LE RENFORCEMENT DU VIADUC DE MARTIGUES

S. AMMAR, L. MONTIGNY

Bouygues T.P.R.F, France

C. CREMONA

Bouygues T.P., France

Introduction

Le viaduc de Martigues supporte l'A55 et permet de franchir la passe navigable reliant l'étang de Berre à la mer méditerranée (Fig.1). Il est composé de deux types d'ouvrage : un ouvrage principal métallique de type pont à béquille d'une longueur totale de 300 m, permettant de dégager un gabarit de navigation de 40 m de haut pour 115 m de large et de quatre viaducs d'accès, deux aux nord et deux au sud, objets des travaux de réparation et de renforcement [10].

Les viaducs d'accès sont des tabliers jumeaux indépendants portant chacun un sens de circulation. Les viaducs nord sont constitués de 6 travées continues, de portée courante 45,00 m excepté la travée d'extrémité sur la culée nord qui est de 34,50 m, soit une longueur totale de 259,50 m. Les viaducs sud sont constitués de 7 travées continues, de portée courante 45,00 m, sauf la travée d'extrémité sur la culée sud qui est de 44,50 m, portant la longueur totale à 314,50 m. Ils présentent une pente longitudinale de 4 % et un devers unique de 2 % vers les rives extérieures. Les tabliers sont des dalles nervurées de 3,00 m de hauteur, précontraintes longitudinalement et transversalement. Les câbles de précontrainte longitudinale sont munis de coupleurs au droit des reprises de bétonnage. Les nervures ont une largeur variable de 0,86 m à leur base à 1,00 m à leur encastrement sur le hourdis. L'entraxe des nervures est de 8,40 m. Le tablier a été réalisé à l'avancement à l'aide d'un cintre auto lanceur.

Les tabliers s'appuient sur les piles en « I », dont la hauteur varie de 23 à 43 m à l'approche de l'ouvrage métallique. A l'une des extrémités les tabliers reposent sur des culées creuses, à l'autre sur des piles-culées en « I » commune avec l'ouvrage métallique. Sur chaque pile culée, 4 amortisseurs parasismiques (vérin à huile simple effet) de 150 tonnes de capacité sont disposés entre le tablier métallique et les tabliers béton.

Fig.1. Vue générale du viaduc de Martigues. ©photothèque BYTPRF

Cet article présente les travaux de renforcement menés sur cet ouvrage entre 2011 et 2014 sous la maîtrise d'ouvrage et d'œuvre de la DIR Méditerranée. Il reprend les éléments principaux de l'article « Le renforcement du viaduc de Martigues », publié dans le N°896 de la revue « Travaux ». Ces travaux ont été exécutés par Bouygues TP Région France.

Les travaux

Plusieurs campagnes d'investigations ont été menées entre 1981 et 2003 et ont mis en évidence un caractère pathologique de l'ouvrage, dont une fissuration dans l'environnement immédiat des zones de reprise de bétonnage (zone de couplage de la précontrainte longitudinale existante), situées à 9,00 m des lignes d'appuis. Ces fissures suivent sensiblement la ligne de reprise de bétonnage et règnent sur les trois quart de la hauteur des nervures depuis leur base. Elles sont principalement dues à une mauvaise appréhension du fonctionnement des coupleurs de précontrainte, à la non prise en compte des effets du gradient thermique, ainsi qu'à une médiocre qualité du béton dans ces zones particulièrement délicate dans la mise en œuvre (ségrégation évidente, béton mal serré, caverneux)

Une dégradation très avancée de l'ensemble des appareils d'appuis et des dispositifs antisismiques longitudinaux hors service et globalement insuffisants complètent l'état de l'ouvrage.

Les différentes études d'avant-projet ont abouti à la nécessité de réaliser un renforcement de l'ouvrage par précontrainte additionnelle ancrée aux extrémités de chaque tablier et dimensionnée pour recomprimer les sections critiques de l'ouvrage. Ce renforcement est complété par l'injection préalable des fissures, le remplacement des appareils d'appuis et la modification totale de la conception parasismique de l'ouvrage (la ville de Martigues passant de zone sismique faible à modérée selon la nouvelle réglementation sismique nationale).

Les études d'exécution

Contexte réglementaire / hypothèses de calcul

Les études d'exécution de la réparation du viaduc de Martigues ont été réalisées conformément aux hypothèses suivantes :

- Règlement de calcul appliqué : règles BPEL 91 [1],
- Charges considérées pour le recalcul de la flexion longitudinale de l'ouvrage : Fascicule 61 titre II (système de charges civils Al et Bc, et charge militaire MC120) [2],
- Effet de température (température uniforme -40°C/+30°C, gradient +8°C),
- Règlement de calcul appliqué pour les études sismiques : AFPS 92 et Eurocode 8-2 [3-4].

