

UN 5^{ÈME} PONT ROUTIER FRANÇAIS EN BFUP : LE TRIPLEMENT DU PONT PINEL À ROUEN

Daniel de MATTEIS, Pierre MARCHAND, Aude PETEL

SETRA

Thierry THIBAUD, Marco NOVARIN, Sandrine CHANUT

Eiffage TP

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE

1.1. L'ouvrage existant et le contexte de son élargissement

Le pont Pinel est un petit ouvrage de 27 m de longueur situé au Petit-Quevilly, au sud de Rouen, qui supporte le trafic entre les voies portuaires sud et les principales voiries de la rive gauche. Il enjambe avec un biais important trois voies ferrées, dont deux électrifiées, desservant une gare de triage (photo 1).



Photo 1 : Vue générale de l'ouvrage existant

L'ouvrage existant est un pont à deux voies à poutrelles enrobées comportant deux travées de 12,20 m et 14,80 m, avec des appuis classiques en béton fondés superficiellement. Construit dans les années 70, il a fait l'objet en 1996 d'un doublement. Son tablier est composé de ce fait de deux dalles à poutrelles enrobées liées par un joint de dilatation longitudinal (figure 1).

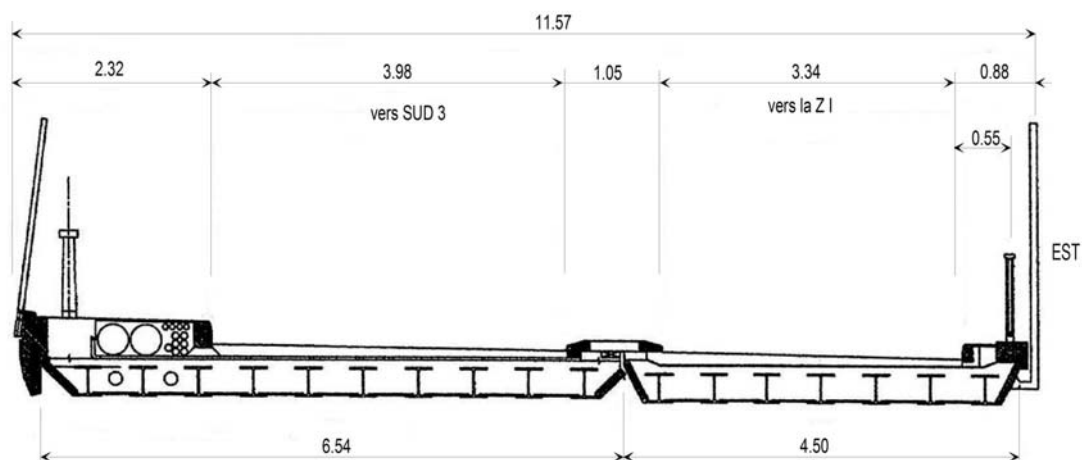


Figure 1 : Coupe transversale du tablier de l'ouvrage existant

En 2008, le giratoire de la Motte situé immédiatement au sud du pont Pinel constituera le débouché provisoire de la liaison entre l'autoroute A150, au nord de la Seine, et la voie rapide Sud III, au sud, qui franchit le nouveau pont levant

appelé pont Flaubert (photo 2). Dans ce contexte, il est prévu d'élargir à nouveau le pont Pinel pour porter sa capacité à deux voies dans le sens Sud > Nord et trois voies dans le sens Nord > Sud, dont une voie d'évitement donnant un accès direct à Sud III.

