

ORTHODALLE : UN PROCÉDÉ INNOVANT DE RENFORCEMENT DE TABLIER À DALLE ORTHOTROPE - L'EXEMPLE DU PONT D'ILLZACH

**Z. HAJAR¹, M. NOVARIN¹, C. SERVANT¹, E. LUANGKHOT^{2*}, G. GÉNÉREUX²,
D. CHAMPENOY³, D. PRYBYLA³, D. BITAR⁴, S. FYON⁵, B. HAASMANN⁵**

¹ Eiffage TP

² Sêtra

³ CETE de l'Est

⁴ CTICM

⁵ Conseil Général 68

* Aujourd'hui chez Arcadis

1. INTRODUCTION

La solution technique pour le projet de réparation du pont de la RD201 sur le canal de Huningue à Illzach est issue du programme de recherche ANR dénommé ORTHOPLUS.

L'objectif principal du projet de recherche ORTHOPLUS piloté par le SETRA était de mettre au point les outils théoriques et méthodologiques de prise en compte de l'épaisseur et de la nature du revêtement dans le calcul en fatigue d'un tablier métallique à dalle orthotrope. Ces outils ont ainsi été utilisés dans un second temps pour optimiser les revêtements bitumineux épais existants et pour développer une solution innovante de revêtement mince en béton fibré à ultra-hautes performances (procédé ORTHODALLE).

Ce procédé, lauréat de la Charte Innovation Routière 2010, a été expérimenté sur un ouvrage en exploitation dont le platelage orthotrope présentait une forte pathologie, à Illzach près de Mulhouse, par la mise en œuvre d'éléments

de dalles préfabriquées en lieu et place du revêtement bitumineux au cours de l'été 2011.

La mise en œuvre de ce procédé novateur est accompagnée d'une instrumentation fine du tablier, de façon à s'assurer du bon comportement dans le temps de l'ouvrage réparé.

2. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE ET DES DÉSORDRES OBSERVÉS

L'ouvrage (Photo 1) dont la mise en service date de 1970 se compose d'une travée isostatique constituée d'un tablier à poutres latérales de type WARREN de 106 mètres de longueur encadrant un platelage de type orthotrope. La largeur totale de l'ouvrage, égale à 12,60 m, porte une chaussée à deux voies de circulation (une dans chaque sens) de 8 mètres de large (largeur utile du tablier égale à 11,00 mètres).



