

UNE COQUE MINCE EN BÉTON FIBRÉ À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES (BFUP) POUR LA GARE DE PÉAGE DU VIADUC DE MILLAU

AN ULTRA-HIGH-PERFORMANCE FIBRE-REINFORCED CONCRETE (UHPRFC) THIN-SHELL STRUCTURE OVER THE MILLAU VIADUCT TOLL GATES

Alain SIMON, Ziad HAJAR, Thierry THIBAUX
EIFFAGE TP



Fig. 1 Ouvrage terminé / Completed structure

1. INTRODUCTION

Réalisé dans le cadre d'une concession de 75 ans et entièrement financé sur fonds privés par le groupe EIFFAGE, le projet du viaduc de Millau comprend la construction d'une barrière de péage. Celle-ci, située à 6 Kms environ au nord du viaduc, signale à l'automobiliste son arrivée dans un site naturel exceptionnel marqué par les gorges du Tarn et la ville de Millau.

1. INTRODUCTION

The Millau Viaduct project, built, entirely financed, and to be operated by the Eiffage group under a 75 year concession, also comprises a toll plaza. The toll gates are located about 6 kilometres north of the viaduct and will convey to drivers the message that they are approaching an exceptional natural site, the Tarn River Gorge and, at its base, the town of Millau.

Lors de l'élaboration de son projet, l'Entreprise a mené une étude architecturale spécifique en voulant réunir deux objectifs. D'une part, créer un signal fort pour le voyageur, obtenu par la forme originale de la toiture du péage, d'autre part mettre en évidence les nouvelles possibilités offertes par le BSI®, un Béton Fibré à Ultra hautes Performances (BFUP).

L'Architecte Michel HERBERT s'est donc inspiré du caractère aérien du site, en dessinant une feuille flottant au-dessus des Causses qui n'est pas sans rappeler la forme des voiles de parapente qui survolent la région.

2. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

L'ouvrage est constitué d'une coque mince en BSI®, posée sur 48 poteaux métalliques groupés par faisceaux et répartis sur 4 files. La disposition des appuis permet d'offrir des travées libres jusqu'à 28m de largeur pour l'implantation des cabines et le passage des véhicules.

La toiture proprement dite présente une longueur de 98m pour une largeur de 28m. Sa géométrie peut se résumer ainsi : la section s'inscrit entre deux arcs de cercles différents et pivote régulièrement tout au long des 98m pour générer des faces gauches. Cette rotation d'ensemble est de 23°.

When working on its design proposal, the Contractor-Concessionaire carried out a special architectural study aimed at combining two objectives: it wanted to give travellers a strong visible signal through a striking toll-plaza roof, and to highlight the architectural potential of the ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC) called BSI®.

The architect appointed, Michel Herbert, found inspiration in the elevated situation of the site, designing a "floating leaf" which, together with its multiple supporting columns, evokes the parapente wings seen soaring in the region.

2. GENERAL PRESENTATION

The structure is a thin shell of BSI® supported by 48 clustered steel columns laid out in 4 rows to provide free spans of up to 28 metres for siting the toll booths and traffic lanes.

The roof structure is 98 m long and 28 m wide. Geometrically, its cross-section is defined by two circular arcs of different radius, and the entire 98 m length is rotated 23° to produce a helically warped structure.

