

LE NOUVEAU PONT DE TÉRÉNEZ (FINISTÈRE)

AUTEURS : STÉPHANE CALAS, DIRECTEUR DE CHANTIER, DODIN CAMPENON BERNARD - STEFAN BERNHARD, BUREAU D'ETUDES TECHNIQUES DODIN CAMPENON BERNARD - MICHEL MARCHETTI, FORMULE INFORMATIQUE - JULIEN MONNERIE, INGÉNIEUR GÉOMÈTRE GTM BRETAGNE - JEAN VASSORD, ARCADIS - CLAUDE REMY, ARCADIS - SYLVIE BOUVET, ARCADIS - DANIEL FOISSAC, BET VINCI CONSTRUCTION FRANCE.

CRÉDITS PHOTOS ET ILLUSTRATIONS POUR L'ENSEMBLE DE L'ARTICLE : PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES - PANORAMIC BRETAGNE © DR

SITUÉ SUR LA RD791 LE FAOU-CROZON, LE NOUVEAU PONT DE TÉRÉNEZ VIENT REMPLACER L'ANCIEN PONT SUSPENDU CONSTRUIT EN 1952 ET DONT L'ÉTAT S'EST PROGRESSIVEMENT DÉGRADÉ. LE NOUVEL OUVRAGE EST UN PONT À HAUBANS DE 515 M DE LONG, COURBE EN PLAN, À TABLIER ET PYLÔNES EN BÉTON PRÉCONTRAIT. LA CONSTRUCTION EN A ÉTÉ CONFIEE EN 2007 AU GROUPEMENT DODIN CAMPENON BERNARD (MANDATAIRE), GTM BRETAGNE ET SOGEA BRETAGNE, TOUTES TROIS FILIALES DU GROUPE VINCI.

RELIER LA PRESQU'ÎLE DE CROZON AU FINISTÈRE NORD

Le pont de Térénez actuellement en service est un pont suspendu d'une portée principale de 272 m qui permet le franchissement de l'Aulne par la RD791 reliant la presqu'île de Crozon au Finistère Nord (photo 2 et figure 3). L'état général de cet ouvrage construit en 1952 s'est progressivement dégradé au cours des ans, suite à des désordres liés à l'alcali-réaction du béton des pylônes et des travées d'accès. Des travaux de confortement ont été effectués en 1992 pour permettre la continuité du service en toute sécurité, mais il est très vite apparu qu'il ne pouvait s'agir là que d'une solution provisoire et que la construction d'un nouvel ouvrage devait être envisagée. La conception du nouveau pont de Térénez a été confiée par le Conseil général du Finistère à une équipe constituée d'un ingénieur, Michel Virlogeux, et d'un architecte, Charles Lavigne, qui a mis au point le projet en collaboration avec le Setra. Le parti architectural retenu est de réaliser, dans ce site maritime exceptionnel marqué par les méandres de l'Aulne, un ouvrage qui attire l'œil tout en restant en harmonie avec le paysage.

Par ailleurs, la construction d'un nouvel ouvrage devait être l'occasion de supprimer les dangereux virages à presque 90° situés aux abords du pont actuel. D'où l'idée d'un tablier courbe en plan, permettant une transition en douceur entre la route et l'ouvrage et assurant une circulation plus fluide des véhicules. Le choix d'un pont à haubans



s'est très vite imposé car, pour des raisons à la fois techniques et esthétiques, le recours à des piles en rivière apparaissait peu satisfaisant. Restait alors à définir la forme à donner aux pylônes pour reprendre efficacement les forces appliquées en tête, qui ne s'équilibrent pas transversalement du fait de l'orientation particulière des haubans due à la courbure du tablier. Après avoir

envisagé une forme en V renversé, les concepteurs ont finalement retenu une solution plus légère et plus pure en forme de lambda (λ) (photo 1). En 2007, le groupement d'entreprises constitué par Dodin Campenon Bernard (mandataire), GTM Bretagne et Sogea Bretagne, toutes trois filiales du groupe Vinci, a été déclaré adjudicataire du projet.

UN TABLIER EN ASSIETTE RENVERSÉE

L'ouvrage est un pont haubané, courbe en plan, à tablier et pylônes en béton précontraint. D'une longueur totale de 515 m, il comporte une travée centrale de 285 m et deux travées de rive de 115 m reposant sur des pilotis intermédiaires (figure 4). Son tracé en plan, symétrique par rapport au milieu de la travée centrale, suit un rayon de 800 m sur toute la longueur de celle-ci, et de 200 m dans les travées de rive, avec des raccordements en clothoïde. Le tablier, en forme d'assiette renversée, supporte une chaussée à deux voies de 7,50 m et deux trottoirs latéraux pour piétons et cycles, de 2,15 m de largeur chacun. Il est soutenu par deux nappes de 72 haubans latéraux disposés en éventail et ancrés dans le tablier entre la chaussée et les trottoirs, en sous-face des nervures longitudinales, dans des engravures.

D'une hauteur de 100 m, les deux pylônes sont contenus dans des plans verticaux normaux à l'axe de l'ouvrage. Du fait de leur forme en λ , le tablier, excentré, est en partie supporté par des consoles horizontales au niveau de la jonction entre les deux « jambes ». ▷

2- Vue d'ensemble du site.

3- Plan de localisation.

2- General view of the site.

3- Location drawing.

En tête du mât, les haubans sont ancrés dans une boîte métallique de 110 t connectée à des voiles latérales en béton armé. Les pilettes sont constituées chacune de deux fûts cylindriques en béton armé, de 2 m de diamètre. Chaque culée comporte un sommier supporté par deux poteaux, en forme de L, fondés sur des semelles indépendantes, et des murs Teratrel.

Les principales phases de réalisation sont les suivantes :

- Les zones à dalle pleine des travées de rive sont coulées sur cintre ;
- Les huit premières paires de voussoirs de part et d'autre de chaque pylône sont construites par encorbellement successif, à l'aide d'équipages mobiles pesant 100 t pour les voussoirs centraux et 110 t pour les voussoirs de rive ; les équipages mobiles sont soutenus par les haubans définitifs ; des haubans de retenue sont ancrés en tête des pylônes et sur les culées ;
- Les clavages dans les travées de rive sont réalisés par des voussoirs de clavage de 2,50 m ;
- Les dix voussoirs centraux suivants sont construits en surencorbellement ;
- Le clavage central est réalisé en dernier, par un voussoir de 3,10 m.