Photo 1 : Vue générale de l'ouvrage - source : Eiffage TP

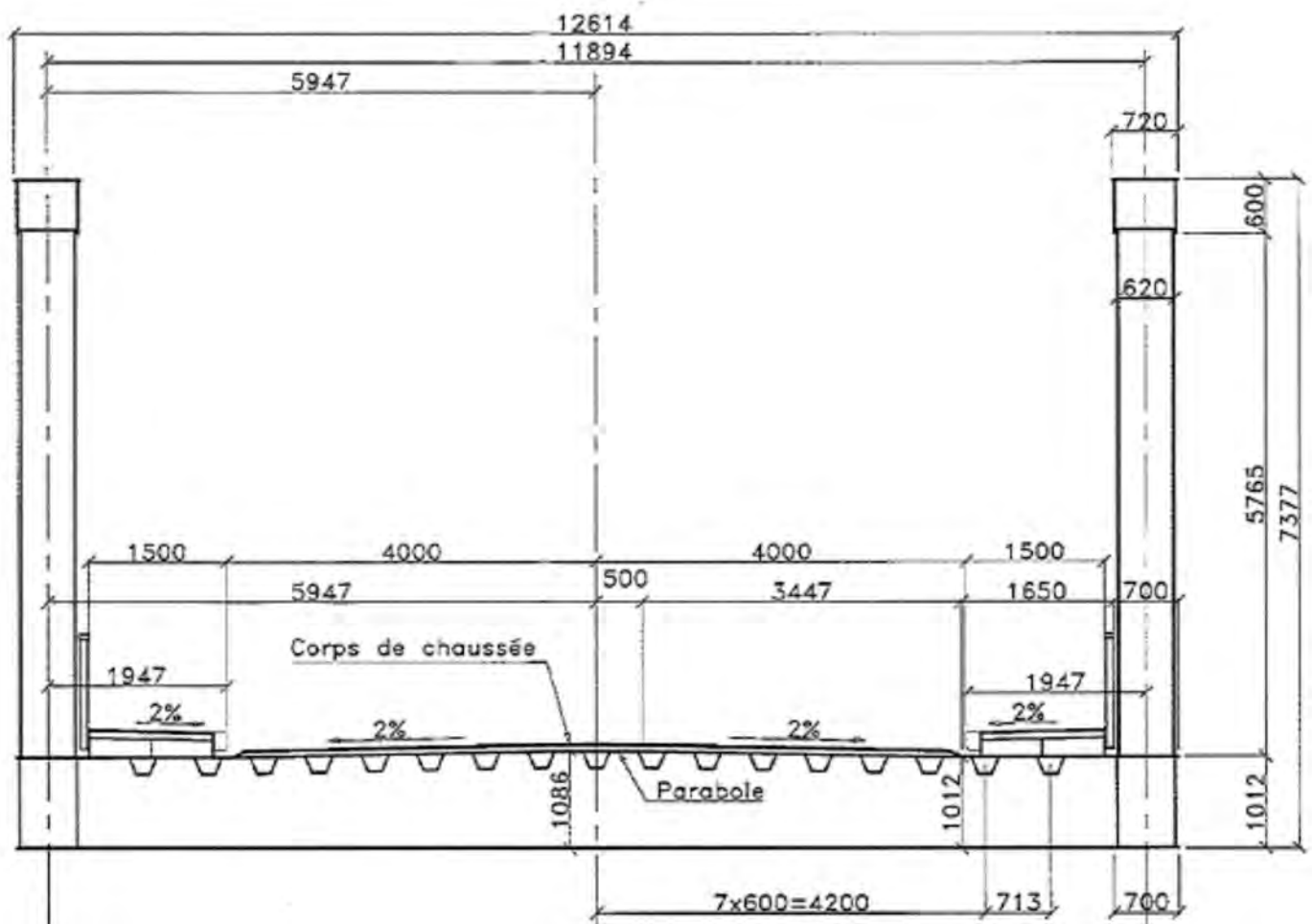


Figure 1 : Coupe transversale

La dalle orthotrope (Photo 2) est constituée d'une tôle métallique de platelage de 12 mm d'épaisseur raidie transversalement par 34 pièces de pont formant 33 intervalles appelés « caisson » et raidie longitudinalement par 17 nervures trapézoïdales fermées appelées augets (figure 1). L'espacement des pièces de pont est de 3,20 m environ et les augets sont discontinus au droit des pièces de pont.

Le revêtement sur ouvrage d'une épaisseur de 80 mm à la mise en service est constitué d'un asphalte bicouche surmonté de BBSG. Avant sa réparation, le tablier présentait de nombreuses fissures le long de la soudure auget/pièce de pont (183 fissures repérées en 2001 et 60 supplémentaires relevées lors de l'inspection détaillée en été 2009). Ces fissures étaient localisées en pied du cordon de sou-

dure auget/pièce de pont, généralement dans l'âme de la pièce de pont, parfois dans le platelage. Il n'y avait pas de propagation à proprement parler, toutefois quatre fissures se prolongeaient longitudinalement entre l'auget et le platelage (Photo 3).

La présence d'eau constatée dans les augets faisait craindre un risque de fissuration de fatigue dans le platelage non détectable en présence du revêtement. De nombreuses traces de corrosion sur les diagonales des poutres WARREN et dans le platelage en intrados du tablier, ont aussi été constatées.