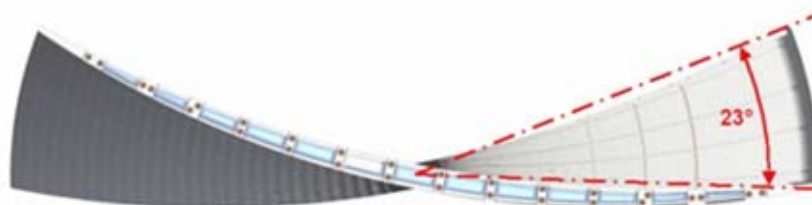


Fig. 2 Section transversale – rotation / Cross-section – rotation

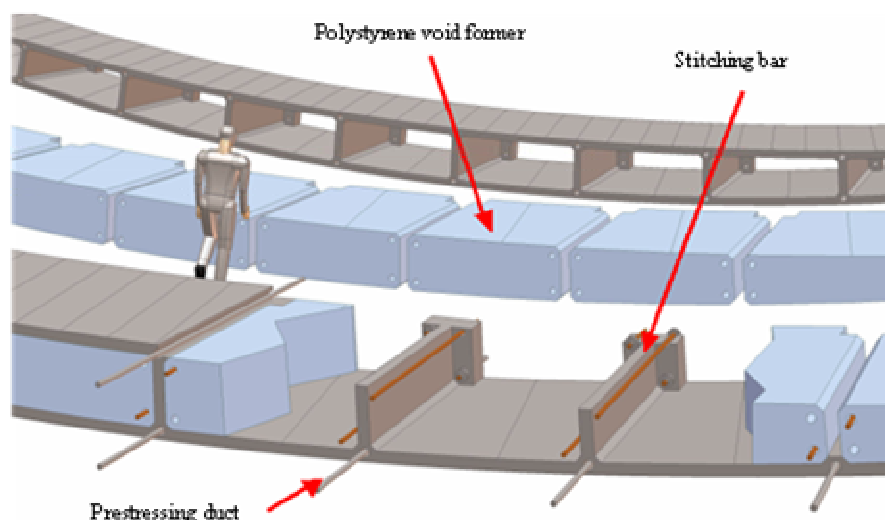


Fig. 3 Décomposition d'un voussoir type / Cutaway of typical segment

Les dimensions et la forme de l'ouvrage imposant la réalisation de voussoirs préfabriqués à joints conjugués, une conception particulière devait permettre de confectionner l'ensemble des éléments avec un seul moule. Le choix s'est ainsi porté sur un moule gauche unique avec une préfabrication en conjugaison verticale. Chaque voussoir est bétonné sur le précédent en contre-moule, ce dernier étant pivoté pour assurer la jonction entre les deux éléments. 53 voussoirs se succèdent ainsi pour obtenir l'ouvrage complet.

Après leur préfabrication les voussoirs sont posés à l'avancement sur un cintre et sont cloués deux à deux par une précontrainte par barres. L'ensemble des 53 éléments mis en place, une précontrainte filante constituée de 28 câbles 12T15S est appliquée avant le décintrement de la structure.

Since the size and shape of the structure called for match-casting of the segments, special design provisions had to be made to enable all segments to be cast in a single mould. It was decided to use a mould warped for vertical match-casting. Each segment is cast on top of the previous segment used as the control face, the control-face segment being rotated into the appropriate position. The structure is made up of a total of 53 segments.

After casting, each segment is placed on falsework and stitched to the previous segment with prestressing bars. Once all 53 segments have been installed, twenty-eight 12T15S prestressing cables are installed from one end of the structure to the other, then tensioned, and the falsework is removed.

3. LE MATÉRIAU BSI®

Le BSI® utilisé pour la barrière de péage de Millau est le fruit d'un développement spécifique, à partir de formulations précédemment employées sur différentes réalisations. Citons les poutres des centrales nucléaires de Cattenom et Civaux (1998-1999) ou encore les 2 ponts innovants de Bourg-lès-Valence réalisés en 2000-2001. Ce dernier projet avait contribué à la validation de ce type de matériau dans le domaine des ponts routiers et à l'élaboration des premières recommandations relatives à l'emploi des BFUP dans le Génie Civil.

3. BSI® CONCRETE

The BSI® concrete used for the toll gates roof is the result of special development based on mix designs used previously for different projects. Previous projects include beams for the Cattenom and Civaux nuclear power plants (1998-1999) and the two innovative Bourg-lès-Valence bridges built in 2000-2001. The Bourg-lès-Valence project served to help validate use of this kind of material for road bridges and to help draft the first recommendations on the use of UHPFRC in civil engineering.

La formule retenue pour Millau présente les caractéristiques suivantes :

The concrete mix design used for the Millau project is as follows:

