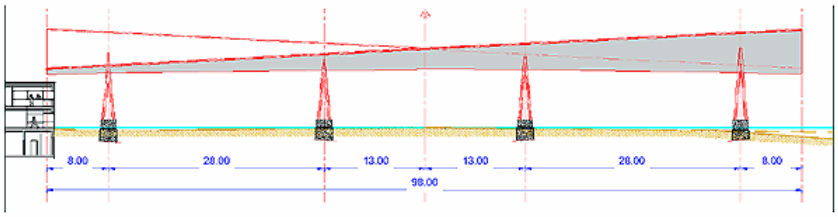
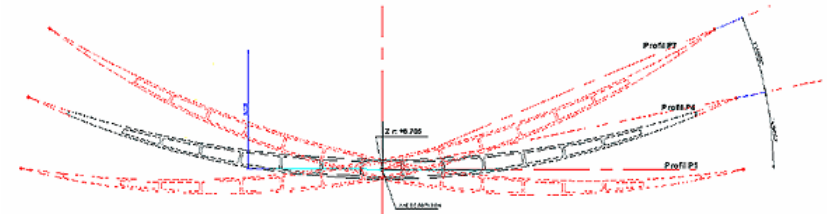
Rapport technique / domaine du bâtiment

Contenu : couverture du péage du viaduc de Millau
Application des BFUP
(Bétons fibrés ultra performants)

Chantier : viaduc de Millau, autoroute A75 - France, couverture du péage
Rédaction : Alain Krummenacher / entrepreneur dipl. / rédacteur TECHNI.CH
CP 251 CH- 3186 Düdingen
Date : 06 janvier 2007

Introduction
A la limite de la recherche-développement.





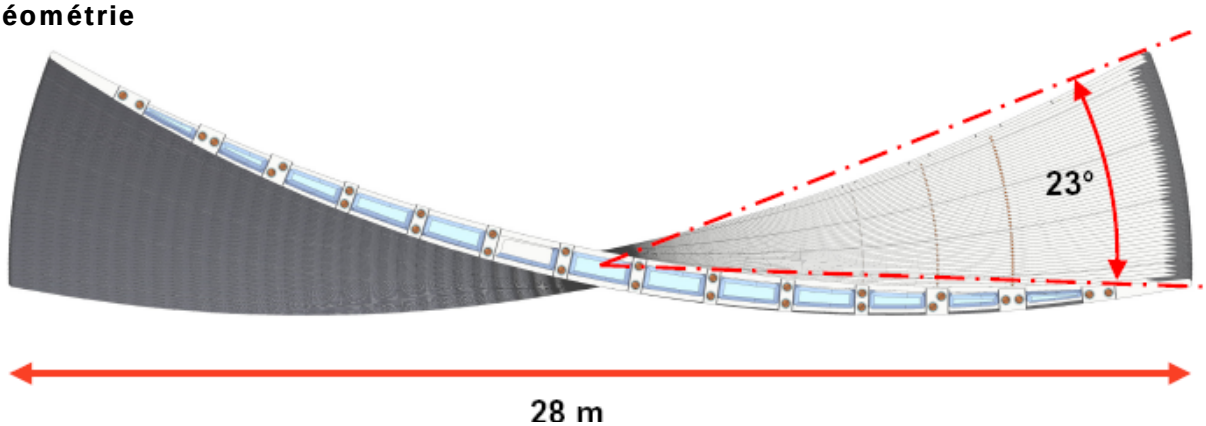
En 2004, les bétons fibrés ultra performants (BFUP) appartenaient encore pour beaucoup d'ingénieurs et d'entrepreneurs au domaine de la recherche et du développement. Dans le cadre de la réalisation du viaduc de Millau, un ouvrage annexe, moins médiatisé, mais à l'image de l'audace du viaduc a été réalisé en BFUP par la société Eiffage Travaux Publics. L'architecte Michel Herbert à conçu cette « voile en torsion » de 98 m de long sur 28 m de large !.