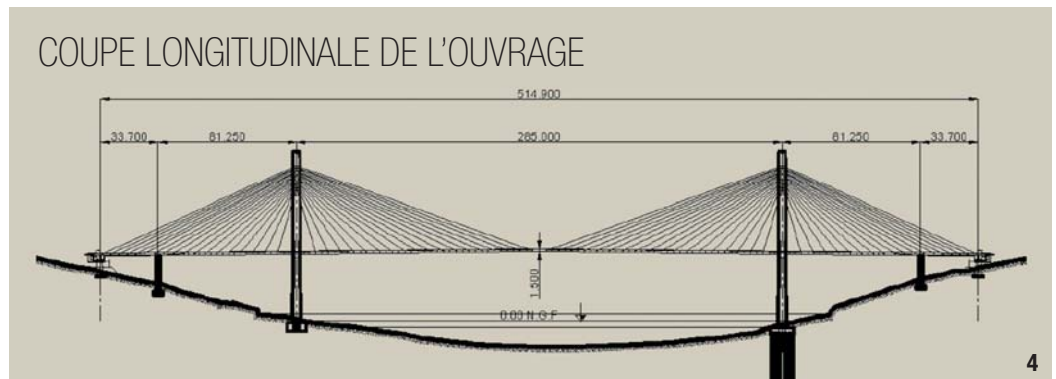
FONDATIONS, APPUIS, TABLIER

Le pylône Sud (P2) repose directement en tête des schistes compacts, sur deux semelles carrées de 11 m de côté et 5 m d'épaisseur. Le pylône Nord (P3) est fondé, par l'intermédiaire de deux semelles octogonales de 3 m d'épaisseur, sur deux groupes de dix pieux de 1,5 m de diamètre, ancrés dans des schistes décomposés.

Les pilettes Sud (P1) et Nord (P4) sont fondées sur des puits marocains de 3,50 m de diamètre. Les culées sont fondées superficiellement.

Le tablier est encastré sur les deux pylônes (figure 5). Il repose sur les pilettes et sur les culées par l'intermédiaire d'appareils d'appui à pot multidirectionnel. Un blocage transversal sur les culées permet de reprendre les efforts horizontaux dus à la courbure en plan de l'ouvrage.

Le tablier est à pente transversale unique, avec un dévers de 2,5 % en travée centrale, puis un dévers variable jusqu'à 5 % sur les culées. Par contre, les trottoirs gardent un dévers constant de 2,5 %. En travée centrale, en zone courante, le tablier est constitué de deux nervures longitudinales, de 1,5 m de hauteur, reliées entre elles en partie haute par une dalle de 22 cm d'épaisseur supportant la chaussée, et par des

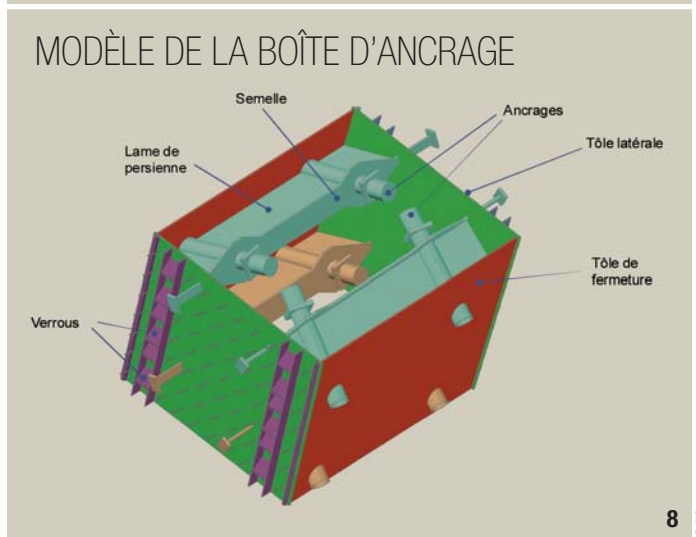
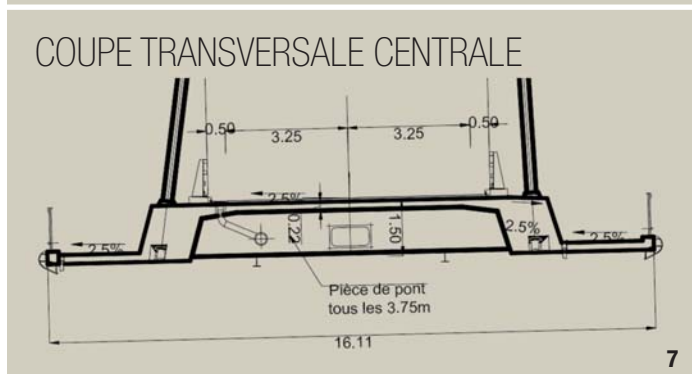
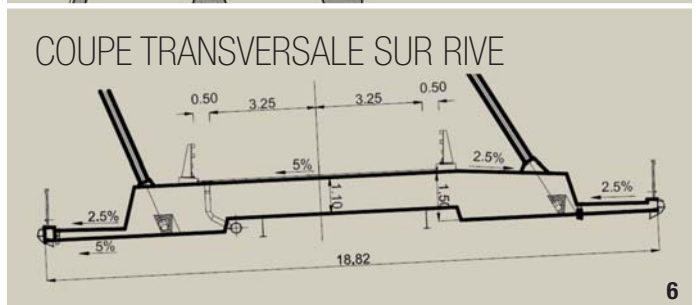
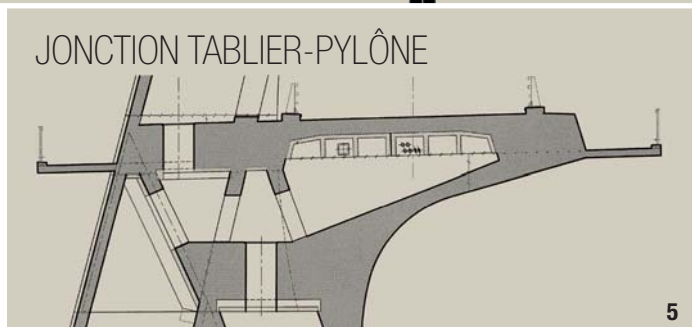


- 4- Coupe longitudinale de l'ouvrage.**
- 5- Jonction tablier-pylône.**
- 6- Coupe transversale sur rive.**
- 7- Coupe transversale centrale.**
- 8- Modèle de la boîte d'ancrage.**

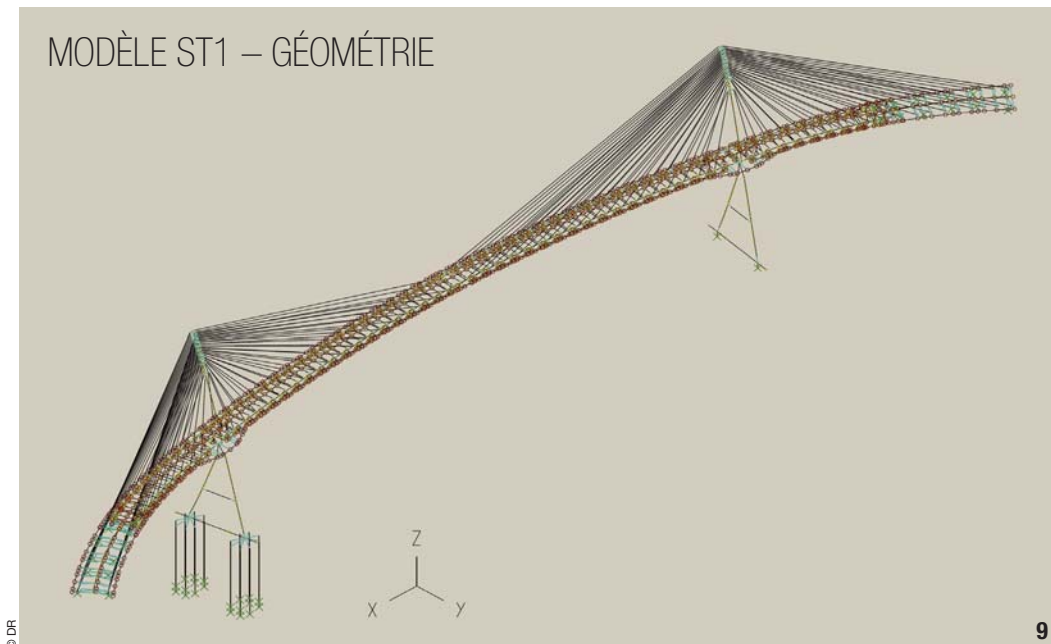
- 4- Longitudinal section of the structure.**
- 5- Deck-pylon junction.**
- 6- Cross section on bank.**
- 7- Central cross section.**
- 8- Model of the anchor box.**