Composition par m ³ Ingredients per m ³		Caractéristiques mécaniques (**) Mechanical characteristics (**)	
Prémix (*) <i>Premix (*)</i>	2355 kg	Densité <i>Density</i>	2.8 t/m ³
Superplastifiant SIKA <i>SIKA superplasticizer</i>	45 kg	Résistance en compression fc28 <i>28-day compressive strength fc28</i>	165 MPa
Eau ajoutée <i>Mix water</i>	195 kg	Résistance en traction ft28 (matrice) <i>28-day tensile strength ft28 (matrix)</i>	8.8 MPa
Fibres métalliques (Lf=20mm Ø=0.3mm) <i>Steel fibres (Lf=20mm Ø=0.3mm)</i>	195 kg	Résistance en traction σ_{bt28} (fibres) <i>28-day tensile strength σ_{bt28} (fibres)</i>	8.8 MPa
Les fibres sont droites et constituées d'acier à très haute limite élastique <i>The fibres are straight, and are made from very-high-elastic-limit steel.</i>		Module de déformation Ei28 <i>Modulus of deformation Ei28</i>	65 GPa
		Retrait endogène total <i>Total autogenous shrinkage</i>	550 µm/m
		Retrait de dessiccation total <i>Total drying shrinkage</i>	150 µm/m
		Fluage total <i>Total creep</i>	Kfl = 1

(*) le prémix est un pré-mélange de tous les constituants secs : ciment, fumée de silice, granulats.

(**) les valeurs de résistances sont des résultats caractéristiques.

(*) *Premix is a mixture of all the dry ingredients: cement, silica fume, & aggregate.*

(**) *Strength values are characteristic results.*

La quantité de fibres utilisée correspond à un dosage volumique de 2.5%. La diminution de ce dosage par rapport aux précédents projets (3%) tient principalement aux améliorations apportées à la matrice cimentaire, sur sa stabilité et son homogénéité en présence de fibres.

Le BSI® de Millau n'en demeure pas moins auto-plaçant et présente de surcroît une durée pratique d'utilisation (DPU) de 2heures. Cette durée peut s'avérer nécessaire pour le bétonnage de pièces complexes et de grand volume.

Fibres were used in the quantity of 2.5% by volume. The reduction in this proportion relative to previous projects (3%) is chiefly due to changes made to the concrete matrix to improve its stability and uniformity in combination with fibres.

The BSI® mix for the Millau project is self-compacting nonetheless and, what is more, has a practical working life of 2 hours. This working life may prove to be necessary when working on complex and large-volume components.

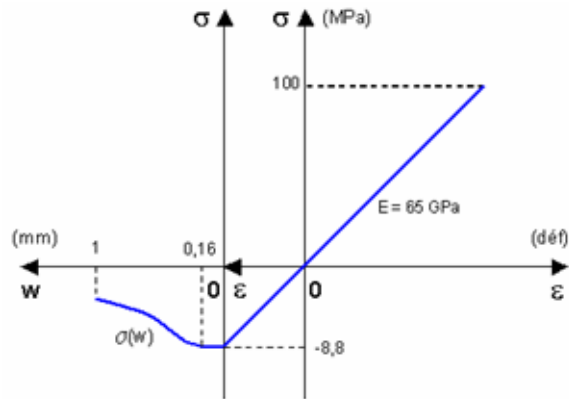


Fig. 4 Loi de comportement / Constitutive law

4. LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

4.1 Calcul des sollicitations

Du fait de la complexité de la géométrie de la coque, l'analyse du comportement de la structure, sous les différentes actions de calcul (charges permanentes, vent, neige, effets thermiques,...), a nécessité la mise en œuvre de plusieurs modèles de calcul aux éléments finis, faisant appel pour certains à des techniques particulières de modélisation.

Les sollicitations d'ensemble, ont été déterminées à partir d'une discrétisation en éléments "coques" de la structure, avec le logiciel de calcul ROBOT. Ces calculs ont fourni en tout point de la coque les torseurs d'efforts (membrane et flexion) pour les différents cas de charges étudiés.

4. CONSTRUCTION DESIGN

4.1 Calculation of action effects

Because of the complex geometry of the shell, analysis of the structure's behaviour under the various design actions (permanent loads, wind, snow, temperature effects, etc.) required several finite-element models to be run.

General action effects were determined from discretization of the structure into "shell" elements by the ROBOT structural analysis program. These calculations provided the force vector fields (membrane and flexural stress) at all points of the shell for each of the load cases studied.

