

La construction du pont de Puget-Théniers

Denis Davi, Philippe Vion

Le contexte général et les principales contraintes du site

La construction du nouveau pont sur le Var à Puget-Théniers, dont la conception générale a été décrite dans le n° 48 du bulletin « Ouvrages d'art » [1], s'est achevée en mai 2005 après 20 mois de travaux. Cet ouvrage remplacera le pont du Brouchier qui constituait jusqu'à présent le seul point de franchissement du Var au niveau de la ville de Puget-Théniers, à quelques 60 kilomètres au nord-ouest de Nice. Il avait été mis en service en 1888 et comportait une voie unique de circulation limitée à 3,5 tonnes et un trottoir en porte-à-faux, le pont du Brouchier, de part sa vétusté et son étroitesse, n'était depuis longtemps plus adapté au trafic. En 1999, le Conseil Général des Alpes-Maritimes a donc décidé de réaliser un nouvel ouvrage de franchissement du Var à deux voies de circulation et deux larges trottoirs sur la commune de Puget-Théniers, permettant plus largement de relier la vallée de la Tinée à celle de l'Estéron. Le souhait du Maître d'ouvrage était de construire une structure esthétique qui s'intègre bien dans le site et qui constitue un ouvrage marquant à l'entrée du département, tout en privilégiant la simplicité des formes et un coût raisonnable.

Outre ces contraintes esthétique et économique, les concepteurs devaient prendre en considération deux contraintes naturelles fortes : d'une part, comme en témoignent les dégâts importants occasionnés lors



Photo 1 : dégâts occasionnés lors de la crue de 1994

de la crue de 1994 (photo 1), le Var est un fleuve torrentiel qui se caractérise par des débordements violents en période de crues. Par conséquent, le cahier des charges stipulait que le futur pont ne devrait posséder aucun appui en rivière et que son tablier serait aussi mince que possible afin de pouvoir dégager un gabarit suffisant vis-à-vis des crues centennales.

D'autre part, la commune de Puget-Théniers se situant en zone de moyenne sismicité, l'ouvrage devait être dimensionné pour résister à un tremblement de terre correspondant à une accélération nominale de 3 m/s^2 , soit environ un tiers de la force de pesanteur prise en horizontal.

Les caractéristiques principales de l'ouvrage

L'étude préliminaire et le dossier de POA réalisés par le Sétra, en collaboration avec l'architecte Laurent Barbier, ont conduit à retenir pour la conception de l'ouvrage, un pont à haubans dissymétriques, à tablier en béton précontraint avec deux mâts de pylône verticaux.

D'un poids total d'environ 4 300 tonnes, le nouveau pont sur le Var de Puget-Théniers présente une longueur totale de 93,85 m répartie en une travée principale de 65,85 m franchissant le Var et une travée arrière de 16 m prolongée par un massif contre-poids

de 12 m scellé dans le rocher (fig.1). Deux nappes de 7 haubans disposés en semi-éventail supportent la travée principale et s'ancrent dans les deux mâts du pylône de 25,50 m de hauteur. Les efforts sont transmis à la culée contre-poids via 2 nappes de 4 haubans de retenue parallèles.

Le tablier, constitué d'une dalle de 22 cm d'épaisseur supportée par deux nervures longitudinales (dans lesquelles viennent s'ancrer les haubans) et par des entretoises espacées de 3,60 m, porte un profil en travers comprenant deux voies de circulation de 3,50 m et deux larges trottoirs de 3,80 m (fig. 2). Le béton utilisé pour le tablier et les pylônes est un béton à hautes performances (B60) tandis que celui des appuis a des caractéristiques plus classiques (B35 pour la pile et les culées, B30 pour les pieux).

