

Le nouveau pont de Térénez : la topographie au service d'un défi technique

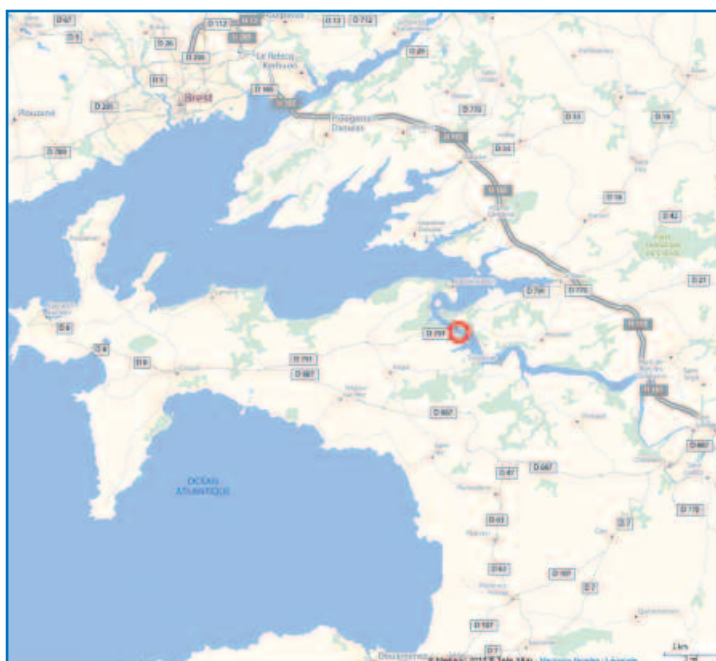
■ Julien MONNERIE - Michel MARCHETTI



Le nouveau pont de Térénez, inauguré en avril 2011, permet le franchissement de l'Aulne par la RD 791 reliant la presqu'île de Crozon au Nord-Finistère. Il remplace un pont suspendu construit en 1952, dont l'état s'était progressivement dégradé au fil des ans suite à des désordres liés à l'alcali-réaction du béton des pylônes et des travées d'accès. 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 alors 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.

■ MOTS-CLÉS

Pont à haubans,
réglage
géométrique,
équipement mobile



Par ailleurs, la construction d'un nouvel ouvrage devait être l'occasion de supprimer les dangereux virages à presque 90° situés aux abords de l'ancien pont. D'où l'idée d'un tablier courbe en plan permettant une transition en douceur entre la route et l'ouvrage et assurant par-là même 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 λ .

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.

Présentation générale de l'ouvrage

■ Géométrie

L'ouvrage, d'une longueur totale de 515 m, est un pont à haubans courbe symétrique comportant une travée centrale de 285 m et deux travées de rive de 115 m reposant sur des pilettes.

Le tracé en plan est constitué par trois arcs de cercle présentant respectivement un rayon de 800 m sur la travée centrale et de 200 m au voisinage des abouts, le raccordement étant réalisé à l'aide de clothoïdes localisées sur les travées de rive.

■ Tablier

Le tablier en béton précontraint, de section en forme d'assiette renversée, supporte une chaussée à deux voies de 7,50 m et deux trottoirs de 2,15 m de largeur situés sur les dalles latérales en console. Il est soutenu par deux nappes latérales de 72 haubans chacune.

Les variations de rayon du tracé en plan imposent au tablier un dévers variable passant de 2,5 % en travée centrale à 5,0 % aux abords des culées, les trottoirs conservant eux une pente constante de 2,5 % pour assurer l'évacuation des eaux pluviales.

Le tablier, d'une hauteur constante de 1,50 m et de largeur courante de 16,11 m, est constitué par deux nervures longitudinales de largeur variable, reliées entre elles en partie supérieure par un hourdis de 22 cm

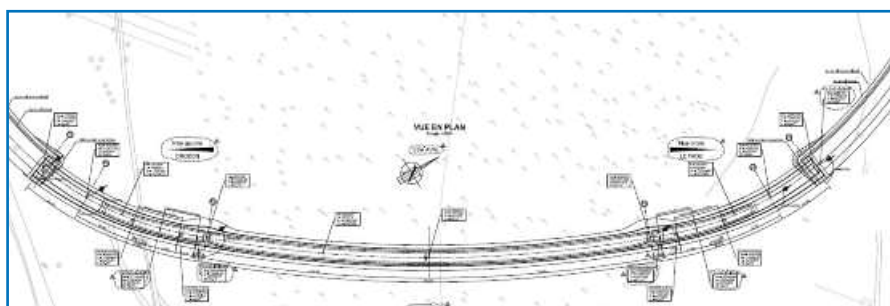
d'épaisseur et prolongées à leur base par les consoles des trottoirs.

