

LA POUTRE ITE®, UNE ALTERNATIVE ECONOMIQUE ET DURABLE AUX POUTRELLES ENROBEES

EIFFAGE Travaux Publics – 2, rue Hélène Boucher – 93337 NEUILLY SUR MARNE

Ziad HAJAR
Marco NOVARIN
Alain SIMON
Thierry THIBAUX

EIFFAGE TP Direction Technique
EIFFAGE TP Direction Technique
EIFFAGE TP Direction Technique
EIFFAGE TP Direction Technique

Sandrine CHANUT
René SALE

EIFFAGE TP Recherche et Développement
EIFFAGE TP Recherche et Développement

RESUME

Depuis plus de 35 ans, le tablier en poutrelles enrobées est la seule et unique solution qui s'offre à l'ingénieur pour franchir une voie circulée avec une épaisseur minimale.

Grâce aux progrès techniques accomplis par les BFUP depuis leur apparition il y a 10 ans, d'autres solutions s'ouvrent aujourd'hui au concepteur. C'est le cas de la poutre ITE®, réalisée en BSI/CERACEM et utilisée pour la première fois à Rouen (France) pour le réaménagement du Pont Pinel, à proximité du nouveau Pont levant Gustave Flaubert.

1. LE DOMAINE D'EMPLOI DES PONTS EN POUTRELLES ENROBEES

• INFLUENCE DES CONTRAINTES DE SITE

D'une manière générale, pour concevoir un franchissement, l'ingénieur dispose de toute une panoplie de solutions techniques associant différents matériaux (béton, acier, mixte,...) et différentes formes (poutres, dalles-caissons, etc...). Lorsque les contraintes deviennent fortes, le choix des solutions se resserre jusqu'à n'offrir qu'un choix très réduit.

Aussi, en site urbain, et lors du franchissement de voies routières ou ferrées en service, seule la solution en poutrelles enrobées s'avère convenir car réduisant au minimum l'épaisseur nécessaire du tablier (nous écarterons ici les ponts à poutres latérales peu adaptées aux zones urbaines).

Rappelons qu'un pont à poutrelles enrobées est un ouvrage dont le tablier est composé de poutrelles métalliques enrobées dans une dalle en béton armé.

Les poutrelles, dont l'espacement est en général compris entre 0,80 m et 1,20 m, sont reliées en sous-face par des dalles servant de coffrage perdu. Après ferrailage de la dalle entre les poutrelles, celle-ci est bétonnée en 2 phases pour réduire les flèches dues au poids du béton frais.

Cette solution, en général plus onéreuse qu'une structure à poutres, est souvent la seule à offrir un gabarit réduit au strict minimum.

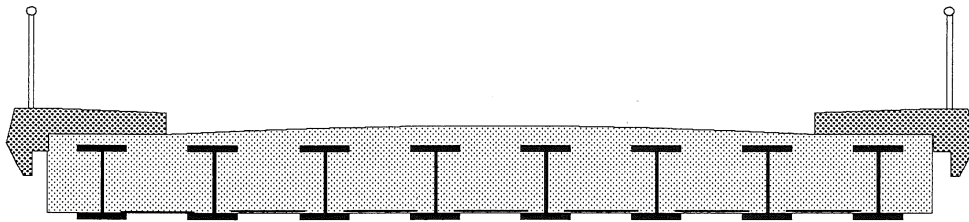


Figure 1 : tablier à poutrelles enrobées – Principe

• DES DONNEES ECONOMIQUES MODIFIEES

La hausse continue du prix de l'acier est venue, ces dernières années, modifier l'économie des solutions mais surtout les délais plus longs d'approvisionnement ont contraint les entreprises à rechercher des solutions alternatives offrant les mêmes qualités et la même pérennité. Enfin le souci de réduire au minimum les nuisances pour les usagers et les riverains lors de travaux d'infrastructure se fait de plus en plus fortement sentir lors du choix de tel ou telle méthode de construction.