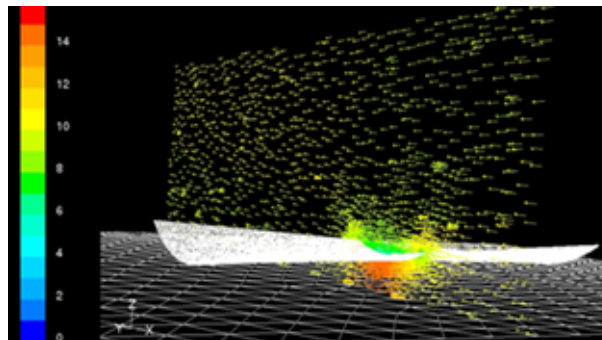


Fig. 5 Vent – Ecoulements aérauliques / Wind – Air flow

L'évaluation de l'action du vent sur la structure a été effectuée par le CSTB de Nantes. Des études numériques ont été réalisées pour caractériser le vent de référence au niveau du site et déterminer les coefficients de pression sur la coque. Le calcul numérique des écoulements aérauliques (Fig. 5) et des champs de pression est obtenu à l'aide du logiciel de mécanique de fluides FLUENT.

Globalement le vent dominant (perpendiculaire à l'ouvrage) a tendance à plaquer la coque vers le sol, avec un effet de torsion d'ensemble lié aux parties relevées.

Les sollicitations locales au niveau des zones sur appuis et des zones d'about (où sont ancrés les câbles de précontrainte définitive) ont été déterminées avec des modèles EF volumiques sur le logiciel ANSYS. La transmission des efforts de la coque vers les poteaux, a été analysée à l'aide d'un modèle volumique fin (Fig. 6) correspondant à une bande de 4 m de largeur axée sur les appuis et relié au modèle général en éléments coques.

The effect of wind on the structure was assessed by the CSTB building research centre in Nantes. Numerical studies were carried out to characterize the reference wind at the site and to determine the wind pressure coefficients affecting the shell. Numerical analysis of air flows (Fig. 5) and pressure fields was performed with the FLUENT fluid mechanics program.

Overall, the prevailing wind (perpendicular to the roof) tends to push the shell down against the ground, with generalized torsional effects because of the upturned parts.

Local action effects at supports and end blocks (where the permanent prestressing cables are anchored) were determined with finite volume elements using the ANSYS program. Transmission of forces from the shell to the columns was analyzed with a finely meshed volume model of a 4 m wide strip centred on the columns (Fig. 6) and connected to the general model of shell elements.

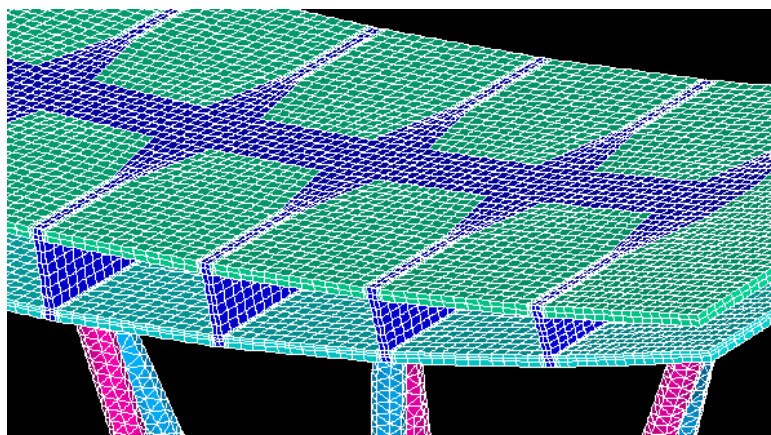


Fig. 6 Modélisation des zones sur appuis / Modelling of support area

La modélisation des zones d'about a nécessité la mise en œuvre d'une méthodologie originale consistant à récupérer la conception CAO des voussoirs d'about réalisée sur le logiciel INVENTOR et à générer les éléments tétraédriques de volume à partir du maillage de peau en utilisant une technique d'enrichissement et de décimation de polyèdre (programme SIMPOLY).

Modelling of the end blocks required a special methodology which involved acquiring the CAD design of the end-block segments from the INVENTOR program and generating volume elements from the skin mesh, using a technique for polyhedral enhancement and decimation (SIMPOLY program).

4.2 Justifications de la coque

Les justifications des éléments en BSI® sont basées sur les Recommandations de l'AFGC [1]. Des hypothèses complémentaires sont toutefois formulées par rapport à ces recommandations pour la justification des parties de la structure dont les sollicitations de type membrane sont prépondérantes. L'ouvrage étant précontraint 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.

