

INTERNATIONAL. TERMINAL DE PANAMA. LA TROISIEME TRAVERSEE SUR LE CANAL DE PANAMA. L'ECHANGEUR NORD DE OUAGADOUGOU AU BURKINA FASO. BARKA - USINE DE DESSALEMENT D'EAU DE MER - SULTANAT D'OMAN. TABLIERS DU DEUXIEME PONT SUR LE WOURI. LE METRO DE JAKARTA. LE PONT DE CHAMBAL AU RAJASTHAN. LE PONT SUSPENDU DE CHACAO AU CHILI. LE METRO D'AUCKLAND. LE BARRAGE DE WADI UMTI AU SULTANAT D'OMAN. DUBAI CREEK TOWER A DUBAI

N°936 OCTOBRE 2017



DUBAI CREEK TOWER
A DUBAI
© SOLETANCHE BACHY

SMA



**Ensemble,
allons plus loin !**

L'assureur de toutes les entreprises,
des professionnels, des dirigeants,
de leurs salariés et de leurs proches.

Retrouvez tous nos produits d'assurance sur groupe-sma.fr




SMABTP
SAISON CAVENIR AVEC ASSURANCE

SMA VIE

SMA
ASSURANCES

SMA
COURTAGE

SMA VIE
COURTAGE

Directeur de la publication
Bruno Cavagné**Directeur délégué**
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fntp.fr**Comité de rédaction**
Sami Bounatirou (Bouygues tp), Erica Calatizzo (Systra), Jean-Bernard Detry (Setec tpi), Philippe Gotteland (Fntp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fntp), Laurent Guilbaud (Saipem), Florent Imberty (Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis), Véronique Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage tp), Philippe Vion (Vinci Construction Grands Projets), Nastaran Vivan (Artelia), Michel Morgenthaler (Fntp)**Ont collaboré à ce numéro**
Rédaction
Monique Trancart (actualités),
Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente**
Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.frFrance (9 numéros) : 190 € TTC
International (9 numéros) : 240 €
Enseignants (9 numéros) : 75 €
Étudiants (9 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)**Publicité**
Rive Média
2, rue du Roule - 75001 Paris
Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44
contact@rive-media.fr
www.rive-media.fr**Directeurs de clientèle**
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.fr
Carine Reininger - LD 01 42 21 89 05
c.reininger@rive-media.fr**Site internet : www.revue-travaux.com****Édition déléguée**
Com'1 évidence
2, chemin dit du Pressoir
Le Plessis
28350 Dampierre-sur-Avre
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.com

La revue Travaux s'attache, pour l'information de ses lecteurs, à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se réserve le droit de refuser toute insertion, jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux).
Ouvrage protégé ; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).Éditions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0218 T 80259
ISSN 0041-1906

L'INTERNATIONAL RÉSERVE ENCORE DES MARGES DE PROGRESSION



© DR

Quelle est la place des ingénieries et entreprises françaises à l'export aujourd'hui ? Les entreprises françaises de BTP font environ 44 % de leur chiffre d'affaire hors métropole. Cette activité est concentrée pour 45 % en Europe, 16 % en Afrique, 16 % en Amérique du nord et 13 % en Asie, au Moyen et Proche Orient, 5 % en Océanie et 6 % en Amérique Latine. Le marché africain se tasse, sans doute du fait de l'instabilité des états et des financements, alors que les besoins sont toujours immenses. Les zones en forte croissance sont le Proche et le Moyen-Orient, et l'Amérique Latine.

Notre présence est forte dans le secteur des routes et des terrassements (36 %), des travaux électriques (22 %), de l'eau et de l'environnement. Viennent ensuite les ouvrages d'art, les fondations spéciales et les équipements ferroviaires. Les équipements portuaire et la distribution d'énergie restent très en retrait.

L'ingénierie, de son côté, relève ce défi, au travers de missions de *schematic design*, *detailed design*, *executive design*, *independant checker*, *peer review*, *value engineering* et maîtrise d'œuvre. Présente notamment dans les Émirats Arabes, en Turquie, au Maghreb, en Afrique sub-saharienne, en Amérique

Latine ou en Russie, elle offre ses services, seule ou au sein de groupements internationaux, dans le domaine des infrastructures, du génie civil, du bâtiment, des immeubles de très grande hauteur et de l'énergie. Les clients sont les états, les bailleurs de fond comme l'AFD, la BAD, la Banque Mondiale, les investisseurs ou les promoteurs privés, et bien sûr les entreprises françaises et étrangères, lorsqu'elles ne choisissent pas les ingénieries locales.

Malgré une croissance régulière depuis huit ans, ces marchés peuvent sembler faibles par rapport à la forte concurrence européenne, anglo-saxonne ou asiatique. Et le besoin en développement et en infrastructures reste immense partout dans le monde. Les principaux acteurs de la construction viennent aujourd'hui de Chine, de Corée et du Japon, mais sont aussi européens, avec l'Espagne, l'Italie ou l'Allemagne. L'ingénierie est, quant à elle, fréquemment d'origine ou de culture anglo-américaine et asiatique.

La présence sur tous ces marchés implique la parfaite connaissance des langues et des cultures, la mobilité, l'écoute et l'ouverture d'esprit nécessaire pour aller au-devant des négociations, des usages contractuels, des clients, des pays et des règlements. Devant cette demande émanant soit de pays riches (immeubles de très grande hauteur, ponts iconiques), soit des pays neufs et émergents (routes, adduction d'eau, ouvrages d'art, ouvrages de génie civil au service de l'énergie, équipements portuaires ou de transports, réparations et expertises) nos entreprises doivent, dans la prochaine décennie, faire fructifier leurs références majeures et trouver leur place et leurs partenaires pour réaliser ces chantiers de qualité en maintenant un haut niveau de service face à une concurrence mondiale.

Notre meilleur atout restera la forte technicité dans des secteurs à haute valeur ajoutée et la rigueur, comme le montre ce numéro de la revue Travaux.

JEAN-BERNARD DETRY
SETEC TPI
VICE-PRÉSIDENT DE L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL



INTER NATIONAL

PONT SUR LE WOURI AU CAMEROUN © PHOTO TÈQUE VINGT ET FILIALES



04 ALBUM

06 ACTUALITÉ

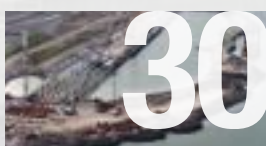


16

ENTRETIEN AVEC ALAIN DEFORCHE

ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT - PRÉPARER DEMAIN AVEC UNE ÉTHIQUE HUMAINE ET ENVIRONNEMENTALE

22 DYNAOPT - MESURE, INSTRUMENTATION, AUSCULTATION : UN SAVOIR-FAIRE MULTIDISCIPLINAIRE



30

TERMINAL DE PANAMA

À sec au pied du canal



36

TROISIÈME TRAVERSÉE SUR LE CANAL DE PANAMA

Des viaducs sur tous les fronts



44

L'ÉCHANGEUR NORD DE OUAGADOUGOU AU BURKINA FASO

Des ouvrages d'art sur un barrage



50

BARKA

Usine de dessalement d'eau de mer au Sultanat d'Oman



56

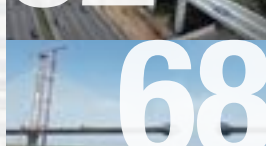
LES TABLIERS DU DEUXIÈME PONT SUR LE WOURI

au Cameroun



62

LE MÉTRO DE JAKARTA



68

LE PONT DE CHAMBAL

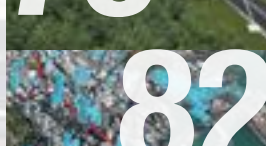
au Rajasthan



76

PONT SUSPENDU DE CHACAO

au Chili



82

PREMIERS MÈTRES DU FUTUR MÉTRO D'AUCKLAND

Fondations et reprise en sous-œuvre



90

BARRAGE DE WADI UMTI

au Sultanat d'Oman



98

DUBAI CREEK TOWER À DUBAÏ

473 barrettes pour fonder l'une des plus hautes tours du monde



LES PALMERAIES ONT BESOIN D'EAU

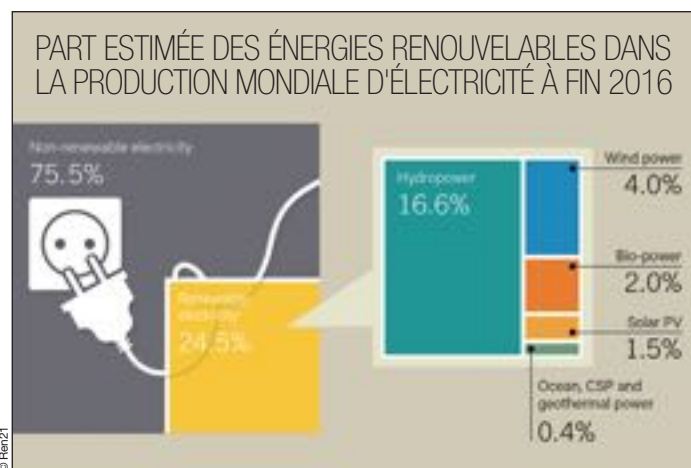
ARTELIA est le maître d'œuvre du barrage de wadi Umti au Sultanat d'Oman, construit par Premier International Project Llc. Cet ouvrage de 23 m de haut est réalisé en *hardfill*, remblai dur faiblement dosé en ciment. Il stocke les crues intenses et brèves qui surviennent dans le massif du Jebel Akdar, en vue de réalimenter le système traditionnel d'irrigation de la palmeraie d'Izki.

(Voir article page 90).



L'ÉOLIEN EN TÊTE DES ÉNERGIES NOUVELLES RENOUVELABLES

L'éolien arrive en tête des énergies nouvelles renouvelables qui produisent de l'électricité mais le photovoltaïque met les bouchées doubles, selon le réseau international d'experts Ren21. La chaleur renouvelable reste à la traîne, et le froid l'est encore plus. Le rapport de Ren21 comptabilise pour la 1^{re} fois les moyens d'utiliser de l'électricité renouvelable sans appoint.



Bio-power : électricité produite à partir de biomasse (ex. méthanisation).
CSP : électricité à partir d'une centrale solaire thermique à concentration.

La part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale mondiale a peu progressé de 2014 à 2015 - passage de 19,2% à 19,3% - selon les derniers chiffres du réseau Renewable Energy Policy Network, Ren21⁽¹⁾. Le pourcentage de 2016 n'est pas encore disponible.

L'électricité renouvelable a plus de succès que la chaleur, le froid ou le carburant de même origine.

→ Quelle électricité pour les véhicules

En 2016, la puissance électrique d'origine renouvelable représente 24,5% du total électrique contre 23,7% en 2015⁽²⁾. Elle atteint 2 017 GW dont 1 096 GW par l'hydraulique qui gagne 25 GW en 2016.

Les nouvelles énergies cumulent 921 GW. Le solaire photovoltaïque s'est étoffé de 75 GW en 2016 pour atteindre 303 au total, mais l'éolien, qui "ne gagne que" 54 GW, le dépasse avec 487 GW installés. Les véhicules électriques sont, en grande majorité, alimentés par de la production nucléaire ou à base d'énergies fossiles. Quelques exceptions. La Norvège alimente des véhicules par de l'électricité hydraulique, selon Ren21. Des sociétés britanniques et néerlandaises proposent de recharger des voitures partagées en électricité renouvelable.

→ Eau chaude solaire en hausse

La chaleur renouvelable mobilise seulement 21 pays, nombre qui n'a pas bougé depuis trois ans. Or, la chaleur absorbe

plus de la moitié de la consommation d'énergie finale, selon Ren21, et les matières brûlées - bois ou autre - le sont à très mauvais rendement. Des industries, en particulier l'agro-alimentaire et les mines, n'hésitent pas à recourir à la chaleur renouvelable solaire, des réseaux urbains aussi à côté de la géothermie.

La production d'eau chaude solaire progresse encore en 2016, de 435 à 456 GWh.

Alors que les besoins de climatisation ou de froid augmentent, ces secteurs s'investissent peu dans les énergies nouvelles, faute de stabilité dans les politiques sur le long terme et d'un savoir-faire suffisant.

→ Stockage : 6,4 GW

L'électricité renouvelable dessert de plus en plus souvent plusieurs usages en même temps, grâce au stockage. Par exemple, l'éolien et le photovoltaïque rechargent des batteries - automobiles ou non - la journée, en vue d'une demande de courant, la nuit.

Le besoin d'un appoint en électricité "traditionnelle" à côté des renouvelables dites intermittentes, relève du « mythe », selon Ren21 : il est possible de s'en passer grâce à « la flexibilité obtenue par l'interconnexion des réseaux, le couplage des usages, et par le recours aux technologies d'information-communication, au stockage, aux pompes à chaleur ». Pour la 1^{re} fois, le rapport de Ren21 se penche sur l'implantation de ces accompagnements au développement des renouvelables. Les États-Unis, la Corée du Sud et le Japon sont les principaux utilisateurs de batteries. La capacité de stockage d'énergie s'élève à 6,4 GW dans le monde (2016).

→ Les investissements dégringolent

Les installations électriques autonomes ou les mini-réseaux progressent rapide-

ment ainsi que le pré-paiement de kilowattheures par téléphone portable (Afrique de l'Est, de l'Ouest, Asie du sud). Les investissements dans les énergies renouvelables, hors hydraulique de plus de 50 MW, ont baissé de 23% par rapport à 2015, en moyenne dans le monde, avec un plus fort recul dans les pays en développement ou émergents : 242 milliards de dollars (201 milliards d'euros environ) ont été dépensés contre 312 en 2015 et 278 en 2014. Le moindre coût d'installation de ces technologies n'expliquerait pas tout.

Le rapport souligne la nécessité d'adopter des politiques spécifiques aux énergies renouvelables, avec des objectifs précis. En 2016, c'était le cas pour 176 pays. Selon Ren21, les efforts sont insuffisants pour limiter la hausse de la température aux 2 degrés des accords de Paris (décembre 2015), et ils devront s'accompagner de plus d'efficacité énergétique.

→ Fourniture électrique 100% renouvelable

Des entreprises se sont regroupées dans le réseau RE100 avec, comme objectif, 100% d'électricité renouvelable dans leur consommation.

Les villes leur emboîtent le pas. Plus de 100 communautés y ont réussi au Japon.

En avril, Ren21 a publié son premier rapport sur comment arriver à 100% de renouvelables à travers l'avis de 110 experts.

www.ren21.net/gsr
et www.ren21.net/gfr.

⁽¹⁾ Ren21 a regroupé les données de 800 spécialistes sur 155 pays.

⁽²⁾ Une erreur dans les documents du Ren21 nous a conduit à publier des chiffres un peu supérieurs dans *Travaux* n°926, septembre 2016, page 9.

2^e CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE AU CHILI PAR EIFFAGE

Eiffage Energia et Eiffage Concessions ont remporté la construction et la maintenance pour trente ans d'une centrale d'électricité photovoltaïque de 98 MW, à implanter dans le grand désert d'Atacama au Chili.

Les filiales d'Eiffage financent le projet en s'associant à Sojitz et Shikoku Electric Power, deux groupes japonais. Montant : 135 millions d'euros.

Eiffage Energia, société espagnole, a déjà construit une centrale solaire, à Quilapilùn, au nord de Santiago (110 MW, 2016). Le Chili vise 70% de renouvelables dans sa production d'électricité en 2050.

Cette année également, Eiffage a lancé les chantiers des centrales solaires de Ten Merina au Sénégal (30 MW) et de Nouakchott, en Mauritanie (50 MW).

En France, le groupe, à travers sa filiale Clemessy (chef de file d'un consortium), avait réalisé en 2015 un parc photovoltaïque de 300 MW, à Cestas (Gironde). Vingt-cinq petites centrales sont connectées entre elles et raccordées au réseau très haute tension de RTE.

→ 1,5 GW dans le monde

Au total, le groupe a installé 1,5 GW en photovoltaïque dans le monde. ■



Première centrale solaire construite au Chili par Eiffage Energia, à Quilapilùn (2016, 110 MW).

© EIFFAGE

PHOTOVOLTAÏQUE : CENTRALES AU SOL ET OMBRIÈRES SE DÉVELOPPENT



Ombrières de parking (Toulouse, 2013) avec bornes de recharge, éolienne et stockage, de Sunvie, participante au 2^e appel à projets photovoltaïques pour une centrale solaire au sol dans l'Aveyron (3,8 MWh, GDSOL Energie Pessens).

Le 3^e appel d'offres pour des installations photovoltaïques se clôture le 1^{er} décembre.

C'est le 3^e des 6 programmés par le ministère de la Transition écologique et solidaire pour des centrales au sol et des ombrières, avec des puissances entre 500 kWc et 17 MWh, visant un total de 3000 MWh.

Les résultats de la 2^e tranche (mai-juin 2017) ont été dévoilés le 28 juillet : 77 lauréats vont installer plus de 500 MWh. Une bonne partie des dossiers

(82%) incluent un financement participatif (des citoyens), ce qui majore de 3 euros/MWh le prix d'achat de l'électricité par EDF établi à 55,5 euros/MWh pour cet appel. Près de la moitié sont implantés sur des terrains dégradés : friches industrielles, anciennes décharges ou carrières.

→ Cascade d'appels d'offres

Les trois autres appels d'offres pour ces puissances s'étagèrent jusqu'en 2019. Prochaine période de remise des dossiers : 9 mai-1^{er} juin 2018.

Parallèlement, d'autres appels sont en cours sur les deux ans à venir. Six restent sur les neuf destinés aux implantations de modules sur bâtiment de 100 kWc à 8 MWh. Huit sur les neuf concernant les installations en autoconsommation (100 kWc-500 kWc) sont ouverts à partir de 2018. Enfin, trois appels s'intéressent à l'innovation dans la production d'électricité solaire. Le premier s'est terminé le 1^{er} octobre. Prochaines dates de clôture : 1^{er} octobre 2018, 30 septembre 2019.

→ 1,7% de la consommation d'électricité

L'énergie solaire photovoltaïque a produit, en 2016, 8,3 TWh - 1,7% de la consommation d'électricité - en France. C'est la deuxième énergie nouvelle renouvelable derrière l'éolienne qui a fourni 21 TWh (4,3%). Les puissances installées vont continuer de croître pour atteindre les objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie en 2018.

L'énergie hydraulique, traditionnelle, arrive toujours en tête des renouvelables avec 59,2 TWh injectés en 2016, soit 12,3% de la consommation.

Détails des appels d'offres sur :

www.photovoltaïque.info/

[Procédures-d-appels-d-offres.html](#). ■

APPEL À PROJETS GÉOTHERMIE

Les entreprises qui veulent répondre à l'appel à projets européen Geothermica ont jusqu'au 24 novembre pour le faire. L'appel vise les démonstrateurs et briques technologiques qui accroissent la compétitivité de la filière géothermique, en production d'électricité ou en récupération de chaleur, et son intégration dans un mix énergétique. En électricité, tous les stades peuvent être améliorés, de la connaissance de la ressource à l'exploitation. En chaleur, il s'agit de travailler sur le forage, l'injection et le pompage, la durée de vie (tubage) et la reconversion d'ouvrages à échangeur profond, géothermiques ou pétroliers. www.geothermica.eu et www.ademe.fr/actualites/appels-a-projets.



La réhabilitation de forages profonds par tubage en fibre de verre, à Chevilly-Larue (Val-de-Marne), a valu à CFG Services un trophée de la géothermie en 2016.

RECHARGER À N'IMPORTE QUELLE BORNE

L'électricité pour véhicule s'obtient soit en payant au coup par coup à une borne, soit en s'abonnant auprès d'un opérateur. Dans ce 2^e cas, vous pouvez, par exemple, réserver une place de recharge ou savoir où recharger, mais surtout vous avez accès à tous les points qui livrent de l'électricité pour cet usage, à la manière d'une carte bancaire qui vous donne de l'argent à partir de n'importe quel distributeur. C'est ce qui s'appelle l'interopérabilité des réseaux publics de recharge.

La Fédération nationale des collectivités concédantes et régies avait signé avec la plate-forme d'interopérabilité Gireve une convention en février 2016, sur ce point. Leur accord fixe un cadre de coopération entre Gireve et les collectivités adhérentes à la FNCCR. Celles-ci lui communiquent, notamment, la localisation et la

© EPAMSA



Point de recharge de l'Epamsa à Bonnières-sur-Seine (Yvelines) sur le territoire Grand Paris Seine & Oise.

disponibilité de leurs infrastructures de recharge.

→ Cent points de recharge

L'Établissement public d'aménagement du Mantois Seine-Aval (Epamsa, Yvelines) collabore avec les acteurs de l'interopérabilité dont Gireve. En tant que coordinateur du déploiement du réseau Électricité Seine Aval (ESA), il a signé des accords d'itinérance fin 2016 et début 2017 avec quatre opérateurs - Belib, Chargemap, Freshmile et Bosch EV - afin que leurs clients accèdent aux 41 bornes de recharge (100 points) de son réseau. Il faudra attendre 2019, quand la gratuité de la recharge sera levée, pour que les abonnés d'Électricité Seine Aval puissent, à leur tour, charger sur les bornes de ces opérateurs.

L'Epamsa développe le territoire "Grand Paris Seine & Oise". ■

40 MILLIONS CONTRE LES FUITES D'EAU

Le 3^e appel à projets de lutte contre les fuites d'eau lancé par l'Agence de l'eau Seine-Normandie se clôture le 1^{er} décembre. Il est ouvert aux collectivités territoriales et aux établissements intercommunaux. Sont financés jusqu'à 50% plafonnés à 2 millions d'euros le remplacement ou la réhabilitation de canalisations par des travaux « structurants et pérennes ». Les collectivités rurales bénéficieront d'un montant total de 30 millions d'euros tandis que les urbaines auront accès à 10 millions « au maximum ». En urbain, il faudra de l'innovation et la « sécurisation des équipements de défense externe contre l'incendie, connectés au réseau d'eau sous pression ».

2 GUIDES BÉTON

Deux guides rappellent les avantages du béton, le premier en génie civil, le second en urbanisme. Les 11 pages du Guide des solutions en béton préfabriqué pour le génie civil en développent les atouts pour les murs de soutènement, les écrans acoustiques ferroviaires et routiers, les ponts à poutres, ouvrages enterrés, voussoirs de tunnel, mâts d'éolienne, passages à faune, etc. Il est édité par la Fédération des industries du béton (www.fig.org).

Le second est proposé par le Syndicat national du béton prêt à l'emploi. Centré sur la ville, il démontre comment le béton peut répondre à 7 exigences : favoriser, restaurer et préserver la biodiversité, atténuer les effets des inondations, agir contre les îlots de chaleur, réduire les dépenses énergétiques, améliorer la qualité de l'air, limiter le recours aux énergies primaires, accroître le confort acoustique.

La brochure de 18 pages Éco-urbanisme : 7 propositions du béton prêt à l'emploi se consulte sur internet (<http://bit.ly/2tOe7JE>).

SUITE D'EUROPAN À PARIS-SACLAY

Le groupement mené par l'Agence J (Suzanne Jubert) a remporté l'élaboration du schéma de cohérence urbaine et paysagère du campus-vallée de l'Université Paris-Sud (Essonne), à la mi-juin.

À ses côtés : Bassinet Turquin Paysages, Ville Ouverte et Alto Step. Le concours avait été lancé par l'Établissement public d'aménagement Paris-Saclay, l'Université, la Communauté Paris-Saclay, les villes d'Orsay et Bures-sur-Yvette.

L'Agence J (architecture et urbanisme) n'est pas inconnue des maîtres d'ouvrage puisqu'elle avait concouru à Europa en 2013 sur le thème de la ville adaptable, pour une partie du site*. L'équipe déploie son schéma autour de la rivière Yvette qui traverse le campus-vallée d'est en ouest.

* Cf. Travaux n°909, octobre 2014, page 8.

5^e ASSISES DE LA MOBILITÉ : QUELS TRANSPORTS EN PÉRIODE DE RESTRICTIONS



© PHILIPPE MONTIGNY/CAPA PICTURES/SCF RÉSEAU

Tous les réseaux de transport doivent être remis à niveau. Ici, renouvellement de plus de 4 km de voie, près de Vierzon (Cher), fin 2016.

Les 5^e assises de la mobilité, organisées par le ministère des Transports à partir du 19 septembre, doivent « identifier les attentes et besoins à l'horizon 2030 et faire émerger de nouvelles solutions dans les territoires ».

À cette occasion, sont consultés tous les acteurs concernés - entreprises, associations, élus, etc.

Les conclusions des assises seront remises aux autorités organisatrices des transports pour qu'elles en débattent. Fin de cette étape en décembre.

Une loi d'orientation suivra au 1^{er} semestre 2018 concrétisée par une programmation année par année. Elle doit donner une vision à moyen terme des infrastructures.

→ Audits techniques

Le 19 juillet, Elisabeth Borne, ministre, avait présenté la feuille de route du gouvernement sur la mobilité devant la commission développement durable de l'Assemblée nationale, et répondu aux questions des parlementaires.

Elle estimait que nous n'étions plus dans une phase de grands plans d'infrastructures, qu'il fallait trouver de « nouvelles réponses aux nouveaux besoins dans un contexte financier contraint. Orienter, c'est préparer la mobilité de demain. »

Il faut « passer d'une politique d'équipements à une stratégie des mobilités ». Selon elle, les besoins sont mal satisfaits : 40 % des habitants n'ont que leur voiture pour se déplacer, les routes et les transports publics sont saturés. Il y a trop de routes et pas assez de liaisons par train. Les réseaux - fer, fleuve, route -

doivent être remis à niveau. Trop d'argent a été consacré aux longues distances. Des audits techniques seront menés sur les réseaux.

→ 11 milliards sur 18 ont été identifiés

Les grands projets comme la ligne ferroviaire Lyon-Turin et le Canal Seine Nord Europe ne sont pas remis en cause mais peuvent connaître des modifications. Le projet Lyon-Turin, étant financé à 40 % par l'Union européenne et 35 % par l'Italie, il semble difficile que la France décide seule de son avenir.

L'État s'est engagé à consacrer 18 milliards d'euros aux grandes infrastructures (hors Grand Paris Express). Sur cette somme, seuls 11 milliards ont été identifiés. Et c'est sans compter l'entretien des réseaux routiers ou fluviaux et la modernisation du rail.

→ Exemple de la Finlande

La Finlande est invitée à participer aux 5^e assises suite à la visite d'Elisabeth Borne dans le pays, début août.

La ministre finlandaise des transports et des télécommunications a présenté leurs innovations et services en matière de mobilité au quotidien. ■

IL FAUT PASSER D'UNE POLITIQUE D'ÉQUIPEMENTS À UNE STRATÉGIE DES MOBILITÉS



Il y a trop de routes et pas assez de liaisons par train.

PRÈS DE 79 MILLIARDS D'EUROS D'ICI À 2040

Il faudrait dépenser 94 000 milliards de dollars - 78 910 milliards d'euros - dans les infrastructures d'ici à 2040 pour accompagner la croissance économique dans le monde et réduire les écarts entre pays, selon un bureau d'études britannique spécialisé dans les prévisions économiques. Oxford Economics s'est basé sur une population de 9,2 milliards d'habitants en 2040, avec une hausse de 46 % des urbains.

Selon les auteurs de ce rapport cité par *La Tribune* du 31 juillet, la France dépense 2,56 % de son produit intérieur brut en infrastructures, ce qui est au-dessus de la moyenne européenne de 2,26 %. À ce rythme, elle devrait répondre à 99 % de ses besoins en investissement en 2040.

COLAS AU MAROC ET EN AMÉRIQUE DU NORD

Colas Rail a remporté le marché de l'extension de la ligne 2 du tramway de Rabat-Salé (Maroc) en groupement avec GTR, filiale routière de Colas au Maroc. Le contrat de 29 millions d'euros comprend la réalisation des plateformes, la pose des voies ferrées et la signalisation sur 7 km ainsi que l'ajout d'une voie de remisage et le déplacement de la station Gare de Salé. Les travaux ont débuté en août pour une mise en service au second semestre 2019. Colas Rail a déjà contribué aux lignes 1 et 2 de Rabat. Toujours au Maroc, l'entreprise achève la pose de la voie ferrée et de la caténaire de la LGV entre Tanger et Kenitra, à livrer à la fin de l'année ou début 2018.

→ Autoroute au Canada

En Amérique du Nord, deux filiales de Colas Canada sont partie prenante de la construction et la maintenance du périphérique sud-ouest de Calgary (Alberta). Alberta Highway Services a remporté la



Ligne 1 du tramway de Rabat (Maroc) à laquelle Colas Rail a participé en 2011.

maintenance jusqu'en 2051 - 136 millions d'euros - en sous-traitance du groupement Mountain View Partners (MVP) qui construit et entretient 31 km d'autoroutes, 14 échangeurs, 47 ponts et un tunnel, ceci dans le cadre d'un partenariat public privé.

L'autre filiale, Standard General Calgary, va fournir la totalité des enrobés du projet, pour 64 millions d'euros. Le chantier se termine fin 2021.

Signalons que Colas Canada s'est engagée dans le rachat de Miller McAsphalt, spécialisé dans les travaux routiers et la distribution de bitume en Ontario, opération en cours d'approbation.

→ État de New-York

Dans l'État de New-York (États-Unis), Barrett Industries Corporation, filiale de Colas Inc., a repris les actifs du groupe Graymont Materials (carrières, postes d'enrobage, centrales à béton). ■

PARTENARIATS POUR DÉVELOPPER L'ÉOLIEN FLOTTANT

Ideol, conceptrice de fondations flottantes pour éoliennes en mer, a signé deux partenariats début 2017, au Royaume-Uni et en Irlande.

L'accord stratégique avec Atlantis Resources (RU) vise à développer 1,5 GW de projets éoliens en mer, avec une 1^{re} tranche de 100 MW en 2021. Atlantis se charge de la ressource en mer, des autorisations et du financement. Ideol se penche sur l'ingénierie technique et fournira les fondations flottantes.

En Irlande, l'entreprise française s'est rapprochée de Gaelectric avec laquelle elle évalue actuellement plusieurs sites

d'implantation d'éoliennes au large des côtes. Un projet initial de 30 MW sera suivi de parcs de plusieurs gigawatts. Gaelectric est spécialisée dans les énergies nouvelles renouvelables, à terre ou en mer, et le stockage d'énergie. Elle participe au démonstrateur North Irish Sea Array avec Oriel Wind Farm, en mer d'Irlande, d'une puissance de 870 MW, où différentes technologies peuvent être testées en conditions réelles.

→ Deux flotteurs différents

Ideol fait appel à des spécialistes du monde entier. En 2016, elle a lancé avec Hitachi Zosen (Japon) la construction

de deux flotteurs : l'un en béton, l'autre en acier, surmontés d'éoliennes différentes et ancrés par des lignes en matériaux différents. ■



À travers les partenariats, Ideol veut passer à la vitesse supérieure, avec des parcs.



Construction de l'anneau carré flottant en béton à Saint-Nazaire.

UNE ÉOLIENNE EN PARTANCE POUR LE LARGE

La fondation flottante en béton destinée à porter une éolienne offshore a été construite par Bouygues Travaux Publics cet été à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique). Elle a ensuite reçu l'interface entre fondation et mât, puis la turbine. Le remorquage en mer de l'éolienne assemblée aura lieu d'ici la fin de l'année vers le site d'essais Sem-Rev de l'École centrale de Nantes, à 22 km au large du Croisic.

La fondation, baptisée Floatgen, a été conçue par Ideol*. Son système d'ancrage en mer, composé de six lignes en nylon, a été également installé cet été.

* Cf. Travaux n°914, avril-mai 2015, p. 10 ; n°918, octobre 2015, p. 14 ; n°926, septembre 2016, p. 11.

LGV LONDRES-BIRMINGHAM EN JOINT-VENTURES

La joint-venture regroupant Eiffage et les groupes britanniques Carillion et Kier, a remporté la conception-réalisation de 2 lots de génie civil de la 1^{re} phase de la ligne à grande vitesse entre Londres et Birmingham (Angleterre). Dans ce cadre, Arcadis UK (mandataire), Setec et Cowi se sont regroupées pour la conception. Les travaux de ces 80 km de voie ferrée sur les 190 qui séparent les deux grandes villes, comprennent des terrassements, 14 viaducs, 86 ouvrages d'art, 5 km de tranchées couvertes, etc. Montant des 2 lots : 1,6 milliard de livres. Mise en service : 2026.

ÉCOSSE : DES PROJETS ÉOLIENS CHANGENT DE MAINS

EDF Energy Renewables, filiale d'EDF, a acheté onze fermes éoliennes à Partnerships for Renewables, gestionnaire d'actifs et développeur, soit une puissance potentielle de 600 MW. Les projets, pour la plupart terrestres, en sont à des stades différents. Trois ont obtenu un permis de construire, un est en cours d'instruction, et sept sont en développement.

NEWHEAT : 80% À L'INTERNATIONAL

Newheat, spécialiste des centrales solaires thermiques pour l'industrie et les réseaux de chaleur, espère en réaliser 50 d'ici 2024 dont 80% à l'international. Pour sortir les premières, l'entreprise de Bègles (Gironde) compte sur le 1,8 million d'euros levé cet été auprès de Noria, Ponticelli Frères, du groupe Etchart, et de ses investisseurs historiques.

* Cf. Travaux n°929, p. 14.

LGV MALAISIENNE-SINGAPOUR

Systra et Meinhardt vont collaborer sur les études de la LGV entre Kuala-Lumpur (Malaisie) et Singapour (plus de 300 km à vol d'oiseau). Le premier contrat porte sur deux gares internationales, en Malaisie. Le second concerne les 38 premiers kilomètres de la ligne. Par ailleurs, Systra a acquis, fin août, International Bridge Technologies (IBT, États-Unis), spécialiste des ponts à vousoirs et haubanés.

RACHAT DANS LES FONDATIONS

Franki Foundations a fait l'acquisition de Martello, groupe britannique spécialisé dans les projets complexes de fondations. La filiale du groupe belge Besix se renforce ainsi au Royaume-Uni et élargit l'éventail de ses techniques.

PARTENARIAT VILLE DURABLE

Suez et Bouygues Construction ont signé un protocole d'accord mondial de trois ans sur la ville durable. Les deux groupes vont collaborer sur la valorisation des déchets et des matériaux recyclés, le traitement et la gestion de l'eau, la logistique de chantier, les boucles locales de ressources ou les solutions décentralisées (énergie), les éco quartiers et les partenariats publics privés.

MADAGASCAR RÉNOVE SES AÉROPORTS

Ravinala Airports, concessionnaire depuis fin décembre pour vingt-huit ans, des aéroports d'Antananarivo et de Nosy Be (Madagascar), commence leur rénovation. Son actionnariat se partage entre ADP (35%), Bouygues (20%) et Meridiam (45%). Il conçoit, construit et exploitera le nouveau terminal international de 17 500 m² sur l'aéroport d'Ivato (Antananarivo). Il rénove le terminal existant et la piste, et met les installations en conformité.

À l'aéroport de Fascène (Nosy Be), il refait la piste et le terminal et met tout en conformité.

Les travaux sont répartis entre Bouygues Bâtiment International et Colas Madagascar.

ADP est chargé de l'assistance à l'exploitation et de la maintenance.



Aéroport de l'île de Nosy Be (Madagascar) avant travaux.

© JACQUES FERNANDES/COULAS

GRAND PARIS EXPRESS : TRAVAUX D'INTERCONNEXION



© SGP-ROLLANDO

Ripage d'une dalle de 7 000 tonnes, toit de la future station Fort d'Issy-Vanves-Clamart (Hauts-de-Seine), au croisement avec une ligne de train.

La future gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart (Hauts-de-Seine) de la ligne 15 sud du Grand Paris Express prend forme. Mi-août, sa dalle de toiture a été mise en place. Elle vient fermer l'enveloppe de la gare avec les parois moulées déjà réalisées. Reste à creuser son volume intérieur sur 40 m de profondeur. La gare est en grande partie enterrée car elle croise la ligne N du Transilien avec laquelle elle sera en correspondance.

L'opération a duré quatre jours, 24 h/24, et mobilisé 137 personnes. SNCF Réseau a d'abord enlevé les huit tabliers provisoires de 30 m de long, installés à l'emplacement de la future station début 2017, découpé les piles, déposé les voies et dégagé les caténaires de la ligne N. → 42 chariots automoteurs

Bouygues TP a piloté la mise en place de la couverture de 7 000 tonnes, 60 m

de long, 2 000 m², préfabriquée sur chantier en cinq mois.

Quarante-deux chariots automoteurs l'ont amenée à sa position définitive, en trois heures.

UNIFIER LES GARES

Les gares et stations du futur Grand Paris auront les mêmes caractéristiques qu'elles soient sur les nouvelles lignes ou sur les prolongations des existantes. Le Syndicat des transports d'Île-de-France (Stif) et la Société du Grand Paris (SGP) ont réaffirmé en juin leur engagement en faveur de l'intermodalité et des espaces publics autour des 68 nouvelles stations. Trois milliards d'euros y seront investis d'ici à 2025.

Chaque gare fait l'objet d'un comité de pôle réunissant la SGP, l'État, la Région, le Stif, les collectivités locales et les opérateurs de transport. Les études se terminent en 2018-2019.

CHEVAUCHEMENT DE LIGNES SOUTERRAINES

Le prolongement de la ligne 14, vers la banlieue nord-ouest de Paris, génère des croisements avec les transports souterrains existants. À la future station Clichy-Saint-Ouen, passe aussi la ligne RER C1. La station sera raccordée à sa baie d'aération mécanisée - puits de secours et ventilation - par un ouvrage cadre sous le tube du RER.

→ Pousée vers le haut

Les sables de Beauchamp sont trop fins et trop argileux pour être stabilisés dans la nappe par injection de coulis. Ils ont donc été congelés à -10°C sur 80 cm d'épaisseur pendant le creusement⁽¹⁾. L'ouvrage cadre de 26 m de long par 12

de large et 8 de haut est construit en six sections. En effet, pendant l'excavation, sa coque congelée a tendance à remonter et à pousser le tunnel RER situé au-dessus. L'ouvrage est donc lesté jusqu'à ce que la nappe reprenne son équilibre autour, à la fin de la congélation.

Ces travaux s'achèvent en novembre. La nouvelle station de la ligne 14 sera livrée à la mi-2018. Le chantier d'un coût total de 60 millions d'euros, est confié à Spie Batignolles TPCI (mandataire) avec Chantiers Modernes Construction, Sogea TPI, Dodin Campenon Bernard, Spie Fondations et Botte Fondations. ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux n°933, pp 92-98.

SNCF Réseau a ensuite remblayé les côtés de la dalle et remis en place les rails pour rétablir le trafic.

Après évacuation des 130 000 tonnes de la boîte gare, seront construits les planchers de bas en haut.

Le gros œuvre se terminera une fois que les tunneliers en provenance de Pont-de-Sèvres à l'ouest et de Bagneux à l'est auront débouché à la station.

→ Correspondance en 2022

Début 2018, commenceront les travaux du couloir d'interconnexion entre les deux lignes et la mise en conformité de tous les quais.

Ouverture de la correspondance en 2022.

Les travaux sont réalisés sous double maîtrise d'ouvrage - SNCF Réseau et la Société du Grand Paris - mais c'est cette dernière qui les finance. ■



Préparation de la congélation.

© SPIE BATIGNOLLES

RÉHABILITATION DE 45 HECTARES INDUSTRIELS



Le complexe de loisirs et de commerces "Hall in One" est en travaux.

La réhabilitation du site industriel de Saint-Chamond (Loire) se concrétise. Giat Industries qui en occupait une bonne partie a fermé en 2006. Vingt hectares sur les 45 de l'opération baptisée Novaciéries, sont désormais dédiés à des activités économiques. Leur commercialisation, après construction neuve ou réhabilitation de l'ancien, est en cours de finalisation. Sur cette moitié ouest du terrain, douze entreprises se sont installées ou s'y sont étendues.

→ Traitement des terres mûrement réfléchi

Saint-Étienne Métropole et la ville de Saint-Chamond située au nord de l'agglomération stéphanoise, ont voulu que la friche sur laquelle étaient restées une quinzaine d'entreprises en particulier de la mécanique, conserve une vocation économique. Novaciéries abrite un millier d'emplois contre 350 avant reconversion. La frange proche du centre-ville est réservée aux logements.

Les collectivités se sont appuyées sur l'Établissement public foncier de l'ouest Rhône-Alpes pour l'acquisition, la dépollution et les démolitions. Au total, 145 000 t de terres non saines ont été gérées par différents acteurs avant d'envisager de nouvelles occupations des terrains. Une partie à pollution non dégradée - 21 000 t - a été confinée sur place dans une alvéole - ancien cratère d'essais de véhicules de guerre -, et 1 % a été évacué à l'extérieur. Le reste a été dépollué sur place et réutilisé. Les solutions choisies ont généré d'importantes économies⁽¹⁾.

La société publique locale Cap Métropole est chargée de la mise en œuvre du projet pour quinze ans. L'opération s'élève à 116 millions d'euros dont 36 à la charge du privé (dont les 20 ha industriels) et 80 par les collectivités dont la dépollution. Le pôle de loisirs et commerces de 10 500 m² est en chantier. Les parois du cinéma sont en voiles de béton de



Les voiles de béton du futur cinéma sont coulés sur plus de 11 m par des cheminées.

11,5 m de haut, coulés par des cheminées. Grâce à ce procédé de coulage de haut en bas, utilisé par Cemex avec BLB Constructions, le béton monte régulièrement et le contrôle de la poussée hydrostatique sur les coffrages est facilité.

→ Haute cheminée conservée

Le chantier des 50 logements commence et prendra fin dans un an. Le parc urbain de 5,5 ha qui traverse Novaciéries du nord au sud, devrait être terminé au printemps. Un hectare et demi est déjà ouvert au public. L'ancien viaduc ferroviaire a été reconverti en promenade. La réfection de 4 000 m² de locaux d'activité se termine. Une cheminée de plus de 100 m a été conservée. ■



Le viaduc ferroviaire des anciennes aciéries a été réaménagé en promenade.

ITER COOPÈRE AVEC LE KAZAKHSTAN

Iter Organization a signé un accord de coopération technique avec le Centre nucléaire national du Kazakhstan (1 600 chercheurs), en juin. L'accord prévoit des échanges d'experts, l'accès au tokamak kazakh KTM - cœur de la fusion - pour tester des matériaux sous flux de particules, ainsi que le développement de systèmes de diagnostic pour Iter, en construction à Saint-Paul-Lez-Durance (Bouches-du-Rhône)*. Le Kazakhstan abrite des mines de béryllium, un métal à propriétés exceptionnelles, source complémentaire de neutrons dans le réacteur expérimental Iter. Le pays n'est pas membre du programme international.

* Cf. actualité, Travaux n°935, septembre 2017.

MAINTENANCE NUCLÉAIRE À SAINT-DIZIER

La mise en service de la base nationale de maintenance nucléaire d'EDF dans l'agglomération de Saint-Dizier (Haute-Marne) est prévue pour la fin de l'année. Elle abrite l'activité de maintenance et l'entreposage du parc de machines, outillages et pièces de rechange générées par la remise à niveau des 58 réacteurs d'EDF. Le bâtiment a été conçu par RTR Architectes (Marne). Deux entreprises vosgiennes - VD Industry et Pyrometal - ont fourni et installé les cloisons intérieures (châssis acier) répondant aux exigences vis-à-vis de l'incendie. La base, implantée sur un terrain de 10 hectares, déploie 18 000 m² en trois zones : administrative, maintenance, entreposage. Coût : 42 millions d'euros.



Le chantier se termine fin 2017.

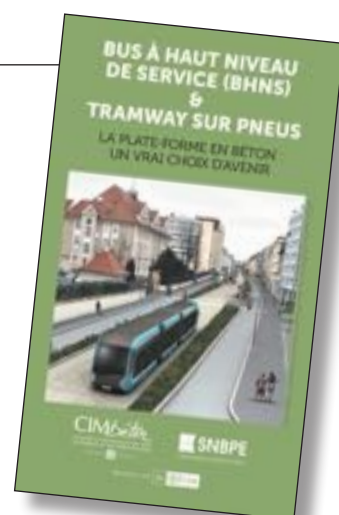
(1) Cf. Travaux n°906, juin 2014, page 8. Voir intervention de Cap Métropole aux journées "Reconvertir les friches polluées", 28-29 mars 2017, Ademe (www.reconversion-friches.ademe.fr/le_recueil.htm).

VOIES BUS EN BÉTON

Les chaussées en béton sont connues pour leur solidité. Elles conviennent donc pour les voies ou parties de voie très sollicitées comme les zones de freinage ou les virages serrés. Le béton a été choisi comme revêtement sur les 10 km du bus à haut niveau de service (BHNS) de Melun-Sénart (Seine-et-Marne). Il est aussi utilisé à Metz, Nîmes, Nantes, Stras-

bourg (ligne G), Douai (Évéole). Le tramway sur pneus entre Châtillon (Hauts-de-Seine) et Viroflay (Yvelines), véhicule assimilé à un BHNS, roule sur une chaussée en dalles de béton à joints goujonnés, guidé par un rail central. Ses exemples sont cités dans la brochure que le Syndicat national du béton prêt à l'emploi consacre aux plates-formes en

béton pour ces transports. Les témoignages qui y figurent mettent en avant la résistance à l'orniérage, le faible entretien, la possibilité d'avoir un revêtement clair qui met bien en évidence la voie de circulation en site propre et diminuerait le besoin en éclairage. Le rendu uniforme et l'adhérence sont aussi mentionnés. <http://bit.ly/2lbqcb0> ■



LES SENTINELLES DE LA POLLUTION DES SOLS

Des organismes vivants, animaux, végétaux, peuvent servir à mieux connaître la pollution d'un sol. Ces bio-indicateurs viennent compléter et affiner les analyses physico-chimiques. Ils détectent le transfert des contaminants et leur effet global. Ils sont insuffisamment utilisés, selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie qui publie un

recueil "Expertises" sur le sujet. Y sont exposés les résultats des recherches du programme Appoline sur les bio-indicateurs de qualité des sols. Trois fiches témoignent d'utilisation sur le terrain à partir de cas réels. Chaque bio-indicateur est présenté sur plusieurs pages : végétaux (prélevés et analysés), escargots (présence de métaux après vingt-huit jours de séjour

in situ), nombre de nématodes (petits vers) dans le sol, analyse des différentes espèces de verre de terre, détection dans les plantes de modifications cellulaires générées par la pollution. Ces outils s'emploient à l'étape du diagnostic et en réhabilitation végétale de terrain, et selon un protocole précis. www.ademe.fr/bio-indicateurs-letat-sols ■



RÉSEAUX DE VENTILATION ÉTANCHES

Une certaine étanchéité à l'air est exigée dans la réglementation thermique 2012. Un guide édité par le Centre scientifique et technique du

bâtiment aide à obtenir celle des réseaux de ventilation, depuis leur conception jusqu'à la vérification en fin de chantier.

Le livre rédigé par un bureau d'études spécialisé inclut les méthodes pour améliorer l'étanchéité. www.cstb.fr ■



S'INITIER À L'ACOUSTIQUE

L'acoustique est une science complexe. Pour bien traiter le bruit, il faut en déterminer l'origine et la transmission. Le manuel sur l'acous-

tique du bâtiment publié par Eyrolles et écrit par Jean-Marie Rapin, est destiné aux artisans, techniciens municipaux, architectes et à tous ceux qui

veulent comprendre ces phénomènes. Largement illustré de schémas, il donne les bases et alerte sur les idées reçues. www.eyrolles.com ■



AIDE AU CHOIX DES MARCHÉS PUBLICS

La Mission interministérielle pour la qualité des constructions publiques (MIQCP) publie deux numéros de *Médiations* sur les procédures de maîtrise d'œuvre selon que leur montant déclenche une mise en concurrence

européenne ou non (seuil de 135 000 euros HT pour l'État, 209 000 pour les collectivités territoriales). Ces brochures d'une vingtaine de pages prennent en compte les textes récents (2015-2016).