De ce constat est né le concept de poutre ITE® (poutre en I à Talon Elargi).

2 . LA POUTRE ITE®

• PRINCIPE

Il s'agit d'une poutre préfabriquée en T inversé réalisée en BFUP et précontrainte par fils adhérents. Sa conception s'inscrit dans une démarche de recherche long terme démarrée en 1997 dans le cadre de la "Charte Innovation Ouvrages d'Art". A cette époque, 2 concepts de tabliers de pont en BFUP avaient été proposés par le Groupe EIFFAGE :

- un système de mini-caissons pour passages supérieurs autoroutiers, concrétisé par les ouvrages innovants de Bourg-lès-Valence (2001),
- un système de tabliers à dalle élégiée pour suppression de passages à niveau dont les poutres ITE®

s'inspirent en partie.

Dans le cas du Pont Pinel, le matériau utilisé est le BSI/CERACEM, matériau développé par le Groupe EIFFAGE en partenariat avec la Société SIKA.

La forme en T inversé permet aux talons des 2 poutres d'être jointifs et de reconstituer une sous-face plane (figure 2). A la différence des poutrelles enrobées acier ou de poutres préfabriquées en béton intégrant des sous-faces jointives, l'espace entre les poutres est laissé vide ce qui augmente fortement le rendement géométrique. Un hourdis supérieur en béton armé classique est alors coulé sur des prédalles posées sur le dessus des poutres comme pour un tablier PRAD (Pont à poutrelles préfabriquées précontraintes par adhérence).

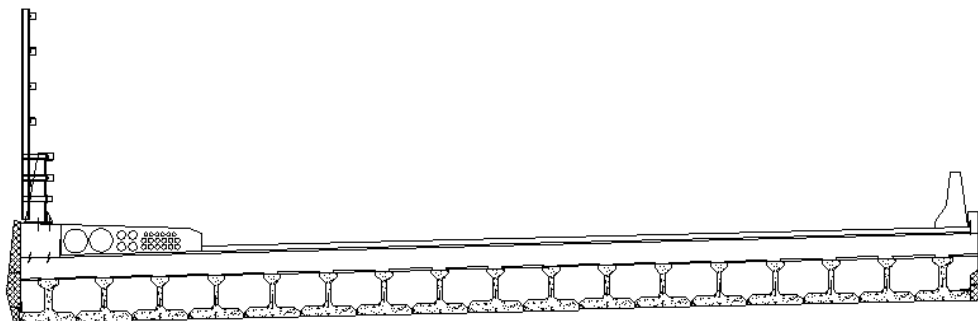


Figure 2 : Coupe transversale du pont Pinel avec poutres ITE®

▪ DESCRIPTION DE LA POUTRE

La poutre standard utilisée pour le Pont Pinel a une hauteur hors-tout de 62 cm et un talon de 80 cm de largeur ; l'épaisseur de l'âme varie de 7 cm en section courante (figure 3), à 12 cm aux abouts.

Elle est fortement précontrainte par 28 torons T15 S tous situés dans le talon mais en réalité peu excentrés par rapport au centre de gravité de la section. Son poids est de 12 T.

Hormis les aciers de connexion avec la dalle supérieure réalisée en béton armé classique, la poutre ne comporte aucun acier passif.

Dans le cas du Pont Pinel (voir § "Pose des poutres") qui possède un biais important (64 grades), les 2 poutres de rive ont les mêmes caractéristiques mais les âmes sont épaissies de 7 à 10 cm en section courante et de 12 à 15 cm aux abouts.

