

# RENFORCEMENT DU TABLIER DU PONT SUR L'HUISNE AU MANS

**Patrick CHARLON, Jérémie BAUMGARTNER, Thierry THIBAUX**

Eiffage TP

## 1. PRÉAMBULE

Dans le cadre de la construction de la ligne de tramway par LE MANS MÉTROPOLÉ, les deux tabliers du pont sur l'Huisne construits en 1976 ont dû être renforcés pour passer de deux fois trois voies de circulation à :

Tablier amont :

- une plate-forme tramway,
- une piste cyclable.

Tablier aval :

- quatre voies de circulation routière.

L'ouvrage d'une longueur de 65 ml se présente sous la forme de deux tabliers disjoints de 15 ml de largeur, constitués chacun de deux travées VIPP de 31,60 ml de portée, indépendants mais rendu continus au niveau du hourdis sur l'appui en rivière.

Chaque tablier est constitué de cinq poutres sous chaussée, préfabriquées et précontraintes par post-tension, de deux entretoises d'about et d'un hourdis.

## 2. LES GRANDS PRINCIPES DU RENFORCEMENT

Les solutions initialement prévues par le maître d'œuvre pour le renforcement de l'ouvrage faisaient appel à la mise en œuvre de précontrainte extérieure associée à des armatures en fibres de carbone.

Les études de l'ouvrage ont montré que les performances requises, à savoir un fonctionnement en classe I du BPEL en flexion longitudinale et en classe II en flexion transversale, ne pouvaient être atteintes qu'en augmentant l'inertie des poutres les plus sollicitées et en améliorant la répartition transversale des charges.

L'augmentation de la capacité portante des poutres fut donc obtenue par addition de joues en B.A. situées de part et d'autre des âmes, et par la réalisation de deux entretoises situées aux 1/3 et aux 2/3 de la travée (fig. 1 et 2).

La mise en œuvre de ces membrures en B.A., d'exécution particulièrement délicate du fait de leur position (les travaux sont à réaliser en sous-œuvre du hourdis, et au-dessus de la rivière) se justifiait par la saturation de la capacité de résistance en compression des poutres.

Celles-ci, fortement précontraintes dès leur mise en service, étaient dans l'impossibilité de supporter une augmentation significative de la puissance de leur câblage.

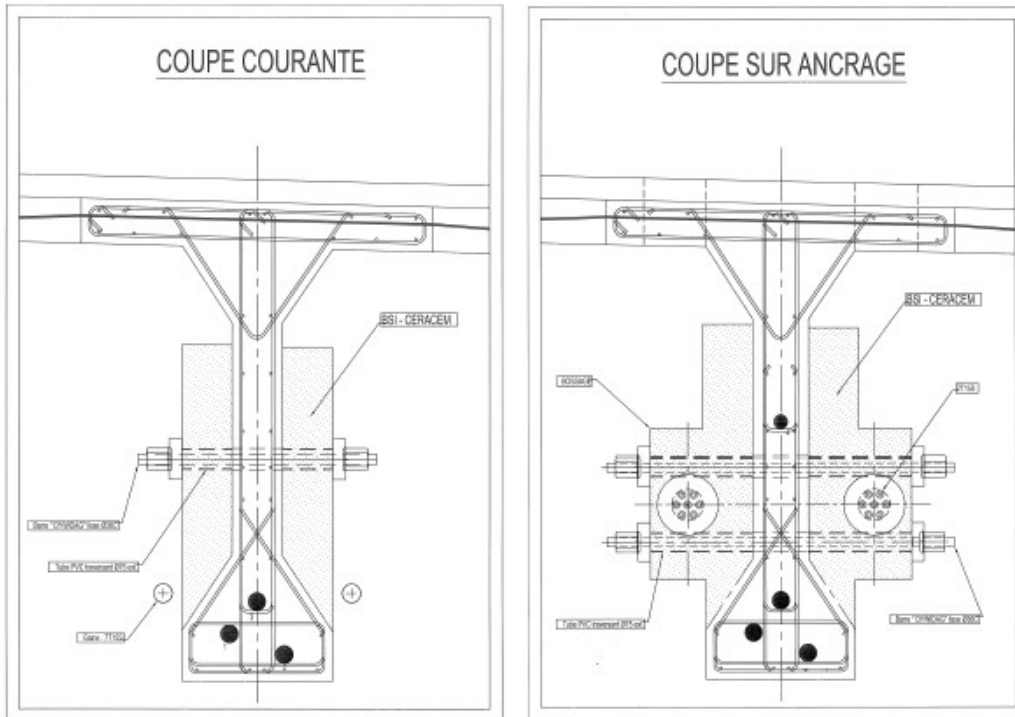
Le nouveau schéma de circulation a entraîné des surcharges d'exploitation importantes :