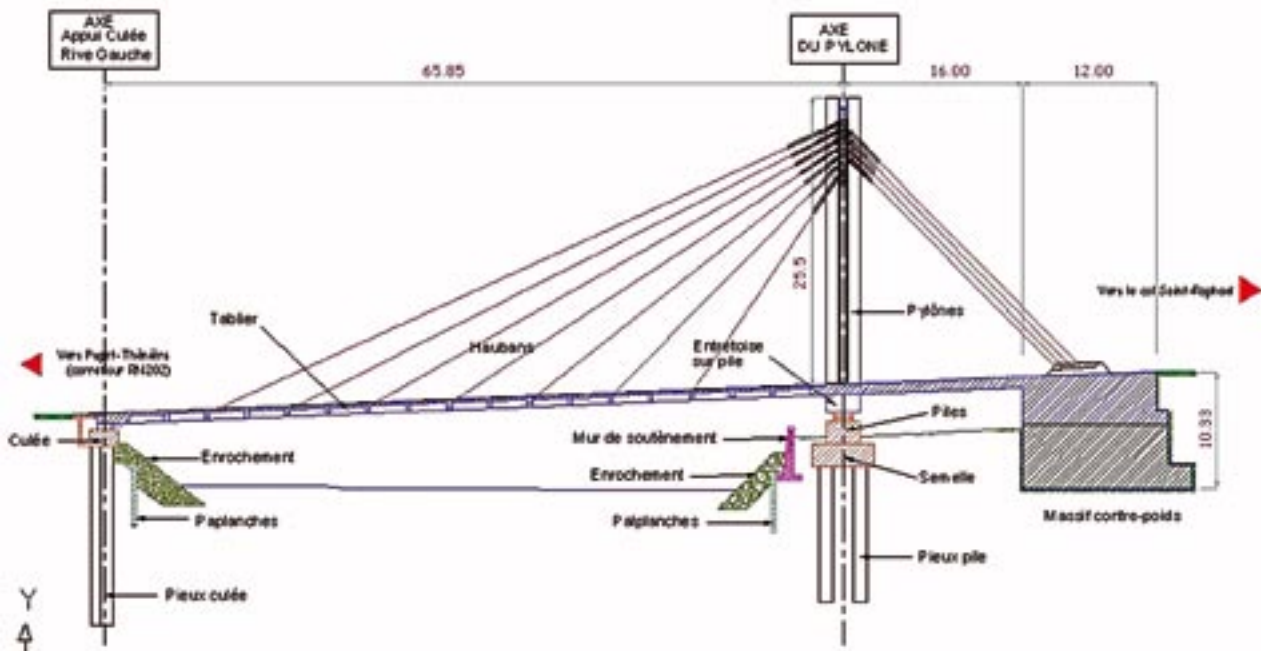


Figure 1 : coupe longitudinale

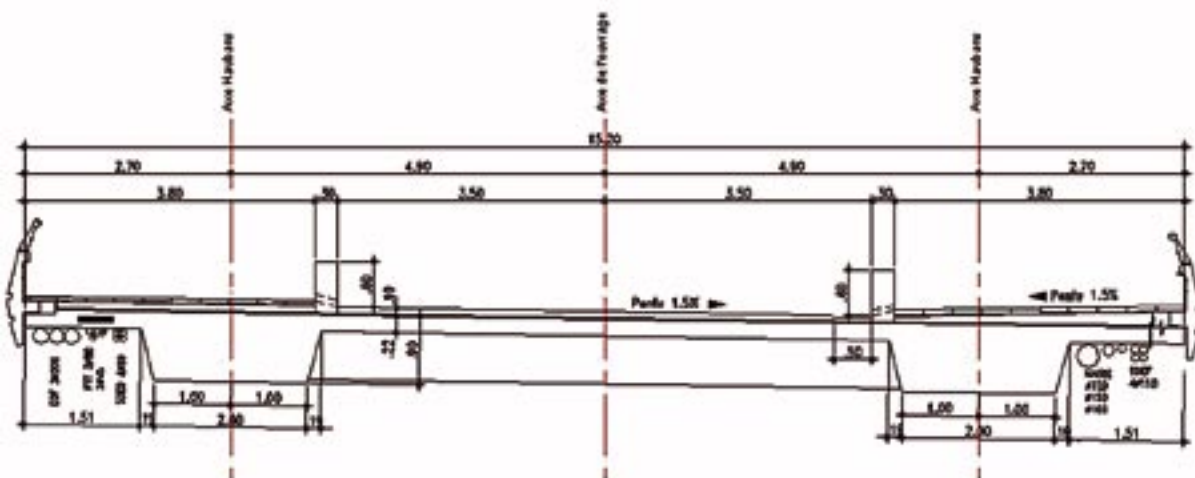


Figure 2 : coupe transversale

Les étapes de la construction

Principe général

Afin de s'affranchir des risques liés aux crues du Var en phase de construction et de ses incidences sur le planning de l'opération, le groupement Razel/Cari, lauréat de l'appel d'offre, a proposé de construire l'ouvrage sur cintre parallèlement au fleuve, puis de l'amener, quasi-achevé, dans sa position définitive par rotation (fig. 3).