Signalons également la mise à jour du guide sur les concours de maîtrise d'œuvre suite au décret n°2017-516 d'avril dernier. Par ailleurs, la MIQCP, organisme de conseil et d'assistance gratuit, anime

deux clubs Bim utilisateurs (conception-construction et gestion-exploitation-maintenance) sous l'égide du Plan transition énergétique dans le bâtiment. www.miqcp.gouv.fr ■

L'ÉCOULEMENT DES EAUX DANS LES SITES MINIERES ANCIENS

Des collectivités locales et des propriétaires privés ont hérité de sites miniers (charbon) au nord d'Alès (Gard). Les systèmes d'écoulement des eaux pluviales et de ruissellement sont restés en place. Certains remontent au milieu du 19^e siècle. Les compagnies minières les ont recouverts afin d'augmenter les surfaces de travail planes, rares dans

ces vallées étroites. Depuis l'abandon des mines dans les années 1950-1980, ces ouvrages se sont fait oublier. Un effondrement spectaculaire d'un ruisseau couvert, en 2012 sous une installation sportive de Robiac-Rochessadoule, a rafraîchi les mémoires. Autre risque : celui d'inondation par bouchage-débouchage brutal d'une canalisation, etc.

Ces ouvrages ne sont pas considérés comme conséquence directe de l'exploitation. Ils ne sont donc pas couverts par les procédures de sinistres miniers, d'où la difficulté de financer les travaux de sécurisation. Une étude de novembre 2016 du Commissariat général à l'environnement et au développement durable

d'Alexis Delaunay et Edmond Graszka, analyse ces situations et propose des solutions. L'École des mines d'Alès a hiérarchisé les travaux pour 70 ruisseaux et les a estimés à 65 millions d'euros (2015). www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/164000730.pdf ■

Enka solutions

Géosynthétiques hautes performances pour le génie civil et les travaux publics

Légers, souples et faciles à installer, les produits Enka Solutions accompagnent les projets les plus exigeants partout dans le monde.

Low & Bonar
12 rue de la Renaissance / 92184 Antony Cedex / T +33 157636740
info@enkasolutions.com / www.enkasolutions.com

BON DE COMMANDE

WWW.REVUE-TRAVAUX.FR

1917 | 2017
LA REVUE
TRAVAUX
A 100 ANS

OFFRE 100 ANS* :
PAR NUMÉRO
10€
AU LIEU DE 25€

À renvoyer à : Com et Com - Service Abonnement TRAVAUX - Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot - 92350 Le Plessis-Robinson
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22 - Fax : +33 (0)1 40 94 22 32 - Email : revue-travaux@cometcom.fr

OUI, je souhaite commander des numéros séparés de la Revue **TRAVAUX**

Numéro de la revue	Date de parution	Quantité
Nombre total d'exemplaires >		

Au tarif de :

- 10 € l'exemplaire (moins de 20 exemplaires), soit : _____ numéros x 10 € = _____ €
- 9 € l'exemplaire (du 21^e au 100^e exemplaire), soit : _____ numéros x 9 € = _____ €
- 8 € l'exemplaire (du 101^e au 500^e exemplaire), soit : _____ numéros x 8 € = _____ €

JE VOUS INDIQUE MES COORDONNÉES :

Nom _____ Prénom _____

Entreprise _____ Fonction _____

Adresse _____

Code postal [] [] [] [] [] Ville _____

Tél. : _____ Fax : _____

Email : _____ Merci de ne pas communiquer mon adresse mail.

Je joins mon règlement d'un montant de _____ € TTC par Chèque à l'ordre de COM'1 ÉVIDENCE

Je réglerai à réception de la facture

Je souhaite recevoir une facture acquittée

**ATTENTION : tous les règlements doivent être libellés
exclusivement à l'ordre de COM'1 ÉVIDENCE**

Date, signature et cachet de l'entreprise obligatoire

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 6 AU 10 NOVEMBRE

Batimat

Lieu : Paris Nord (Villepinte)
www.batimat.com

• 7 ET 8 NOVEMBRE

Forum africain des infrastructures

Lieu : Marrakech (Maroc)
http://i-conferences.org

• 7 AU 10 NOVEMBRE

Interclima Elec

Lieu : Paris Nord (Villepinte)
www.interclimaelec.com

• 13 AU 16 NOVEMBRE

Congrès de l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain

Lieu : Paris (Palais des congrès)
www.aftes2017.com/fr/

• 16 NOVEMBRE

Assises nationales de l'éolien terrestre

Lieu : Paris (Maison de la chimie)
www.enr.fr

• 21 AU 23 NOVEMBRE

Salon des maires

Lieu : Paris (Porte de Versailles)
www.salondesmaires.com

• 27 AU 29 NOVEMBRE

8^e assises nationales de l'environnement sonore

Lieu : Paris (Cité des sciences et de l'industrie)
www.bruit.fr

• 6 AU 8 DÉCEMBRE

Conférence Stuva (tunnels et infrastructures)

Lieu : Stuttgart (Allemagne)
www.stuva-conference.com/en/

• 18 DÉCEMBRE

Requalification innovante des friches industrielles

Lieu : Lyon
www.indura.fr

• 24 ET 25 JANVIER 2018

Rencontres de la mobilité intelligente

Lieu : Montrouge (Hauts-de-Seine)
www.congres-atecitsfrance.fr

FORMATIONS

À NOTER :

La formation continue de l'École des ponts s'est installée au 24 boulevard de l'Hôpital, Paris 13^e.

• 13 ET 14 NOVEMBRE

Nouveau code de la commande publique Bim

Lieu : Paris
http://evenements.infopro-digital.com

• 21 NOVEMBRE

Diagnostic des chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art

Lieu : Paris
http://formation-continue.enpc.fr

• 23 ET 24 NOVEMBRE

Management de projet en Bim

Lieu : Paris
http://formation-continue.enpc.fr

• 27 NOVEMBRE

Mettre le Bim au service des infrastructures des collectivités

Lieu : Paris
http://evenements.infopro-digital.com

• 27 ET 28 NOVEMBRE

Transport urbain par câbles : faisabilité, mise en œuvre

Lieu : Paris
http://formation-continue.enpc.fr

• 29 NOVEMBRE AU 1^{er} DÉCEMBRE

Projets de tunnels : prise en compte des risques

Lieu : Paris
http://formation-continue.enpc.fr

• 30 NOVEMBRE

Bim et infrastructures

Lieu : Paris (FNTP)
http://formation-continue.enpc.fr

• 5 ET 6 DÉCEMBRE

Gestion des sédiments de dragage : traitement à terre et valorisation

Lieu : Paris
http://formation-continue.enpc.fr

NOMINATIONS

EDF :

Marianne Laigneau a été nommée directrice exécutive chargée de l'international, dans le groupe, et Cédric Lewandowski, directeur exécutif chargé de l'innovation, de la stratégie et de la programmation.

EIFFAGE :

Marc Legrand, président d'Eiffage Rail Express, va également diriger Eiffage Concessions et Eiffage Services.

FRT PACA :

François Debain préside la Fédération régionale des travaux publics en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Il prend la suite de Laurent Amar.

PLAINE DU VAR :

Olivier Sassi a été nommé directeur général de l'Établissement

public d'aménagement Éco-Val-lée Plaine du Var. Il succède à Pascal Gauthier.

QUALITÉ :

Roland Peylet a été nommé, par décret, président de la Mission interministérielle pour la qualité des constructions publiques.

RATP :

Catherine Guillouard remplace Elisabeth Borne (ministre des Transports) comme présidente-directrice générale de la Régie. Paul Tirvaudey devient son directeur de cabinet.

SNCF RÉSEAU :

Peggy Louppe est chargée de la transformation de SNCF Réseau.

VINCI :

Philippe Dewost est nommé directeur de Leonard, structure d'innovation et de prospective du groupe.

formation continue  www.formation-continue-unil-epfl.ch



- Formation de 3 jours (donnée en anglais) par le Prof. Lyesse Laloui, Ph.D., et Alessandro F. Rotta Loria, P.E.
- Organisée par l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)
- Comprendre les géostructures énergétiques pour le chauffage et le refroidissement de bâtiments et d'infrastructures ainsi que leur dimensionnement énergétique, géotechnique et structural.

En savoir plus : www.formation-continue-unil-epfl.ch

Formation Continue UNIL-EPFL | EPFL Innovation Park | Suisse
Tél. : +41 21 693 71 20 | formcont@unil.ch

ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

PRÉPARER DEMAIN AVEC UNE ÉTHIQUE HUMAINE ET ENVIRONNEMENTALE

UNE EXPÉRIENCE ET DES OUTILS UNIQUES PERMETTENT À ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT, L'UNE DES ENTITÉS DU GROUPE ARTELIA, D’AFFIRMER UNE EMPREINTE INTERNATIONALE DE HAUT NIVEAU SUR LES PROJETS D’INFRASTRUCTURES ET LES GRANDS ENJEUX DE DÉVELOPPEMENT DANS SES DOMAINES D’ACTIVITÉ : MARITIME ET PORTUAIRE, HYDRO-ÉLECTRICITÉ ET BARRAGES, RESSOURCES EN EAU ET RISQUES, ÉNERGIES RENOUVELABLES, EAUX URBAINES ET DÉCHETS. **ENTRETIEN AVEC ALAIN DEFORCHE, DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT DE ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



ALAIN DEFORCHE, DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT D’ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT, PRÉCISE LA DÉMARCHÉ DE CETTE ENTITÉ EN METTANT EN ÉVIDENCE QUELQUES-UNES DE SES PARTICULARITÉS, TANT AU PLAN ORGANISATIONNEL QU’À CELUI DES MOYENS SPÉCIFIQUES, AU TRAVERS DE CHANTIERS SIGNIFICATIFS EN COURS OU À VENIR À L’INTERNATIONAL.

Comment le groupe Artelia a-t-il été constitué ?

Artelia est né de l’union de Coteba et de Sogreah concrétisée le 30 mars 2010. L’ambition d’Artelia est de construire un leader européen de l’in-

génierie indépendante qui offre à ses clients, publics et privés, une approche originale de l’ingénierie, du management de projet et du conseil répondant aux attentes d’un monde en évolution. Artelia exerce ses missions dans neuf

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT



domaines d'activité : bâtiment, eau, environnement, énergie, maritime, ville, transport, industrie, multi-sites.

En 2016, le groupe a réalisé un chiffre d'affaires de 439 millions d'euros, dont un tiers à l'international, avec 4 000 collaborateurs.

Il s'agit d'un groupe indépendant dont 96,7% du capital est détenu par les managers et les salariés (500 managers actionnaires et 1 600 collaborateurs via un FCPE).

Depuis juillet 2017, cet effectif est passé à 4 900 collaborateurs avec l'acquisition à 100% d'Auxitec Ingénierie, qui réalise un chiffre d'affaires de 80 millions d'euros.

Déjà leader français de l'ingénierie indépendante dans les domaines du bâtiment, des infrastructures, de l'eau et de l'environnement, Artelia concrétise par cette acquisition son ambition de compter parmi les grandes ingénieries européennes des process industriels.

Pour Auxitec Ingénierie, l'adossement à un groupe international constitue une réelle opportunité de développement vers des activités et des marchés nouveaux, dans un contexte de recomposition du paysage français de l'ingénierie industrielle.

Dans le groupe, comment Artelia Eau & Environnement se situe-t-il et quelle est son importance ?

Artelia Eau & Environnement est l'un des quatre secteurs opérationnels ou « pôles métier » du groupe, les autres étant Bâtiment et Industrie, Ville & Transport et le réseau de nos filiales Internationales.

Par cohérence des métiers et des approches de nos clients, certaines filiales internationales d'Artelia sont

ALAIN DEFORCHE : PARCOURS

Alain Deforche est ingénieur de l'École des Mines d'Alès, département Génie Civil (1991), titulaire du BTS de géologue de l'École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy (ENSG) et d'un diplôme supérieur d'études géologiques de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPC).

Il a participé comme ingénieur de génie civil spécialisé dans les études géotechniques et structurales puis en tant que chef de projet, à différents niveaux, depuis les études de faisabilité jusqu'à l'exécution, à de grands aménagements hydrauliques maritimes et fluviaux tels que ports, stations de pompage, centrales hydroélectriques, réservoirs, barrages et structures associées, sur tous les continents et beaucoup en Asie, au Proche et Moyen-Orient et au Maghreb.

Après trois ans chez Simecsol entre 1986 et 1989 en tant que géologue/géotechnicien, il a intégré Sogreah en 1991 dont il est devenu chef de la division Ouvrages Maritimes en 2002, puis directeur du département Maritimes à partir de 2008.

Directeur général adjoint de Artelia Eau & Environnement depuis 2011, il pilote notamment l'excellence technique du Secteur et coordonne le développement international des activités maritimes au niveau du groupe.

1- Alain Deforche, directeur général adjoint de Artelia Eau & Environnement.

2- Le barrage de Bagatelle à l'île Maurice.

3- Le barrage de New Fulaj au sultanat d'Oman.

4- Le projet « Lucy » du groupe Vale de construction d'un parc de résidus miniers en Nouvelle Calédonie.

rattachées à Eau & Environnement sur quatre pays : Dubai, Oman, Madagascar, Côte d'Ivoire. En complément de ces implantations s'ajoute l'entreprise belge Sher qui travaille essentiellement sur l'Afrique Centrale et l'Afrique de l'Est (avec des implantations au Burundi, au Burkina Faso et au Rwanda).

Artelia Madagascar est la plus ancienne de nos filiales. Elle dispose d'une longue expérience dans les métiers de l'eau, de l'irrigation, ainsi que sur les projets côtiers et portuaires, en rayonnant également depuis 70 ans sur l'Afrique de l'Est.

Artelia Eau & Environnement représente un effectif de l'ordre de 500 personnes (800 avec les filiales) et un chiffre d'affaires de 64 millions

d'euros (80 avec les filiales). Ce dernier est réparti à 50/50 entre public et privé et s'élève à 55% de l'activité à l'exportation pour Artelia Eau & Environnement (80% avec les filiales).

Nous nous projetons essentiellement sur l'international et, en France, nous portons les grands projets d'infrastructure liés à l'eau, par exemple l'extension du port de Port-la-Nouvelle, en Occitanie et le canal Seine-Nord Europe.

Artelia Eau & Environnement est historiquement présent à l'international sur tous les continents, un héritage Ô combien précieux de Sogreah et que nous avons la passion de développer avec nos clients.

La diversité des chantiers liés à l'eau et à l'environnement et l'éclectisme des pays dans lesquels ils se situent sont-ils gérés avec une organisation particulière ?

Le fort développement de notre présence à l'international dans le domaine de l'eau nous a conduits à mettre en place une organisation matricielle pour apporter de la lisibilité sur nos cinq principaux marchés : les barrages hydroélectriques, le maritime et le portuaire, les eaux urbaines et les déchets, les ressources en eau et les risques naturels, et enfin les énergies renouvelables.

Ces cinq marchés sont portés par des cinq directeurs de projet au contact des clients. Ils viennent chercher des ressources dans quatre compétences techniques fortes : génie civil et géotechnique, hydraulique, qu'elle soit fluviale, maritime ou urbaine, mécanique et électricité, environnement. Le directeur de projet constitue son équipe avec des spécialistes de chacune des disciplines. ▶

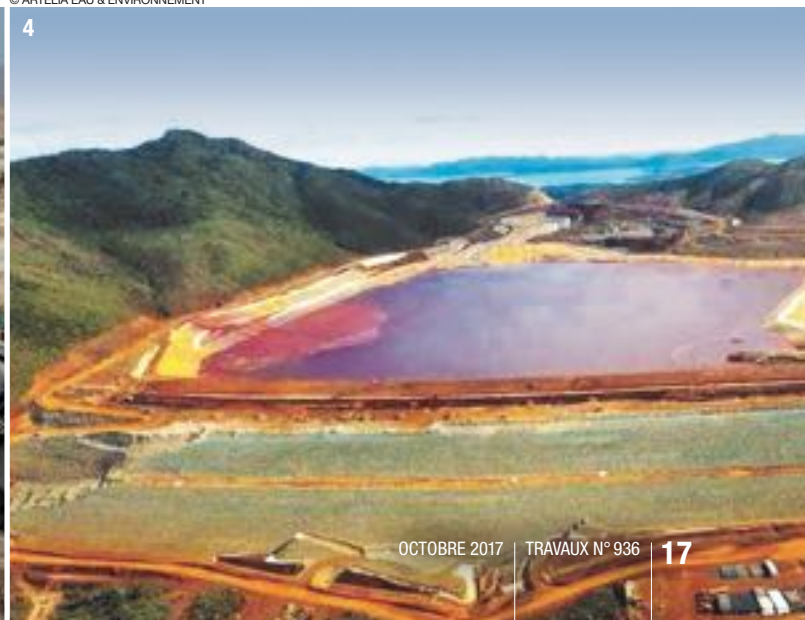
© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

3



© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

4



LE LABORATOIRE D'HYDRAULIQUE

Le modèle réduit physique hydraulique est un outil incomparable d'analyse et de concertation au service des projets d'aménagement les plus complexes.

Le modèle réduit a beaucoup évolué et se présente ainsi comme un outil moderne, complémentaire du modèle mathématique, irremplaçable à tous les stades d'un projet : capable d'apporter et de valider des solutions techniques dans des configurations complexes, source d'économie, garantie de sécurité, outil de communication et d'accompagnement de la concertation.

Artelia Eau & Environnement dispose en banlieue proche de Grenoble (Pont-de-Claix (38)) d'un laboratoire hydraulique de 10000 m² permettant de traiter les sujets suivants :

- Aménagement et environnement littoral et estuarien,
- Développement des infrastructures portuaires,
- Stabilité des ouvrages maritimes,
- Chenaux d'accès aux ports,
- Tenue à poste des navires,
- Aménagement et environnement de cours d'eau,
- Contrôle des risques torrentiels,
- Franchissement des plaines d'inondation,
- Dimensionnement hydraulique des barrages,
- Prises d'eau, stations de pompage, ouvrages complexes des réseaux d'assainissement,
- Efforts sur les structures,
- Écoulements souterrains et confinement des sols pollués.



5

© MARC MONTAGNON



6

© MARC MONTAGNON

Ceci nous permet d'aborder des projets de plus grande dimension, ambitieux, avec des équipes disposant de réelles synergies combinant expertises pointues et expérience.

À l'international, nous avons des services calibrés pour ces marchés.

Derrière les services opérationnels, il faut le support des services « fiscalité », « juridique et contrats », « risques et sécurité », « relations humaines » qui soient en situation d'accompagner les chefs de projets et l'ensemble de nos

collaborateurs avec l'ensemble des compétences nécessaires pour garantir la réussite de nos projets.

Malheureusement, nos zones d'action sont de plus en plus perturbées par les conflits régionaux et nous avons intégré à cet effet un directeur de la sécurité qui a pour responsabilité de veiller à la sécurité des personnes, qui puisse se rendre personnellement sur site dans le cadre de nos projets pour, notamment, évaluer le risque « pays ».

Parmi les projets en voie d'achèvement ou en cours, pourriez-vous en présenter quelques-uns représentatifs de la diversité de la présence d'Artelia Eau & Environnement dans le monde ?

Au nombre des chantiers récemment achevés, je citerai pour commencer le barrage de Bagatelle à l'île Maurice, le barrage de New Fulaj au sultanat d'Oman et le terminal méthanier de gaz naturel liquéfié de Yamal près de Mour-

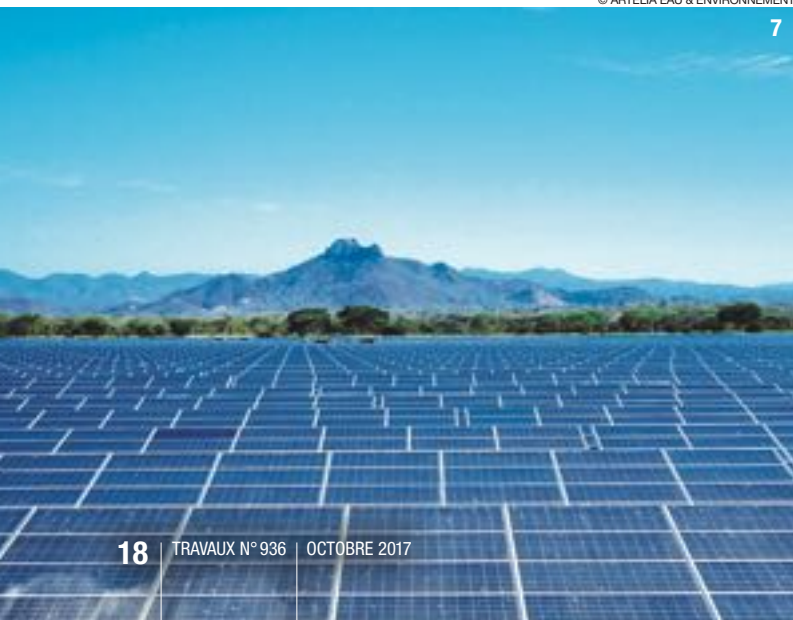
mask, au cœur du Grand Nord russe. Fin décembre 2016, après cinq ans de travaux, la mise en eau du barrage d'alimentation en eau potable de Bagatelle a commencé. Long de 2,5 kilomètres et haut de 47 mètres, l'ouvrage comprend deux ailes en terre et une partie centrale en enrochements.

Sur ce chantier, notre mission était la validation de l'APD, les études d'exécution et la supervision des travaux.

Le barrage de New Fulaj en Oman est un ouvrage de protection contre

© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

7



© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

8



les crues suite aux dégâts provoqués dans la ville de Sur par deux cyclones en 2007 et 2010 mais aussi de rechargement de la nappe phréatique. La mission d'Artelia était l'étude du projet et la supervision des travaux de construction du barrage.

Pour le terminal GNL de Yamal, dans la mer de Kara prise par les glaces plusieurs mois par an, nous avons travaillé à la conception du port situé dans l'estuaire de l'Orb, l'évaluation des conditions hydrodynamiques pour le déchargement des colis lourds, ainsi que sur l'ensemble des enjeux de navigation comprenant notamment la conception du chenal de navigation dans un environnement hydro-sédimentaire complexe.

En Nouvelle Calédonie, la mission d'impact environnemental que nous avons réalisée pour le projet « Lucy » de Vale portait sur la construction d'un parc de résidus miniers sur le site d'extraction du nickel que ce leader mondial de l'industrie minière exploite dans l'île. Cette étude complexe a permis de concilier des enjeux techniques, économiques, environnementaux, et réglementaires. En Côte d'Ivoire, dans le même domaine de l'environnement, nous participons aux travaux de sauvegarde et de valorisation de la lagune Ebrié en améliorant le renouvellement des eaux. Les travaux concernent l'élargissement et l'approfondissement du canal de navigation et l'ouverture de passes dans le cordon littoral sur la base de nos modélisations hydrauliques.

À Abidjan, également, nous participons à l'extension du terminal céréalier du port de façon à accueillir des navires conventionnels avec un tirant d'eau de 13,50 m sur 400 m de nouveaux quais. Nous venons par ailleurs d'achever les études préliminaires d'un nouveau ter-

minal de regazéification de gaz naturel liquéfié près d'Abidjan.

Au Salvador, Neoen s'est adjoint les services d'Artelia Eau & Environnement, dans le cadre du projet « Providencia Solar » pour une assistance à maîtrise d'ouvrage, suivi de chantier et

5- Modélisation physique de la prise d'eau pour la centrale thermique de Safi dans le laboratoire d'hydraulique de Pont-de-Claix.

6- Modélisation physique de l'amarrage d'un navire exposé à la houle dans le laboratoire d'hydraulique.

7- Le projet « Providencia Solar » au Salvador de centrales solaires photovoltaïques.

8- Les travaux de terrassement du barrage de Bwange au Malawi, en Afrique australe.

9- L'île centrale du projet d'îles artificielles Zakum dans les Émirats Arabes Unis a une longueur de 1 200 m et une largeur de 600 m.

10- Le nouveau canal de dérivation du barrage d'Inga, en République Démocratique du Congo.

ingénierie de raccordement au réseau pour la construction de deux centrales solaires photovoltaïques occupant une surface de 115 hectares, raccordées au réseau d'électricité haute tension, d'une puissance totale de 100 MWc. En Arménie, nous avons réalisé la conception et le suivi des travaux de la station d'épuration Erevan, d'une capacité de 350 000 m³/j. Cela comprenait trois volets : réhabilitation du dégrillage et dessablage, digestion des boues et valorisation du biogaz, traitement secondaire qui permettra de supprimer jusqu'à 95 % de la pollution.

Parmi les projets en cours ?

Au Malawi, en Afrique australe, Artelia Eau & Environnement supervise les travaux de construction du barrage de Bwange.

Le design d'origine du barrage qui atteindra 60 m de hauteur à l'issue de deux phases de travaux, a été entièrement retravaillé à partir d'une modélisation numérique pour minimiser les volumes de déblais et de béton tout en s'adaptant aux contraintes du site et aux règles de l'Art. Géologie, génie civil et hydraulique sont ici associés pour parvenir à un fonctionnement satisfaisant de l'ensemble des éléments constitutifs.

Un autre projet en cours de construction est le canal d'Inga sur le fleuve Congo, en République Démocratique du Congo. Il s'agit de réaliser un nouveau canal de dérivation de 1,5 km de long pour acheminer les eaux de façon plus efficace à la centrale hydro-électrique. Nous avons réalisé l'ensemble des études notamment un modèle hydro-sédimentaire en laboratoire et nous supervisons maintenant les travaux. Le projet comporte des ouvrages multiples : batardeaux et digues de

protection, digue en argile compactée de 150 000 m³, injections entre le canal existant et le futur canal depuis la crête des batardeaux, excavation du nouveau canal à l'explosif...

Au Maroc, nous avons réalisé l'ensemble des études des infrastructures maritimes du nouveau port de Safi et des ouvrages de prise et de rejet d'eau de mer de la centrale thermique : il s'agit construire en bord de mer un complexe énergétique et industriel avec son port d'approvisionnement en charbon et d'importation et d'exportation des produits pour l'usine de l'Office Chérifien des Phosphates.

Pour APM Terminals et Bolloré, nous avons effectué toutes les études FEED du nouveau grand port à conteneurs de Tema au Ghana. Le port est gagné sur la mer et comprend une digue de protection par 20 mètres de profondeur, 1 400 mètres de quais et 100 hectares de plateformes. Les travaux sont en cours et se déroulent en complète conformité avec ce que nous avons conçu.

D'autres opérations sont-elles en cours dans les domaines portuaire ou maritime ?

À Dubaï, Artelia assure une prestation d'ingénierie maritime (projet d'exécution et maîtrise d'œuvre complète) dans le projet « La Mer ». La mission porte sur la création d'une marina capable d'accueillir 150 bateaux dans un environnement comprenant trois hôtels, un yacht-club, des commerces et des résidences.

À Abu Dhabi, dans le détroit d'Ormuz, nous venons de gagner le projet « Haild and Gasha » de onze îles artificielles industrielles destinées à se substituer à des plateformes de forage de gaz en mer actuellement en service. ▶

© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

9



© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

10



Pour ces onze îles, Artelia Eau & Environnement assure la totalité du projet d'études jusqu'au dossier d'appel d'offres travaux.

Un autre projet du même type a été réalisé entre 2010 et 2014 dans les Emirats Arabes Unis, sur le champ pétrolier de Zakum, à 80 km au nord-est d'Abu Dhabi : il s'agissait de quatre îles artificielles en mer conçues et réalisées en tant que plateformes pour les forages pétroliers et le prétraitement de l'huile. L'île centrale a une longueur de 1200 m et une largeur de 600 m, les trois îles satellites une longueur de 650 m et une largeur de 450 m.

Pour ces quatre îles, Artelia Eau & Environnement a assuré toutes les études d'ingénierie ainsi que les modèles physiques dans son laboratoire de Pont-de-Claix pour vérifier la stabilité hydraulique des protections.

Et parmi les projets à l'étude ?

Le carnet de travail est important. Par exemple, dans le domaine maritime, nous réalisons actuellement l'ensemble des études pour la réalisation des ouvrages maritimes associés aux quatre tranches de la future centrale nucléaire d'Akkuyu, sur la côte méditerranéenne de la Turquie : ouvrages de protection, prises d'eau et de rejet, quais d'accostage des navires d'approvisionnement...

Au Liban, dans la région de de Jounieh, à une quinzaine de kilomètres au nord de Beyrouth, l'État libanais souhaite réaliser un nouveau terminal croisière et deux marinas pour les yachts de plaisance. Artelia Eau & Environnement réalise avec son partenaire libanais les études de dimensionnement des ouvrages de protection du port constitués d'une digue principale de 2200 m de longueur s'avancant vers le large



© ERIC ROBERT

11

PORT REVEL FÊTE SES 50 ANS

Artelia Eau & Environnement vient de célébrer les 50 ans d'existence de Port Revel, son école de pilotage à la manoeuvre de supertankers, méthaniers et navires de croisière.

Créé en 1967 à partir du Laboratoire d'Hydraulique situé en région grenobloise, Port Revel est le fruit d'un savoir-faire hydraulique mondialement reconnu, et d'essais de navigation sur modèle réduit réalisés pour le compte de la compagnie Esso dans les années 60. En 50 ans, le principe de la maquette avec pilote embarqué n'a jamais cessé de démontrer son efficacité pour assurer la sécurité du trafic maritime.

Depuis sa création, 7000 capitaines de navires et pilotes des ports les plus prestigieux - San Francisco, New York, Tokyo - sont venus se former à toutes les manoeuvres possibles, amarrage, appareillage, croisement ou dépassement en canal, dans toutes les conditions imaginables, courants contraires, vent, perte de gouvernail...

Port Revel est un lieu exceptionnel à plusieurs titres : un lac de 5 ha à proximité de Grenoble, une reproduction physique des sites les plus périlleux à parcourir (Cap Horn...), 11 maquettes de navires toutes construites au 1/25^e, 5 remorqueurs, des pilotes instructeurs et pilotes de remorqueurs d'un niveau sans égal, un cadre de formation privilégié. Par sa technicité et sa taille, Port Revel est unique au monde.

À cela s'ajoute une capacité de réaliser des simulations numériques de navigation, dans l'objectif de confirmer les plans masses de nouveaux ports et extensions portuaires conçus par les équipes d'Artelia.

sur environ 1100 m. Pour ce projet, notre participation revêt des aspects multiples notamment la validation du plan masse du port satisfaisant les conditions opérationnelles, agitation portuaire et manoeuvrabilité des navires notamment, et les modélisations physiques dans notre laboratoire d'hydraulique permettant d'optimiser les dimensions de la digue.

Les équipes sont également actives sur les études de plusieurs barrages dont celui de Janneh au Liban qui entre en

11- Manoeuvre d'accostage d'une maquette au 1/25^e dans le lac de Port Revel.

12- À Safi, au Maroc, le chantier du nouveau complexe énergétique et industriel.

13- Construction de la digue du nouveau port de Safi.

14- Le port de « La Mer » à Dubaï : une prestation complète d'ingénierie maritime pour la création d'une marina.

15- Le barrage de Janneh au Liban, un projet porteur d'innovations techniques, est entré en phase d'exécution.

16- Le chantier du barrage de Delsitanisagua en Équateur.

© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

12



© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

13





© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

14

phase d'exécution, j'y reviendrai car c'est un beau projet porteur d'innovations techniques.

Pour conclure, il serait intéressant d'évoquer deux sujets au travers desquels, en plus ou dans le prolongement de son modèle actionnarial, Artelia Eau & Environnement, en particulier, mais le groupe Artelia, en général, se différencient : l'innovation et la dimension humaine.

L'innovation fait partie des gènes d'Artelia, qu'il s'agisse de l'intégration du BIM dans nos projets ou de de l'intégration de drones et de la 4^e dimension, par exemple pour le suivi de l'avancement de la construction du nouveau centre commercial de Carré Sénart, dans les environs de Paris.

Dans le même ordre d'idées, nous avons mis en place une méthodologie innovante pour le calcul des barrages sous sollicitations sismique et thermique pour des ouvrages à voûte épaisse dont le barrage de Janneh au Liban constitue une illustration concrète. Ce projet est vraiment atypique car les conditions de fondation sont extrêmement contraignantes et il fallait absolument trouver des solutions innovantes. Cette méthodologie va être « challengée » par toutes les barragistes du monde lors du prochain atelier modélisation organisé par le Congrès International des Grands Barrages à Stockholm en septembre 2017. En ce qui concerne la dimension humaine de l'entreprise, il faut évidemment parler de la Fondation Artelia. Cette entité philanthropique privilégie un mode d'intervention original axé

sur le bénévolat de compétences. Au cours des dix années écoulées, 171 salariés et retraités ont ainsi offert leur compétence et leur bien le plus précieux, le temps, à 63 associations et ONG porteuses de projets dans 24 pays.

La fondation a financé intégralement la mise à disposition de ces collaborateurs.

D'autres formes de soutien, comme le mécénat financier pour la réalisation de puits d'eau potable en Afrique, le parrainage de jeunes dans les quartiers en difficulté, la solidarité à travers des challenges sportifs sont progressivement venus élargir le champ d'action de cette fondation grâce à la mobilisation bénévole de plusieurs centaines de collaborateurs. Elle participe elle aussi à la dimension humaine de l'entreprise. Le fait que l'entreprise soit détenue

par son management et ses salariés apporte des particularités au niveau de sa philosophie générale en termes de relations humaines : proximité entre les collaborateurs avec des équipes de taille relativement petite, valorisation des compétences techniques de chacun en apportant l'excellence technique qu'il porte en lui.

Pour conclure, un élément complémentaire permettant d'illustrer le positionnement d'Artelia à l'international est notre classement par la revue Engineering News Record, basé sur notre chiffre d'affaire international par métier.

Sur le métier du « Maritime et des Ports », depuis 2008, Artelia est classé régulièrement dans le top 10 : sur la base de notre chiffre d'affaires 2015 à l'international, Artelia a été classé 9^e tandis que, sur le métier des « Barrages », Artelia a été classé 12^e. □

© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

15



© ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

16





© V. GAUREL - BOUYGUES

DYNAOPT

MESURE, INSTRUMENTATION, AUSCULTATION : UN SAVOIR-FAIRE MULTIDISCIPLINAIRE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

DYNAOPT (CONTRACTION DE DYNAMIQUE ET OPTIQUE) EST UNE ENTREPRISE INDÉPENDANTE D'INGÉNIEURS-CONSEILS EN INSTRUMENTATION ET AUSCULTATION QUI PROPOSE PRÈS DE 20 ANS D'EXPERTISE POUR TOUS LES BESOINS EN INSTRUMENTATION ET EN AIDE À L'ANALYSE DE RISQUE : DÉFINITION DU PROGRAMME D'AUSCULTATION, CHOIX DES TECHNOLOGIES ET DES SYSTÈMES PARTICULIERS, ACQUISITION, TRANSMISSION ET TRAITEMENT DE LA MESURE. SES PÉRIMÈTRES D'ACTIVITÉS, EN FRANCE COMME À L'INTERNATIONAL, SONT PRINCIPALEMENT LE GÉNIE CIVIL, LA GÉOTECHNIQUE, L'ENVIRONNEMENT AU SENS LE PLUS LARGE DU TERME (GLISSEMENTS DE TERRAIN, CHUTES DE ROCHERS, INONDATIONS, COULÉES DE BOUE...) ET PONCTUELLEMENT LE DOMAINE INDUSTRIEL.

Née au début du 20^e siècle, la démarche de l'auscultation a longtemps subi une réticence certaine parce que les résultats des instruments se révélaient peu fiables. Aujourd'hui, « *les progrès réalisés en ingénierie de l'auscultation*, indique Didier Dupuis, directeur technique et gérant de Dynaopt, *font qu'il est*

devenu impensable de construire sans ausculter ».

Le développement de ce métier d'expertise méconnu du grand public s'explique par deux raisons essentielles :

→ L'évolution des constructions et la réalisation de travaux importants en zones fortement urbanisées rendent les critères de sécurité et de qualité

1- Mesures de tassement sur la digue en mer du port Calais 2015.

de plus en plus exigeants et impliquent des connaissances quantifiées des ouvrages et des terrains toujours plus précises ;

→ Les modélisations mécaniques, bien qu'ayant grandement évolué, ne donnent encore que des images très simplifiées de la complexité des données géologiques et géotechniques.

LES ORIGINES DE L'ENTREPRISE

C'est à la suite d'une rencontre chez Telemac, un leader mondial dans la fabrication d'instruments destinés à l'auscultation d'ouvrages de génie civil⁽¹⁾, que Didier Dupuis et Frédéric Dadoun décident de fonder Dynaopt en 1999. « La création de Dynaopt, indique Didier Dupuis, directeur technique et gérant de l'entreprise, répond, d'une part, au besoin de lier les techniques topométriques avec les mesures collectées par des capteurs et, d'autre part, au besoin de développer une ingénierie spécifique en matière d'auscultation. Dynaopt rassemble, dans une seule structure, les compétences permettant la maîtrise complète de la "chaîne de la mesure", et cela de la traduction des objectifs de l'auscultation jusqu'au traitement de l'information en passant par la conception et la mise en œuvre des systèmes de mesure ».

Dès son démarrage, Dynaopt prend en charge deux opérations significatives : de 2000 à 2004, l'instrumentation en phase chantier du pont Charilaos Trikoupis (Rion Antirion en Grèce) pour le compte de Vinci Grands Projets, puis de 2004 à 2006, le soutien technique aux maîtres d'œuvre Arcadis et Inexia sur plusieurs lots de la ligne LGV Est. Le pont Charilaos Trikoupis, est un ouvrage à haubans qui relie le Péloponnèse à la Grèce continentale entre les deux villes de Rion et Antirion.

© MARC MONTAGNON



2

DYNAOPT EN BREF

Dynaopt emploie 16 personnes en France à son siège de Champigny-sur-Marne. Son chiffre d'affaires est d'environ 2 millions d'euros. Les ventes de matériel représentent 20% de ce chiffre d'affaires, les locations et prestations de services 80%. L'international (hors filiale algérienne) représente 10 à 15% de son chiffre d'affaire.

En 2015 Dynaopt a été lauréat du programme PM'UP et bénéficie du soutien de la région Île-de-France pour son développement au national et à l'international.

Un des objectifs de l'équipe Survey de Vinci Construction Grands Projets était de réduire les temps unitaires de chacune des opérations de réglage et d'optimiser les mises en tension des haubans à chaque clavage.

2- De gauche à droite, Frédéric Dadoun et Didier Dupuis, les co-fondateurs de Dynaopt.

3- Le pont de Rion Antirion, l'une des premières grandes références de Dynaopt.

4- La centrale nucléaire de Qinshan en Chine.

Une instrumentation originale a été développée pour pouvoir fournir au logiciel de réglage les données requises. Des capteurs spécifiques, innovants pour certains d'entre eux, se sont révélés nécessaires là où les solutions plus traditionnelles n'étaient pas adaptées. La solution choisie a permis de réaliser des fléaux de 560 m de long avec des imperfections de construction de ± 15 mm, les opérations courantes de réglage ne dépassant pas la demi-heure, mesures et calculs compris. Pour cette prestation, le partenariat Dynaopt / équipe Survey / Formule Informatique a reçu le grand prix de l'innovation Vinci.

Sur le tracé de la LGV Est, la réalisation de grands remblais en zones compressibles a nécessité un suivi des tassements et des variations de pression interstitielle afin de garantir la stabilité des ouvrages.

Dans ce cadre, Dynaopt est intervenue, côté maîtrise d'œuvre, pour assurer un rôle de "chargé d'auscultations", à savoir : validation des choix des moyens et des procédures de mesure mis en œuvre, suivi des équipes mesure de l'entreprise sur le terrain, validation du traitement de l'information... Sa forte implication sur le terrain a permis une instrumentation plus performante quant au pourcentage de matériel opérationnel ce qui a été profitable autant à la maîtrise d'œuvre qu'à l'entreprise chargée des travaux.

À L'INTERNATIONAL : EN DIRECT OU EN PARTENARIAT

Dynaopt travaille avec l'ensemble des bureaux d'étude et des majors du BTP, en France et à l'étranger. ▷



3



4

© DYNAOPT



5

© DYNAOPT



6

© STRUCTURAE



7

© DR

En 2008, Simecsol, chargé de l'étude et du suivi d'importants glissements de terrains impactant la ville de Constantine en Algérie, fait appel à Dynaopt pour former des entreprises locales à la mise en place de tubes inclinométriques profonds (jusqu'à 90 m). Pour Didier Dupuis et Frédéric Dadoun, c'est l'occasion d'entrer en relation avec des ingénieurs algériens et de créer Dynaopt Algérie, filiale basée à Constantine et aujourd'hui dirigée par Fayçal Benarab.

Cette filiale a permis l'implantation de Dynaopt au Maghreb et de travailler avec plusieurs entreprises étrangères. Lors de la construction de la première phase du tramway de Constantine en 2009, Dynaopt avait signé un contrat directement avec l'entreprise Pizzarotti pour le suivi et le contrôle des fondations. Aujourd'hui, le projet d'extension de cette ligne, qui renforcera la desserte des quatre universités de Constantine avec la création de 12 nouvelles stations, est très attendu par la population d'Ali-Mendjeli, une ville nouvelle de 500 000 habitants.

Dans cette seconde phase, Dynaopt Algérie devrait de nouveau réaliser le contrôle des fondations, pour le compte de Cosider, entreprise étatique adjudicataire des travaux.

Un autre exemple concerne le projet d'extension du port de Djen Djen en

Algérie. « L'ouvrage est un terminal à conteneurs gagné sur la mer par la réalisation d'une digue de 1 550 m de longueur en caissons préfabriqués associée à un remblai hydraulique, précise Didier Dupuis. L'auscultation consiste au suivi de la stabilité des caissons ainsi que de celle du remblai hydraulique situé à l'arrière de la digue. Ce sera une première en Algérie parce que l'instrumentation, totalement automatisée, se fait pendant la construction mais devrait passer, à la fin des travaux,

5- Le barrage hydraulique de Dumanoir en Guadeloupe.

6- Dynaopt a fourni l'instrumentation du barrage de Berke en Turquie.

7- Le site impressionnant du barrage de Berke.

8- Instrumentation dans le cadre de l'extension d'une raffinerie à Alger.

dans les mains du gestionnaire pour le suivi de la vie de l'ouvrage ».

Les autres contrats récents ou en cours concernent CRCC (Chine) pour des essais de chargement d'ouvrages sur des autoroutes algériennes ainsi que CGEC (Chine) pour l'instrumentation du barrage de Djenné au Mali.

« Pour toutes ces interventions, poursuit Didier Dupuis, les équipes de Dynaopt et de Dynaopt Algérie sont présentes physiquement pour assurer des prestations de service complètes avec la



8

© DYNAOPT



9



10



11

fourniture de matériel ainsi que le suivi des ouvrages sur lesquels elles réalisent les mesures et le traitement de l'information. Là encore, le rôle de nos équipes consiste à définir les moyens de mesure, les installer, valider la fiabilité des résultats, assurer la maintenance et enfin traiter les données pour les rendre interprétables par les ingénieurs des bureaux d'étude ».

CONSEIL TECHNIQUE À L'INTERNATIONAL

À l'international, Dynaopt intervient également comme conseil technique en assistance à des entreprises spécialisées. Ces conseils en instrumentation d'ouvrage sont le plus souvent de courte durée (3 à 4 semaines au maximum) et se déroulent à un moment très particulier du phasage des travaux. Ils sont presque toujours liés à un besoin de formation des équipes sur site afin de les rendre autonome pour la mise en œuvre et la lecture des différentes instrumentations installées. En cas de problème, ces équipes peuvent bénéficier du soutien de Dynaopt à distance ou sur site.

9- Chantier du port de Djen Djen en Algérie.

10- Mise en place d'une instrumentation sur le chantier d'extension du port de Djen Djen en Algérie.

11- Les caissons formant la digue du port de Djen Djen avant leur immersion.

Plusieurs exemples illustrent cette activité :

→ Zones compressibles au Maroc : Keller Fondations et Medocean (entreprise marocaine de géotechnique) sont intervenus dans le cadre du confortement des sols de la future zone des ateliers de maintenance de la ligne à grande vitesse Tanger - Kenitra (à Tanger). Ces deux entreprises ont fait appel à Dynaopt pour le suivi des tassements.

→ Barrages :

En Tunisie, Dynaopt est intervenue sur le barrage de El Brek pour Hidrotechnika (bureau d'études serbe) pour la formation à la mise en place de cellules de pression interstitielle.

En Turquie, l'instrumentation du barrage de Berke⁽²⁾ sur l'Euphrate a été fournie par Telemac pour le compte de CEAS, la compagnie turque de transport d'électricité. Elle comprend des pendules dans le corps du barrage pour surveiller son comportement, des extensomètres au niveau de la jonction barrage/terrain, des mesureurs de débit de fuite en pied de l'ouvrage, des appareils de surveillance sismique...

« Cette instrumentation ayant été livrée dix ans avant qu'il soit possible de la mettre en œuvre, précise Didier Dupuis, Telemac s'est appuyé sur Dynaopt pour suivre sa mise en place et valider le bon fonctionnement de l'ensemble. En dépit des dimensions exceptionnelles du barrage, l'ensemble de la surveillance ▷

L'ADAPTATION DES MOYENS

À l'écoute de ses clients, Dynaopt intègre et commercialise des instruments de mesure, des systèmes clé en main et des logiciels spécifiques au traitement de l'information répondant au cahier des charges. Ses ingénieurs s'attachent à optimiser la solution proposée tout en respectant le budget alloué. Dynaopt propose ainsi un choix varié de techniques :

- Mesure par capteurs (corde vibrante, inductif, résistif, fibre optique...),
- Mesure optique automatisée,
- Automatisation de systèmes d'auscultation, gestion des alarmes,
- Logiciels de communication et de visualisation - suivi à distance.



12



13



14

© DYNAPLOT

de l'ouvrage n'est pas automatisé mais réalisé physiquement (c'est-à-dire que les mesure sont faites manuellement au niveau de chaque capteur). Cette particularité était liée à une politique de préservation de

l'emploi local. Il était donc nécessaire de former les équipes locales à utiliser le matériel et à assurer sa maintenance, tout en restant capable de faire du diagnostic visuel sur l'ouvrage ».

12- La gare Le-Vert-de-Maisons du futur Grand Paris Express.

13- Dynaplot intervient sur la gare Les-Ardoines de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express.

14- Puits d'essai au Kremlin-Bicêtre dans le cadre du prolongement de la ligne 14 du métro parisien.

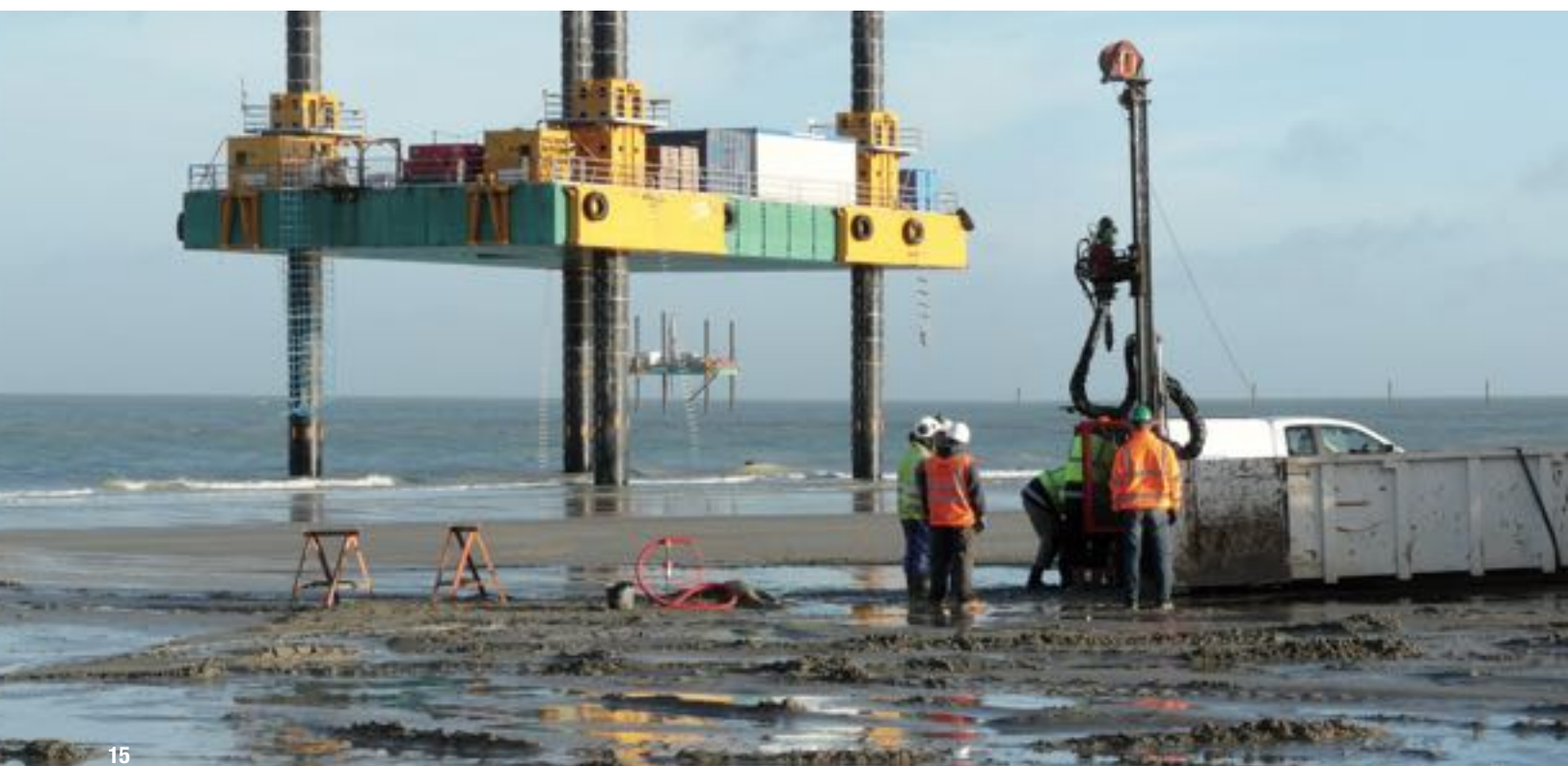
15- Mesures de tassement sur la digue en mer du port Calais 2015.