### Tablier amont à usage du tramway et de la circulation des cycles

Malgré l'allègement des charges en circulation sur rails, la mise en œuvre d'une couche de béton de l'ordre de 25 cm entraîne un accroissement des contraintes dans la structure. Nous avons eu recours à l'utilisation de la précontrainte extérieure et l'application de plats carbone collés.

### Tablier aval à usage routier avec quatre voies de circulation

Le tablier initial conçu pour une circulation routière à trois voies sera utilisé avec quatre voies de circulation ce qui entraîne un accroissement très important des surcharges. Le tablier sera renforcé également par de la précontrainte extérieure et l'application de plats carbone collés. Par contre, deux poutres sur les cinq de ce tablier ne résisteront pas au flambement (poutre en forme de I de 1,80 ml de hauteur).



Figures 1 et 2

En conséquence, nous avons augmenté l'inertie des deux poutres par ajout de deux contre voiles de 1 ml de hauteur et de 20 cm d'épaisseur en BSI, cloués transversalement de part et d'autre de l'âme ( fig. 3).



Figure 3

Si le renforcement des tabliers supportant le tramway trouvait sa justification dans la réalisation d'un support de voies épais, les surcharges des rames étant par ailleurs du même ordre de grandeur que celles des véhicules routiers, celui des tabliers routiers était justifié par l'augmentation du nombre de voies porté de 3 à 4.

### 3. TROIS TECHNIQUES DE RENFORCEMENT MISES EN APPLICATION

#### 3.1. Précontrainte extérieure

Les travaux de précontrainte de clouage et de précontrainte additionnelle ont été réalisés par la Division Précontrainte de EIFFAGE TP, Entreprise distributrice du procédé DSI en France.

Les différentes étapes de renforcement d'une poutre sont décrites ci-après.

##### Reconnaissance des câbles de précontrainte.

Dans les zones d'ancrage des câbles extérieurs de renforcement, les câbles existants n° 3 (12T13 - Ø gaine 70 mm) et n° 4 (4T15 - Ø gaine 55mm) sont situés dans l'âme de la poutre (e = 20cm - figure 1). Compte tenu de l'épaisseur du béton des âmes, il a été possible d'éviter la gammagraphie classique et de la remplacer par une recherche au FERROSCAM FS 10 (HILTI), à partir du plan théorique des supports de câbles de l'existant. Le tracé réel des câbles existants a pu être ainsi repéré avec une précision suffisante pour implanter les carottages à réaliser ultérieurement (fig.4).