pièces de pont métalliques. Il est complété, de part et d'autre des nervures, par des dalles en console de 22 cm d'épaisseur, ancrées en partie basse et supportant les trottoirs. Sa largeur totale est de 16,11 m. La longueur des voussoirs est de 7,50 m. La distance entre pièces de pont est de 3,75 m, et la distance entre haubans, de 7,50 m. Sur une longueur de 18,75 m de part et d'autre du pylône, la section du tablier varie afin de permettre le contournement du pylône par le trottoir intérieur, et afin de réaliser l'encastrement du tablier sur le pylône. Dans les travées de rive, du fait de la courbure et afin de respecter les conditions de gabarit vis-à-vis des haubans, la largeur du tablier varie progressivement pour atteindre 18,45 m sur les culées (figures 6 et 7).

Par ailleurs, les travées de rive étant plus courtes que la demi-travée centrale, l'espacement entre les haubans arrière se réduit progressivement, pour passer



MODÈLE ST1 – GÉOMÉTRIE



© Df

9

de 7,50 m près des pylônes à 4,70 m près des culées. La longueur des voussoirs arrière passe quant à elle de 7,50 m à 6,45 m alors que la largeur des nervures augmente progressivement pour respecter l'équilibre des poids. Enfin, pour limiter les soulèvements sur les pilettes et les culées, la section du tablier passe en dalle pleine sur une longueur de 46 m à partir de l'axe des culées. En outre, un contre-poids est prévu sur chaque culée.

9- Modèle ST1 – géométrie.

9- ST1 model – geometry.

PHASAGE DE CONSTRUCTION DANS LA MODÉLISATION ST1

- Réalisation du pylône Sud (P2) et de la travée de rive Sud coulée sur cintre.
- Réalisation du pylône Nord (P3) et de la travée de rive Nord coulée sur cintre.
- Réalisation du fléau sud constitué de 2 x 8 voussoirs à l'aide des équipages mobiles et de haubans de retenue provisoires accrochés au niveau de la culée C0.
- Clavage du fléau Sud à la travée sur cintre Sud.
- Réalisation en surencorbellement, à l'aide d'un équipage mobile, des 10 voussoirs centraux restants côté Sud avec mise en tension progressive des haubans arrière.
- Réalisation du fléau Nord constitué de 2 x 8 voussoirs à l'aide des équipages mobiles et de haubans de retenue provisoires accrochés au niveau de la culée C5.
- Clavage du fléau Nord à la travée sur cintre Nord.
- Réalisation en surencorbellement, à l'aide d'un équipage mobile, des 10 voussoirs centraux restants côté Nord avec mise en tension progressive des haubans arrière.
- Réalisation d'un vérinage horizontal à la clé puis réalisation du clavage central.
- Réalisation des superstructures et application des retentions finales dans les haubans.

PRÉCONTRAINTÉ DU TABLIER

La précontrainte longitudinale du tablier est constituée de câbles 19T15 intérieurs au béton. Au milieu de la travée centrale, elle est constituée de sept câbles par nervure, ancrés dans des bossages sur les faces latérales intérieures des nervures. Du fait de la courbure en plan, qui entraîne des moments d'axe vertical dans le tablier, la précontrainte au voisinage des pylônes et dans les travées sur cintre est dissymétrique. Elle comporte 12 câbles dans la nervure intérieure au niveau des pylônes, complétés pendant la phase de construction du fléau par deux câbles provisoires en nervure extérieure, et six câbles dans la nervure extérieure des travées de rive. Certaines zones intermédiaires ne comportent aucune précontrainte longitudinale. Les zones de type dalle pleine des travées de rive sont précontraintes par huit câbles ondulés, ancrés aux extrémités de la dalle. Enfin, la zone de transition entre la dalle pleine et le hourdis de 22 cm est précontrainte transversalement par quatre câbles 4T15S.

LEVÉES DES PYLÔNES

Les pylônes sont réalisés en vingt levées successives. La section transversale de la jambe, de la béquille et du mât est un caisson de dimensions variables, dont les parois ont une épaisseur de 50 cm. La nervure intérieure du tablier est directement encastrée sur le pylône, au nœud de jonction entre la jambe, la béquille et le mât. La nervure extérieure est encastrée sur une console horizontale construite au niveau du nœud dans

le plan du λ . Du fait de la courbure du pont, les pylônes ne sont pas seulement sollicités en compression, mais également en flexion et en torsion, ce qui a nécessité l'utilisation de câbles de précontrainte longitudinale, ainsi que la mise en place d'armatures passives de densité très élevée. Les efforts variant pendant la construction, cette précontrainte est constituée de trois paires de câbles 27T15S définitifs et de quatre paires de câbles 27T15S provisoires, qui sont détendus au fur et à mesure de la construction des voussoirs. Pour limiter les effets du déséquilibre pendant la construction des huit premières paires de voussoirs en encorbellement – les voussoirs centraux étant construits avant les voussoirs de rive –, des haubans de retenue sont utilisés. Ils sont ancrés en tête du mât et dans la partie de la travée de rive en dalle pleine déjà construite et provisoirement clouée sur la culée.

PRINCIPE DE HAUBANAGE

Le haubanage est constitué de 144 haubans, répartis en deux nappes latérales de 2 x 18 haubans pour chaque pylône. La longueur des haubans varie de 35 à 150 m. Ils comportent de 12 à 27 torons T15S, de classe 1 860 MPa. Les torons sont individuellement protégés et logés dans une gaine extérieure en PEHD. La mise en tension se fait en partie basse, au vérin mono-toron. Les ancrages hauts sont réglables. Les haubans sont équipés de tubes antivandalisme en partie basse, sur 3 m de hauteur. Des amortisseurs sont prévus sur les haubans centraux H9 à H18. Ils seront logés à l'intérieur de ces tubes.