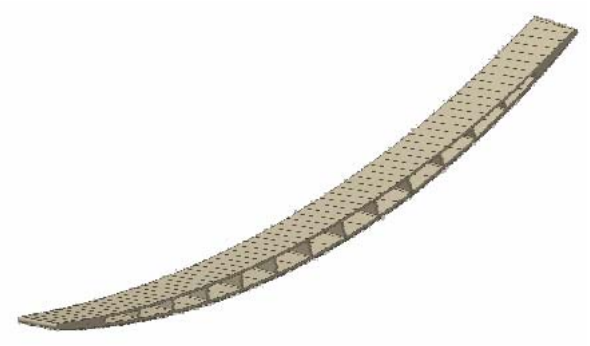
Construction du viaduc

le péage terminé

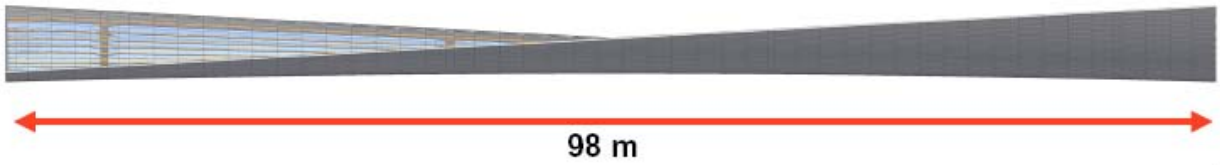
Afin de réaliser cette forme hélicoïdale, un concept de 53 voussoirs identiques a été mis en place. La coque épaisse de 20 à 80 cm de ces voussoirs est creuse (évidements en mousse EPS) et les parois ont uniquement une épaisseur de 10 cm !

Géométrie

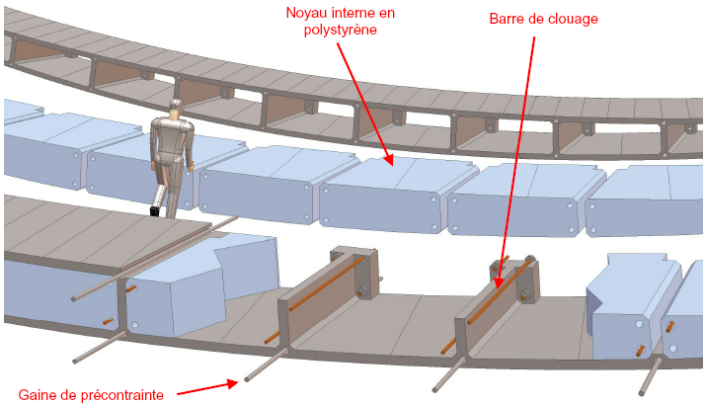




La forme hélicoïdale a été obtenue par une succession de voussoirs gauches (l'enveloppe extérieure est identique pour les 53 éléments) décalés les uns par rapport aux autres d'un angle de rotation en fonction de leur emplacement.
Un seul coffrage a permis la préfabrication des 53 voussoirs. La conception de la structure est basée sur la technique des voussoirs à joints conjugués collés préfabriqués.
Chaque voussoir a une longueur de 28 mètres, une hauteur de 1.85 m et une épaisseur au centre de 85 cm et aux extrémités de 20 cm.



Les 98 m de la couverture sont décomposé en 53 voussoirs assemblés longitudinalement en phase définitive par 28 câbles de précontrainte.



Audace, savoir-faire et défi technique.

Préfabrication des voussoirs / coffrage bétonnage

Préfabriqués verticalement dans un coffrage métallique géant et stockés à 3 km du chantier, ces voussoirs de 40 to ont été transportés ensuite jusqu'au lieu de l'assemblage. L'emplacement (3 kms de distance du chantier) n'était pas idéal mais il n'était pas possible d'utiliser un emplacement plus proche.

Le coffrage réalisé par la Maison PERI était très complexe. Il utilisait le voussoir bétonné comme fond de coffrage pour le voussoir suivant ce qui garantissait lors du montage en assemblage parfait.