La rigidité transversale du tablier est assurée en partie courante par des pièces de pont métalliques espacées de 3,75 m. La section du tablier est surépaissie entre les pilettes et les culées de façon à pouvoir équilibrer la composante verticale des tensions des haubans de rive.

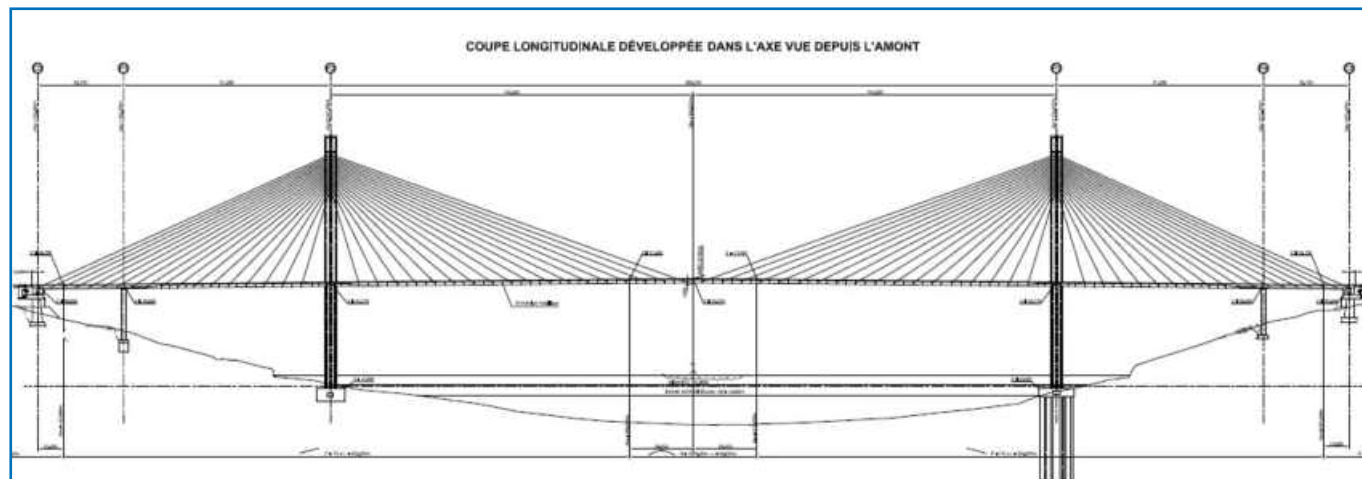
■ Pylônes

Les pylônes d'une hauteur de 100 m présentent la forme originale en λ déjà mentionnée qui a permis de résoudre de façon élégante les problèmes liés à l'excentricité des efforts due à la courbure de l'ouvrage.

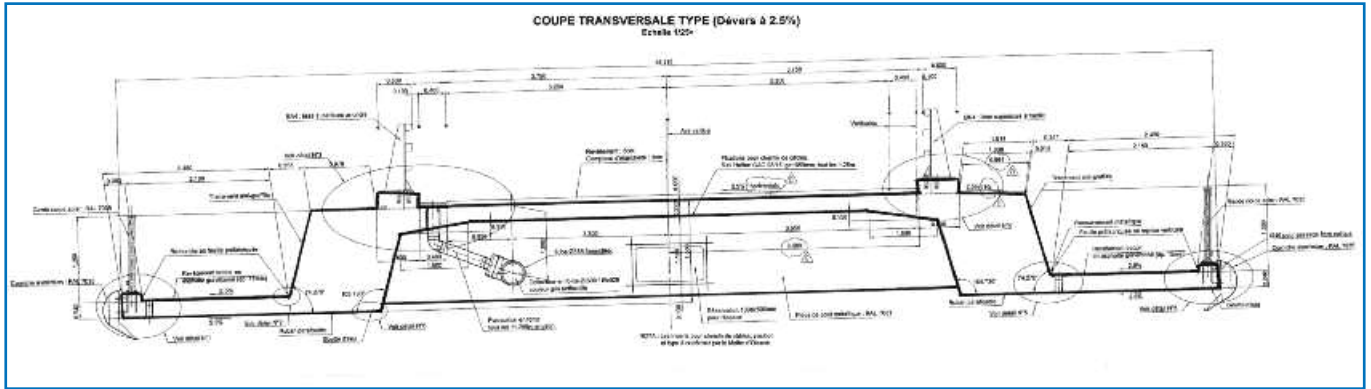
Les pylônes, en béton sur leur partie courante, sont couronnés en tête par une boîte d'ancrage métallique, sur laquelle viennent se fixer la quasi-totalité des haubans. Le choix de cette solution est dicté à la fois par des considérations de fonctionnement structurel et de réalisation. Cette pièce métal permet en effet d'assurer de manière simple l'équilibre entre les composantes horizontales des forces des haubans de la travée cen-