BOÎTE D'ANCRAGE DES HAUBANS

Les 15 paires supérieures de haubans centraux et de rive sont ancrées en tête de chaque pylône par l'intermédiaire d'une boîte métallique connectée aux voiles latérales. Les trois paires de haubans inférieures sont directement ancrées dans deux dalles en béton armé situées au-dessous de cette boîte, la dalle la plus haute lui servant d'appui. La boîte métallique est de section rectangulaire variable en raison de l'inclinaison de la partie haute du mât par rapport à la verticale. Elle est constituée de deux tôles connectées aux voiles latérales en béton armé, dites tôles latérales, de deux tôles traversées par les haubans, dites tôles de fermeture, et de 15 paires de lames de persienne servant chacune d'appui à une paire de haubans (figure 8). ▷

Chaque lame de persienne est constituée de trois éléments coplanaires, soudés de part et d'autre des deux tubes servant d'appui aux plaques d'ancrage des haubans.

Les axes des haubans n'étant pas coplanaires, on a cherché à placer les éléments de la lame de persienne dans un plan moyen par rapport aux axes des tubes.

Chaque lame de persienne est munie d'une semelle supérieure soudée sur les tôles latérales. Elle est également soudée sur une des tôles de fermeture, qui constitue ainsi une semelle inférieure et permet un fonctionnement en poutre en I.

Les semelles supérieures sont prolon-

gées par des lanières métalliques traversant les tôles latérales et soudées sur des platines noyées dans le béton, permettant ainsi la transmission des efforts de traction dus à l'encastrement des lames de persienne sur les voiles latéraux.

Les efforts tranchants sont transmis aux voiles latéraux par l'intermédiaire de verrous métalliques soudés sur les tôles latérales et prenant appui sur le béton.

Le poids total de la boîte d'ancrage est de 110 t. Elle a été livrée sur le site en deux demi-boîtes, puis entièrement assemblée au sol avant mise en place en une seule fois en tête du mât par levage au moyen d'une grue.

MODÉLISATION D'ENSEMBLE

L'ouvrage a été modélisé sous le logiciel ST1 du Setra (figure 9). Le modèle retenu est un modèle spatial bipoutre, chaque poutre représentant un demi-tablier. Les deux poutres longitudinales sont reliées entre elles par des poutres transversales représentant les pièces de pont et le hourdis. Ce modèle a été préféré à un modèle à une seule poutre car il permet de représenter correctement le comportement transversal et d'obtenir directement les efforts et contraintes, avec les bonnes concomitances, dans chacune des nervures. Pour valider les caractéristiques mécaniques à affecter à chacune des deux poutres longitudinales du modèle et aux

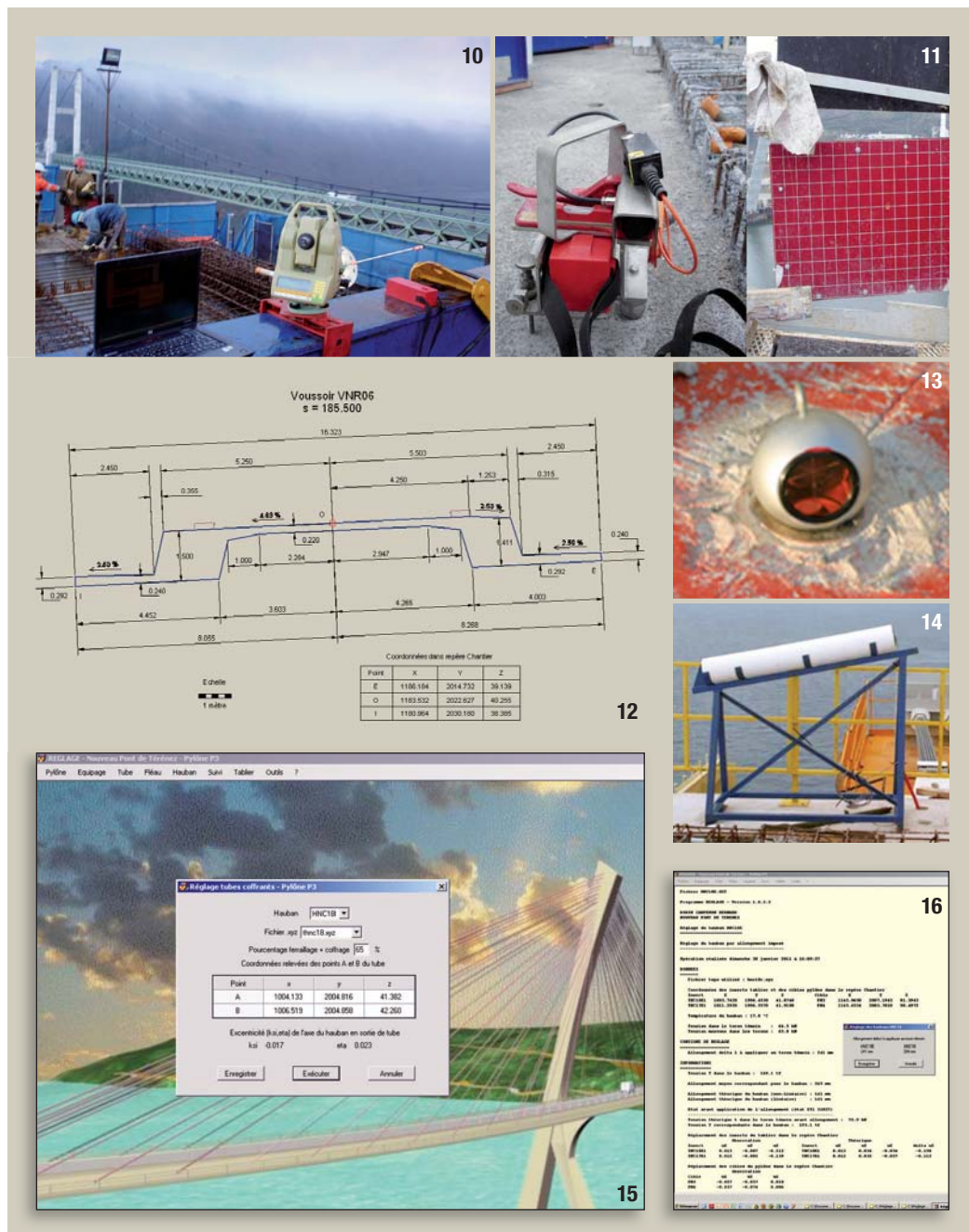
pièces de pont, un modèle partiel aux éléments finis avec le logiciel Hercules a été réalisé avec des éléments barres et des éléments coques.

Le modèle ST1 tient compte, de façon précise, de la cinématique de construction et des méthodes de chantier.

Chacun des cycles de construction des voussoirs a été modélisé en détail et tient compte, par exemple :

→ De toutes les imbrications existantes entre la construction du voussoir central et celle du voussoir de rive ;

→ Du fait que les équipages mobiles, une fois avancés pour la construction du voussoir N, sont chargés par les pièces de pont, les tubes coffrant et le ferrailage des nervures avant même



10- Procédé de réglage des tubes de haubans.
11- Système de réglage de l'équipage par laser.
12- Coupe de tablier générée par le logiciel « Réglage ».
13- Insert topo.
14- Maquette de hauban avec capteurs de température.
15- Copie d'écran du réglage des tubes.
16- Copie d'écran du réglage fin des haubans.