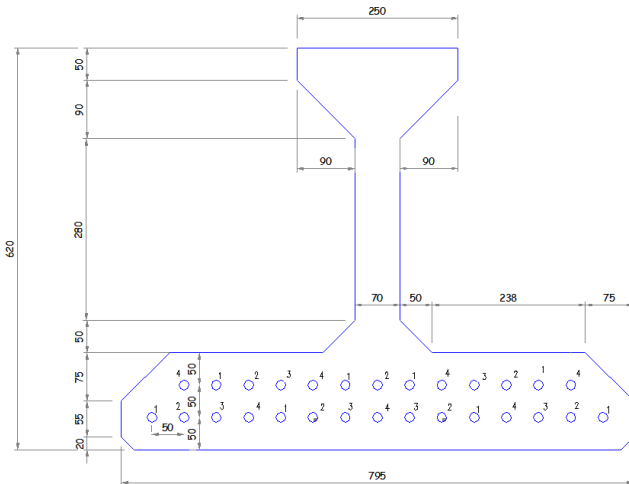


Figure 3 : Pont Pinel - Coupe transversale d'une poutre (section standard)

- **LE BSI/CERACEM, BETON FIBRE A ULTRA HAUTES PERFORMANCES DU GROUPE EIFFAGE**

Le BFUP utilisé pour la fabrication des poutres ITE® est le BSI/CERACEM développé par le Groupe EIFFAGE. Ce béton fibré de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 165 Mpa en compression peut être formulé de différentes manières suivant son utilisation. Pour les poutres ITE® la formule est identique à celle utilisée pour la construction de l'auvent du péage de Millau à savoir :

- 2 360 kgs de Prémix sec
- 45 kgs de superplastifiant
- 195 l d'eau
- 200 kgs de fibres métalliques (longueur 20 mm, diamètre 0,3 mm)

Le Prémix qui comprend le ciment, les granulats et les ultra-fines est préparé et conditionné en usine (SIKA France) sous contrôle qualité puis livré à l'unité de préfabrication.

3. LA COMPARAISON AVEC LES POUTRELLES ENROBÉES CLASSIQUES

Le guide SETRA-SNCF des Ponts-routes à tabliers en poutrelles enrobées publié en 1995, donne les limites d'élançement des poutrelles seules ainsi que l'élançement total (poutre + hourdis) pour une travée isostatique. Si l'on compare ces ratios avec ceux des poutres ITE® et PRAD on obtient (tableau 1) :

TYPE	PORTEE	TRAVEES	ELANCEMENT POUTRE SEULE	LANCEMENT POUTRE + HOURDIS	POIDS PROPRE AU M ²
POUTRELLES ENROBÉES ACIER	8 à 25 m	Isostatiques	1/40	1/34	1,85 T/m ²
POUTRES ITE®	10 à 30 m	Isostatiques	1/45	1/34	1,10 T/m ²
PRAD	10 à 30 m	Isostatiques	~ 1/24	1/20	

Tableau 1 : Comparatif de performances entre 3 types de poutres

Le tableau montre les performances des poutres ITE® en termes d'élançement sont identiques aux poutrelles métalliques enrobées mais leur mise en œuvre comporte des avantages supplémentaires comme nous allons le voir plus loin. Dans certains cas l'allègement important du tablier (1,10 T/m² au lieu de 1,85 T/m² pour une travée de 25 m, soit une réduction de poids de 40%) peut se traduire par des économies pour les fondations.

Les poutres ITE® sont posées en une seule coupure de circulation (la nuit) minimisant la gêne pour l'utilisateur.

Ces poutres étant jointives, la pose des prédalles, le ferrailage et le bétonnage du hourdis supérieur se déroulent de jour et en totale sécurité.

Le seul ferrailage à mettre en œuvre se résumant à celui du hourdis, aucune barre n'est à enfile dans les trous à prévoir dans les âmes des profilés. Ces manipulations de barre posent en général des problèmes de sécurité et doivent être réalisées sous consignes caténaires.

En outre, à la différence des poutrelles enrobées qui nécessitent du fait de leur souplesse 2 à 3 phases de bétonnage avec un nettoyage délicat des surfaces de reprise, le hourdis supérieur des ponts à

poutre ITE® représente un volume de béton très inférieur et est bétonné en une seule fois d'où un gain notable de délai.