Vue en plan



Coupe longitudinale



Coupe transversale en travée centrale

trale et celles de la travée de rive adjacente. Elle facilite en outre le réglage de l'orientation des plaques et des tubes d'ancrage, puisque ceux-ci sont positionnés en usine au moment de la préfabrication des éléments de la boîte.

Compte tenu des efforts importants de flexion auxquels ils sont soumis en service comme en construction, les pylônes ont dû être renforcés par des câbles de précontrainte.

Le tablier est encasturé sur les pylônes par l'intermédiaire de consoles déportées en béton situées au niveau du nœud de λ .

■ Haubanage

Le tablier est porté par deux nappes latérales de haubans, comprenant chacune 2 x 18 haubans par pylône, soit un total de 144 haubans pour l'ensemble de l'ouvrage.

Les haubans sont constitués de torons T15 gainés graissés, logés dans une

gaine en PEHD et ancrés individuellement sur les plaques d'ancrage, ce qui permet de les hisser et de les tendre un par un au moment de l'installation d'un hauban.

Les longueurs des haubans varient de 35 à 150 m, le nombre de torons par hauban passant alors progressivement de 12 à 27 au fur et à mesure que l'on s'écarte des pylônes.

Opérations de réglage des pylônes

■ Construction des pylônes

Les pylônes (jambe, béquille, et fût) sont réalisés à l'aide d'un coffrage auto-grimpant, en 20 levées successives, jusqu'à l'arase de pose des boîtes d'ancrage.

Les boîtes d'ancrage métalliques, d'un poids de 110 tonnes pièce, sont préfabriquées en usine, puis acheminées sur site par convoi routier. Pour des contraintes de gabarit, chaque boîte est

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

Etudes d'exécution : Groupement ARCADIS Lyon / VINCI CONSTRUCTION FRANCE (BET de Marseille)

Etudes Méthodes : CAMPENON BERNARD DODIN Ingénierie VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS (pose des boîtes d'ancrage)

Logiciel de réglage de l'ouvrage en cours de construction : FORMULE INFORMATIQUE



Construction du pylône



QUELQUES CHIFFRES

Volume total de béton : 13.000 m³

Armatures passives : 1 900 tonnes

Aciers pour ouvrages provisoires :
2 000 tonnes

Charpentes métalliques :

Pièces de pont : 226 tonnes

Boîtes d'ancrage : 110 tonnes chacune

Pylônes : Hauteur totale depuis le dessus
des semelles : 99,180 m

Haubans : 144 haubans dont 40 équipés
d'amortisseurs,
300 tonnes de torons,
11 à 27 torons par hauban,

Tablier :

Longueur totale : 515 m

Travée principale : 285 m

Hauteur à la clé : 42 m



Châssis mécano-soudé



constituée de deux parties qui sont assemblées par soudure sur site, au pied du pylône, avant d'être mise en place par levage.

■ Réglage et suivi géométriques des levées

Le réglage des coffrages et le suivi géométrique des pylônes en cours de construction ne posent pas de difficultés particulières compte tenu des faibles déplacements subis. On règle donc les coffrages en absolu et on s'assure que le pylône se déforme au fur et

à mesure des levées selon les prévisions du modèle de calcul.

■ Contrôle géométrique des boîtes d'ancrage

Généralités

Les boîtes d'ancrage doivent être réalisées et installées avec une grande précision, de façon à assurer à la livraison de l'ouvrage un centrage correct des haubans dans les tubes d'ancrage, l'espace libre entre le faisceau de torons et le bord du tube n'étant que de l'ordre de 30 mm.