Le projet de renforcement n'a pas pour objet de rendre l'ouvrage strictement conforme aux règlements actuels, mais de refermer les fissures au droit des joints de couplage de la précontrainte existante. Sur ces bases, la précontrainte additionnelle a donc été dimensionnée de telle sorte que :

- Au droit des joints de construction des travées (section de couplage de la précontrainte existante) :
    - Critère 1 : La section soit toujours comprimée sous l'action des charges extérieures combinées à l'ELS fréquent et sous les seules effets de la précontrainte ;
    - Critère 2 : A l'ELS rare, les tractions dans les aciers passifs et les surtensions dans les câbles calculées en classe III soient conformes aux prescriptions du BPEL ;
    - Critère 3 : A l'ELU, les déformations des différents matériaux soient conformes aux prescriptions du BPEL ;
- Partout ailleurs :
    - Critère 4 : la précontrainte additionnelle n'entraine que des compressions dans l'ensemble des sections.

Les études de clouage des massifs d'ancrage de la précontrainte additionnelle (et massifs déviateurs) ont été menées suivant la norme NFP 95-104 [5]. L'accroche des massifs a été justifiée à l'aide de barres précontraintes de clouage complétées par des scellements d'aciers passifs selon les recommandations données dans l'article paru dans le n°501 des annales de l'ITBTP de février 1992 [6]. Un dimensionnement mixte (Béton précontraint - Béton armé) a donc été retenu :

- Sous sollicitations ELS, l'accroche du massif a été justifiée au sens de la norme NFP 95-104 par la seule précontrainte,
- Sous sollicitations ELU, l'accroche du massif a été justifiée selon le n°501 des annales de l'ITBTP par la précontrainte associée à des armatures passives scellées.

Etudes de flexion longitudinale

Les études de flexion longitudinale ont été réalisées sous le logiciel ST1 du Cerema [7] à l'aide d'une modélisation filaire de chaque tablier béton. L'ensemble de la précontrainte (câblage existant et câblage additionnel) a été rentré dans la modélisation. Les effets différés du béton (retrait, fluage) et de la précontrainte (pertes par relaxation) ont été intégrés dans les calculs.

Ces modèles ont permis d'établir les nouvelles descentes de charge en service sur les néoprènes et de vérifier les contraintes normales et contraintes de cisaillement dans les tabliers durant les différentes phases de la vie de l'ouvrage (état actuel avant réparation, état après réparation, état en phase de vérinage ultérieur, état au temps infini à 50000 jours).

Les justifications des sections de joint (calcul en sections fissurées) ont été conduites à l'aide du logiciel CDS du SETRA [8]. Pour ces vérifications, l'effet de la précontrainte a été considéré par un calcul en fourchette en supposant :

- Soit un niveau de fonctionnement correct des coupleurs de précontrainte, traduit par la prise en compte de 100% de l'effort de précontrainte transmis dans la section,
- Soit d'un niveau de fonctionnement altéré des coupleurs de précontrainte, traduit par la prise en compte de 70% de l'effort de précontrainte transmis dans la section.

Etude des massifs d'abouts

Les massifs d'abouts sont équipés d'un système de précontrainte par barres dont le rôle est d'équilibrer les sollicitations suivantes :

- Barres verticales :
  - Reprendre le cisaillement sous diffusion d'équilibre général amené d'une part par la précontrainte existante et d'autre part par la précontrainte additionnelle.
  - Assurer le clouage des pièces de charpente recevant les RAP en sous face des nervures.
- Barres horizontales :
  - Justifier le clouage du massif sous l'effet de l'ancrage de la précontrainte additionnelle.
  - Reprendre le glissement amené par la précontrainte verticale à l'interface massif/nervure existante.
  - Reprendre le glissement provenant du couple amené par les RAP sur le massif en situation sismique.

Les études de diffusion des abouts ont été menées selon une approche analytique conformément à l'annexe IV du BPEL [1] et complétées par des analyses locales à l'aide de modélisations aux éléments finis volumiques réalisées sous le logiciel ROBOT [9] (Fig.2).