Au Maroc : diagnostic de l'instrumentation en place et étude de la faisabilité d'une automatisation des mesures.

→ Centrales nucléaires : en Chine, formation à la mise en place de capteurs et au traitement des données (centrale de Qinshan et de Lyanungang) pour Telemac et Freyssinet ; en Roumanie (centrale de Cernavoda) pour Telemac : préparation de l'automatisation de la lecture des capteurs installés lors de la construction du dôme et du radier.

SÉCURISATION ET SUIVI DES SITES NATURELS

À la suite d'une coulée de boue sur les pentes du volcan Chichontepec au Salvador, un village avait été partielle-



15

© V.GAUREL - BOUYGUES



© DYNAPPT

16

17

ment détruit. L'objectif était de réaliser des moyens de protection de ce village après sa reconstruction sur les lieux mêmes de la catastrophe, par la mise en œuvre de détecteurs de coulées de boue et de capteurs équipant les digues de détournement de nouvelles coulées.

Avec l'aide d'une entreprise locale, Dynappt a réalisé la mise en place du système conçu par le bureau d'études français JPA et la société Modular One.

À noter que, sur ce chantier perdu dans la nature, les capteurs de surveillance sont alimentés par des panneaux solaires : pour l'anecdote, une milice

16- Suivi de remblais sur un chantier de terrassement.
17- Installation d'un théodolite automatisé en bordure d'une voie ferrée.

armée locale était chargée de protéger contre le vol ces panneaux et les batteries associées. D'autres projets similaires ont été étudiés en Algérie et en France.

GRAND PARIS EXPRESS : UN SOUTIEN ET UNE PRESTATION COMPLÈTE

Dynappt est présente sur le marché français dans de nombreux domaines d'instrumentation d'auscultation et de surveillance. Elle intervient directement auprès de la maîtrise d'ouvrage ou de la maîtrise d'œuvre ainsi que pour le compte d'entreprises ou de groupements adjudicataires des marchés.

Dans le cadre des chantiers du Grand Paris Express, l'entreprise a créé un Groupement d'Intérêt Économique avec deux de ses partenaires historiques :

→ Structure et Réhabilitation, bureau d'étude installé à Bagnolet et Igny

spécialisé dans les ouvrages souterrains et les ouvrages enterrés ;
 → Hyp-Arc bureau de géomètres basé à Saint-Julien-en-Genevois spécialisé dans la topométrie de précision et des "travaux spéciaux".

Ce GIE baptisé Gauss Monitoring (Géométrie AUScultation et Suivi) regroupe environ 130 personnes dont une quarantaine spécialisée dans l'instrumentation et l'auscultation.

Il abrite l'ensemble des disciplines nécessaires pour répondre aux exigences de monitoring de ces grands chantiers allant de la fourniture et la pose du matériel jusqu'à l'interprétation des mesures. ▷





18



19

© DYNAOPT

« Ce groupement, dirigé par Grégory Lebon, un des ingénieurs de Dynaopt, poursuit Didier Dupuis, permet d'apporter une meilleure attention aux exigences de ces marchés tout en continuant à assurer un service de qualité aux clients historiques de Dynaopt sur les autres marchés ».

Les premières interventions de Dynaopt (avant la création de Gauss Monitoring) et de Gauss Monitoring sur les chantiers du Grand Paris Express ont été, entre autres, l'instrumentation et le suivi du puits d'essai Marcel-Sembat au Kremlin-Bicêtre pour le compte du bureau d'études Antea, le suivi des plateformes ferroviaires au niveau des gares Les-Ardoines et Le-Vert-de-Maisons pour le groupement Horizon et le suivi du comportement des terrains par l'extensomètre incrémental dans les puits Calmette dans le cadre du prolongement de la ligne M11⁽³⁾.

Le puits d'essai Marcel-Sembat a été réalisé dans le cadre du prolongement de la ligne 14⁽⁴⁾. Ce puits d'essai réalisé par Eiffage, d'un diamètre de 5 m et d'une profondeur de 40 m, a nécessité un suivi topométrique de surface, des mesures de convergence du puits, la réalisation d'essais de chargement à la plaque horizontaux et verticaux.

Pour ces prestations, Dynaopt a proposé, en fonction des contraintes de chantier et de la fréquence des mesures, des solutions aussi bien automatisées que manuelles. La réalisation d'une galerie horizontale de 12 m de longueur en fond de puits a bénéficié d'un suivi inclinométrique et extensométrique vertical à partir de la surface et, en galerie, d'un suivi extrusométrique.

Située à la limite entre Alfortville, à l'ouest, et Maisons-Alfort, à l'est, la

future gare Le-Vert-de-Maisons se trouve sous les voies ferrées à proximité du square Dufourmantelle. Elle assurera une correspondance avec celle, existante, du RER D. La future gare Les-Ardoines est implantée à Vitry-sur-Seine, à proximité du Technicentre Paris Rive Gauche, un important centre de maintenance RER de la SNCF. La présence des plateformes ferroviaires et des habitations nécessite une surveillance. Gauss Monitoring a été sollicité par le groupement Horizon

18- Radar de structure dans un ouvrage souterrain.

19- Fissurométrie dans un ouvrage ayant subi des désordres de structure.

20- Instrumentation de pieux sur le chantier de la raffinerie de Skidda en Algérie.

(Bouygues - Soletanche Bachy) sur le lot T2A de la ligne 15 Sud. Le GIE fournit un suivi en temps réel, par un ensemble de théodolites automatisés des voies en gares de Le-Vert-de-Maisons et Les-Ardoines.

PRÉSENCE DIVERSIFIÉE EN PROVINCE

Bien que son siège et ses installations soient situés en région parisienne, Dynaopt intervient dans toute la France. Elle est actuellement présente sur le



20

© DYNAOPT

21- Surveillance d'une voie ferrée par une batterie de clinomètres.

chantier Calais 2015 pour le compte de Bouygues TP. Le projet consiste à réaliser une digue en mer de plus de 3 kilomètres, à terrasser par dragage le fond du futur bassin de 90 hectares, et à utiliser les matériaux issus de ces dragages pour construire de nouveaux terre-pleins gagnés sur la mer en les stockant derrière des digues provisoires.

La digue principale servira à protéger la navigation et les équipements du port à l'intérieur d'un bassin de 90 hectares navigables. Sa carapace composée de Xblocs® est conçue pour résister aux tempêtes et à la montée des eaux dans les cent prochaines années.

Les cotes de la digue sont variables selon les sections mais, globalement, sur la section la plus au large, qui est la plus importante et la plus profonde, elle a une hauteur maximale de 25 m par rapport au fond marin, une largeur en pied de 90 m, hors tapis de protection anti-affouillement, et de 15 m en tête. Sur ce chantier, Dynaopt participe au suivi et à la mesure des tassements des terrains porteurs du remblai hydraulique.

« La particularité de travailler dans des zones gagnées sur la mer, précise Didier Dupuis, implique des réflexions et des dispositions spécifiques tant pour la conception des moyens de mesure que pour la mise en œuvre des matériels de contrôle et de suivi des tassements ». Toujours en province, en direct ou en partenariat, Dynaopt a une activité sur des chantiers de natures et de tailles diverses :

→ Suivi de plateformes ferroviaires lors de traversées sous voies : Dynaopt propose à la location ou la vente des systèmes de mesure de stabilité de la plateforme ferroviaire répondant aux exigences de la SNCF. Elle propose en complément un suivi vibratoire à la directive IN1226 et une auscultation par géoradar avec son partenaire Geoscan Structure et Réhabilitation.

→ Surveillance de différentes zones rocheuses et glissements. En Haute-Savoie, en particulier, la Sage (Société Alpine de Géotechnique) assure le suivi du glissement du Chambon avec les solutions techniques développées par Dynaopt.



21

© DYNAOPT

DES PRODUITS SPÉCIFIQUES

Lorsque la solution technique n'est pas disponible auprès de ses fournisseurs ou sur le marché, Dynaopt développe des solutions de mesures dédiées ou non à un client :

- **Pendule laser** : mesure de déviation de verticalité sans fil,
- **Hathor (en collaboration avec Hyp-Arc)** : système de mesure par théodolite motorisé asservi,
- **Référence topographique profonde** : report d'un point ancré en profondeur,
- **Artix** : système de contrôle de positionnement des voies ferrées (développé pour TSO),
- **MT5E** : profilomètre multipoint automatisé pour les mesures de tassement.

→ L'instrumentation pour Antea de zones de stockage de résidus provenant de l'industrie de l'aluminium dans la région de Decazeville, avec sélection, mise en œuvre et automatisation des mesures.

→ Diverses instrumentations de remblais (cellules de pression interstitielle, piézomètres, tassomètres...) pour le compte de plusieurs bureaux d'études et entreprises de sondages comme Fondasol, Forsol, Althea Ingénierie...

UNE DOUBLE COMPÉTENCE

Suivant les projets et la disponibilité des équipes de ses clients, Dynaopt propose soit une prestation complète allant de la conception de l'instrumentation jusqu'au rendu des mesures (l'interprétation de ces dernières étant réalisée par des bureaux d'études externes), soit simplement la fourniture du matériel d'auscultation, à la vente ou à la location.

Par exemple, l'entreprise fournit du matériel d'auscultation pour l'instrumentation de la mine de cuivre et d'or d'Oyu Tolgoi située en Mongolie dans le désert de Gobi ainsi que plusieurs types d'instruments servant au réglage du tablier du pont de l'Atlantique sur le canal de Panama (Vinci Construction Grands Projets).

« Si Dynaopt se tient évidemment au fait de l'évolution des techniques de suivi et de mesure, conclut Didier Dupuis, son savoir-faire se situe dans sa maîtrise des choix au niveau des matériels et ou des techniques à mettre en œuvre et de leur gestion en regard des conditions de chantier rencontrées. L'auscultation n'est pas une fin en soit, c'est un outil que Dynaopt s'emploie à maîtriser pour aider à comprendre le comportement d'un ouvrage et son incidence sur son environnement ». □

1- Telemac (société française acquise en 1991 par l'entreprise canadienne Rocrest) a participé à l'instrumentation de surveillance de plus de 400 barrages dans 75 pays à travers le monde. La société a été fondée par André Coyne en 1947 afin de faire la promotion des extensomètres à corde vibrante dans le domaine du génie civil. Ces instruments ont été utilisés pour la première fois en 1930, dans le barrage de Brommat, en France.

2- Le barrage de Berke est un ouvrage voûte en béton de 201 m de hauteur au-dessus des fondations (257 m de hauteur totale), d'un volume de 735 000 m³, dont le réservoir a une superficie de 800 000 m².

3- Le prolongement de la ligne M11 de l'actuel terminus Mairie-des-Lilas à la gare RER E de Rosny-Bois-Perrier facilitera les déplacements dans l'Est parisien.

4- Le prolongement de la ligne 14 va mener de la station Olympiades (Paris XIII^e) à l'aéroport d'Orly d'ici à 2024.



TERMINAL DE PANAMA : À SEC AU PIED DU CANAL

AUTEUR : ANTOINE BIDAULT, CHEF DE PROJET, SAIPEM SA

LA MISE EN SERVICE DES NOUVELLES ÉCLUSES DU CANAL DE PANAMA EN JUIN 2016 PERMET DE FAIRE TRANSITER PAR LE CANAL DES PORTE-CONTAINERS DE DERNIÈRE GÉNÉRATION. AFIN DE PERMETTRE L'ACCUEIL DE CES NAVIRES, PSA PANAMA INTERNATIONAL TERMINAL A DÉCIDÉ D'AUGMENTER SES CAPACITÉS EN AGRANDISSANT SON TERMINAL EXISTANT SITUÉ À L'ENTRÉE DU CANAL. DÉBUTÉE FIN 2016, LA CONSTRUCTION DU QUAI EST RÉALISÉE PAR SAIPEM SA, EN PARTENARIAT AVEC JAN DE NUL GROUP, GRÂCE À UNE MÉTHODOLOGIE CONSTRUCTIVE SINGULIÈRE PUISQUE LA MAJORITÉ DES TRAVAUX SONT EFFECTUÉS À SEC PLUS DE 20 m SOUS LE NIVEAU DU CANAL ADJACENT.

LE CONTEXTE

Situé sur la façade pacifique du Panama, en amont des écluses de Miraflores et en aval du pont des Amériques, le projet d'extension du terminal répond au besoin de PSA Panama International Terminal d'accueillir des porte-containers de plus grande capacité et ainsi capter une partie de l'augmentation du trafic

maritime qui sera générée par la mise en service du nouveau jeu d'écluses sur le canal.

Perpendiculairement au quai existant qui dispose d'un tirant d'eau de 14 m, PSA Panama International a décidé de réaliser deux postes à quai offrant un tirant d'eau de 16 m avec possibilité d'approfondissement à 18 m, sur une longueur de 750 m.

1- Vue générale du projet avant mise en eau.

1- General view of the project before first filling.

L'emprise du quai à réaliser, une structure en pieux béton qui supporte un tablier réalisé au moyen d'éléments préfabriqués sur lesquels une dalle in-situ est réalisée, se situait sur des terrains existants. Cela impliquait d'important travaux de terrassements et de dragage afin d'enlever près de 4 millions de mètres cubes pour obtenir le tirant d'eau souhaité.



2
© JJS

La connaissance géologique et l'expérience de ces terrains par notre partenaire ont permis au groupement de développer une méthode de construction atypique visant à maximiser la réalisation de travaux à sec.

En effet, le terrain en place comportant des matériaux fortement cohérents et imperméables, appelés Pacific Muck, un puits de près de 450 m de long et un fond de fouille situé 20 m sous le niveau du canal a été réalisé, ne laissant qu'une digue de protection de 15 m en tête comme séparation entre le canal et les travaux.

2- Vue aérienne du projet après mise en eau.

3- Travaux de terrassement du puit.

2- Aerial view of the project after first filling.

3- Shaft earthworks.

Protégés pendant près d'un an par cette digue, les travaux de terrassements, de fondations (536 pieux forés Ø 1400 mm et Ø 1100 mm), de réalisation des poteaux (Ø 1400 mm et Ø 1100 mm ; longueur jusqu'à 18 m) et de protection de talus ont pu être réalisés exclusivement par des moyens terrestres, permettant ainsi de minimiser les interfaces avec la navigation du canal, mais aussi d'optimiser les délais de réalisation (24 mois pour l'ensemble de la construction du quai) et de garantir une meilleure qualité de réalisation des ouvrages.

LE DESIGN

L'ancrage des pieux est réalisé dans les formations rencontrées en dessous de la couche de Pacific Muck. Ces dernières sont essentiellement de deux types : la formation sédimentaire consolidée d'origine volcanique dite « La Boca Formation » et le substratum basaltique. Le passage de l'un à l'autre de ces matériaux, aux caractéristiques mécaniques différentes (les résistances en compression simple mesurées dans le basalte ont dépassé les 100 MPa alors que celles rencontrées dans la Boca ne dépassent pas les 15 MPa), ▷



3
© SAIPEM SA



est brutal et peut s'opérer en quelques mètres en raison de la présence des failles secondaires qui affectent le substratum basaltique.

Afin de cartographier ce substratum pour optimiser les longueurs de fiche des pieux, une campagne géotechnique de 56 sondages sur l'ensemble de l'emprise du quai a été réalisée dans les premiers mois du projet. La collecte d'échantillons sur chaque sondage a permis de caractériser les matériaux en place, et de définir leur altitude et leur nature en réalisant des essais PLT (Point Load Test) et UCS tous les 2 m. L'analyse de ces données par les équipes engineering de Saipem SA basées à Paris et Lima a permis de définir des longueurs optimisées de

fiche des pieux en considérant la nature du terrain en place, mais également les efforts qui s'appliquent sur ce dernier. La forte variabilité du terrain, tant en altitude qu'en caractéristiques géotechniques, a conduit à définir une longueur d'ancrage dans le terrain en place (jusqu'à 35 m pour les pieux les plus profonds) et une hauteur du poteau prolongeant le pieu jusqu'à la sous face du tablier (jusqu'à 18 m pour les plus hauts) adaptée à chaque élément. Le ferrailage de ces éléments a été réalisé en intégrant la séquence de construction (partie pieu et partie colonne ; cette dernière pouvant être réalisées en plusieurs levées en fonction de sa hauteur totale), mais aussi en intégrant les contraintes transport

4- Essai de chargement statique à 800 t.

5- Machine de montage des cages de ferrailage pour pieux et colonne.

6- Vue depuis le fond du puits de la réalisation des colonnes.

4- Static loading test at 800 tonnes.

5- Machine for the assembly of concrete reinforcing cages for piles and columns.

6- View of column execution from bottom of shaft.

et en minimisant les pertes d'acier au niveau de l'atelier de préfabrication du ferrailage.

Cette unicité a engendré la mise en place d'une logistique précise pour l'approvisionnement des éléments de ferrailage nécessaires. Les zones de stockage sur site étant réduites, la préfabrication des cages d'armature dans l'atelier de ferrailage dédié situé à proximité du site devait suivre la séquence et le planning de réalisation. En complément de la problématique du sol mentionnée ci-dessus, l'autre composante importante du design du quai est sa tenue au séisme. L'ouvrage devant résister à un séisme ayant une période de retour de 475 ans, ce dernier a été dimensionné en utilisant





la méthode dite de *push-over*. Cette méthode d'analyse structurelle permet de prendre en compte le comportement non-linéaire des rotules plastiques formées dans les pieux sous sollicitation sismique. Elle permet ainsi de déterminer plus précisément les efforts dans les éléments et les déplacements de la structure, conduisant à un dimensionnement optimisé.

Afin de garantir une homogénéité vis-à-vis du comportement structurel des pieux d'un même segment, le linéaire global du quai a été découpé en 5 segments distincts et non connectés structurellement. Seuls les rails du système de grues portuaires connectent deux segments adjacents. Les segments, définis en fonction de la nature et

7- Atelier de préfabrication des dalles.

8- Grue de 600 t sur quai pour pose des éléments préfabriqués.

7- Slab prefabrication equipment.

8- 600-tonne crane on the dock for placing prefabricated members.

l'élevation du terrain afin d'avoir une homogénéité, sont espacés de 25 cm afin d'éviter tous contacts entre eux lors du séisme de design.

La résultante de ces deux éléments dimensionnants majeurs du quai a conduit à la mise en place de 11 000 t d'acier grade 80 avec des diamètres allant jusque 44 mm et avec des densités de ferrailage dépassant les 300 kg/m³ dans certains zones de l'ouvrage.

LA RÉALISATION

Les travaux ont débuté avec les terrassements afin d'excaver le puits (figure 3).

Les pelles mécaniques de 70 t ainsi que la trentaine de dumpers mobilisés

pour ces terrassements ont permis d'évacuer les matériaux soit vers des chalands pour une mise en dépôt dans une zone définie au large, soit vers une zone de stockage sur site afin de pouvoir être réutilisés ultérieurement pour la réalisation des remblais à l'arrière du quai.

Pour certaines zones où le basalte affleurerait au-dessus de la cote finale de terrassement, il a été nécessaire de miner avant le démarrage des terrassements.

Parallèlement aux travaux de terrassement, un essai de chargement statique au double de la capacité portante maximale a été réalisé.

Un pieu de 1 400 mm de diamètre a ainsi été foré, bétonné et instrumenté avec des jauges de contrainte permettant de suivre l'évolution des contraintes lors du chargement. Ce pieu a ensuite été coiffé d'une structure métallique sur laquelle un lest en béton de 800 t a été installé (figure 4).

Cette charge a progressivement été transmise au pieu par paliers grâce à un système de vérins. Les enregistrements des mesures de contrainte et de déplacement du pieu pendant le cycle de charge et de décharge ont permis de valider le dimensionnement des pieux.

Après qu'une zone suffisante du puit a été terrassée jusqu'au toit du rocher, les opérations de forage ont démarré. ▷





9

© SAIPEM SA

Ces dernières, réalisées par Trevi Panama avec deux foreuses SR-70, consistent à forer des pieux Ø 1 400 mm ou Ø 1 100 mm entre 7 et 35 m dans le substratum. Les cages de ferrailage étaient fabriquées à la longueur requise sur le yard de ferrailage situé à proximité. Compte tenu de la quantité de pieux et de leur longueur, il a fallu mettre en œuvre 3 machines pour réaliser ces cages de manière semi-automatique (figure 5).

Le béton, dimensionné pour garantir une durée de vie de 50 ans, est fourni depuis une centrale dédiée au projet, installée à proximité du site et il est mis en œuvre au moyen d'un camion pompe et d'un tube plongeur. Après la validation des pieux par test sonique, suivie du recépage soit au moyen de la méthode Recépieux®, soit par piquage, la réalisation des colonnes et des chapiteaux débute.

Les colonnes, de même diamètre que les pieux, sont réalisées en utilisant des coffrages métalliques conçus pour le projet. Ils sont ajustables afin de pouvoir compenser les variations altimétriques du toit rocheux et permettent de réaliser des levées jusqu'à 10,5 m.

Les colonnes les plus élancées, soit 18 m, sont ainsi réalisées en deux levées (figure 6).

Après connexion de la cage de ferrailage de la colonne à celle du pieu, soit par recouvrement, soit par coupleurs, les coffrages circulaires comprenant deux demi coquilles sont réglés et fermés afin de bétonner la colonne au moyen d'une pompe. Le chapiteau qui recevra les éléments préfabriqués du tablier est coulé en même temps que la dernière levée.

Pour diminuer les temps de réalisation du tablier in-situ, des éléments préfabriqués viennent coiffer les poteaux et supportent la dalle de compression du quai. Un atelier de préfabrication (figure 7) a été installé à proximité du site afin de réaliser les 1 000 unités nécessaires. Les plus grande ayant une surface de 56 m² pour un poids de 55 t, leur transport entre la zone de préfabrication et le lieu de pose est réalisé grâce à une remorque spécialement conçue pour le projet et montée sur un tombereau articulé à la place de la benne. Certains blocs préfabriqués ont dû être réalisés sur le tablier compte tenu de leurs dimensions qui ne permettaient pas de les transporter. La mise en place de ces éléments est réalisée par une grue à chenilles de 600 t positionnée sur le quai (figure 8).

9- Échafaudages pour support des éléments préfabriqués singuliers de la poutre de couronnement.

10- Talus de protection en enrochements.

9- Scaffolding to support the singular prefabricated members of the capping beam.

10- Protective embankment of rockfill.

Cette dernière pose les éléments à l'avancement, cheminant ainsi le tablier venant d'être réalisé. Chaque élément repose sur 4 poteaux formant une maille de 8 m de côté. Pour les éléments singuliers de la poutre de couronnement (chambre électrique, station de pompage), avantage est pris de la réalisation à sec de l'ouvrage.

Les éléments préfabriqués spécifiques sont installés sur des échafaudages de plus de 18 m de hauteur (figure 9). La pose de ces éléments terminée, les travaux in-situ de réalisation se décomposent en deux étapes. La première consiste en la réalisation des poutres qui permettent la connexion des poteaux dans le tablier. La seconde est la réalisation de la dalle de compression du tablier. Pour chacune des étapes, on réalise d'abord la pose des



10

© SAIPEM SA



© SAPEM SA
11

12

ferrillages et ensuite le bétonnage. Le tablier a été démarré en son milieu permettant ainsi de progresser sur deux fronts simultanément. La grue, seulement nécessaire pour les opérations de pose des pré-dalles, chemine d'un front à l'autre. Cela permet de sortir du chemin critique du cycle le temps de monter en résistance du béton, car une résistance de 35 MPa est requise pour faire passer la grue au-dessus d'une zone du quai. Cette résistance est atteinte après 48 heures. Cette séquence permet de progresser de 20 m de quai par semaine.

Après la réalisation de la dalle de compression, les équipements de quai (rails, défenses, bittes d'amarrage) sont installés et la signalisation du quai est peinte.

Avant de poser les éléments préfabriqués, mais après la réalisation des colonnes, les remblais arrière du quai ont été montés en utilisant des matériaux de carrière. Ces remblais sont ensuite protégés des marées, du battillage et des jets des propulseurs des navires par une carapace en enrochements (figure 10). Cette dernière est mise au moyen d'une pelle de 90 t disposant d'un bras de 24 m de long. Lorsque la réalisation des colonnes et

11- Perspective du quai avant mise en eau.

12- Perspective du quai après remplissage du puit.

11- Perspective view of the dock before first filling.

12- Perspective view of the dock after filling the shaft.

des talus de protection a été terminée à sec (figure 11), le quai a pu être mis en eau, en mai 2017, avant de démarrer les travaux de dragage. La mise en eau a été réalisée en ouvrant une brèche dans la partie supérieure de la digue de protection afin de laisser le puits se remplir au gré des marées. Trois jours ont été nécessaires pour remplir ce puits, connectant ainsi le quai au canal (figure 12).

Une fois le quai mis en eau, une drague *backhoe* et un *cutter* enlèvent la digue qui aura permis de réaliser ce quai pratiquement entièrement à sec pendant

près d'un an (figure 2). Cette méthode de réalisation atypique, ainsi qu'un design optimisé et une industrialisation poussée de la préfabrication ont permis de sécuriser les délais de construction courts, tout en garantissant la qualité de la réalisation.

La livraison de 300 m de quai a permis la réception du navire transportant les 4 premières grues portuaires qui ont été déchargées fin juillet, permettant ainsi au client de préparer la mise en service de son quai.

Le quai sera livré dans son intégralité fin 2017. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

536 pieux Ø 1 400 et 1 100 mm

1 048 éléments préfabriqués

4 millions de m³ de terrassement

12 000 t de ferrailage

52 000 m³ de béton

263 000 m³ d'enrochements

PRINCIPAUX INTERVENANTS

CLIENT : PSA Panama International Terminal SA

INGÉNIEUR : Urs - Aecon

ENTREPRISES :

groupe Saipem - Jan de Nul pour la réalisation du quai
Jan de Nul pour les opérations de dragages

PRINCIPAUX SOUS-TRAITANT DU GROUPEMENT :

Trevi Panama pour la réalisation des pieux

Armatek pour le façonnage et mise en place des aciers

Argos pour la production et livraison de béton

(formulation faite par groupement)

ABSTRACT

PANAMA TERMINAL: ON DRY LAND AT THE BASE OF THE CANAL

ANTOINE BIDAULT, SAPEM SA

The new locks of the Panama Canal placed in service in June 2016 will change the seaways for container ships. To be able to receive the latest generations of these vessels which will now be able to pass through the canal, PSA Panama International Terminal wanted to enlarge its existing terminal by creating berths capable of receiving these ships. The Saipem/Jan de Nul consortium performed the design and construction of this structure by optimising the engineering work despite complex soil conditions and major seismic constraints, and by developing an atypical construction technique. Given the nature of the land in situ it was possible to perform most of the dock construction works on dry land while working 20 m below the level of the canal adjacent to the project. □

TERMINAL DE PANAMÁ: DIQUE SECO A PIE DEL CANAL

ANTOINE BIDAULT, SAPEM SA

La entrada en funcionamiento en junio de 2016 de las nuevas esclusas del canal de Panamá modificó las vías marítimas de los porta-contenedores. Para poder acoger las últimas generaciones de estos buques, que ahora pueden pasar por el canal, PSA Panama International Terminal SA decidió ampliar su terminal existente creando puestos de atraque que permitieran acoger a estos buques. El consorcio Saipem - Jan de Nul se encargó del diseño y la construcción de esta obra, optimizando la ingeniería pese a unas condiciones de suelo complejas y a importantes restricciones sísmicas, y desarrollando una técnica de construcción atípica. En efecto, la naturaleza de los terrenos permitió realizar la mayor parte de las obras de construcción del dique seco trabajando 20 m por debajo del nivel del canal adyacente al proyecto. □



1

© PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES

TROISIÈME TRAVERSÉE SUR LE CANAL DE PANAMA : DES VIADUCS SUR TOUS LES FRONTS

AUTEURS : ÉRIC JOLY, RESPONSABLE CONCEPTION, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - LAURENT AGOSTINI, DIRECTEUR TECHNIQUE, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - SAMUEL L'HUISSIER, RESPONSABLE PONTS EN ENCORBELLEMENT, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - GUILLAUME DECOUX, RESPONSABLE PONTS POUSSÉS, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

LA TROISIÈME TRAVERSÉE DU CANAL DE PANAMA, RÉALISÉE AU NORD DES ÉCLUSES DE GATÚN SUR LA CÔTE NORD DE L'ATLANTIQUE, RÉPOND À L'ENGAGEMENT PRIS PAR L'ACP (AUTORIDAD DEL CANAL DE PANAMÁ) DE DÉSENCLAVER LA RÉGION DE COLÓN APRÈS LES TRAVAUX D'ÉLARGISSEMENT DU CANAL ET LA CONSTRUCTION DU TROISIÈME JEU D'ÉCLUSES. CETTE TRAVERSÉE DE PRÈS DE 3 km COMPREND UN PONT PRINCIPAL HAUBANÉ DE 1 050 m DE LONG, AVEC UNE PORTÉE CENTRALE DE 530 m, ET DES VIADUCS D'ACCÈS DE 1 125 m À L'EST ET 906 m À L'OUEST. PRÈS DE 130 ANS APRÈS LES DIFFICULTÉS DE FERDINAND DE LESSEPS DANS LA « COUPE CULEBRA » POUR LES TRAVAUX DU CANAL, CE PROJET MARQUE LE RETOUR DE L'INGÉNIEURIE FRANÇAISE AU PANAMA.

L'article traite des viaducs d'accès. Ces viaducs, tous réalisés en béton coulé en place, comprennent des parties réalisées par poussage et d'autres par encorbellements successifs (figure 3).

Le contrat initial d'un montant de 365 millions de dollars est un contrat de *Build only*, avec une conception du projet faite par CCCC (China Com-

munications Construction Company), Highway Consultants et Louis Berger Group pour le compte de l'ACP (Autoridad del Canal de Panamá).

La conception initiale prévoit pour les viaducs d'accès des modules (ensemble de tabliers) en voussoirs préfabriqués mis en place au cintre auto-lanceur, et un pont en encorbellement de voussoirs coulés en place au-dessus de la voie

1- 3^e traversée
du Canal de
Panama - Vue
d'ensemble.

1- 3rd Panama
Canal crossing -
General view.

ferrée située à l'est (figure 4). Cette conception a dû être cependant reprise sur plusieurs points, des hypothèses sismiques jusqu'au design de détails, afin de rendre l'ouvrage constructible et réglementaire. Cette reprise de conception a donc logiquement nécessité une requalification du contrat, avec prise de responsabilités de l'entreprise sur tous les points modifiés.



© PHOTOTÉQUE VINCI ET FILIALES

2

Dans la conception initiale, les sections transversales des caissons des tabliers, de 20,80 m de large, sont à hauteur constante pour les modules de 45 m (hauteur 2,50 m) et 78 m (hauteur 4,40 m), et à hauteur variable pour le pont coulé en place de 125 m de portée.

LA NÉCESSITÉ D'UNE MULTITUDE DE CHANTIERS

La réalisation de ces viaducs d'accès est un défi au même titre que le pont

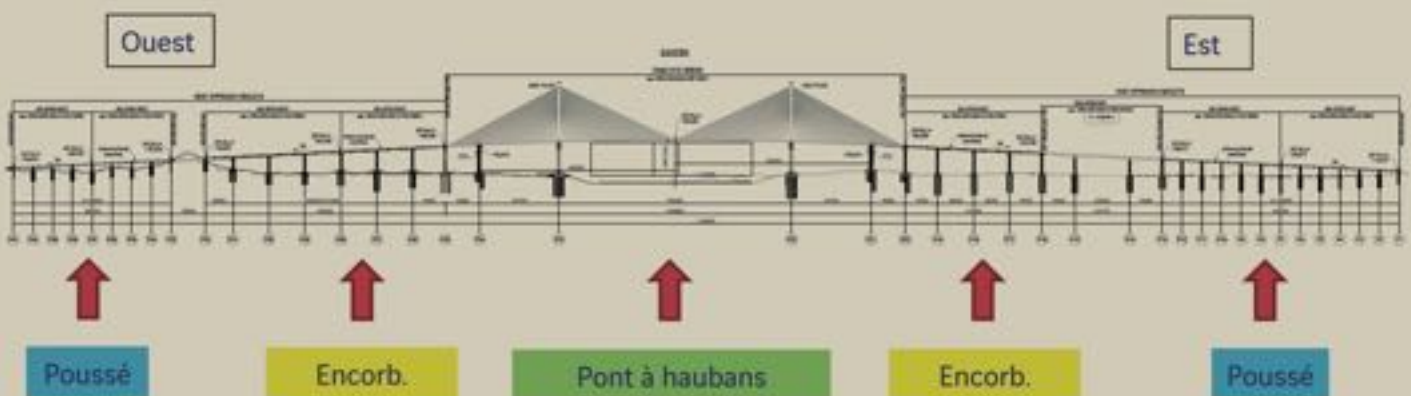
2- 3^e traversée du Canal de Panama - Situation.
3- Élévations des ouvrages - Vue générale.

2- 3rd Panama Canal crossing - Location.
3- Elevation views of the works - General view.

principal, tant par la longueur totale à réaliser, plus de deux kilomètres, que par la variété des ouvrages. Les modes constructifs choisis ont été revus, avec pour objectifs de rationaliser les moyens et de respecter les délais très courts, et les structures ont dû être reprises, des principes de ferrailage jusqu'à la précontrainte. En effet, la préfabrication de voussoirs de deux hauteurs différentes et leur pose à l'aide de cintres n'étaient pas viables : les linéaires en jeu n'étaient pas suffisants,

le transport des voussoirs par barge à travers le canal était très compliqué, l'installation d'une usine de préfabrication de chaque côté du canal nécessitant des fondations lourdes dans un sol inconsistant était hors de question. Rationaliser les moyens, cela veut aussi dire qu'il faut, certes, avoir des ouvrages répétitifs, mais aussi et surtout suffisamment d'équipes de compagnons qualifiés pour les réaliser. Il n'est en effet pas question de les réaliser l'un après l'autre. ▷

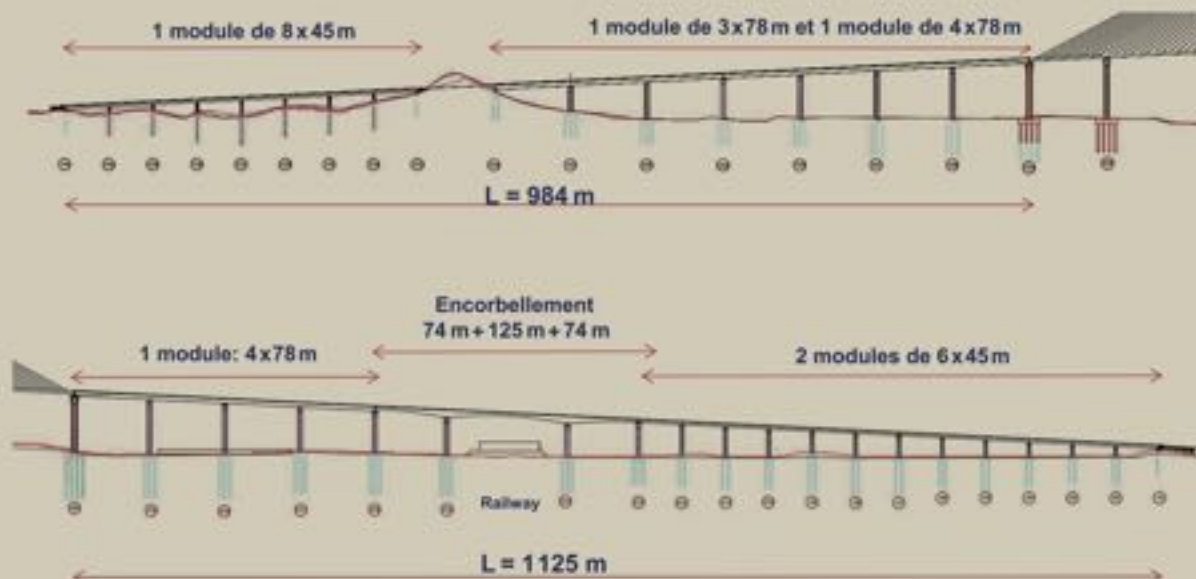
ÉLÉVATIONS DES OUVRAGES - VUE GÉNÉRALE



3

© PHOTOTÉQUE VINCI ET FILIALES

TRAMAGE INITIAL DES OUVRAGES



4

© PHOTOTEQUE VINCI ET FILIALES

Le choix d'avoir deux modes constructifs différents s'est ainsi rapidement imposé, tout comme celui d'abandonner toute préfabrication complète des voussoirs. Les contraintes du projet, avec la configuration des ouvrages d'extrémité comportant des travées répétitives de 45 m, une longueur maximale de 540 m à l'ouest et des accès complètement libres, ont rapidement imposé une construction par poussage. Seuls les profils des ouvrages nécessitaient des ajustements afin de rendre les ponts « poussables », en ligne droite ou selon une courbure en plan.

Les autres ouvrages sont construits par encorbellement de voussoirs coulés en place. Les ouvrages sont ainsi dans la configuration telle que montrée en figure 3.

LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE ET LES CONDITIONS DE SITE

Le contexte réglementaire est basé sur les AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials) « LRFD Bridge Design Specifications ». Les conditions de site se distinguent par un risque sismique important avec des conditions géologiques très défavorables par endroit à cause de la présence de couches molles (Atlantick Muck) parfois très épaisses.

Le spectre de réponse au rocher a un plateau à 1,3 g pour le séisme de 2475 ans de période de retour.

Les paramètres géophysiques des sols, et notamment les vitesses de

propagation des ondes de cisaillement ayant été cependant mal estimés dans la conception initiale, une campagne complémentaire d'essais *crosshole* a permis de confirmer les paramètres plus pessimistes pris en compte par l'entreprise. Les conséquences ont été importantes pour le design des ouvrages et de leurs fondations, à la fois à cause de toutes les disposi-

4- Tramage initial des ouvrages.

5- Triple appui pendulaire sphérique.

4- Initial framing of the works.

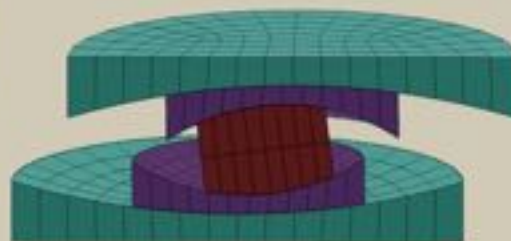
5- Triple spherical pendular support.

tions constructives demandées par les AASHTO vis-à-vis du niveau de séisme, mais aussi à cause des effets liés aux mauvaises conditions géologiques : forts effets d'interactions cinématique sur les fondations profondes et modifications des mouvements sismiques. Les conditions de vent ne sont pas exceptionnelles, par contre l'humidité est omniprésente et le risque de corro-

TRIPLE APPUI PENDULAIRE SPHÉRIQUE



Section of Triple Pendulum Bearing



5

© PHOTOTEQUE VINCI ET FILIALES



6

sion est bien réel. C'est la raison pour laquelle l'ACP a privilégié des ouvrages « tout béton » avec le souci de minimiser les besoins de maintenance durant les 100 ans de durée de vie.

LES SOLUTIONS TECHNIQUES COMMUNES À TOUS LES OUVRAGES

Tous les ouvrages reposent sur leurs appuis par l'intermédiaire de « Triple pendulum bearings », appuis pendulaires triplement sphériques, particulièrement efficaces pour filtrer les excitations sismiques (figure 5).

Le principe de fonctionnement de ces appuis est que la période de vibration du tablier est choisie simplement avec le rayon de courbure de la surface concave. Elle est indépendante de la masse de la structure portée. L'amortissement est sélectionné en choisissant les coefficients de frottement.

Les mouvements de torsion de la structure sont minimisés car le centre de rigidité des appuis coïncide automatiquement avec le centre d'inertie de la structure portée.

6- Vue du pont Est en cours de poussage.

7- Les 3 pousseurs en action.

6- View of the east bridge during pushing.

7- The 3 pushers in action.



7

La période de vibration, la capacité de charge verticale, l'amortissement, la capacité de déplacement peuvent être sélectionnés indépendamment.

Trois rayons effectifs et trois coefficients de frottement sont choisis pour optimiser les performances pour différentes forces et fréquences de secousses sismiques.

Cela permet une flexibilité de conception maximale pour tenir compte des mouvements modérés et extrêmes. Les joints de dilatation initialement présents entre les différents modules ont été supprimés, seuls sont conservés les joints entre les ouvrages.

Les comportements des tabliers et de leurs fondations ont ainsi été calculés dans toutes les phases de construction et en service en faisant des calculs non-linéaires dynamiques (calculs temporels) à l'aide du logiciel Sofistik. Les conditions géologiques au droit de chaque pile ont été prises en compte finement, ce qui s'est traduit par des mouvements sismiques différents par pile, ainsi que des interactions cinématiques (efforts induits par les mouvements des différentes couches de sol sur les pieux les traversant), au droit de chaque pile.

Les fondations de tous les ouvrages étaient prévues sur pieux. Elles ont pu être maintenues partout moyennant quelques aménagements, sauf sur les deux piles P17 et P19 à l'est décrites ci-après.

LES PONTS POUSSÉS

Les ponts poussés aux deux extrémités sont différents par leurs longueurs : 360 m à l'est et 540 m à l'ouest, ainsi que par leurs tracés en plan : courbe à l'ouest [R=5 000 m], et droit à l'est. Ils sont poussés sur un profil à 5 % avec un poids d'environ 35 t par mètre. (figure 6).

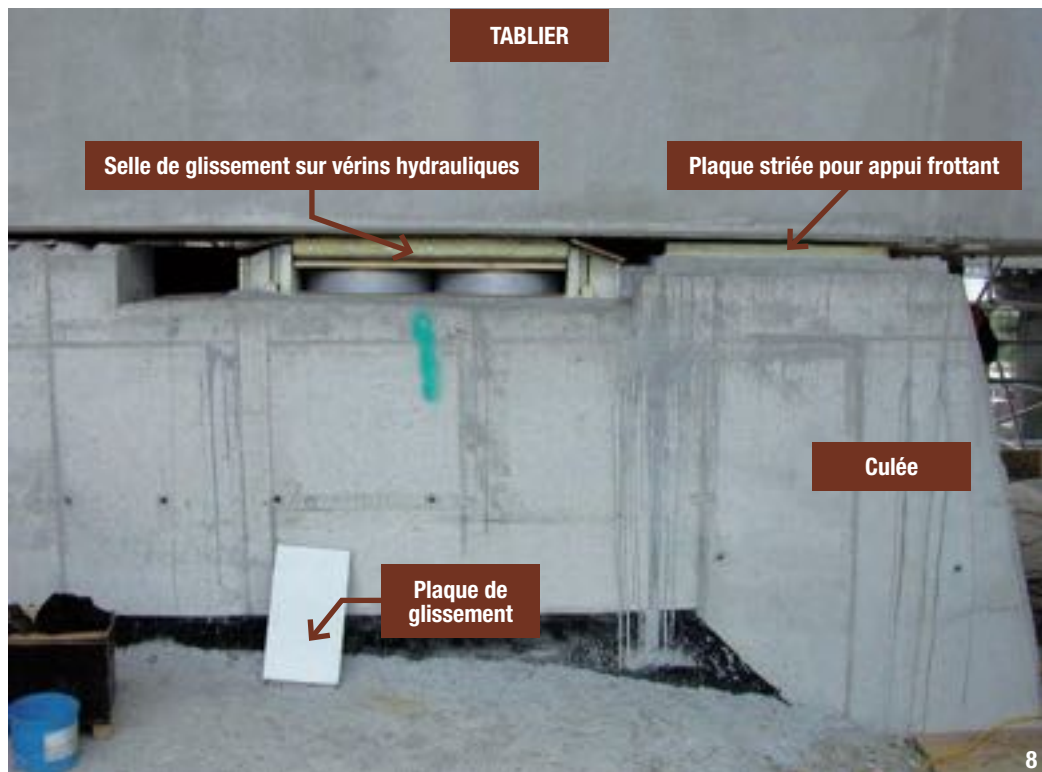
La section transversale a été légèrement optimisée avec une section de hauteur constante : 3,00 m.

Outre les bancs de poussage et les palées provisoires qu'il a fallu rajouter entre les culées et la première pile, les problèmes majeurs pour la conception de ces ponts ont été :

- La fabrication, l'acheminement et le montage/démontage/remontage de l'avant-bec ;
- Le schéma de précontrainte de poussage avec des câbles principalement extérieurs au béton ; les prescriptions des AASHTO sont en effet très limitatives pour l'utilisation des câbles extérieurs, ce qui est dû surtout au fait que ce mode de construction par poussage est très peu utilisé outre-atlantique ;
- La capacité des pousseurs qui devait être dimensionnée pour l'ouvrage le plus long (près de 19 000 t) en intégrant la pente de 5 %, des pousseurs existants devant être réutilisés (figure 7) ;
- Les dispositifs complémentaires de retenue des ouvrages, les frottements pouvant être mobilisés sur culée et palées provisoires étant insuffisants pour l'ouvrage le plus long.

Pour chaque ouvrage, un banc de poussage de 68 m de long, constitué de 3 longrines fondées sur pieux, a été prévu à l'arrière de la culée. Une palée provisoire a été rajoutée dans la première travée, à 17 m de la culée.

Chaque travée de 45 m est coulée en quatre tronçons sur le banc, dont un voussoir sur pile et deux déviateurs, chaque tronçon étant coulé en deux phases : d'abord le U inférieur constitué du hourdis inférieur et des âmes du caisson, puis la table supérieure. Avant chaque poussage la précontrainte longitudinale est mise en tension : 2 câbles 12C15s et 2 câbles 19C15s internes, et 8 câbles 27C15s externes par travée, la précontrainte transversale 4F15s@600 mm est mise en tension avant le poussage de la travée totale. Un avant-bec métallique de 32,75 m de long pesant 90 t (figure 6) a été utilisé, il est fixé au tablier par l'intermédiaire de barres de précontraintes horizon-



8- Détail des appuis sur culée pendant le poussage.
9- Dispositifs de freinage complémentaire.

8- Detail of supports on the abutment during pushing.
9- Additional braking devices.

tales. L'avant-bec ayant une hauteur de 3,6 m plus importante que celle du tablier [3,0 m], des plots en béton ont été provisoirement rajoutés sur le hourdis supérieur, ces plots sont fixés par des barres verticales de précontrainte. Pour prévenir tout désordre en cas de séisme pendant les phases de construction, les piles ont été équipées en tête de dispositifs provisoires servant à la fois de guidage latéral et d'amortissement transversal [systèmes à ressort précontraint].