Un suivi géométrique rigoureux s'impose donc aux différentes étapes de la réalisation :

- tout d'abord, lors de la préfabrication en usine,
- puis, lors de l'assemblage sur site,
- enfin, lors de la pose en tête de pylône.

Contrôle géométrique en usine

Chaque demi-boîte est rapportée à un système d'axes local permettant d'implanter les plaques et les tubes d'ancrage à l'aide d'une approche topographique. Dans la pratique, ce système d'axes est matérialisé par des dés métalliques soudés à la paroi sur lesquels viennent se visser des supports magnétiques permettant l'installation de prismes de type SPAC40 Geodesia.

Ce système d'axes sert également au suivi des déformations de la pièce au fur et à mesure de sa fabrication, cette opération étant effectuée de façon contradictoire par les géomètres de l'entreprise et ceux du Conseil général. Les deux demi boîtes sont assemblées à blanc en usine de façon à s'assurer que les dispositifs de centrage permettent d'obtenir avec une bonne précision la géométrie théorique de l'ensemble.

Contrôle géométrique lors de l'assemblage

La boîte d'ancrage a fait l'objet de différentes opérations de contrôle géo-



Boîte d'ancrage au sol



métrique sur site, toutes réalisées à l'aide d'une station totale :

- répétition du montage à blanc effectué en usine, afin de vérifier que la pièce n'a subi aucune déformation lors du transport et des opérations de manutention,
- vérification que les retraits de soudure produisent un raccourcissement uniforme de la boîte, à l'exclusion de toute déformation transversale,
- contrôle de la coplanéité des trois surfaces devant venir en contact avec les surfaces d'appui métal installées sur le pylône,
- vérification, à titre de contrôle supplémentaire, de la position de quelques tubes d'ancrage.

Contrôle géométrique avant et après pose

L'opération de pose de la boîte sur le pylône consiste à la basculer de la position horizontale à la position verticale, à la lever, puis à la reposer sur trois surfaces métalliques prévues à cet effet, le centrage en plan étant assuré par trois pions.

Le contact entre la surface portante de la boîte et l'arase béton du pylône est alors réalisé ultérieurement par un bain de mortier.

Pour obtenir une implantation précise des surfaces d'appui métal et des pions de centrage, l'ensemble des pièces ont été positionnées sur un châssis mécano-soudé réalisé en usine.

Il est important de pouvoir évaluer, avant levage de la boîte, le défaut de centrage en fin de construction du pont de chaque hauban par rapport à son tube d'ancrage. Cette information permet alors, le cas échéant, d'appliquer une correction d'ensemble qui optimise la répartition des erreurs.

Pour ce faire, on assemble virtuellement la boîte telle que réalisée et les trois surfaces d'appui sur pylône, cette opération s'effectuant en superposant au mieux les points de contact correspondants à l'aide d'un calcul de best-fit 3D.

Dans la pratique, aucune correction d'ensemble de la position des boîtes d'ancrage n'a été nécessaire pour compenser les erreurs de fabrication



Levage de la boîte d'ancrages

de la boîte d'ancrage, celles-ci étant restées dans une plage tout à fait acceptable.

Une fois la boîte d'ancrage en place sur le pylône, on réalise un dernier contrôle avant de décrocher les élingues de levage : on s'assure que la boîte se situe bien dans le plan de symétrie vertical du pylône et qu'elle présente l'inclinaison requise. Les mesures topographiques correspondantes s'appuient alors sur des cibles fixées en partie haute de la boîte et sur le fût du pylône.

Du point de vue des opérations topographiques, la préparation de la pose des boîtes d'ancrage s'est révélée délicate, compte tenu de l'exiguïté de l'espace de travail au niveau de l'arase béton du fût et de la déformabilité du pylône sous l'action de gradients thermiques.

Pour s'affranchir des contraintes liées à ce dernier point, on a préféré travailler en relatif par rapport au fût plutôt qu'en absolu dans le système d'axes Chantier ; la position de l'axe théorique du fût avait été déterminée au préalable par un relevé dans des conditions où les effets thermiques peuvent être considérées comme négligeables, c'est-à-dire tôt le matin.



