1

© ISC

LES APPUIS EN RIVIÈRE DU DEUXIÈME PONT SUR LE WOURI

AUTEURS : PAUL ONFROY, CHEF DE PROJETS , ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE) - CHARLES SPAULDING, DIRECTEUR DE PROJET ADJOINT, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL (VINCI CONSTRUCTION) - JEAN MOUFO, DÉLÉGUÉ RÉGIONAL, LABOGÉNIE - NICOLAS METGE, DIRECTEUR ADJOINT, ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE)

À L'HEURE OÙ LES IMPRESSIONNANTS FLÉAUX DE CE DOUBLE PONT COMMENCENT À S'ÉLANCER AU-DESSUS DE L'ESTUAIRE DU WOURI À DOUALA, CAPITALE ÉCONOMIQUE DU CAMEROUN, RETOUR SUR LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION DES APPUIS EN RIVIÈRE DE CES OUVRAGES HORS NORMES.

CONTEXTE DU PROJET

Le projet du deuxième pont sur le Wouri comprend 2 ouvrages exceptionnels jumelés, courbes, avec un tablier routier de 25,55 m de large et un tablier ferroviaire de 10,10 m.

Ces deux ouvrages structurellement indépendants sont simplement reliés entre eux par un caniveau central.

Les 750 m de brèche sont franchis à l'aide de 6 travées en béton précontraint de portées variant de 91 à 133 m. La portée maximale de l'ouvrage ferroviaire atteint 130 m, ce qui est relativement rare pour un ouvrage ferroviaire à 2 sens de circulation.

Les 5 appuis en rivière sont de type « pile-chevêtre » reposant sur des groupes de 4 à 6 pieux de 2,50 m de diamètre ancrés à 45 m de profondeur.

La réalisation de ces ouvrages a été confiée à un groupement composé de filiales du groupe Vinci Construction à l'issue d'un concours de type conception-réalisation lancé par le Ministère des TP camerounais. Le mandataire Sogea Satom a fait appel pendant la phase d'appel d'offre à Ingénierie des Structures et des Chantiers (ISC), filiale de Vinci Construction France et à l'architecte Thomas Lavigne pour la conception des deux ponts (figure 2).

Situés sur la Nationale n°3 dans sa traversée de la ville de Douala, ces ouvrages sont destinés à augmenter la capacité d'échange face à l'accroissement du trafic en doublant un pont routier-ferroviaire datant de 1954 aujourd'hui saturé.

1- Vue générale du chantier depuis la rive gauche.

1- General view of the project from the left bank.

Ils permettent de raccorder le centre du pays à la région Ouest, grenier du Cameroun et porte d'entrée vers le Nigeria.

Cette grande réalisation du Cameroun de l'émergence, voulue par le Président Paul Biya, est complétée par deux projets de pénétrantes autoroutières qui se raccordent aux extrémités Est et Ouest du tracé.

Les retombées économiques sur le pays sont nombreuses. À titre d'exemple, le ciment, les aciers passifs et les ouvrages provisoires métalliques (équipages mobiles, estacade, charpente de dévérinage) sont produits ou réalisés localement.

© AGENCE LAVIGNE/CHÉRON

2

CONCEPTION ARCHITECTURALE ET TECHNIQUE

Le règlement du concours exigeait que les appuis des nouveaux ouvrages soient alignés avec ceux du pont existant, situé 8 m en amont de l'ouvrage routier. Le pont existant ayant des travées de 45 m, les concepteurs avaient donc le choix entre réaliser des tabliers mixtes de 90 m de portée, ou des tabliers en béton précontraint de 135 m de portée. Le choix économique s'est porté sur la deuxième solution (réduction du nombre d'appuis en rivière) ce qui a aussi eu pour effet de favoriser l'économie locale (la fabrication et la mise en œuvre du béton nécessitant davantage de main d'œuvre que l'assemblage d'une charpente métallique préfabriquée).

2- Photo-montage des ouvrages (pont ferroviaire au 1er plan).

3- Profil en long de l'ouvrage ferroviaire.