Les pousseurs sont ceux de l'entreprise précédemment utilisés sur le projet de l'Oresund pour les éléments de tunnels. Ces pousseurs, au nombre de trois (figure 7) et d'un poids unitaire de 25 t, sont constitués de deux vérins hydrau-



liques avec une course de 1 200 mm et une capacité par pousseur de 615 t, donc 1 850 t au total. Ils sont fixés par serrage sur chacune des longrines. Le poussage du pont se fait travée par travée sur des plaques en acier avec un contact acier/acier, les coefficients de frottement pris en compte sont variables selon les phases considérées :

- Sur le banc de poussage : 25% en phase de démarrage et 15% en phase de poussage ;
- Sur les appuis glissants : 2,5% en phase de démarrage et moins de 2% en poussage.

Pendant les phases de poussage, un seul pousseur est suffisant pour « retenir » le pont jusqu'à la 8^e travée, au-delà, il faut prévoir de déplacer les pousseurs un par un.

À la fin du poussage de chaque travée, le tablier est déveriné sur la culée et la palée provisoire afin qu'il repose sur des tôles striées et que ces deux appuis puissent assurer par frottement le freinage du pont (figure 8).

En plus, pour le pont Est, il faut pouvoir mobiliser une capacité de freinage de



10 © PHOTOTÉQUE VINCI ET FILIALES

10- Le pont en encorbellements Ouest.

11- Étaieiment lourd Hebetec en rive.

**10- The west cantilever bridge.
11- Heavy Hebetec strutting on the bank.**

925 t et il a fallu prévoir à partir de la travée 8 des dispositifs complémentaires de freinage pouvant reprendre 500 t supplémentaire, les efforts étant transmis par butonnage de la sous-face du tablier sur la culée (figure 9).

Au final, le cycle de poussage d'une travée se fait sur trois semaines. Les câbles extérieurs de continuité (6 câbles 27C15S) complètent la précontrainte.

LES PONTS EN ENCORBELLEMENT

Les travures des ponts à modules de 78 m ont en fait été revues afin d'optimiser les travées de rive tout en respectant l'harmonie générale, le découpage final des ouvrages est le suivant :

- À l'ouest (figure 10), les 7 x 78 m ont été remplacés par : 62,50 m – 5 x 82 m – 74 m ;
- À l'est, les 4 x 78 m ont été remplacés par : 74 m – 2 x 82 m – 74 m ;
- Le pont sur la voie ferrée est resté dans sa configuration initiale : 74 m – 125 m – 74 m.

Les sections transversales ont été légèrement optimisées avec une section à hauteur variable : 2,80/4,40 m pour les travées de 82 m et 3,00/7,50 m pour la travée de 125 m.

Les fléaux sont coulés en place à l'aide d'équipages mobiles de 60 t chacun pour les fléaux de 82 m et de 70 t chacun pour les fléaux de 125 m. Deux paires d'équipages sont utilisées pour couler les 9 fléaux de 82 m, et une paire pour les deux fléaux de 125 m.



11 © PHOTOTÉQUE VINCI ET FILIALES



12

© PHOTO THÉÂTRE VINCI ET FILIALES

12- Fléau du 125 m et console de rive.

13- Fondations spéciales P17 et P19.

12- 125-metre deck section and edge cantilever girder.

13- Special foundations P17 and P19.

Chaque voussoir de 3,50 m est précontraint par 2 câbles 25C15s.

La configuration particulière avec des ouvrages de part et d'autre du canal a nécessité 58 opérations de hissage/déhissage de matériels lourds (coffrages spéciaux, équipage mobile, cintre...) et transferts par barge sur le canal.

Pour la travée spéciale de 125 m au-dessus de la voie ferrée, une grue mobile a été utilisée sur le tablier pour achever les extrémités des fléaux.

La construction cyclique des fléaux est classique et se déroule sur 4 jours par paire de voussoirs :

FONDACTIONS SPÉCIALES P17 ET P19



13

© PHOTO THÉÂTRE VINCI ET FILIALES

- Avancée et réglage de l'équipage ;
- Mise en tension de la précontrainte de fléau des voussoirs précédents ;
- Pose de la cage d'armature en U préfabriquée ;
- Avancement du noyau coffrant intérieur ;
- Pose de la cage d'armature « table supérieure » préfabriquée ;
- Fermeture des masques et bétonnage.

Les travées de rive ne pouvaient pas être construites par sur-encorbellements pour les fléaux de 82 m.

Une innovante tour d'étalement de forte capacité auto-télescopique de grande hauteur (60 m) a spécialement été développée par Vinci Construction Grands Projets et Hebetec pour le projet (figure 11).

Les fléaux sont cloués provisoirement sur les piles par 4 câbles 19T125S, les appuis définitifs étant mis en place après clavage des fléaux entre eux. Les câbles d'éclisse (8 câbles 23C15S par travée) et les câbles extérieurs de continuité (8 câbles 22C15S) complètent la précontrainte.

Pour les fléaux de 125 m dont les travées de rive font aussi 74 m, donc relativement courtes par rapport aux fléaux (balancement 0,59xL), il a été possible d'utiliser des consoles directement accrochées aux piles P13 et P16 (figure 12).

Les appuis P17 et P19 du viaduc Est ont nécessité une attention particulière du fait des configurations géologiques très défavorables sous excitations sismiques, qui généraient des sollicitations inacceptables pour

des fondations profondes sur pieux. La solution finale se devait de protéger au maximum la pile et sa fondation des effets cinématiques d'interaction.

Les principes retenus sont les suivants (figure 13) :

- Supprimer les pieux principaux en conservant uniquement la semelle de la fondation sous la pile ;
- Substituer le mauvais sol par un gros béton entre la sous-face de la semelle et le niveau supérieur de la couche de rocher (Gatun Rock), soit sur 12 m de hauteur ;
- Prévoir une enceinte périphérique de plus de 18 m de diamètre en pieux sécants fichés dans le rocher, et travaillant uniquement en « touches de piano » sans reprise de traction annulaire.

Les efforts ont été évalués en considérant un modèle global 3D « Sol+Structure », y compris la modélisation de la masse du tablier (3800 t) et de ses appuis pendulaires parasismiques sur la pile, grâce à une analyse aux Éléments Finis (logiciel Dynaflo) et des calculs prenant en compte les non-linéarités du sol avec des lois de comportement complexes (Multi-yield Elastoplastic model with kinematic hardening based on plasticity theory). Ces analyses compliquées ont permis ainsi d'évaluer au plus juste l'ensemble des sollicitations sur la semelle de fondation et l'enceinte de pieux sécants issus à la fois des effets inertiels (les réponses du pont au séisme) et des interactions cinématiques (les effets du aux mouvements propres des couches de sol sur les fondations). □

QUANTITÉS PRINCIPALES

Pont poussé Longueur totale = 900 m	Béton	Armatures	Précontrainte
Pieux et semelles	12 785 m ³	1 596 t	-
Culées Piles et têtes de piles	4 740 m ³	757 t	-
Tabliers	11 470 m ³	2 530 t	677 t

Pont en encorbellement Longueur totale = 1 132 m	Béton	Armatures	Précontrainte
Pieux et semelles	14 747 m ³	1 752 t	-
Culées Piles et têtes de piles	6 083 m ³	1 300 t	-
Tabliers	18 025 m ³	3 965 t	975 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

CLIENT :

ACP (Autoridad del Canal de Panamá)

INGÉNIEUR CONSEIL :

China Communications Construction Company Highway Consultants et Louis Berger Group

ENTREPRISE GÉNÉRALE :

Pasa (Vinci Construction Grands Projets)

BUREAU D'ÉTUDES :

Vinci Construction Grands Projets (Vcgp) -
Département Conception et Études de Structures (Dces)

PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES :

Vinci Construction Grands Projets - Département Scientifique -
Pôle géotechnique

PARAMÈTRES SISMOLOGIQUES ET ANALYSE P17-P19 :

Géodynamique et Structure

PRÉCONTRAINTE : Freyssinet

BUREAU DE CONTRÔLE STRUCTURES :

International Bridge Technology (IBT)

BUREAU DE CONTRÔLE GÉOTECHNIQUE :

Dan Brown and Associates

ABSTRACT

THIRD CROSSING OVER THE PANAMA CANAL: VIADUCTS ON ALL FRONTS

ÉRIC JOLY, VINCI - LAURENT AGOSTINI, VINCI - SAMUEL LHUISSIER, VINCI - GUILLAUME DECOUX, VINCI

After a significant reappraisal of the initial design, both the design and the construction technique for the access viaducts to the third bridge over the Panama Canal were optimised in response to challenges related to the site constraints: geological profiles, earthquakes, and impossibility of using work barges on the canal permanently. It was also essential, from a human resource viewpoint, to provide for two different construction techniques. The general configuration was very suitable for the design of launched bridges at both ends of the canal, and cantilever bridges elsewhere. All the structures rest on their piers via spherical pendular supports, which are extremely effective with respect to seismic risk. The highly varied geological profiles, sometimes very unfavourable due to the presence of large soft layers (Atlantic Muck), in some cases required strengthening of the deep foundations with piles, or even changing the foundations for special foundations of an original design. □

TERCER PASO SOBRE EL CANAL DE PANAMÁ: VIADUCTOS EN TODOS LOS FRENTES

ÉRIC JOLY, VINCI - LAURENT AGOSTINI, VINCI - SAMUEL LHUISSIER, VINCI - GUILLAUME DECOUX, VINCI

Tras la revisión a fondo del diseño inicial, los viaductos de acceso del tercer puente sobre el canal de Panamá se han optimizado a la vez en su diseño y su modo de realización para responder a los problemas generados por las restricciones del emplazamiento: perfiles geológicos, sismos e imposibilidad de utilizar permanentemente barcasas de trabajo en el canal. Asimismo, ha sido imprescindible prever dos modos de construcción en términos de medios humanos. La configuración general ha facilitado el diseño de los puentes pretensados en los dos extremos del canal, y de puentes en ménsula en el resto de puntos. Todas las construcciones reposan sobre sus pilotes mediante apoyos pendulares esféricos, especialmente eficaces ante el riesgo sísmico. Los perfiles geológicos muy variados, y en ocasiones desfavorables a causa de la presencia de importantes capas blandas (Atlantic Muck), han exigido en algunos casos refuerzos de los cimientos profundos mediante pilotes, e incluso cambiar dichos cimientos por cimientos especiales de diseño original. □



1
© DGIR (DIRECTION GÉNÉRALE DES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES)

L'ÉCHANGEUR NORD DE OUAGADOUGOU AU BURKINA FASO : DES OUVRAGES D'ART SUR UN BARRAGE

AUTEURS : JEAN-BAPTISTE PRAT, INGÉNIEUR PRINCIPAL, ENTREPRISE ISC - PIERRE-ÉTIENNE LATOUR, DIRECTEUR DE PROJET, ENTREPRISE SOGEA-SATOM

AU MÊME TITRE QUE L'ENSEMBLE DES CAPITALES SOUS-RÉGIONALES, OUAGADOUGOU, EN FORTE EXPANSION, DOIT TRAITER SES PRINCIPAUX NŒUDS ROUTIERS URBAINS COMME UNE ÉTAPE PRÉALABLE À LA POURSUITE DE SON URBANISATION. LA ZONE D'IMPLANTATION DU FUTUR ÉCHANGEUR NORD DE OUAGADOUGOU EST UN DE CES NŒUDS À LA CONFLUENCE DE 2 ROUTES NATIONALES, DU BOULEVARD CIRCULAIRE, D'UNE VOIE FERRÉE ET DE DEUX DES TROIS BASSINS DES BARRAGES DE OUAGADOUGOU. EN 2015, LES USAGERS POUVAIENT PERDRE 50 MINUTES POUR TRAVERSER CE CARREFOUR.

PRÉSENTATION DU PROJET

Le projet de l'échangeur Nord de Ouagadougou au Burkina Faso se monte à 67 milliard de francs CFA (102 millions d'€) financé par l'état burkinabé et réalisé par Sogea Satom (Vinci Construction) sur une durée de 36 mois (démarrage des travaux le 26 novembre 2015).

Ce projet permettra d'améliorer la circulation à l'intérieur de Ouagadougou par le prolongement du Boulevard Circulaire à travers le quartier Tanghin - en direction du futur nouvel aéroport -, d'accroître globalement le niveau de sécurité routière et de faciliter le dépla-

cement des populations des communes de Signohin, Baskuy, Nongremassom et Kamboisin (plus de 800 000 habitants au total).

L'aménagement de l'échangeur Nord doit permettre le passage d'une voie à l'autre sans carrefour ni feux rouges tout en conservant le fonctionnement des barrages N°1 et N°2.

Le bureau d'étude chargé de la conception du projet a envisagé plusieurs configurations pour cet échangeur : aménagement d'un giratoire en passage supérieur à 6 m de hauteur et d'un viaduc à 12 m par rapport au terrain naturel, aménagement en tréfle

1- Vue d'ensemble 3D.

1- Overall 3D view.

complet, aménagement en lunette, etc. Finalement, la solution d'un aménagement en quatre nœuds à anse a été retenue pour l'échangeur principal. Cette option est une combinaison de plusieurs passages supérieurs à chaque intersection et d'un passage

supérieur au niveau central. Par ailleurs, la RN22 traverse l'avenue Yatenga à 6 m de haut pour se raccorder à cette dernière par une sortie en trompette ou aux autres axes par une anse raccordée à l'échangeur principal.

L'assemblage des 4 anses forme une boucle de desserte à 6 m de hauteur et comporte quatre ouvrages de franchissement : deux au-dessus de l'avenue Yatenga et deux au-dessus du boulevard circulaire. Pour tourner à gauche, il faudra donc emprunter trois ouvrages tandis que pour tourner à droite, il suffira de sortir par une des anses avant l'échangeur principal.



2
© PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES

LES OUVRAGES DE GÉNIE-CIVIL

L'échangeur se caractérise par un nombre significatif d'ouvrages de génie-civil en béton armé. Outre les ouvrages d'assainissement type dalot et caniveau en grand nombre pour un ouvrage situé au droit d'un barrage, on compte plusieurs types d'ouvrages d'art courants (sur radier ou semelles superficielles et, pour certains, sur pieux forés) :

2- Vue aérienne d'ensemble.
3- Vue aérienne OA3 et OA4.

2- Overall aerial view.
3- Aerial view of OA3 and OA4.

- Portique ouvert type PIPO (OA3 d'une portée de 17,9 m) ;
 - Portiques doubles type POD (OA 4 à 10 d'une portée de 14 à 22 m) ;
 - Portiques triples sur voie ferrée (OA 1 et 2 d'une longueur de 44 et 56 m sur trois travées) ;
 - Cadres multicellulaires (OH 1 à 4).
- Le choix des cadres pour les ouvrages assurant la traversée du canal s'est imposé, d'une part, pour répartir au maximum la descente de charge sur

le sol de qualité médiocre au droit du barrage et, d'autre part, pour limiter les joints entre les OH et le radier du canal. Ce projet a été l'occasion de mettre en œuvre plusieurs nouveautés techniques au Burkina Faso telle l'utilisation d'une cintreuse hydraulique pour réaliser les nœuds de ferrailage des ouvrages. Cette solution a permis la réduction des quantités d'acier en supprimant le recouvrement des gros diamètres, la réduction des risques de fissuration liés aux poussées au vide dans ces zones de recouvrement en équerre et la simplification de la mise en œuvre du béton des culées avec des attentes non coudées. La réduction du ratio d'armatures des différentes dalles est évaluée à 5 kg/m³. Enfin, une harmonie architecturale a été recherchée au niveau des corniches et des piles qui ont toutes la même forme sur l'ensemble du projet.

UN BARRAGE SOUS UN ÉCHANGEUR

FONCTIONNEMENT ACTUEL DES BARRAGES 1, 2 ET 3

Le nord de Ouagadougou est caractérisé par la présence de 3 bassins réalisés dans les années 1950 pour permettre l'alimentation en eau potable de la ville. Une urbanisation importante à proximité de ces bassins a rendu leur eau impropre à la consommation à cause de la pollution et de l'envasement. Ces lacs servent toujours à la pêche et à la culture maraîchère pour alimenter les zones voisines.

Le barrage n°1 a une capacité actuelle de 1 million de mètres cube, pour une surface de 1 million de mètres carrés lorsque la cote du seuil est atteinte. ▷



© PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES
3



© PHOTOTEQUE VINCI ET FILIALES

Le volume retenu provisoirement peut être doublé lors des crues de la saison des pluies survenant entre les mois de juillet et septembre. Le phénomène de crue est accentué par la transformation rapide du bassin versant, d'une part à cause de l'urbanisation et l'aménagement d'infrastructures telles que le bitumage, le pavage ou encore la construction d'habitations qui tendent à imperméabiliser les sols et, d'autre part, du fait de la destruction des savanes arbustives au profit de zones d'activités agricoles nécessaires en raison de la croissance démographique de la région. Le déversoir existant mesure 90 m de long environ et permet de retenir une hauteur d'eau de 2,10 m. Cet évacuateur de crue, assurant la régulation du niveau d'eau du barrage N°1, est un radier revêtu en béton armé. Un bassin de dissipation est situé juste en aval du déversoir, sous le pont.

Une tour de prise et une conduite de diamètre 500 mm complètent l'équipement existant pour permettre l'alimentation de la cuvette du barrage N°2 via un canal d'aménée.

FONCTIONNEMENT FUTUR

Le projet prévoit de pouvoir conserver le fonctionnement des barrages N°1 et N°2 tel qu'à l'origine.

L'emprise de l'échangeur au droit de ces deux barrages implique le remblaiement complet de la zone.

La digue est donc avancée sur le barrage N°1 et en réduit la surface d'environ 80 hectares nécessaires à la construction du projet. La digue étanche est un talus latéritique à 1/2

contenant en son centre un noyau argileux dont la profondeur sous le TN varie de -0,5 m en rive jusqu'à -4 m au centre de l'actuel barrage N°1 où la hauteur d'eau est la plus importante. L'arase supérieure de ce noyau est 1 m au-dessus du niveau du seuil permettant ainsi une bonne étanchéité de la digue. L'aval de la digue est, lui, muni d'un drain cheminée en sable qui débouche sur un drain en pied. La hauteur totale de la digue est la même que la précédente digue, soit 4,5 m à son niveau le plus haut au centre du barrage, pour éviter toute inondation des zones localisées en amont.

4- Vue aérienne déversoir, OH1 et OH2, OA9.

5- Réalisation du déversoir.

6- Réalisation du radier à l'amont du pont Baskuy.

4- Aerial view of spillway, OH1 and OH2, OA9.

5- Execution of the spillway.

6- Execution of the foundation raft upstream of Baskuy Bridge.

L'ensemble des remblais nécessaires à la création de cet échangeur comportant environ 22 km de voiries est de quasiment un million de mètres cubes. Cette quantité importante de purges et remblais positionne ce chantier à la fois comme un chantier de terrassement et de génie civil.

L'acheminement du trop-plein du barrage N°1 vers le barrage N°2 à travers ces zones fraîchement remblayées est prévue grâce à la construction d'un canal de 600 m de long, 42 m de large et 3,5 m de haut soutenant les remblais de la zone de l'échangeur. Ce canal est muni à l'amont, sur une



© PHOTOTEQUE VINCI ET FILIALES



7

longueur de 94 m, d'un déversoir suivi par un coursier qui permet d'accélérer le volume d'eau entrant et lui permettre de s'écouler sur la longueur du canal. L'accélération est assurée par une pente à 3%. Ces deux éléments représentent une surface bétonnée de 5000 m² avec un radier d'épaisseur 40 cm. Le canal permettant ensuite le rejet de la crue dans le barrage N°2 mesure 433 m de long et 42 m de large avec une épaisseur de radier de 25 cm et des voiles de 35 cm sur

7- Ferrailage de la culée de l'OA7.
8- Seuil existant et pont Baskuy.
9- Démolition du seuil existant.

7- Reinforcing bars for the abutment of OA7.
8- Existing weir and Baskuy Bridge.
9- Demolition of the existing weir.

3,5 m de haut. La pente du canal est de 0,25%.

La longueur du seuil de déversement passe de 90 m à 115 m pour améliorer le débit d'évacuation. Ce débit est augmenté pour pallier la réduction de superficie du barrage N°1 et anticiper la potentielle dégradation du bassin versant. L'adoption d'un profil Creager au profit du seuil épais existant permet également l'amélioration du laminage puisque son coefficient de débit passe de 0,39 à 0,48.

Le débit de crue projet passe ainsi à 165 m³/s.

Le seuil est fondé sur un radier poids en béton armé et la stabilité de l'ensemble est assurée par un parafouille en béton armé enfoui de 1,10 m, jouant le rôle de bêche. Ce parafouille est prolongé de 1,10 m supplémentaire en béton cyclopéen pour assurer une bonne étanchéité et limiter les infiltrations d'eau sous le radier. Un tapis de matériau étanche est également mis en

place devant le seuil pour augmenter le trajet d'infiltration et ainsi limiter l'effet de renard hydraulique.

Une des difficultés a été de déterminer la perméabilité du sol alors qu'aucune reconnaissance particulière n'a pu être réalisée avant la vidange du barrage N°1 qui a eu lieu en septembre 2016. Elle a été mesurée au moyen d'essais Lefranc effectués à intervalle de 25 m sur le périmètre du seuil. Les résultats ont été corrélés par la mesure du temps de remplissage de la tranchée de drainage. Des poches d'eau sous pression emmagasinées dans le terrain ont été observées lors de creusement à la pelle, faisant apparaître des canalicules. Ce phénomène provisoire, qui s'est retrouvé lors de la réalisation des essais Lefranc, a été corrigé lors de l'interprétation des résultats.

Les sous-pressions sous le radier sont annulées par la réalisation d'un réseau de drains en gravier et tube perforé couvrant la superficie du déversoir. ▷



8



9



10



11

© PHOTOTEQUE VINCI ET FILIALES

Ce réseau de drainage est connecté plus loin à deux regards permettant le contrôle du débit dans ces drains et l'évacuation de cette eau vers le barrage N°2.

FONCTIONNEMENT PROVISOIRE

Le rétablissement du fonctionnement hydraulique lors de l'exécution s'est déroulé en deux étapes correspondant aux deux périodes sèches des travaux du canal.

Lors de la première période, une digue provisoire a été montée pour permettre de réaliser au sec deux tronçons de la digue ainsi que le déversoir et le premier ouvrage hydraulique de franchissement (OH1).

Une ouverture est ménagée dans les digues provisoire et définitive pour permettre le passage de la crue de la saison des pluies de 2016 par l'ancien déversoir. L'ancienne digue ainsi que le pont sont laissés en service pendant cette période pour ne pas couper la circulation de l'avenue Yatenga.

La deuxième étape commence dès septembre 2016. Le barrage N°1 est vidangé pour permettre la fin des travaux sur la nouvelle digue mise sous

10- Mesure de la vitesse de remplissage de la tranchée de drainage.

11- Faciès géologique au droit du barrage.

12- Essai géologique pour l'OA1 au croisement de l'avenue Yatenga et de la voie ferrée.

10- Measuring the drainage trench filling rate.

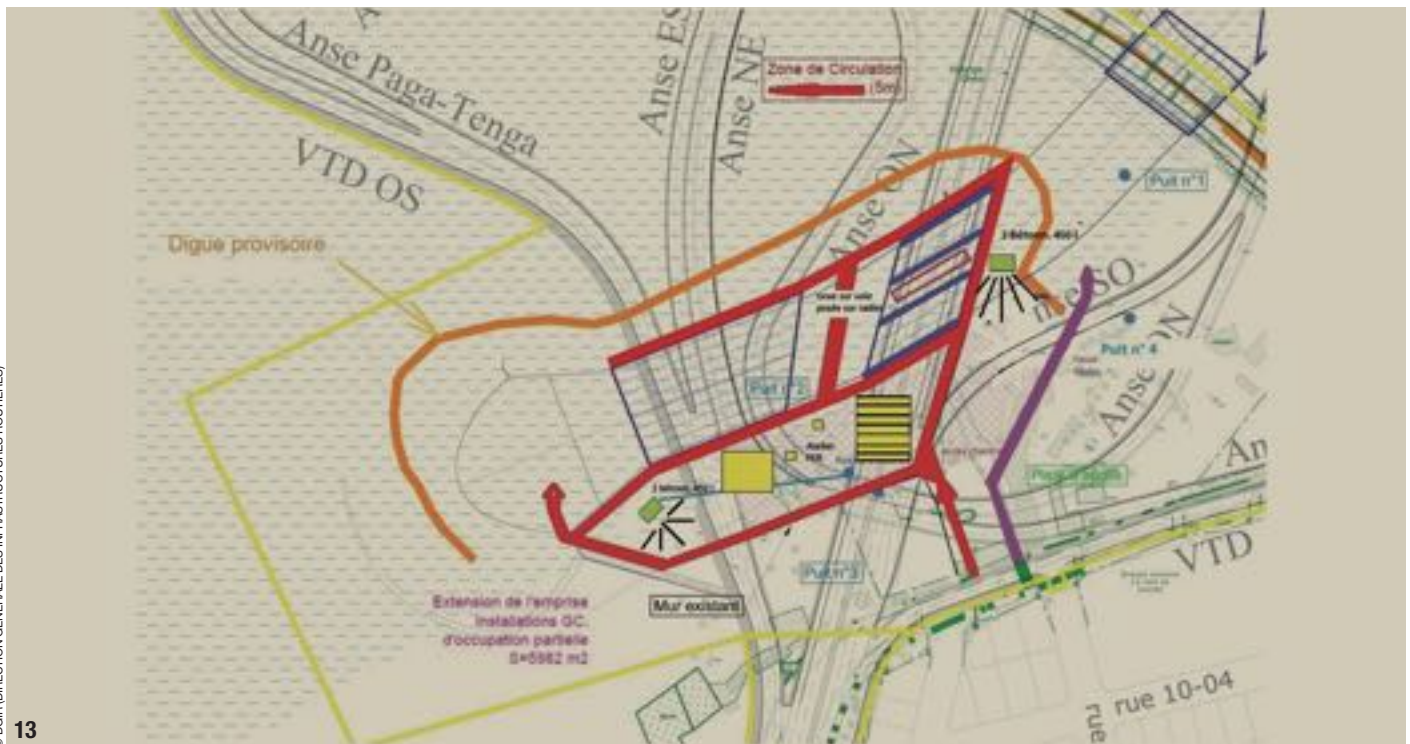
11- Geological facies at the dam level.

12- Geological test for OA1 at the intersection of Yatenga Avenue and the railway line.



12

© PHOTOTEQUE VINCI ET FILIALES



circulation en substitution à la RN2 désormais coupée. Le pont de Baskuy et le déversoir existant peuvent alors être détruits laissant la place pour les travaux sur le canal ainsi que sur les OH2 à OH4 qui doivent impérativement être terminés avant le début de la saison des pluies 2017.

En effet une fois la digue terminée, il était obligatoire de terminer le canal avant l'arrivée des pluies au risque de noyer l'ensemble du chantier ou d'inonder les riverains occupant les zones en amont du projet.

Le respect du planning a été compliqué par l'arrivée précoce de la saison des pluies et par les modifications liées aux optimisations du projet durant sa construction. En effet, l'axe du canal a été corrigé pour diminuer l'angle d'in-

13- Plan digue provisoire Canal Amont.

13- Drawing of Upstream Canal temporary dyke.

tersection avec l'axe routier passant au droit de l'OH4 et donc le biais de cet ouvrage cadre multicellulaire. La nouvelle conception puis les justifications et les plans de coffrage-ferraillage ont été livrés de manière à permettre leur validation et leur exécution avant les

pluies qui auraient pu mettre en danger les travaux. Le travail en poste de nuit a été mis en place sur cette partie de l'ouvrage de mars à mai 2017.

L'axe du canal est ainsi passé d'un tracé droit à un tracé en S. Outre ses avantages financiers, cette modification a permis de ralentir le débit en sortie du canal (la largeur du canal a pu être agrandie) et donc de réduire les risques d'affouillement à son exutoire en supplément d'un parafouille et d'un lit d'enrochements sur 5 m déjà prévus à l'aval. L'optimisation des quantités de béton a pu être évaluée à 2400 m³ sur l'OH4 (soit 45% de son volume béton initialement prévu) et 100 m³ sur le canal du fait de la diminution de sa longueur globale. Le planning a finalement bien été tenu. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- CLIENT : État Burkinabé**
- MAÎTRE D'ŒUVRE : Ageim**
- ENTREPRISE GÉNÉRALE: Sogea Satom (Vinci Construction)**
- BUREAU D'ÉTUDES DE CONCEPTION : Ageim**
- BUREAU D'ÉTUDES D'EXÉCUTION DU GÉNIE CIVIL : Isc (Vinci Construction)**

ABSTRACT

THE OUAGADOUGOU NORTH INTERCHANGE IN BURKINA FASO: ENGINEERING STRUCTURES ON A DAM

JEAN-BAPTISTE PRAT, ISC - PIERRE-ÉTIENNE LATOUR, SOGEA-SATOM

Due to its technical and methodological innovations, the construction of the Ouagadougou North interchange allows training of about a thousand workers in advanced techniques (placing formwork panels, work at a height, propping with truck passageway, etc.). It also demonstrates the expertise of local and international representatives who are established in the country extensively. Once its construction is completed, the interchange will allow development of the region by increasing the fluidity of road arteries and access to the residential areas of northwest Ouagadougou. Significant space has been left for pedestrian and cyclist traffic and for improving the operation of the city's hydroelectric dams. □

EL ENLACE NORTE DE UAGADUGÚ EN BURKINA FASO: OBRAS DE FÁBRICA SOBRE UNA PRESA

JEAN-BAPTISTE PRAT, ISC - PIERRE-ÉTIENNE LATOUR, SOGEA-SATOM

Utilizando innovaciones técnicas y metodológicas, la construcción del enlace norte de Uagadugú va a permitir formar a un millar de compañeros acerca de técnicas avanzadas (instalación de ramales, trabajo en altura, apeos con paso bajo andamio, etc.). Asimismo, permitirá demostrar la capacidad de los interlocutores locales o internacionales ampliamente implantados en el país. Una vez finalizado, el enlace agilizará el desarrollo de la región aumentando la fluidez de los ejes de tráfico vial y conectando zonas residenciales del noroeste de Uagadugú. Se ha reservado un espacio importante para la circulación no motorizada y para la mejora del funcionamiento de las presas hidráulicas de la ciudad. □



1

© SUEZ

BARKA - USINE DE DESSALEMENT D'EAU DE MER AU SULTANAT D'OMAN

AUTEURS : PIERRE GUERIN, INGÉNIEUR, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - GEOFFREY GOSSE, CHEF DE SERVICE GÉNIE CIVIL, INGEROP - PASCAL TROLES, CHEF DE SERVICE GÉNIE CIVIL, SUEZ

LA PHASE 4 DE L'EXTENSION DE L'USINE DE DESSALEMENT D'EAU DE MER DE BARKA, SUR LA CÔTE DE LA BATINAH AU NORD D'OMAN, AVEC UNE CAPACITÉ DE 281 000 m³ PAR JOUR, EST LA PLUS GRANDE USINE DE DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSÉE DU SULTANAT D'OMAN. SA MISE EN SERVICE EST PRÉVUE EN AVRIL 2018 APRÈS DEUX ANS D'ÉTUDES ET DE TRAVAUX. SITUÉE EN BORDURE DE MER, UNE DES PRINCIPALES DIFFICULTÉS TECHNIQUES RÉSIDE DANS LA RÉALISATION DES NOMBREUX OUVRAGES ENTERRÉS EN RAISON DE LA PRÉSENCE DE LA NAPPE À TRÈS FAIBLE PROFONDEUR DANS DES TERRAINS À DOMINANTE SABLEUSE.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Au cours des 20 dernières années, le gouvernement du sultanat d'Oman s'est engagé dans un programme réussi pour la restructuration et le développement de la participation du secteur privé dans le secteur de l'électricité et des eaux.

OPWP (Oman Power and Water Procurement) a choisi le consortium Barka Desalination Company formé par Suez et ses partenaires pour le financement, la construction et l'exploitation d'une nouvelle usine de dessalement d'eau de mer à Barka (figure 1). Ce partenariat public-privé BOO (Build

1- Vue aérienne du chantier.

1- Aerial view of the site.

Own Operate) prévoit la construction et l'exploitation de cette installation d'une capacité de 281 000 m³ par jour, la plus grande usine de dessalement par osmose inverse du sultanat d'Oman. Suez est chargé de la construction de l'usine (figure 2) et de son exploitation pour une durée de 20 ans.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Le site de Barka est situé à quelques dizaines de mètres de la mer, à l'est de la péninsule arabique sur la côte où les formations rencontrées peuvent être classées en cinq unités géologiques constituées de matériaux alluvionnaires plus ou moins cimentés (figures 3 et 4) :

- Des sables (sables de plage) : il s'agit d'un horizon de sables fins légèrement limoneux avec de nombreux débris de coquillages ;
- Des dépôts éoliens : il s'agit de matériaux sableux fins à très fins recouvrant les dépôts alluvionnaires récents ;
- Des dépôts alluvionnaires récents : il s'agit de matériaux alluvionnaires marins, principalement des sables et des limons ;
- Des dépôts alluvionnaires : il s'agit de limons sableux et de gravas localement cimentés ;
- Des dépôts alluvionnaires anciens : il s'agit de limons sablo-graveleux bien cimentés ou de roches sédimentaires altérées.

Le site est proche des monts Hajar qui se sont formés par obduction lors de la



2 © SUEZ

collision entre la plaque Européenne et la plaque Arabique. Ces phases tectoniques sont à l'origine de l'apparition de plusieurs zones de failles associées à une activité sismique du secteur qui est ainsi classé en zone A2 selon l'International Building Code, avec une accélération de référence de 0,15 g et un séisme de référence de magnitude 6,1.

RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

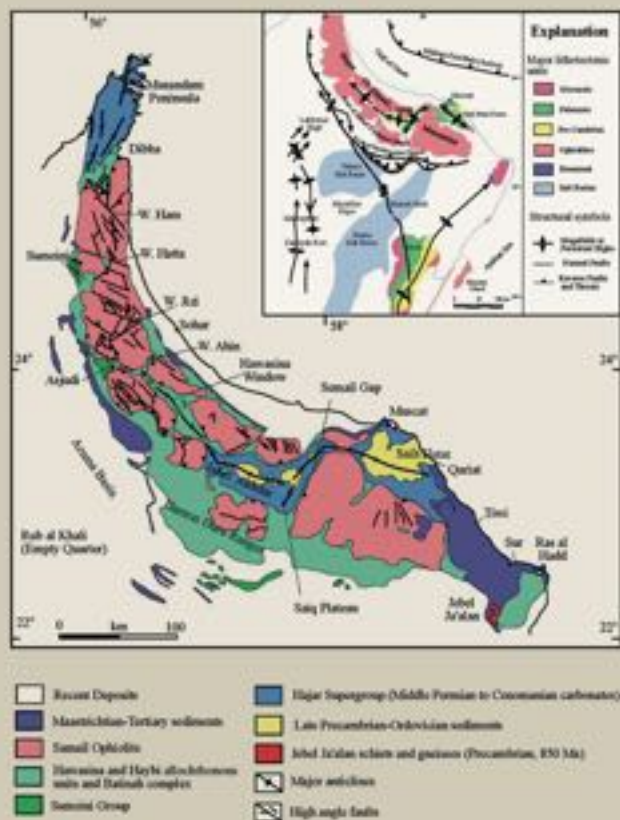
En phase d'offre, seules les reconnaissances géotechniques du site voisin où était déjà construite la phase 3 de l'usine de Barka étaient disponibles pour permettre à Geos de réaliser les études de pré-dimensionnement géotechniques des ouvrages.

Ces données, si elles ont permis de fiabiliser les options de conception n'étaient pas suffisantes pour mener à bien dans de bonnes conditions d'optimisation les études d'exécution. Ainsi, un programme de reconnaissances géologiques et géotechniques complémentaires a été établi par Geos préalablement au démarrage des études d'exécution.

- En novembre et décembre 2015, dans un délai très court, les reconnaissances (figure 5) suivantes ont été réalisées :
- 18 sondages carottés à 20 ou 30 m de profondeur avec essais SPT tous les 2 m et prélèvements d'échantillons intacts ;
 - 3 essais cross-hole pour déterminer la classe de sol sous séisme pour le site ;
 - 78 sondages au pénétromètre statique ;
 - 18 puits à la pelle mécanique ;
 - Des essais d'identification et de mécanique des sols sur les matériaux prélevés.

Le programme a été établi pour permettre une optimisation des ouvrages géotechniques notamment par l'emploi d'un pénétromètre statique qui permet de réaliser un dimensionnement plus fiable que les essais SPT utilisés habituellement dans cette région. Des essais SPT (figure 6) ont tout de même été réalisés afin de confirmer les résultats des horizons superficiels et de qualifier les horizons profonds qui n'ont pas pu être atteints avec le pénétromètre statique. Geos a exploité ces sondages pour établir les notes d'hypothèses géotechniques générales (pour l'ensemble du site), particulières (un modèle adapté à chaque ouvrage a été réalisé afin d'optimiser le dimensionnement) et les notes de calculs pour l'ensemble des ouvrages géotechniques du projet : ▷

CARTE GÉOLOGIQUE DU NORD D'OMAN



3

© THE GEOLOGICAL SOCIETY OF LONDON

2- Ferrailage d'un radier.

3- Carte géologique du nord d'Oman.

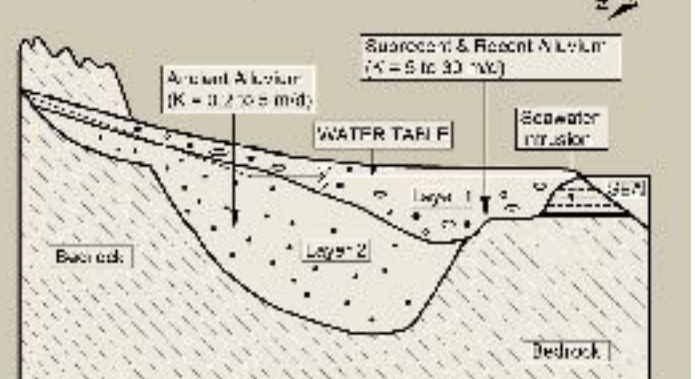
4- Coupe géologique Sud-Nord.

2- Reinforcing bars for a foundation raft.

3- Geological map of northern Oman.

4- South-North geological cross section.

COUPE GÉOLOGIQUE SUD-NORD



4

© JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING



5 © SUEZ

fondations superficielles, fondations profondes et soutènements pour les fouilles et ouvrages enterrés.

Une optimisation des fondations a pu être réalisée grâce à ces éléments par rapport à la conception prévue au stade de l'appel d'offre avec notamment la suppression des renforcements de sols par inclusions rigides ou colonnes ballastées sur plusieurs ouvrages.

Les solutions d'amélioration des sols destinées à réduire les risques de tassement et de tassements différentiels se sont alors limitées à la réalisation d'une purge des matériaux les plus compressibles en surface et leur substitution sur 2 m d'épaisseur sous deux ouvrages.

Les reconnaissances géologiques et géotechniques ont ainsi permis de définir la stratigraphie du site : les premiers mètres sont constitués de dépôts sableux à limono-sableux de compacité faible puis augmentant avec la profondeur sur 8 m d'épaisseur.

Un niveau très compact intermédiaire, lié à une phase de cimentation des matériaux, est présent sur la majorité des sondages vers 3 à 4 m de profondeur.

À la base des dépôts les plus récents, les terrains rencontrés sont sablo-graveleux puis sablo-limoneux avec des bancs indurés. Il s'agit donc de terrains dont la perméabilité peut être, selon leur granulométrie, de moyenne à élevée.

Le substratum rocheux est constitué de conglomérats et de grès à partir de 20 m de profondeur environ. Tous les essais réalisés dans le substratum ont été plafonnés à 50 coups au SPT.

Les formations recoupées par les travaux de terrassement ont fait l'objet d'essais d'identification afin d'optimiser le mouvement des terres sur le site en définissant dès les phases d'études géotechniques d'exécution les modalités de réemploi des matériaux du site. Tous les matériaux, à l'exception d'une couche superficielle de 20 cm d'épaisseur moyenne, ont pu être réemployés pour les travaux de terrassement, soit en remblai général, soit en couche de forme pour les matériaux bien gradués et très peu plastiques (indice de plasticité inférieur à 10).

La zone du projet, située à proximité immédiate de la mer est caractérisée par la présence d'eau à faible profondeur, de 2 à 3 m sous le niveau de la plateforme du site et par une perméabi-

lité relativement forte sur les 7 à 8 premiers mètres (de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}$ m/s). La perméabilité diminue avec la profondeur et la présence de couches contenant une matrice fine et un niveau de cimentation important.

Les essais cross-hole réalisés entre forages voisins sur une profondeur de 30 m ont permis de caracté-

5- Forage en cours.

6- Sondage carotté BH17.

5- Drilling in progress.

6- BH17 core drilling.

ser la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres.

Une valeur de 500 m/s environ a été mesurée pour les trois zones testées. La classe de sol de type C a ainsi été intégrée dans l'ensemble des calculs sismiques.

OUVRAGES RÉALISÉS TERRASSEMENTS

Au démarrage des travaux, des remblais ont été mis en œuvre sur 75 % de la surface du site afin d'atteindre le niveau de plateforme du projet.

Ces remblais ont atteint une hauteur maximale de 1,5 m.

Des terrassements en déblai ont été nécessaires sur plusieurs ouvrages avec la méthodologie suivante :



6 © GECOSOL

- En l'absence d'ouvrage à proximité, un talutage a été privilégié ;
- Dans les autres configurations, les terrassements ont été réalisés à l'abri d'écrans de soutènement en palplanches ou pieux sécants selon les ouvrages avec des dispositifs de pompage pour le rabattement de la nappe.

Les terrassements en déblai ont représenté des volumes conséquents de matériaux qui ont pu être en partie réutilisés sur site conformément aux résultats des études sur le réemploi des matériaux.

BÂTIMENTS

Trois principaux types d'ouvrages composent le projet :

- 1-** Ouvrages enterrés : il s'agit d'ouvrages sur radier de grandes dimensions enterrés à une profondeur variant de 2 à 12 m sous le niveau plateforme projet, soit jusqu'à 8 m sous le niveau de la mer (figure 7) ;
- 2-** Ouvrages superficiels fondés sur un radier de grandes dimensions ;
- 3-** Ouvrages superficiels fondés sur semelles filantes ou isolées.

7- Ferrailage de la station de pompage.

8- Soutènement et pompage.

7- Reinforcing bars for the pumping station.

8- Retaining structure and pumping.



© SUEZ
7

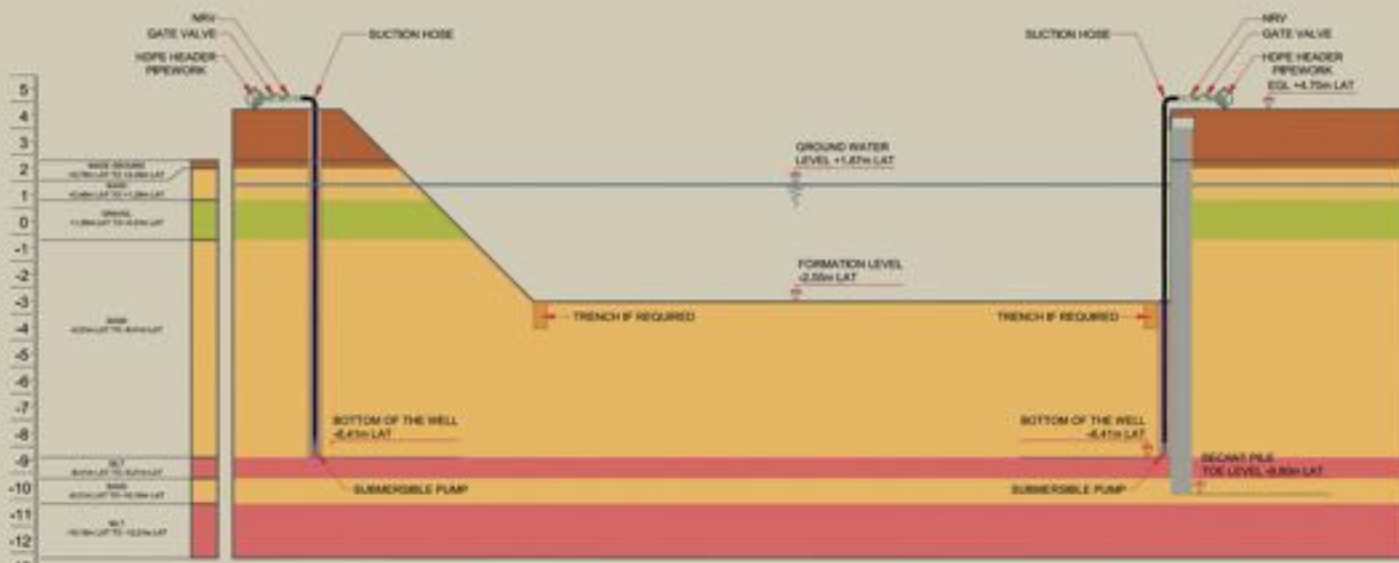


© SUEZ
8

Les études d'exécution géotechniques menées par Geos ont permis de limiter le recours aux fondations profondes pour un seul ouvrage très fortement chargé. Cet ouvrage (Limestone filter) est fondé sur un radier de 40 m par 20 m supportant une charge qui varie de 50 à 200 kPa. Les tassements attendus sous cet ouvrage étaient trop importants, ce qui a conduit à la mise en place de 34 pieux de diamètre 900 mm et de 16 m de longueur.

Pour les autres ouvrages, soit les sols en place étaient suffisamment compacts pour limiter les tassements à des valeurs compatibles avec les structures des installations industrielles, soit il a été réalisé une substitution des deux premiers mètres pour s'affranchir de la couche d'alluvions récentes à dominante argileuse rencontrée localement. Ces substitutions ont permis de limiter les tassements sous les ouvrages à 20 mm. À titre d'exemple, le bâtiment « Reverse Osmosis » qui est constitué d'un radier très long de 30 m x 200 m, constitué de plusieurs modules séparés par des joints de dilatation, a nécessité la réalisation d'une substitution sur 2 m d'épaisseur sur la totalité de la surface soit un volume de terrassement conséquent de 12000 m³. Le remblai d'apport en matériaux sélectionnés a été mis en œuvre par couche de 25 cm d'épaisseur pour assurer un niveau de compactage compatible avec les exigences de compacité recherchées. Des murs de soutènement en pieux sécants ont été réalisés sur plusieurs ouvrages afin d'assurer la stabilité des fouilles des ouvrages enterrés en minimisant à la fois les volumes de terrassement et les impacts sur le planning. En effet, les contraintes de planning ont rendu impérative la construction des deux ouvrages enterrés à 6 m sous le niveau du radier de l'ouvrage DMGF (Dual Media Gravity Filter) parallèlement à la construction de ce dernier. En effet, cet ouvrage, dont la superficie est de 5000 m² environ, se trouvait sur le chemin critique de la construction en termes de planning, il n'était donc pas possible de retarder sa construction. Un système de pompage en périphérie des fouilles a été mis en œuvre pour assurer la réalisation des travaux hors d'eau (figure 8). Un système de 8 pompes immergées a été mis en place dans des forages à 3 m sous le niveau du fond de fouille pour rabattre la nappe. Le débit total pour cette fouille était de 50 à 100 m³/h ce qui a été suffisant pour maintenir la fouille au sec pendant la durée des travaux. ▷

PRINCIPE DE RABATTEMENT DE LA NAPPE



9

© SUEZ

La coupe en figure 9 montre plus précisément le système installé pour cet ouvrage. L'expérience des entreprises locales sur ce type d'opération a permis de mettre en place un système relativement simple. Aucun bouchon injecté n'a été nécessaire alors que les premières reconnaissances géologiques et géotechniques pouvaient laisser penser que ces matériaux à dominante sableuse avaient des perméabilités non compatibles avec ces techniques de contrôle du niveau phréatique. L'efficacité de ce système a bénéficié de la présence d'un certain niveau de cimentation des couches et/ou d'horizons plus argileux, qui ont limité vraisemblablement la perméabilité verticale et donc l'apport d'eau dans les fouilles. Les ouvrages profonds tels que la station de pompage ou le puits de décharge ont nécessité également la réalisation d'un système de soutènement étanche car ces ouvrages ont un niveau bas au-delà de 10 m de profondeur. Il a été retenu la réalisation d'ouvrages de soutènement circulaire en pieux sécants afin de limiter le recours à des systèmes de butonnage qui auraient fortement ralenti et rendu complexe la réalisation des travaux de génie civil. Ces soutènements autostables se sont révélés plus économiques grâce à l'amélioration des rendements pour les travaux de génie civil mais également grâce à une augmentation du linéaire de soutènement relativement faible par rapport à une enceinte rectangulaire

strictement circonscrite à l'ouvrage. À titre d'exemple, pour la station de pompage, une enceinte rectangulaire aurait nécessité la mise en œuvre d'un écran de 95 m de longueur totale avec au minimum deux niveaux de butons et l'impossibilité de considérer l'écran définitif de l'ouvrage compte tenu des contraintes d'étanchéité fortes. Le soutènement mis en place était circulaire avec un diamètre de 39 m soit un linéaire 122 m mais sans aucun niveau de butons.