4.2 Shell verifications

Verifications of the BSI® elements are based on the AFGC recommendations on ultra-high-performance fibre-reinforced concretes [1], though some additional assumptions are also made for verifying the parts of the structure where membrane-type action effects are determining. Since the structure is prestressed solely longitudinally, the principles of verification differ depending on whether the transverse or longitudinal behaviour of the structure is to be studied.

Dans le sens longitudinal, les justifications sont menées en référence à la classe I du BPEL [2], classe habituelle de vérification des ouvrages en voussoirs préfabriqués, pour laquelle aucune traction n'est tolérée dans les conditions des états limites de service.

Dans le sens transversal, les efforts étant repris entièrement par le béton fibré, il est fait référence à la classe IV des recommandations BFUP, qui est la classe de vérification particulière des BFUP en l'absence d'acier passif et de précontrainte. En complément, dans le cas de traction pure (effets de membrane prépondérants), la contrainte est calculée en considérant la section non fissurée et est limitée en service à $0.8 \times f_{t28}$.

Les sollicitations résistantes ultimes sont calculées en considérant la loi caractéristique de comportement du matériau fissuré, affectée du coefficient partiel de sécurité $\gamma_{bf} = 1.3$.

La diffusion des efforts concentrés de précontrainte dans les zones d'about est justifiée sur la base des directions et contraintes principales de traction, obtenues à l'aide du modèle aux éléments finis décrit précédemment, et en vérifiant que celles-ci demeurent inférieures à la résistance apportée par les fibres : σ_p / γ_{bf} , avec

$$\sigma_p = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\omega_{lim}} \cdot \int_0^{\omega_{lim}} \sigma(\omega) \cdot d\omega$$

où :

- $\sigma(\omega)$: loi de comportement caractéristique en traction directe
- K : coefficient couvrant l'anisotropie d'orientation des fibres due à la mise en oeuvre

$K = 1.75$ pour les effets de surface et d'éclatement (valeur "locale" de K)

$K = 1.25$ pour les effets de diffusion générale (valeur "globale" de K)

- $\omega_{lim} : 0.3\text{mm}$ (ouverture de fissure)

5. LES ESSAIS PRÉLIMINAIRES

Avant le démarrage de la production des voussoirs, certaines dispositions ont fait l'objet d'essais préliminaires afin d'être validées. C'est notamment le cas des zones d'introduction des deux procédés de précontrainte (post-tension pour les câbles filants et barres courtes pour les clouages). Dans les deux cas, aucune armature de fretage n'est en effet utilisée. Les dispositions testées et retenues ont permis de mettre en évidence des coefficients de sécurité à la rupture supérieurs à 2.

For the longitudinal examination, verifications were carried out to class I of the French BPEL limit-state prestressed-concrete design code [2], the class usually applicable for verification of structures made from precast segments, and in which no tension is allowed under serviceability limit state conditions.

For the transverse examination, since forces are taken solely by the fibre-reinforced concrete, class IV of the UHPFRC recommendations was used: this is the special verification class for UHPFRC without reinforcement and prestressing steel. Additionally, in the case of pure tension (where membrane effects are determining), the allowable stress is calculated assuming an uncracked section and is limited to $0.8 \times f_{t28}$ in service.

Ultimate resistance effects are calculated using the characteristic law for behaviour of the cracked material, with a partial safety factor $\gamma_{bf} = 1.3$.

The distribution of concentrated prestress forces in the end blocks is verified on the basis of the principal tensile stresses and their directions as determined by the finite-element model described above, and verifying that they remain less than the strength contribution of the fibres, σ_p / γ_{bf} , with

$$\sigma_p = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\omega_{lim}} \cdot \int_0^{\omega_{lim}} \sigma(\omega) \cdot d\omega$$

where:

- $\sigma(\omega)$: characteristic direct tensile strength
- K : coefficient taking account of the anisotropy in orientation of fibres due to concrete placement

$K = 1.75$ for spalling and bursting effects ("local" value of K)

$K = 1.25$ for general distribution effects ("global" value of K)

- $\omega_{lim} : 0.3\text{mm}$ (crack width).

5. PRELIMINARY TESTING

A certain number of preliminary tests had to be carried out to validate some of the proposed design features before production could actually start. In particular, this concerned the distribution of prestress for the two different techniques (post-tensioning with end-to-end cables, and short bars stitching two consecutive segments together). No hooping was used in either case. The tests revealed ultimate strength safety margins of more than 2. The detailing was thus adopted.