Afin de le maintenir en exploitation, l'ouvrage a été mis en sécurité vis-à-vis du risque de décrochage des augets en février 2010. Parallèlement, une solution de renforcement et de réparation de l'ouvrage a été recherchée par le CG68 et le CETE de l'Est

3. LA SOLUTION DE RÉPARATION PROPOSÉE PAR EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

Les dégradations constatées portaient essentiellement sur le platelage à la jonction auget-pièce de pont alors que les

poutres porteuses principales étaient en bon état de conservation.

De ce fait, la solution de réparation la plus appropriée consiste à accroître fortement la rigidité du platelage supérieur en lui connectant rigidement une dalle mince en BFUP. L'inertie étant sensiblement accrue, les efforts de flexion longitudinale sont filtrés par le revêtement en BFUP et les contraintes à la jonction auget-pièce de pont sont ainsi notablement réduites.

Cette solution a été mise en oeuvre en combinant la préfabrication et le clavage en place des éléments préfabriqués. Le revêtement en BFUP est constitué de 66 dalles préfabriquées de dimension 3.45mx2.70m en plan et de 5cm d'épaisseur disposées longitudinalement sur 2 files. La partie coulée en place est constituée de bandes longitudinales de clavages au nombre de 3 (une centrale de 30 cm et deux latérales de 20 cm de large), ainsi que des bandes transversales de clavage de 60 cm de large, axées sur les pièces de pont.

La continuité mécanique du BFUP au travers des joints de reprise est assurée à l'aide d'un ferrailage en treillis soudé ST 65C disposé au niveau du feuillet moyen de la dalle.

La dalle BFUP est connectée au platelage à l'aide de « mini » goujons type Nelson disposés dans les bandes de clavage et dans les poches des éléments préfabriqués de 380mm x380mm (figure 2).