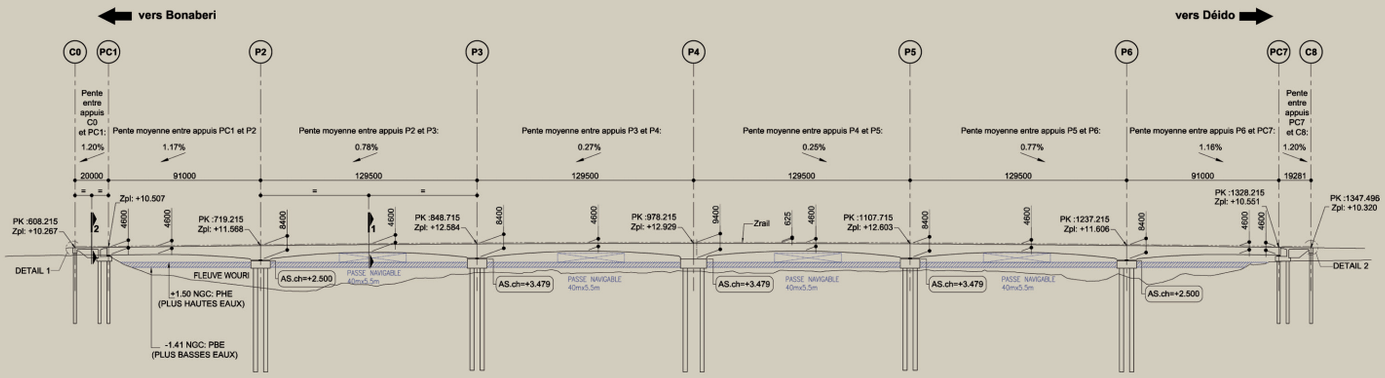
2- Photo-montage of the structures (railway bridge in the foreground).

3- Longitudinal profile of the railway bridge.

Les tabliers sont constitués de voussoirs en béton de type B50 coulés en place par encorbellements successifs (16 à 17 paires de voussoirs de 3,30 à 3,54 m de long par fléau). Une estacade traversante de 8 m de large et de 15 m de portée permet d'acheminer hommes, matériels et matériaux en pied de chaque fléau. L'appui central P4 joue le rôle de point fixe pour les 2 ouvrages. Sur l'ouvrage ferroviaire, le voussoir sur pile du point fixe est directement encastré sur la pile-chevêtre elle-même appuyée sur 2 files de 3 pieux Ø 2 500, dans le but d'encaisser les efforts de freinage des trains. L'élancement des tabliers associé au profil en long parabolique des ouvrages permet de libérer 4 passes navigables de 40 m par 5,50 m de haut au droit des travées principales (figure 3).

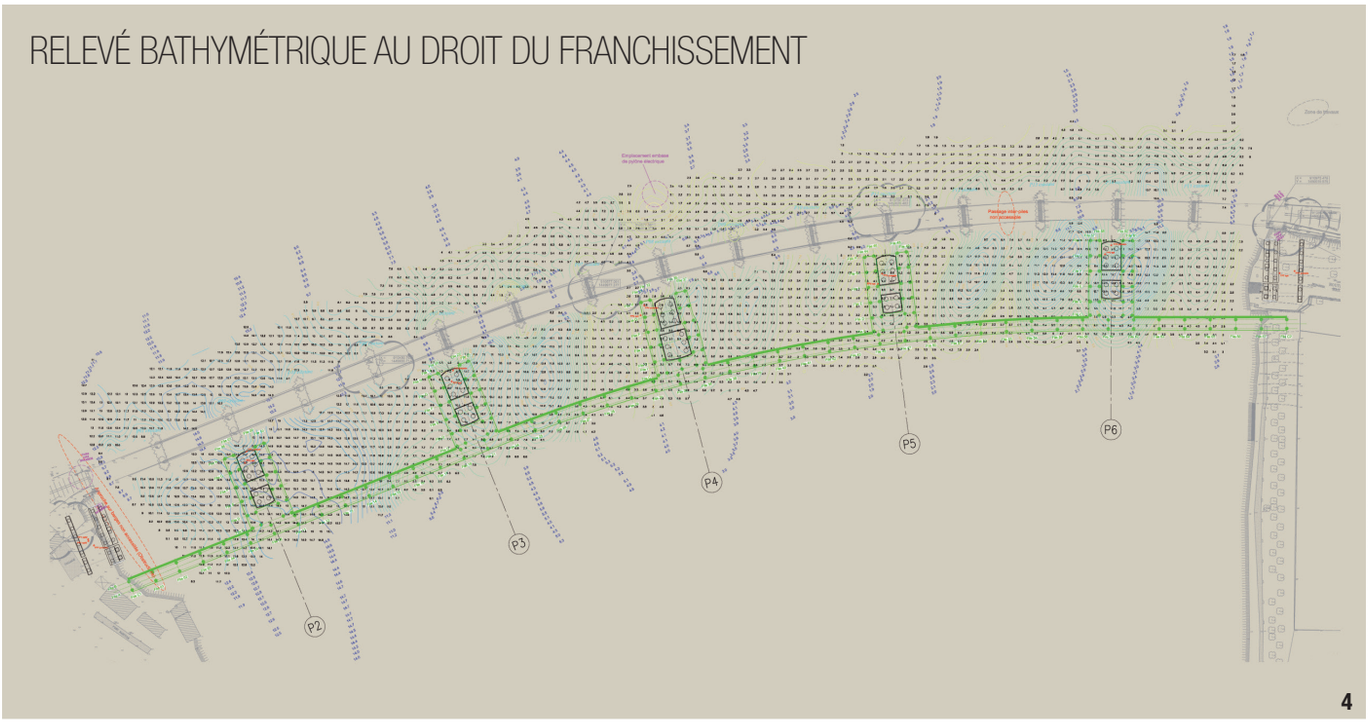
Des déviateurs secondaires complètent les déviateurs primaires afin d'adapter le tracé en plan des câbles de précontrainte de continuité au tracé en plan des tabliers. Ornés de motifs inspirés de la culture Sawa, les tabliers viennent rebondir sur les pile-chevêtres qui émergent à peine de l'eau tels des galets faisant des ricochets. ▷