Le rythme de bétonnage était le suivant :

- 1 journée de bétonnage
- 1 nuit pour atteindre la résistance nécessaire au levage
- ½ jour pour le décoffrage, la descente du voussoir en contre-moule et le nettoyage du moule.
- ½ jour pour la mise en place dans le coffrage des blocs de polystyrène, des gaines de précontraintes et des autres incorporés.

Cellule de préfabrication

Voussoir en cours de descente pour se Positionner en contre-moule du suivant

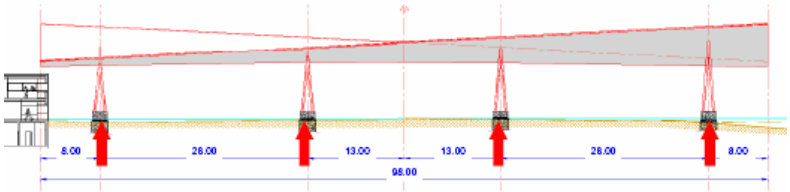
Après décoffrage, le voussoir inférieur ayant servi de contre-moule est posé sur des chariots et transportés vers le lieu de stockage, le voussoir supérieur descend et le cycle recommence.

Transport
Une fois préfabriqués et stockés, les voussoirs ont été transportés depuis le site de préfabrication jusqu'à l'emplacement du chantier (environs 3 kms) au moyen d'un plateau multi-roues Kamag spécialement conçu pour cet ouvrage par la société Goldhofer.

Pose
Un autre défi. Il fallait trouver un système permettant non pas seulement le levage mais également la rotation dans les 3 dimensions.
Les voussoirs ont été assemblés au moyen une imposante grue sur chenille (Demag CC2400, flèche de 66 m, capacité de 600 to à 7m) équipée d'une flèche de 66 m et d'un palonnier capable d'effectuer toutes les rotations dans l'espace.

Chaque voussoir a été retourné puis reposé au sol afin de permettre l'enfilage des barres de clouage, pendant que la colle à voussoir (Sikadur 31) était appliquée sur la tranche du dernier voussoir posé. Cette opération réalisée, le voussoir est à nouveau levé et orienté dans sa position définitive pour être cloué.
Ces opérations ont fait l'objet d'un suivi méticuleux des voussoirs et aucune fissuration ni déformation non prévue n'a été décelée.
Le cycle de pose était de 2 voussoirs par jour.
La précontrainte a ensuite été exécutée en procédant par phases aux deux extrémités.

Le décintrement par vérinage de l'ensemble de la coque a été réalisé au moyen de 32 vérins plats disposés sous les pieds des poteaux.



Sécurité / essais de charges

Jusqu'au bout l'entreprise aura pris toutes les mesures techniques et les précautions de sécurité afin de livrer un ouvrage conforme au cahier des charges.
Un essai de chargement grandeur nature a été effectué à l'aide de 271 big-bags d'une tonne chacun. Conformément aux calculs, la flèche maximale en travée a été inférieure à 2 mm.

Béton BFUP

BFUP ? : Il s'agit de l'avènement d'un nouveau matériau, les bétons devenant « désarmés » (suppression des armatures métalliques).Ce nouveau matériau, en plus d'une résistance importante en compression, résiste à la traction et affiche un comportement ductile (déformation plastique avant rupture). Autrement dit un matériau qui concurrence l'acier ou la fonte en laissant libre cours à l'imagination architecturale.

Béton utilisé : 850 m3 de béton fibré ultraperformant (BFUP) de BSI®-Ceracem.
Il aurait été impossible de construire cet ouvrage avec un béton « ordinaire ».
Les efforts à reprendre auraient conduit à construire une coque de 2 à 3 m d'épaisseur.
Le « béton » utilisé mis au point par Eiffage TP et Sika est plus proche de la fonte que du béton.