10- Procedure for adjusting stay-cable tubes.
11-Laser system for rig adjustment.
12- Deck cross section generated by the adjustment software («Réglage»).

© DR



17



18 19



l'installation et la première mise en tension des haubans N sur l'équipage ;
 → Du fait que la mise en tension des haubans se fait de façon progressive au fur et à mesure du bétonnage du voussoir N sur l'équipage ;
 → Du fait que la dernière mise en tension des haubans ne se fait pas sur l'équipage mais sur le voussoir N le lendemain du bétonnage de ce dernier après transfert de l'ancrage des haubans de l'équipage vers le tablier. Les phases particulières de clavage à la rive et de clavage central ont elles aussi été modélisées avec précision, en tenant compte des systèmes d'alignement utilisés sur le chantier.

FERRAILLAGE DU TABLIER

La définition du ferrailage du tablier a donné lieu à de nombreuses vérifications, consécutives à sa structure transversale et aux nombreuses phases de calculs de flexion longitudinale étudiées. Ces vérifications se sont organisées à

17- Vue d'ensemble des installations rive Nord.

18- Plate-forme P2 – terrassement du fond de fouille.

19- Installation rive Nord – batardeau pylône P3.

17- General view of North bank installations.

18- Platform P2 – earthworks at bottom of excavation.

19- North bank installation – pylon P3 cofferdam.

partir des études suivantes : études des pièces de pont, détermination du ferrailage longitudinal, étude de la flexion transversale, cisaillement et diffusion, analyse des sections singulières. Quelques précisions sont données ci-après pour les études les plus significatives.

ÉTUDES DES PIÈCES DE PONT

Les pièces de pont métalliques entre nervures sont connectées au hourdis et aux nervures latérales par des goujons régulièrement espacés, et leur fonctionnement est celui d'une section mixte. Pour la vérification de ces éléments, les efforts sont déterminés par les calculs de flexion d'ensemble (modèle ST1) et par les résultats des calculs de flexion transversale pour les efforts locaux (modèles Ansys). Une analyse détaillée et un processus de calcul ont donc été nécessaires pour associer les résultats de ces deux calculs sur la base d'efforts concomitants. Ainsi, pour chaque section

et cas d'étude, il a été utilisé des torseurs d'efforts calés sur une composante cible et ses concomitantes. Ces vérifications ont été menées vis-à-vis des états ELS-ELU pour toutes les phases enveloppes de construction et de service, et pour les cas de rupture et de changement de haubans.

Au final, pas moins de 700 analyses ont été nécessaires pour justifier toutes les pièces de pont du tablier.

Le point délicat était la transmission de l'effort normal véhiculé par la semelle inférieure de la pièce de pont, celle-ci pouvant être soit en traction, soit en compression. Cela a nécessité la mise en place de connecteurs horizontaux fixés sur une platine venant en prolongement de l'âme pour reprendre la traction, et de butées de compression pour limiter la contrainte sur le béton à 0.6 fc. La densité de ferrailage longitudinal, la proximité des câbles de précontrainte et des boîtes d'ancrage des haubans ont compliqué ces dispositions.

Toutes les sections ont été vérifiées en service et en construction en tenant compte des très nombreuses phases. La détermination du ferrailage longitudinal de base repose sur les deux vérifications suivantes : reprise des tractions en zones tendues et équilibre interne des sections. Tous ces calculs ont montré que ce sont les phases de construction qui sont dimensionnantes pour le ferrailage.

FLEXION TRANSVERSALE

Pour compléter les efforts généraux issus du modèle ST1, des modèles locaux aux éléments finis ont été réalisés à l'aide du logiciel Ansys. Ceux-ci ont permis de tenir compte précisément des différents chargements en construction (notamment les effets de l'équipage mobile et des différents matériels de construction) puis en service (avec les effets de rupture de hauban), et également d'étudier les points singuliers où la modélisation filaire atteint ses limites (zones à proximité des pylônes, jonction dalle pleine-dalle bi-nervurée, dalle coulée en place, appuis de rive).

Pour chaque modèle, hourdis et trottoirs sont modélisés par des éléments de plaques épaisses à quatre nœuds, nervures et pièces de pont par des éléments poutres.

Des liaisons rigides relient les éléments poutres aux éléments plaques avec les excentricités correspondantes. Les haubans ont été assimilés à des appuis simples après avoir vérifié par des calculs comparatifs que l'approche avec des appuis élastiques n'était pas plus pertinente.

Le ferrailage résultant de ces études représente, par voussoir, un taux d'armatures variant entre 200 et 220 kg/m³. La mise en place de cette densité d'acier dans les nervures s'est avérée très complexe du fait de la présence de nombreux inserts qui limitaient les possibilités de passage des barres, dont la plupart ne pouvaient être continues. Un ferrailage spécifique a dû être étudié pour chaque voussoir, ce qui a nécessité, pour sa définition complète, deux ou trois plans au format A0 par voussoir, hors nomenclature.

NŒUD DE LIAISON PYLÔNE-TABLIER

L'étude de la déviation des efforts apportés par le mât vers la jambe et la béquille à travers les différents éléments constituant le nœud de liaison est basée sur un modèle bielles-tirants. La méthode consiste à vérifier en chaque nœud l'état d'équilibre sous les compressions ou tractions amenées par les différents voiles, et à calculer le ferrailage nécessaire pour reprendre les efforts de traction.

On constate la nécessité d'un tirant au point de convergence du voile intérieur de la béquille et des voiles intérieurs de la jambe et du mât, reprenant un effort de traction de 15 000 kN, soit 600 cm² d'acier.

ÉTUDE DE LA BOÎTE D'ANCRAGE

Une première étude a été faite à l'aide d'un modèle spatial géométriquement simplifié en éléments de coques, à l'aide du programme Hercule, pour évaluer le degré d'encastrement des lames de persienne sur les voiles latéraux. Chaque lame de persienne a ensuite été justifiée manuellement en fonction de ses dimensions propres et des efforts spécifiques apportés par les haubans ancrés. Les pièces servant directement à ancrer les haubans ont été dimensionnées pour reprendre 90 % de l'effort à la rupture des haubans ; il s'agit essentiellement des plaques d'ancrage et des tubes qui les supportent. Ces éléments ont par ailleurs fait l'objet d'un calcul spécifique aux éléments finis à l'aide du logiciel Ansys, qui a permis de vérifier qu'il n'était pas nécessaire d'ajouter des ailettes entre le tube et la plaque d'ancrage. Les lames de persienne et leurs semelles ont été justifiées en considérant que l'un des haubans atteignait 90 % de l'effort à la rupture, le second hauban étant sollicité à 65 % de l'effort à la rupture.