PROFIL EN LONG DE L'OUVRAGE FERROVIAIRE



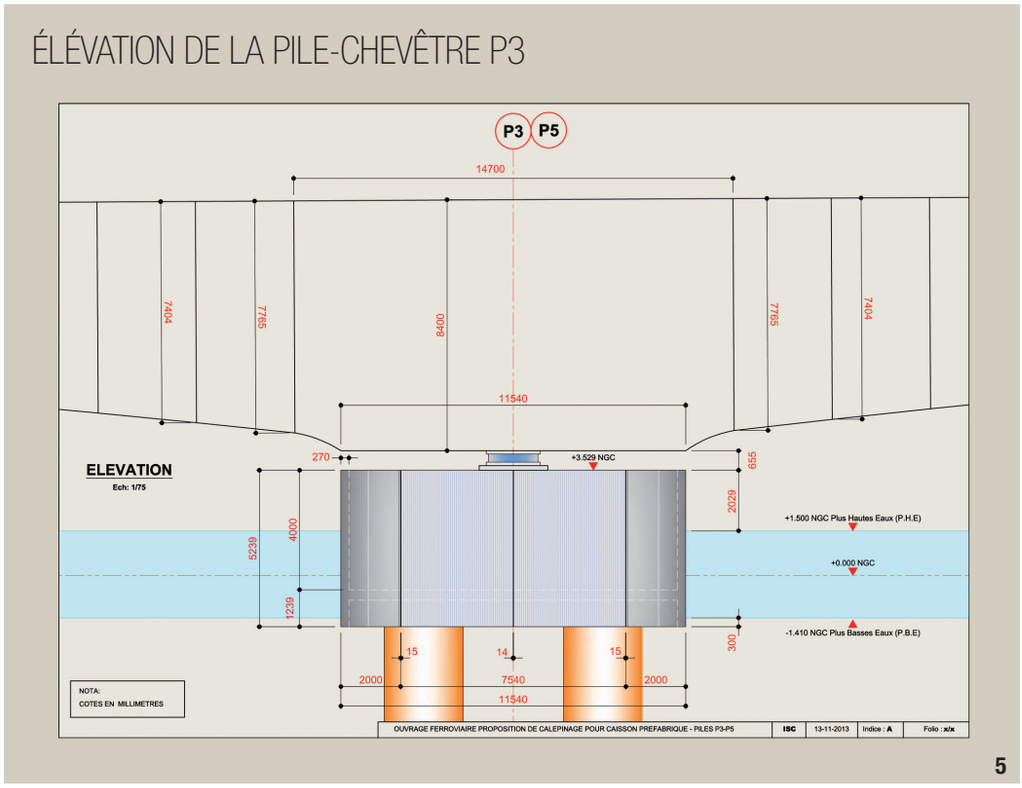
3

© ISC



4

© SOGEA-SATOM POUR LE GPT LE WOUR



5

© ISC

CARACTÉRISTIQUES DU SITE

CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES

Le fleuve Wouri constitue un large bassin de plusieurs centaines de kilomètres carrés au niveau de la ville côtière de Douala.

Les précipitations annuelles qui règnent dans cette zone tropicale sont de 3,80 m, 80 % ayant lieu pendant la saison des pluies de juillet à octobre.

La profondeur du fleuve au niveau du franchissement varie de 18 m (dans l'alignement du chenal de navigation) à 3 m (au milieu du fleuve).

Le courant s'inverse au gré des marées, avec un marnage moyen de 2,20 m et une vitesse à l'étiage de l'ordre de 1 m/s.

Le Mio-Pliocène (MP), situé à environ 40 m de profondeur, est l'horizon servant d'ancrage aux fondations des ouvrages. Cet horizon est constitué de dépôts alluvionnaires très compacts de granulométrie allant des limons aux sables fins. Sa résistance à la compression simple est de l'ordre de 1 MPa, donc à la limite entre un sol et une roche. Ce matériau érodable se délite dans l'eau. Au-dessus et jusqu'au toit du fond marin, le lit du fleuve est constitué de dépôts alluvionnaires lâches, le plus souvent des sables silteux intercalés de poches d'argile organique.