Cette méthode de construction a nécessité quelques adaptations par rapport au projet initial du Sétra : d'une part, une longrine de rotation provisoire en béton armé a été réalisée pour permettre le glissement de l'appui aval depuis sa position initiale jusqu'à sa position finale sur pile (fig. 4 et 5).

D'autre part, le massif contre-poids a été scindé en deux parties : une partie mobile pivotant avec l'ouvrage et servant à contrebalancer son poids propre pendant la phase de rotation, et une partie fixe construite à son emplacement définitif, servant à équilibrer les surcharges d'exploitation et à ancrer correctement l'ouvrage dans le substratum rocheux en cas de séisme.

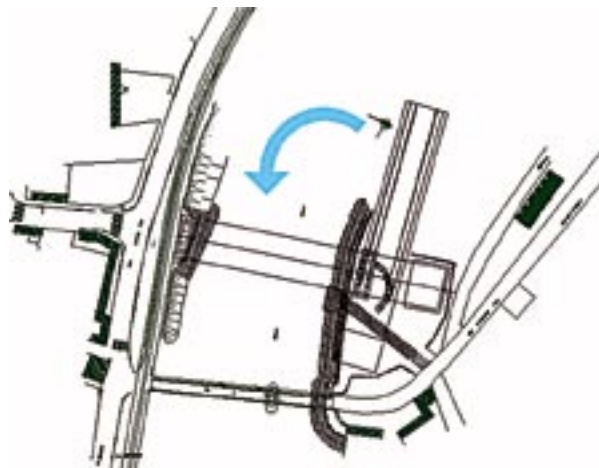


Figure 3 : principe de mise en place par rotation de l'ouvrage (vue de dessus)