Les ouvrages, de type industriel, comportent les éléments suivants :

→ Génie civil (figure 10) ;

9- Principe de rabattement de la nappe.

10- Réalisation de planchers.

9- Groundwater lowering technique.

10- Execution of floors.

→ Charpente métallique et serrurerie : EXE avec production des plans de fabrication issus de maquettes 3D sous Tekla ;

→ VRD : études d'exécution avec coordination des réseaux utilisés avec les réseaux *process* ;
→ HVAC et électricité et second-œuvre.

Les ouvrages de génie civil du projet sont en majorité des ouvrages étanches qui ont donc été systématiquement testés en eau avant réception (figure 11). Cette phase de test a également permis d'acquiescer les tassements sous les ouvrages et de vérifier que les prévisions de tassement faites en phase d'études d'exécution ont été respectées : le suivi sur site a montré l'absence de tassement au-delà des valeurs calculées.



10

© SUEZ

VOIRIES

Pour circuler sur le site, des voiries ont été réalisées. Elles ont été dimensionnées pour un trafic de poids lourds avec une fréquence de 10 véhicules par jour et par sens de circulation. Les conditions météorologiques particulières du site (température moyenne de plus de 30°C) ont été prises en compte dans les calculs. Ces conditions sont pénalisantes en termes de module de déformation des couches bitumineuses par rapport aux conditions habituellement rencontrées en France ce qui conduit à des surépaisseurs de couche pour respecter les critères de réception.

Toutes les eaux sont collectées au niveau des voiries pour être ensuite acheminées vers des bassins d'infiltration.

RÉSEAUX

La prise d'eau en mer se fait à environ 2 km de la côte à une profondeur minimale de 10 m par rapport au niveau de la mer par un système de deux tuyaux lestés de 2 m de diamètre (figure 12). Leur mise en place a nécessité la réalisation d'écrans en palplanches en mer pour assurer la stabilité des terrains sur la partie enterrée du linéaire. D'importants travaux de dragage ont été réalisés pour la mise en place de la conduite.

Un vaste réseau de conduites a été mis en œuvre sur le site pour la circulation de l'eau entre les différents ouvrages du *process*. Les conduites mises en œuvre sur l'ensemble du site sont en GRP (Glass Reinforced Plastic). Elles ont été réalisées spécifiquement pour le site. Leur mise en œuvre a nécessité le respect de dispositions constructives particulières afin de garantir leur pérennité (largeur minimale de tranchée, compactage adapté...). □



11



12

© SUEZ

11- Test d'étanchéité.

12- Tuyau Ø 2 m pour la prise d'eau en mer.

11- Tightness test.

12- 2 m dia. pipe for seawater intake.

PRINCIPALES QUANTITÉS

SUPERFICIE DU SITE :
90 000 m²

VOLUME DE REMBLAIS :
20 000 m³

VOLUME DE BÉTON :
30 000 m³

DURÉE DES TRAVAUX :
2 ans

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : OPWP (Oman Power and Water Procurement)

TITULAIRE DU MARCHÉ : Consortium Barka Desalination Company (Suez, Engie, Itochu Corporation et Towel & Co LLC)

ÉTUDES D'EXÉCUTION GÉNIE CIVIL : Ingerop

ÉTUDES D'EXÉCUTION GÉOTECHNIQUES : Geos Ingénieurs Conseils

ABSTRACT

BARKA - SEAWATER DESALINATION PLANT IN THE SULTANATE OF OMAN

P.GUERIN, GEOS INGENIEURS CONSEILS - G.GOSSE, INGEROP - PASCAL TROLES, SUEZ

The drinking water supply is a major societal issue for the Sultanate of Oman. The OPWP (Oman Power and Water Procurement) company therefore decided to increase the production capacity of the Barka plant by 280,000 cu.m per day. Suez, awarded the contract for design, construction and operation, entrusted the design and construction engineering work to Ingerop and Geos. The project, located on a seaside site, with major excavation work under the aquifer and significant civil engineering structures, was designed in record time in close cooperation with the designers of the treatment process. Extensive optimisation of the geotechnical and civil engineering aspects made it possible to reduce the number of piles and eliminate deep foundations, for example. □

BARKA: PLANTA DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR EN EL SULTANATO DE OMÁN

P.GUERIN, GEOS INGENIEURS CONSEILS - G.GOSSE, INGEROP - PASCAL TROLES, SUEZ

El abastecimiento de agua potable es un importante desafío social para el Sultanato de Omán. Así, la sociedad OPWP (Oman Power and Water Procurement) ha decidido aumentar las capacidades de producción de la planta de Barka en 280.000 m³ al día. Suez, adjudicatario del contrato de diseño, construcción y explotación ha encargado a Ingerop y Geos los estudios de proyecto y ejecución. El proyecto, situado en un emplazamiento a orillas del mar, con excavaciones importantes en subsuelo y construcciones de ingeniería civil de envergadura, ha sido estudiado en un tiempo récord, en estrecha sinergia con los diseñadores del proceso de tratamiento. Avanzadas optimizaciones de los aspectos geotécnicos y de ingeniería civil han permitido reducir el número de pilotes o eliminar cimientos profundos. □



© PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES 1

LES TABLIERS DU DEUXIÈME PONT SUR LE WOURI

AUTEURS : FABIEN MATHIEU, DIRECTEUR TECHNIQUE DE CHANTIER, VINCI CONSTRUCTION - FRANÇOIS DEBONNIERES, DIRECTEUR DE TRAVAUX, VINCI CONSTRUCTION

DOUALA, 3 MILLIONS D'HABITANTS, UN FLEUVE (LE WOURI) ET UN SEUL PONT. RETOUR SUR L'ÉMERGENCE D'UN DOUBLE VIADUC EN ENCORBELLEMENTS POUR PALLIER DES CONDITIONS DE TRAFIC DEVENUES TROP DIFFICILES. DANS LES COULISSES DE CE PROJET EN CONCEPTION/CONSTRUCTION MENÉ PAR LE GROUPEMENT SOGEA SATOM/SOLETANCHE BACHY, AVEC UN FOCUS PARTICULIER SUR LE RÉGLAGE GÉOMÉTRIQUE DES FLÉAUX ET LES FORMULATIONS DE BÉTON.

Le pont existant a été construit en 1954, et accueille 2 voies routières séparées par une voie ferroviaire au milieu. Il est sur le seul axe reliant le centre du pays à l'ouest du Cameroun. Actuellement, aux heures de pointe, traverser les 750 m de cet ouvrage prend deux heures. Dans le cadre des projets dits « structurants », Le Ministère des Travaux Publics du Cameroun a donc lancé une série de travaux routiers permettant de traverser l'agglomération urbaine de Douala, dont le projet du deuxième pont sur le Wouri est le point d'orgue. Ce projet consiste en la réalisation d'un double viaduc en encorbellement (un ouvrage routier (OAR) à 2x3 voies et un ouvrage ferroviaire (OAF) à 2 voies) situé à 10 m du pont existant, et d'un TOARC urbain de 3 km.

Les deux nouveaux viaducs ont une longueur totale de 750 m, divisée en 4 travées courantes de 132 m, 2 travées de rive de 91 m et 2 travées inertes de 20 m (figure 3). Les appuis, tous fondés sur pieux, peuvent être regroupés en trois familles : 2 culées

à terre (C0 et C8), 2 piles culées (PC1 et PC7) séparant les travées de rives et les travées inertes, et 5 appuis en rivière (P2 à P6).

Chaque appui en rivière est constitué d'un groupe de pieux (4 sur l'OAF, et 6 sur l'OAR) de 2,50 m de diamètre pour 45 m de profondeur solidarisés en tête par un chevêtre sur lequel vient directement s'appuyer le voussoir sur pile (VSP). La conception et la construction des pieux et des chevêtres ont été abordées dans un



1- Fléau de l'ouvrage routier.

2- Élévation du tablier routier - Vue générale.

1- Deck section of the road bridge.

2- Elevation view of the road deck - General view.

article précédent de la revue Travaux⁽¹⁾. Le tracé en plan des tabliers, épousant celui du pont existant, est droit de C0 à P3, puis courbe de P3 à P6 avec un rayon de courbure de 1 020 m, et droit de P6 à C8. Le profil en long est un arc de cercle de rayon 25 000 m axé sur l'appui central P4.

L'ouvrage routier, de 25,50 m de largeur, a un profil en travers en toit composé de 2x3 voies et d'un trottoir de 2 m de largeur. L'ouvrage ferroviaire, de 10,10 m de largeur, accueille 2 voies ferrées et 2 trottoirs de service de 0,70 m de largeur (figure 4). Ce dernier a une pente transversale unique de 1 % orientée vers l'ouvrage routier pour permettre la récupération des eaux pluviales dans un caniveau commun aux deux ouvrages. L'épaisseur des tabliers est quasiment la même sur les deux viaducs et varie entre 4,40 m en travée et 8,20 m sur appui.

Sur le plan architectural, le tablier orné de motifs Sawa sur les corniches et les voussoirs sur pile (figure 1) rebondit sur des chevêtres à peine émergeant tel des galets ricochant sur l'eau.

LES VOUSOIRS SUR PILE (VSP)

Les voussoirs sur pile ont été réalisés en trois phases (hourdis inférieur, âmes puis hourdis supérieur).

Des plates-formes en console fixées sur les rives des chevêtres ont supporté les coffrages d'âme en bois de 7,10 m de hauteur. La troisième phase a été réalisée sur étalement à l'intérieur et consoles fixées sur les âmes pour les encorbellements.

LES TRAVÉES SUR CINTRE

La travée sur cintre Est comprend le voussoir sur culée et 3 voussoirs longs de 4,80 m à 6,35 m. Les voussoirs sont réalisés en deux phases : hourdis inférieur + âmes, puis hourdis supérieur (figure 5).

Le cintre, fondé sur 14 pieux Ø 914 mm de 37 m de long, supporte un fond de moule mobile ripé après chaque coulage de voussoir à la manière d'un équipage mobile.

Une fois les premières phases de l'OAR terminées, le fond de moule est ripé latéralement pour commencer sur l'OAF. À la fin des deux travées sur cintre Est, toute la structure a été démontée puis remontée sur l'autre rive où un deuxième fond de moule a été fabriqué pour travailler sur les deux ouvrages en même temps. Sur la rive

Ouest, le fond marin plus important a obligé de raccourcir la travée sur cintre d'un voussoir.

LES ÉQUIPAGES MOBILES

8 équipages mobiles ont été nécessaires pour s'adapter au planning du projet. Étudiés en France par Ersem et Cbdi, ils ont été fabriqués dans un atelier local (Cometal), avec l'aide d'une équipe chantier pour le suivi de fabrication. Les 4 équipages de l'OAR pèsent 100 t chacun (figure 6), et ceux de l'OAF 60 t (figure 7), ce qui donne un poids total d'équipages de 640 t. Ils ont permis de couler des voussoirs de 35 à 100 m³ avec une déformation maximale de 15 mm. Les équipages des deux ouvrages n'ont pas la même conception. Ceux de l'OAR ont une structure plutôt habituelle avec une poutre en C « par-dessus » supportant les poutres porteuses latérales. Les équipages de l'OAF quant à eux,

ont été pensés pour pouvoir croiser leurs homologues « routiers » à travers l'inter-distance de 1 m entre les deux ouvrages. Les poutres en C sont donc remplacées par des tôles latérales suspendant une structure en U « par-dessous ».

CADENCES SUR LES FLÉAUX

Les équipes de l'OAR ont affiché un cycle moyen de 5 j/paire de voussoirs (figure 8) tandis que celles de l'OAF ont atteint une vitesse de 4 j/paire en moyenne. L'OAR est en effet différencié de l'OAF par une section transversale bien plus grande impliquant un ferrailage décomposé en plusieurs colis, 4 câbles de précontrainte de fléau par voussoir au lieu de 2, et une précontrainte transversale du hourdis supérieur. Les transferts d'équipages par barge entre fléaux (démontage partiel puis remontage) ont duré 1 mois en moyenne. ▶

3- Coupe longitudinale du tablier routier.

4- Coupe transversale des tabliers.

3- Longitudinal section of the road deck.

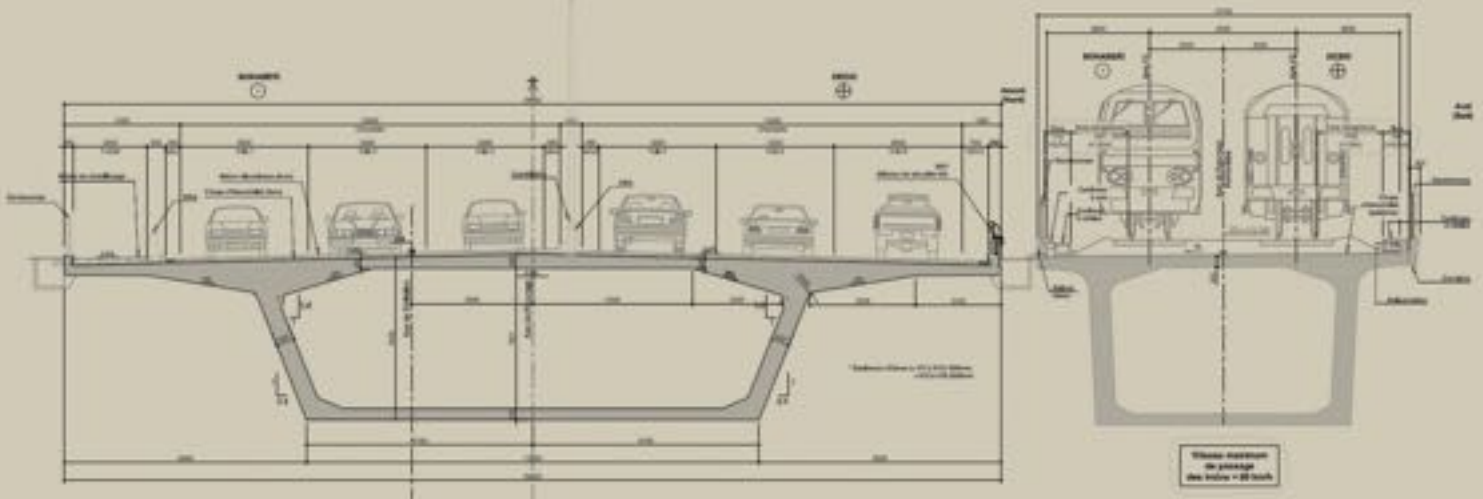
4- Cross section of the decks.

COUPE LONGITUDINALE DU TABLIER ROUTIER



3

COUPE TRANSVERRSALE DES TABLIERS



4

© PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES

Les 1 600 m de tablier ont été réalisés en tout juste plus d'un an (fin novembre 2015 à début janvier 2017), soit un total de 340 voussoirs réalisés en 13 mois. La meilleure cadence mensuelle (40 voussoirs/mois) est atteinte au mois d'août 2016 qui enregistre alors 749 mm de précipitations (saison des pluies) et dépasse les 703 mm de précipitation annuelle pour Paris en 2016. Pour une bonne synchronisation des 8 équipages mobiles en simultané, une équipe dédiée au bétonnage de nuit a été mise en place.

PRÉCONTRAÎTE

1 900 t, soit 1 560 km de torons ont été intégrés dans les viaducs. 4 types de précontrainte ont été mis en place : précontrainte de fléau 19T15, précontrainte éclisse 19T15, précontrainte transversale 3B15 et 4B15 de torons gainés graissés (TGG) directement coulés dans le hourdis supérieur de l'OAR et précontrainte de continuité. Pour cette dernière, 4 paires de câbles extérieurs par double travée en 37T15 dans l'OAF et 31T15 pour l'OAR sont logées à l'intérieur des caissons pour une longueur maximale de 269 m. La solution de câbles en TGG pré-injectés au coulis de ciment tendus au vérin monotoron a été retenue. Elle évite à la fois les problèmes d'approvisionnement/mise en œuvre de la cire pétrolière au Cameroun et les manœuvres délicates de vérins multi-torons à l'intérieur des caissons.

LES ATELIERS

Pour une meilleure maîtrise des délais et de la qualité, le maximum de tâches a été internalisé.



5

© PHOTOÉQUIPE VINCI ET FILIALES

Deux centrales 40 m³/h Skako montées sur chantier ont produit les 54 000 m³ de béton des viaducs. Le laboratoire béton monté en propre a, quant à lui, accompagné les centrales en constituant, conservant et écrasant 6 700 éprouvettes sur la durée du chantier. Une usine de façonnage a été montée sur site pour produire les 5 900 t d'armatures des viaducs avec une production moyenne de 300 t/mois.

Tous les coffrages bois, et en particulier ceux des VSP sont issus de la menuiserie du chantier.

L'atelier chaudronnerie a, quant à lui, produit 75 % des structures métalliques provisoires en dehors des équipages et des VSP : Estacade, TSC, châssis de grue, accès etc.

LE BÉTON

Les 4 formules de béton du tablier ont été élaborées par le laboratoire parisien du service béton de Vinci Construction France avec le concours du labora-

5- Coffrage et ferrailage des voussoirs sur culée C0.

6- Équipage mobile du tablier routier.

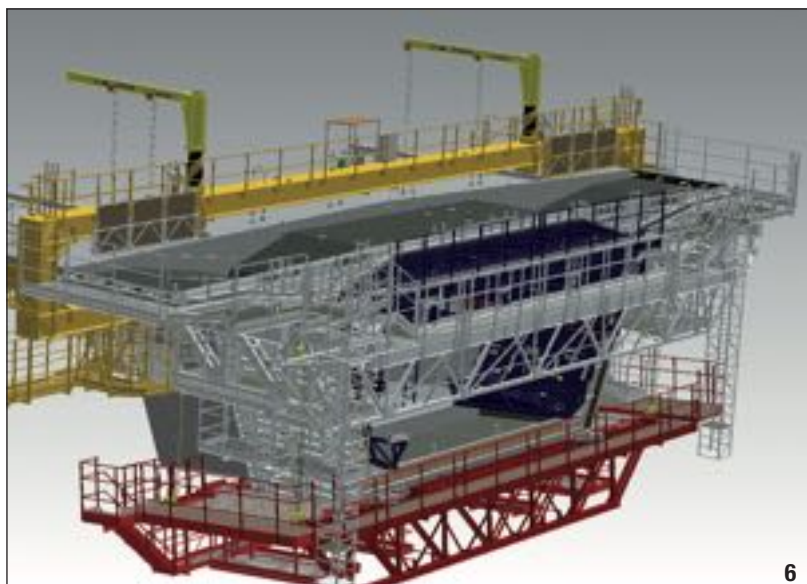
7- Équipage mobile du tablier ferroviaire.

5- Formwork and reinforcing bars for the segments on abutment C0.

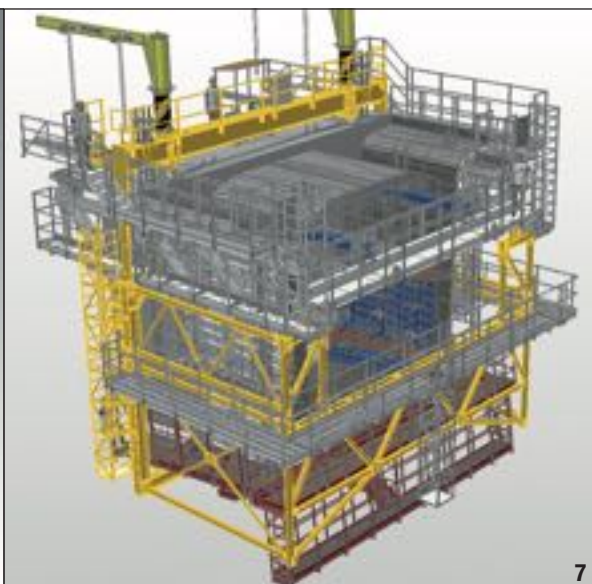
6- Mobile rig for the road deck.

7- Mobile rig for the rail deck.

toire local de Sogea Satom (carrière d'Ekona) et du laboratoire du chantier. Les tabliers sont constitués d'un béton C50/60, une première au Cameroun. Les cadences soutenues des équipages mobiles imposant une montée en résistance rapide au jeune âge, cette formule C50/60 était initialement prévue à base d'un ciment CEM I. En analysant les caractéristiques techniques des ciments fournis localement par Cimencam (Lafarge-Holcim), et les données climatiques de Douala, il a été pressenti de remplacer le ciment CEM I par du CEM IV (ciment de type pouzzolanique). En effet, la chaleur permanente et régulière (température moyenne annuelle de 26°C, variant de 22 à 32°C) garantit une prise rapide et régulière du CEM IV. Avec la confirmation des convenances, cette solution a été retenue permettant de diminuer l'exothermie du béton pendant sa prise, mais aussi de limiter sensiblement la fissuration de retrait. Cette formulation choisie s'est accompagnée



6



7

© PHOTOÉQUIPE VINCI ET FILIALES



© PHOTOTÉQUE VINCI ET FILIALES 8

d'un contrôle systématique de la maturité à chaque coulage de voussoir, à la fois par maturomètre et par écrasement d'éprouvettes au jeune âge. Ce C50/60 à base de CEM IV a ainsi atteint des performances au jeune âge compatibles avec le planning du tablier (18 MPa à 15h, 40 MPa à 7 j). À noter qu'un changement d'origine du clinker avait été envisagé par le cimentier, mais des essais ont montré que cela aurait modifié le comportement de la formulation, augmentant la réaction exothermique du béton pendant la prise. À la demande du chantier, le cimentier a conservé son fournisseur de clinker

8- Fléaux 5 des ouvrages routier et ferroviaire terminés.

9- Écarts géométriques des fléaux.

10- Principe de sur-encorbellement.

8- Completed deck sections 5 of the road and rail bridges.

9- Geometric deviations of the deck sections.

10- Balanced cantilever technique.

initial jusqu'à la fin de la construction des tabliers. Par ailleurs, pour contrôler la régularité du ciment à la réception et son comportement rhéologique, un essai de mortier-béton équivalent (MBE) a été utilisé spécifiquement. Le laboratoire du chantier a ainsi réalisé un essai avant chaque vidange de vraquier, permettant de valider chaque livraison. En parallèle, des simulations thermiques ont été réalisées pour dimensionner des systèmes de refroidissement du béton pour toutes les pièces d'épaisseur supérieure à 2 m, c'est à dire les voussoirs sur culée et les voussoirs sur pile.

LE RÉGLAGE GÉOMÉTRIQUE DES FLÉAUX ET DES LEVÉS TOPOGRAPHIQUE DISSÉQUÉS

Avec des contre-flèches variant de -10 cm à +12 cm, la pyramide de construction en 400 phases fournie par les bureaux d'études, permet aux topographes de situer l'ouvrage réel par rapport au tracé théorique. Compte tenu des tolérances prévues au marché (+/- 30 mm dont au moins 90% des points à +/- 20 mm) des outils de calculs ont été spécialement développés pour décomposer chaque écart relevé en 4 sous-écarts : le tassement sur appuis, la flexion propre du fléau, l'imprécision de réglage et le déséquilibre du fléau en bascule (figure 9).

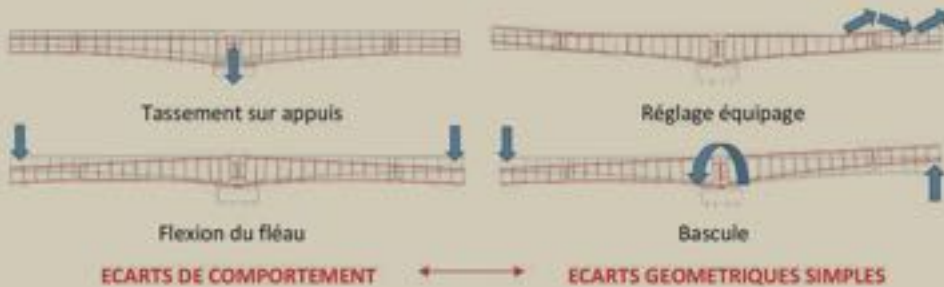
Les deux premiers constituent des écarts de comportement devant être pris au sérieux s'ils viennent à dépasser largement les prévisions. Les deux derniers constituent quant à eux des écarts purement géométriques devant simplement provoquer des corrections de mise en œuvre.

L'enjeu premier est d'avoir une bonne compréhension du comportement de l'ouvrage : en effet, relever un écart de 0 mm sur un voussoir peut signifier que tout se passe comme prévu, mais peut aussi révéler un équipage mobile réglé 5 cm trop haut combiné avec un fléau 5 cm trop bas.

Afin d'arriver à cette dissection quasi chirurgicale des écarts relevés, les services de topographie et de contrôle externe du chantier ont développé deux approches calculatoires différentes et indépendantes permettant un contrôle croisé.

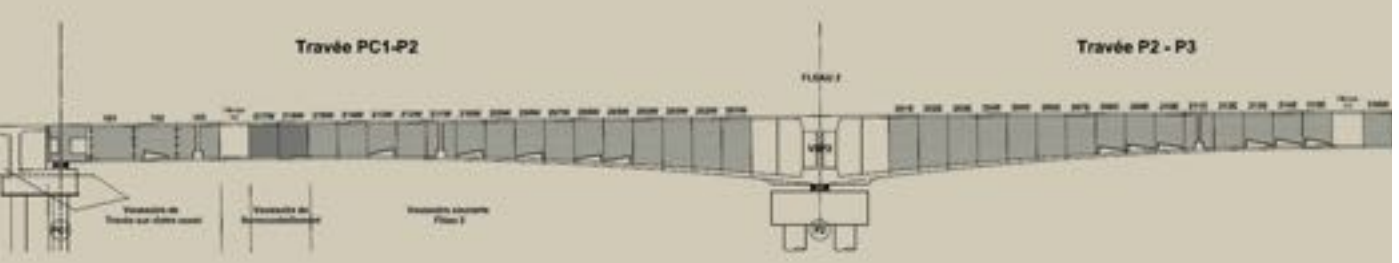
Au final, plusieurs phénomènes intéressants ont été observés : les tassements sur appui ont été moindres que prévu (8 mm seulement pour les 8800 t de poids propre des fléaux) reflétant le raccourcissement élastique des pieux, mais aucun tassement de sol sous la pointe de ces mêmes pieux. ▷

ÉCARTS GÉOMÉTRIQUES DES FLÉAUX 4 TYPES



© PHOTOTÉQUE VINCI ET FILIALES 9

PRINCIPE DE SURENCORBEMENT



© PHOTOTÉQUE VINCI ET FILIALES 10



© PHOTO THÉO VINCIG ET FILIALES

CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES OUVRAGES

TYPE : Encorbellements successifs en conception-construction

LONGUEUR : 745 m

LARGEUR : 25,50 m (OAR) - 10,10 m (OAF)

HAUTEUR : 4,40 m à 8,20 m

TRAVÉES : 2 travées de 91 m + 4 travées de 129,50 m + 2 travées inertes de 20 m

APPUIS : 2 culées, 2 piles culées, 5 appuis en rivières (chevêtres directement sur pieux de 45 m). Pas de pile. Voussoirs sur pile directement posés sur chevêtres

11- Vue d'ensemble avec estacade.

12- Vue d'ensemble depuis l'ouest.

11- General view with temporary bridge.

12- General view from the west.

En flexion, les fléaux de l'ouvrage routier ont été légèrement plus souples que prévus impliquant la décision de tendre les câbles de précontrainte de fléau de secours sur les voussoirs 8 pour gagner 10 mm sur l'écart géométrique. Cette mesure a un objectif uniquement « cosmétique » puisqu'elle ne s'avère pas nécessaire structurellement. Les imprécisions de réglages sont globalement restées dans un fuseau de +/- 20 mm. Enfin, deux phénomènes ont été observés sur l'effet bascule des fléaux : plus de rigidité en rotation sur appui d'environ 30%, et surtout un « effet cliquet »



© PHOTO THÉO VINCIG ET FILIALES



13

© PHOTOTEQUE VINCI ET FILIALES

induisant un mauvais rééquilibrage des fléaux en rotation. Par exemple, couler un voussoir à l'est peut faire remonter l'extrémité Ouest du fléau de 20 mm. Et cette extrémité ne redescend que de 15 mm au coulage du voussoir Ouest de la même paire. Les quelques millimètres s'accumulant de voussoir en voussoir peuvent sensiblement compliquer le réaligement des fléaux lors des clavages. Il faut donc parfois rééquilibrer le fléau en inversant l'ordre de bétonnage est/ouest au prix d'une journée de planning perdue à chaque inversion.

LE SUR-ENCORBELLEMENT

Sur l'OAR, chaque fléau est découpé en 16 paires de voussoirs de 3,54 m chacun, sauf le fléau 2, le plus à l'ouest, qui est dissymétrique (figure 10) avec 15 voussoirs d'un côté, et 17 de l'autre. Cette curiosité vient à la fois de l'obligation contractuelle d'aligner les appuis des nouveaux viaducs avec ceux de l'ouvrage existant et de la travée sur cintre raccourcie à cause du fond marin (voir plus haut).

13- Vue d'ensemble depuis l'est.

13- General view from the east.

Les 5 premiers clavages consistent à réaligner un fléau libre en rotation sur un fléau fixe. Naturellement, le dernier clavage implique un réaligement entre deux parties d'ouvrage déjà fixes (le fléau 2 d'un côté, et la travée sur cintre Ouest de l'autre). Cette difficulté commune à chaque ouvrage coïncide donc avec la position des voussoirs en sur-encorbellement. Ces derniers accusant un mouvement théorique de 22 cm au moment de leur coulage, la moindre erreur de prévision et de comportement peut mener à l'impossibilité de réaligner correctement le dernier clavage. Finalement, un écart relatif de 20 mm maximum a été relevé sur le dernier clavage des deux viaducs. □

1- Revue Travaux n°923 d'Avril/Mai 2016.

PRINCIPALES QUANTITÉS

BÉTON : 54 000 m³ dont 27 000 m³ pour les tabliers

ACIERS : 5 900 t dont 3 700 t pour les tabliers

PRÉCONTRAİNTE : 1 600 t

DÉLAI : 44 mois (8 mois d'études + 36 mois de travaux)

PRINCIPAUX INTERVENANTS

FINANCEMENT : AFD / C2D / BIP – 180 M€

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ministère des Travaux Publics du Cameroun

AMO : Groupement Louis Berger / Scet Cameroun / Ingecam

AGMO : Labogénie

GROUPEMENT CONCEPTION/CONSTRUCTION : Sogea Satom / Soletanche Bachy / Cabinet Lavigne Cheron

ÉTUDES D'EXÉCUTION : Campenon Bernard - Dodin Ingénierie (Cbdi) sur l'OAR et Ingénierie des Structures et des Chantiers (Isc) sur OAF (groupe Vinci Construction)

MÉTHODES : Cbdi (estacade, VSP, appuis à terres, Fléaux) - ISC (Chevêtres) - Ersem (conception équipages mobiles) - Cmf (Conception coffrage bois VSP) - Cross Consult (TSC)

CONTRÔLE EXTERNE : Isc, Secoa et Stefanini (ouvrages provisoires)

EXPERTISE BÉTON : Service béton de Vinci Construction France

ABSTRACT

DECKS OF THE SECOND BRIDGE OVER THE WOURI

FABIEN MATHIEU, VINCI CONSTRUCTION - FRANÇOIS DEBONNIERES, VINCI CONSTRUCTION

Two cantilever viaducts 1 metre apart have been designed in Douala, Cameroon, to overcome the insufficiency of the single existing bridge built in 1954, very much alone in this city of 3 million inhabitants. Specific production facilities were set up to adapt to the local environment of the project, and very special approaches were also adopted for geometric adjustment of the deck sections and the concrete mix designs. □

LOS TABLEROS DEL SEGUNDO PUENTE SOBRE EL RÍO WOURI

FABIEN MATHIEU, VINCI CONSTRUCTION - FRANÇOIS DEBONNIERES, VINCI CONSTRUCTION

En Duala (Camerún) se han diseñado dos viaductos en ménsula situados a 1 m de distancia para paliar la insuficiencia que supone la existencia de un único puente, construido en 1954, para una ciudad de 3 millones de habitantes. Además de los medios de producción específicos utilizados para adaptarse al contexto local del proyecto, el ajuste geométrico de los mástiles y las formulaciones de hormigones han sido objeto de procedimientos muy particulares. □

LE MÉTRO DE JAKARTA

AUTEURS : GEORGES MAURIS, RESPONSABLE D'ÉTUDES, SYSTRA - SAMAR DAABOUS, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, SYSTRA - TEODOR DEMETRIU, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, SYSTRA - IR. SYAHRUDDIN, DIRECTEUR GÉNIE CIVIL ET VOIE, PT ADHI KARYA (PERSERO) TBK - IR. UJANG RAMDAN, RESPONSABLE GÉNIE CIVIL, PT ADHI KARYA (PERSERO) TBK.

LES TROIS PREMIÈRES LIGNES DE MÉTRO LÉGER LRT TRAVERSENT EN AÉRIEN LA VILLE DE JAKARTA. ELLES PERMETTENT DE RELIER À CAWANG LES QUARTIERS DE DUKUH ATAS, CIBUBUR ET BEKASI TIMUR. L'ESSENTIEL EST ASSURÉ PAR UN VIADUC EN U, AINSI QUE 11 PONTS CONSTRUITS PAR ENCORBELLEMENTS SUCCESSIFS. LA ZONE EST FORTEMENT SISMIQUE.



1 © PT ADHI KARYA (PERSERO) TBK

PRÉSENTATION DU PROJET

DKI Jakarta est la capitale d'Indonésie et compte plus de dix millions d'habitants. La métropole Grand Jakarta - ou Jabodetabek- est la deuxième métropole mondiale après Tokyo et compte 28 millions d'habitants en 2014. La ville est également l'un des pôles d'activité économique les plus importants d'Indonésie. DKI Jakarta contri-

bue à plus de 17% au PIB national. Avec le développement économique et le nombre croissant de voiture associés à l'absence de métro, la ville est constamment embouteillée. Le temps moyen de transport des habitants est de 4h par jour. Le gouvernement de DKI Jakarta a déployé d'importants efforts pour accroître la capacité et la qualité des services de transport public grâce

1- Vue générale du viaduc en U.

1- General view of the U-shaped viaduct.

à l'introduction d'un certain nombre de lignes de bus BRT et a commencé la construction de la première ligne de transport en commun ferroviaire. La ville est, malgré tout, toujours aussi congestionnée, d'où la récente initiative du gouvernement de construire 3 lignes LRT (figure 2), attribuées en design & build à PT Adhi Karya (Persero) Tbk. ou "ADHI".

Le sujet le plus critique est le délai de réalisation ; l'enjeu étant que la première ligne soit opérationnelle durant l'année 2018, alors que la conception n'a démarré qu'en 2016.

La solution retenue par le constructeur a été celle de Systra : pose de têtes de pile et de viaducs en U (figure 1) préfabriqués en zone courante afin de maximiser la préfabrication et de minimiser les activités réalisées sur site (figure 3). La solution de 11 ouvrages en béton précontraint construits par encorbellements successifs (caisson classique, ou caisson « à corne ») a été adoptée pour les franchissements particuliers.

VIADUCS EN U ET TÊTES DE PILES PRÉFABRIQUÉES

La section courante des travées types est constituée de deux U indépendants, chacun supportant une voie du LRT sur la dalle inférieure. Chaque travée est isostatique, typiquement 30 m.

Les travées en U sont précontraintes par pré-tension et préfabriquées par travée entière. En raison de leur poids relativement bas, de l'ordre de 150 t, elles sont transportées sur site et posées à l'aide de deux grues mobiles. Le cycle de préfabrication est de 5 jours par banc avec 5 travées par banc, soit une poutre par jour. Le rythme de pose est de 2 à 6 poutres par jour, suivant les contraintes de trafic.

La longueur des travées varie entre 15 m et 30 m afin de s'accommoder à la nature du site, fortement urbanisé. La hauteur totale de la section de chaque U est de 1,75 m, sa largeur varie de 4,6 m pour les alignements droits à 5,6 m en courbe, le rayon de courbure en plan pouvant atteindre 87 m.



2
© WIKIPEDIA/SYSTRA

2- Carte des lignes 1, 2, 3 du LRT.

3- Vue générale du site de préfabrication.

2- Map of LRT lines 1, 2 and 3.

3- General view of the prefabrication site.

Les poutres à section en U ont une excellente intégration dans un environnement urbain grâce à la finesse du profil comparé aux autres types de structure. Le profil en long du rail peut être abaissé de 2 m. Les stations sont donc de taille inférieure et le coût des opérations est réduit. Les quantités sont réduites de 20 % par rapport aux solutions en caisson. Des économies peuvent également avoir lieu au niveau des équipements et de la maintenance :

les chemins d'évacuation et les garde-corps sont intégrés à la structure. En conséquence le poids des équipements est réduit. Les chemins d'évacuation sont au niveau des tables de compression du U. L'accès pour la maintenance des équipements est facilité puisque la poutre est à section ouverte.

Les chevêtres des travées typiques (figure 4) sont en béton précontraint par post-tension, préfabriqués en atelier, transportés sur site et installés à l'aide d'une grue mobile. La connexion entre la pile coulée sur site et le chevêtre préfabriqué est assurée à l'aide de barres verticales de précontrainte. Pour des franchissements supérieurs à 30 m et allant jusqu'à 45 m, on utilise des chevêtres élargis. Ce type de structure consiste à étendre longitudinalement le chevêtre afin d'augmenter la longueur totale de la travée sans changer la structure des travées typiques. Dans cette solution, le viaduc en U est identique à celui d'autres sections typiques.

La solution d'ouvrages en béton précontraint construits par encorbellements successifs a été retenue pour les franchissements supérieurs à 45 m.

OUVRAGES CONSTRUITS PAR ENCORBELLEMENTS SUCCESSIFS : CAISSONS ET CAISSONS À CORNES

Sur les 3 lignes du LRT on compte 11 ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs. La travée centrale de ces ponts varie de 75 m à 90 m.

Tous les ponts ont une hauteur variable sur leur longueur. Deux types de section sont considérés pour ces ouvrages. Les ponts fortement courbes (jusqu'à 115 m en plan) ont une section en caisson classique unicellulaire, des parapets non-structuraux et une hauteur de caisson variant de 5,6 m sur pile à 2,6 m à la clé. Les ponts droits ou à faible courbure ont une section type caisson à corne sur pile qui se transforme en U à mi-travée. Les âmes du U participent à la résistance de la structure. La hauteur de la section varie de 6,4 m sur pile à 2,03 m à la clé. Les caissons à cornes permettent d'assurer une continuité esthétique avec les U. Ils permettent également de réduire la hauteur du rail surtout dans les zones de franchissement de nœuds routiers, comme par exemple pour Jorr Bridge. Ce pont franchit l'autoroute « Jl. Tol Jagorawi » à 10 voies, ainsi qu'un pont « Jl. Tol Pondok Pinang - Tmii » (figure 5).



3
© PT ADHI KARYA (PERSERO) TBK

Dans les ponts en caisson à corne, la précontrainte de fléaux file dans les tables de compression des « cornes » du U. En cas de forte courbure, cela engendre des efforts de poussée au vide perpendiculaires à l'axe des âmes, et conduisent à une augmentation de leurs dimensions.

La précontrainte des ponts à caisson est constituée d'unités 12T15 et 19T15 pour les câbles de fléaux, 19T15 pour les câbles éclisses, 19T15 et 37T15 pour la précontrainte extérieure.

La précontrainte des ponts en caisson à corne est répartie comme ci-dessous :

- Les câbles de fléaux, du type 12T15 ou 19T15, sont intérieurs au béton et ancrés au niveau des tables de compression des cornes ;
- Les câbles éclisses, de type 19T15, sont intérieurs au béton et ancrés dans des bossages au niveau du hourdis du caisson ;
- Les câbles de continuité, de type 19T15, sont intérieurs au béton, mis en tension à la fin de la construction du tablier. Ils sont ancrés sur les voussoirs d'extrémité et sur les entretoises des VSP.

Les tabliers de tous les ponts sont encastrés sur les piles intermédiaires et simplement appuyés sur des appareils d'appuis à pot sur les piles de rive. Chacune des piles intermédiaires est constituée de deux voiles dédoublées. Chaque voile est de 3,5 m de largeur et d'une épaisseur qui varie entre 1,1 m (ou 1,0 m) au centre et 0,8 m (ou 0,7 m) aux extrémités. Ce type de pile permet d'assurer la stabilité des fléaux en construction et d'offrir une grande souplesse dans le plan horizontal.

Les piles de rive sont constituées d'un fût unique en section carrée pleine.

Toutes les piles des ponts sont supportées par des fondations profondes. Les semelles intermédiaires sont fondées sur 8 à 10 pieux de 1,8 m. Le peu d'espace disponible contraint à opter pour des fondations à fort biais.

Dans les zones où l'accès des machines de forage ou la surface d'implantation des pieux sont limités des solutions en fondations caisson sont adoptées.

La préfabrication permet de minimiser les risques liés à la construction et maintenir la circulation dans un contexte fortement urbanisé. Elle permet de plus l'augmentation de la cadence d'installation des voussoirs, pose d'une à deux paires de voussoirs préfabriqués par nuit au lieu d'une paire de voussoirs par semaine pour la solution coulée en place.



4

© SYSTRA

Toutefois, du fait des différentes contraintes du site, les deux solutions ont été mélangées. Les tabliers de la plupart des ponts sont en partie coulés en place et en partie préfabriqués. Les premiers voussoirs, proches du VSP sont coulés en place, car trop hauts (limite fixée à 4,20 m) pour pouvoir passer sous les multiples ouvrages existants entre le site de préfabrication et le chantier.

La longueur des voussoirs préfabriqués (de 2,3 m à 3,42 m) est limitée par les dimensions des entrées des péages

4- Pose du chevêtre.

5- Vue générale de l'ouvrage Jorr.

4- Placing the pier cap.

5- General view of Jorr Bridge.

des autoroutes et par la capacité des équipements de levage du site de préfabrication (poids maximal 70 t).

SÉISME

UTILISATION D'APPUIS À NOYAUX DE PLOMB POUR LES OUVRAGES TYPIQUES

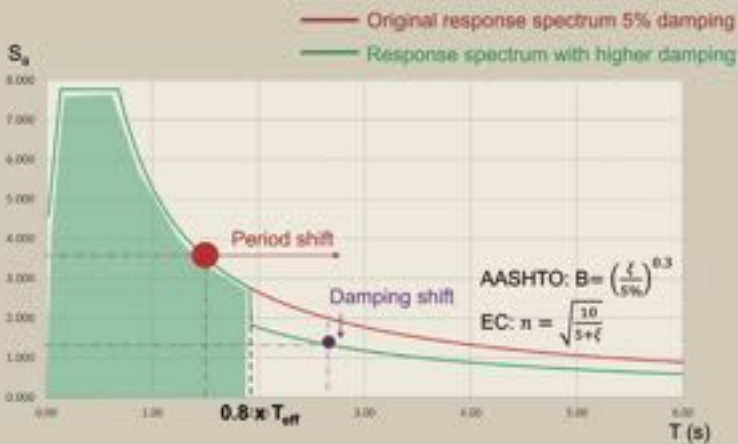
Jakarta est une zone fortement sismique. Suivant les zones géotechniques, le plateau du spectre se situe entre 0,8 g et 1,1 g (figure 6). Pour diminuer les efforts transmis aux fondations, Systra a proposé une isolation sismique avec des appuis à noyaux de plomb (LRB) (figure 7) sur l'ensemble des ouvrages typiques. La période de l'ouvrage augmente ainsi que l'amor-



5

© PT ADHI KARYA (PERSERO) TBK

SPECTRE DE RÉPONSE - SOL TYPE D



© SYSTRA

6

7

tissement. Les efforts dans les pieux ont été fortement diminués. Pour que ces LRB soient efficaces, il faut qu'ils plastifient suffisamment sous séisme c'est-à-dire avoir un F_y relativement faible. En parallèle, on doit veiller à ne pas plastifier le noyau sous freinage/accélération. Considérer les efforts de freinage/accélération dans leur totalité conduirait à devoir prendre en compte un F_y élevé. Le calibrage du

LRB s'effectue donc en considérant les efforts réduits de freinage/accélération obtenus grâce à une analyse d'interaction rail-structure (IRS). Dans chaque cas on présente les résultats de l'analyse spectrale (RSA) avec l'analyse temporelle linéaire (THA). Dans ces deux cas on considère le système de base sans LRB. Les efforts obtenus en THA et RSA correspondent, ce qui permet de montrer que l'analyse est

bien calibrée avant de passer en non linéaire. On compare les résultats des solutions conventionnelles (butée sismique) à ceux obtenus avec LRB et analyse temporelle non-linéaire. Les moments en pied de pile sont divisés par 3 (figure 8), et les tractions dans les pieux (positives) sont divisées par 4 avec des moments divisés par 3 (figure 9). La raideur court-terme du LRB est celle du noyau de plomb ; raide mais pas

toujours suffisamment pour éviter de trop importants déplacements différentiels transversaux en service. Ces déplacements peuvent générer des ruptures de rail à la fatigue. Systra a donc dimensionné un dispositif de clés entre tabliers qui permet de solidariser les travées transversalement.

SÉISME SUR OUVRAGES SPÉCIAUX ET PROBLÉMATIQUE DE RUPTURE FRAGILE

Les ouvrages spéciaux ayant des piles relativement hautes, tous disposent de piles intermédiaires en voiles dédoublés. Pour ces ouvrages, les calculs sismiques sont réalisés par analyse spectrale avec prise en compte des inerties fissurées.

Les voiles dédoublés sont très efficaces du point de vue longitudinal. La souplesse de l'ouvrage permet d'augmenter le mode longitudinal et de réduire les efforts.

En longitudinal, le tranchant en tête de pile génère moments et traction/compression dans les deux voiles. On procède par itérations successives, pour déterminer l'effort à prendre en compte dans le dimensionnement en capacité. En transversal, en revanche, les voiles ont une meilleure capacité. L'effort plastique équivalent, après évaluation de la capacité de la rotule, est supérieur à la demande élastique de séisme. Les codes sont assez vagues en général sur ce sujet. L'Eurocode permet de considérer l'effort élastique comme effort de dimensionnement. L'approche de l'AASHTO est plus orientée sur la performance de l'ouvrage et préconise qu'une amplification de l'effort élastique sans précision du coefficient d'amplification doit être pris en compte. ▷

6- Spectre de réponse - Sol type D.

7- Photo de LRB.

8- Comparaison du moment fléchissant au cours du temps - design conventionnel et isolation.

9- Efforts maximaux M-N concomitant pour différents accélérogrammes et différentes conceptions.

6- Response spectrum - Type D soil.

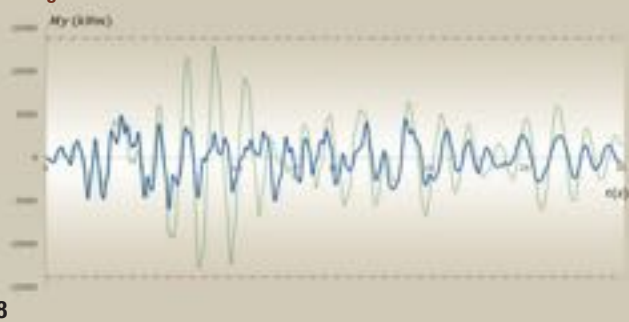
7- Photo of LRB.