Opérations de réglage et de suivi géométrique du tablier

■ Principe de construction du tablier

Des considérations d'ordre technique et de coût ont conduit à réaliser le tablier en mettant en œuvre plusieurs méthodes :

- Les zones à dalle pleine des travées de rive sont construites sur cintre.
- Une fois un pylône achevé, on démarre la construction par encorbellements successifs de la partie adjacente de tablier à l'aide d'une paire d'équipages mobiles supportant les coffrages. On réalise ainsi alternativement de chaque côté du pylône huit tronçons appelés voussoirs que l'on haubane au fur et à mesure de leur construction. Après achèvement d'un voussoir et mise en tension de ses haubans, on procède à l'avancement de l'équipage mobile pour démarrer la construction du voussoir suivant.
- On solidarise ensuite par clavage le tronçon de travée de rive réalisé par encorbellements avec le tronçon construit sur cintre.
- On poursuit la construction de la travée centrale par encorbellements successifs avec des voussoirs de 7,50 m





Tronçon de tablier de rive construit sur cintre



Équipage mobile central



de longueur : on parle alors de surencorbellement.

- Enfin, on assure la continuité du tablier en réalisant le clavage central entre les deux consoles haubanées en surencorbellement.

■ Objectifs des opérations de réglage

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 devant être traités séparément :

- la géométrie du tablier,
- la mise en tension des haubans.

Dans tous les projets, la maîtrise des opérations de réglage s'avère un élément clé pour le bon déroulement de la construction. Dans le cas du nouveau pont de Térénez, ce point est encore plus critique, compte 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.

■ Présentation générale des opérations de réglage et de suivi

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 elles sont de l'ordre de 15 à 20 mm.

Réglage des haubans

Pour être précis, le réglage d'un hauban au moment de son installation neces-

site 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 pouvoir s'assurer que l'ouvrage en cours de construction se comporte effectivement comme prévu par le modèle de calcul, afin de rapidement détecter 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.

Données utilisées pour les opérations de réglage et de suivi

Il est important de noter que les opérations de réglage s'appuient sur les données du modèle de calcul plutôt que sur ses résultats.

Ainsi, la géométrie retenue pour le réglage du tablier est la même que celle qui a servi à décrire les coordonnées des nœuds dans le logiciel de calcul ST1 : c'est donc la géométrie de la structure à vide non déformée, qui, dans le cadre de ce projet, est également celle qui figure sur les plans.

Par ailleurs, comme déjà mentionné, on ne cherche pas à régler un hauban en lui appliquant une force de mise en tension dont la valeur serait donnée par le modèle de calcul. On a cependant recours par commodité aux résultats relatifs à une phase postérieure à l'installation du hauban pour définir le réglage retenu dans le cadre de la simulation de la construction phase par phase.

A l'inverse des opérations de réglage, les opérations de suivi supposent bien sûr que l'on dispose des résultats du calcul pour l'état considéré, quitte à ce que parfois le modèle soit remis à jour pour tenir compte du chargement réel de la structure.

■ Mise en œuvre pratique

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 que le nouveau pont de Térénez. Paradoxalement, les difficultés à résoudre sont du même ordre que celles rencontrées sur une structure de beaucoup plus grandes dimensions comme le pont Vasco de Gama à Lisbonne ou le pont de Rion-Antirion en Grèce.

Il est donc vite apparu nécessaire de mettre en œuvre des moyens à la hauteur de l'enjeu, à la fois en termes d'organisation, de préparation et d'outils informatiques – même si l'ouvrage reste en définitive un pont de taille moyenne.

Organisation

La responsabilité des opérations de réglage sur site a été confiée à un ingénieur topographe spécialiste de la construction de ponts à haubans. Le groupement d'entreprises s'est en outre 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.

Le bureau d'études techniques de Campenon Bernard Dodin Ingénierie a assuré le suivi de l'ouvrage en cours de construction. Sa mission était de vérifier que le comportement de l'ouvrage était conforme aux prévisions du modèle de calcul – et en cas d'écarts d'en analyser les causes et de préconiser les mesures à prendre.

Préparation

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,
- le matériel topographique standard et spécifique à mettre en œuvre,
- l'imbrication des opérations dans le cycle de construction d'un voussoir,
- la collecte des données nécessaires (ex. : définition de la géométrie du tablier, 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...)

Outils informatiques

Comme 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. FORMULE INFORMATIQUE a développé à cet effet un programme spécifique baptisé REGLAGE et utilisé par l'équipe topo du chantier.

