

Un cinquième pont routier français en BFUP

Le triplement du pont Pinel à Rouen

Sandrine Chanut, Nicolas Fabry, Gérard Leclerc, Pierre Marchand, David Marchesse, Daniel de Matteis, Aude Petel, Thierry Thibaux

Présentation générale de l'ouvrage

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).

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).

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



Photo 1 : vue générale de l'ouvrage existant – Source : Sétra



Photo 2 : plans de situation du pont Pinel – Source : Sétra

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.

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.

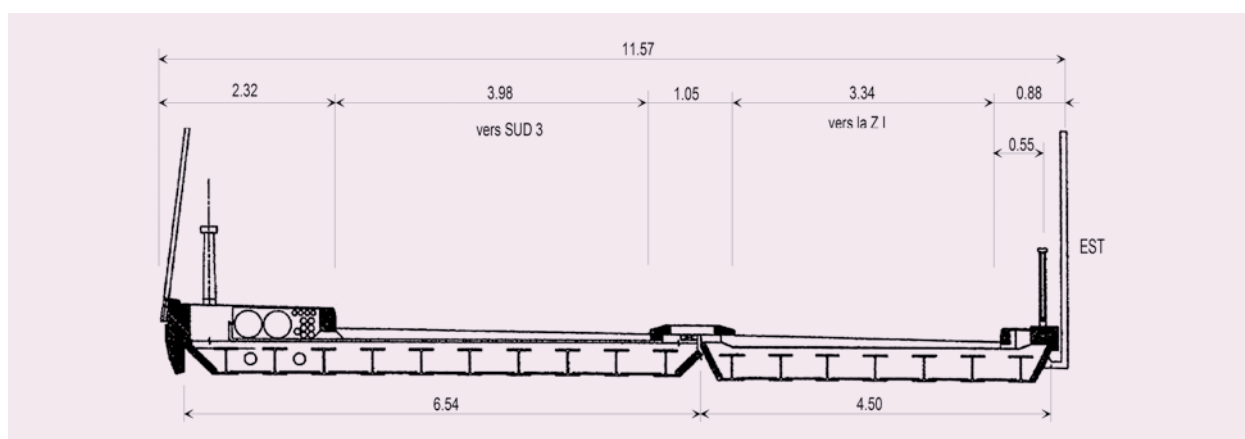


Figure 1 : coupe transversale du tablier de l'ouvrage existant

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.

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), et les deux culées étaient constituées de rideaux de palplanches raidis par des profilés en H (rideaux mixtes Hz), ce qui permettait de grandement simplifier leur exécution.

Caractéristiques générales de la variante d'Eiffage Tp

Eiffage Tp a proposé une solution variante portant sur deux points.

Le premier consiste à remplacer les rideaux de palplanches avec profilés par des rideaux sans profilés mais ancrés.

Le second point consiste 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).

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.