Malaxage : Le temps de malaxage est multiplié par 7 en regard d'un béton ordinaire et il faut respecter des procédures bien spécifiques pour introduire les divers composants.
La centrale montée sur place était capable de produire qu'un m3 de BSI®-Ceracem toutes les 20 minutes.
Le mélange s'apparente à une recette sophistiquée dont les ingrédients principaux se compose d'un pré-mélange – principalement du ciment, des fumées de silice et des sables de bauxite- fabriqué en usine et livré sur le chantier en big-bag de 1200 kg, de fibres métalliques, de superfluidifiant et d'eau.
Tous les éléments doivent être pesés avec une précision extrême et ont étés conservés dans des hangars spéciaux sous température et hygrométrie contrôlées afin de ne pas fausser la formule magique.

Quelques chiffres

Longueur	: 98 m
Largeur	: 28 m
Travées	: 8m / 28m / 26m/ 28m/ 8m
Géométrie	: hélicoïdale (rotation totale de 23°)
Section	: hauteur de 20 à 85 cm
Coques	: épaisseur de 10 cm
Poids total	: 2300 tonnes
Précontrainte	: 28 unités DSI 12T 15S
Aciers passifs	: aucun
Nbr de voussoirs	: 53

Le revers de la médaille

Le procédé par béton ultra performant sur un ouvrage de cette ampleur n'a pas été sans problèmes. Le béton BFUP a été dans certains cas moins conciliant que prévu mais l'entreprise a toujours trouvé des solutions afin de maitriser la technique et la sécurité.
Le positionnement des voussoirs afin de prendre la forme de cette voile en torsion a été également un défi. Arriver à créer une ligne parfaite sur 98 m de long… en assemblant 53 éléments…en rotation sur un axe… n'a pas été possible à 100%. Là aussi une solution technique et esthétique a été trouvée par la société Eiffage TP.
Les deux parties frontales (2 x 98 m) ont été reprofilées avec un habillage en aluminium en forme de corniche, ce qui redonne à cette voile la pureté et la finesse de sa ligne.

Il était inévitable qu'un projet d'une telle audace soulève des problèmes. Par contre c'est avec de tels défis que l'on avance dans les nouvelles techniques en faisant sortir les nouveaux procédés des laboratoires et en les confrontant à la réalité.
La force d'une entreprise se mesure également à sa capacité de trouver des solutions face à des problèmes inhabituels tout en garantissant une sécurité optimale.

Conduite des travaux, quelques remarques

Le défi a été relevé et l'ouvrage réalisé à la satisfaction de ses concepteurs.
Pour le conducteur de travaux tout ou presque était nouveau, le BFUP, l'audace de la géométrie, les contraintes etc.. Il a été nécessaire de créer des nouveaux outils de concevoir des nouveaux procédées, des engins de transport et souvent d'adopter des solutions « compliquées et complexes » qui ne peuvent pas être reportés sur d'autres ouvrages.
Lors d'un contact avec Monsieur Thierry Thibaux, directeur technique d'EIFFAGE Travaux Publics, celui-ci me signalait :
« vous avez remarqué que le péage est un projet très particulier, posant des problèmes spécifiques à la limite de la recherche-développement. Par exemple, le coffrage vertical est une solution qui ne se pratique quasiment jamais.
Un autre exemple est le transport des voussoirs sur 3 kms, ce qui n'est pas souhaitable dans l'absolu mais était nécessaire dans le cas du péage car nous ne disposions pas de la zone tout de suite. »

Cet ouvrage doit rester dans son contexte exceptionnel à ce stade de l'application des BFUP.
Le mot de la fin appartient à Monsieur Thibaux ***« Le danger est donc que les conducteurs de travaux utilisent ensuite des solutions compliquées pour des problèmes simples ! »***

Bibliographie:
Midi Libre édition spéciale janvier 2005
Journée Info Holcim/2006
Photos : Eiffage
Remerciement particulier: Eiffage TP / Thierry Thibaux directeur technique

Infos complémentaires :
Recherches en Suisse dans le domaine des BFUP (situation janvier 2007):
-Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), professeurs Eugen Brühwiler et Aurelio Muttoni
-Ecole d'ingénieurs de Fribourg (EIF) : professeur René Sutter