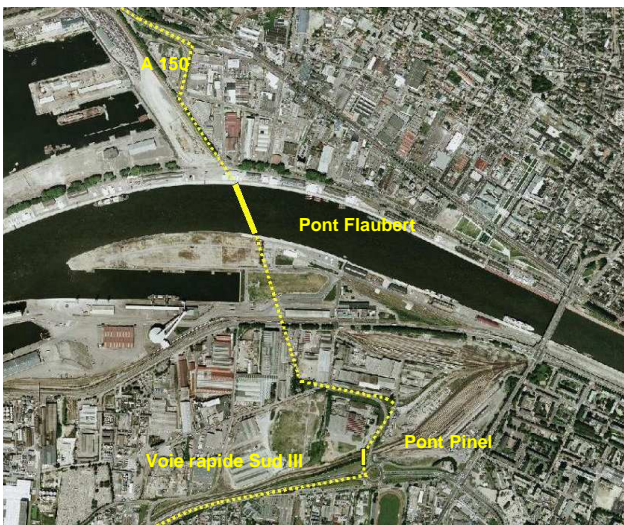
4. LE PONT PINEL, PREMIERE APPLICATION DES POUTRES ITE®

• PRESENTATION

A l'ouest de Rouen, le franchissement de la Seine par le tout nouveau Pont levant Gustave Flaubert, relie désormais l'autoroute A150, située au Nord, et la rocade Sud de l'agglomération.

Cette opération a nécessité le réaménagement de plusieurs voies routières et en particulier l'élargissement du Pont Pinel, ouvrage modeste en poutrelles enrobées franchissant 3 voies ferrées.

L'étude de ce projet a mis en évidence qu'il existait une alternative aux solutions classiques de tabliers à poutrelles enrobées, à savoir des poutres en BFUP (Béton Fibré à Ultra Hautes Performances) dotées de performances au moins équivalentes et offrant des avantages déterminants lors de la phase de construction.



Photos 1 et 2 : plans de situation du Pont Pinel

L'ouvrage existant est constitué de 2 tabliers accolés en poutrelles enrobées comportant chacun 2 travées de 12,20 m et 14,80 m reposant sur murs-culées et fondations superficielles (photo 3).

L'ouvrage projeté, accolé aux 2 précédents, franchit les voies ferrées sans pile intermédiaire pour en simplifier la construction, d'où une portée de 27,40 m.



Photo 3 : Pont Pinel - Vue générale de l'ouvrage existant

Dans le dossier de consultation, le tablier comportait 17 poutrelles HEB 700 de 27,40 m de portée disposées selon un biais de 64 grades. Le dévers transversal de 2,5% du tablier de 14 m de large est repris en disposant les poutrelles verticales avec un léger décrochage de l'une par rapport à l'autre (figure 4).

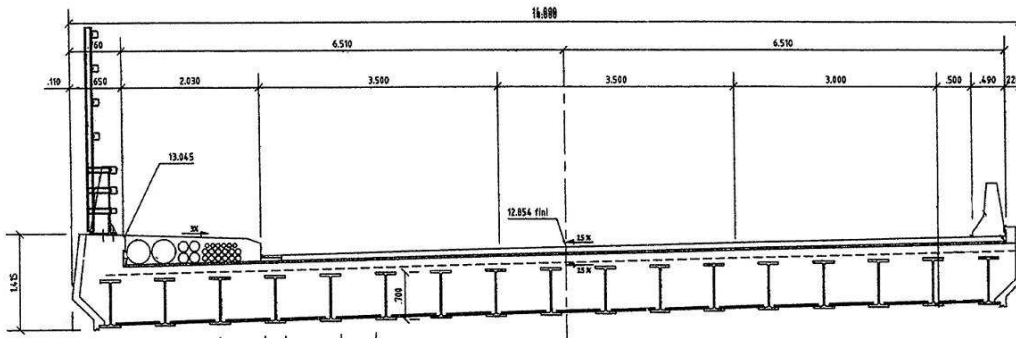


Figure 4 : Pont Pinel - Coupe transversale de la solution mise à l'appel d'offres

La solution en BFUP présentée par EIFFAGE respecte en tous points la géométrie de l'ouvrage. Les poutres ITE® ont été légèrement décalées l'une par rapport à l'autre et complétées par un hourdis supérieur en béton classique C35/45 dont l'épaisseur varie de 21 à 32 cm pour respecter le profil en long parabolique (figure 5).