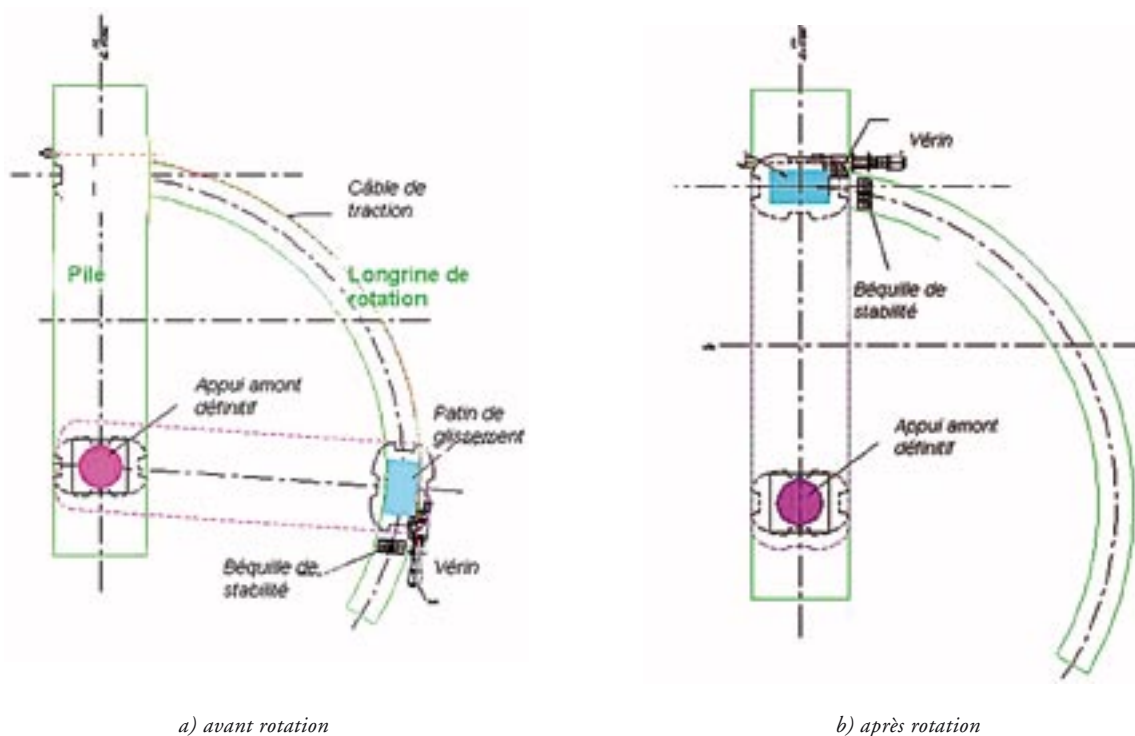


Figure 4 : rotation de l'ouvrage par glissement de l'appui aval sur la longrine provisoire (vue de dessus)

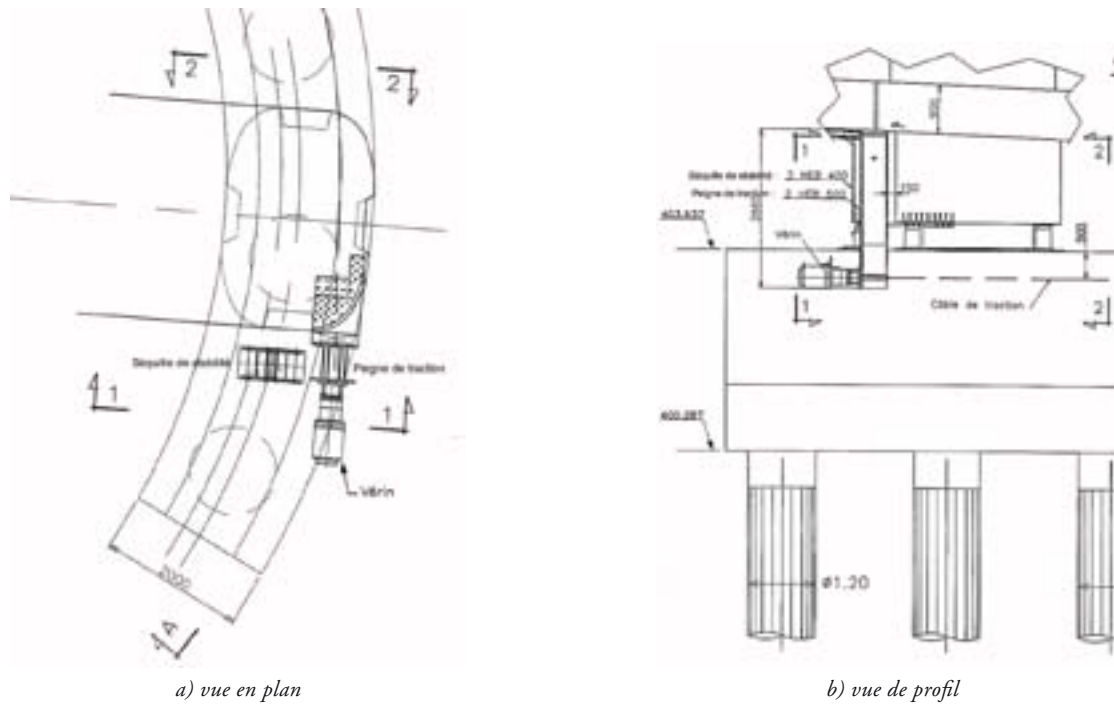


Figure 5 : détail du dispositif de rotation

La solidarisation des deux parties du massif, une fois la rotation effectuée, est réalisée par l'intermédiaire de 14 cheminées tronconiques verticales et d'une ceinture périphérique en béton armé (fig. 6). La section des cheminées tronconiques varie de 0,65 m x 0,65 m au niveau de la jonction, à 0,80 m x 0,80 m aux extrémités. Ces cheminées sont ferraiillées, au moyen d'armatures passives en attente, de façon à reprendre les efforts de traction verticaux qui s'y développent en

service et sous séisme. Le transfert d'efforts au reste de la structure (massif de culée contreponds) est assuré par la forme tronconique et par frottement périphérique béton/béton le long du coffrage en lattis métallique de type Nerlat®. La ceinture périphérique présente quant à elle une section carrée constante de 1,00 m de côté. Sa connexion au massif est réalisée au moyen d'armatures passives en attente.