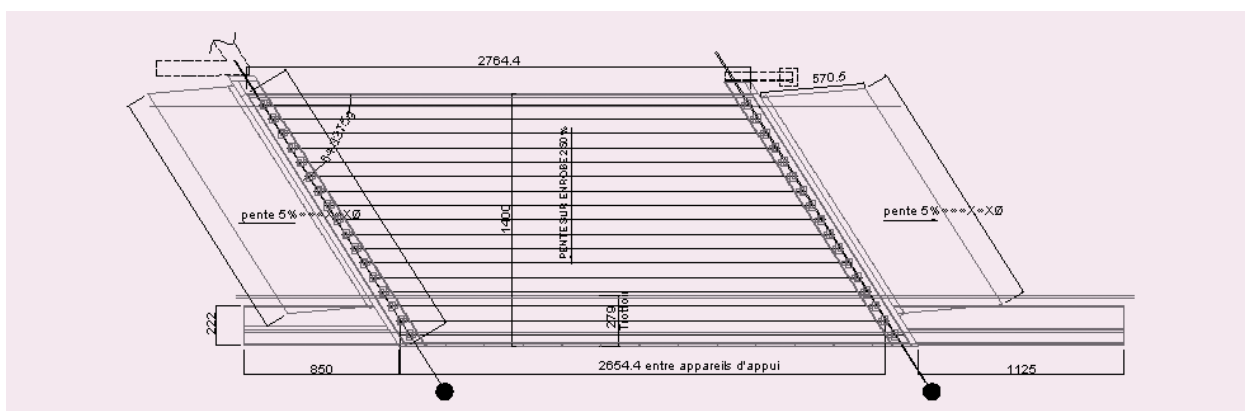


Figure 2 : vue en plan du nouveau pont

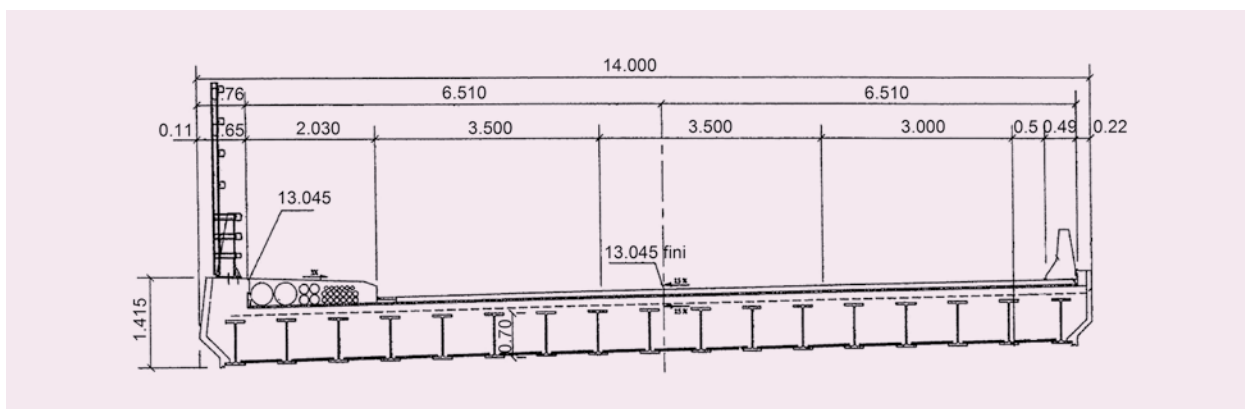


Figure 3 : coupe transversale de la solution mise à l'appel d'offres

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 crossant 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.

Les études d'exécution

Les études d'exécution des appuis ont été réalisées par le bureau d'études d'Eiffage Haute-Normandie (M. Maillot) et contrôlées par la division DEIOA du CETE Normandie-Centre.

Les études d'exécution du tablier ont été réalisées par le service technique ouvrages d'art (STOA) d'Eiffage TP

(MM. Fabry, Simon, Novarin et Thibaux) 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.

Les appuis

Les chevêtres en béton armé sont encastrés sur des rideaux de palplanches Larssen 606n, tandis que les murs en retour du côté opposé à l'ouvrage existant sont constitués par des palplanches Larssen 605. Les palplanches sous chevêtres, qui doivent reprendre à la fois la poussée des terres et les efforts horizontaux du tablier, sont ancrées par des tirants. Ces derniers se reprennent pour partie sur des rideaux arrière en palplanches PU12 et pour partie sur les rideaux formant murs en retour et sont constitués par des barres Gewi de 36 et 40 mm de diamètre.

Les calculs des rideaux de palplanches ont été effectués à l'aide du logiciel RDO. Un premier dimensionnement a été effectué avec une valeur approchée du module de réaction du rideau d'ancrage. Après détermination de ce dernier, un nouveau calcul a été effectué en tenant