ESSAIS ET CALCULS AU VENT

Comme la plupart des ouvrages haubanés, le pont de Térénez a nécessité l'exécution d'essais et de calculs au vent approfondis. Ces études ont été articulées en trois étapes :

→ Définition de modèles de vent pour les études en phase de construction et de service ;

→ Réalisation d'essais sur maquette pour la vérification de la stabilité aéro-élastique du tablier et la mesure de ses coefficients stationnaires en fonction de l'angle d'incidence du vent ;

→ Calculs de l'ouvrage en vent turbulent, en construction et en service, au moyen du logiciel Hercule et de son module dédié HVT.

Les deux premières phases ont été réalisées par le CSTB de Nantes. En ce qui concerne la caractérisation du vent, on peut retenir les points essentiels suivants, découlant de la topographie du site :

→ La vallée de l'Aulne canalise le vent et détermine deux directions de vent sensiblement perpendiculaires à la travée principale (vent amont et vent aval) ;

→ Du fait de l'encaissement du site, on constate une réduction de la vitesse du vent de l'ordre de 25 % par rapport à la vitesse standard en Bretagne ;



20



21

20- Cage d'armature préfabriquée de la levée 20.1 située sous la boîte d'ancrage.

21- Pose de la boîte d'ancrage.

20- Prefabricated reinforcement cage of concrete lift 20.1 located under the anchor box.

21- Installing the anchor box.

→ Malgré la présence d'une étendue plane et sans rugosité (la rivière), on note une turbulence du vent importante et comparable à celle obtenue en une zone urbaine (site de classe IV selon l'Eurocode).

De leur côté, les essais de stabilité aéro-élastique de l'ouvrage montrent une excitabilité aux échappements tourbillonnaires qui se manifeste en phase de construction. Bien que la turbulence du vent atténuée largement cet effet, il a été décidé de disposer les corniches définitives sur le tiers extrême du premier fléau construit en attente de clavage avec le second fléau. Sans être



© DF 22

systématiquement déterminantes, les combinaisons avec vent ont conduit aux sollicitations principales pour diverses parties de la structure, soit en phase de construction, soit en phase de service. Ce résultat justifiait une analyse soignée de l'effet vent, en particulier au moyen de l'analyse au vent turbulent.

RÉGLAGE DE L'OUVRAGE EN COURS DE CONSTRUCTION

La maîtrise des opérations de réglage de l'ouvrage constitue un élément clé dans un projet de pont à haubans. Dans le cas du nouveau pont de Térénez, ce point est encore plus critique compte

22- Travée sur cintre.

22- Span on centre.

tenu des sujétions liées aux caractéristiques particulières de l'ouvrage :

- Tablier courbe en plan présentant une section et un dévers variables ;
- Faible épaisseur du tablier nécessitant la mise en tension progressive des haubans ancrés sur un nouveau voussoir lors du bétonnage de ce dernier.

Le réglage en cours de construction d'un pont à haubans consiste à appliquer, au fur et à mesure de la réalisation du tablier, des actions permettant d'obtenir in fine un ouvrage conforme aux choix retenus par le bureau d'études lors des études d'exécution. Les opérations correspondantes portent sur deux

sujets distincts qu'il convient de traiter séparément : la géométrie du tablier et la mise en tension des haubans.

RÉGLAGE GÉOMÉTRIQUE DU TABLIER

Contrairement à la pratique courante retenue pour la construction d'un pont en encorbellement, le tablier d'un pont à haubans ne peut être construit en positionnant l'équipage mobile à une cote théorique calculée. En effet, l'expérience montre que l'extrémité du fléau peut subir en quelques heures une flèche de l'ordre d'une dizaine de centimètres sous la seule action du soleil. D'où la nécessité de recourir à un réglage de l'équipage mobile en relatif par rapport à la partie de tablier déjà construite. Se pose alors un problème de précision bien connu dans la réalisation de voussoirs préfabriqués. Compte tenu des bras de levier mis en jeu, une erreur millimétrique sur la position des premiers voussoirs peut conduire à des erreurs centimétriques à la clé de l'ouvrage. La solution consiste alors à gérer avec une extrême précision (de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre) les inévitables erreurs d'exécution qui sont, elles, de l'ordre de 15 à 20 mm.

RÉGLAGE DES HAUBANS

Pour être précis, le réglage d'un hauban au moment de son installation nécessite un certain nombre de précautions. On ne peut, en effet, se contenter d'appliquer la force théorique à l'ancrage donnée par le modèle de calcul, car :

- Les charges réelles sur chantier ont rarement exactement la valeur adoptée par l'étude d'exécution ;
- Cette façon de faire ignore la température réelle des haubans (qui en été peut être très différente de celle du béton) ;
- Enfin, cette approche ne peut être directement mise en œuvre lorsque l'on tend les torons du hauban un par un à l'aide d'un vérin mono-toron.

On préfère recourir à une solution à la fois plus robuste et plus précise qui permet le réglage d'un hauban quelles que soient les conditions sur site et qui exprime la consigne de réglage sous la forme d'un allongement Δl à imposer au hauban, celui-ci étant déterminé à partir d'un relevé topographique et d'une mesure de tension.

SUIVI DE L'OUVRAGE EN COURS DE CONSTRUCTION

Dans le cadre d'une structure peu conventionnelle comme le nouveau pont de Térénez, il est important de ▷

s'assurer que l'ouvrage en cours de construction se comporte effectivement comme prévu par le modèle de calcul, afin de détecter rapidement, le cas échéant, toute divergence, et d'en analyser les causes. Dans la pratique, on procède à un relevé général du tablier dans un état précis pour lequel on dispose des résultats du modèle de calcul. La vérification consiste alors à comparer les valeurs des déplacements des inserts déduites des mesures topographiques avec les valeurs théoriques correspondantes.

Les opérations de réglage sont intimement liées aux tâches de construction du tablier. Elles doivent donc pouvoir être réalisées de façon à perturber le moins possible le rythme du chantier tout en garantissant le niveau de précision que requiert un ouvrage aussi technique. Paradoxalement, les difficultés à résoudre sont du même ordre que celles rencontrées sur des structures de beaucoup plus grandes dimensions, comme le pont Vasco-de-Gama à Lisbonne ou le pont de Rion-Antirion en Grèce. D'où la nécessité de mettre en œuvre des moyens à la hauteur en termes d'organisation, de préparation et d'outils informatiques, même si l'ouvrage reste un pont de taille moyenne. Le groupement d'entreprises s'est adjoint les services de Michel Marchetti, de la société Formule informatique, qui possède sur le sujet un savoir-faire spécifique déjà mis en œuvre sur des projets comme le pont de l'Iroise, le second pont sur la Severn, le pont Vasco-de-Gama ou le pont de Rion-Antirion.

Un des points délicats du projet concerne l'intégration des déformations de l'équipage mobile lors de la réalisation d'un voussoir, compte tenu des efforts verticaux et horizontaux variables appliqués par les haubans en cours de bétonnage. Le bureau de méthodes de Campenon Bernard Dodin ingénierie a effectué l'analyse correspondante en modélisant l'équipage par une structure treillis tridimensionnelle. La mise au point des procédures de réglage passe par un travail de préparation impliquant des intervenants de profils divers (équipe travaux, bureaux d'études structures et méthodes, ingénieur topographe, conseil extérieur...).