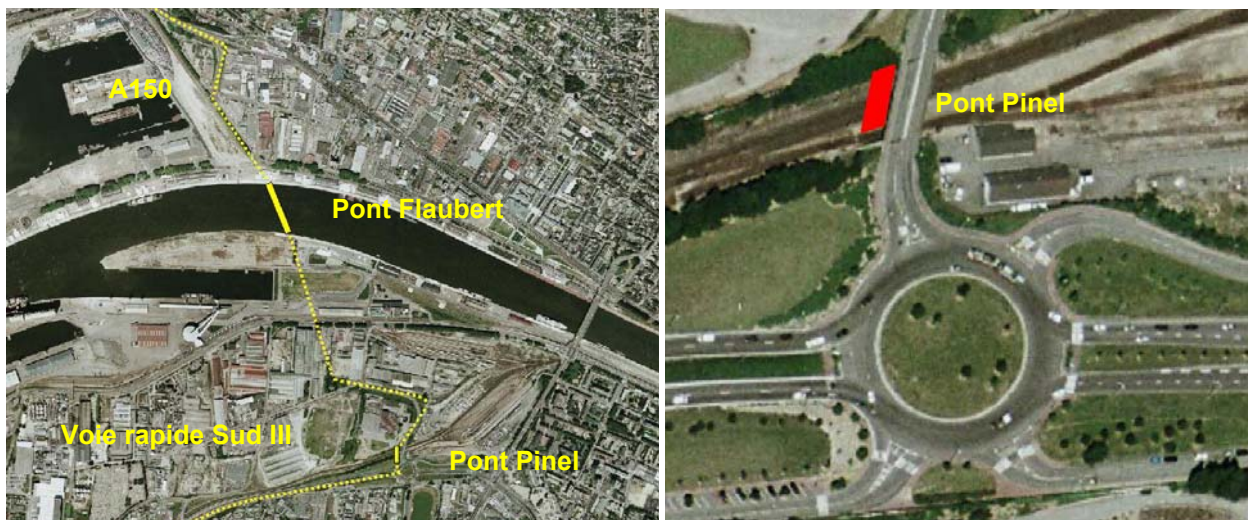


Photo 2 : Plans de situation du pont Pinel

L'article qui suit présente la solution - très classique - qui avait été imaginée pour ce triplement d'ouvrage puis les études et les travaux de la solution beaucoup plus innovante réalisée sur proposition de l'entreprise Eiffage TP, une solution dont le tablier associe des poutres en béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) jointives à un hourdis en béton classique. Il est à noter que ce nouvel ouvrage est le cinquième pont routier français comportant des composants structuraux en BFUP, les quatre autres étant les deux ouvrages de Bourg-lès-Valence, dans la Drôme, le pont de Saint-Pierre-la-Cour, en Mayenne, et le PS 34 sur l'A51.

1.2. Caractéristiques générales de la solution de base du DCE

Le troisième pont Pinel est un ouvrage de 27 m de portée, à travée unique, qui franchit selon un biais de 64 grades les voies ferrées de desserte de la gare de triage de Rouen (figure 2). D'une largeur de 14 m, entièrement déversé à 2,5% vers l'ouest, il supporte une bande dérasée de gauche de 0,50 m, trois voies de circulation de 3,50 m chacune et un trottoir de 2,03 m accueillant une quinzaine de fourreaux. Ses principaux équipements sont une couche de roulement de 8 cm, une couche d'étanchéité de 3 cm, une barrière de type BN4 équipée d'un dispositif de retenue de chargement de camion, une GBA et des corniches préfabriquées en béton. Son profil en long est parabolique, son sommet se situant au milieu de l'ouvrage.