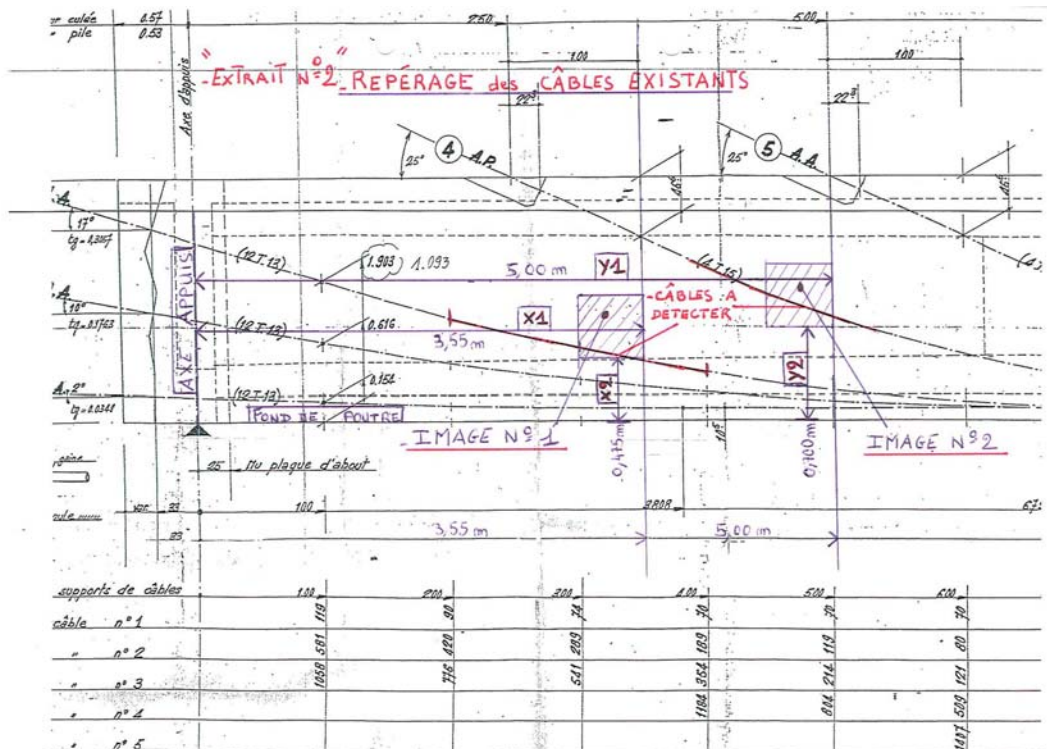


Figure 4

##### Réalisation des carottages sur les poutres.

Les carottages de diamètre 80 mm sont réalisés à l'aide d'une carotteuse SHIBUYA de type TS 403 avec moteur d'avance AF 22.A, avec une précision de + 5 mm pour le premier.

Huit carottages sont effectués pour ancrer un câble extérieur 7T15 et six pour un câble 4T15.

##### Mise en place des barres de clouage.

Les barres d'ancrage sont des barres DYWIDAG lisses de diamètre 32 mm (ancrage des câbles 4T15) ou 36 mm (ancrage des câbles 7T15).

Elles sont prémontées et injectées en atelier ; un ensemble comprend :

- la barre lisse DYWIDAG (acier 1080/1230 MPa pour les barres Ø 36 et acier 835/1030 pour les barres Ø 32).
- un ancrage passif et un ancrage actif constitués d'une plaque galvanisée et d'un écrou à base sphérique.
- une gaine PEHD Ø 52.
- une injection à la cire INJECTELF par gravité entre les plaques actives et passives.

Après bétonnage des bossages d'un ancrage (tubes perdus coffrants en PVC prolongeant les carottages), la barre préfabriquée (sans l'ancrage actif) est introduite dans les réservations. L'ancrage actif est ensuite mis en place.

Simultanément, une résine de matage époxy est mise en place entre les nus extérieurs du béton des bossages et les plaques passives et actives de façon à assurer une bonne répartition des efforts à la mise en tension des barres.

Les barres sont mises en tension à l'aide de Vérins MP 110 ; un capot court est mis en place coté passif et un capot long coté actif. Ces capots sont bourrés à la cire par gravité après mise en tension (fig. 5). Le capot long permet la mise en place du vérin sur la barre.



Figure 5

#### Mise en oeuvre de la précontrainte longitudinale extérieure.

Les unités mises en œuvre sont le 7T15S et le 4T15S (fig.1) ; une poutre reçoit 2 câbles 7T15S ou 2 câbles 4T15S.

Les principales fournitures mises en œuvre sont les suivantes :

- ancrages extérieurs 4T15S et 7T15S constitués d'une trompette coffrante galvanisée, d'une plaque d'appui galvanisée, d'un disque d'ancrage et d'un capot (fig. 6).
- gaine PEHD PE 80 ou PE 100 NF114 de Ø 50 ou 75 mm (selon unité) livrée en barres droites et raboutées par manchons électrosoudables et/ou soudure miroir.
- projection définitive par cire pétrolière type INJECTELF de TOTAL.
- tubes déviateurs en aciers galvanisés, droits ou cintrés de Ø 62 cm ép. 2 mm ou Ø 89 ép. 2 mm.