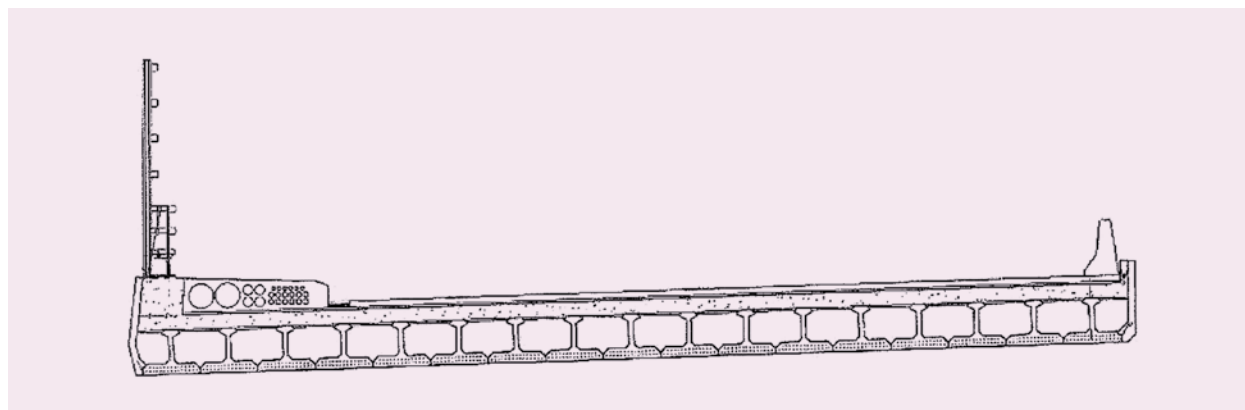


Figure 4 : coupe transversale du tablier de la variante d'Eiffage TP

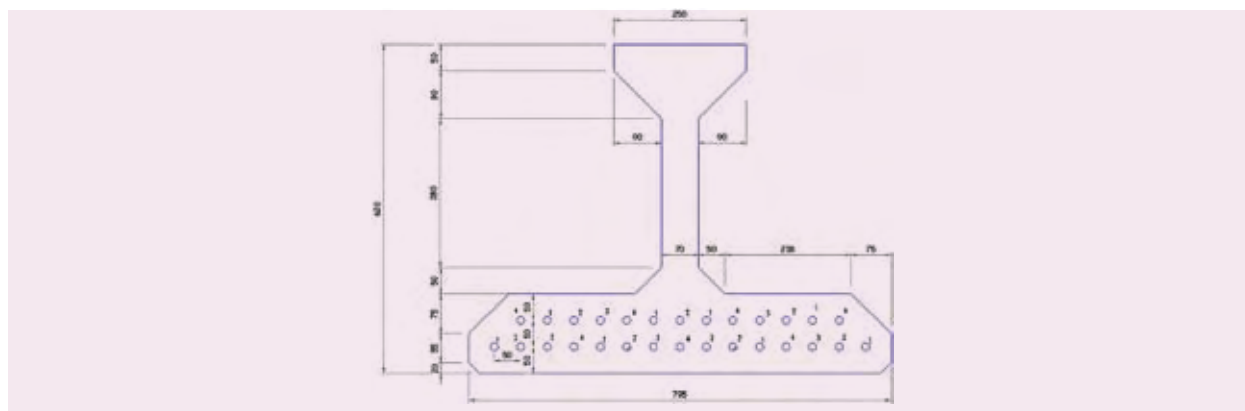


Figure 5 : coupe transversale d'une poutre courante

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). Cette décision dégrade très légèrement l'esthétique de la sous-face de l'ouvrage, qui n'est plus tout-à-fait plane, mais ce point n'a pas été considéré comme important dans le contexte général de l'ouvrage.

Les travaux

Les travaux se sont déroulés durant presque toute l'année 2007. Ils ont été réalisés par l'agence Haute Normandie d'Eiffage (MM. Lucien et El Gourari) assistée par Mlle Chanut et M. Salé d'Eiffage T_p pour la partie poutres. Ils ont été contrôlés par le service d'ingénierie routière (SIR) de Rouen de la direction interdépartementale des routes (DIR) du Nord-Ouest (M. Dupont), ce dernier étant assisté par la section ouvrages d'art du laboratoire régional (LR) des Ponts et Chaussées de Rouen pour le contrôle des matériaux et procédures qualité (M. Gilleron).

Les culées

Les palplanches ont d'abord été vibro-foncées puis battues au refus, notamment avec un mouton D30. Les cotes atteintes ont été peu différentes de celles auxquelles on pouvait s'attendre au vu des études géotechniques.

Le rideau sud a été battu pour partie à l'arrière et assez près du mur en aile en béton de l'ouvrage existant mais heureusement, aucune structure inattendue susceptible de constituer un obstacle n'a été rencontrée.

Une attention particulière a enfin été apportée à la provenance des remblais techniques mis en œuvre derrière les culées.

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 :

- 2 360 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.