8- Comparison of the bending moment over time - conventional design and isolation.

9- Maximum simultaneous M-N forces for various accelerograms and various designs.

COMPARAISON DU MOMENT FLÉCHISSANT AU COURS DU TEMPS -

Design conventionnel et isolation

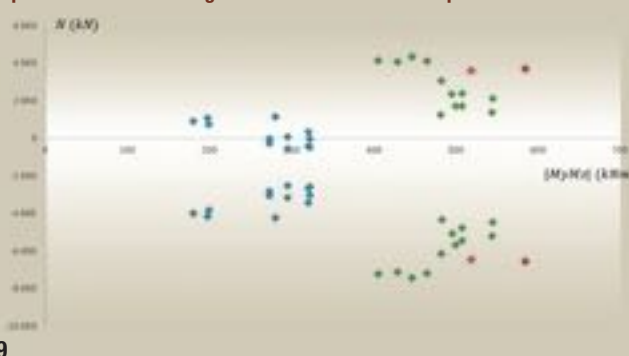


© SYSTRA

8

EFFORTS MAXIMAUX M-N CONCOMITANT

pour différents accélérogrammes et différentes conceptions



© SYSTRA

9

KUNINGAN

L'implantation du LRT au niveau du franchissement du boulevard Jl. H. Rasuna Said par l'autoroute urbaine élevée Jl. Tol Cawang Grogol représente un point dur du projet. Sous ce carrefour se prépare la construction d'un passage souterrain permettant à une partie des automobilistes d'éviter ce nœud. Le pont Kuningan devra enjamber un passage inférieur, un carrefour, et enfin les deux viaducs de l'autoroute ; tout ceci rendant toute insertion très difficile pour les appuis du futur pont (figure 10).

Le futur ouvrage de la ligne de métro devra satisfaire plusieurs contraintes, notamment :

- Le franchissement d'un des carrefours les plus embouteillés de Jakarta, qui nécessite une construction de tablier avec très peu d'interruption de circulation ;
- Le manque de gabarit disponible pour pouvoir construire des fondations profondes sous les tabliers des ponts autoroutiers ;
- La coordination avec la construction du futur passage souterrain sous le carrefour ; les piles de rive de l'ouvrage doivent être implantées dans l'axe médian de la trémie ;
- Le manque d'emprise disponible pour un chantier/aire de construction autour du pont ;
- Un travelage imposé : travée centrale unique de 148 m (sans appui intermédiaire) ou deux travées de 80 et de 68 m ;
- La place disponible entre les deux tabliers autoroutiers existants du Tol Cawang est de 2,9 m, si on opte pour une solution avec appui intermédiaire.

Plusieurs solutions ont été proposées lors de la phase de préconcept afin de permettre au client de choisir l'option la plus adaptée :

- 1-** Solution caisson mixte lancé (figure 11) ;
- 2-** Solution caisson béton précontraint à voussoirs préfabriqués construit par encorbellement successif (figure 12) ;
- 3-** Solution pont haubané courbe (figure 13).

La solution 1 caisson mixte nécessite un lançage adapté à la forte courbure du tracé ; certains segments devront être levés à la grue et soudés sur place car l'emprise disponible pour la préfabrication est très limitée.

Le principal problème était l'impossibilité d'utiliser une palée provisoire du fait de la circulation.



10

© SYSTRA



11



12



13

© ADHI

10- Vue en plan du carrefour au niveau de Kuningan.

11- Variante 1 - Kuningan : Caisson mixte.

12- Variante 2 - Kuningan : Caisson béton précontraint.

13- Variante 3 - Kuningan : Pont haubanée.

10- Plan view of the intersection at the level of Kuningan.

11- Variant 1 - Kuningan: Composite box girder.

12- Variant 2 - Kuningan: Prestressed concrete box girder.

13- Variant 3 - Kuningan: Cable-stayed bridge.

La solution 2 pont haubané élimine la problématique d'implantation d'un appui intermédiaire. L'impact sur la circulation serait minimal car la construction se déroulerait en dehors ou au-dessus de la circulation. Comme inconvénients de ce type d'ouvrage on peut citer la durée de construction allongée, son coût, et l'impact sur la construction du futur passage souterrain de Rasuna Said. L'inclinaison du pylône et la position des haubans est déterminée par plusieurs critères. Les haubans doivent éviter au maximum le gabarit du train. Leur inclinaison et la poussée transversale génèrent donc d'importants moments en pied de pylône. La position des haubans est donc choisie afin de réduire au maximum cet effet avec le concours du poids propre du pylône.

La solution 3 pont caisson béton précontraint construit par encorbellement est la solution qui a été finalement retenue par le client (figure 14).

Le pont en caisson a une longueur de 248 m avec 4 travées de 55, 80, 68 et 45 m. La hauteur des voussoirs sur pile est de 5,3 m et 4,25 m, celle des voussoirs de clé de 2,3 m. Le rayon de courbure en plan est de 115 m. La pile la plus haute implantée sur le médian du passage inférieur à une hauteur de 24 m.

PRÉSENTATION DU MODÈLE SOFISTIK - KUNINGAN : CAISSON BÉTON PRÉCONTRAIT



© SYSTRA

14

À la suite des études, une série de dispositions techniques a été déterminée :

- La pile qui constitue l'appui intermédiaire doit être limitée à 2,50 m de largeur, avec un déplacement maximal admis sous séisme de 20 cm. Ces déplacements ont été vérifiés pour une période de retour plus grande que celle de référence.
- Cette pile encaisse des efforts considérables durant la phase construction du fait de la courbure des fléaux : il n'y a pas de place disponible pour des palées. Des câbles de précontrainte dans la pile sont à prévoir durant la phase de construction. En phase définitive, l'ouvrage étant encastré dans la pile, une rotule plastique est susceptible de se former en tête de cette pile. Les câbles sont donc détendus après clavage afin de garantir une bonne ductilité de la rotule plastique sous séisme.
- Un contrôle de la géométrie de la pile doit être assuré en permanence - il est également important de prévoir une contre-flèche afin de compenser les déplacements durant la construction (car la structure est courbe).

14- Présentation du modèle Sofistik - Kuningan : Caisson béton précontraint.

14- Presentation of the Sofistik model - Kuningan: Prestressed concrete box girder.

→ La fondation à mettre en place au niveau de l'appui intermédiaire est un caisson construit par havage de 8 m de diamètre, réalisé par un sous-traitant spécialisé afin de limiter l'emprise de la fondation et de permettre la construction d'une fondation de taille importante sous un ouvrage existant.

→ Afin de limiter davantage les déplacements de l'ouvrage sous séisme et de s'assurer que les efforts sont repartis uniformément, les raideurs des différentes piles sont calibrées en augmentant leurs sections à la base. □

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

LONGUEUR : 19,7 km, dont 17,1 km en aérien

DURÉE DU TRAJET : 30 minutes

GARES : 11 gares aériennes, 3 gares souterraines et 1 dépôt - 5 gares supplémentaires sont prévues

VITESSE DE CONCEPTION : 110 km/h

CAPACITÉ MATÉRIEL ROULANT : 6 voitures - 120 m de long

PRINCIPALES QUANTITÉS TRAVÉE TYPE

NOMBRE D'OUVRIERS SUR SITE : 3000 ouvriers

LONGUEUR TOTAL DES OUVRAGES CONSTRUITS PAR ENCORBELLEMENT : 2,2 km

LONGUEUR TOTAL DU VIADUC TYPIQUE EN U : 41,5 km

LARGEUR/HAUTEUR/POIDS D'UN U DROIT: 4,6 m / 1,75 m / 150 t

RATIO DE PRÉCONTRAINTE/ARMATURES DU U : 35 kg/m³ / 190 kg/m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ministère du transport - Direction générale des chemins de fer

MAÎTRE D'ŒUVRE : Oriental Consultant - Japan

CONCEPTEUR : Systra

ENTREPRISE : PT Adhi Karya (Persero) Tbk

ABSTRACT

THE JAKARTA METRO

G. MAURIS, SYSTRA - S. DAABOUS, SYSTRA - T. DEMETRIU, SYSTRA - IR. SYAHRUDDIN, PT ADHI KARYA (PERSERO) TBK - IR. UJANG RAMDAN, PT ADHI KARYA (PERSERO) TBK

The Greater Jakarta metropolis - or *Jabodetabek* - is the second largest metropolis in the world after Tokyo, with 28 million inhabitants in 2014. It currently has no metro transport system. The Jakarta government has decided to start work on three light metro lines (LRT: Light Rapid Transit system) or more than 40 km of U-shaped viaducts and 2 km of bridges built by balanced cantilever method. The tight construction deadlines are being met thanks to industrial prefabrication of the U-shaped viaducts and pier caps. The standard viaducts are isolated from earthquake by lead rubber bearings (LRBs), and transverse movements in service are limited by keys fixing the successive spans. The most complex structure is a bridge built by balanced cantilever method passing over the Rasuna Said/Kuningan intersection. □

EL METRO DE JAKARTA

G. MAURIS, SYSTRA - S. DAABOUS, SYSTRA - T. DEMETRIU, SYSTRA - IR. SYAHRUDDIN, PT ADHI KARYA (PERSERO) TBK - IR. UJANG RAMDAN, PT ADHI KARYA (PERSERO) TBK

La métropole del Gran Jakarta (o *Jabodetabek*) es la segunda metrópolis del mundo después de Tokio, con 28 millones de habitantes en 2014. Actualmente no posee transporte por metro. El gobierno de Jakarta ha decidido construir tres líneas de metro ligero LRT (light rapid transit), lo que representa más de 40 km de viaductos en U y 2 km de puentes construidos en ménsulas sucesivas. Los ajustados plazos de construcción se han respetado gracias a la prefabricación industrial de los viaductos en U y de las cabezas de pilote. Los viaductos normales están protegidos de los seísmos por apoyos con núcleo de plomo (LRB) y los desplazamientos transversales en servicio están limitados por llaves que unen los sucesivos tramos. La obra más compleja es una construcción por ménsulas sucesivas sobre el cruce de Rasuna Said/Kuningan. □



1

© HYUNDAI

LE PONT DE CHAMBAL AU RAJASTHAN

AUTEURS : ERICA CALATOZZO, RESPONSABLE ÉTUDES DÉPARTEMENT VPP, SYSTRA - SERGE MONTENS, RESPONSABLE SCIENTIFIQUE DÉPARTEMENT VPP, SYSTRA - MATHIEU MULS, RESPONSABLE ÉTUDES DÉPARTEMENT VPP, SYSTRA - AREZKI TOUAT, DIRECTEUR ADJOINT DE LA RÉGION APA, SYSTRA - JEAN CHARLES VOLLERY, DIRECTEUR DE LA RÉGION APA, SYSTRA

D'UNE LONGUEUR TOTALE DE 1 100 m, LE PONT DE CHAMBAL (RAJASTHAN) EST LE PREMIER OUVRAGE HAUBANÉ À SUSPENSION AXIALE CONSTRUIT EN INDE. IL COMPORTE UN OUVRAGE HAUBANÉ AVEC UNE TRAVÉE PRINCIPALE DE 350 m SUPPORTÉE PAR DEUX PYLÔNES AXIAUX, ET DEUX VIADUCS D'ACCÈS, DE 370 m ET 30 m DE LONGUEUR. CET OUVRAGE ROUTIER A ÉTÉ CONÇU EN RESPECTANT LES CONTRAINTES IMPOSÉES PAR LA PROTECTION DES GAVIALS, UNE ESPÈCE PROTÉGÉE DE CROCODILES HABITANT LA RIVIÈRE DE CHAMBAL, RÉSERVE NATURELLE ET SANCTUAIRE DE CES DERNIERS.

INTRODUCTION

Longue de 1 050 km, la rivière protégée de Chambal sillonne les états de Madhya Pradesh, du Rajasthan et de l'Uttar Pradesh, au nord de l'Inde, avant de se jeter dans le fleuve Yamunâ (figure 2).

Pour pouvoir la franchir, les autorités indiennes ont demandé la construction d'un pont au niveau de la ville de Kota, principale agglomération, avec plus d'un million d'habitants, située sur le cours de la rivière.

1- Vue générale.

1- General view.

La conception de cet ouvrage a été fortement impactée par la contrainte de protéger une espèce rare de crocodiles, les gavials (*Gangeticus gangeticus*). Classés comme menacés d'extinction dans la liste rouge des espèces en

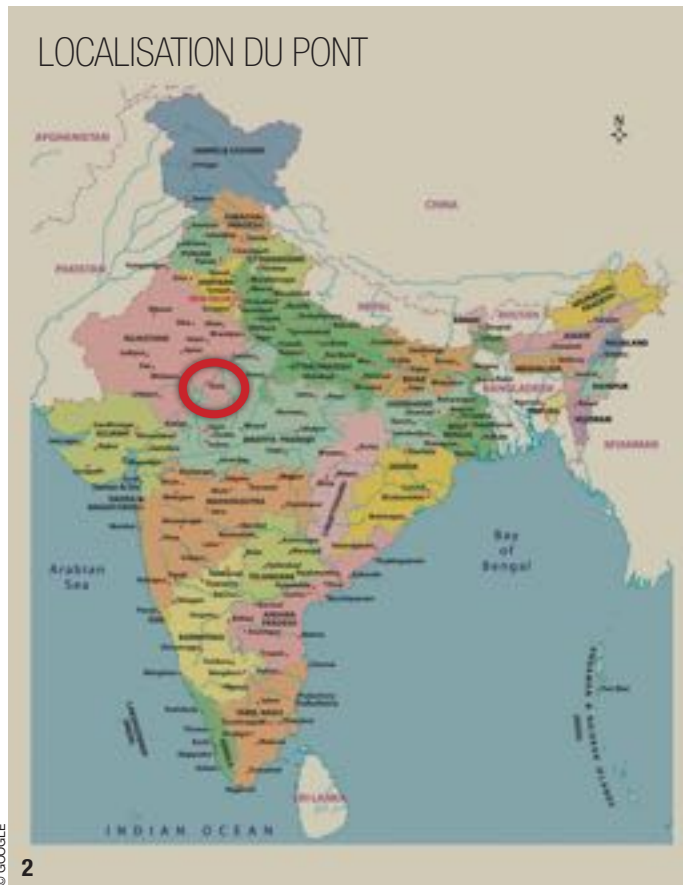
voie de disparition de l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) les gavials sont considérés comme des animaux sacrés dans la tradition indienne.

La conception de l'ouvrage a dû respecter les principales contraintes suivantes :

- Impossibilité de construire des piles dans la rivière ;
- Protéger les crocodiles du bruit causé par les véhicules traversant le pont ;
- Impossibilité d'installer un quelconque équipement dans la rivière même pour les investigations du sol.

- 2- Localisation du pont.
- 3- Section type.
- 4- Élévation.

- 2- Bridge location.
- 3- Typical cross section.
- 4- Elevation view.



CONCEPTION

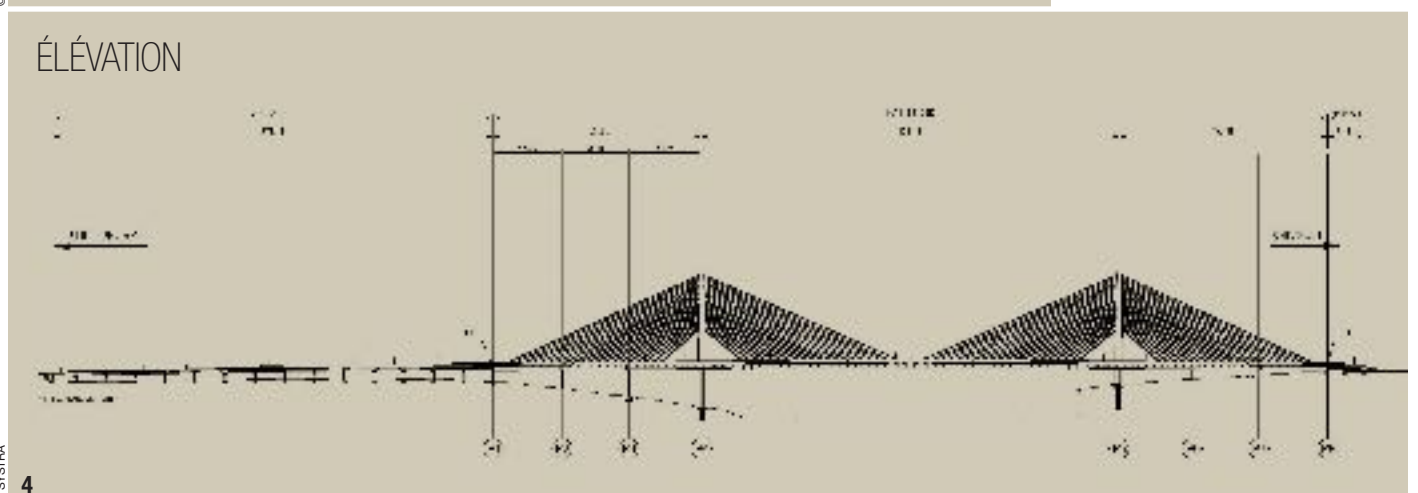
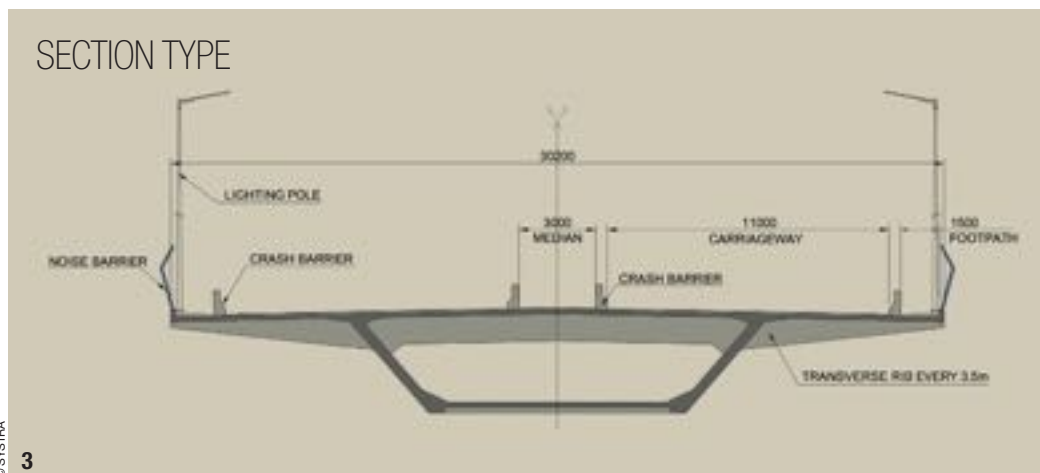
La largeur de la rivière est d'environ 300 m. En raison de l'impossibilité de mettre une pile dans cette dernière, la solution de pont haubané d'une portée principale de 350 m avec un tablier précontraint porté par deux pylônes axiaux a été retenue. Les parties latérales du pont haubané reposent sur des piles intermédiaires. Deux viaducs d'accès, de 370 m et 30 m de longueur, dotés de tablier à poutres préfabriquées, se trouvent à chaque extrémité du pont principal (figure 4).

Le tablier est constitué d'un caisson en béton précontraint de 30,2 m de largeur et 4,10 m de hauteur, rigidifié par une entretoise chaque 3,5 m. Il s'agit d'un tablier à deux fois 3 voies avec un médian central de 3 m et deux passages piétons de 1,50 m (figure 3). L'ouvrage est bordé d'écrans acoustiques de 2,50 m de hauteur destinés à protéger du bruit les gavials. Une étude au vent turbulent avec des essais en soufflerie a été menée pour vérifier le bon comportement du tablier compte tenu de ces écrans.

Le tablier est liaisonné aux deux pylônes par des haubans axiaux en semi harpe, ancrés chaque 7 m au tablier, le premier hauban étant ancré à 38,5 m du pylône. Les ancrages passifs sont positionnés au niveau des pylônes.

Les pylônes ont 80 m de hauteur au-dessus du tablier, avec une largeur constante de 3 m et une longueur variable de 7 m à 4 m.

Les pylônes en béton armé contiennent une structure en acier où se trouvent les ancrages des haubans. Cette structure en acier est composée de 20 boîtes en acier par pylône (une pour chaque couple de câbles de haubans), qui reprennent la composante horizontale des efforts dans les haubans. ▶



La composante verticale est transmise au pylône par des goujons de cisaillement, situés sur les côtés latéraux des boîtes en acier.

Un trou d'homme, avec une dimension minimale de 800x1 500 mm, est prévu à l'intérieur du pylône.

Les haubans sont composés de torons gainés individuellement présentant une triple protection : galvanisation, remplissage de cire, et gaine en polyéthylène individuelle. Le nombre de torons par hauban varie de 58 à 91. Des dispositifs anti-vibrations sont installés pour les haubans les plus longs.

Le tablier est précontraint longitudinalement par de la précontrainte intérieure et extérieure, et transversalement par de la précontrainte intérieure.

Les câbles extérieurs se trouvent principalement dans les travées latérales. Des câbles de fléau sont utilisés pour la partie construite en encorbellement, dans la zone située avant le premier hauban. Des câbles intérieurs, dits câbles cycliques, sont ensuite utilisés pour garantir la continuité chaque 4^e voussoir.

La précontrainte transversale est constituée par des câbles 13T15 pour les entretoises et 4T15 pour le hourdis supérieur. De plus, pour chaque ancrage des haubans, un diaphragme précontraint diagonalement est mis en place, permettant la transmission des efforts aux âmes du caisson (figure 5). Pour réduire les efforts de soulèvement sur les piles latérales, un contrepoids en béton est coulé dans le caisson au droit de ces dernières.

Le tablier se trouve à une hauteur maximale de 30 m par rapport au terrain naturel. Cette hauteur étant relativement faible, il était plus économique de construire les travées latérales sur plusieurs piles.

Ces piles latérales rigidifient l'ensemble du pont, et diminuent le moment de flexion et les déplacements verticaux dans la travée principale, ainsi que le moment de flexion longitudinale du pylône. La construction du pont principal a été réalisée sur des échafaudages pour les travées latérales et en utilisant la méthode par encorbellements successifs avec clavage à mi-travée pour la travée centrale.

Le tablier est supporté par des appareils sphériques (figure 6) glissants se situant sur le pylône P4 et sur les piles des travées latérales. La pile supportant le pylône P5, la plus courte et située à proximité de la falaise, est encastrée au niveau du tablier. Des investigations géotechniques (topographiques,



PRÉCONTRAÎTE TRANSVERSALE DANS UN VOUSSOIR TYPE

5 © SYSTRA

5- Précontrainte transversale dans un voussoir type.

6- Appareil d'appui sphérique sur P4 et blocage longitudinal en phase de construction.

7- Pylône P4.

5- Transverse prestressing in a standard segment.

6- Spherical bearing device on P4 and longitudinal blocking in the construction phase.

7- Pylon P4.



6 © SYSTRA

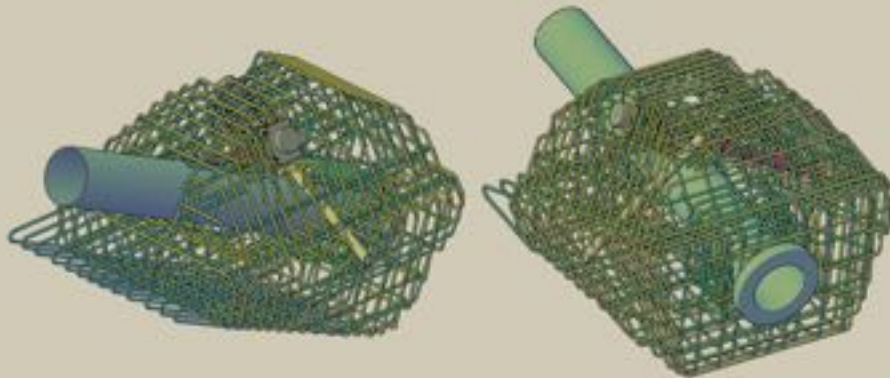
géologiques et géophysiques) ont été menées pour en assurer la stabilité en respectant les contraintes de site. Ce schéma statique a été choisi après comparaison avec d'autres schémas statiques envisageables : encastrement sur les deux piles principales, appareils d'appuis sur les deux piles principales (figure 6).

Les piles ont une forme rectangulaire pour les travées latérales et une forme en croix pour les fûts sous les pylônes. Bien que cette dernière forme soit inhabituelle, elle a été choisie pour des raisons structurelles. Les charges principales provenant du pylône axial rectangulaire, il est nécessaire que la pile comporte une partie rectangulaire de mêmes dimensions que la base du pylône. D'autres charges provenant des âmes du tablier et de son diaphragme, il est intéressant de placer une section transversale sous ce diaphragme.



7 © SYSTRA

VUE 3D DU FERRAILLAGE DES BLOCS D'ANCRAGE



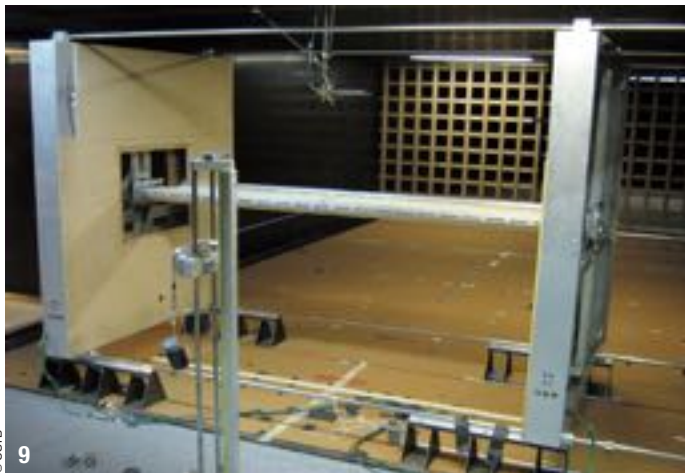
La conjugaison de ces éléments conduit à une section optimisée en forme de croix.

Cette forme n'est généralement pas choisie car elle présente une faible résistance longitudinale de flexion et de torsion. Lorsque le pont est construit par encorbellement avec des fléaux symétriques, il est généralement nécessaire de disposer d'une grande résistance longitudinale en flexion en raison des fortes sollicitations induites par le déséquilibre du poids des fléaux et par les effets dissymétriques du soulèvement dû au vent. Il faut également une bonne résistance en torsion pour reprendre les effets de traînée dissymétrique sous l'action du vent sur le fléau libre. Il en résulte donc souvent une section de pile en caisson. Dans le cas de cet ouvrage, les travées latérales étant construites sur échafaudages, cette forme en croix plus simple a pu être adoptée (figure 7).

Grace à la bonne qualité du sol, toutes les piles latérales sont fondées sur fondations superficielles et les deux pylônes sont fondés sur deux pieux de 4,5 m de diamètre et de 15 m de longueur. La semelle sur pieux présente une épaisseur variable de 2 m à ses extrémités à 5 m sur l'axe des pylônes afin d'optimiser la quantité de béton. ▷

8- Vue 3D du ferrailage des blocs d'ancrage.
9- Maquette 3D du tablier.
10- Barrières anti-bruit.

8- 3D view of reinforcing bars for anchor blocks.
9- 3D model of the deck.
10- Noise-abatement barriers.



11- Phasage de construction.

11- Construction work sequencing.

PLANNING DES ÉTUDES

- décembre 2006 - fin janvier 2007 (2 mois) (validation du concept).
- « **Definitive design** » : février 2007 - fin mai 2007 (4 mois) (coffrage et ferrailage des fondations).
- « **Intermediate design** » : fin mai 2007 - mi-juillet 2007 (1,5 mois) (ferrailage des piles).
- « **Final design** » : mi-mai 2007 - mars 2008 (10 mois) (ferrailage du tablier, des ancrages (figure 8), des pylônes, précontrainte...).

ÉTUDES SISMIQUES

La ville de Kota est située dans la zone sismique II, soit avec une accélération de pointe du sol de 0,1 g. Le spectre de réponse de conception a été défini en se basant sur le code IRC (Indian Railways Code).

Pour estimer les effets du séisme sur la structure, un modèle 3D du pont a été réalisé, comportant une partie des viaducs d'accès afin d'obtenir les effets corrects sur les appuis à la transition entre ces viaducs et le pont principal. Les effets sismiques ont été évalués pour la phase de service et pour les phases de construction les plus défavorables. Les effets de tous les modes ont été combinés en utilisant une combinaison quadratique complète CQC.

Le coefficient de comportement de la réponse a été considéré selon le code AASHTO LRFD.

ÉTUDES AU VENT

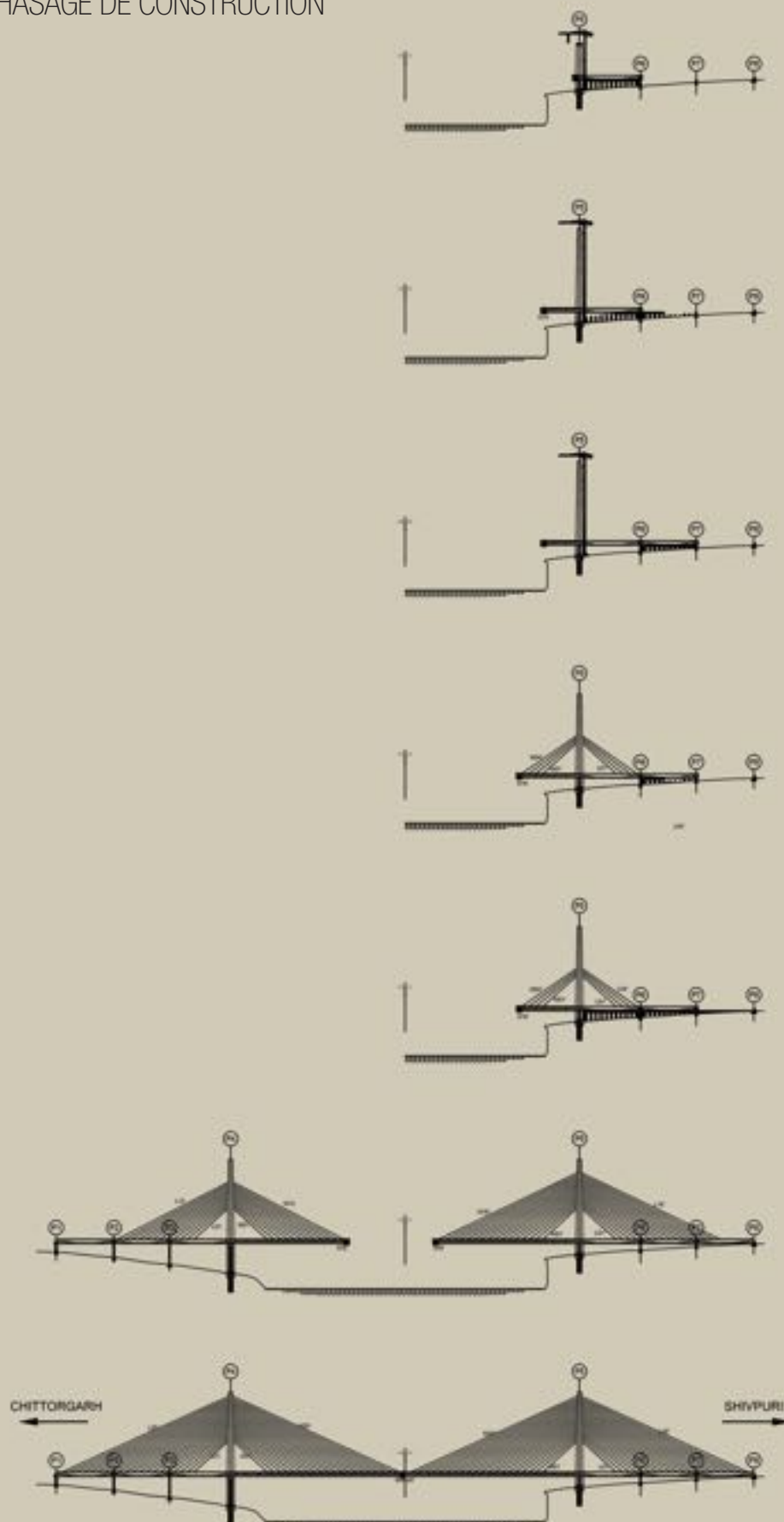
Pour protéger les gavials du bruit causé par les véhicules traversant le pont des barrières acoustiques ont été adoptées. Une barrière acoustique efficace doit évidemment présenter une porosité nulle.

Toutefois cela peut créer des turbulences et des mouvements tourbillonnaires sur le tablier du fait d'un coefficient de traînée plus important par rapport à celui d'une barrière classique présentant généralement une porosité de l'ordre de 50 %.

Des essais en soufflerie ont été effectués par le Cstb à Nantes (France) (figure 9).

Au cours du premier essai réalisé avec une barrière acoustique verticale, un

PHASAGE DE CONSTRUCTION



tourbillon de grande amplitude créant une importante flexion verticale est apparu pour une vitesse moyenne de vent de 15 m/s.

Selon les critères de conception fixés, les amplitudes de vibration sous échappement tourbillonnaire devaient être limitées pour des vitesses moyennes du vent inférieures à 20 m/s. Il a donc été nécessaire de modifier la forme de

12- Construction du fléau côté P4.

13- Construction - vue d'ensemble.

12- Construction of deck section on P4 side.

13- Construction - general view.

la barrière acoustique afin de satisfaire ce critère.

Diverses variantes ont ensuite été testées : corniches avec ouvertures à la base de la barrière, corniches triangulaires symétriques latérales larges, des combinaisons de ces types de barrières, etc.

Aucun des éléments testés n'a satisfait ce critère. Une barrière anti-bruit avec

une forme angulaire non symétrique a finalement été testée et retenue (figure 10).

La vitesse critique de création du tourbillon était alors supérieure à la limite de 20 m/s, et créait des amplitudes de vibration beaucoup plus petites qu'avec les barrières testés précédemment (10 fois plus petites).

La stabilité aéro-élastique (flottement) a également été vérifiée jusqu'à une vitesse moyenne du vent de 50 m/s. Les coefficients aérodynamiques ont ensuite été mesurés sous un vent uniforme et un vent turbulent, en phase de construction et en phase de service. Ces coefficients ont ensuite été utilisés dans un calcul au vent turbulent par analyse modale stochastique, afin de dimensionner l'ouvrage, et de procéder aux vérifications à la fatigue du ferrailage du tablier.

PHASAGE DE CONSTRUCTION

La construction s'est déroulée de 2007 à 2017.

Après la réalisation de l'ensemble des appuis (fondations, piles intermédiaires, piles supportant les pylônes), la travée P5-P6 est coulée sur échafaudage (figure 11).

Cette travée permet alors d'amorcer la construction du fléau par encorbellements successifs jusqu'au voussoir S10, soit une longueur totale de 31,5 m. En parallèle, le pylône est érigé. ▷



12



13



14

© HYUNDAI

Les travées P6-P7, puis P7-P8, sont alors réalisées de la même manière que P5-P6, permettant de poursuivre la réalisation du fléau désormais soutenu par les haubans, le premier hauban étant ancré au voussoir n°10 et le vingtième au voussoir n°48. En effet, les haubans sont ancrés au tablier tous les 7 m, ce qui correspond à 2 voussoirs de 3,5 m pour la travée centrale ; chacun des deux fléaux comportant un total de 49 voussoirs de 3,5 m de long (en plus du voussoir sur pile), bétonnés en place avec un équipage mobile.

Dans cette zone, deux types de voussoirs avec phasage de construction différent sont donc présents :

→ Voussoirs avec haubans : bétonnage de l'élément, installation des deux haubans, première mise en tension du hauban côté travée latérale (70% de la force requise en construction), mise en tension du hauban côté travée principale (100% de la force en construction), deuxième phase de retension du hauban côté travée latérale (jusqu'à atteindre la force de 100%).

Le temps de construction d'un voussoir avec hauban est de l'ordre de 7 à 8 jours.

→ Voussoirs courants : bétonnage, déplacement de l'équipage mobile. Le temps de construction est de l'ordre de 5 jours.

Le même phasage de réalisation a été appliqué pour chacun des fléaux (figures 12 et 13).

Après l'opération de clavage (détaillée par la suite), l'ensemble des équipements de l'ouvrage (barrières, chaussée, etc.) est mis en place.

Puis une nouvelle phase de retension des haubans est effectuée.

14- Clavage.

15- Dispositifs anti déplacements verticaux et transversaux.

14- Keying.

15- Systems to prevent vertical and transverse displacements.

CONTRÔLE DE GÉOMÉTRIE

Pour des raisons structurelles, esthétiques et fonctionnelles, la géométrie correcte du tablier à la fin de sa construction doit être garantie. Pour ce faire, des contrôles de la géométrie du tablier ont été nécessaires à chaque étape de la construction afin de maîtriser le profil final.



15

© HYUNDAI

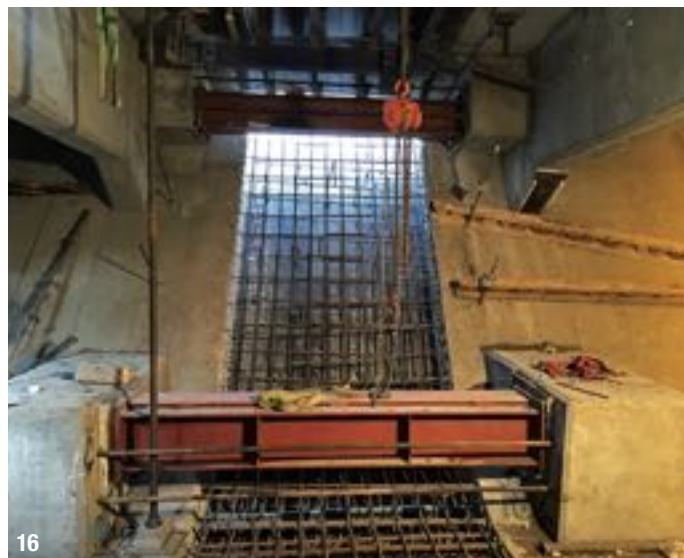
La construction par encorbellements successifs impliquant la division du tablier en multiples éléments réalisés successivement, des vérifications de la géométrie du tablier ont été effectuées après chaque bétonnage de voussoir afin d'ajuster, le cas échéant, la position et l'orientation du suivant.

Chacun des voussoirs est équipé de repères permettant d'identifier sa position réelle. Les contrôles ont pour but de mesurer l'écart absolu et relatif en altitude, de chaque repère par rapport à sa position théorique.

Plus particulièrement, la maîtrise des flèches est très importante dans le cas de construction par encorbellements successifs dans l'optique du clavage. Les deux fléaux doivent en effet se rejoindre à la même altitude, définie en phase d'études, afin d'éviter un rattrapage des niveaux par l'application à l'extrémité de l'un des deux fléaux d'une charge temporaire ou par la modification des tensions des haubans avant clavage. Ces techniques peuvent en effet provoquer l'apparition d'efforts parasites dans la structure ou une modification de la répartition des tensions dans les haubans.

CLAVAGE

Le contrôle de la géométrie étape par étape a permis d'obtenir in fine une dif-



16
© HYUNDAI

16- Dispositifs anti déplacements longitudinaux.

16- Systems to prevent longitudinal displacements.

férence de niveau entre les deux fléaux avant clavage, située dans la plage de tolérance acceptable.

Les opérations de clavage (figure 14) se sont déroulées sur 4 jours en plusieurs étapes, en fonction des mouvements des fléaux lors des variations de température ambiante au cours de la journée :

→ Bétonnage du hourdis inférieur du caisson au moment où les fléaux se trouvent dans leur position la plus basse ;

- Quand le béton a acquis une résistance suffisante, mise en tension d'une partie de la précontrainte intérieure dans le hourdis inférieur ;
- Bétonnage de la partie restante du voussoir de clavage lorsque les fléaux se trouvent dans leur position la plus haute ;
- Quand le béton a acquis une résistance suffisante, mise en tension de la deuxième partie de la précontrainte intérieure dans le hourdis inférieur et mise en tension des câbles intérieurs de précontrainte dans le hourdis supérieur ;
- Mise en tension de la précontrainte de continuité ;
- Relâchement du blocage longitudinal du tablier sur P4.

Le découpage en étapes avait pour but d'assurer que les mouvements du tablier entre le coulage et la mise en précontrainte ne généreraient pas de traction dans le béton non précontraint. Des dispositifs (figures 15 et 16) permettant de bloquer les déplacements verticaux, longitudinaux et transversaux ont été utilisés afin d'éviter tout déplacement relatif entre fléaux.

Le clavage du pont de Chambal a eu lieu en janvier 2017 et sa construction a été finalisée en juillet 2017. L'ouvrage a été inauguré et ouvert au trafic fin août 2017. □

QUANTITÉS DU PONT PRINCIPAL

PYLÔNES : 2 100 m³ de béton, 420 t d'armatures, 170 t d'acier structurel

TABLIER : 12 600 m³ de béton, 1 900 t d'armatures, ratio 151 kg/m³, 318 t de précontrainte

HAUBANS : 785 t

PILES : 2 600 m³ de béton, 300 t d'armatures

FONDACTIONS : 2 200 m³ de béton, 300 t d'armatures

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : National Highways Authority of India (NHAI)

ASSISTANT AU MAÎTRE D'OUVRAGE : Lbg (Louis Berger) - Cowi, respectivement « Employer's representative » et « Proof Checker »

BUREAU D'ÉTUDES : Systra

ENTREPRISE : Hyundai Engineering & Construction - Gammon

SOUS-TRAITANT ESSAIS EN SOUFFLERIE : Cstb

SOUS-TRAITANT HAUBANS : Freyssinet

ABSTRACT

CHAMBAL BRIDGE IN RAJASTHAN

ERICA CALATOZZO, SYSTRA - SERGE MONTENS, SYSTRA - MATHIEU MULS, SYSTRA - AREZKI TOUAT, SYSTRA - JEAN CHARLES VOLLERY, SYSTRA

Chambal Bridge, with a total length of 1,100 m, is the first axial-suspension cable-stayed bridge built in India. This road bridge was designed to comply with the constraints imposed by the protection of the gavials, a protected crocodile species inhabiting the Chambal River, in a natural reserve and protection zone for these animals. On the edges of the deck are noise-abatement barriers. Turbulent wind studies were carried out in the design engineering phase in order to validate the type of noise barrier to be used. To ensure the correct keying of the deck sections, precise inspections of the deck shape were required. Construction of the Chambal Bridge was completed in July 2017. □

EL PUENTE DE CHAMBAL, EN RAJASTÁN

ERICA CALATOZZO, SYSTRA - SERGE MONTENS, SYSTRA - MATHIEU MULS, SYSTRA - AREZKI TOUAT, SYSTRA - JEAN CHARLES VOLLERY, SYSTRA

El puente de Chambal, de 1.100 m de longitud total, es el primer puente atirantado con suspensión axial construido en India. Esta obra vial se ha diseñado respetando las restricciones que impone la protección de los gaviales, una especie protegida de cocodrilos que habitan en el río Chambal, reserva natural y santuario de estos animales. El tablero está bordeado por pantallas acústicas. Durante la fase de estudios se han analizado las turbulencias del viento para validar el tipo de pantalla acústica más adecuado. Para garantizar la correcta geometría del tablero al final de la construcción y para asegurar una implantación óptima de los mástiles, ha sido necesario realizar precisos controles de la geometría del tablero. La construcción del puente de Chambal finalizó en julio de 2017. □



© HDEC-OAS-SYSTR-AAS-JAKOBSEN 1

PONT SUSPENDU DE CHACAO AU CHILI

AUTEURS : BÉNÉDICTE PICH, DIRECTEUR DE PROJET ADJOINT, SYSTR - GEORGES MAURIS, RESPONSABLE D'ÉTUDES, SYSTR - ÉRIC GOGNY, EXPERT STRUCTURES MÉTALLIQUES, SYSTR - AYMEN CHEIKH MHAMED, DIRECTEUR EXÉCUTIF DE PROJET, SYSTR - SVEIN ERIK JAKOBSEN, DIRECTEUR EXECUTIF DE PROJET, AAS-JAKOBSEN

LE PONT DE CHACAO CONSTITUE L'UN DES PROJETS LES PLUS EMBLÉMATIQUES D'AMÉRIQUE LATINE. CE PROJET PORTÉ PAR LE MINISTÈRE DES OUVRAGES PUBLIQUES DU CHILI SERA LE PLUS GRAND PONT SUSPENDU MULTI-TRAVÉES AU MONDE AVEC SES DEUX TRAVÉES DE 1 055 m ET 1 150 m. CET OUVRAGE FAIT PARTIE D'UN PROJET GLOBAL D'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE VISANT À RELIER L'ÎLE DE CHILOÉ, DEPUIS LA VILLE DE QUELLÓN AU SUD, À L'AUTOROUTE PANAMÉRICAINNE AU NIVEAU DE VALPARAISO. LE PROJET, INTERROMPU EN 2006 POUR RAISONS FINANCIÈRES, A ÉTÉ RELANCÉ EN 2012 EN VUE D'UNE OUVERTURE D'ICI 2020.

HISTORIQUE DU PROJET

Le pont suspendu de Chacao sera le plus grand pont suspendu d'Amérique Latine et le plus grand pont suspendu multi-travées au monde (figures 1 et 2).

Ce projet phare, mené par le Ministère des Ouvrages Publics chilien, a pour ambition le développement économique de l'île de Chiloé située à 1 000 km au sud de Santiago du Chili. Le pont permettra le remplacement des ferries effectuant des navettes entre l'île et le continent, dont la régularité dépend fortement des conditions climatiques. Il permettra également d'assurer la continuité physique de l'autoroute A5

qui relie à Valparaiso la ville de Quellón, au sud de l'île de Chiloé (figure 3). Les habitants de l'île de Chiloé attendent avec impatience la concrétisation de ce projet évoqué pour la première fois en 1972. Au début des années 2000, le gouvernement chilien souhaite faire du pont suspendu de Chacao un symbole de l'unité du pays en prévoyant son ouverture pour les célébrations du bicentenaire de l'indépendance du Chili en 2010.

Le projet fut attribué une première fois dans les années 2000 sous forme d'un contrat de concession pour la conception, la construction, la main-

1 - Pont de Chacao - Vue de la rive Nord.

1 - Chacao Bridge - View of the north bank.

tenance et l'exploitation de l'ouvrage. Les premières études détaillées du pont suspendu aboutirent à un montant de travaux largement plus élevé que le montant initial estimé par le gouvernement chilien. Le projet fut alors annulé

par la présidente Michelle Bachelet en 2006 pour raisons financières.

Le projet fut relancé au début des années 2010 sous la pression des populations locales. Le montant des travaux et le mode de financement furent réétudiés et le projet fut relancé en 2012 sous la forme d'un contrat de conception-construction. Le contrat fut attribué en février 2014 à un consortium composé des entreprises : Hyundai Engineering & Construction - Oas - Systra - Aas-Jakobsen. Le début de la construction du pont est attendu pour le second semestre 2017 après la validation des études détaillées.



2

© @HDEC-OAS-SYSTRAS-AAS-JAKOBSEN

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Le pont suspendu de Chacao s'étend sur une longueur de 2754 m d'ancrage à ancrage, il est constitué de deux travées principales de 1055 m et 1155 m. Au nord le tablier suspendu est prolongé sur 284 m jusqu'à la culée Nord. Au sud un viaduc mixte tri-poutres à trois travées relie le pylône Sud à la culée Sud (figure 4).

Le câble principal repose sur des pylônes en béton. Les pylônes sont de hauteur variable, leur sommet varie de +157 m à +198 m au-dessus du niveau de la mer. Les pylônes Nord et central se trouvent dans le canal de Chacao, ils sont fondés sur des pieux en béton armé renforcés par des chemises métalliques sur leur hauteur libre et jusqu'à 10 m sous le fond marin. La longueur libre des pieux est de 32 m au niveau du pylône Nord et de 16 m au niveau du pylône central. Les fondations des autres appuis situés sur les rives du canal étaient initialement prévues sur semelles superficielles, elles sont en cours de modification pour des fondations profondes afin d'augmenter la sécurité de l'ouvrage vis-à-vis du séisme.