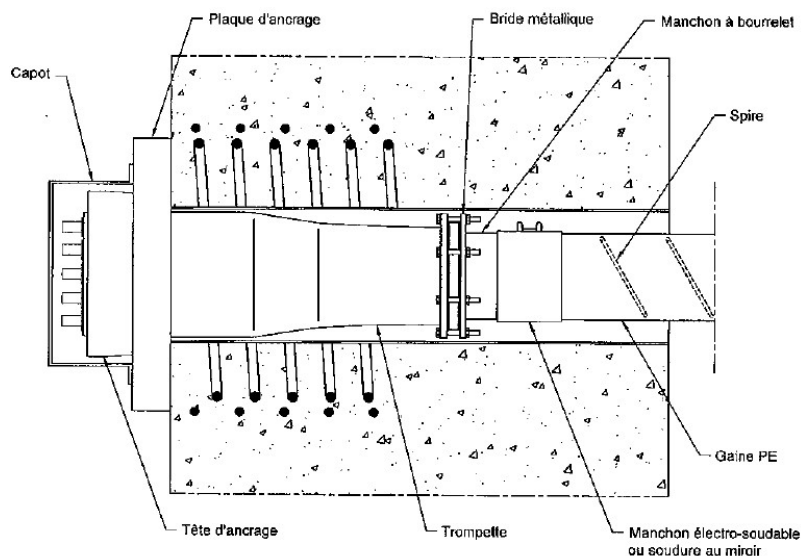


Figure 6



Principe de mise en œuvre :

- soudure des barres PEHD à la longueur prévue.
- installation de la gaine PEHD à travers les ancrages et les déviateurs et raccordement aux ancrages.
- enfilage des torons.
- mise en tension symétrique des câbles en actif-passif selon le phasage prévu.
- injection des câbles à la cire pétrolière en une seule campagne finale (figure 7).



Figure 7

Matériel utilisé :

|                    |  |
|--------------------|--|
| Montage des gaines | machines à souder les manchons ou à soudeuse miroir.               |
| Enfilage           | enfileuse ESG-8 et pompe hydraulique ZP57/28 et dévidoir AWK 1650. |
| Mise en tension    | vérins HOS 950 et HOZ 1700 avec pompe hydraulique 77-134.          |
| Injection          | centrale d'injection ARTEON.                                       |

Des plots collés ont été mis en œuvre dans les zones d'introduction de la précontrainte extérieure.

### 3.2. Utilisation du BFUP

L'utilisation du BSI®/Céracem a permis :

- De s'affranchir des entretoises intermédiaires. L'augmentation des caractéristiques mécaniques à l'aide des seules joues en BSI se révélait en effet suffisante, le module de Young de ce matériau étant supérieur à celui d'un béton ordinaire de 2 fois à court terme, et de 3 fois à long terme ;
- De réaliser dans des bonnes conditions en sous-œuvre du hourdis des joues de plus faible épaisseur, en utilisant les propriétés de béton autoplaçant du BSI®/Céracem.



Principe de réalisation :

Les joues, de 20 x 90 cm et de 22,00 m de longueur, sont liées aux âmes des poutres préfabriquées par barres précontraintes, disposées aux droits des bossages d'ancrages des câbles longitudinaux de renfort, ainsi qu'à mi-travée.

Les barres des bossages d'ancrage sont dimensionnées pour transmettre la force de précontrainte par frottement à la structure mixte béton ordinaire-BSI®/Céracem.

Avant mise en tension des barres, les joues en BSI sont laissées libres, afin de réaliser leur retrait par rapport aux poutres en béton précontraint. Ce principe permet de prévenir le risque de fissuration, par déformations différentielles empêchées, entre les deux matériaux.

Production du BFUP et son mode de coulage :

Le prémix (mélange des composants secs) a été livré en sacs, puis malaxé sur site au moyen de 2 malaxeurs (fig. 8). Cette production foraine a permis de mettre en œuvre 40 m<sup>3</sup> de BSI®/Céracem, correspondant à 10 m<sup>3</sup>/jour.

Le bétonnage, sans vibration, s'est effectué par l'intermédiaire de 6 cheminées par joue.

Ces cheminées de 200mm de diamètre, carottées dans le tablier, donnaient ainsi accès à la partie supérieure du coffrage (fig. 9).



Figure 8



Figure 9

Le principe de l'alternance des passes de bétonnage a permis d'obtenir l'homogénéité souhaitée entre les différents coulages de BSI®/Céracem.

Les résistances à 28 jours sur cube ont atteint 182 MPa de moyenne.