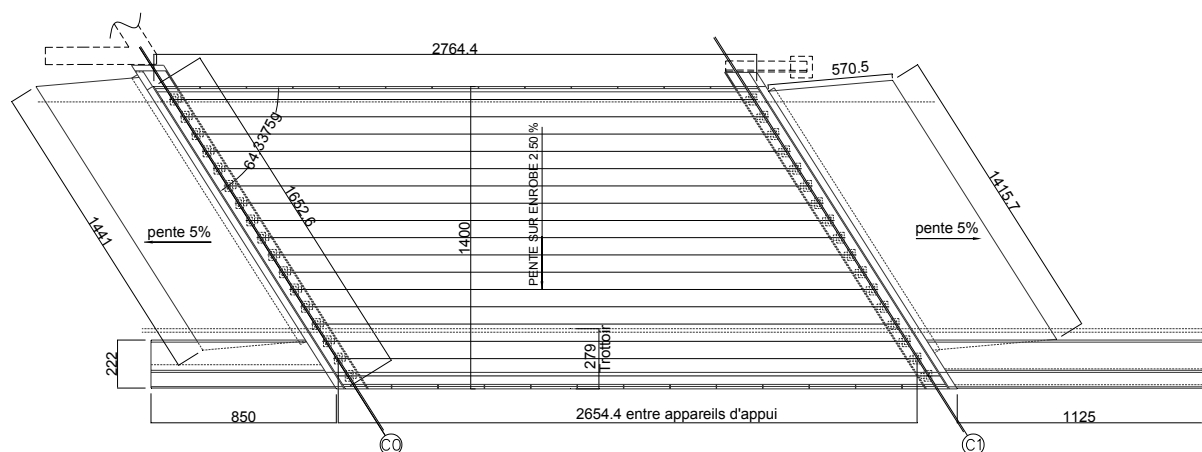


Figure 2 : Vue en plan du nouveau pont

Tel que prévu au dossier de consultation des entreprises, le tablier de l'ouvrage était du type dalle en poutrelles enrobées, avec 17 poutrelles HEB700 (figure 3).

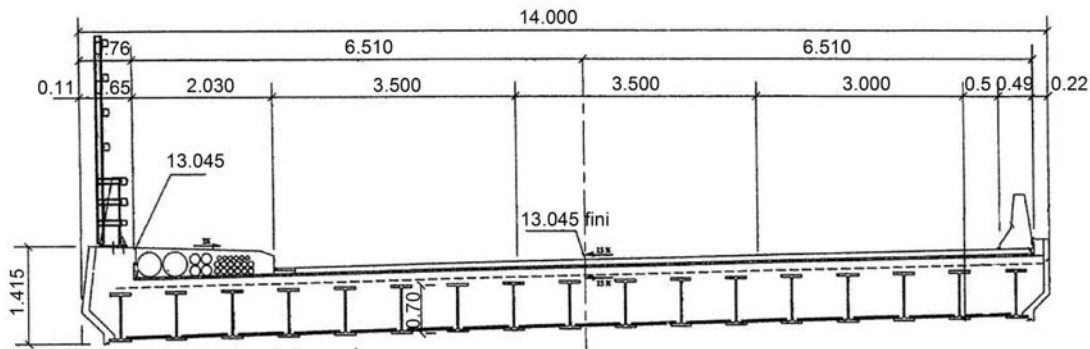


Figure 3 : Coupe transversale de la solution mise à l'appel d'offres

1.3. Caractéristiques générales de la variante d'Eiffage TP

Eiffage TP a proposé plusieurs variantes. La principale consistait à remplacer le tablier à poutrelles enrobées par un tablier de type PRAD constitué de 17 poutres préfabriquées en BFUP "BSI® Ceracem Millau" de 165 Mpa de résistance en compression à 28 jours et d'un hourdis en béton classique C35/45 coulé en place (figure 4).

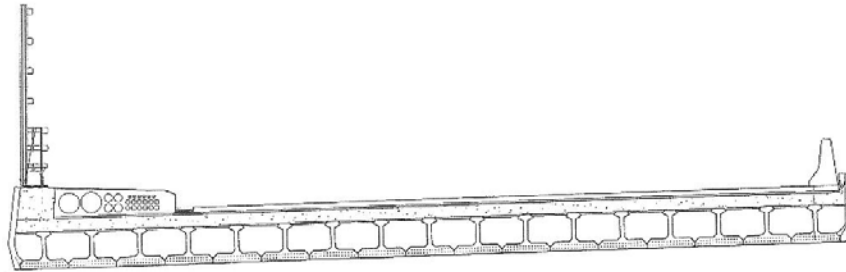


Figure 4 : Coupe transversale du tablier de la variante d'Eiffage TP

Tel que prévu dans l'offre d'Eiffage TP, les dix-sept poutres, toutes identiques, sont inclinées à 2,5%, jointives, présentent une hauteur hors hourdis de 0,62 m et comportent (figure 5) :

- un gros talon inférieur, de 0,80 m par 0,15 m (hors goussets),
- une âme d'épaisseur variable comprise entre 7 cm en zone centrale et 12 cm près des abouts,
- un petit talon supérieur, de 0,250 m par 0,050 m (hors goussets),
- 28 torons T15S de classe 1860, tous placés dans le talon inférieur, s'ancrant progressivement grâce à un gainage de certains d'entre eux,
- des connecteurs de type aciers HA assurant la connexion entre les poutres en BFUP et le hourdis en béton classique, tous placés dans le talon supérieur.