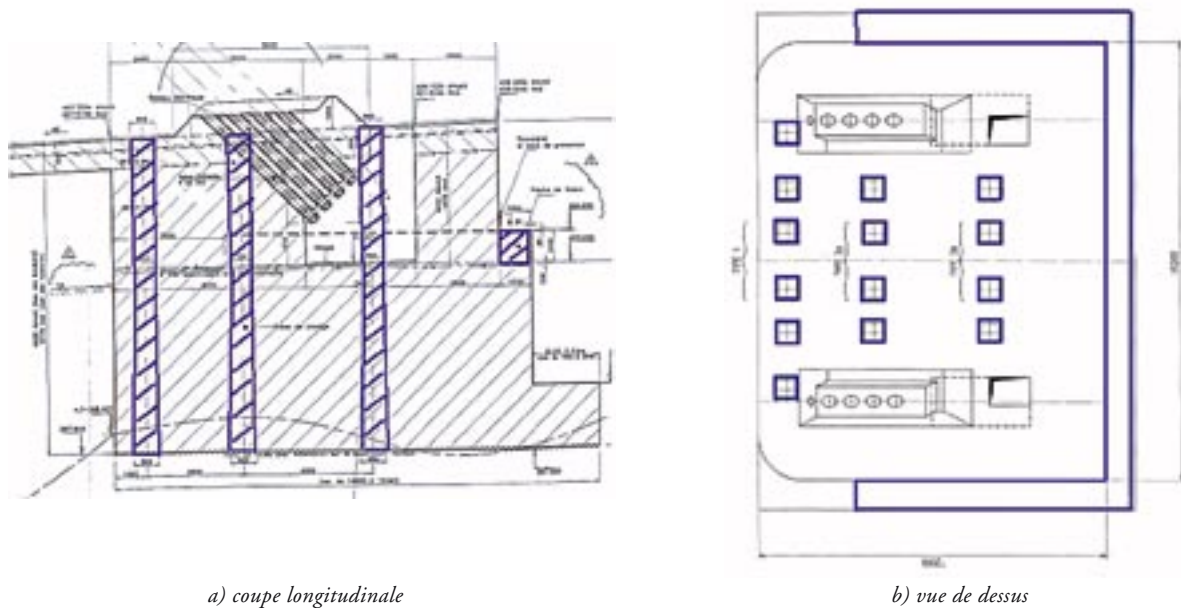


Figure 6 : solidarisation du massif contre-ponds par cheminées tronconiques verticales et ceinture périphérique

La réalisation des appuis

La construction de l'ouvrage a débuté en septembre 2003 par les travaux de terrassement généraux (photo 2), la mise en place des palplanches de protection des berges du Var au niveau de l'implantation du futur pont et la réalisation des pieux de la pile, de la longrine de rotation et de la culée rive gauche.

Ces pieux, d'un diamètre de 1,2 m et d'une longueur de 12 à 16 m, sont au nombre de 12 pour la pile, 4 pour la culée rive gauche et 6 sous la longrine de rotation. Les pieux de la pile et de la culée comportent une gaine métallique définitive et présentent une densité de ferrailage importante atteignant jusqu'à 150 kg/m³ en vue de leur conférer un bon comportement sous séisme (photos 3).



Photo 2 : travaux de terrassement généraux (sept. 2003)



a) cages d'armatures



b) gaine métallique et bétonnage

Photos 3 : réalisation des pieux de la culée rive gauche



Photos 4 : positionnement de l'entretoise sous pylône avant rotation et détail de la couronne de guidage

Au niveau de la pile, l'entretoise sous pylône repose d'un côté sur son appareil d'appui glissant définitif équipé d'une couronne de guidage métallique pour la phase de rotation et de l'autre sur la longrine de rotation par l'intermédiaire de patins de glissement en acier inox (photos 4). La longrine, qui sera démolie une fois la rotation effectuée, est encastrée dans la pile.