Ainsi, les deux contre-voiles filants de section 20 X 90 cm ont été coulés en place, sur les talons inférieurs et de part et d'autre de l'âme des poutres en « I ».

Les contre voiles ont été simplement « posés » sur le talon inférieur des poutres, la liaison avec l'âme s'est fait par précontrainte transversale. Ce principe d'augmentation de raideur a permis de s'affranchir des entretoises transversales et de ne concentrer les efforts que sur deux poutres par tablier.

### 3.3. Renforts à base de fibre de carbone

Les tabliers ont été renforcés par collage d'armatures à base de fibres de carbone SIKA CARBODUR.

Environ 5 000 m. de lamelles Sika Carbodur à base de fibres de carbone de 150 mm de largeur ont été collés avec la colle époxydique Sikadur 30, en particulier l'intrados et l'extrados des hourdis, les poutres en « I » (les sous faces et les parties latérales ont été renforcées par ces lamelles posées en superposition jusqu'à trois couches).

Les fibres ont été disposées en deux zones des tabliers :

- en fibre inférieure et supérieure du hourdis, de façon à justifier la flexion transversale selon la classe II du BPEL (fig.10);
- en arrière des ancrages 7T15S des poutres avec joues en BSI®/Céracem pour équilibrer les excès de cisaillement et les effets d'entraînement de la précontrainte de renforcement (fig.11).

Les lamelles sont larges de 150 mm et épaisses de 12 mm et sont superposées jusqu'à trois couches.

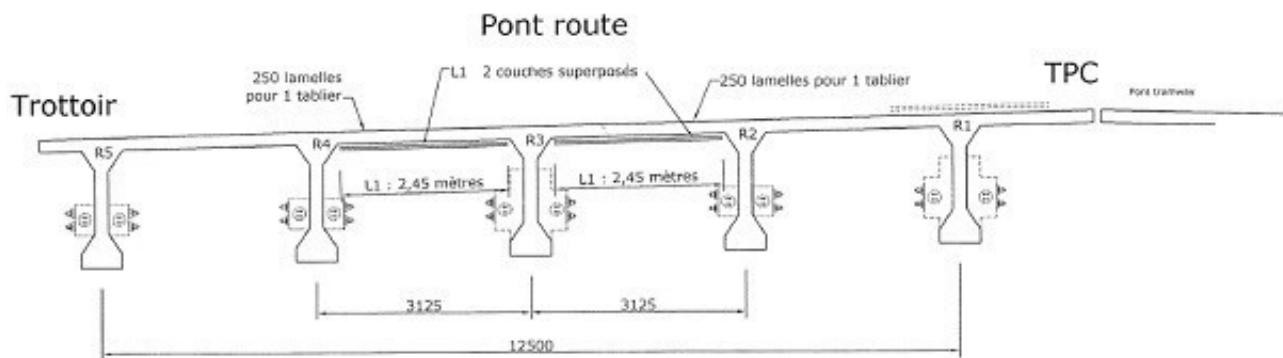
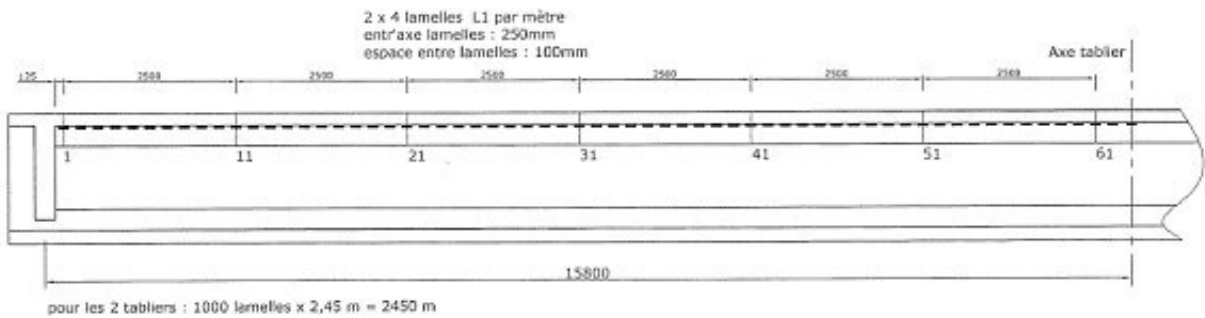