Photo 2 : Sous-face du platelage - source : Eiffage TP



Photo 3 : Désordres observés - source : Cete de l'Est

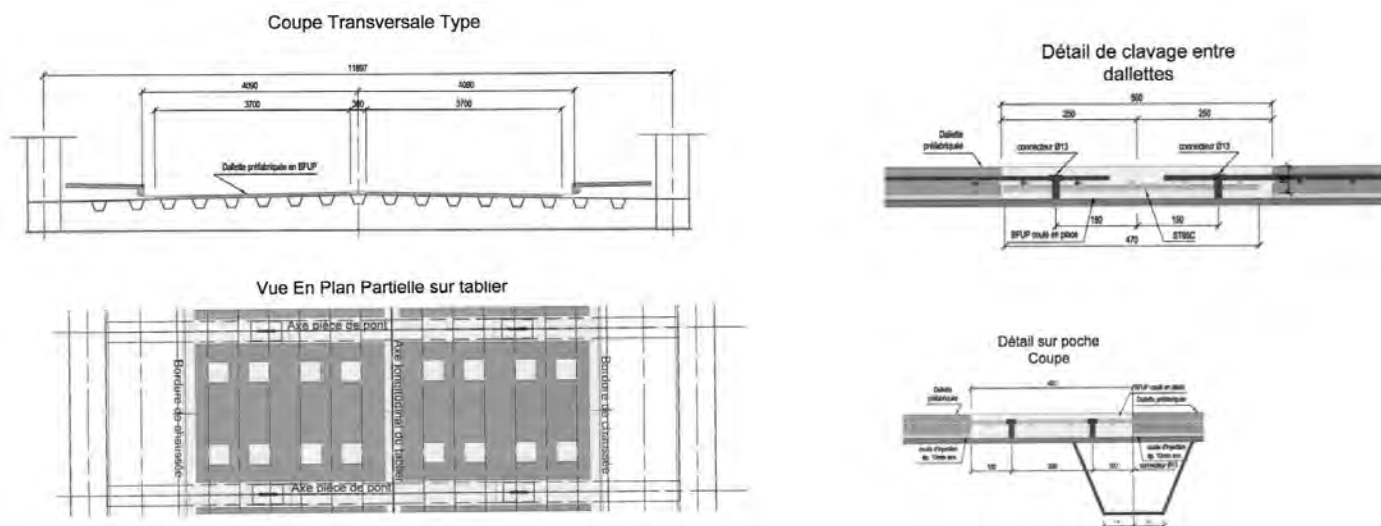


Figure 2 : Principe de renforcement

L'utilisation de dalles préfabriquées a permis de réduire au strict minimum les nuisances et restrictions de circulation et de minimiser les quantités de BFUP à couler en place, les cantonnant aux seules zones de clavage entre dalles ce qui permet d'avoir des moyens de bétonnage limités.

Cette solution avec dalles préfabriquées a été également favorisée par la géométrie du tablier (alignement droit), permettant de couvrir toute la surface avec un seul type d'élément préfabriqué

4. LE PROGRAMME DE SUIVI EXPÉRIMENTAL

L'étude expérimentale du comportement du complexe dalle orthotrope-BFUP ne pouvant s'appuyer sur un protocole d'essais classiques puisqu'il s'agit d'un complexe innovant de deux structures sans références antérieures en France, il est apparu pertinent de réaliser une première campagne d'expérimentation basée sur l'essai de flexion « cinq points » utilisé par les entreprises routières pour tester en fatigue les revêtements de chaussée (essai normalisé NFP 98-286).

Ces essais, réalisés dans le cadre du projet de recherche Orthoplus, ont permis d'étudier sur des échantillons de petites dimensions 580 x 220 mm, trois types de connexion pour une épaisseur constante de BFUP de 35 mm.

Ces essais à petite échelle ont montré un excellent comportement en statique et en fatigue du complexe tôle/BFUP quel que soit le mode de connexion : goujons, treillis-soudé ou treillis-soudé avec plaque crénelée de connexion soudée à la tôle.

L'essai de flexion « cinq-points » ne permettant pas de simuler le comportement de la dalle orthotrope munie de ses augets, il en résulte que ni le comportement en flexion longitudinale ni le cumul des contraintes longitudinales et transversales n'étaient accessibles dans ce type d'essai.

C'est ainsi que plusieurs corps d'épreuve à plus grande échelle ont été testés en statique et en fatigue au laboratoire

central de l'IFSTTAR. Il s'agissait d'éléments de dalle orthotrope de dimensions 2,40 x 4,00 m fabriqués à cette occasion dans l'usine d'EIFFAGE CONSTRUCTION METALLIQUE de Lauterbourg, et revêtue soit de béton bitumineux, soit de BFUP.

En complément, une campagne d'essais sur structure réelle de grande dimension « échelle 1 » dans le cadre du programme ORTHOPLUS a été entreprise. Cette campagne d'essais a consisté à étudier le comportement d'un platelage de type « VMD » (Viaduc Métallique Démontable) fourni par le CNPS (Centre National des Ponts de Secours). Le tablier « VMD » de 12,80 m de longueur et de 3,50 m de largeur a été transféré sur le site de Monthyon, près de Meaux, où EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS dispose d'une usine de fabrication d'enrobés et d'installations permanentes, afin de faire l'objet de différents tests.

Le tablier « VMD » avait pour rôle principal de quantifier le bénéfice structurel apporté par le revêtement en BFUP par rapport à une configuration tôle nue ou à celle avec un revêtement bitumineux non participant.

Plusieurs solutions pouvant être adoptées selon la nature du projet à réaliser dans le cadre d'un marché de travaux aussi bien pour la construction d'un tablier neuf que pour la réparation d'un tablier présentant des signes pathologiques ont été testées.

Pour valider la solution technique retenue pour le pont de la RD201 à Illzach, un élément de dalle préfabriquée en BFUP a été connecté à cette occasion au platelage orthotrope du tablier « VMD » (Photos 4 et 5).