La construction de la partie inférieure fixe de la culée contre-poids en rive droite a nécessité d'important travaux de fouille et de terrassement pour atteindre le niveau du rocher. La stabilisation des parois latérales et arrière de la fouille a été réalisée au moyen d'une paroi berlinoise clouée (photo 5a). Le bétonnage a été

effectué en trois passes successives en prenant soin de garder des réservations pour les cheminées verticales tronconiques de solidarisation avec la partie supérieure (photo 5b).

La partie supérieure mobile de la culée rive droite a été construite sur cintre et sur lit de sable afin de faciliter sa mise en mouvement lors de la phase de rotation. L'alignement des tubes de réservation pour l'ancrage des haubans de retenue et le positionnement des réservations des parties supérieures des cheminées tronconiques de solidarisation, qui devront se superposer parfaitement avec celles de la partie inférieure, ont nécessité une attention toute particulière (photos 6).



a) fouille et terrassement (mars 2004)



b) ferrailage et réservations pour les cheminées de solidarisation (mai 2004)

Photos 5 : culée rive droite - partie inférieure fixe



a) coffrage et ferrailage (mai 2004)



b) décoffrage (sept. 2004)

Photos 6 : culée rive droite - partie supérieure mobile

La construction du tablier sur cintre parallèlement au Var

Le tablier a été réalisé sur cintre sur la rive droite du Var. Le cintre a servi au coffrage de la travée arrière et des deux nervures longitudinales précontraintes de la travée principale. Les entretoises en béton armé ont été préfabriquées sur site, de même que les prédalles coffrantes qui ont servi au coffrage de la partie supérieure du hourdis central (photos 7). Le bétonnage du tablier a été réalisé en 4 phases longitudinales, la première phase correspondant à la travée arrière et les trois suivantes au découpage par plots de la travée principale. La précontrainte longitudinale du tablier, constituée au total de 7 paires de câbles 19T15S, a été mise en œuvre en deux phases : 3 paires de câbles ont été mises en tension avant la rotation de l'ouvrage (à $f_{cj} \geq 46$ MPa) et 4 paires après rotation (à $f_{cj} \geq 55$ MPa). Les trois paires de câbles filants sur toute la longueur du pont ont été tendues depuis leurs deux extrémités (culées rives gauche et droite), tandis que les quatre paires s'arrêtant en travée principale ont été mises en tension depuis la culée rive gauche uniquement. La dissymétrie longitudinale introduite dans la géométrie du câblage de précontrainte est destinée à équilibrer le surplus de compression apporté par les haubans dans le tablier à proximité du pylône et dans la travée arrière, afin d'obtenir une contrainte d'effort normal uniforme dans l'ensemble du tablier.



a) vue générale du cintre et plaques d'ancrage de la précontrainte



b) entretoises et prédalles préfabriquées en sous-face du tablier

Photos 7 : construction du tablier sur cintre



a) échafaudage général



b) coffrage grimpant des levées de 4 m

Photos 8 : construction des mâts du pylône

La réalisation du pylône et des boîtes d'ancrage

Les deux mâts du pylône ont été réalisés à l'aide de coffrages grimpants par levées successives de 4 m, alternativement sur un mât puis l'autre (photos 8). Les régions situées en partie basse des mâts ainsi que les zones nodales de connexion avec l'entretoise sous pylône sont des zones de concentration très importante d'efforts sous sollicitations sismiques. En conséquence, ces zones ont fait l'objet d'un ferrailage particulièrement contraignant (photo 9), conformément aux dispositions constructives prescrites par les règlements parasismiques en vigueur [2].

Les boîtes d'ancrage métalliques pré-assemblées en usine, de 6 m par 3,60 m, sont encastrées dans le béton en tête de mâts au moyen de goujons (photos 10). Toutes les faces, à l'exception de celles en contact direct avec le béton, ont fait l'objet d'un traitement anti-corrosion par peinture époxy.