Figure 10

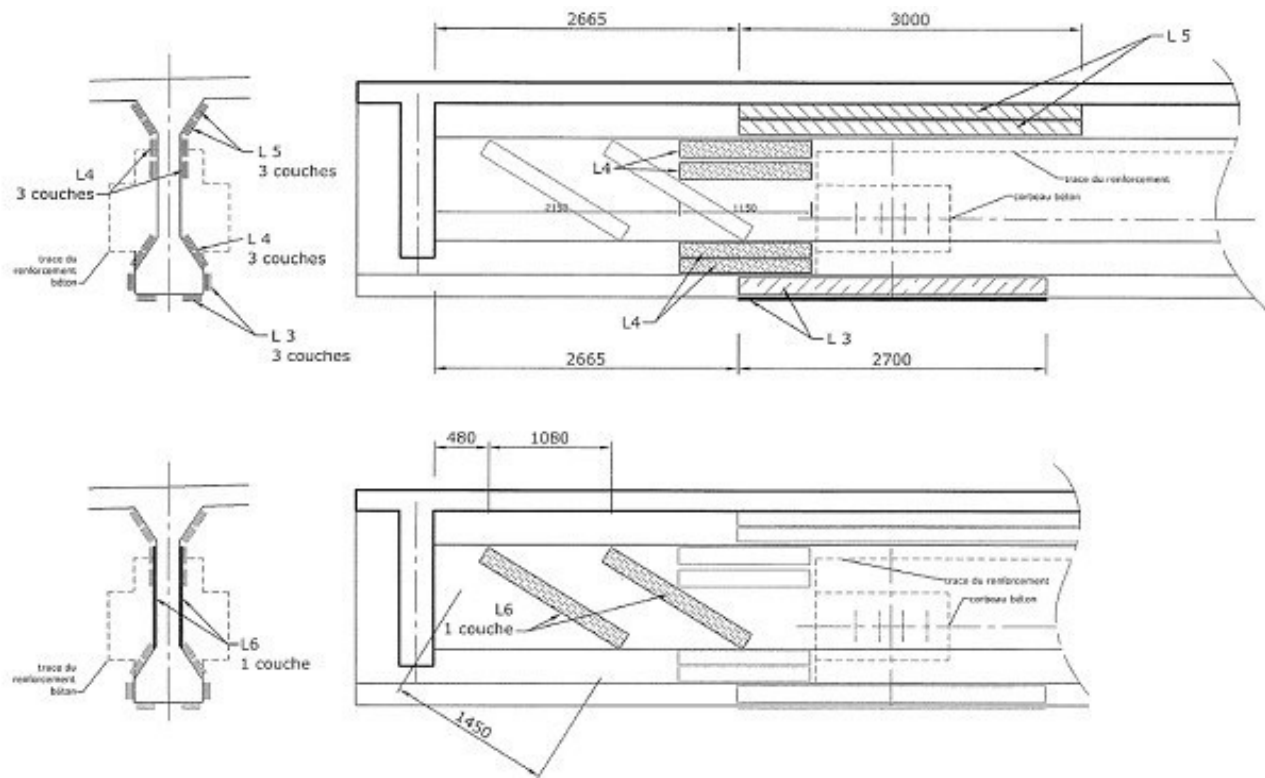


Figure 11

Les caractéristiques mécaniques retenues dans les calculs sont les suivantes :

ELU  $\sigma_{cu} = 1485 \text{ MPa}$  avec  $\varepsilon_{cu} = 9 \%$

ELS  $\sigma_c = 450 \text{ MPa}$

$E = 165000 \text{ MPa}$

Les lamelles ont été orientées suivant les contraintes principales de traction des membrures à renforcer : pour cette raison elles ont été inclinées sur l'horizontale de 32 degrés en arrière des ancrages de précontrainte.

Pour le dimensionnement et la justification du renforcement ont été utilisées les recommandations provisoires de l'AFGC « Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites » de décembre 2003.

#### 4. CONCLUSION

Le renforcement initial de l'ouvrage existant a permis de modifier son usage et sa destination à moindre coût et dans un délai court, grâce à des techniques et matériaux nouveaux et performants. Les essais ont donné toute satisfaction.