La berge côté rive droite est caractérisée par une butte constituée de sols silto-argileux. En rive gauche, l'ouvrage atterrit sur un remblai hydraulique réalisé lors du boom pétrolier pour étendre le port de Douala et qui surmonte des dépôts sableux lâches à moyennement denses datant du quaternaire.

AFFOUILLEMENTS

Des affouillements très importants des piles 12 à 15 du pont existant (situées en rive gauche) ont mis en évidence 2 phénomènes :

4- Relevé bathymétrique au droit du franchissement.

5- Élévation de la pile-chevêtre P3.

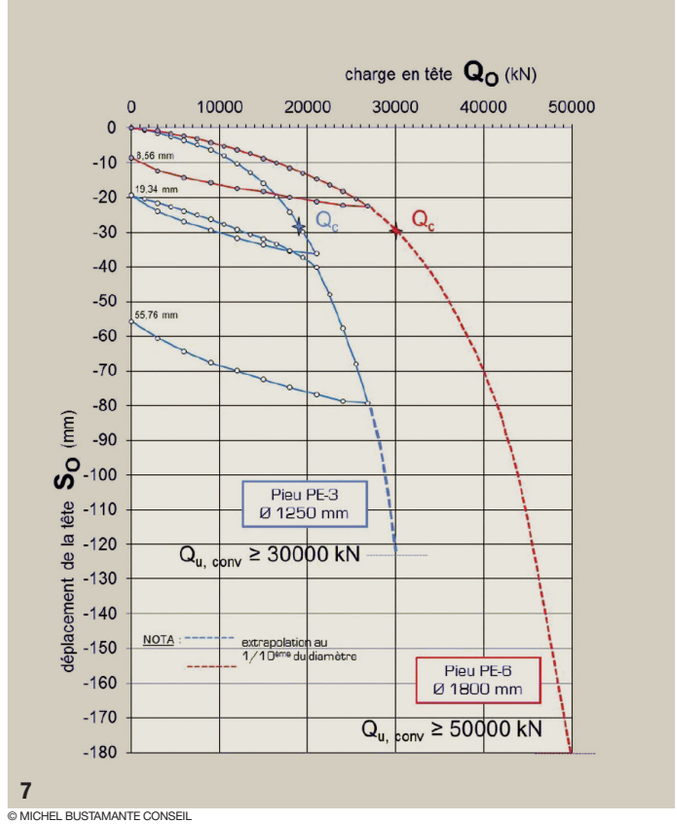
4- Bathymetric survey at the crossing point.

5- Elevation view of pier and pier cap P3.

→ Un effet de seuil caractérisé par de fortes érosions en aval dues à l'obstacle que représente la ligne de piles du pont existant ;

→ La création d'effets tourbillonnaires au droit des piles existantes (figure 4) dus au désaxement de 45° entre les piles existantes et la ligne d'écoulement des eaux (causé par le remblai hydraulique mis en place dans les années 70).

© SOGEA-SATOM POUR LE GPT LE WOURI



© MICHEL BUSTAMANTE CONSEIL

Pour faire face à ces 2 phénomènes, les ingénieurs ont conjugué deux idées fortes pour la conception des appuis en rivière : des pieux de grand diamètre peu sensibles à des érosions ultérieures, encastrés sur des chevêtres descendant à peine plus bas que la cote des plus basses eaux pour réduire au minimum la section hydraulique du fleuve et éviter la création de tourbillons supplémentaires (figure 5) préjudiciables à la structure existante.

LES FONDATIONS

RECONNAISSANCES

La caractérisation des conditions géotechniques s'est faite au moyen d'essais pressiométriques haute pression (poussés au plus à 10 MPa) et de sondages carottés (SPT puis carottage avec tube Mazier dans le MP). Les valeurs trouvées de pression limite de 7,5 MPa en moyenne, contrastant avec les 2,5 MPa de la campagne du dossier d'appel d'offre, ont permis de justifier le raccourcissement des pieux.

PIEUX D'ESSAI

Les pieux d'essai ont été particulièrement utiles pour valider l'optimisation de la longueur des pieux, passant de 65 m à 45 m dont 5 m ancrés dans l'horizon porteur du Mio-Pliocène. La méthode d'exécution des essais proprement dits a dû être adaptée, les essais de type Osterberg prévus initialement par le groupement constructeur n'étant plus adaptés dès lors que l'effort mobilisable en pointe devient prépondérant comparé au frottement mobilisable le long du fût des pieux. Le choix s'est donc porté sur l'utilisation de 6 pieux de réaction pour mobiliser les 2 800 t nécessaires pour solliciter tour à tour 2 pieux d'essai (de 1,25 et 1,8 m de diamètre correspondant règlementairement à au moins la moitié du diamètre des pieux d'exécution) au-delà de leur charge de service et au plus proche possible de la rupture du sol (figure 6).