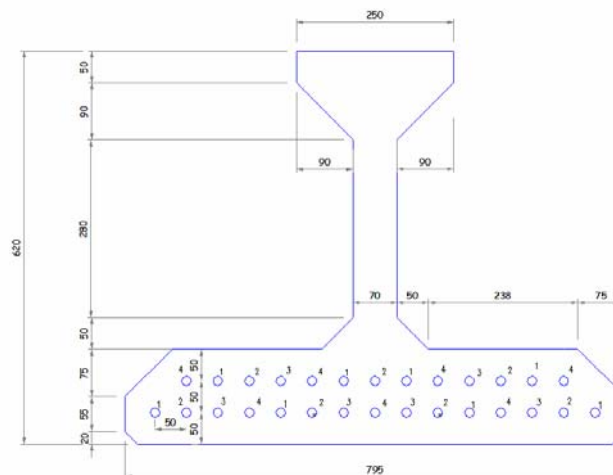


Figure 5 : Coupe transversale d'une poutre courante

A l'about des poutres, deux entretoises de dalle sont coulées en place en même temps que le hourdis pour lier les poutres préfabriquées entre elles. Leur jonction avec les poutres est assurée en croissant vers le haut huit des vingt-huit torons T15S prévus dans chaque poutre.



Tel que prévu dans l'offre d'Eiffage TP, le hourdis supérieur, dont l'épaisseur varie de 21 à 32 cm pour respecter le profil en long parabolique, est exécuté sur des prédalles avec un béton classique de type C35/45. L'offre variante d'Eiffage TP étant légèrement moins chère que les autres offres tout en étant techniquement satisfaisante, le maître d'ouvrage a décidé de la retenir.

2. LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

2.1. Généralités

Les études d'exécution de l'ouvrage ont été réalisées, pour l'essentiel, par le Service Technique OA (STOA) d'Eiffage TP et contrôlées par la Division des Grands Ouvrages du Sétra.

Les justifications ont été menées sur la base des règlements français et du document "Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Recommandations provisoires" édité par le Sétra et l'AFGC en janvier 2002. L'ouvrage doit supporter le char Mc120 mais aucun convoi exceptionnel.

2.2. Le tablier

Bien que l'ouvrage soit isostatique et de portée modeste, son étude demeure complexe de par la prise en compte du biais et des matériaux utilisés.

Modèles utilisés

Les calculs ont été menés en parallèle par Eiffage TP, qui a utilisé un modèle ST1, et le Sétra, qui a opté pour un modèle PCP.

Les deux modèles sont basés sur le même principe, à savoir un grill de poutres représentant le hourdis en béton classique lié rigidement à des poutres modélisant les poutres en BFUP.

S'agissant de précontrainte par pré-tension, la précontrainte a été introduite dans le modèle en tenant compte des pertes par raccourcissement élastique ainsi que des pertes thermiques dues à l'échauffement du béton lors de sa prise.

Le retrait et le fluage ont été modélisés en adoptant les lois d'un béton classique mais en modifiant certains paramètres pour avoir le retrait et le fluage d'un BFUP (rappelons que le retrait total d'un BFUP est de l'ordre de $6 \text{ à } 7.10^{-4}$ au lieu de $2 \text{ à } 2.5 \cdot 10^{-4}$ pour un béton classique et que son coefficient de fluage est de 1 au lieu de 2).

Contraintes normales dans les poutres

La résistance des poutres aux contraintes normales n'a pas posé de problème particulier. Comme pour un PRAD classique, la phase qui sollicite le plus la poutre en BFUP est celle qui suit le relâchement des torons.

Contraintes de cisaillement dans les poutres

La résistance des poutres aux contraintes de cisaillement a été un peu plus difficile à justifier. Les deux modèles de calculs ont en effet montré que, sur les deux poutres de rive, le cisaillement résultant de l'effort tranchant, de la torsion et la diffusion dépassait le cisaillement admissible (ce qui n'était pas le cas sur les poutres courantes).