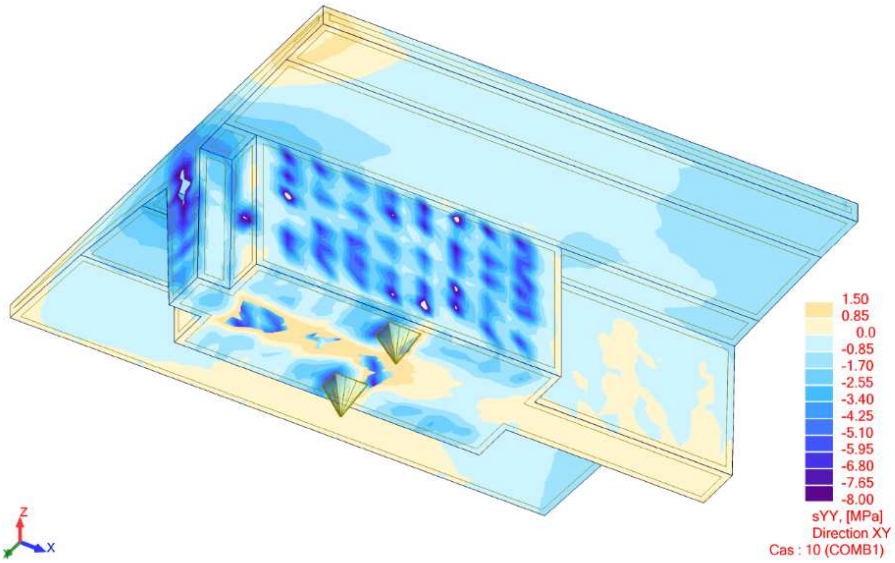

Fig.2. Modélisation aux éléments finis. ©COGECI

Etude sismique

L'effet du séisme dans les directions transversale et verticale a été étudié à l'aide d'une analyse spectrale multimodale réalisée sur le logiciel ROBOT (Fig.3). Cette modélisation a permis de déterminer :

- Les efforts transversaux à reprendre par les butées parasismiques en tête de pile
- Les déplacements transversaux du tablier sous séisme
- Les descentes de charges verticales sous séisme sur les néoprènes

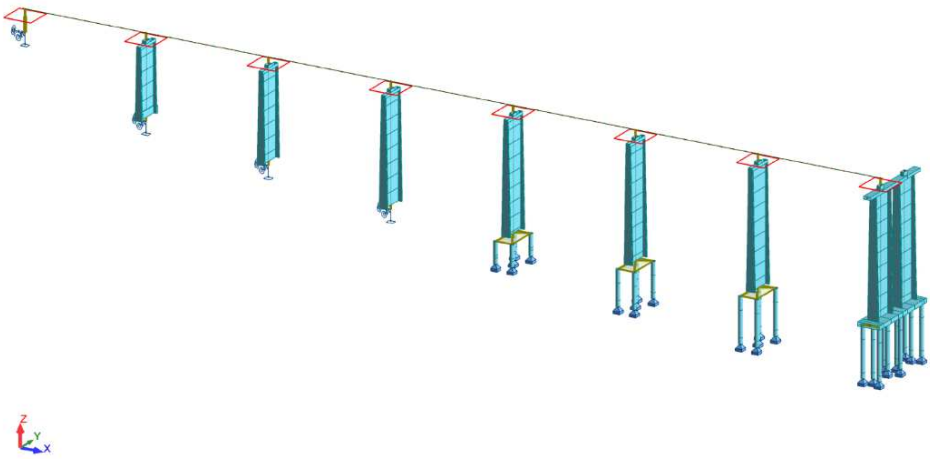

Fig.3. Vue d'ensemble de l'étude parasismique (tablier sud-est) ©COGECI

Dans la direction longitudinale, des Ressorts Amortisseurs Précontraints (RAP) ont été mis en œuvre entre les tabliers et les culées de manière à limiter l'effort sismique global sollicitant les culées. Les RAP ont donc été dimensionnés selon deux critères :

- Obtenir un effort global sismique longitudinal sur le point fixe des culées inférieur à 1200 t (effort maximum horizontal pouvant être repris par les culées),
- Obtenir un déplacement du tablier au niveau de son point fixe inférieur à 20 mm.

Ces critères ont été vérifiés à l'aide d'une analyse sismique temporelle réalisée à l'aide du programme développé par la société AK SISM. Selon cette méthode d'analyse, l'action du séisme a été caractérisée dans le logiciel par la définition directe de l'accélérogramme fourni par le maitre d'œuvre.