Le protocole des essais, leur suivi et leur interprétation se sont faits avec le concours de l'équipe de M. Bustamante et L. Gianeselli, et l'entreprise Sol Data. Les pieux d'essai avaient été calculés selon le fascicule 62 titre V avec les résultats des essais au pressiomètre Ménard, qui une fois encore et en présence de sols encaissants somme toute non répertoriés, se sont avérés extrêmement fiables (figure 7).

LA RÉALISATION DES PIEUX Ø 2500

Les pieux en rivière ont été forés depuis une estacade provisoire complétée par des antennes transversales de 7 m de large de part et d'autre de chaque ligne d'appui. Sur la hauteur libre, des viroles en acier scellées de 6 m environ dans les terrains de surface ont été mises en place jusqu'à la cote de la plateforme soit 2 m au-dessus des plus hautes eaux. La raideur importante des terrains encaissants a déterminé le choix d'une foreuse puissante Soilmec SC120 avec table de forage déportée SA40 délivrant 45 t.m de couple aux 2 kellys utilisés pour le forage. ▷

6- Charpente de réactions des essais à 2 800 t.

7- Résultats des pieux d'essai.

8- Mise en place d'une virole métallique Ø 2 600.

9- Forage d'un pieu Ø 2 500 au bucket sous bentonite.

6- Reaction frame for 2800-tonne tests.

7- Test pile results.

8- Positioning a steel collar of dia. 2600 mm.

9- Bentonite bucket drilling of a pile of dia. 2500 mm.

© SOGEA-SATOM POUR LE GPT LE WOUR

10
© ISC

Le phasage de réalisation des pieux se déroulait comme suit : mise en place des viroles (figure 8), forage au bucket (figure 9), dessablage avec une unité Sotres, mise en place des cages d'armatures à la grue Sumitomo SCX130 et enfin le bétonnage au tube plongeur, soit un cycle total de 2 jours par pieu en double poste.

Une série d'aléas géotechniques explique le rallongement de la durée d'exécution des 82 pieux des ouvrages (y compris 30 pieux diamètre 1 800 mm en rives), soit 16 mois au lieu des 10 mois prévus, de juillet 2014 à octobre 2015.

LES PRINCIPAUX ALÉAS GÉOTECHNIQUES

→ Affaissement du trou de forage de 4 pieux sur 10 de la première pile en rivière dû à la présence de terrains boulants s'expliquant par une circulation d'eau imprévisible dans l'horizon des sables et graviers roulés (situés immédiatement au-dessus du substratum). Ces affaissements localisés pouvant représenter plusieurs dizaines de mètres cubes ont eu pour effet de déstabiliser les terrains et rendu la reprise du forage très difficile. La solution trouvée a été de rallonger la longueur des viroles jusqu'à les ancrer dans le substratum. L'atelier de vibro-foncage du chantier étant inadapté pour vibro-foncer des pièces de cette dimension (tubes de 45 t, 2,70 m de diamètre et 45 m de long), il a donc fallu procéder par tronçons de tubes enturés *in-situ* et préforés de l'intérieur à l'avancement.

→ Présence d'enrochements (blocométrie 100 kg et plus) et d'obstacles divers dans les vases de surface sur certains pieux situés près des piles du pont existant, pouvant gêner le fonçage des tubes, les déformer ou considérablement gêner la progression du forage. Il a fallu broyer et enlever ces blocs à la tarière.

→ Présence de couches d'induration au sein du mio-pliocène sur des épais-

11
© SOGEA-SATOM POUR LE GPT LE WOURI

10- Les caissons ferroviaires (à gauche, déjà dévériné) et routier (à droite, en cours d'assemblage) des pile-chevêtres P2.

11- Ferraillage d'une prédalle sur l'aire de préfabrication.

10- The railway caissons (left-hand, already jacked down) and road caissons (right-hand, being assembled) of pier and pier cap P2.

11- Reinforcing bars for a formwork slab on the prefabrication area.

© SOGEA-SATOM POUR LE GPT LE WOURI

12

seurs inférieures à un mètre mais avec des résistances à la compression mesurées atteignant 100 MPa. Après une série de tentatives qui ont fini par aboutir pour les traverser sur les premiers pieux, dans des conditions particulièrement éprouvantes pour le matériel de forage, les couches indurées ont finalement été prises en compte dans la justification de la pointe des pieux, réduisant leur longueur à 40 m.