Les études d'exécution ont donc abouti à deux types de poutre, les poutres courantes déjà décrites et les poutres de rive comportant une âme et un talon supérieur élargis de 3 cm sur toute la longueur de l'ouvrage :

Epaisseur de l'âme	Poutres 2 à 16	Poutres 1 et 17
- sur les 2 m d'about	0.12 m	0.15 m
- entre 2 m et 5 m	0.07 à 0.12 m	0.10 à 0.15 m
- en milieu de poutre	0.07 m	0.10 m

Sur les poutres de rive, pour augmenter la contrainte de compression longitudinale, les torons ont été ancrés plus près de l'about. Pour limiter la traction en fibre supérieure, un toron a également dû être ancré dans le talon supérieur (figure 6).

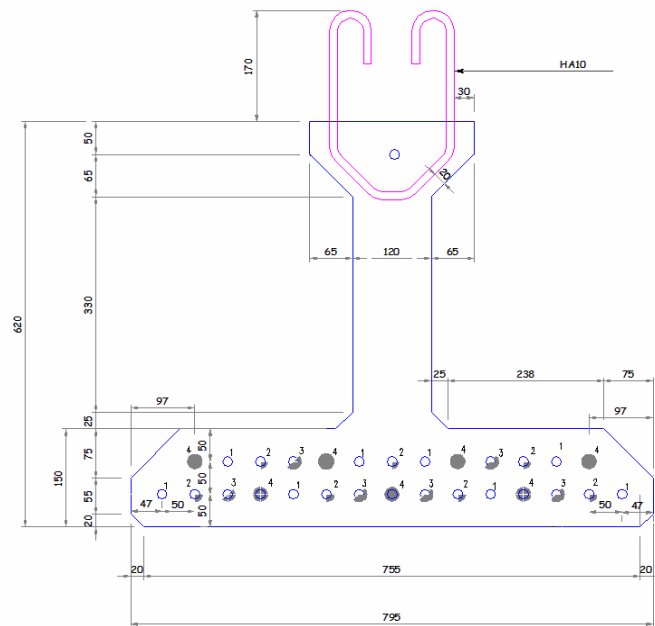


Figure 6 : Coupe transversale d'une poutre de rive (poutre renforcée)

Connexion poutres-hourdis

L'interface entre les poutres et le hourdis ne pouvant bénéficier d'une rugosité suffisante, il a été jugé plus prudent de ne pas la considérer comme une reprise de bétonnage au sens du BAEL, mais comme une interface entièrement lisse où les aciers travaillent exclusivement en cisaillement. Les aciers de liaison ont donc été calculés comme des connecteurs de pont mixte. Cette interprétation est toutefois probablement pessimiste et mériterait de plus amples investigations.

Appareils d'appui

Comme pour les poutres, la justification des appareils d'appui en élastomère fretté, notamment vis-à-vis des rotations, s'est effectuée sans difficultés pour les appareils d'appui courants mais plus difficilement pour les deux appareils d'appui de rive situés dans les angles obtus du tablier. In fine, il a été décidé de poser les poutres directement sur les appareils d'appui courants, et de mater les deux appareils d'appui de rive situés dans les angles obtus.

Orientation des poutres

Pour faciliter la pose des poutres et limiter la torsion dans celles-ci, il a finalement été décidé de poser les poutres avec leur âme parfaitement verticale, le dévers global étant obtenu par un décalage vertical de 17 mm entre chaque poutre et sa voisine (figure 7).