La dalle préfabriquée était munie de « poches » permettant de concentrer les connecteurs par paquets et d'assurer la liaison par clavage du BFUP coulé en place. Cette disposition est proche de celle mise en œuvre pour les ponts mixtes bipoutres à dalle béton armé préfabriquée.

Des épreuves de chargement ont été ensuite réalisées après que le tablier « VMD » ait été instrumenté afin de quantifier le gain apporté en flexion locale et en flexion générale.



Photo 4 : Tablier VMD - Dalle préfabriquée



Photo 5 : Tablier VMD - Bétonnage des zones de clavage

5. LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Les justifications de l'ouvrage ont été menées dans les deux configurations "État initial" et "État renforcé", en considérant les charges routières civiles et les charges militaires pour lesquelles l'ouvrage avait été conçu.

La modélisation de la structure a été conduite à l'aide de modèles aux éléments finis 3D à partir d'éléments coques simulant finement le platelage orthotrope et son revêtement en BFUP (figure 3).

Les calculs ont été réalisés, en considérant dans un premier temps un comportement élastique linéaire des matériaux avec une loi d'interface acier-béton issue des essais push-out réalisés dans le cadre du projet ORTHOPLUS.

La prise en compte de la fissuration du BFUP dans les zones sur appuis au droit des pièces de pont a également été analysée, de manière à évaluer les effets de redistribution dans le platelage mixte acier-BFUP.

La comparaison des résultats du calcul de l'ouvrage avant et après renforcement (Tableau 1), a montré un gain important de raideur ainsi qu'une réduction appréciable des contraintes dans le platelage métallique.

Les calculs à la fatigue sont effectués selon la méthode « cumul de dommage ». En retraçant l'historique du char-

gement et la projection du trafic à venir, Les dommages à l'état initial et l'état renforcé ont été évalués et il a été calculé l'effet de la présence de la dalle BFUP sur l'espérance de vie de l'ouvrage après renforcement.

Les deux détails critiques pour l'ouvrage sont d'une part la soudure des augets discontinus sur l'entretoise. (Détail 36 selon EN 1993-1-9), et d'autre part la soudure de l'auget sur le platelage par un cordon d'angle (Détail 71 selon EN 1993-1-9 ou 125 selon les travaux de KOLSTEIN et du projet ORTHOPLUS).

Pour le premier détail, la présence de la dalle BFUP a permis de diminuer les contraintes en fibre inférieure de l'auget à la jonction avec l'entretoise de presque 50 %, ce qui permet de prolonger la résistance des détails non fissurés de près de 20 ans. Concernant le deuxième détail, la réduction des contraintes permet d'avoir une durée de vie de plus de 80 ans.

En ce qui concerne les justifications propres au revêtement en BSI®, elles sont basées sur les "Recommandations provisoires AFGC-SETRA pour les BFUP de 2002", en considérant la classe IV correspondant à une section armée par des fibres et des aciers passifs. Pour les joints de reprise la résistance de la section correspond à celle d'une section en béton armé sans contribution des fibres.