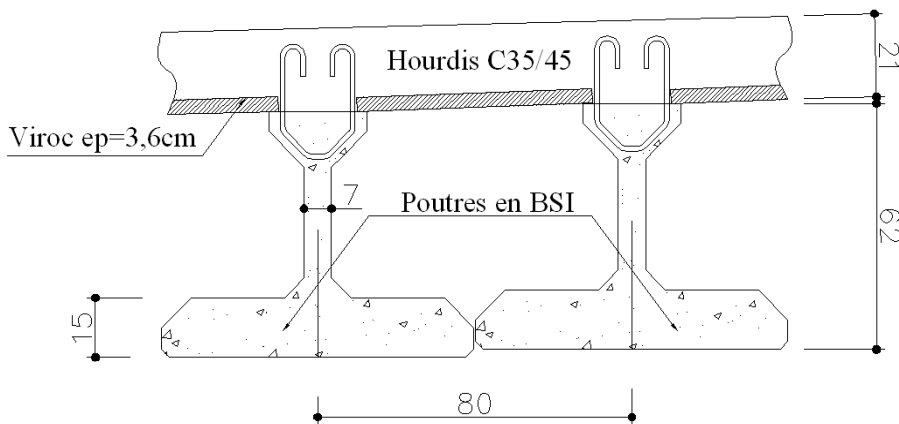


Figure 5 : Pont Pinel – Coupe transversale de la variante avec poutres ITE®

La construction de ce 3^e tablier entraînant des travaux à proximité immédiate des voies et contre les appuis de l'ouvrage existant, le projet prévoyait de réaliser des culées sur rideau mixte en palplanches de type H_Z. La plus grande légèreté du tablier en BFUP a permis d'optimiser cette partie d'ouvrage.

Les poutres sont reliées au droit des appuis par 2 entretoises d'about qui sont coulées en même temps que le hourdis, le tout en béton classique C35/45. De ce fait, les extrémités des poutres préfabriquées présentent un biais égal à l'ouvrage, soit 64 grades.

• LES TRAVAUX

Préfabrication des poutres

La préfabrication des poutres a été réalisée dans l'usine de la société néerlandaise HÜRKS BETON, partenaire de longue date du groupe EIFFAGE. L'usine d'Eindhoven, qui dispose d'installations ultra-modernes et de puissants bancs à fils adhérents est spécialisée dans la fabrication de composants à haute valeur ajoutée pour le bâtiment et le génie civil ; l'essentiel de sa production est constitué de bétons à hautes performances autoplaçants (B.A.P.).

La forme particulière de la section ITE avec son talon très large nécessite une procédure de fabrication très précise. Pour garantir le bon remplissage de la partie inférieure qui comprend 28 torons, le bétonnage est réalisé en 2 phases :

- le talon seul avec la partie basse du coffrage en place
- l'âme et le gousset supérieur après pose des panneaux d'âme et insertion des aciers de liaison avec le hourdis supérieur.

L'ensemble de l'opération se déroule en moins d'une heure, durée inférieure à la D.P.U., (durée pratique d'utilisation) du BSI.

Le BSI étant autoplaçant, aucune vibration n'est nécessaire. Cependant, cette vertu ne dispense pas d'étudier et choisir la meilleure méthode de mise en place pour que les écoulements du béton fibré à travers les obstacles éventuels ne provoquent ni défauts locaux ni orientation préférentielle néfaste des fibres.