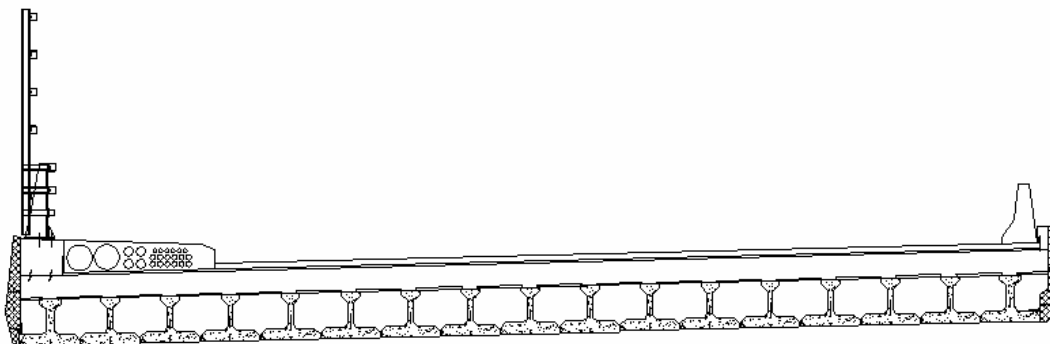


Figure 7 : Coupe transversale définitive avec poutres verticales

3. LES TRAVAUX

3.1. Généralités

Les travaux se sont déroulés durant l'année 2007 et ont été réalisés par l'agence Haute Normandie d'Eiffage.



3.2. La préfabrication des poutres en BFUP

Généralités

Les poutres en BFUP ont été préfabriquées à Veldhoven, près d'Eindhoven (Pays-Bas) par la société néerlandaise Hurks Béton. Cette dernière est le partenaire historique d'Eiffage pour son activité BFUP, puisqu'elle a contribué aux principales réalisations en BSI dont la préfabrication des poutres en BFUP des centrales EDF de Civaux et de Cattenom ainsi que celles des ponts de Bourg-lès-Valence.

Le béton fibré

Le BFUP utilisé pour les poutres du pont Pinel est identique au BSI® Ceracem Millau utilisé pour la construction en voussoirs préfabriqués de l'auvent du péage du viaduc de Millau. Rappelons qu'il s'agit d'un béton fibré de résistance caractéristique égale à 165 MPa, dont la composition est la suivante :

- 2360 kg de Premix (*) Ceracem BFM-Millau,
- 45 kg de super plastifiant,
- 195 kg d'eau,
- 195 kg de fibres métalliques.

(*) Le Premix est un composant sec, livré en sacs, constitué de ciment et de granulats.

La fabrication des poutres

La fabrication des poutres en BFUP est assez proche de celle des poutres de type PRAD et s'effectue notamment au-dessus d'un banc de mise en tension. Compte tenu de la grande différence de largeur entre le talon inférieur et l'âme, Eiffage et Hurks Béton ont opté pour un bétonnage en deux phases :

- tout d'abord le talon, seule la partie basse du coffrage étant en place,
- puis l'âme et le gousset supérieur, la partie haute du coffrage étant ajoutée et les connecteurs insérés.

Un délai compris entre 30 et 60 minutes pouvant s'écouler entre ces deux phases, il était nécessaire de briser une légère croûte se formant à la surface du béton du talon inférieur (phénomène déjà rencontré sur d'autres ouvrages), pour garantir une bonne interpénétration des fibres au niveau de la jonction âme-talon. A cet effet, un dispositif approprié mis au point par Hurks était installé dans le coffrage avant chaque bétonnage de talon et était retiré après installation de la partie haute du coffrage (photo 3).



Photo 3 : Mise en place de la partie supérieure du coffrage

Comme pour les poutrelles PRAD classiques, la prise du béton a fait l'objet d'un suivi maturométrique basé sur des sondes de température placées à un mètre de chaque about, en haut de l'âme et dans le talon inférieur. La poutre était ainsi décoffrée dès que la maturométrie indiquait une résistance du béton supérieure à 101 MPa, ce qui était généralement obtenu au bout d'environ 24 heures, et ceci sans étuvage.

Les poutres en BFUP ont été réalisées avec un about présentant le même biais que l'ouvrage, donc 64 grades. Afin d'éviter toute rupture de l'angle du talon inférieur due à la contre-flèche de la poutre, lors de la phase de détension, l'entreprise a placé dans le coffrage deux fourrures réduisant de quelques millimètres la hauteur de l'extrémité biaise des poutres, ce qui empêche les poutres de s'appuyer sur ces zones à risques.

L'épreuve de convenance

Avant le début de la préfabrication des poutres, une épreuve de convenance a été réalisée. Comme indiqué dans les recommandations provisoires AFGC/Sétra concernant les BFUP, l'épreuve de convenance a pour but, sur un ouvrage de ce type, de valider la formule du béton et des moyens de mise en œuvre mais aussi de valider les modalités détaillées du bétonnage des poutres. En général, l'épreuve de convenance valide ces paramètres et permet de déterminer le coefficient d'orientation des fibres K dont est issue la résistance en traction apportée par les fibres.

