transversal stop ends of the panels in order to ensure the minimum cover for the reinforcement of the deck.

The beams have to resist a maximum compression stress of 76 MPa at ULS; the extreme tension strain reaches the yield value.

Les poutres de 750 mm de hauteur comportent une âme de 140 mm d'épaisseur, imposée par les charges induites par la chaussée béton sur l'ouvrage. Les poutres sont précontraintes par 16 torons adhérents inférieurs et 4 torons supérieurs. Ces armatures sont des torons T15 super de classe 1860 MPa.

Les contraintes de compression maximum (ELS) sont obtenues au transfert de la précontrainte où l'on atteint 45 MPa, ce qui impose 80 MPa de résistance caractéristique (cette valeur était obtenue 48h après bétonnage, mais avant le traitement thermique).

En service (ELS rares) on observe une très légère traction, inférieure à 1 MPa. Aux ELU on atteint le palier en traction de 2.6 8MPa avec un allongement de 0.5‰, sans utiliser la partie adoucissante du diagramme.

Les contraintes de compression dans le hourdis atteignent au plus 9 MPa, largement acceptables.

Les contraintes de cisaillement (ELS) dans l'âme atteignent 4.95MPa, qui avec une contrainte de compression en haut de l'âme de 10.7 MPa donne une valeur admissible de 5.2 MPa.

L'étude de la diffusion de la zone d'about nous a conduit à étager les ancrages des torons (en trois groupes) afin de limiter les efforts de diffusion à l'about de la poutre.

La reprise des moments de torsion dans les poutres se traduit par des réactions horizontales transversales sur les appareils d'appui. La justification des contraintes a été menée en superposant la torsion de Saint – Venant et l'effet du bimoment.

6. LA RÉALISATION

Les deux culées sont réalisées devant un écran en terre armée, fondées chacune sur 6 pieux de diamètre 1000mm.

La préfabrication des poutres Ductal® a été prise en charge par CPC (Composants Précontraints). Les poutres ont été fabriquées dans l'usine de Brive. CPC ont fourni le banc de précontrainte, les moules et le personnel. Le malaxage était supervisé par VSL et LAFARGE, la précontrainte par VSL.

L'organisation du traitement thermique a nécessité la mobilisation d'une unité de production de vapeur et de chauffage spécifique pour cette production.

La production des poutres a été menée au rythme de 2 poutres tous les 2 jours.

La préfabrication des poutres a incorporé les connecteurs pour l'équilibre des contraintes tangentielles entre les 2 matériaux, ces armatures sont des U HA 12 ou 10 orientés suivant le biais de l'ouvrage.

The height of the beams is 750mm with a 140mm thick web, which is necessary because of the high weight of the concrete roadway. The beams are prestressed by 16 tendons in the bottom flange and 4 tendons in the top flange. The tendons are of T15S type, class 1860MPa.

The maximum compression stresses (SLS) are obtained during transfer of the prestress (45 MPa). This means a minimum characteristic strength of 80MPa at this stage (this value was obtained 48h after pouring, but before thermal treatment).

Extreme tension stresses during service stages (SLS) are less than 1MPa. The yield tension stress of 2.68MPa is reached at Ultimate Limit Stages (strain of 0.5‰, without using softening part of the stress-strain diagram).

The maximum compression of the top flange is not critical (less than 9MPa).

The SLS shear stresses of the web are up to 4.95MPa. Considering a compression stress at the top of the web of 10.7MPa the limit shear stress is situated at 5.2 MPa.

The analysis of the anchorage and bearing zone of the beams showed the necessity to provide longitudinally 3 distinct anchorage zones for the tendons in order to limit tensions due to the application of concentrated loadings.

Torsion moments in the beams result in horizontal/transversal reactions of the bearings. Additional stresses in the beams due to torsion are taken into account by a method considering both Saint – Venant theory as well as bi-moment.

6. REALISATION

The two abutments are founded on 6 bored piles diameter 1000mm each. The back of the abutments is realized in reinforced earth.

CPC (Composants Précontraints) was in charge of precasting the Ductal® beams. The beams are realized at the factory at Brive where CPC provided the precast utilities, formwork and labor. The mixing process was supervised by VSL and LAFARGE, the prestress by VSL.

The organization of the thermal treatment required the mobilization of specific heating utilities.

The production sequence of the beams was 2 beams per 2 days of labor.

The precasting of the beams included shear connectors to enable the transfer of the shear forces from the cast in situ deck to the beams. The shear connectors are U-bars HA 12 or 10 aligned with the horizontal skew of the bridge.

Les prédalles avaient été préfabriquées dans l'hiver.
La dalle de l'ouvrage a été coulée fin avril 2005.

La mise en service est prévue début 2006.

7. CONCLUSION

Les matériaux comme le Ductal® devraient se développer pour des ouvrages de ce type où l'on doit franchir rapidement une voie existante. Il peut devenir compétitif par rapport à des solutions de type poutrelles métalliques enrobées. Le pont de St. Pierre la Cour grâce aux caractéristiques du revêtement de chaussée a permis d'atteindre certaines limites du matériau, ce qui laisse entrevoir des orientations d'évolution des règles justificatives provisoires.

The cast-in-situ deck of the bridge was finished in April 2005.

Opening to public is programmed for beginning of 2006.

7. CONCLUSION

Materials such as Ductal® should be developed for such bridges where existing traffic lanes have to be crossed without delay. Such types of structures have a potential to become competitive versus common types. The bridge of St. Pierre la Cour has reached the limits of the capacity of the new material, mostly because of the specific roadway composition. Further developments of the design recommendations for UHPFRC can be expected.