La prise du béton fait l'objet d'un suivi maturométrique systématique. Le décoffrage et la coupure des torons interviennent environ 24 heures après la fin du bétonnage lorsque le béton a atteint une valeur de résistance à la compression supérieure à 110 Mpa sur cube (environ 100 Mpa sur cylindre), sans étuvage. La mesure à 28 jours dépasse les 165 MPa.

Sous l'effet de la précontrainte, le taux de compression du BSI® atteint alors localement 52 MPa.

Epreuve de convenance

L'application des Recommandations Provisoires AFGC-SETRA (Janvier 2002) relatives aux BFUP engendre un certain nombre d'essais préliminaires visant à vérifier que les matériaux et matériels employés sont conformes aux hypothèses de l'étude. Pour cela, on réalise un élément témoin représentatif de l'ouvrage réel qui permet de valider les moyens et méthodes de bétonnage et de mesurer ainsi le coefficient K relatif à la dispersion sur l'orientation des fibres.

En effet, tout flux de béton fibré, même autoplaçant, subit des effets d'orientation dans la benne, les conduits, la descente dans le coffrage. Contrairement aux idées reçues cette orientation préférentielle n'est pas recherchée car si elle est bénéfique dans un sens, elle engendrera un déficit de résistance dans l'autre direction.

Un tronçon de poutre ITE® de 5 ml de longueur a donc été coulé pour vérifier ces paramètres et prélever les prismes destinés au calcul du coefficient K à l'aide de tests de résistance à la flexion.

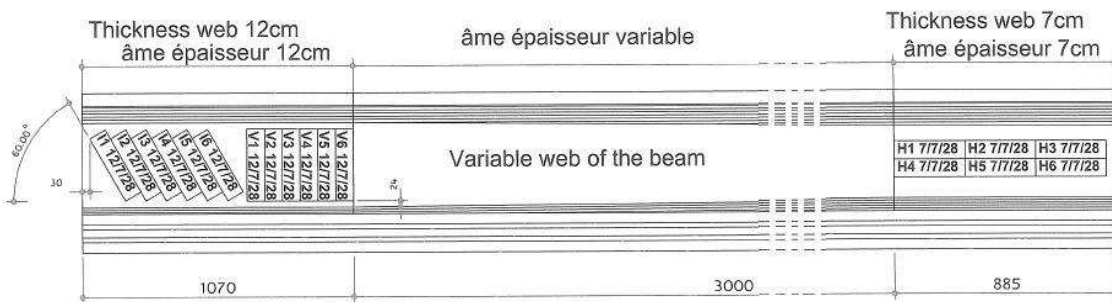


Figure 6. Élément –témoin Zones de prélèvement d'échantillons carotés.

Trois corps d'épreuve ont dû être réalisés pour caler les méthodes et obtenir des résultats conformes aux attentes.



Photo 4 : Pose des poutres

Les poutres ont été acheminées par train d'Eindhoven à Rouen, puis posées à la grue mobile de 300 tonnes le 9 juin 2007. On notera à ce propos que dans le cas des poutrelles enrobées de grande longueur (25 à 30 m), la sensibilité au déversement impose en principe de poser les profilés par paires. Cette précaution est inutile pour la poutre ITE®, vu sa forme très rigide en T inversé. Le poids d'une poutre ITE (12 tonnes) est donc à rapprocher d'une paire de poutrelles HEB 700 (13,4 tonnes).

Après pose des poutres, dont les talons sont jointifs, aucune autre interruption de trafic n'est nécessaire, ce qui réduit la gêne pour l'utilisateur au minimum (photo 5).



Photo 5 : Sous-face du tablier

5. LES ETUDES D'EXECUTION

Les études d'exécution ont été réalisées pour la partie BFUP par le STOA, bureau d'études interne d'EIFFAGE TP avec un contrôle de la Division Grands Ouvrages du SETRA et pour la partie conventionnelle par le B.E.T. D'EIFFAGE TP Normandie avec un contrôle de la DEIOA du CETE Normandie-Centre.