Le programme REGLAGE a été conçu de façon à limiter au maximum, à la fois aux stades de la préparation et de l'exploitation, les saisies manuelles – qui sont toujours des sources potentielles d'erreurs. Ainsi, les relevés topographiques et les résultats du modèle de calcul sont lus directement dans les fichiers produits par les instruments et par le logiciel calcul de structure ST1.

Par ailleurs, pour des raisons de clarté, seules les consignes de réglage à transmettre aux équipes d'exécution s'affichent lors du dialogue interactif, tandis que toutes les informations détaillées, utiles à des fins de traçabilité, sont stockées dans un fichier historique que l'on peut consulter en arrière-plan.

■ Opérations de réglage

Généralités

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 coffrants des haubans
- réglage de la tension du toron témoin
- retension des haubans par paliers en cours de bétonnage
- évaluation des erreurs d'exécution du voussoir
- réglage précis des haubans du voussoir

Réglage de l'équipage mobile

La position en plan et en élévation de l'équipage mobile est réglée en relatif par rapport au voussoir précédent. On utilise à cet effet les quatre inserts (repères topographiques) de ce dernier dont on connaît les écarts par rapport à leur implantation théorique.





Système de réglage laser

Le réglage s'effectue à l'aide de deux dispositifs laser localisés sur chaque nervure du tablier. Un dispositif comprend :

- une source placée à l'aplomb de l'insert arrière,
- un diaphragme situé au droit de l'insert avant,
- un écran dépoli fixé à l'avant de l'équipage mobile.

Le module du programme REGLAGE associé à cette opération détermine la position (ξ, η) que le spot doit occuper sur l'écran dépoli lorsque l'équipage est en place pour réaliser le nouveau voussoir. Le calcul correspondant prend en compte les déformées propres de l'équipage au moment de son réglage, ainsi qu'en fin de bétonnage.

Cette solution – qui reprend le principe utilisé sur le pont de Rion-Antirion pour la pose des éléments préfabriqués de tablier – permet de réaliser le déplacement de l'équipage sans l'intervention d'un géomètre, ainsi que de corriger de façon progressive sa position transversale en fin d'avancement.

Réglage des pièces de ponts

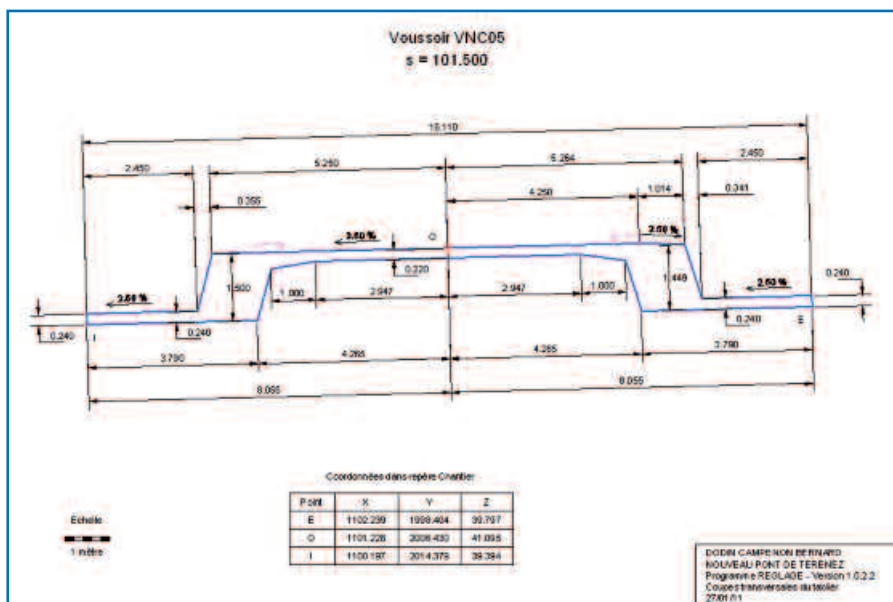
Une fois l'équipage en place, on installe les deux pièces de pont qui comportent, soudés sur des tiges, les inserts du nouveau voussoir. Un relevé topographique de la position de ces derniers et de ceux du voussoir précédent permet de déterminer leur écart par rapport à leur position nominale.

Réglage des coffrages du voussoir

Le tablier présente sur les travées de rive une section de dimensions et de dévers variables, ce qui complique le réglage des coffrages sur l'équipage mobile. Pour faciliter le travail des coffreurs, le programme REGLAGE offre un module qui permet de produire, sous la forme d'un croquis DXF, la coupe transversale cotée du tablier en toute section.