La forme du pylône central est en Y inversé, sa forme a été étudiée afin de trouver un optimum entre la nécessité de limiter les déplacements du tablier à mi-travée pour respecter le gabarit de navigation et minimiser les efforts dans le câble sous cas de chargement dissymétrique des travées (figure 5). Le tablier suspendu est métallique de type caisson composé de plaques raidies. Ce tablier orthotrope supporte 4 voies de circulation. La largeur totale du caisson est de 23,824 m, sa hau-

2- Pont de Chacao - Vue du tablier.

3- Localisation du pont.

2- Chacao Bridge - View of the deck.

3- Bridge location.

teur est de 3,270 m au centre du tablier, il est suspendu au câble principal par l'intermédiaires de suspentes espacées de 20 m. Des diaphragmes de type treillis raidissent le caisson tous les 4 m (figures 6 et 7).

UN OUVRAGE EMBLÉMATIQUE DANS UNE ZONE DE FORTES CONTRAINTES

La réalisation d'un pont suspendu franchissant le canal de Chacao est un véritable défi parce que les contraintes de

site sont nombreuses et sont autant de paramètres à prendre en compte dans le dimensionnement de cet ouvrage d'art exceptionnel.

L'ouvrage se situe dans une zone de forte sismicité. Le site de construction se situe à moins de 300 km de la ville de Valdivia où le séisme le plus puissant jamais enregistré eut lieu en 1960 avec une magnitude 9,6 sur l'échelle de Richter. Ce séisme provoqua une élévation locale du plancher océanique de plus de 6 m et un tsunami de grande ampleur avec des vagues hautes de 25 m. En 2010, la région fut à nouveau touchée par un fort séisme avec le séisme de Maule de magnitude 8,8 dont l'épicentre se situe à proximité de la ville de Concepción éloignée de 700 km du site. Ce dernier séisme fut intégré dans l'analyse de risque sismique probabiliste réalisée spécifiquement pour le projet et eut pour conséquence l'augmentation du spectre de réponse sismique initial basé sur des études menées en 2006. L'augmentation constatée fut autour de 20% au niveau du pic d'accélération, l'accélération longitudinale au plateau pour le dimensionnement du pylône Nord est devenue alors proche de 12 m/s².

Le canal de Chacao est un site exposé au vent. Les études sur site ont déterminé une vitesse moyenne au niveau du tablier de 90 km/h. Des essais en soufflerie ont permis de confirmer la géométrie du caisson métallique du tablier ainsi que la forme des barrières de sécurité afin d'éviter tout risque d'instabilité aérodynamique ou d'échappement tourbillonnaire. Ces essais ont aussi permis de déterminer les caractéristiques aérodynamiques. ▷

© GOOGLE



3

COUPE LONGITUDINALE



4

© @HDEC-OAS-SYSTRAS-AAS-JAKOBSEN

L'analyse spectrale menée réutilise ces paramètres et fournit les charges à prendre en compte sur les différentes parties de la structure. En particulier, sur les pylônes Nord et Sud en construction, le vent turbulent est un cas de charge déterminant pour le dimensionnement du ferrailage. Enfin, la réalisation d'une maquette de l'ouvrage entier a validé les résultats numériques obtenus.

Les contraintes topographiques et de courants marins ont façonné la géométrie finale du pont. Le canal de Chacao pouvant atteindre des profondeurs supérieures à 100 m, la position des pylônes est déterminée afin de pouvoir les fonder à des profondeurs raisonnables. L'axe du pont a ainsi été choisi afin de passer au-dessus d'un promontoire rocheux sous-marin, nommé Roca Remolinos, qui culmine à 3 m sous le niveau moyen de la mer, permettant la réalisation d'un pylône au milieu du canal. La travée principale de l'ouvrage est alors divisée en deux grandes travées de 1 055 m et 1 155 m.

Les courants marins sont principalement des courants de marée atteignant des vitesses de 5 m/s qui empêchent les navires de marine marchande de remonter le courant. Afin de s'affranchir au maximum de la contrainte du courant lors de la construction et pour faciliter la maintenance, il a été choisi de percher les semelles de fondation des pylônes à 4,50 m au-dessus du niveau moyen de la mer en les fondant sur des pieux en béton armé équipés d'une chemise métallique structurelle servant également de coffrage perdu sur leur hauteur libre.

ZOOM SUR L'ANALYSE EN POUSSÉE PROGRESSIVE DU PYLÔNE CENTRAL

Les pylônes en béton du pont de Chacao sont dimensionnés par le séisme.

Les efforts sismiques proviennent majoritairement de l'accélération de leur propre masse. L'analyse en poussée progressive ou analyse *pushover* est une analyse non-linéaire prenant en compte les non-linéarités des matériaux et les non-linéarités géométriques. Elle permet de détecter l'apparition

4- Coupe longitudinale.

5- Pylône central.

4- Longitudinal section.

5- Central pylon.

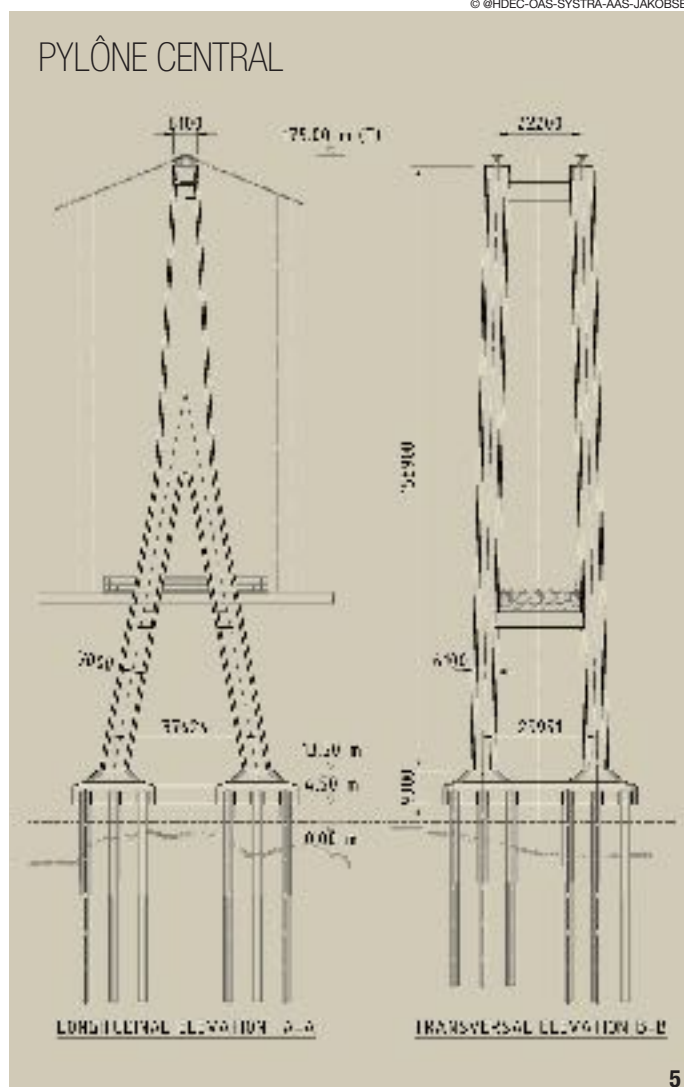
des rotules plastiques et de connaître le mécanisme de rupture d'une structure. Cette étude vise à augmenter la ductilité de la structure en mettant en place des armatures de confinement au niveau des rotules plastiques développées sous séisme et à identifier les différents modes de rupture et d'endommagement.

Le dimensionnement du pont de Chacao est basé sur le code américain AASHTO qui impose de protéger les zones de rotules plastiques se créant pour un événement sismique supérieur au séisme de projet. Ainsi même si aucune plastification n'est observée pour le séisme de projet de période de retour de 1000 ans, l'ensemble des zones de plastification détectées pour un niveau de séisme supérieur (2500 ans de période de retour) seront confinées.

Pour les ponts typiques, le ratio des masses entre le tablier et les piles est tel que l'étude revient à appliquer une force en tête de pile correspondant à la masse du tablier accélérée. La rotule plastique est alors évidente et se crée en pied de pile.

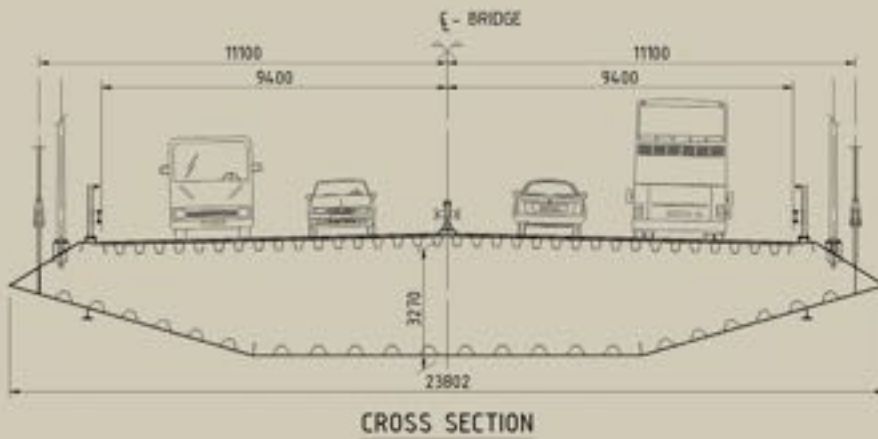
Pour le pont de Chacao, les choses se compliquent. La souplesse du tablier rend peu sensible aux efforts sismiques qui sont principalement apportés par l'accélération de la masse propre du pylône. Le *pushover* se traduit alors par l'application le long du pylône d'un effort correspondant à la déformée du pylône sous séisme. La déformée doit correspondre à une déformée mobilisant plus de 80 % de la masse du pylône pour que cette étude soit représentative du comportement réel.

Pour le pylône central, il est nécessaire de cumuler plusieurs modes de déformation pour mobiliser cette masse. Plusieurs approches s'opposent sur le cumul des modes. L'une consiste



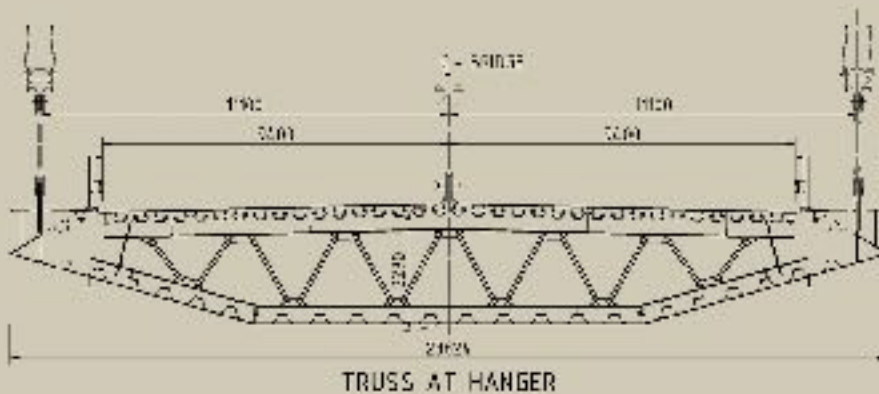
5

COUPE TRANSVERSALE FONCTIONNELLE



6

COUPE SUR DIAPHRAGME TYPIQUE



7

à effectuer un *pushover* par mode et de cumuler les résultats, la seconde à effectuer un seul *pushover* en appliquant progressivement un effort correspondant à la déformée cumulée de plusieurs modes. C'est une variante de cette dernière méthode qui avait été appliquée sur le projet de Chacao.

La méthode des *pushovers* construits à partir des résultats de l'analyse temporelle linéaire, à l'aide du logiciel Sofistik a été adoptée. La déformée de chacun des *pushover* est issue de la déformée et des accélérations maximisant le déplacement et les efforts au niveau des sections critiques du

pylône (base des jambes inclinées, tête de pieux, extrémités des poutres de liaison...). La force appliquée au pylône correspond au produit d'un facteur arbitraire d'amplification par l'accélération d'un point du modèle $f_i = \lambda_i \cdot M \cdot a$.

- 6- Coupe transversale fonctionnelle.
- 7- Coupe sur diaphragme typique.
- 8- Résultats du pushover 1.
- 9- Résultats du pushover 2.

- 6- Functional cross section.
- 7- Cross section on typical diaphragm.
- 8- Results of pushover analysis 1.
- 9- Results of pushover analysis 2.

Exemple de résultat d'une analyse de *pushover*

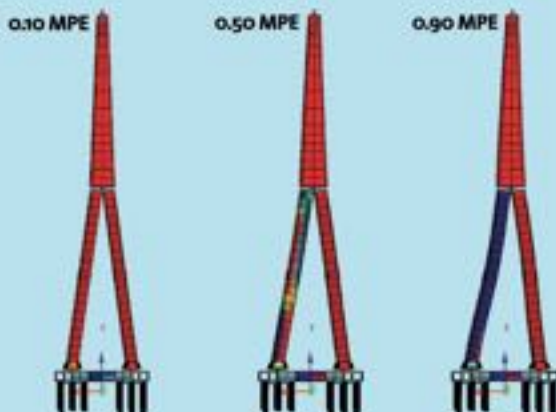
Les figures suivantes montrent les résultats de l'analyse *pushover* du pylône central pour un mode de déformation longitudinal à différents pas de temps (figures 8 et 9).

Identification des premières plastifications

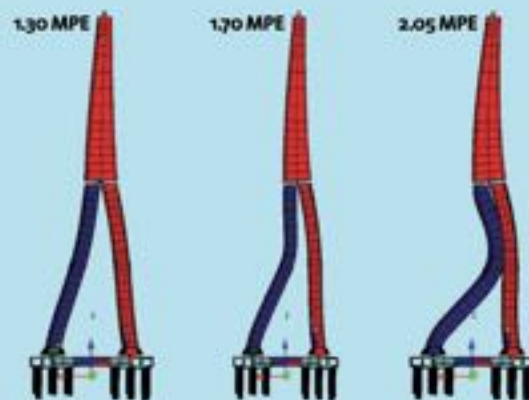
La figure 10 permet d'identifier une première plastification à la base des jambes inclinées du pylône pour 1,05 MPE, MPE étant le séisme de projet, puis une seconde plastification pour 1,30 MPE en tête des jambes inclinées. La forme de la courbe bleue montre néanmoins que la première rotule plastique apparaît pour un niveau de séisme beaucoup plus élevé autour de 1,5/1,6 MPE.

Séquence d'apparition des rotules plastiques

Sur la figure 11, les déformées en traction dans les aciers sont tracées en fonction du niveau de séisme pour le pied de jambes inclinées et en tête de pylône. Ce graphe permet de visualiser l'apparition de la première rotule en pied de pylône pour un niveau de séisme de 1,5 MPE (courbe bleue) et pour 1,7 MPE en tête de pylône (courbe bleue). ▷



8



9

ANALYSE

L'analyse *pushover* permet de comprendre le mécanisme de rupture ductile de la structure ainsi que la séquence d'apparition des rotules plastiques. Généralement cette étude ne traite pas des modes de rupture fragile (effort tranchant, connections). Il est nécessaire de vérifier tranchant et connections aux différents pas d'incrémentations du *pushover*. Si la rupture fragile ne peut être évitée avant la rupture ductile, il faut renforcer localement et déterminer le niveau de séisme pour lequel on accepterait ce type de rupture. Un design en capacité permet d'éviter ce dilemme sur les structures traditionnelles mais cette approche n'est pas transposable à des formes de pylône complexes.

L'analyse du pylône central a également montré que sa forme triangulaire se comporte comme un treillis avec l'apparition de fortes tractions et compressions dans les jambes inclinées sous séisme. Quand un moment fléchissant se combine avec l'effort de traction, la rotule plastique a tendance à se propager le long des jambes inclinées sans créer de réel fusible localisé. Il devient difficile de limiter cette propagation, le confinement doit être mis en place sur une grande partie des jambes inférieures.

ZOOM SUR L'ATTACHE DES SUSPENTES AU TABLIER MÉTALLIQUE

L'un des éléments clé du pont est la liaison tablier/suspentes. Les suspentes s'articulent autour d'un axe dans la direction longitudinale du pont afin de ne pas mettre le câble en flexion.

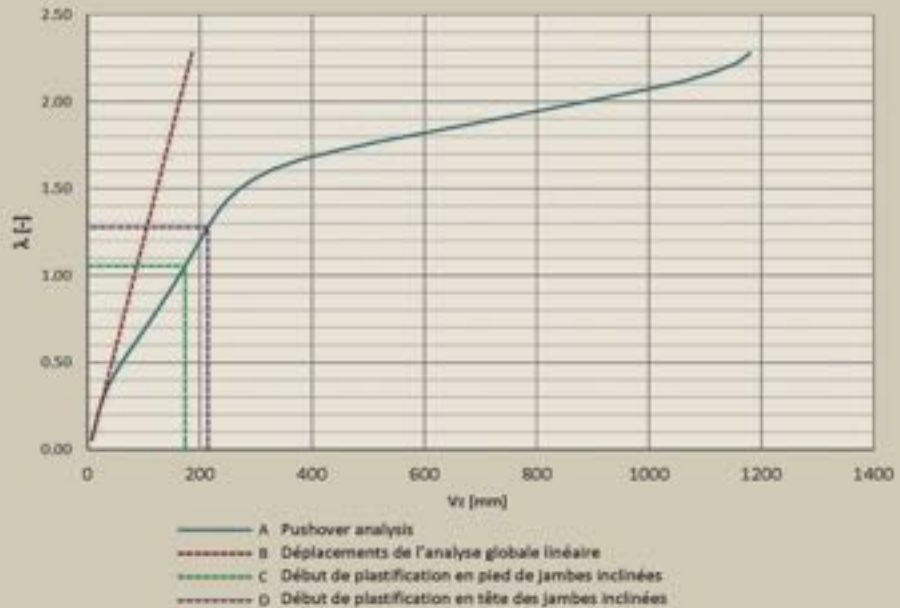
Généralement, le dimensionnement de la pièce métallique de liaison entre les suspentes et le tablier ne requiert pas de calcul sophistiqué. La conception de cette pièce se fait en respectant les principes géométriques édictées dans l'AASHTO ainsi qu'en utilisant les critères géométriques et les restrictions décrits dans l'AISC (American Institute of Steel Construction).

Lorsque l'un des critères de dimensionnement n'est pas respecté il est alors nécessaire de réaliser des études plus poussées pour valider les épaisseurs de plaques. Systra a réalisé sur Ansys un modèle aux Eléments Finis prenant en compte la déformée plastique de l'acier et ce afin de déterminer :

- La distribution et la valeur des pressions de contact entre l'axe et la plaque d'ancrage ;
- Les contraintes et les déformées dans la plaque d'ancrage ;

PYLÔNE CENTRAL - JAMBES INCLINÉES

Déplacement maximal dans la direction longitudinale en fonction de λ .
 $\lambda = 1.0$ correspond à $1.0 \times \text{MPE}$ (MPE, séisme de projet)

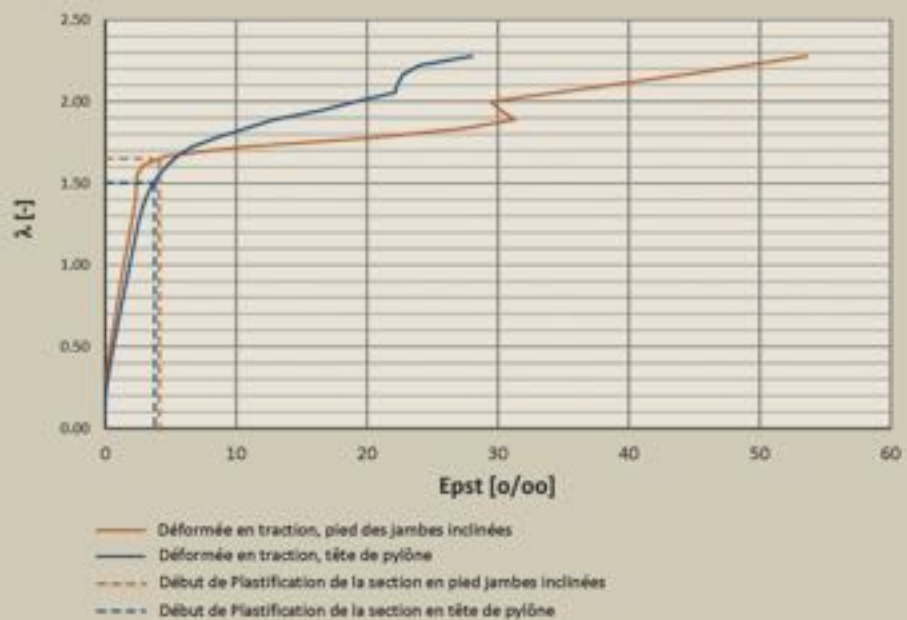


10

© HDEC-OAS-SYSTR-AAG-JAKOBSEN

PYLÔNE CENTRAL

Déformée en traction en fonction de λ .
 $\lambda = 1.0$ correspond à $1.0 \times \text{MPE}$



11

© HDEC-OAS-SYSTR-AAG-JAKOBSEN

→ Les charges de rupture (avec prise en compte de la plasticité des matériaux).

Le modèle Ansys a été créé avec des éléments volumiques et des éléments de contact entre la plaque d'ancrage et l'axe qui permettent d'extraire les pressions de contact. La loi de contrainte-déformation de l'acier est une loi bilinéaire avec un palier plastique.

10- Déplacement des jambes inclinées.

11- Déformée du pylône.

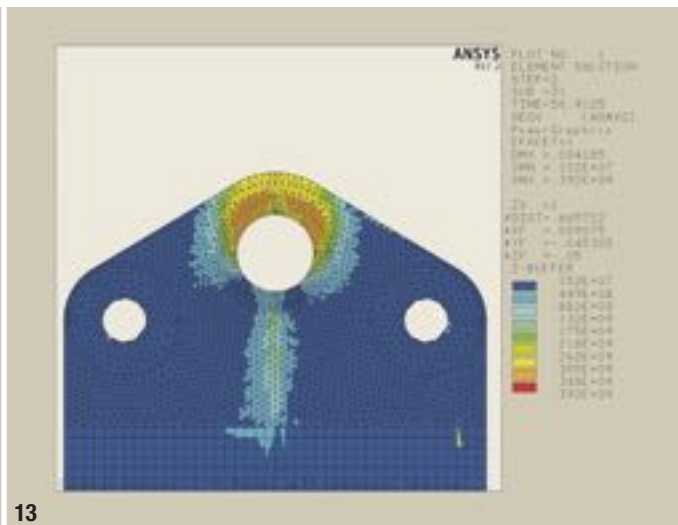
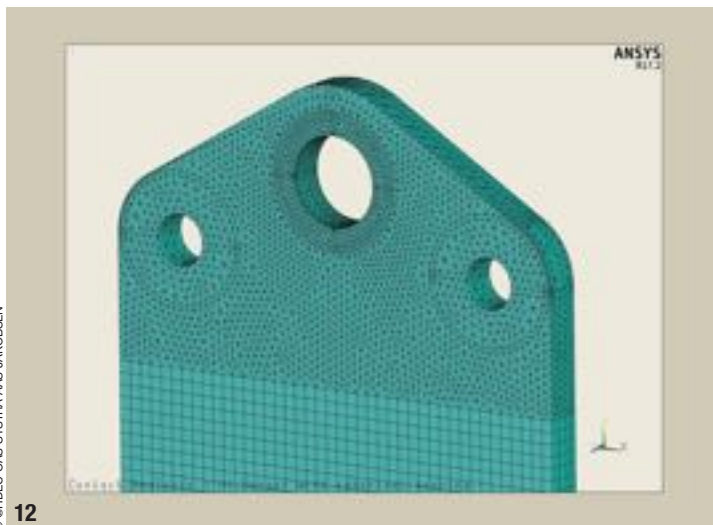
10- Displacement of inclined legs.

11- Pylon strains.

Les efforts dans l'axe ont été introduits par des efforts concentrés aux nœuds (figures 12 et 13).

Les critères de vérification de la plaque d'ancrage sont :

- Limitation de la contrainte équivalente par le critère de Von Mises, ($\sigma_e = \sigma_{eq}$) doit rester inférieure à la limite élastique des matériaux $\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq f_y$.



→ Limitation de la déformée du matériau à sa déformée plastique qui dépend de l'état de contrainte de la pièce et ce conformément aux études menées par Lemaître [1985].

CONCLUSION

Les études d'exécution menées par Systra et Aas-Jakobsen ont dû intégrer les nombreuses contraintes de site. Il a fallu réaliser des modèles de

12- Modèle Ansys des plaques d'ancrages des suspentes.

13- Contraintes de Von Mises dans les plaques d'ancrage.

12- Ansys model of suspender anchor plates.

13- Von Mises stresses in anchor plates.

calculs complexes pour appréhender le comportement du pont sous des chargements d'exploitation, de vent et sismiques. Les codes de calcul ont souvent montré leurs limitations vis-à-vis d'un ouvrage si singulier et il a fallu avoir recours à des résultats de recherches ou à des modèles aux élé-

ments finis non linéaires pour aboutir à des conclusions et finaliser le dimensionnement. Le pylône central a fait l'objet d'une attention toute particulière afin d'assurer sa robustesse sous chargement sismique par la mise en place d'armatures de confinement au niveau des rotules détectées par le *pushover*. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PYLÔNE CENTRAL - ÉLÉVATION : 9 900 m³ de béton, 3 425 t d'armatures
PYLÔNE CENTRAL - SEMELLE : 14 000 m³ de béton, 3 575 t d'armatures, 290 t de précontrainte

PYLÔNES NORD ET SUD - ÉLÉVATIONS : 8 000 m³ de béton, 2 527 t d'armatures

PYLÔNES NORD ET SUD - SEMELLES : 10 000 m³ de béton, 2 119 t d'armatures, 110 t de précontrainte

TABLIER : 20 000 t d'acier

CÂBLE PRINCIPAL : 7 782 t

SUSPENTES : 595 t

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU PONT SUSPENDU DE CHACAO

LONGUEUR : 2 754 m d'ancrage à ancrage, 2 494 m de tablier suspendu, 2 travées principales de 1 155 m et 1 055 m

LARGEUR DU TABLIER : 23 m

HAUTEUR DES PYLÔNES : 153 m - 170 m - 194 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Misniterio de las Obras Publicas (MOP)

AMO : R&Q Ingenieria - Cowi

CONCEPTEUR : Systra - Aas-Jakobsen

ENTREPRISE : Hyundai Engineering & Construction - Oas

ABSTRACT

CHACAO SUSPENSION BRIDGE IN CHILE

BÉNÉDICTE PICH, SYSTR - GEORGES MAURIS, SYSTR - ÉRIC GOGNY, SYSTR - AYMEN CHEIKH MHAMED, SYSTR - SVEIN ERIK JAKOBSEN, AAS-JAKOBSEN

The Chacao suspension bridge will be the longest suspension bridge in Latin America, 2,750 m long and with two main spans 1,155 m and 1,055 m long. The bridge is located on a site that is heavily constrained by seismic, topographic and wind factors. Its concrete pylons are designed for earthquake resistance and underwent detailed engineering studies to prevent any brittle failure for an earthquake with a return period of 2,500 years. The link between the suspenders and the metal deck was designed on a made-to-measure basis to find an optimum compromise between plate thickness and strength. □

EL PUENTE COLGANTE DE CHACAO, EN CHILE

BÉNÉDICTE PICH, SYSTR - GEORGES MAURIS, SYSTR - ÉRIC GOGNY, SYSTR - AYMEN CHEIKH MHAMED, SYSTR - SVEIN ERIK JAKOBSEN, AAS-JAKOBSEN

El puente colgante de Chacao será el más largo de este tipo de Latinoamérica, con 2.750 m de longitud y sus dos luces principales de 1.155 y 1.055 m de longitud. Esta obra está situada en un emplazamiento que presenta fuertes restricciones a nivel sísmico, topográfico y eólico. Sus pilonos de hormigón se han dimensionado para soportar sismos y han sido objeto de detallados estudios para evitar rupturas por fragilidad por sismos de 2.500 años de período de retorno. En enlace entre los tirantes y el tablero metálico ha sido objeto de un dimensionamiento a medida para hallar un compromiso óptimo de grosor de placa y resistencia. □

PREMIERS MÈTRES DU FUTUR MÉTRO D'AUCKLAND : FONDATIONS ET REPRISE EN SOUS-ŒUVRE

AUTEURS : FABRICE PEREZ, CHEF DE PROJET, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL - DAMIEN DELBOS, RESPONSABLE D'AGENCE, FREYSSINET - JULIEN SANTOUL, CHEF DE PROJET, SIXENSE - PHILIPPE BEGOU, DIRECTEUR PROJETS, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

AUCKLAND INVESTIT DANS UN RÉSEAU FERRÉ SOUTERRAIN QUI DESSERVIRA SON CENTRE D'AFFAIRES. LA PREMIÈRE ÉTAPE DE CE PROJET CONSISTE À RÉALISER LES PREMIERS MÈTRES DE TUNNELS SOUS UN BÂTIMENT HISTORIQUE EMBLÉMATIQUE, LE « CHIEF POST OFFICE ». AFIN DE LUI CONSERVER TOUT SON CACHET, SA STRUCTURE VA ÊTRE VÉRINÉE EN PRENANT APPUI SUR LES PAROIS MOULÉES DES TUNNELS RÉALISÉES DEPUIS LES SOUS-SOLS. LE TOUT SOUS SURVEILLANCE ATTENTIVE DES DÉFORMATIONS DE TOUS LES BÂTIS EN TEMPS RÉEL.



AUCKLAND ET SES BESOINS EN TRANSPORTS PUBLICS

Connue mondialement pour héberger les « All Blacks » dans leur stade d'Eden Park, et l'Amérique's Cup (prochaine édition en 2021), Auckland est la plus grande ville et le cœur économique de Nouvelle-Zélande avec 1,5 millions d'habitants, mais aussi une des villes les plus étendues au monde. Quand on sait qu'elle est implantée au milieu

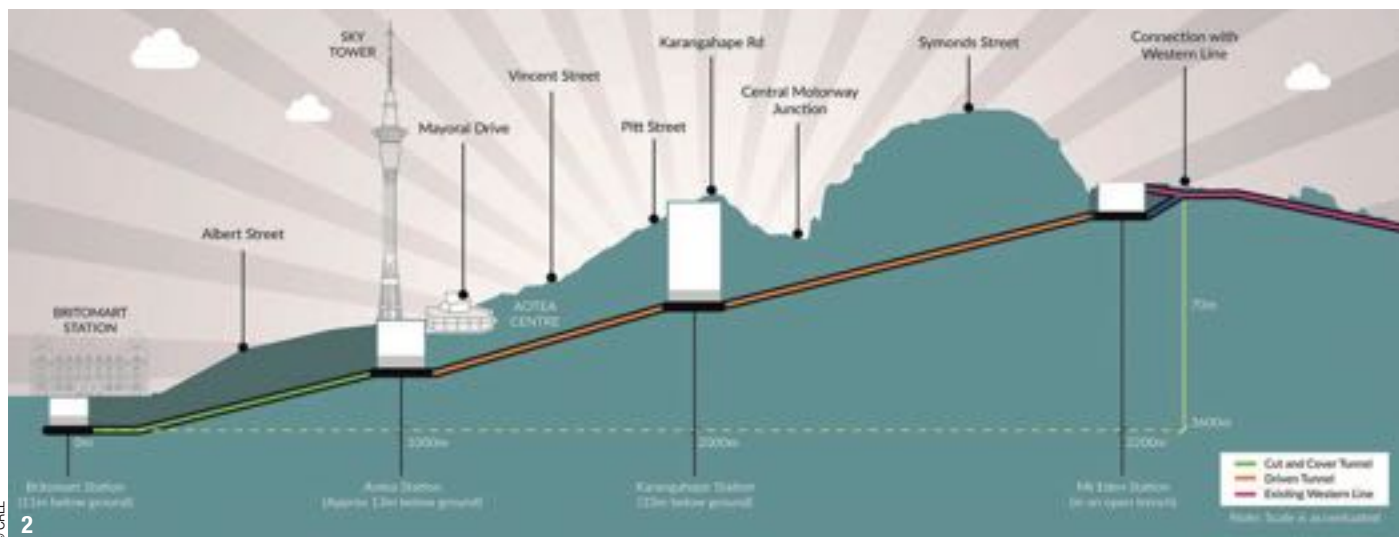
de baies très découpées, on comprend que les transports sont un problème pour le pôle néo-zélandais des affaires. À cela s'ajoute la forte croissance que connaît Auckland, fortement soutenue par les investissements étrangers et l'immigration (voir projets de construction en bleu dans figure 1). Un fort développement de son centre qui est prévu perdurer au moins 20 ans.

1- Projet CRL (City Rail Link) - vue en plan.

1- CRL (City Rail Link) project - plan view.

LE PROJET CRL, ET LA PREMIÈRE ÉTAPE CRL C1

Le projet CRL (City Rail Link) prévoit de « boucler » le réseau ferroviaire (figure 1), mais surtout de réaliser deux nouvelles stations souterraines en plein centre-ville, reliées au réseau existant par une troisième station à ciel ouvert (figure 2). Avec 3,6 km de double tunnel, CRL est actuellement



© CRL
2

le plus gros projet d'infrastructure en Nouvelle-Zélande.

Quant à la première étape, objet du contrat « C1 », elle a démarré en juillet 2016 et consiste à réaliser les tunnels dans la continuité de la gare Britomart, sous le fameux Chief Post Office (CPO). La figure 3 montre la coupe des tunnels sous le bâtiment du CPO.

La sélection du groupement d'entreprises Downer-Soletanche Bachy, effectuée en 2015, s'est prolongée par une phase de dialogue compétitif (Early Contractor Involvement) qui a permis

2- Projet CRL (City Rail Link) - vue en coupe.

3- Façade du Chief Post Office et coupe sur nouveaux tunnels ferroviaires.

2- CRL (City Rail Link) project - cross-section view.

3- Facade of the Chief Post Office and cross section of new rail tunnels.

d'optimiser la conception du projet, notamment en transformant les structures de soutènement provisoires du tunnel en structures définitives, assurant les reprises de charge du vérinage puis des tunnels en exploitation.

LE PHASAGE DE RÉALISATION DE CRL C1

Avant les travaux d'infrastructure, d'importants travaux ont été nécessaires pour remplacer l'accès à la gare sous le CPO par un accès provisoire à l'est, sans interruption du service.

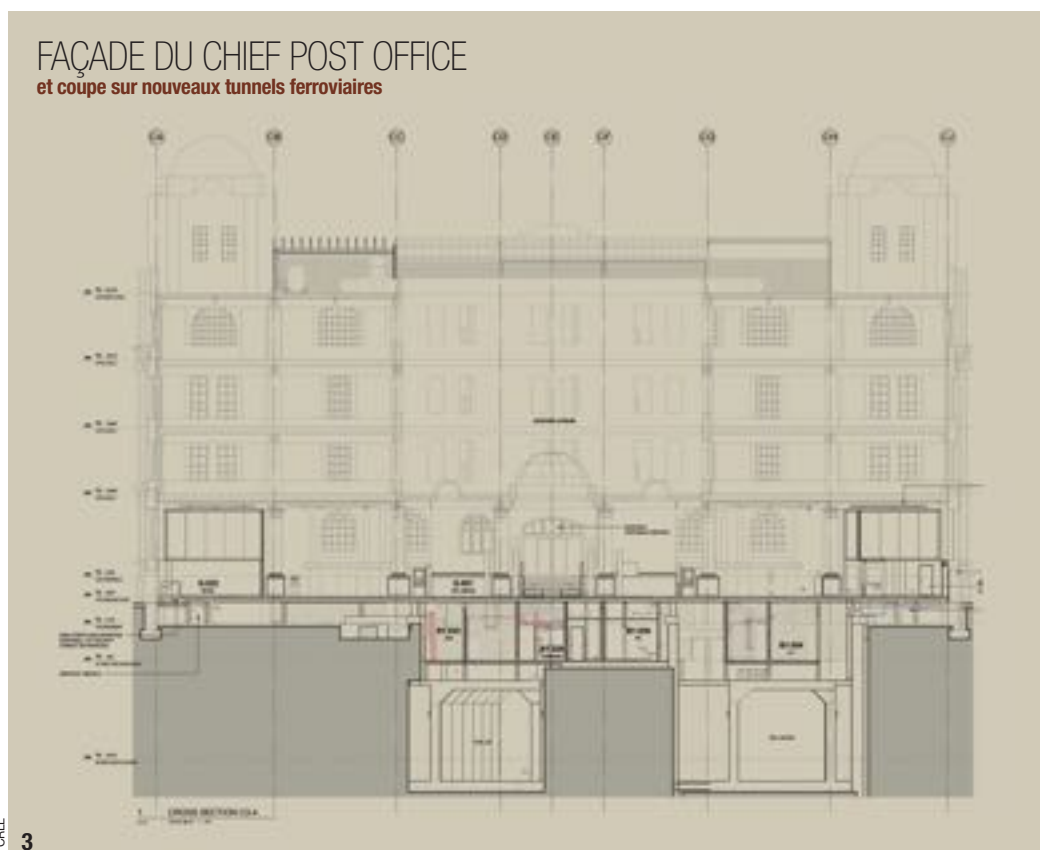
Ensuite toutes les structures du bâtiment en sous-sol et rez-de-chaussée ont été découpées et démontées pour ne garder que les colonnes métalliques supportant les planchers, ainsi que leurs fondations sur pieux (figure 4). Le CPO a été bâti sur des terrains gagnés sur la mer par remblai lors des agrandissements successifs du port. Les premiers mètres de terrain sont donc de très mauvaise qualité. Pour reconstituer une plateforme de travail pour les travaux de paroi moulée, un remblai léger en polystyrène a été réalisé dans les zones de sous-sols plus profonds pour limiter les efforts parasites sur les fondations existantes. Les murettes-guide ont été réalisées dans cette étape de préparation.

La paroi moulée est ensuite réalisée depuis le sous-sol, sous hauteur limitée de 7 m environ.

Viendra ensuite la réalisation de colonnes de jet-grouting permettant de compléter l'enceinte des tunnels, dans les zones inaccessibles ou autour des fondations existantes. La figure 5 montre le panneautage de la paroi et les colonnes de jet-grouting.

Puis on procédera à la reprise en sous-œuvre du bâtiment en s'appuyant sur les parois moulées via des poutres métalliques ou béton précontraint (figures 6 et 7 et description de la reprise en sous-œuvre).

Suivront le terrassement et le butonnage des parois moulées pour la réalisation du génie-civil des tunnels, le génie civil des tunnels et leur remblai. Et enfin ce sera la reconstruction des sous-sols du bâtiment, ainsi que tout le second-œuvre nécessaire à la remise en service du CPO comme accès à la gare Britomart et siège administratif et commercial de Auckland Transport. ▽



© CRL
3

LES PAROIS MOULÉES SOUS LE CPO

Les contraintes sont multiples pour la réalisation de ces parois moulées :

- Limiter au maximum les vibrations en phase travaux, pour préserver l'intégrité du CPO dont la structure a été affaiblie, et minorer les nuisances aux riverains ;
- Travailler sous hauteur limitée à 7 m environ, alors que les panneaux comme les cages d'armatures atteignent 17 m ;
- Évoluer avec la foreuse entre les colonnes soutenant les planchers du bâtiment, dont l'espacement varie de 5 à 7 m ;
- Accéder au sous-sol par une seule rampe débouchant sur une ruelle où la circulation est intense aux heures de pointe.



© SOLENCHE BACHY

La solution retenue pour le forage est l'utilisation d'une Hydrofraise Compacte dernière génération HC05. La machine est équipée d'un power-pack « détachable », pouvant être positionné sur un crawler et relié par un

ombilical à la foreuse (figures 8 à 10). L'ancrage dans les couches compactes est rapide et ne génère pas de vibrations mesurables. Les déplacements de la machine et des conduites de boue et de béton lors des changements de

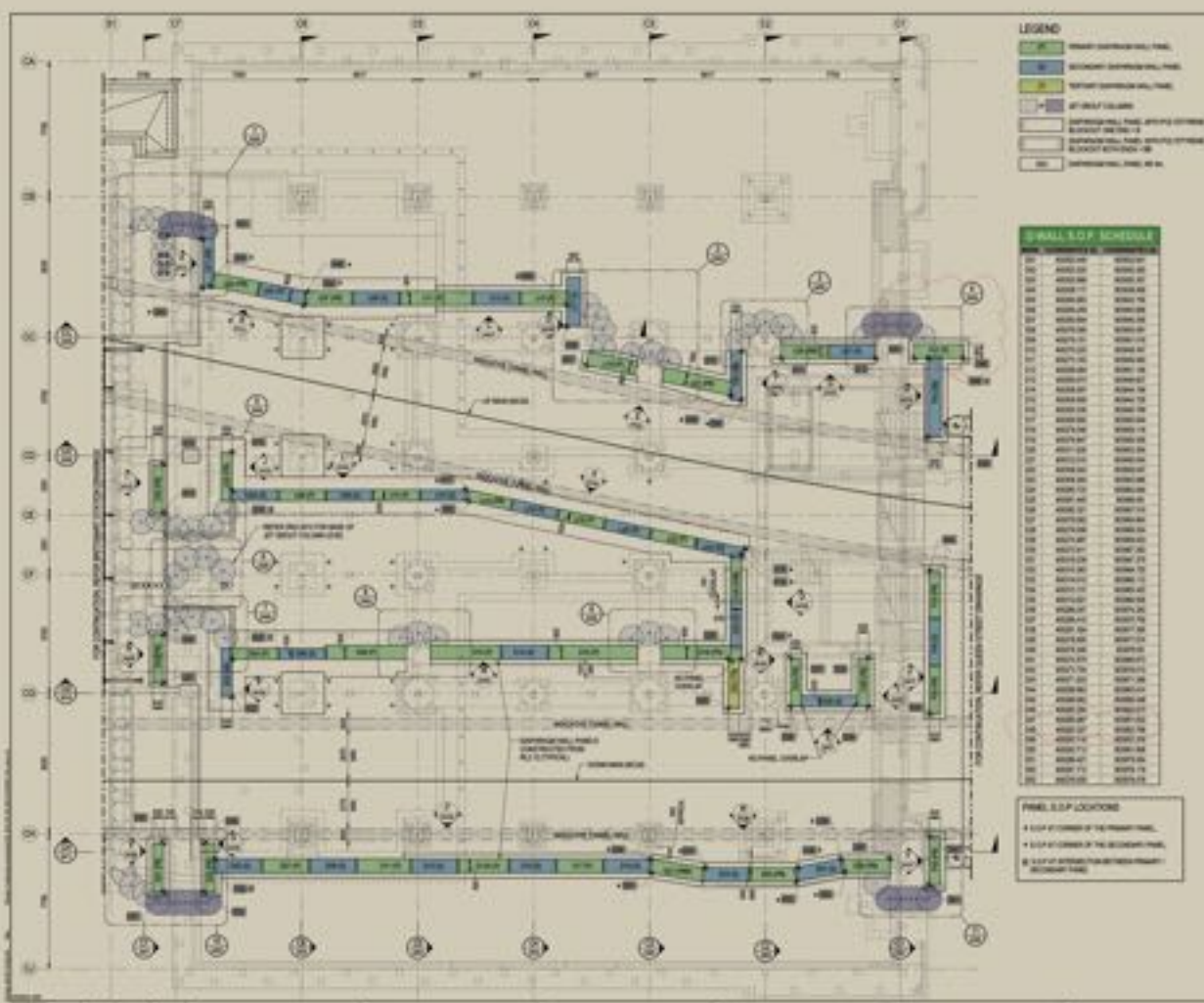
4- Plateforme en sous-sol après dépose du plancher béton et protection des colonnes métalliques.

5- Panneautage de la paroi moulée et colonnes de jet-grouting sous le Chief Post Office.

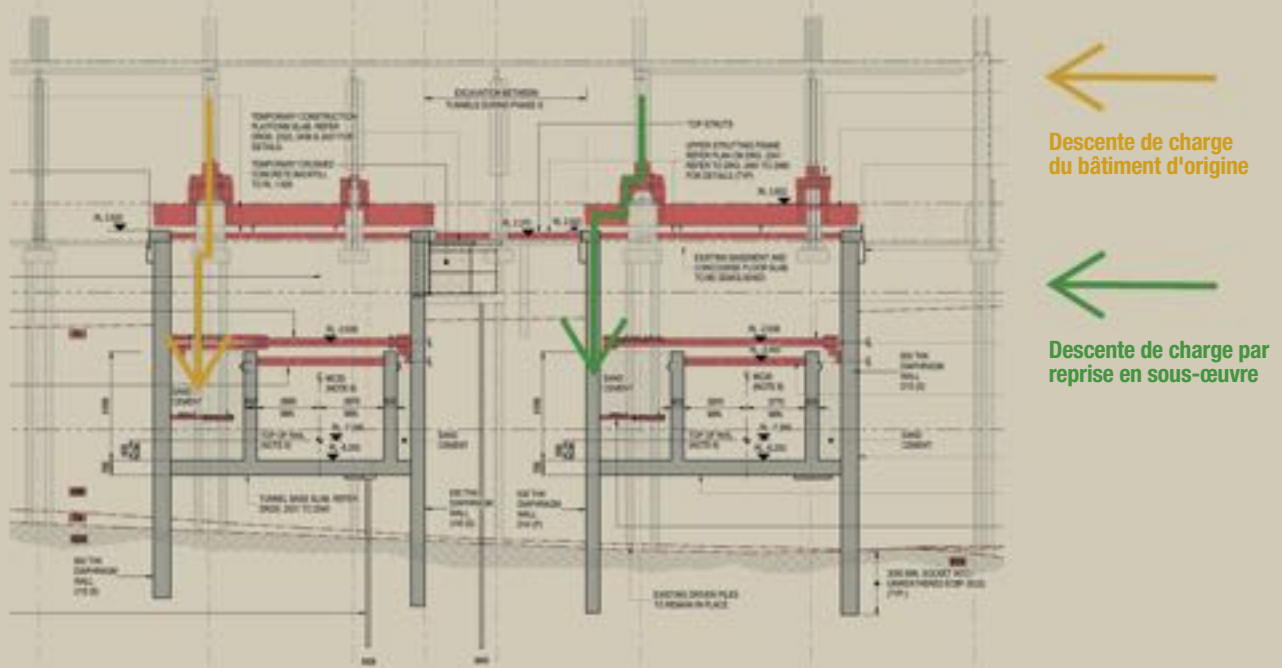
4- Subsoil platform after removing the concrete floor and protecting the steel columns.

5- Diaphragm wall panelling and jet grouting columns under the Chief Post Office.

PANNEAUTAGE DE LA PAROI MOULÉE ET COLONNES DE JET-GROUTING SOUS LE CHIEF POST OFFICE

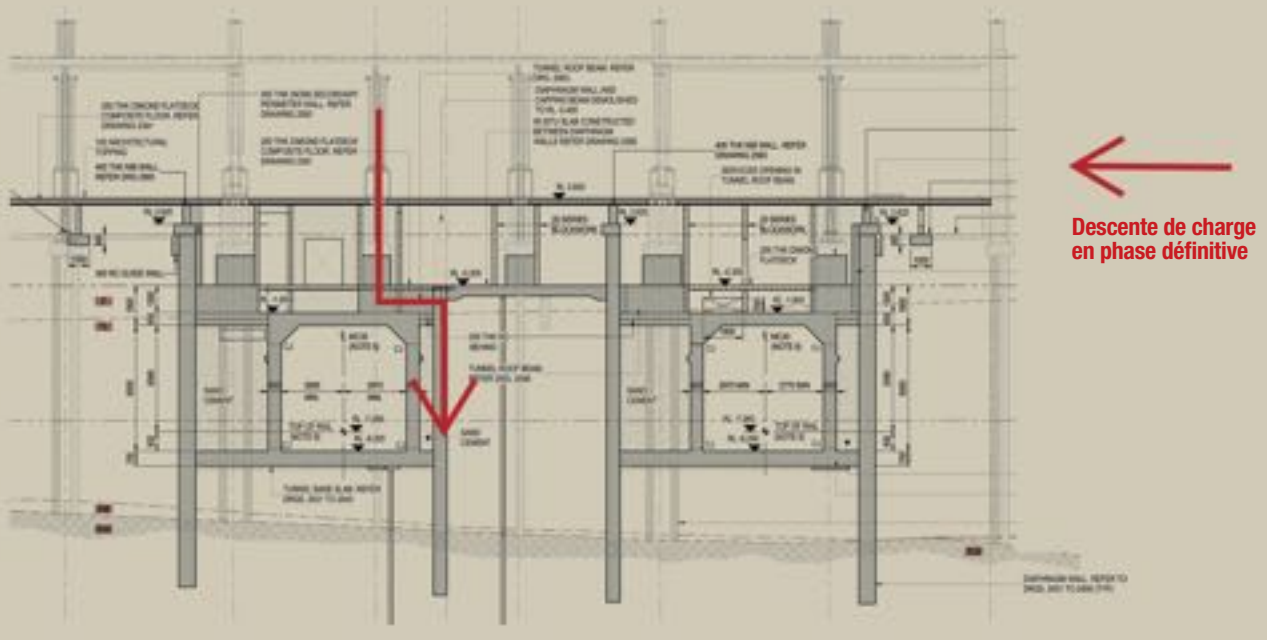


COUPES SUR FONDATIONS ET TUNNELS - PHASES INITIALE ET PENDANT LE VÉRINAGE



© CRL 6

COUPES SUR FONDATIONS ET TUNNELS - PHASE DÉFINITIVE



© CRL 7

panneaux sont en fait le poste le plus chronophage de la séquence de travail ! La mise en place des cages d'armatures est réalisée par une grue télescopique sur chenilles, de dimension adaptée au site.