Il concerne des sujets aussi variés que :
→ La définition précise des méthodes de réglage retenues ;
→ L'imbrication des opérations dans le cycle de construction d'un voussoir ;
→ La collecte des données nécessaires (ex. : définition de la géométrie du ta-

blier, découpage en voussoirs, caractéristiques des haubans, déformation de l'équipage mobile...);

→ L'examen de points pratiques qui peuvent se révéler critiques compte tenu du peu d'espace libre en extrémité de fléau (implantation des repères topographiques, position des instruments lors des relevés...).

Comme nous l'avons déjà mentionné, les opérations de réglage s'appuient sur des mesures effectuées sur chantier : relevés topographiques, mesures de tension et de température. Les données correspondantes doivent pouvoir être traitées de façon rapide et fiable.

La société Formule informatique a développé à cet effet un programme spécifique baptisé Réglage qui est utilisé par l'équipe topo du chantier.

OPÉRATIONS DE RÉGLAGE

Les opérations de réglage se succèdent au rythme des tâches du cycle de construction d'un voussoir :

→ Réglage de la position de l'équipage mobile en fin d'avancement ;

→ Implantation des pièces de pont et réglage des coffrages ;

→ Réglage des tubes coffrant des haubans ;

→ Réglage de la tension du toron témoin au moment de l'enfilage ;

→ Retension des haubans par paliers en cours de bétonnage ;

→ Évaluation des erreurs d'exécution du voussoir ;

→ Réglage précis des haubans du voussoir (photos 10, 11, 13 et 14, figures 12, 15 et 16).

À chaque opération correspond un module spécifique du programme Réglage.

Prenons l'exemple du réglage précis des haubans : le réglage objectif à appliquer à un hauban est parfaitement défini par les résultats du modèle de calcul relatifs à l'un des états postérieurs à l'opération d'installation. Un relevé topographique des cibles encadrant les ancrages sur tablier et sur pylône permet d'évaluer, par un calcul approprié, le déplacement des ancrages. Connaissant la tension T du hauban, les déplacements \vec{u}_T et \vec{u}_P des ancrages et la température θ du hauban, il est possible de déterminer l'allongement Δl à appliquer au hauban pour lui imposer le réglage objectif. Dans la pratique, on évalue la température du hauban en utilisant une maquette munie de sondes qui reproduit l'état thermique des haubans en place. Le module « hauban » du programme Réglage permet non



23

© DR

seulement de déterminer la consigne d'allongement Δl , mais également de vérifier a posteriori que le réglage appliqué est correct.

Un utilitaire spécifique a été développé dans le cadre du programme Réglage pour obtenir automatiquement, sous forme d'une feuille Excel avec graphique, les écarts entre observations et prévisions théoriques. Ce suivi a permis, entre autres, de recalibrer en cours de construction du tablier certains paramètres du modèle tels que la raideur des fondations ou le poids réel des voussoirs.

CONTRAINTES DU SITE

L'ouvrage est situé au cœur du Parc naturel régional d'Armorique. De nombreuses réglementations nationales et européennes (zones ZNIEFF, Natura 2000, loi littoral, site classé) ont induit de nombreuses contraintes d'organisation et de planification pour le chantier. Les zones déboisées et terrassées ont été réduites au maximum. Ainsi, les zones d'installations se trouvent très proches, voire sur les zones de marnage, soit au moyen d'une digue en terre, soit au moyen d'estacades fondées sur pieux battus. Les portées des grues à tour sont limitées à 50 m pour celle du pylône P2 (du fait de la proximité du pylône de l'ancien pont), et à 55 m pour le pylône P3, pour les mêmes raisons que pour P2. La portée de la grue de P3 a pu être étendue à 70 m dès que le télescopage inter-

médiaire a permis de hisser la grue au-dessus du pylône de l'ancien pont (photo 17). L'étréoussse de la zone d'installation autour du pylône P3 comparée à la masse de matériel nécessaire au chantier a nécessité d'organiser l'espace d'une manière assez fine.

La mise en place de plusieurs zones de stockage en dehors de l'emprise du chantier est devenue indispensable. Cela nous a obligé à organiser des manutentions et des transports, souvent en convois exceptionnels.

RÉALISATION DES FONDATIONS

Les semelles du pylône P2 étant assises sous le niveau de l'eau, nous avons réalisé une digue étanche constituée de 7 000 m³ de remblai sur laquelle un rideau de palplanches a été battu. Cela a permis de terrasser sous le niveau de l'eau de la rivière. Les semelles ont été réalisées en trois phases, pour éviter une élévation excessive de la température du béton et limiter les volumes des bétonnages à 250 m³ (photo 18).

Quant au pylône P3 (fondations profondes), le marché proposait des barrettes et une digue en terre analogue à celle de P2. Le groupement d'entreprises a proposé une variante consistant à remplacer la digue par un batardeau accessible par une estacade et les barrettes par des pieux tubés forés d'une profondeur de 37 m. La réalisation des pieux a été fortement perturbée par la présence de failles et de blocs



rocheux situés dans la vase, imposant à l'équipe de Botte fondations un recours fréquent au trépan (photo 19).

CONSTRUCTION DES PYLÔNES

Les différentes levées ont été réalisées à l'aide de coffrage auto-grimpant Peri. Les ancrages des nombreux câbles de précontrainte des pylônes étant situés

23- Équipage mobile.

24- Tête de pylône – détail.

23- Mobile rig.

24- Pylon head – détail.

dans des bossages qui réduisent les dimensions du noyau intérieur, le coffrage intérieur a dû être adapté au gré des variations de section.

Les cages d'armature ont été préfabriquées en U (soit deux U par levée), puis assemblées sur le coffrage à l'aide de barres en éclipse.

réalisée à l'aide d'éléments préfabriqués, après la fin de l'installation des haubans afin de ménager une trémie d'accès suffisante pour l'approvisionnement du matériel (photo 24).

RÉALISATION DU TABLIER

Les parties de tablier situées entre les culées et les pilettes ont été réalisées en cinq plots, sur un cintre. Cette partie n'est décintrée qu'après l'installation des haubans (photo 22). Les variations géométriques du tablier sur la longueur des voussoirs V01 ont nécessité l'utilisation d'un coffrage bois posé sur l'équipage mobile. Les voussoirs de la travée centrale, inscrite sur un rayon constant de 800 m, sont tous similaires, tandis que ceux de rive s'inscrivent dans une géométrie comprenant une clothoïde suivie d'un rayon de courbure de 200 m, le tout en dévers variable, avec une largeur variable et un espacement des entretoises variable. Ainsi, l'équipage mobile côté rive est infiniment plus complexe que celui de la travée centrale.

POSE DES BOÎTES D'ANCRAGE

La pose des boîtes d'ancrage des haubans a nécessité une préparation rigoureuse afin de résoudre les problématiques liées à la déformabilité des boîtes, à l'exiguïté des plates-formes de travail et aux strictes tolérances d'implantation : 1 mm en altimétrie, 2 mm en plan et 0,5° sur l'orientation des tubes de haubans.