Photo 9 : cage d'armature d'une levée de pylône
(ratio d'acier : 137 kg/m³)



Photos 10 : boîtes d'ancrage métalliques des haubans



La mise en tension des haubans

Les haubans sont constitués de câbles à torons multi-couches (TMC) réalisés par l'entreprise sous-traitante Baudin-Chateauf. Ces câbles sont constitués de fils élémentaires galvanisés $\varnothing 5,3$ enroulés en hélice autour de trois fils d'âme $\varnothing 3,25$, selon plusieurs couches successives alternativement dans un sens puis dans l'autre (photos 11). La protection contre la corrosion est assurée d'une part par un remplissage à la cire pétrolière des interstices entre les câbles, et d'autre part par une gaine périphérique en polyéthylène haute densité de 6 mm d'épaisseur nominale extrudée autour du câble.

Les haubans de la travée principale, constitués de 168 fils périphériques enroulés sur 7 couches, présentent un diamètre de 93 mm pour une charge de rupture de 619 tonnes. Les haubans de retenue se composent quant à eux de 270 fils périphériques enroulés sur 9 couches et constituent par conséquent des unités légèrement plus grosses (diamètre de 114 mm et charge de rupture de 992 tonnes). Notons enfin que les haubans sont équipés de divers dispositifs spécifiques : tubes anti-vandalisme en partie inférieure et dispositifs absorbeurs de vibrations en élastomère au niveau des ancrages contre les effets du vent et des séismes.

Une première mise en tension des haubans s'est effectuée avant rotation depuis la sous-face des poutres longitudinales du tablier au moyen de vérins (photos 12). La mise en tension s'est effectuée de façon alternée entre les haubans de la travée principale et les haubans de retenue afin de réduire au maximum les efforts de flexion dans les mâts du pylône et jusqu'à obtenir un léger décollement entre le tablier et les cintres. Une paire de haubans provisoires a par ailleurs été tendue entre la tête de mâts et l'extrémité du tablier afin de suppléer la réaction d'appui de la culée rive gauche durant la phase de rotation.



Photos 11 : fabrication des haubans TMC



Photos 12 : mise en tension des haubans avant rotation depuis la sous-face du tablier

La rotation du pont

Le 13 novembre 2004 au matin s'est effectuée la rotation de l'ouvrage, en présence des principaux élus locaux et devant près de trois mille habitants des deux rives venus assister à la phase sans doute la plus spectaculaire de la construction du nouveau pont de Puget-Théniers (photos 13).

Toute la rotation a été réalisée sous couverture météo afin de s'assurer que la vitesse du vent ne dépassait pas 50 km/h durant cette phase particulièrement sensible du chantier.

Avant rotation, l'ouvrage a été préalablement lesté par des contrepoids en béton jusqu'à obtenir une réaction d'appui de 220 tonnes sur la béquille arrière de stabilisation (photo 14b) correspondant à un moment de déséquilibre arrière de 440 t.m. Des pesées d'une grande précision ont alors été réalisées afin de s'assurer que les descentes de charges étaient bien réparties sur les trois appuis : l'appui amont servant de pivot, l'appui aval équipé de patins néoprène/téflon glissant sur la longrine de rotation, et la béquille arrière de stabilisation excentrée de deux mètres par rapport à l'axe des appuis principaux.

La rotation a été réalisée au moyen d'un câble de traction filant le long de la longrine circulaire et d'un vérin d'une force de 120 tonnes (photo 14c). Le vérin ayant une course de 25 cm en continu, il a fallu faire 60 courses de vérins pour procéder à sa rotation complète. Quatre heures ont au total été nécessaires à cette mise en place. Au cours de la rotation, les descentes de charges maximales prévues en pied de pylône étaient de 2 228 tonnes au niveau de l'appui à pot servant de pivot et de 2 237 tonnes sur la selle de glissement.



Photos 13 : la rotation de l'ouvrage



a) vue générale



b) pesée de la réaction d'appui sous la béquille arrière de stabilisation



c) vérin et câble de traction

Photos 14 : dispositif de rotation

L'achèvement de l'ouvrage

Une fois l'ouvrage dans sa position finale, il restait à terminer la structure et à réaliser les superstructures. Les colonnes et la ceinture de solidarisation du massif contrepoids de la culée rive droite ont été ferraillées et bétonnées. En rive gauche, une butée parasismique en béton armé de dimensions en plan 1,75 m par 1,20 m et de 70 cm de hauteur a été ajoutée pour bloquer le débattement latéral du tablier sous séisme. Un grillage anti-intrusion a par ailleurs été disposé afin d'interdire l'accès à la chambre de tirage de la précontrainte tout en permettant un éclairage naturel suffisant (photos 15). Au niveau de la pile, la béquille arrière a été démontée, la longrine de rotation démolie et l'appui aval sous pylône a été placé sur son appareil d'appui à pot glissant définitif.