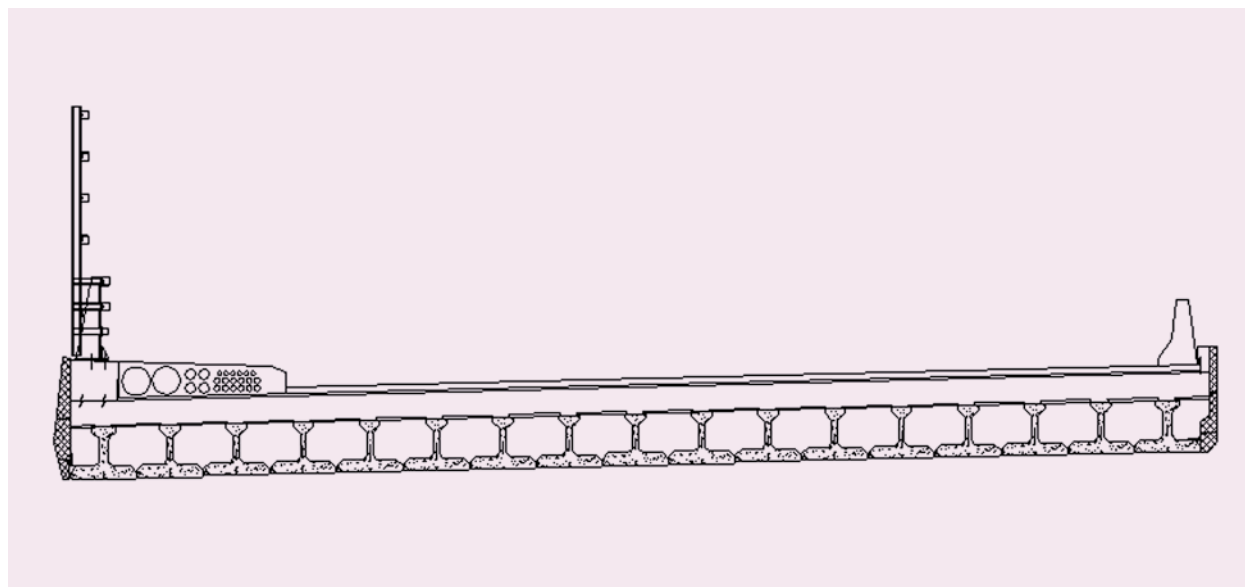


Figure 7 : coupe transversale définitive avec poutres verticales

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. À 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).

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, Eiffage Tr 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.

À 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.

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 ;

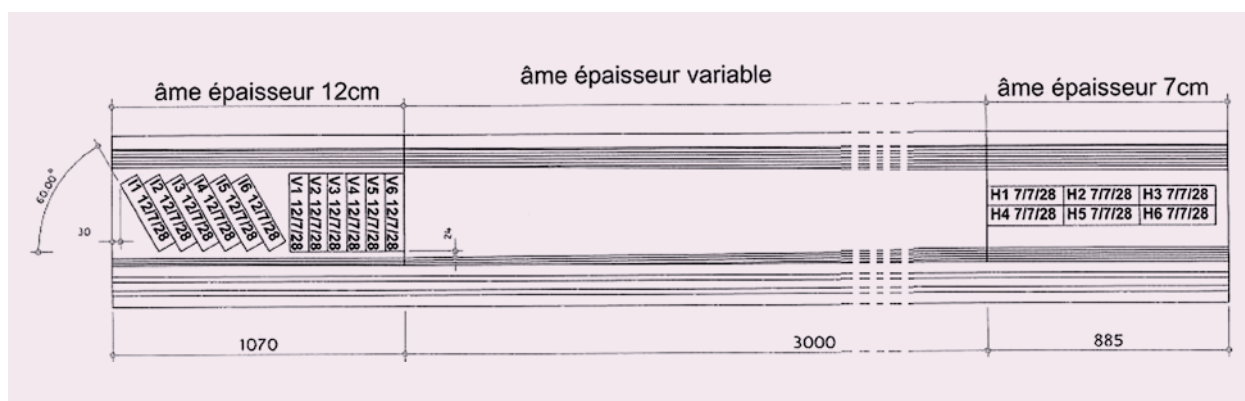




Photo 3 : mise en place de la partie supérieure du coffrage
Source : P. Gilleron (LRPC de Rouen)



Photo 4 : stockage des poutres sur chantier – Source : Séttra

• 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).

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) stationnée

derrière la culée nord de l'ouvrage, à une distance suffisamment importante pour ne pas provoquer de flexion significative dans le rideau de palplanches de cet appui.

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 5 : pose des poutres – Source : Séttra



Photo 6 : cales provisoires pour les poutres de rive – Source : Séttra



Photo 7 : sous-face du tablier – Source : Séttra

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).

Autres points

Un état de surface très irrégulier, avec des « assiettes » d'une profondeur de l'ordre de 2 mm, a été constaté sur la face supérieure du talon inférieur de certaines poutres. Ce phénomène a pour origine l'air emprisonné pendant la mise en place de la partie supérieure du coffrage, ainsi que l'horizontalité importante de cette zone. Cet état de surface ne constitue cependant pas un problème majeur, les surfaces concernées n'étant plus visibles une fois l'ouvrage achevé et un enrobage suffisant étant respecté.

Par ailleurs, une fissure presque horizontale de 2 à 3 dixièmes de millimètre est apparue près de l'about d'une des poutres de rive, à une dizaine de centimètres sous la base du talon supérieur, peu après la détension des torons. Après examen de cette fissure sur le site, heureusement située dans une zone non critique, il a été décidé de conserver la poutre mais de la réparer par collage à la résine de feuilles de carbone de type Carbodur. L'origine de cette fissure n'est pas connue mais un problème du même type avait déjà été rencontré sur l'une des poutres d'un autre pont à tablier en BFUP.

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 et dénommées poutres ITE® (poutres en I à Talon Elargi).

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 la structure d'Eiffage TP 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'élancement des poutres s'établit au 1/43^e et celui du tablier complet au 1/31^e). 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 Eiffage TP. Il reste maintenant à améliorer quelques points encore perfectibles :

- la durée importante de l'épreuve de convenance,
- la fissuration de la poutre de rive,
- la qualité de l'extrados et l'état de surface du dessus du talon inférieur ■