Réglage des tubes coffrants

Le réglage des tubes coffrants constitue une opération délicate dans le cycle de construction des voussoirs, car elle requiert une bonne précision pour assurer le centrage du faisceau de torons en sortie de tube, en particulier lorsque le hauban comporte un amortisseur annulaire.



Coupe transversale du tablier produite par le programme REGLAGE



les coordonnées des inserts par des séries de mesures, tandis que l'on estime *a posteriori* la qualité de l'évaluation en examinant les résidus de l'opération de bestfit – qui ne doivent pas dépasser 5 dixièmes de millimètre.

Réglage précis des haubans du voussoir

Durant le bétonnage du voussoir les haubans sont ancrés sur l'équipage mobile. Lorsque la résistance du béton est suffisante, on procède au transfert de la force des haubans de l'équipage vers les ancrages définitifs du voussoir. C'est à partir de cet état que l'on effectue le réglage précis des haubans qui terminera l'opération d'installation.

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 de retension.

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 u_T et u_P des ancrages,
- 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 REGLAGE permet non seulement de déterminer la consigne d'allongement Δl , mais également de vérifier *a posteriori* que le réglage appliqué est correct.

■ Suivi de l'ouvrage en cours de construction

Généralités

L'objectif du suivi de l'ouvrage est de s'assurer que son comportement en cours de construction est conforme aux prévisions du modèle de calcul.

Comme déjà mentionné, le suivi est essentiellement de nature géométrique. Pour une phase de construction donnée, on compare les valeurs observées des déplacements des inserts du tablier et des cibles des pylônes avec les valeurs théoriques correspondantes – en s'assurant bien sûr que le chargement pris en compte dans le modèle de calcul coïncide exactement avec le chargement réel.

Utilitaire Suivi

Le dépeillement manuel des fichiers de sorties d'un code de calcul représente un travail fastidieux et sujet à erreurs. En outre, les déplacements théoriques sont connus aux nœuds tandis que les déplacements réels sont mesurés au droit des inserts et des cibles, ceux-ci portant un nom différent des nœuds et n'étant pas exactement placés au même endroit.

D'où l'idée d'automatiser le processus. Le programme REGLAGE offre un utilitaire Suivi qui permet à partir d'un fichier de relevé topo de générer automatiquement une feuille Excel avec graphique représentant, pour un état donné, les écarts entre les flèches théoriques du tablier et les valeurs théoriques correspondantes.

Déroulement du suivi

Le bureau d'études Campenon Bernard Dodin Ingénierie s'est chargé de l'analyse des relevés régulièrement transmis

par le chantier. Ce suivi a permis, entre autres, de recalibrer en cours de construction du tablier certains paramètres du modèle tel que la raideur des fondations ou bien encore le poids réel des voussoirs.

Aspects topographiques

■ Importance des mesures topographiques

Comme on a pu le constater dans ce qui précède, les mesures topographiques jouent un rôle central dans les opérations de réglage et de suivi de l'ouvrage en cours de construction.

Elles interviennent tout d'abord comme données d'entrée dans la détermination des consignes à appliquer sur site : correction à donner à la position de l'extrémité d'un tube coffrant, allongement à imposer à un hauban pour finaliser son installation,...

Elles servent également au suivi géométrique de l'ouvrage : le relevé des positions dans l'espace des inserts du tablier et des cibles des pylônes permet d'appréhender les déformations de la structure et par conséquent de s'assurer que celle-ci se comporte conformément aux prévisions du modèle de calcul.