Les justifications de la structure ont été menées suivant les Recommandations Provisoires relatives à la conception et à la réalisation des structures en béton fibré à Ultra Haute Performances, éditées par le SETRA et l'AFGC en janvier 2002.

La structure du tablier, de conception classique en apparence (type PRAD), présente les particularités suivantes :

- 1) l'absence d'aciers passifs dans les poutres préfabriquées en BSI
- 2) la prise en compte du caractère hybride de la section résistante du tablier (BFUP pour les ponts et béton ordinaire pour le hourdis) et plus particulièrement le comportement du BSI à court et à long terme (retrait, fluage, ...).
- 3) le biais relativement prononcé pour ce type de structures à poutres (biais de 64 grades) et dont l'influence se traduit par un accroissement des efforts de torsion notamment dans les poutres de rive.

Aussi les calculs d'exécution ont été menés à l'aide d'une modélisation en grillage de poutres en utilisant le logiciel ST1 du SETRA.

Le modèle de calcul adopté permettait de simuler finement tant l'aspect particulier du matériau que les effets de répartition transversale et de torsion liés au biais mécanique.

Les justifications sous sollicitations normales sont analogues aux spécifications de la Classe II du BPEL. Pour les justifications aux ELU, le calcul du moment résistant ultime des poutres est mené en négligeant la contribution des fibres. Vis-à-vis des sollicitations tangentes, la résistance au cisaillement est apportée principalement par les fibres, en l'absence d'armatures transversales conventionnelles. Les poutres de rives plus sollicitées (torsion, tranchant,...) que celles courantes, présentent une âme élargie de 3 cm.

A l'issue de ce projet il a été procédé à une adaptation du logiciel PRAD-EL du SETRA aux poutres préfabriquées en BFUP, ce qui devrait simplifier les études ultérieures.

6. CONCLUSION

La construction d'un premier ouvrage en poutres ITE® dans le cadre du contournement Ouest de Rouen a permis de valider le fait qu'il existe aujourd'hui une alternative économique aux ponts à poutrelles métalliques enrobées dans la gamme de portée 20 à 30 m.

Pendant la construction, les travaux sur site sont simplifiés et la sécurité renforcée. En phase d'exploitation l'excellent comportement du BFUP aux agressions extérieures est un gage de pérennité de l'ouvrage et évite les interventions problématiques au-dessus des caténaires pour la peinture des sous-faces de profilés.

Cette première expérience d'utilisation de poutres ITE va se poursuivre par le doublement d'un pont à 2 travées de 28,50 m de portée en site urbain au-dessus d'un faisceau de voies ferrées à Sarcelles.

Ainsi, dix ans après leur première utilisation en France, les BFUP, fruits des efforts constants de recherche-développement des entreprises et laboratoires, avec l'appui des Services Techniques de l'Etat (DDE, SETRA) peuvent offrir de nouvelles solutions alliant légèreté, durabilité et gêne minimale pour l'utilisateur.

7. REFERENCES

PRINCIPALES QUANTITES

Tablier		
- Surface	380 m ²	
- BFUP (BSI/CERACEM)		78 m ³
- Béton C35/45		120 m ³
Appuis		
- Béton		70 m ³
- Palplanches	85 t	

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

▪ Maître d'œuvre :

Etat

▪ Maître d'Ouvrage

SIR ROUEN (Ex DDE 76)

▪ Etudes

▪ Etudes d'exécution :

- Tablier : EIFFAGE TP STOA
- Appuis : EIFFAGE TP – Agence Normandie

▪ Contrôle des études :

- Tablier : SETRA/CTOA/DGO
- Appuis : CETE Normandie – Centre DEIOA

▪ Travaux :

- EIFFAGE TP Agence Haute Normandie
- Préfabrication des poutres : HÜRKS BETON

▪ Contrôle des travaux :

- SIR DE ROUEN
- LRPC de ROUEN