Des prototypes (tronçons de voussoirs) à l'échelle 1 ont également été réalisés sur site afin de régler tous les paramètres de la production : cycle de confection du BSI® avec la centrale dédiée à la préfabrication, mode de bétonnage des voussoirs et influence sur la distribution des fibres dans la structure, calibrage maturométrique précis pour se prémunir des effets du retrait partiellement gêné dans la cellule de préfabrication en pilotant les opérations de décoffrage...

La cinétique de prise du matériau est en effet caractérisée par une longue période dormante : de l'ordre de 14 heures à 20°C. Une double loi d'Arrhenius devient nécessaire pour décrire l'ensemble de la prise depuis sa confection. Le calibrage issu des campagnes d'essais a été basé sur les travaux du projet national CALIBE sur la maturométrie.

Enfin, les prototypes ont fait l'objet de prélèvements (prismes 10x10x40 sciés) pour effectuer les essais de validation des performances mécaniques du BSI® tel que confectionné sur site : résistance en traction de la matrice cimentaire obtenue par flexion 4 points et résistance en traction apportée par les fibres obtenue par flexion 3 points.

6. PRÉFABRICATION DES VOUSSOIRS

Situé à proximité du futur ouvrage, le chantier de préfabrication des voussoirs se compose d'une centrale à béton équipée spécialement pour le BSI®, d'une cellule de préfabrication (PERI), d'une grue à tour, d'un hangar pour l'entreposage des big-bags de prémix et de fibres et d'une aire de stockage équipée de chariots sur rails pour le transfert des voussoirs.

Full-scale prototypes (segment sections) were also built on the site to adjust all the production parameters: BSI® production cycle with the batching plant proposed for precasting, segment concreting procedure and effect of fibre distribution within the structure, precise calibration of curing in order to make provision for the effects of partially restrained shrinkage in the mould, by co-ordinating the form striking sequence.

Because the concrete setting mechanism has a long dormant period of around 14 hours at 20°C, a double Arrhenius law is necessary to describe the entire setting process from the moment the concrete is batched. The calibration derived from testing campaigns was based on work carried out by France's national CALIBE project on measurement of concrete curing.

Lastly, 10x10x40 prismatic samples were sawn from the prototypes and run through bending tests to validate the mechanical performance of the BSI® concrete actually produced at the site (tensile strength of the cement matrix and tensile strength contribution of the fibres).

6. CASTING YARD

The segment casting yard was located very close to the toll plaza site. It consisted of a concrete batching plant specially equipped for BSI®, a PERI mould, a tower crane, a shed for storing bulk bags of premix and fibres, and a storage yard with rail-mounted trolleys for moving the segments.



Fig. 7 Cellule de préfabrication / Segment casting yard

La campagne d'essais préliminaires et les dernières mises au point effectuées à l'occasion des premiers éléments ont permis de caler un cycle régulier de préfabrication de 2 jours par voussoir. Le chantier s'est alors organisé en une succession de semaines de 4 et de 6 jours pour atteindre un rythme moyen de 2.5 voussoirs/semaine.

La décomposition du cycle est classique et se décline ainsi : descente et réglage du voussoir « n-1 » en contre-moule, mise en place des gaines de précontrainte et des noyaux en polystyrène dans le coffrage, fermeture du coffrage, bétonnage, prise du béton, arrimage du voussoir « n » et décoffrage, retrait du voussoir « n-1 » en contre-moule, descente du voussoir « n ».



Fig. 8 Voussoir en cours de descente
Segment lowering



Fig. 9 Removal of control-face segment
Evacuation du voussoir

7. ASSEMBLAGE DE LA COQUE

Une fois préfabriqués, les voussoirs sont transportés jusqu'au pied du cintre de pose, au moyen d'une remorque hydraulique multi-roues de 15 essieux. Ils sont alors pris en charge par une grue treillis de capacité 600 t. Equipée d'un palonnier basculeur à double C, elle permet le déplacement et la rotation des voussoirs dans toutes les directions de l'espace.