UNE MÉTHODE INNOVANTE POUR LA RÉALISATION DES APPUIS EN RIVIÈRE

Afin de s'affranchir de batardeaux conséquents (jusqu'à 18 m de tirant d'eau au niveau de la pile P2) et de limiter la réduction de la section hydraulique du fleuve en phase de chantier, une méthode innovante (sélection du prix régional de l'innovation Vinci) a été mise au point par l'équipe d'Isc, et mise en œuvre sur le terrain par l'équipe travaux.

DES CAISSONS ÉTANCHES PRÉFABRIQUÉS

Les chevêtres des piles en rivière ont été réalisés à l'aide de caissons étanches en béton armé jouant à la fois le rôle de parement architectural, de coffrage perdu et de batardeau. Ces caissons préfabriqués ont été assemblés hors d'eau à l'aplomb de leur position définitive et dévérinés à l'aide d'une charpente métallique, de vérins creux, et de barres Dywidag (figure 10).

LA CHARPENTE DE DÉVÉRINAGE

La charpente de dévérinage, constituée de poutres primaires, de poutres secondaires et d'un réseau de passerelles et d'escaliers, s'appuie sur les chemises des pieux définitifs à l'aide de tabourets métalliques afin de répartir la pression sur la périphérie des chemises. Les trous oblongs situés sur les différents organes de la charpente permettent d'adapter cette dernière à la géométrie exacte du caisson et à l'implantation des pieux (tolérance en plan de +ou- 50 mm). Les caissons sont constitués de 14 à 17 éléments préfabriqués pesant entre 4 t et 18 t, préfabriqués sur installation foraine (figure 11) et posée depuis les antennes de l'estacade avec la grue Sumitomo SCX 130 (figure 12). Une fois le hourdis du fond de caisson bétonné, l'ensemble est dévériné jusqu'au-dessus du niveau des plus hautes eaux par passes de 25 cm à l'aide de vérins creux simple effet de 100 t de capacité et d'un système de chaises et de double écrou.

LA POSE DES COQUES PRÉFABRIQUÉES

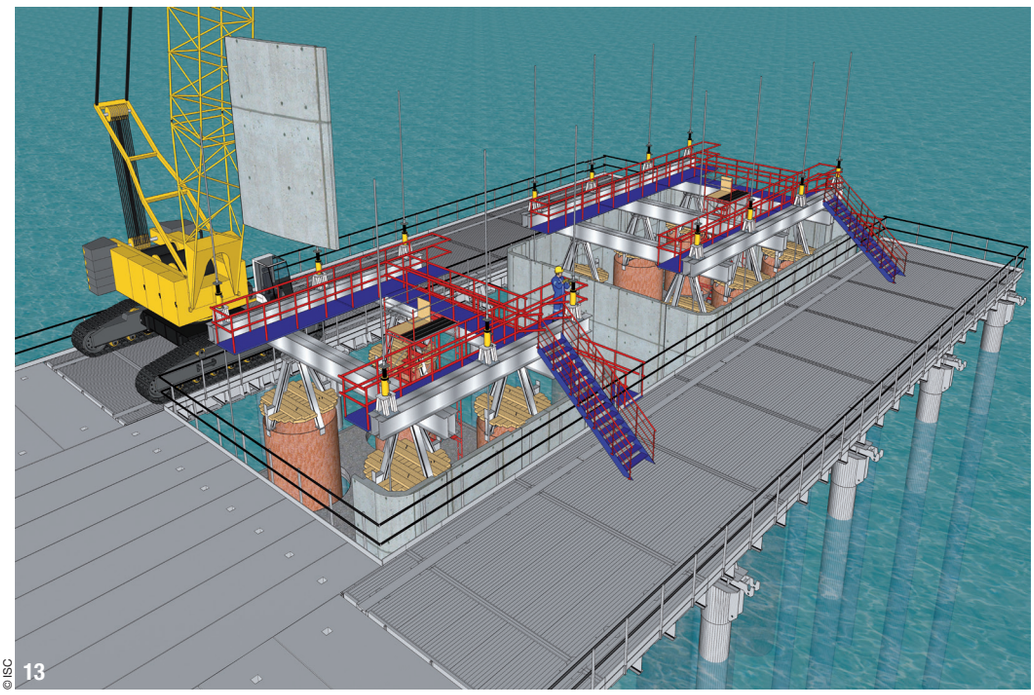
Cette position permet d'assembler les coques périphériques en sécurité, le grutier ayant le champ de vision libre de tout obstacle. Les coques périphériques sont ensuite posées, stabilisées et clavées au rythme de 4 éléments par jour (figure 13). Les éléments préfabriqués sont pré-équipés avec des équerres en pieds et des étais tirant-poussant en tête pour faciliter leur pose et leur réglage. ▷

12- Mise en place des prédalles constituant le fond des caissons.