■ Station totale

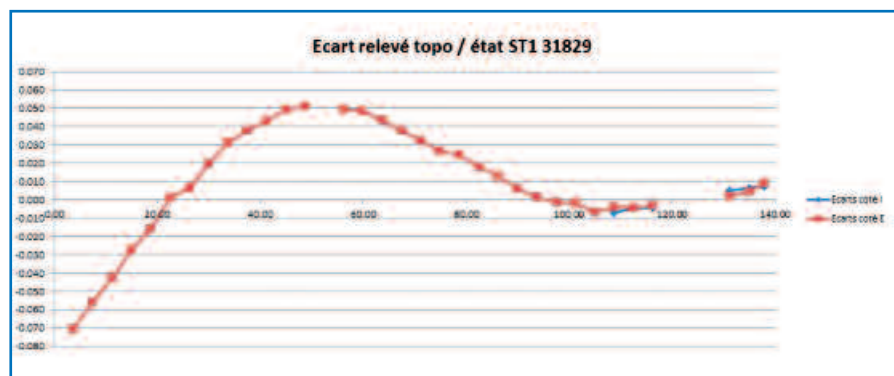
Généralités

Dans de nombreux cas de figure, les algorithmes de réglage s'appuient sur les valeurs de coordonnées de repères topographiques. On utilise alors pour leur relevé une station totale Leica TCA 2003 dont les performances sont compatibles avec les précisions recherchées.

Chaque relevé fait l'objet de séries de mesures consécutives qui sont traitées par un module spécifique du programme REGLAGE, ce qui garantit une bonne précision des données topographiques utilisées.

Utilisation avec compensateur

Le réglage d'un hauban passe par la détermination du déplacement de ses ancrages, que l'on évalue à partir des coordonnées *dans le système d'axes*



Logiciel REGLAGE – Suivi du tablier



parorama.beelgare.fr

Chantier des inserts topographiques voisins. On travaille alors en absolu, avec compensateur, la précision attendue étant de l'ordre de 1 à 3 mm.

Utilisation sans compensateur

L'évaluation des erreurs d'exécution d'un nouveau voussoir (voir § *Opérations de réglage*) met en jeu les coordonnées des inserts de ce nouveau voussoir et des deux voussoirs précédents, ces coordonnées pouvant être mesurées dans un système d'axes quelconque – la seule contrainte étant que l'axe z reste proche de la verticale.

Les mesures s'effectuent en relatif, sans compensateur, ce qui autorise le cas échéant un léger mouvement global du tablier durant le relevé. Le traitement des séries de mesures nécessite alors un recalage préalable amenant les séries en superposition ; cette opération, prise en charge par le module de prétraitement du programme REGLAGE, s'appuie sur un calcul de bestfit 3D. Cette façon de procéder permet alors d'obtenir une mesure de grande précision, de l'ordre de 5 dixièmes de millimètre.

■ Dispositif laser de réglage de l'équipage mobile

Plutôt que d'avoir recours à des instruments topographiques conventionnels, on a préféré utiliser pour le réglage de l'équipage mobile un dispositif spéci-

fique fourni par la société Dynaopt (voir § *Réglage de l'équipage mobile*).

Comme déjà mentionné, l'intérêt de cette solution est de permettre un réglage progressif de l'équipage tout au long de son avancement, sans avoir à immobiliser un opérateur et une station totale.

Conclusion

Sur un projet très technique comme le nouveau Pont de Térénez, le rôle de l'équipe topographique va bien au-delà des missions classiques d'implantation et de relevés qu'elle assume habituellement sur un chantier de génie civil.

Elle participe, en étroite collaboration avec les différents intervenants (bureaux d'études, méthodes, responsables chantier, experts...), à la préparation technique du projet et accompagne ensuite, tout au long de la construction de l'ouvrage, les équipes d'exécution dans toutes les opérations clés.

Cette opportunité d'ouverture vers d'autres disciplines et l'implication quotidienne de l'équipe dans les activités du chantier ont été vécues comme une expérience enrichissante, qui ouvre des perspectives intéressantes sur le rôle que peuvent jouer l'ingénieur et le technicien géomètre dans des projets de génie civil non conventionnels. ●

Références bibliographiques

Article *Revue Travaux* n° 879 Mars 2011
Crédits photographiques : Vinci

Contacts

Julien MONNERIE

GTM Bretagne – Vinci Construction France
julien.monnerie@vinci-construction.fr

Michel MARCHETTI

FORMULE INFORMATIQUE
75, rue de Lourmel 75015 PARIS
formulinfo@aol.com

Nicolas CHAMBRAGNE

DCB - Vinci Construction
nicolas.chambagne@vinci-construction.com

ABSTRACT

The construction of the new Térénez Bridge illustrates the key role that can be played by conventional and specific survey means in technically sophisticated civil engineering projects.

This paper describes the procedures adopted for the adjustment of the structure during its erection, as well as the related survey and measurement operations required to evaluate the adjustment instructions. A particular stress is put on the solutions that have been chosen to guarantee survey measurement accuracy compatible with the aimed adjustment precision.