Dès sa prise en charge par la grue, chaque voussoir est retourné puis reposé au sol pour permettre l'enfilage des barres de clouage (précontrainte provisoire par barres Macalloy). Pendant ce temps la colle à voussoir est appliquée sur la tranche du dernier voussoir posé sur le cintre. Une fois ces préparatifs achevés, le nouveau voussoir est présenté en vis-à-vis du précédent et les barres Macalloy sont mises en œuvre. Cette dernière opération conditionne la libération de la grue.

Les 53 voussoirs ont ainsi été posés à l'avancement avec un rythme moyen de deux éléments par jour. Une fois le dernier en place, la précontrainte définitive a été appliquée : 28 câbles DSI 12T15S ont été tendus par phases pour comprimer progressivement et régulièrement la structure.

7. ASSEMBLY OF THE SHELL

After casting, the segments were transported by a 15 axle multiwheeled hydraulic trailer to the erection falsework where they were handled by a 600 tonne lattice-jib mobile crane. Fitted with a double-C inverting lifting beam, the crane was able to move and turn segments in all directions.

As soon as it was attached to the crane, each segment was turned up the other way and placed back on the ground for stitching bars (Macalloy bars for temporary prestress) to be inserted. At the same time, glue was applied to the edge of the last segment placed on the falsework. Once this preparatory work had been completed, the new segment was offered up to the glued face and the Macalloy bars tensioned. Once this operation had been done, the crane was free to handle the next segment.

The 53 segments were erected successively, at a rate of two segments per day. Once the last segment was in place, the permanent prestress was installed: twenty-eight DSI 12T15S tendons were tensioned in a phased operation to compress the structure gradually and regularly.



Fig. 10 Levage et retournement d'un voussoir / Hoisting and turning a segment



Fig. 11 Présentation d'un nouveau voussoir sur le cintre / Offering up new segment on falsework

L'ensemble de l'ouvrage ainsi constitué a été décintré au moyen de 32 vérins hydrauliques couplés par paires (les 16 bases des faisceaux de poteaux étant équipées) et actionnés par 16 pompes pilotées par un ordinateur central relié à 16 capteurs de déplacement (précision de 1 à 2/10 de mm).

Enfin, un essai de chargement grandeur nature a été entrepris pour vérifier et contrôler la réponse de la structure : la coque a été chargée par 271 big-bags de une tonne chacun, pendant 48 heures. Cette charge ayant été définie de façon à reproduire au plus près les effets les plus sévères qu'engendrent simultanément la neige et le vent.

8. CONCLUSION

Après plusieurs réalisations marquantes, les BFUP conquièrent peu à peu de nouveaux territoires en permettant aux architectes d'imaginer d'autres types de structures, et aux ingénieurs d'explorer d'autres procédés de construction.

The entire structure thus assembled was lifted off its falsework by 32 hydraulic jacks coupled in pairs (being located on the 16 bases of the column clusters) and actuated by 16 pumps controlled by a central computer connected to 16 displacement sensors (precision of 0.1 to 0.2 mm).

A 'real-life' loading test was then carried out to check and monitor the response of the structure: the shell was loaded with 271 bulk bags, each weighing 1 tonne, left in place for 48 hours. This load case had been defined to faithfully reproduce the most severe action effects resulting simultaneously from wind and snow.

8. CONCLUSION

After use in several striking projects, UHPFRC is little by little conquering new territory where it enables architects to imagine new kinds of structures and engineers to explore new construction procedures.

En France, leur développement est facilité par la publication récente des Recommandations de conception et calcul [1] qui vont encourager les maîtres d'ouvrage à utiliser plus largement ces nouveaux matériaux pour leurs besoins spécifiques.

The development of UHPFRC in France has been facilitated by the recent publication of guidelines which are encouraging all those involved in construction to make greater use of this new material and tailor it to their specific requirements.



Fig. 12 Mise en service de l'ouvrage le 16 décembre 2004
Toll plaza opened on 16th December 2004

9. RÉFÉRENCES

[1] AFGC-SETRA "Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Recommandations provisoires / Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes – Interim Recommendations", Janvier 2002.

[2] BPEL 91, 1999 revision "Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites", Fascicule 62, titre I, section II du CCTG, Avril 1999.

9. REFERENCES

[1] AFGC-SETRA "Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Recommandations provisoires / Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes – Interim Recommendations", January 2002.

[2] BPEL 91, 1999 revision "Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites", Fascicule 62, titre I, section II du CCTG, April 1999.