13- Mise en place des coques périphériques.

12- Positioning the formwork slabs constituting the bottom of the caissons.

13- Positioning the peripheral shells.



© ISC

13

© ISC

© GROUPEMENT LE WOURI

14- À l'intérieur d'un caisson de l'ouvrage routier avant son immersion.

15- Collerettes d'étanchéité en béton armé.

16- Immersion du caisson.

14- Inside of a caisson for the road bridge before its submersion.

15- Reinforced-concrete sealing collars.

16- Submersion of the caisson.

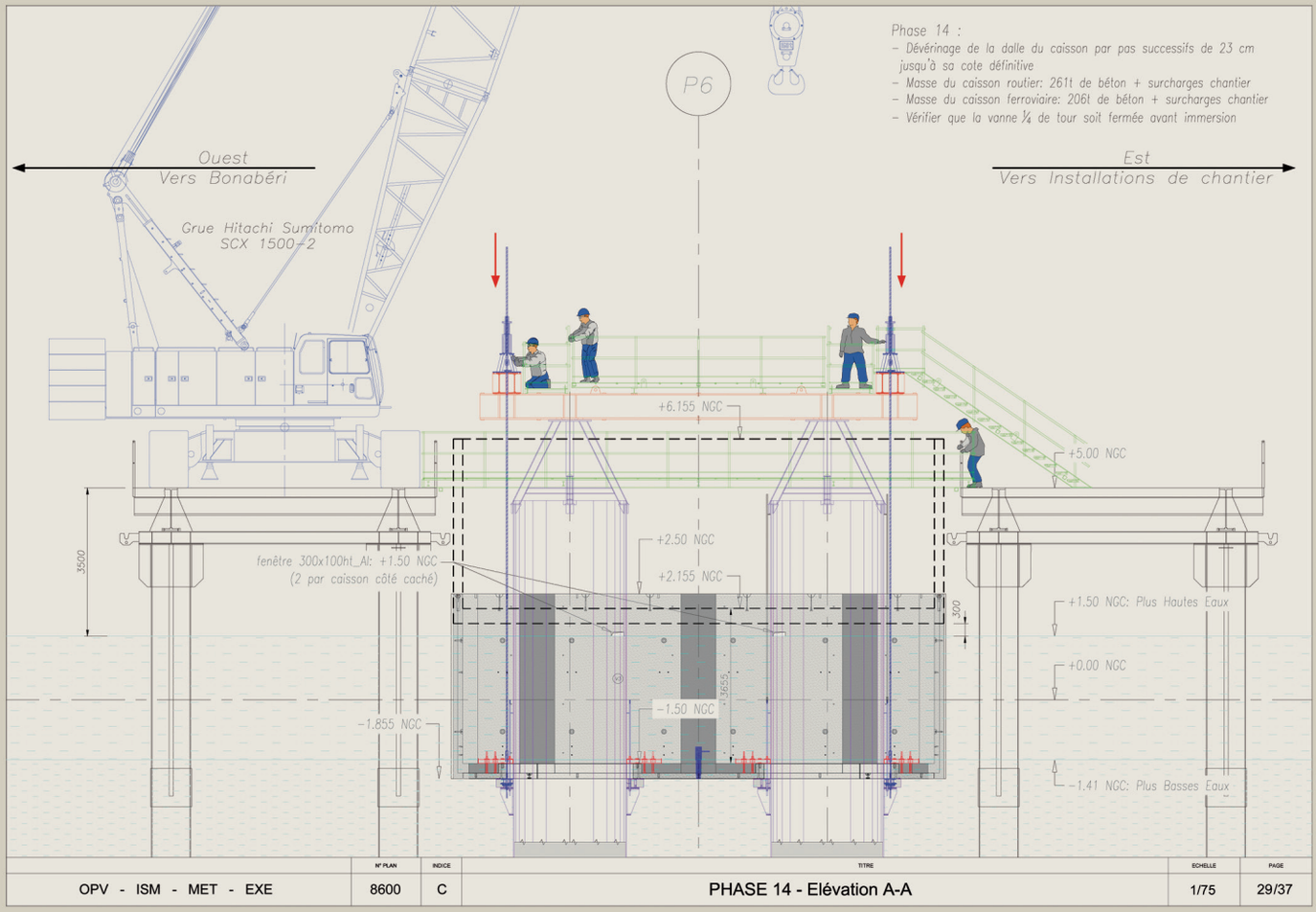
Les caissons de 300 t ainsi reconstitués (figure 14) sont dévérinés sur 3,50 m jusqu'à leur cote définitive (figure 16). Ils reposent sur des corbeaux métalliques soudés sur les chemises des pieux via une collerette en béton armé jouant à la fois le rôle de réglage et d'étanchéité (figure 15).