L'épreuve de convenance peut cependant, dans certains cas, mettre en évidence une méthodologie de bétonnage orientant trop les fibres, donc à revoir.

A cet effet, un élément témoin d'une longueur de 5 m, exécuté à l'aide d'un des deux tronçons d'extrémité du coffrage des poutres, a été bétonné dans les mêmes conditions que les futures poutres : même usine, même malaxeur, même coffrage en deux parties, même légère vibration du coffrage au cours du bétonnage, etc....

Cet élément témoin a ensuite fait l'objet de carottages. Six carottes horizontales, six carottes verticales et six carottes obliques, soit dix-huit carottes, ont ainsi été extraites par Hurks Béton puis testées en flexion "3 points" avec entaille dans le laboratoire de la société SIKA, fournisseur du Premix, à Gournay-en-Bray (figure 8). Il faut noter que la poutre comprenant des zones dans lesquelles l'âme est d'épaisseur variable, les carottes sont effectuées uniquement dans les zones latérales, d'épaisseur constante.

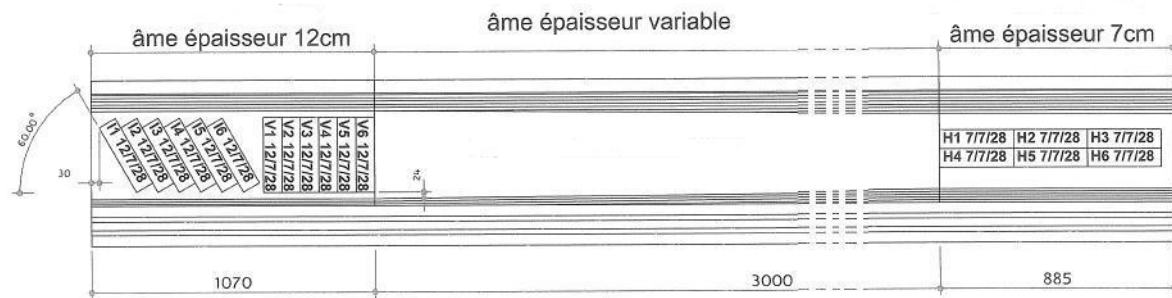


Figure 8 : Schéma de carottage de l'épreuve de convenance

Comme sur d'autres chantiers, l'épreuve de convenance a posé un certain nombre de problèmes et a dû être refaite deux fois, ce qui a retardé le début de la préfabrication des poutres. Ainsi :

- la première épreuve de convenance a été abandonnée dès son décoffrage en raison d'un bullage trop important des âmes - probablement dû à un étalement au cône trop faible de la seconde gâchée - qui aurait pu entâcher les résultats des essais ;
- la deuxième épreuve de convenance a été jugée non satisfaisante, l'analyse des essais de flexion "3 points" ayant montré une anisotropie de la distribution des fibres dans le béton, conduisant à une valeur du coefficient de répartition des fibres K insuffisante (cette anisotropie a été attribuée à un volume un peu trop faible de la gâchée de BFUP (300 litres au lieu de 500 litres, valeur minimale recommandée pour le malaxeur) et à une floculation importante des fibres, elle-même probablement due à un stockage prolongé en atmosphère humide).

3.3. Le transport et la pose des poutres en BFUP

Les poutres ont été transportées entre Veldhoven, aux Pays-Bas, et Sotteville-lès-Rouen par train, le reste du trajet, soit quelques kilomètres, étant effectué en camion.

Les dix-sept poutres (photo 4), d'un poids maximal de 14 tonnes, ont été posées sous interruption du trafic ferroviaire le samedi 9 juin 2007, à l'aide d'une grue mobile de 300 tonnes (photo 5).



Photo 4 : Stockage des poutres sur chantier



Photo 5 : Pose des poutres

Comme décidé pendant les études d'exécution, les quinze poutres centrales ont été posées directement sur les appareils d'appui définitifs, donc sans matage, des cales latérales en profilés métalliques garantissant leur stabilité. Les deux poutres de rive ont, elles, été posées sur des cales provisoires (photo 6), les appareils d'appui définitifs étant mis en place en fin de chantier et matés.