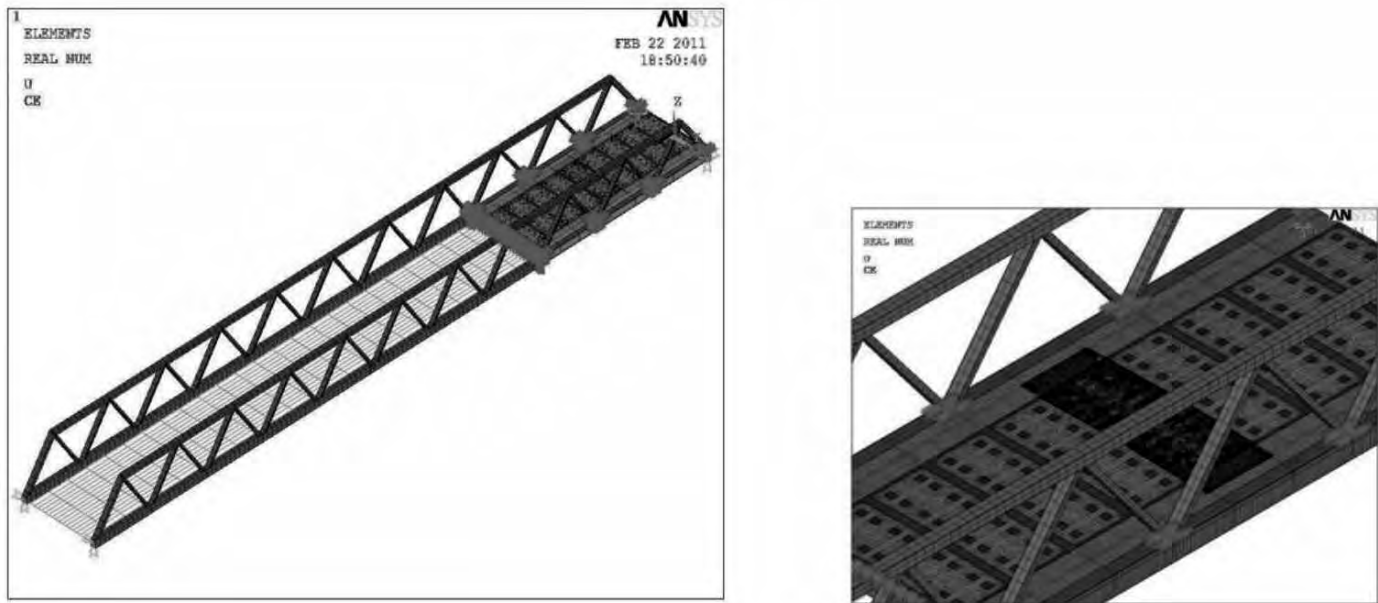


Figure 3 : Vue modèle 3D

Contraintes en MPA		Pont initial	Pont renforcé	Écart
Tôle de Platelage	σ_x (longitudinal)	263	163	-38%
	σ_y (transversal)	390	154	-61%
Augets	σ_x sous face	398	298	-25%
	σ_x âme	252	107	-58%
	σ_{xz} âme	122	59	-52%
Pièce de pont	σ_y	243	210	-14%
	σ_{xz}	120	104	-13%

Tableau 1 : Contraintes à l'ELU - Comparaison Etat initial / Etat renforcé

6. LES TRAVAUX DE RÉPARATION

Le challenge était de réaliser les travaux de renforcement de la dalle orthotrope en bénéficiant, d'une interruption totale de la circulation de l'ouvrage en été pendant deux mois seulement en juillet et août 2011.

La préfabrication des dalles BFUP (66 au total) a démarré en atelier début avril 2011 avec un rythme moyen de 4 dalles par jour.

Sur site, les travaux préparatoires ont consisté en :

- La dépose des revêtements sur ouvrage, couche d'enrobé et d'étanchéité.
- La préparation de la surface de la tôle de la dalle orthotrope après dépose des revêtements par hydrodécapage afin d'éliminer toutes les matières non adhérentes au support.

Pour les travaux de renforcement prévus sur 9 semaines, il s'agissait d'effectuer :

- **La pose des goujons-connecteurs** (Photo 6), par soudure à l'arc par fusion et forgeage au pistolet. Au total, près de 12000 goujons ont été soudés sur l'ouvrage.
- **La pose et réglage des dalles préfabriquées** en BFUP (Photo 7) à l'aide d'un chariot télescopique, en partant du milieu de la travée vers les appuis.