La précontrainte additionnelle

La précontrainte additionnelle longitudinale extérieure est assurée par la mise en œuvre de 2 câbles 27T15S par nervures (soit env. 1000 tonnes de compression par nervures), suivant un tracé polygonal. Le système de précontrainte utilisé est le système VSL type GC6-27. Les câbles règnent sur la quasi-totalité de la longueur des tabliers et sont déviés sur piles et en travées par des déviateurs. Les gaines en PEHD sont mises en œuvre à l'avancement, travée par travée, et raccordées entre elle par manchons electro-soudables. Des dispositifs de maintien provisoire des gaines de type « hamacs » sont mis en œuvre pour permettre les opérations d'enfilage des torons. Retendable et remplaçable, cette précontrainte est injectée la cire pétrolière.

Les câbles sont ancrés aux extrémités des tabliers par des massifs d'ancrages, eux même cloués sur les nervures par une précontrainte transversale horizontale par barres. 45 barres de précontrainte de diamètre 40 mm, par massifs, sont nécessaires pour assurer la bonne transmission des efforts. La préparation des surfaces de contact entre l'ouvrage existant et les massifs est réalisée par scarification du béton au moyen d'une hydro démolition (2800 bars). Cette technique présente l'avantage de ne pas être traumatisante pour l'ouvrage à l'inverse du bouchardage ou du piquage.

Les déviateurs, sur pile et en travée, sont eux cloués à l'existant par deux barres de précontrainte de diamètre 36 mm.

Les opérations de mise en tension des câbles sont précédées par l'injection des fissures à la résine époxy, permettant de rétablir le monolithisme des sections fissurées et ainsi de recomprimer ces zones.

Le remplacement des appareils d'appuis

Des consoles de vérinage sont réalisées pour chacune des piles. Elles sont clouées à l'ouvrage par l'intermédiaire de 8 barres de précontraintes de diamètre 50 mm, mises en tension à 140 tonnes, assurant ainsi l'effort de plaquage nécessaire au soulèvement de l'ouvrage (Fig.4).

Fig.4. Dispositifs de vérinage. ©photothèque BYTPRF

Quatre groupes de trois vérins de capacité 260 tonnes permettent de prendre en charge l'ouvrage et de procéder à la découpe des bossages inférieurs. La dénivelée transversale admissible (d'un appui à l'autre) pour ces opérations est limitée à 0,3 mm. Les nouveaux appareils d'appuis néoprène (800 mm x 800 mm) sont ensuite mis en œuvre avec des dispositions particulières sont mises en œuvre pour assurer un anti-cheminement des appareils ou un plan de glissement.

Les accès

Les dimensions de l'ouvrage nécessitent la mise en œuvre d'accès spécifiques pour la réalisation des travaux.

En têtes de pile

Les travaux situés en tête de pile courante (remplacement des appareils d'appuis, butée parasismiques, déviateurs sur piles) sont réalisés à partir de plateformes périphériques, hissées depuis le pied des piles (Fig.5).

Fig.5. Accès en tête de pile. ©photothèque BYTPRF

Les dispositifs de hissage sont constitués de 4 ensembles portiques/palan à air, d'une capacité unitaire de 3,2 tonnes. L'assiette des plateformes est contrôlée durant les opérations de hissage et de déhissage afin d'éviter toute déformation excessive de la structure (Figs.6). En phase exploitation, les plateformes reposent sur 8 corbeaux métalliques, fixés en périphérie de piles de l'ouvrage.

Fig.6. Dispositifs de hissages. ©photothèque BYTPRF

Sur piles culées

La réalisation des massifs d'ancrage de la précontrainte additionnelle nécessite la mise en place d'outils de coffrage et d'accès adapté aux contraintes géométriques de l'ouvrage.

Fig.7. Plateau coffrant. ©photothèque BYTPRF

Pour chacune des nervures, un plateau coffrant est alors hissé depuis le tablier (hauteur 43 m), suivant la même méthodologie que les accès en tête de pile (Fig.7). La première partie constitue un berceau permettant de hisser puis de riper la seconde partie servant de fond de moule et de platelage de travail. En phase d'exploitation, l'outil est suspendu par l'intermédiaire de 14 tiges de coffrage de diamètre 30 mm. L'ensemble de la structure pèse environ 8 tonnes.

Les dispositifs parasismiques

La mise à niveau des dispositifs parasismiques de l'ouvrage répond aux exigences accrues des nouvelles règlementations. Elle comprend :

- La réalisation de butées parasismiques de sécurité sur les piles et de blocage sur les culées et piles culées (Fig.8).
- La mise en œuvre d'amortisseurs à effet de seuil sur culées à raison de 4 unités par culée (Fig.9).