ÉTANCHÉITÉ ET POUSSÉE D'ARCHIMÈDE

Ces collerettes sont munies d'un joint intérieur à lèvre en nitrile pour rendre le vide annulaire étanche au mortier prise mer et de 2 joints supérieurs en polymère pour assurer un contact parfait avec la sous-face du caisson.

La poussée d'Archimède est reprise grâce à des contre-équerres reliées aux précédents corbeaux par des tiges Artéon Ø 30 qui maintiennent plaqué le fond du caisson à marée haute. Le vide annulaire laissé entre les chemises métalliques et le caisson est comblé à marée basse à l'aide d'un

IMMERSION DU CAISSON



16

© ISC

© SOGEA-SATOM POUR LE GPT LE WOURI

17

micro-béton à liant colloïdal. Les éléments préfabriqués (surtout les coques verticales), ont été dimensionnés pour faire face aux nombreuses phases provisoires de l'opération (décoffrage, retournement, poussée d'eau en fibre extérieure, poussée du béton en fibre intérieure, etc.).
Des palonniers à poulies ont été conçus pour manipuler ces pièces fragiles (épaisseur de 13 cm pour les prédalles) en toute sécurité.

17- Ferraillage de la phase 1 du caisson de l'ouvrage routier.

18- Caisson de l'ouvrage ferroviaire vidangé.

17- Reinforcing bars for phase 1 of the road-bridge caisson.

18- Emptied caisson of the railway bridge.

LE FERRAILLAGE DU CHEVÊTRE

Le caisson est ensuite vidé, la charpente de dévérinage démontée et les chemises métalliques recepées (figure 18).
Les 4 m du chevêtre peuvent alors être ferraillés et bétonnés (en 3 phases, voir figure 17) pour un délai total de 8 semaines par paire de chevêtres de ces 2 ouvrages. Les chevêtres sont alors libérés pour monter les grues à tour et les plateformes de VSP. □

PRINCIPALES QUANTITÉS DES OUVRAGES

35 000 m³ de béton
3 550 t d'armatures passives
1 600 t de précontraintes

© ISC

18

PRINCIPAUX INTERVENANTS

FINANCEMENT : AFD / C2D / BIP
MAÎTRE D'OUVRAGE : MINTP
GROUPEMENT CONCEPTEUR / CONSTRUCTEUR : Sogea Satom / Soletanche Bachy
ASSISTANT À LA MAÎTRISE D'OUVRAGE : Groupement Louis Berger / Scet Cameroun / Ingecam
ASSISTANT GÉOTECHNIQUE À LA MAÎTRISE D'OUVRAGE : Labogénie
CONCEPTION ET MÉTHODES : Ingénierie des Structures et des Chantiers (ISC)
ÉTUDES D'EXÉCUTION : Isc / Cbdi
CONTRÔLE EXTÉRIEUR : Secoa / Stefanini (O.P.)

ABSTRACT

RIVER SUPPORTS FOR THE SECOND BRIDGE OVER THE WOURI

PAUL ONFROY, ISC (VINCI) - CHARLES SPAULDING, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL (VINCI) - JEAN MOUFO, LABOGÉNIE - NICOLAS METGE, ISC (VINCI)

The river piers for the second bridge over the Wouri *(Douala, Cameroon) were designed to resist scouring and limit the impact on the river's hydraulic cross section. These piers and pier caps, supported on pile foundations 2500 mm in diameter and 45 m long, were prefabricated above the water and jacked down to their final level using hollow jacks. This construction technique, developed and executed by the companies of Vinci Group, makes it possible to build piers in a river in record time by doing without a cofferdam.* □

LOS APOYOS SOBRE EL RÍO DEL SEGUNDO PUENTE SOBRE EL WOURI

PAUL ONFROY, ISC (VINCI) - CHARLES SPAULDING, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL (VINCI) - JEAN MOUFO, LABOGÉNIE - NICOLAS METGE, ISC (VINCI)

Los pilares sobre el río del segundo puente sobre el Wouri *(Duala, Camerún) han sido diseñados para resistir las socavaciones y limitar el impacto sobre la sección hidráulica del río. Estos pilares capiteles, sustentados sobre pilotes de 2.500 mm de diámetro y 45 m de longitud, se han prefabricado por encima del nivel de agua y se han hecho descender hasta su cota definitiva mediante cilindros huecos. Esta técnica de realización, ideada y ejecutada por empresas del grupo Vinci, permite construir pilares sobre el río en un tiempo récord sin necesidad de ataguías.* □