- **La pose des armatures** (treillis soudés) dans les zones de clavage transversal et longitudinal
- **La réalisation des bandes de clavage** transversal et des poches en BFUP coulé en place (Photo 8). La fabrication du BSI® sur le site a été réalisée avec un malaxeur classique à axe vertical et par gâchées de 250 l.
- **L'injection au coulis de l'interface dalle / tôle**, est réalisée à l'aide d'un mortier sans retrait. Des trous d'injection et des événements sont prévus dans les dalles préfabriquées, permettant de garantir le bon remplissage de l'interface.

- **La mise en œuvre de l'étanchéité et du revêtement**

Après une préparation du support par grenaillage, un traitement par pontage des reprises de bétonnage et après application d'un primaire en résine époxydique, une couche de roulement en résine gravillonnée est mise en œuvre (Photo 9), sur une épaisseur totale d'environ 10 mm.

Les travaux préparatoires ont démarré le 14 juin 2011. La pose des dalles s'est déroulée en juillet/août 2011.

La remise en service du tablier renforcé a pu être faite le 1^{er} septembre 2011, permettant ainsi notamment aux transports scolaires de circuler à nouveau sur l'ouvrage.



Photo 6 : Pose des « mini » goujons



Photo 7 : Pose des dalles préfabriquées



Photo 8 : Pose des dalles préfabriquées



Photo 9 : Mise en œuvre de la couche de roulement

7. LE CONTRÔLE DES TRAVAUX ET LA VALIDATION DE L'EXPÉRIMENTATION

Le Réseau Scientifique et Technique (SETRA + CETE EST) du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), a eu pour mission de contrôler et valider les études d'exécution, le choix des matériaux et leur mise en œuvre, ainsi que les procédures de mise en œuvre des matériaux.

L'objet de la validation est d'analyser le fonctionnement mécanique réel de l'ouvrage par rapport au fonctionnement théorique mis en évidence à l'occasion des études d'exécution par les modèles de calcul aux éléments finis. Il s'agit également d'étudier le comportement mécanique avant et après renforcement de manière à évaluer la durée de vie résiduelle de l'ouvrage réparé et d'étudier le comportement mécanique dégradé de l'ouvrage dans l'hypothèse de la rupture d'un auget.

Pour la flexion générale, il s'agit d'examiner l'impact de la mise en œuvre de la dalle sur le comportement de la structure métallique d'origine (flexion générale de l'ouvrage et flexion locale des pièces de pont), en s'intéressant notamment au niveau de connexion sous l'action des charges de trafic, des effets thermiques (différence de température entre la dalle en béton et les poutres métalliques) et de retrait.

Pour la flexion locale, il s'agit d'évaluer, tout particulièrement au droit des augets les variations de contraintes en fatigue dans la nouvelle configuration par rapport à l'ancienne.

Pour la détermination des actions de fatigue, ont été réalisés :

- l'enregistrement du trafic pendant une durée de deux mois de manière à caractériser le trafic réel circulant sur l'ouvrage.
- l'enregistrement simultané de variations de contraintes sur les poutres porteuses et sur les augets étudiés afin de mettre en évidence l'effet dynamique global et local du trafic. .

Pour ce faire, le programme d'instrumentation prévoyait :

- l'instrumentation d'une zone d'about ainsi que la zone de milieu de travée sur un ensemble de trois augets situés à l'aplomb d'une file de roues de poids lourd.
- l'instrumentation de la section de mi-travée des poutres porteuses avec des jauges extensométriques (membrane supérieure et inférieure), ainsi qu'avec des sondes de température.
- l'instrumentation de la section de mi-travée de la pièce de pont située à mi-travée avec des jauges extensométriques (membrane supérieure et inférieure), ainsi qu'avec des sondes de température.
- l'instrumentation de l'about de l'ouvrage pour détecter d'éventuels glissements entre la dalle et le platelage.
- le relevé de la déformation globale de l'ouvrage (à mi-travée) et locale (à mi-travée de flexion de la pièce de pont située à mi-travée de l'ouvrage).