Photo 6 : Cales provisoires pour les poutres de rive



Photo 7 : Sous-face du tablier

Le bétonnage du hourdis en béton classique C35/45

Le hourdis a été coffré à l'aide de prédalles Duripanel de 36 mm d'épaisseur et exécuté à l'aide d'un béton de type C35/45. Son bétonnage s'est déroulé en cinq heures environ, les entretoises de dalle étant bétonnées en dernier pour limiter la torsion dans les poutres (en effet, si on commence le bétonnage par les entretoises et que le béton durcit, les poutres n'ont plus tendance à travailler selon leur axe longitudinal mais selon un axe perpendiculaire aux retombées, induisant de ce fait de la torsion).

4. INTÉRÊT DE LA SOLUTION VARIANTE ET CONCLUSIONS

Les poutres mises en œuvre sur ce chantier sont des poutres en BFUP développées par la société Eiffage TP.

Selon leur concepteur, ces poutres sont les éléments principaux d'une nouvelle structure de tablier pouvant constituer une alternative économique et durable aux dalles en poutrelles enrobées, en particulier lorsque l'ouvrage franchit des voies circulées et que ses portées dépassent la vingtaine de mètres.

En service, les principaux avantages de cette structure sont la grande durabilité des poutres en BFUP (aucun entretien de la sous-face de l'ouvrage) ainsi que la possibilité de concevoir des tabliers très minces (pour le pont Pinel, l'élanement des poutres s'établit au 1/43ème et celui du tablier complet au 1/31ème). La structure est également beaucoup moins lourde qu'une structure en dalle à poutrelles enrobées (environ 40% de moins ici), ce qui dans certaines conditions de sols, peut permettre de réduire les fondations de l'ouvrage.

En construction, ses principaux avantages sont, d'une part, la grande stabilité des poutres et, d'autre part, la rapidité et la sécurité des tâches à mener une fois les poutres posées. En effet, les poutres étant jointives (aux tolérances d'exécution près), les interventions humaines se font en sécurité et les platelages provisoires sont supprimés. La pose des prédalles peut ainsi être effectuée très rapidement, de jour et sans interruption de circulation. Le ferrailage et le bétonnage du hourdis sont également beaucoup plus rapides que celui d'une dalle à poutrelles enrobées (quantité de béton très inférieure, pas d'aciers transversaux à enfiler dans les poutrelles, etc...).

La construction de cet élargissement du pont Pinel confirme les avantages mis en avant par l'entreprise. Il reste maintenant à améliorer quelques points encore perfectibles comme la durée importante de l'épreuve de convenue et l'état de surface de certaines parties des poutres.

5. RÉFÉRENCES

- 1) AFREM – BFM (1995) : Recommandations sur les méthodes de dimensionnement, les essais de caractérisation, de convenue 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, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Janvier, 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 Fibers reinforced concrete ribbed slab : experimental validation and preliminary detailed analyses, 7th International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete, Washington D.C. (USA), june 20-22, 2005
- 8) J. Resplendino, S. Bouteille «Les derniers développements dans l'utilisation des Bétons Fibrés Ultra Performants en France », congrès AFGC/GC2005, Paris (2005)
- 9) J. Hanoteau, M. Behloul, O. Bayard, J. Resplendino , S. Bouteille, L. Boutonnet , S. Vildaer, B. Radiguet , S. Bernhard, N. Padovan «Ductal : a new material, the bridge of St Pierre La Cour», in the French technology of concrete, AFGC, The second fib congress, Naples (2006)
- 10) J. Resplendino, S. Bouteille, O. Delauzun, E. Maleco, C. Dumont, P. Cantrelle, G. Chanliaud, C. Clergue, Y. Lingard, A. Capra, L. Linger, J. Martin, M. Guilloud «Construction of an overpass on the A51 Motorway, made of a prestressed box beam built with UHPFRC», in the French Technology of concrete, AFGC, The second fib congress, Naples (2006)
- 11) J. Resplendino, S. Bouteille «Construction de deux ponts routiers en béton fibré ultra performant (BFUP), bulletin OA du Sétra n°53