Fig.8. Butées de sécurité sur piles courantes. ©photothèque BYTPRF

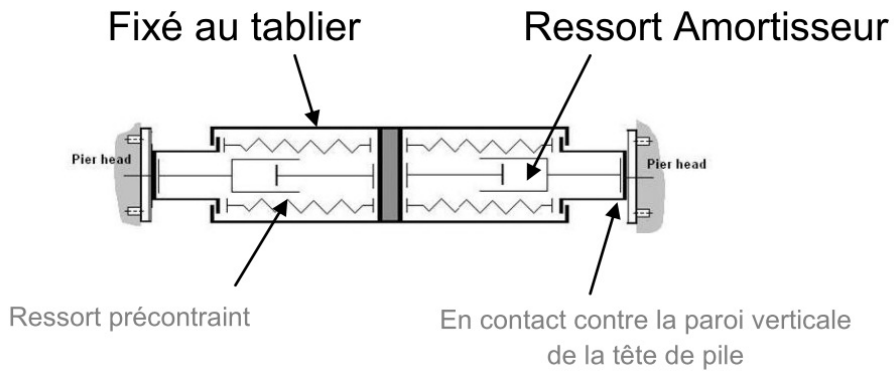

Fig.9. Principe de fonctionnement RAP. ©DYNA SHOCK SYSTEM

L'amortisseur précontraint est un appareil conçu pour dissiper l'énergie sismique soumise à des structures. Le RAP (Ressort Amortisseur Précontraint) réduit le déplacement longitudinal du pont à 25 mm en phase de séisme. Ils sont placés entre les massifs de la précontrainte additionnelle, sur lesquels ils sont cloués, et des massifs en béton armé. Ils agissent comme une clé de cisaillement, qui a la possibilité de se régénérer automatiquement après un événement dynamique.

L'énergie sismique est dissipée par l'amortisseur au lieu d'être transmise à la structure. Ces amortisseurs précontraints acceptent le déplacement longitudinal lors du retrait fluage et de la dilatation ou contraction thermique.

L'amortisseur précontraint fonctionne sur le principe du passage rapide du fluide visqueux à travers un orifice étroit, qui génère un taux de résistance élevé, dissipant alors une grande quantité d'énergie. Afin d'éviter le déplacement en service, un effort de précontrainte de 120 tonnes est appliqué au ressort.

Après la compression dynamique de l'amortisseur (séisme), celui-ci a la capacité de revenir à sa position d'origine en raison de la fonction de ressort intégré (dit « auto-réarmable »). La valeur de la force de retour est dimensionnée afin de surmonter la force de frottement des appuis glissants.

Afin de générer l'amortissement et la fonction ressort dans les deux directions, un RAP à double effet est utilisé.

Conclusions

Construit entre 1969 et 1972, le viaduc de Caronte supporte 80000 passages quotidiens. Depuis sa mise en service, le viaduc a fait l'objet de nombreuses investigations liées aux désordres constatés sur les viaducs d'accès en béton précontraint. Les pathologies actuelles révèlent les insuffisances règlementaires et technologiques de l'époque : fissuration au niveau des joints de couplage, dégradation des appuis, obsolescence des dispositifs parasismiques avec arrachement des ancrages sous l'effet des déformations induites par les charges de trafic.

Les études et inspections complémentaires ont conduit à l'élaboration d'un projet de réparation, qui consistait en une injection des fissures et une réfection des parements, un renforcement des viaducs d'accès par précontrainte extérieure, une reprise des dispositifs d'accès, une réfection des superstructures et équipements, un remplacement des appareils d'appui, et une mise en conformité sismique.

Références

[1]. BPEL 91, 1991. *Prestressed concrete design code*. Ministry of Transport, Paris, France

[2]. Fascicule 61, 1971. *Part II: Loads for bridges (design, calculation and tests)*. Ministry of Transport, Paris, France.

[3]. AFPS 92, 1992. *Guide for bridge seismic protection*. Presses de l'ENPC, Pairs, France.

[4]. EN1998, 2004. *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*, European Standards, European Committee for Standardization, European Union.

[5]. NFP 95-104, 1992. *Repair and strengthening of concrete and masonry structures: specifications relative to the technique of additional prestressing*. AFNOR, La Plaine Saint-Denis, France.

[6]. Poineau D., 1992. The prestressing technique for bridge repair and strengthening works. *Annales de l'ITBTP*, N°501, Feb.1992.

[7]. ST1, 2015. *ST1 user's guide*. Cerema/DTecITM, Sourdun, France

[8]. CDS, 2014. *CDS user's guide*. Cerema/DTecITM, Sourdun, France.

[9]. ROBOT, 2015. *Robot structural analysis*. Autodesk, USA.

[10]. Ammar S., Montigny L, 2015. Le renforcement du viaduc de Martigues. *Travaux*, 896, 30-36