Au total, 72 jauges de déformations ont été collées en intrados de l'ouvrage et sur les poutres principales (Photo 10). Un suivi topométrique de la section à mi-travée a également été réalisé. Des prismes ont été fixés sur les membrures inférieures et supérieures des poutres principales. Un prisme a été fixé en sous-face de la semelle inférieure de la pièce de pont n°17, dans l'axe de l'ouvrage. Ce suivi a permis d'examiner le comportement global de la structure renforcée.

Les épreuves de chargement ont été conduites avant et après réparation afin d'évaluer le comportement de l'ouvrage renforcé. À mi-travée, le pont a été chargé par 6 camions tandis que 2 camions ont suffi pour l'étude des sections d'about.

Les principales conclusions que l'on peut tirer des épreuves de chargement avant et après réparation sont :

- le fonctionnement global de la structure (sous charge statique), n'est pas modifié ; les flèches sont diminuées de l'ordre de 2% et les contraintes dans les poutres principales sont sensiblement les mêmes.
- la flexion longitudinale des pièces de pont est réduite : la connexion des dalles BFUP au droit des bandes de clavage est excellente ;
- l'évaluation du fonctionnement local des augets est particulièrement difficile : les écarts de position des roues entre théorie et pratique, puis entre les deux épreuves de chargement induisent des différences de comportement



Photo 10 :Instrumentation du platelage – source : CETE de l'Est

local de la structure qu'il est impossible d'appréhender. Aussi, seules des tendances peuvent être déduites des mesures :

- les dalles BFUP semblent mieux répartir les efforts vers les augets adjacents,
- l'axe neutre semble se situer dans le BFUP, ce qui indique la bonne connexion du BFUP au platelage,
- les contraintes transitant dans les augets semblent diminuer de 30%,
- les contraintes transitant dans le platelage semblent diminuer de 50%.

8. LE PROGRAMME DE SUIVI DE LA DURABILITÉ DE LA RÉPARATION

Il s'agit de s'assurer du bon fonctionnement dans le temps de la réparation pendant une période de dix ans.

Le suivi de l'ouvrage après sa remise en service comprendra des Inspections détaillées régulières dont la fréquence sera ajustée en fonction des observations ainsi qu'une visite annuelle conduite par un expert du CETE de l'Est. À ce jour, les inspections détaillées sont programmées à un an, cinq ans puis dix ans après la réparation.

A l'occasion de ces inspections, il sera également procédé à un suivi de l'évolution des contraintes et de la flèche sous chargements statiques par des épreuves similaires aux

épreuves de chargement réalisés à la fin des travaux. L'objectif de ces instrumentations est notamment de vérifier la pérennité de la connexion entre les dalles BFUP et le platelage métallique. Cette campagne d'instrumentation pourra être simplifiée par le comité de suivi technique constitué à cet effet après analyse des résultats.

9. CONCLUSION

Le procédé ORTHODALLE appliqué à la réparation de l'ouvrage de la RD201, montre tout l'intérêt de cette technique novatrice :

1. Elle permet d'accroître la capacité portante de la dalle orthotrope, en réduisant les contraintes dans le platelage métallique.
2. La durée de vie de l'ouvrage est allongée d'au moins 20 ans pour un coût relatif très avantageux par rapport à celui de la solution de remplacement de l'ouvrage.
3. Elle fait appel à l'emploi de BFUP, composite le plus durable existant à ce jour. La durée de vie attendue du revêtement en BFUP conduit à un bilan environnemental sur l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage considérablement amélioré.

Le procédé ORTHODALLE, mis en œuvre avec succès sur le pont d'Illzach a reçu le Label IVOR (Innovation Validée sur Ouvrage de Référence), attribué par le comité d'Orientation du Réseau Génie Civil & Urbain lors de la séance du 4 Juin 2012.