Enfin, la paire de haubans provisoires a été détendue et on a procédé au réglage définitif des haubans. Ce réglage définitif a été réalisé depuis la boîte d'ancrage métallique en tête de mâts (photos 16), à l'exception de la première paire en travée accessible depuis la rive à proximité de la pile et des haubans de retenue tendus depuis le bas.



Photos 15 : butée parasismique de blocage latéral en culée rive gauche et grillage anti-intrusion



Photos 16 : réglage définitif des haubans depuis les têtes de mâts

En ce qui concerne les superstructures et les équipements, on a procédé à la pose des garde-corps (photo 17a), à la réalisation de la chape d'étanchéité et des enrobés (photo 17b), et au dallage des trottoirs (photo 17c). Les pylônes ont par ailleurs été équipés de paratonnerres (photo 17d) et des spots d'éclairage des haubans ont été installés en tête de mâts et au niveau des plots d'ancrage dans le tablier afin de souligner la silhouette de l'ouvrage en perception nocturne (photos 17d, 17e et 17f).



a) garde-corps



b) chape d'étanchéité



c) dallage des trottoirs



d) paratonnerre et éclairage en tête de mâts



e) réservation pour spot d'éclairage dans les plots d'ancrage des haubans



f) spots d'éclairage des haubans de retenue

Photos 17 : pose des superstructures et équipements



Conclusion

Le chantier du nouveau pont sur le Var à Puget-Théniers, en plus d'être localisé sur un site particulièrement exposé (franchissement d'un fleuve à régime torrentiel, zone de moyenne sismicité), s'est caractérisé par la mise en œuvre d'un certain nombre de méthodes de construction innovantes ou peu classiques : choix de béton hautes performances, utilisation de haubans de type TMC, mise en place de l'ouvrage par rotation... La maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre ont été assurées par le Conseil Général des Alpes Maritimes. Pour le contrôle technique des études d'exécution (vérification des notes de calcul, des plans d'exécution et des documents méthodes), la direction des Infrastructures Routières du Conseil Général a été assistée par le Séttra, qui avait déjà réalisé les études de conception. Le contrôle d'exécution sur le chantier a été effectué en partenariat avec le Laboratoire Régional de Nice (CETE Méditerranée), notamment pour le contrôle de la qualité des bétons, pour le contrôle de la fabrication, des procédures d'essai et de la mise en œuvre des haubans, ainsi que pour celui de la réalisation et de la protection anti-corrosion des boîtes d'ancrage métalliques. Au final, le montant total de l'opération s'élève à un peu plus de 6 millions d'euros auxquels viennent s'ajouter 3 millions d'euros pour les aménagements paysagers connexes (aménagement du carrefour, rétablissement du passage à niveau du chemin de fer de Provence, création d'un espace de promenade sous le pont et aménagement de la rive droite du Var). Les visions lointaines ou à proximité directe de l'ouvrage, de même que son appropriation

immédiate par la population semblent correspondre parfaitement aux objectifs initiaux fixés par la maîtrise d'ouvrage et témoignent d'un partenariat de maîtrise d'œuvre réussi entre le Conseil Général des Alpes-Maritimes et les services centraux de l'Etat (Séttra et LRPC de Nice) ■

Références bibliographiques

[1] Le projet du nouveau pont sur le Var à Puget-Théniers – P. Vion – Bulletin « Ouvrages d'art » n°48, avril 2005 – Séttra/CTOA

[2] Ponts courants en zone sismique – Guide de conception Séttra – SNCF

Credit photos : Albert Laurens (DDE 06 Subdivision de Puget-Théniers), photo 1 - Philippe Julien (Séttra), figures 1, 2 et 4 - Razel/Cari, figures 3, 5 et 6, photo 13 - Denis Davi (Séttra) et Philippe Vion (Séttra), photos 2 à 18.

Photos 18 : quelques vues de l'ouvrage terminé...