Pour atteindre ces tolérances, il a été réalisé un châssis support mécanosoudé puis usiné et équipé de pions de centrage, destiné à recevoir la boîte d'ancrage. Ce support a ensuite été positionné, réglé au millimètre et scellé sur le pylône, ce qui a permis de garantir la bonne implantation de la boîte (photos 20 et 21).

Les opérations de pose des boîtes ont été réalisées à l'aide d'une grue DEMAG CC2800 (flèche treillis 600 t sur chenille à volée variable) de chez Médiaco Maxilift.

Le sommet de la tête de pylône n'est pas structurel mais esthétique et fonctionnel, car il permet d'accéder aux équipements situés au sommet de chaque pylône. La tête de pylône a été

ÉQUIPAGES MOBILES

La particularité des équipages mobiles du pont de Térénez provient du fait que les haubans définitifs sont temporairement fixés sur l'équipage afin de participer à la reprise des charges lors du bétonnage.

Ils ont une masse de 100 t pour la travée centrale et de 110 t pour celle de rive (photos 1 et 23).



© DR

24



25- Charpente HEB 1000 pour le maintien de la zone de clavage.

25- HEB 1000 frame for retaining the keying area.

Les contraintes de résistance minimales sont les suivantes : 15 MPa pour le décoffrage du coffrage tunnel, 25 MPa pour le transfert de l'effort des haubans sur le voussoir, et 33 MPa pour la translation de l'équipage. Pour un cycle optimal, les 15 MPa doivent être obtenus en début de poste le lendemain du bétonnage, et les 33 MPa en milieu d'après-midi.

ARMATURES

Les nervures sont préfabriquées et équipées du tube coffrant du hauban ainsi que des gaines et ancrages de précontrainte. Le hourdis central et les trottoirs sont assemblés en place.

La pose complète des armatures dure entre trois et six heures selon la complexité du voussoir et la phase en cours, dont moins d'une heure pour poser chaque nervure. Cycle type :

- Préparation du fond de moule (nettoyage, réglage, huilage) et du coffrage tunnel, pose des pièces de pont, brèlage de l'équipage sur le voussoir ;
- Ferrailage des nervures et du hourdis central ;
- Pose et enfilage des haubans ;

- Ferrailage des trottoirs ;
- Coffrage des nervures des trottoirs, mise en place des inserts dans le béton ;
- Vérification structurelle de l'équipage, réception ;
- Bétonnage et mise en tension des haubans ;
- Décoffrage ;
- Tension d'affinage ;
- Descente et avancée de l'équipage. Durée du cycle : six jours sur les premiers voussoirs et trois jours en production maximale.

CLAVAGE EN TRAVÉE CENTRALE

Pour claver, il faut dans un premier temps aligner les fléaux puis les brider pour éviter tout mouvement différentiel en cours de durcissement du béton de clavage. Pour ce faire, une charpente constituée de poutres HEB1000 fixée sur chaque fléau assure l'alignement. Par ailleurs, des butons reliant les deux extrémités des fléaux sont mis en compression à l'aide de vérins plats. L'effort normal est de 140 t par buton, ce qui induit un écartement de 4 cm qui permettra de compenser partiellement le fluage ultérieur du béton (photo 25). □

PRINCIPALES QUANTITÉS

BÉTON : 13 000 m³ dont :

- Fondations (semelle et pieux), 4 000 m³
- Pylônes et pilettes, 3 200 m³
- Tablier, 5 200 m³

ARMATURES PASSIVES : 1 900 t

RATIO D'ACIERS PASSIFS :

- Tablier/équipage mobile, 211 kg/m³ (max : 226 kg/m³)
- Tablier sur cintre, 101 kg/m³
- Pylônes (hors fondations), 219 kg/m³ (max : 320 kg/m³)

ACIERS POUR OUVRAGES PROVISOIRES : 2 000 t

CHARPENTES MÉTALLIQUES : Pièces de pont, 226 t ; boîtes d'ancrages, 110 t chacune soit 220 t

PYLÔNES : Hauteur totale depuis le dessus des semelles : 99,180 m ; hauteur d'une levée, 4 m

PRÉCONTRAINTES :

- Pylônes, 47 t en 27T15S (dont 26 t en provisoire), 28 câbles en 27T15S
- Tablier, 88 t en 19T15 (dont 2 t en provisoire), 74 câbles dont 8 provisoires

HAUBANS : 144 haubans dont 40 équipés d'amortisseurs ; 300 t de torons (12 à 27 torons par hauban)

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Conseil général du Finistère

ASSISTANT MAÎTRE D'OUVRAGE : Michel Virlogeux

ARCHITECTE : Architecture et ouvrage d'art (Lavigne & Cheron architectes)

MAÎTRE D'ŒUVRE : Conseil général du Finistère

ENTREPRISES EN GROUPEMENT SOLIDAIRE : Dodin Campenon Bernard (mandataire), GTM Bretagne, CMA (ex-Sogea Bretagne BTP), Freyssinet

ÉTUDES D'EXÉCUTION : Groupement Arcadis Lyon, Vinci Construction France (BET de Marseille)

LOGICIEL DE RÉGLAGE EN COURS DE CONSTRUCTION : Formule Informatique

ÉTUDES MÉTHODES : Campenon Bernard Dodin ingénierie, Vinci construction grands projets (pose des boîtes d'ancrage)

ABSTRACT

THE NEW TÉRÉNEZ BRIDGE (FINISTÈRE REGION)

DODIN CAMPENON BERNARD: STÉPHANE CALAS, STEFAN BERNHARD - MICHEL MARCHETTI - JULIEN MONNERIE, GTM BRETAGNE - ARCADIS: JEAN VASSORD, CLAUDE REMY, SYLVIE BOUVET - DANIEL FOISSAC, BET VINCI CONSTRUCTION

The new Térénez Bridge, situated on county road RD791 between Le Faou and Crozon, replaces the old suspension bridge built in 1952, which had gradually deteriorated. The new structure is a cable-stayed bridge 515 metres long, in a plane curve, with a prestressed concrete deck and pylons. The construction contract was awarded in 2007 to the consortium formed by Dodin Campenon Bernard (leader), GTM Bretagne and Sogea Bretagne, all three subsidiaries of Vinci Group. □

EL NUEVO PUENTE DE TÉRÉNEZ (FINISTERRE)

DODIN CAMPENON BERNARD: STÉPHANE CALAS, STEFAN BERNHARD - MICHEL MARCHETTI - JULIEN MONNERIE, GTM BRETAGNE - ARCADIS: JEAN VASSORD, CLAUDE REMY, SYLVIE BOUVET - DANIEL FOISSAC, BET VINCI CONSTRUCTION

Situado en la RD791 Le Faou-Crozon, el nuevo puente de Térénez sustituye el antiguo puente colgante construido en 1952, cuyo estado se había degradado progresivamente. La nueva estructura es un puente atirantado de 515 m de largo, curva en planta, con tablero y torres de hormigón pretensado. La construcción se confió en 2007 a la agrupación Dodin Campenon Bernard (mandatario), GTM Bretagne y Sogea Bretagne, todas ellas filiales del grupo Vinci. □