Finalement, la principale difficulté a été la fabrication des cages d'armatures. En effet, les aciers de diamètre 50 mm exigés par le design ont nécessité la mise en service d'une nouvelle filière dans l'usine Pacific Steel. De plus, les normes néo-zélandaises pour les armatures de béton définissent une qualité d'acier qui s'est avérée incompatible avec les coupleurs de type Ancon pré-conçus par le designer, en particulier

6- Coupes sur fondations et tunnels - phases initiale et pendant le vérinage.
7- Coupes sur fondations et tunnels - phase définitive.

6- Cross sections of foundations and tunnels - initial phase and jacking phase.

7- Cross sections of foundations and tunnels - final phase.

dans les gros diamètres. Ce sont finalement des manchons de type Preschon (Iron Man BMS coupler) qui sont utilisés, nécessitant l'importation en urgence d'une machine depuis Singapour.

LA REPRISE EN SOUS-ŒUVRE DU CPO DÉFIS ASSOCIÉS À LA REPRISE EN SOUS-ŒUVRE

Le bâtiment CPO est actuellement supporté par un réseau de murs et de colonnes qui reposent sur des pieux. Ces pieux étant dans l'emprise des tunnels à réaliser, le poids du bâtiment doit être reporté vers les parois moulées fraîchement réalisées avant d'entre-

prendre les excavations. La descente de charge sera modifiée une seconde fois à la fin des travaux afin de pouvoir libérer les structures provisoires et rendre au bâtiment son architecture d'origine. L'évolution du cheminement des descentes de charge au cours des travaux est représentée dans les figures 6 et 7. Il faut souligner l'importance historique de ce bâtiment pour le pays. Cela explique l'intérêt du public pour le projet et l'attention portée par les entreprises au maintien du bâtiment intact. La façade et son hall d'entrée sont le cœur culturel du bâtiment avec, notamment, une mosaïque de grande valeur historique.



8

© SOLETANCHE BACHY

Cet ensemble massif est porté par un réseau de murs fondés sur pieux. Le reste du bâtiment est soutenu par des colonnes également fondées sur pieux. Afin de reprendre en charge le bâtiment en limitant au strict minimum ses mouvements et ainsi préserver ses éléments les plus fragiles, la reprise en sous-œuvre sera adaptée à chacun de ces deux cas.

SOLUTIONS TECHNIQUES

Les structures portantes du bâtiment (murs et colonnes) vont être supportées par des poutres béton ou acier qui enjambent les futures excavations et reposent sur les parois moulées. Les murs soutenant le hall d'entrée et sa mosaïque sont « cloués » par précontrainte à de nouvelles poutres en béton qui les ensèrent. Ces poutres sont elles-mêmes précontraintes pour limiter leur gabarit et les faire tenir dans l'espace restreint sous le bâtiment. La rigidité de ces poutres de précontrainte permet de limiter les mouvements de cette partie sensible du bâtiment. Dans le reste du bâtiment, des colliers métalliques sont serrés par précontrainte sur les colonnes. Ces colliers reposent à leur tour sur des poutres métalliques. 350 t d'acier structural seront installées pour cette solution plus flexible mais également plus légère et donc plus rapide à installer. Une fois ces « ponts » mis en place, ils sont mis en charge par vérinage, ce qui

a pour conséquence de décharger les fondations existantes. Pour cette opération, on fait appel aux vérins plats inventés par l'ingénieur français Freyssinet dans les années 1930. Le vérin plat a la forme d'une galette métallique de quelques dizaines de millimètres de hauteur que l'on gonfle en introduisant un liquide sous pression. Cette technique est particulièrement bien adaptée aux travaux de reprise en sous-œuvre. Du fait de leur faible hauteur, ils sont plus faciles à insérer

8- Hydrofraise HC05 évoluant entre les colonnes.

9- Power pack de l'hydrofraise HC05 sur crawler indépendant.

8- HC05 hydro-fraise moving between columns.
9- Power pack of the HC05 hydro-fraise on independent crawler.

dans les bâtiments existants. D'autre part, et contrairement à d'autres types de vérins, ils ne sont pas sujets au coincement. Enfin, et c'est leur avantage principal, ils permettent le transfert d'efforts colossaux avec une maîtrise des mouvements au millimètre près et pour un coût limité. Pour cette application, 108 vérins plats seront installés pour un effort total de vérinage de 9000 t. À lui seul, le plus gros vérin plat utilisé dans ce projet pourrait lever une charge de 600 t (voir configuration en figure 11).



9

© SOLETANCHE BACHY



© SOLETANCHE BACHY

10

Pour assurer la sécurité du bâtiment pendant les deux ans que dureront les travaux, les vérins plats sont calés de part et d'autre. Toutefois, il est difficile de caler un bâtiment dont les mouvements sont de l'ordre de quelques millimètres seulement. Des cales ajustables venant se mettre au contact par serrage ont été conçues spécifiquement pour le projet.

Les vérins plats seront laissés en place afin de pallier immédiatement tout mouvement du bâtiment détecté par le système de surveillance de l'ouvrage.

10- Hydrofraise HC05 en cours de forage sous le Chief Post Office.
11- Positionnement des vérins plats.

10- HC05 hydro-fraise during drilling under the Chief Post Office.

11- Positioning of flat jacks.

LE SUIVI CONTINU DES TASSEMENTS ET DÉPLACEMENTS LE PROBLÈME DU MANQUE DE RÉFÉRENCES

Le suivi continu des déformations du CPO et des bâtis environnants est primordial, tant dans les phases de démolition que de réalisation des fondations, que, et surtout, dans la phase de vérinage du bâtiment.

Une difficulté majeure est l'absence de référence fixe à l'intérieur du bâtiment.

Le procédé Cyclops est mis en œuvre par Sixense pour assurer ce suivi : basée sur la mise en œuvre de Stations Totales, cette technologie a fait ses preuves mais se heurte à deux difficultés :

- 1- La configuration du CPO rend impossible pour les stations Cyclops une visée vers des cibles de référence fixe ;
- 2- Tout le bâtiment est susceptible de mouvements alors qu'il est lui-même au centre de la zone d'influence des travaux.

Sans référence fixe, un suivi en temps réel des déplacements et déformations n'est pas possible en utilisant le mode opératoire traditionnel des Stations Totales.

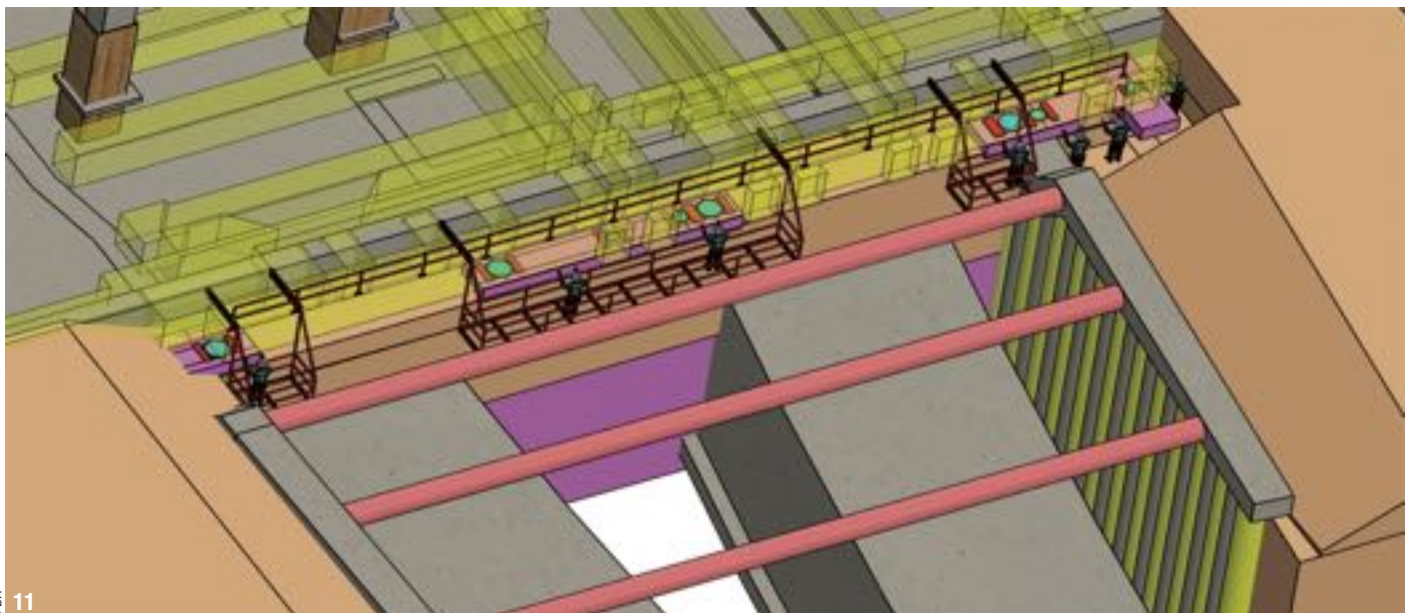
LA TECHNOLOGIE EVOLUTION™

Pour résoudre cette difficulté, la solution mise en œuvre consiste à relier virtuellement les stations Cyclops via un algorithme mathématique complexe, leur permettant ainsi de partager les mêmes prismes de référence.

Ce procédé, breveté par Soldata sous le nom Evolution™, est illustré en figure 12.

Les composants de cette technologie de partage des données de référence sont :

- Un jeu de prismes de référence couvrant une large ouverture d'angle garantissant une référence robuste ;
- De multiples Stations Totales Cyclops partageant au moins 2 prismes - avec un angle d'ouverture de 30° minimum - avec ses stations voisines.



© DR

11

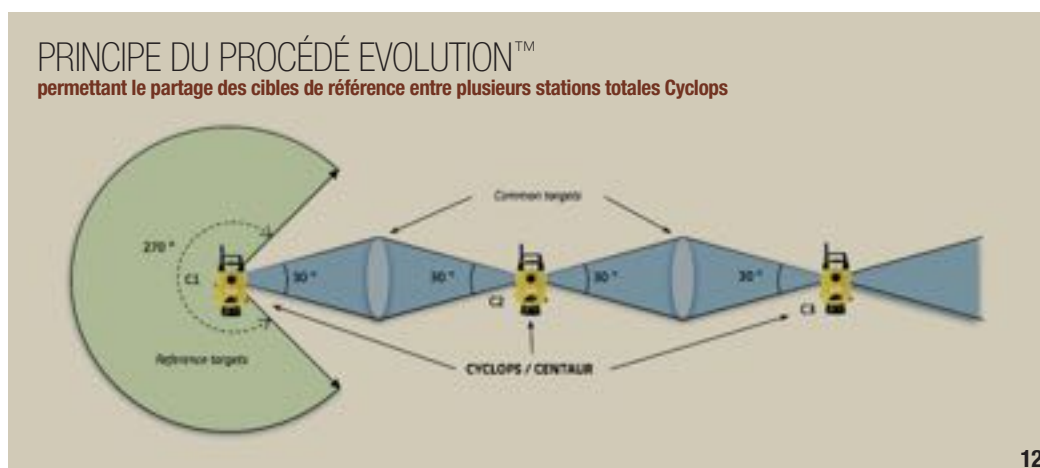
Le principe de fonctionnement est le suivant : une fois tous les cycles de mesure réalisés, les données sont traitées globalement selon la méthode des moindres carrés.

Par itérations successives, les différentes solutions mathématiques sont identifiées jusqu'à atteindre la solution conforme aux critères de convergence prédéterminés et ainsi identifier et quantifier les prismes qui sont restés fixes et ceux présentant des mouvements.

Il est important de noter que les Stations Totales Cyclops sont elles-mêmes considérées comme des cibles dans le traitement global des données. C'est une caractéristique primordiale du procédé, qui permet d'installer des Stations Totales dans la zone d'influence, ou en d'autres mots, sur des supports potentiellement instables ou mouvants.

APPLICATION AU BÂTIMENT DU CPO ET SES ALENTOURS

Sept stations Cyclops ont été installées pour suivre et enregistrer les mouvements du CPO et des bâtis et infrastructures environnants : quatre à l'extérieur du bâtiment, et trois à l'intérieur. L'installation forme un réseau complexe de mesures :



12

- Prismes de référence (en jaune) ;
- Prismes de mesure (en rouge) pour les bâtiments et les colonnes du CPO ;
- Références de tassement (en bleu).

Les stations Cyclops sont organisées en 2 groupes indépendants : si une station était supprimée ou était défaillante, l'ensemble des mesures de son groupe serait inexploitable, puisque l'algorithme d'analyse est global. Même si le risque s'avère très faible, il a été décidé de créer deux groupes indépendants, comme illustré dans la figure 13.

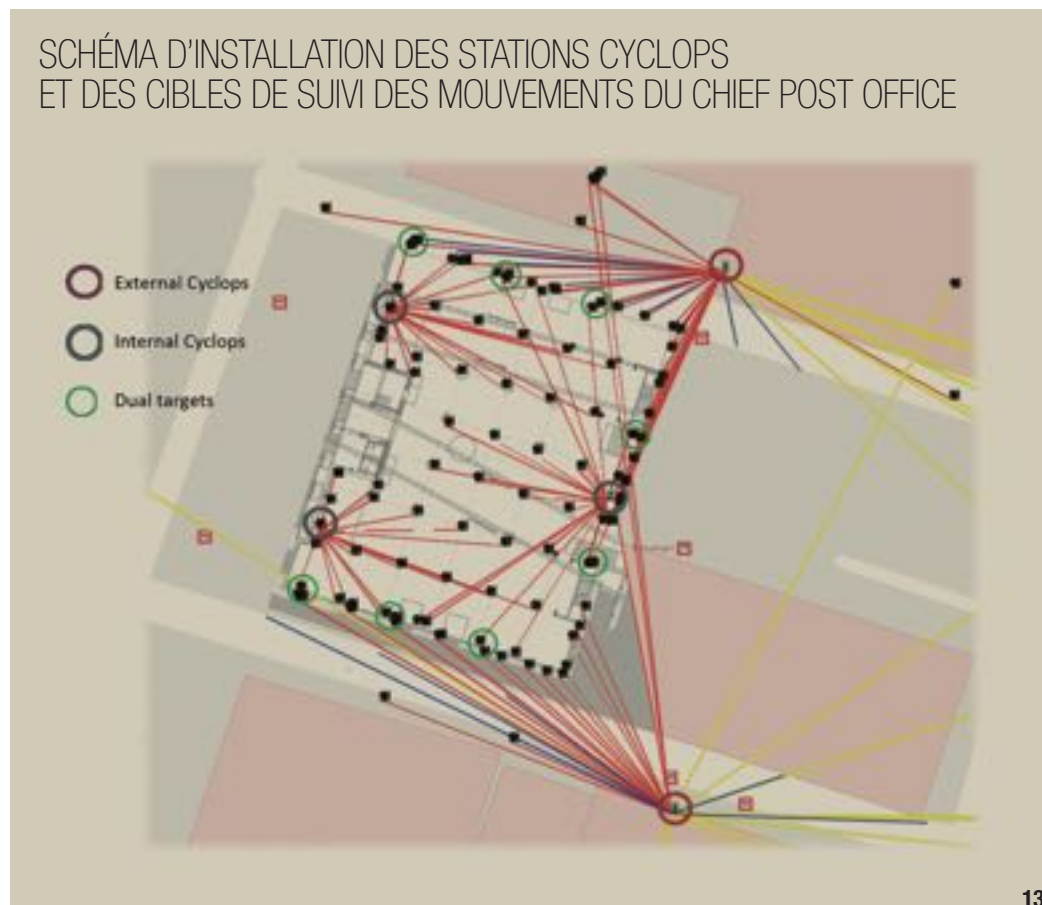
Une fois analysées, les coordonnées de tous les prismes sont transformées en déplacement en x, y et z par rapport à une référence correspondant à une date fixée. Les valeurs sont représentées graphiquement à l'aide du Système d'Information Géographique (SIG) accessible sur le web, baptisé Geoscope. Des alarmes sont générées automatiquement si les déplacements mesurés excèdent les seuils prédéterminés.

Des vérifications sont également systématiquement réalisées sur la stabi-

lité des cibles de référence et sur la variance résiduelle du processus global d'analyse. Générant également des alarmes le cas échéant.

Le résultat final de ce processus de mesure et d'analyse est la valeur des déplacements en x, y et z des colonnes du bâtiment. Une représentation par Geoscope est illustrée dans la figure 14. Des lignes isométriques sont également tracées. Si elles n'ont pas de signification physique, elles permettent au premier coup d'œil d'appréhender les déplacements sans avoir

SCHÉMA D'INSTALLATION DES STATIONS CYCLOPS ET DES CIBLES DE SUIVI DES MOUVEMENTS DU CHIEF POST OFFICE



13

12- Principe du procédé Evolution™ permettant le partage des cibles de référence entre plusieurs stations totales Cyclops.

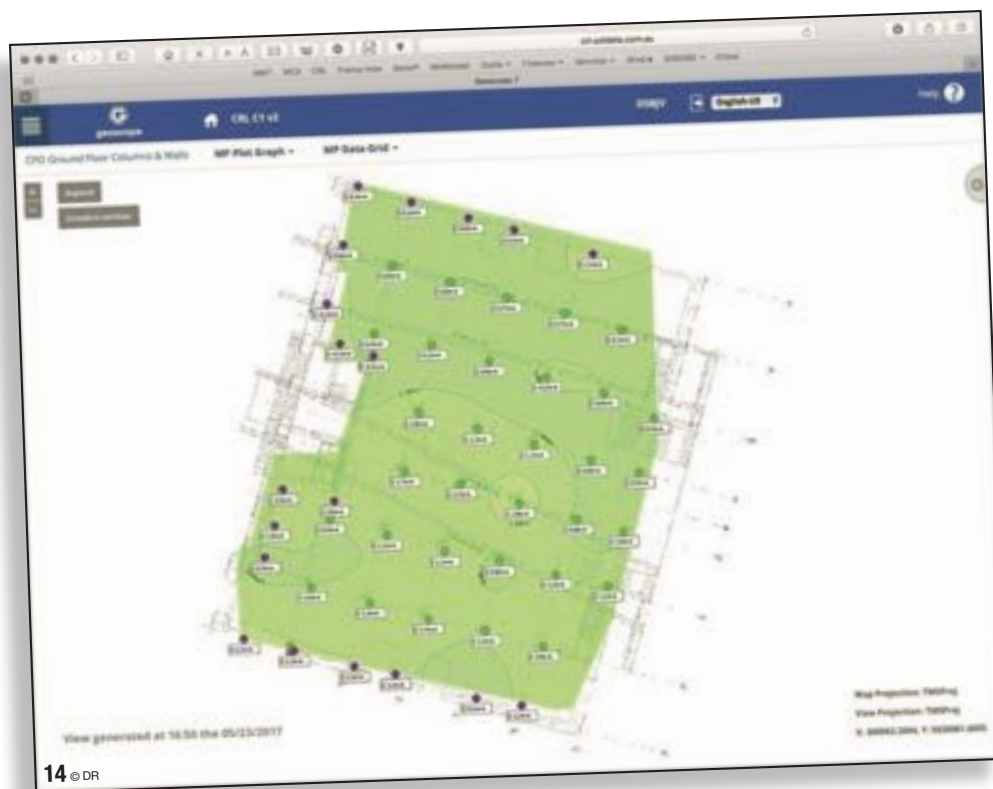
13- Schéma d'installation des stations Cyclops et des cibles de suivi des mouvements du Chief Post Office.

12- Schematic of the Evolution™ process allowing the sharing of reference targets between several Cyclops total stations.

13- Layout diagram of Cyclops stations and targets for monitoring movements of the Chief Post Office.

14- Présentation finale des déplacements des colonnes du bâtiment avec lignes isométriques.

14- Final presentation of building-column displacements with isometric lines.



à lire toutes les valeurs de mesure. Les Stations Cyclops sont paramétrées pour effectuer un cycle de mesure toutes les 20 minutes, et le traitement global des données est effectué toutes les heures.

LE PROGRAMME DE CRL C1 ET LES PROCHAINES ÉTAPES DE CRL

Le programme de CRL C1 est de terminer les fondations profondes en mars 2018, la reprise en sous-œuvre se déroulera de janvier à juin 2018. Puis

les travaux de terrassement et génie civil enterré jusqu'en novembre 2019. Suivra la réalisation des structures du CPO et du second-œuvre, ainsi que des aménagements extérieurs, pour

un fonctionnement dans la nouvelle configuration à partir de juillet 2020. Le lot principal, C3, comprenant le tunnel foré et les trois nouvelles stations sera lancé en 2018 en appel d'offres

dans une formule « conception-réalisation », en parallèle des commandes des autres lots. L'ensemble de CRL devrait être mis en service fin 2023 / 2024. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 8 000** m de découpe béton en épaisseur > 800 mm
- 64** panneaux de paroi moulée de 630 et 830 mm totalisant 2 220 m³
- 58** colonnes de jet-grouting diamètre 1,40 m
- 22 160** m³ d'excavation
- 350** t de poutres acier pour vérinage du bâtiment
- 8 385** m³ de béton prêt à l'emploi

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- SOCIÉTÉ DE PROJET :** City Rail Link Limited
- EXPLOITANTS :** Auckland Transport et Kiwiraill
- GROUPEMENT CONCEPTION-CONSEIL TECHNIQUE :** Aurecon, Mott Macdonald, Arup, Grimshaw & Jasmx
- GROUPEMENT CONSTRUCTION C1 :** Downer New Zealand Ltd & Soletanche Bachy International (NZ) Ltd
- SOUS-TRAITANTS VÉRINAGE ET SUIVI DÉFORMATIONS :** Freyssinet et Sixense

ABSTRACT

FIRST METRES OF THE FUTURE AUCKLAND METRO: FOUNDATIONS AND UNDERPINNING

FABRICE PEREZ, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL - DAMIEN DELBOS, FREYSSINET - JULIEN SANTOUL, SIXENSE - PHILIPPE BEGOU, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

Auckland is in the process of acquiring a metro for its business centre, adding to its rail network. Soletanche Bachy and other companies of the Soletanche Freyssinet Group are taking part in the first work section, comprising execution of the first metres of tunnelling beyond the current terminus. Executed by underpinning under an historic building, these works require specifically adapting existing technologies and equipment in response to the project's needs. Diaphragm walls between building columns, monitoring of strains and subsidence, jacking and prestressing: these are all opportunities to demonstrate French expertise in a country where French building and civil engineering firms still have only a small footprint. □

PRIMEROS METROS DEL FUTURO METRO DE AUCKLAND: CIMENTACIÓN Y RECALCE

FABRICE PEREZ, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL - DAMIEN DELBOS, FREYSSINET - JULIEN SANTOUL, SIXENSE - PHILIPPE BEGOU, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

Auckland está construyendo un metro para su centro de negocios, completando así su red ferroviaria. Soletanche Bachy y otras empresas del grupo Soletanche Freyssinet participan en el primer lote, que consiste en la realización de los primeros metros de túneles más allá de la actual estación terminal. Realizadas en recalce debajo de un edificio histórico, estas obras exigen una adaptación específica de las tecnologías y los materiales existentes para responder a las necesidades del proyecto. Pantallas de hormigón entre las columnas del edificio, seguimiento de las deformaciones y asentamientos, colocación de tubos con gato y pretensado son algunas de las técnicas que permitirán demostrar la competencia de Francia en un país donde la construcción y las obras públicas galas están todavía poco presentes. □



1

© PHOTOTHÈQUE ARTELIA

BARRAGE DE WADI UMTI AU SULTANAT D'OMAN

AUTEURS : PIERRE AGRESTI, DIRECTEUR DE COMPÉTENCE GÉNIE CIVIL, ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT -
MATHIEU GEOFFREY, DIRECTEUR DE PROJET, BARRAGES HYDROPOWER ET INFRASTRUCTURES, ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT -
PIERRE-YVES MOULLARD, DOCTEUR INGÉNIEUR GÉOLOGUE, INGÉNIEUR RÉSIDENT TRAVAUX, ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT, OMAN

LE BARRAGE D'UMTI A POUR VOCATION LA RECHARGE DES NAPPES PHRÉATIQUES. IL STOCKE LES CRUES INTENSES ET BRÈVES QUI SURVIENNENT DANS LE MASSIF DU JEBEL AKDAR, EN VUE DE RÉALIMENTER LE SYSTÈME TRADITIONNEL D'IRRIGATION DE LA PALMERAIE D'IZKI. CE BARRAGE DE 23 m DE HAUTEUR SUR FONDATION ET 150 m DE LONG A ÉTÉ CONSTRUIT EN REMBLAI DUR FAIBLEMENT DOSÉ EN CIMENT.

BARRAGE DE RECHARGE DES NAPPES

De par son climat chaud et aride et sa géographie montagneuse s'étirant le long de l'Océan Indien, le Sultanat d'Oman est un pays désertique soumis à un climat extrême généralement sec et chaud. Les précipitations sont épisodiques, courtes et intenses. Elles ruissellent et engendrent des crues rapides appelées *flash flood*. Les écoulements ne durent que quel-

ques heures après les épisodes de pluie et les lits des rivières (wadi) sont généralement secs.

Plus rarement, cette région subit aussi l'assaut des cyclones qui se forment sur l'Océan Indien et qui, en rencontrant les chaînes montagneuses côtières, génèrent des crues exceptionnelles en débit et en volume. Malgré le développement récent d'usines de dessalement approvisionnant les principaux centres urbains et industriels, la préservation

1- Le barrage est implanté au pied du massif du Jebel Akdar entre deux escarpements rocheux.

1- The dam is located at the base of the Jebel Akdar mountains between two rocky escarpments.

des ressources en eau de surface et souterraine est d'une importance capitale pour le pays.

Dans cet objectif, l'état omanais développe depuis plus de 20 ans la construction de barrages de recharge de nappe dont le but premier est d'améliorer l'infiltration des eaux de surface dans les nappes phréatiques et, dans une moindre mesure, d'atténuer les effets négatifs des crues fréquentes : inondations et érosion des sols.



© PHOTOTHÈQUE ARTELIA

2



Les barrages de recharge permettent de retenir les eaux des crues les plus fréquentes dans des réservoirs de petite à moyenne capacité et de recharger les nappes par deux mécanismes :

1- La recharge directe dans le réservoir d'une part (l'efficacité de cette recharge a tendance à diminuer dans le temps avec le colmatage de la retenue par les matériaux fins apportés par les crues) ;

2- Localisation du projet.
3- La palmeraie d'Izki située en aval du barrage.

2- Project location.
3- The Izki palm grove located downstream of the dam.

2- L'infiltration en aval du barrage dans les lits actifs du wadi par le relâchement contrôlé d'eau claire durant plusieurs jours, après les épisodes de crue.

En effet, le stockage de surface inter-saisonnier ne constitue généralement pas une solution pérenne dans cette région où la température dépasse 45°C durant l'été et l'évaporation annuelle dépasse les 3 m par an.

LE BARRAGE EN REMBLAI DUR DE WADI UMTI

Le barrage de recharge du wadi Umti est un ouvrage de 23 m de haut et de 145 m de long situé au pied du massif montagneux du Jebel Akdar, à moins de 2 km en amont de la palmeraie d'Izki (120 km au SE de la capitale Mascate), (figures 1, 2 et 3).

Bien que le barrage soit de dimensions modestes, son site présente des conditions de réalisation difficiles :

- Vallée étroite et encaissée entre une falaise et un versant abrupt ;
- Crues de projet de forte intensité et de courte durée, à maîtriser durant la période de construction ;
- Fondation hétérogène, consistant en alluvions grossières, couches cimentées et substratum calcaire fortement tectonisé ;
- Proximité à l'aval d'un système de captage traditionnel ancestral (dénommé falaj) alimentant la palmeraie d'Izki (figure 4).

Avec un réservoir d'une capacité utile de 600 000 m³, le barrage d'Umti est conçu pour stocker le volume de la crue de période de retour annuelle ou biannuelle.

Le bassin versant, d'une superficie de 52 km² seulement, est constitué d'une zone montagneuse très aride combinant des versants rocheux à fortes pentes et des précipitations potentiellement intenses.



© PHOTOTHÈQUE ARTELIA

3

La crue de période de retour 1 000 ans génère un débit de pointe de 2 700 m³/s, proche des maximaux extrêmes observés dans le monde sur un bassin de cette taille.

De plus, le choix de la crue de projet doit être réalisé avec prudence, en considérant l'incertitude qui règne sur les résultats des études hydrologiques basées sur un nombre réduit d'enregistrements de pluie et de débit.

La topographie étroite et raide du site et l'hydrologie conditionnent les choix de conception du projet : les crues du projet nécessitent d'utiliser toute la largeur disponible pour les faire transiter par-dessus l'ouvrage au moyen d'un seuil à surface libre, d'un coursier et d'un bassin de dissipation. Ces structures doivent être capables de résister à des débits spécifiques élevés (27 m³/s/m pour la crue de période de retour 1 000 ans).

Au droit du barrage, le substratum rocheux est constitué de calcaires dolomitiques broyés, localement karstifiés et comblés par des remplissages d'argiles plastiques.

Cette formation est recouverte par des alluvions grossières sur une épaisseur variable de 5 à 25 m, incluant des blocs plurimétriques mais aussi des couches discontinues plus ou moins cimentées.

Afin d'éviter tout impact négatif sur la nappe phréatique existante et sur le système de captage traditionnel situé en aval, le client a imposé qu'on ne réalise pas de travaux de traitement de la fondation dans les alluvions et le substratum karstifié sous-jacent.

CHOIX DE CONCEPTION

Sur des fondations alluvionnaires compactes, un barrage en béton conventionnel de faible hauteur est techniquement envisageable à la condition d'adopter une géométrie trapézoïdale qui permet de résister aux fortes surcharges hydrauliques de déversement et aux sous-pressions potentiellement élevées, tout en limitant les contraintes appliquées à la fondation.

Ce profil trapézoïdal implique la production d'un volume important de béton (près de 50 000 m³ tous types de bétons confondus). Les alluvions calcaires du wadi constituent une source d'agrégats abondante et de très bonne qualité pour la production de tous types de bétons et diverses solutions sont envisageables : béton conventionnel vibré, béton compacté au rouleau (BCR), béton cyclopéen ou remblai dur. Les études de conception du barrage



© PHOTOTHÈQUE ARTELIA

d'Umti ont conduit à choisir la solution du remblai dur qui permet d'optimiser le coût de l'ouvrage.

APPEL D'OFFRES ET VARIANTE D'ENTREPRISE

L'équipe Barrages d'Artelia E&E (anciennement Sogreah) en collaboration avec sa filiale locale a réalisé toutes les études, de la première identification du site (1998) jusqu'à la supervision des travaux (2013-2014).

En cohérence avec les expériences acquises sur les barrages en BCR faiblement dosé et remblai dur, les études de conception prévoyaient un coffrage

4- Un falaj : système de captage et d'irrigation traditionnel.

5- Coupe type schématique de la section déversante.

4- A falaj: traditional catchment and irrigation system.

5- Typical schematic cross section of the discharge section.

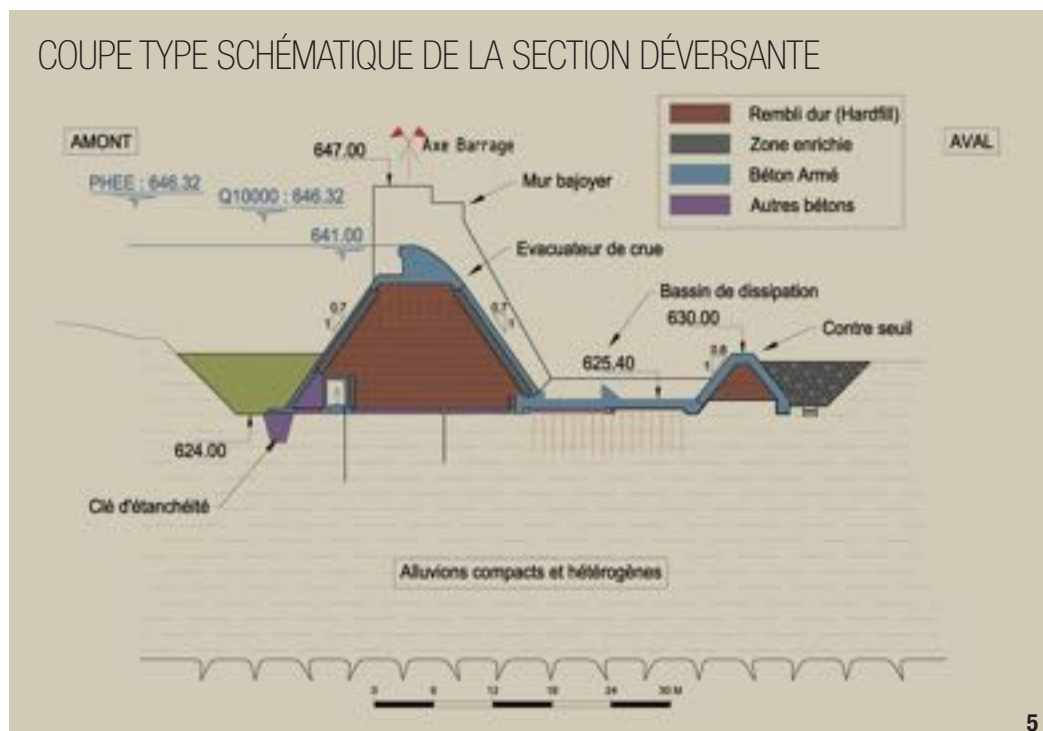
du remblai dur par des blocs préfabriqués en béton conventionnel vibré non armé.

Les plans d'appel d'offres montraient un principe de bloc préfabriqué mais les spécifications étaient ouvertes et permettaient tout type de coffrage : blocs préfabriqués, plaque vibrante, méthode excédentaire ou autres.

Les soumissionnaires étaient donc invités à proposer leurs solutions alternatives en prouvant qu'elles garantissaient les exigences finales du projet : stabilité, imperméabilité et pérennité des faces amont et aval dans toutes les conditions usuelles et extrêmes définies au cahier des charges.

Le marché de construction a été attribué sur appel d'offres local ouvert à l'entreprise Premier International Project (Pip), un entrepreneur local ayant une bonne expérience en infrastructure de transport mais seulement un barrage en remblai de petite taille à son actif. Assisté par le bureau sud-africain spécialisé Arq Consultant, Pip a proposé une solution compétitive et innovante de coffrage du remblai dur basée sur un enrichissement au coulis et vibration. Cette méthode inédite pour un remblai dur est inspirée de la méthode utilisée pour les BCR classiques de type GE-RCC (Grout Enriched Rolled Compacted Concrete).

Durant la période de mobilisation, Pip, Arq et Artelia ont travaillé de concert pour mettre au point et valider cette méthode et diverses autres adaptations



© PHOTOTHÈQUE ARTELIA



6

© PHOTOTHÈQUE ARTELIA

6- Bassin de dissipation avec la réalisation des éléments en béton armé sur le parement aval.

6- Stilling basin with execution of reinforced concrete elements on the downstream face.

de la conception visant à simplifier la construction sans altérer le niveau de qualité finale exigé par le client.

En effet, les autorités omanaises considèrent que les barrages de recharge, bien qu'ils constituent des retenues temporaires, doivent répondre au même niveau d'exigence que les barrages permanents avec un faible niveau de surveillance et de maintenance ultérieur. La conception adoptée in fine met en œuvre du remblai dur avec zones enrichies au coulis pour le coffrage du corps du barrage et toutes les faces exposées (face aval de sections non déversantes, murs latéraux, mur de soutènement de la route d'accès).

BARRAGE EN REMBLAI DUR

Le remblai dur est un béton compacté au rouleau (BCR) de conception rustique. Il est composé de granulats, de ciment faiblement dosé ($< 100 \text{ kg/m}^3$) et d'eau. Produit en centrale à béton classique, il est mis en œuvre comme un remblai avec des moyens de terrassement courants (camions bennes, bouteurs, compacteurs...).

Initié par l'ingénierie française dans les années 90 et résultant du projet national de R&D BaCaRa, le concept de barrage à face symétrique en remblai dur (Faced Symmetrical Hardfill Dam : SFHD) a été adopté à ce jour pour la construction de près d'une centaine de barrages dans le monde. Il repose sur une géométrie trapézoïdale symétrique conférant :

- Une grande stabilité mécanique, notamment sous sollicitations sismiques et hydrauliques élevées ;
- Une séparation des fonctions de sécurité : l'étanchéité est assurée par des faces en béton armé et la stabilité par l'ouvrage de masse réalisé en remblai dur. Un dispositif de drainage raccordé à une galerie interne permet de collecter et contrôler les fuites éventuelles du masque étanche et d'évacuer les écoulements internes vers l'aval.

Du point de vu constructif, les avantages déterminants du remblai dur sur les solutions en BCR ou béton conventionnel sont :

- Spécifications et méthodes de mise en œuvre simplifiées, permettant l'ouverture de l'appel d'offres aux entreprises locales ;
- Suppression des contraintes sur la continuité de la production et le contrôle de la température de mise en place et de prise ;
- Ouvrages de dérivation provisoire réduits au minimum : le déversement des crues de chantier est autorisée sur les ouvrages en cours de construction, sans mettre en péril l'ouvrage ni impact significatif sur le programme de construction.

Cette solution inédite utilise des équipements standards de coffrage manutentionnables : elle est plus rapide et plus économique que la solution classique avec blocs préfabriqués.

En outre, l'enrichissement au coulis du remblai dur crée une zone aux caractéristiques mécaniques élevées dans laquelle sont placées des barres d'ancrages en attente pour l'accrochage des structures en béton armé vibré portées : masques des faces amont, coursier de face aval du barrage, seuil déversant (figure 9).

L'entreprise et son consultant avaient initialement proposé de réaliser l'étanchéité des faces par enrichissement du remblai dur. Mais cette variante n'a finalement pas été retenue car elle n'offrait pas les garanties suffisantes d'étanchéité et de durabilité demandées.

En outre, durant la période de démarrage des travaux, la route d'accès à la zone amont a été requalifiée en route d'intérêt touristique régional nécessitant un élargissement à 12 m de la chaussée au droit du barrage.

Le schéma de principe en figure 5 illustre la coupe type du barrage approuvée pour construction. ▷



7



8



9

7- Mise en place et compactage du remblai dur dans le corps de l'ouvrage.

8- État de surface d'un joint inter-couche de remblai dur.

9- Enrichissement des zones de parement du remblai dur.

7- Placing and compacting hardfill in the body of the structure.

8- Surface condition of an inter-layer joint in hardfill.

9- Enrichment of hardfill cladding areas.

COMPOSITION ET ÉLABORATION DU REMBLAI DUR

Les spécifications du matériau remblai dur définies au marché avaient volontairement été simplifiées autant que possible afin de permettre une optimisation du dosage en ciment et de la production des agrégats. Le marché de travaux prévoyait la mise en place d'une procédure de mise au point et de validation comprenant une première série d'essais en laboratoire dès la notification du marché, suivie par des remblais d'essais réalisés sur site, dès installation de la centrale à béton.

Le contrat fixait également des limites pour le dosage en liant : 60 à 80 kg/m³, avec possibilité d'inclure jusqu'à

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU BARRAGE

Type du barrage	Barrage symétrique en remblai dur
Volume du réservoir	650 000 m ³
Hauteur : sur fondation / sur TN	23 m / 17,50 m
Fruit des parements amont et aval	0,7h / 1v
Longueur : Totale / Déversoir	150 m / 100 m
Crues de projet : - Crue de chantier : - Crue de dimensionnement :	Q ₂ = 150 m ³ /s Q ₁₀₀₀ = 2 700 m ³ /s
Matériaux de construction	Remblai dur : - 38 000 m ³ (barrage) - 10 000 m ³ (murs de soutènement) Béton conventionnel vibré : 11 600 m ³

20 kg/m³ de cendres volantes ou de filler calcaire.

Les caractéristiques mécaniques des spécifications ont été ajustées à l'issue des premiers tests en laboratoire :

→ Résistance à la compression simple ≥ 4 MPa (à 90 jours) ;

→ Densité moyenne ≥ 22,5 kN/m³ ;

→ Densité minimale = 22 kN/m³.

Les agrégats extraits dans la cuvette du réservoir du wadi Umthi sont constitués principalement de dolomie très dure ayant une granulométrie continue et bien graduée. Écrêtés à 65 mm et compactés à l'optimum Proctor, les alluvions naturelles présentent un faible indice des vides et une densité sèche élevée de 22,6 kN/m³.



10

© PHOTOTHÈQUE ARTELIA

Les essais de labo puis les premiers remblais d'essais réalisés sur site ont confirmé leur aptitude à produire un remblai dur de grande qualité avec de très faible dosage en ciment.

Une composition comprenant seulement 60 kg/m³ de ciment ordinaire portland permet d'obtenir les résistances spécifiées, sans aucun ajout d'autre liant tel que cendres volantes ou filler calcaire.

Cette composition place le barrage d'Umti parmi les remblais durs les plus sobres en ciment existant au monde. Le matériau obtenu présente une bonne ouvrabilité, une densité sèche élevée pour ce type de matériau (23,5 kN/m³) et une résistance à la compression qui passe de 2,2 MPa à 7 jours à 4,8 MPa à 90 jours. Ce raidissement progressif assure l'adaptation du remblai dur aux déformations de la fondation imposées par le poids propre de l'ouvrage.

Le faible dosage en liant limite le dégagement de chaleur par hydratation du ciment et permet de maintenir en place du béton inférieure à 27°C, avec un recours limité aux moyens d'abaissement de la température usuellement nécessaire pour la réalisation de béton

10- Vue du barrage terminé avant première mise en eau.
11- Premier déversement en octobre 2015.

10- View of the completed dam before first filling.
11- First discharge in October 2015.

© PHOTOTHÈQUE PREMIER INTERNATIONAL PROJECT



11

de masse en région chaude et aride : refroidissement de l'eau de gâchage, adjonction de glace, voire système de réfrigération en place.

MISE EN PLACE ET RENDEMENT

La construction du barrage d'Umti nécessite la mise en place de 38 000 m³ de remblai dur dans le barrage et d'environ 10 000 m³ dans les murs de soutènements de la nouvelle route d'accès.

Après une préparation adéquate, l'entrepreneur a été capable de mettre en place un volume de 30 000 m³ en seulement 6 semaines, sur une période contractuelle de construction de 15 mois (dont 3 mois suivant la construction du barrage pour les travaux d'élargissement de la route d'accès amont).

La mise en place de la première couche de remblai dur dans le corps du barrage a été précédée par une période de 6 mois pour la réalisation des excavations, la préparation des fondations, la galerie de drainage, la plinthe amont et les dalles du bassin de dissipation aval.

Cette période a été également nécessaire pour la mise au point de la composition du remblai dur et des méthodes, la réalisation de plusieurs remblais d'essais et la formation du personnel avant la mise en place de la première couche matériau sur l'ouvrage.

Une fois le remblai dur terminé sous la rive droite et l'évacuateur de crue, le basculement de la route, la fermeture de la rive gauche, les structures en béton armé et les travaux de finitions ont nécessité 6 mois supplémentaires. ▷



12

© PHOTOTHÈQUE ARTELIA

CRUES DE CHANTIER

Le chantier a subi trois crues significatives dont l'une durant la période de mise en place du remblai dur ayant une période de retour estimée à 40 ans. Le dispositif de dérivation des crues était constitué d'une simple canalisation de 800 mm. Destiné à assurer un temps suffisant pour l'évacuation du personnel et des engins, il a été rapidement saturé et le chantier a été submergé, mais de manière contrôlée. Ces crues n'ont endommagé ni le remblai dur ni les structures permanentes du barrage. La mise en place du matériau a pu reprendre en moins de 24h, après un simple nettoyage de surface et sans aucun traitement spécifique du joint de reprise.

MISE EN EAU ET PERFORMANCES

Depuis l'achèvement des travaux fin 2014, le barrage d'Umti a intercepté plusieurs petites crues dont une avec un déversement significatif en octobre 2015 (figure 11).

Le barrage a déjà permis la réinfiltration de plus de 1 million de m³ sur la période 2015-2016.

RETOUR D'EXPÉRIENCE

Le projet de Wadi Umti confirme les nombreux intérêts du remblai dur pour la construction des barrages poids en béton. Ce matériau se distingue du

béton compacté au rouleau par les atouts suivants :

- Le traitement entre couches est limité à un simple nettoyage à l'air comprimé. Grâce au profil symétrique du barrage, il n'est pas nécessaire de garantir une forte cohésion entre les différentes couches.
- La simplicité de mise en place et l'absence de traitement des joints de reprise permettent d'avoir des vitesses de construction élevées et une grande flexibilité. Les méthodes

12- Inspection d'ouvrage après le premier déversement.

13- Tour de prise d'eau et seuil déversant.

12- Inspection of the structure after the first discharge.

13- Water intake tower and overflow spillway crest.

de construction peuvent être maîtrisées par une entreprise non spécialisée, sous réserve d'une assistance adéquate et d'une période de préparation et de mise au point suffisante.

- Le dégagement de chaleur par hydratation du ciment est très limité et ne nécessite pas de moyen particulier de contrôle de la température à la mise en œuvre. Cette propriété est un avantage majeur pour les ouvrages massifs en zone tropicale.



13

© PHOTOTHÈQUE ARTELIA



© PHOTO THÉQUE ARTELIA

14

→ L'enrichissement au coulis permet de créer des zones vibrées qui simplifient le coffrage et améliorent sensiblement la qualité des ancrages des structures en béton armé portées ; Cependant, ce traitement ne constitue pas une étanchéité suffisante pour un ouvrage permanent.

Au final, le coût de revient de ce matériau rustique est faible (de 3 à 5 fois moins cher que le béton vibré).

Enfin, le remblai dur permet d'envisager des solutions encore plus économiques qui nécessitent cependant un contexte contractuel adéquat et un niveau de suivi et de maintenance potentiellement élevé.

Le remblai dur, et plus largement les matériaux traités, sont des matériaux

14- Barrage terminée vue de la rive droite.

14- Completed dam seen from the right bank.

de construction encore appelés à se développer pour la construction des barrages. Ils font l'objet d'un Comité Technique de la Cigb (Commission Internationale des Grands Barrages) relayé et alimenté par un groupe de travail national du Cibr (Comité Français des Barrages et Réservoirs). □

INFOS CHANTIER

PLANNING DE CONSTRUCTION :

- Mobilisation entreprise : février 2013
- Début des travaux : avril 2013
- Mise en service barrage : juin 2014
- Durée totale : 18 mois (dont 15 mois pour le barrage)

MONTANT DES TRAVAUX : env. 10 M€

INTERVENANTS

CLIENT : Ministry of Regional Municipalities & Water Resources ; Sultanat d'Oman

MAÎTRE D'ŒUVRE: Artelia

ENTREPRISE : Premier International Project Llc, assisté par Arq Consultant

ABSTRACT

WADI UMTI DAM IN THE SULTANATE OF OMAN

PIERRE AGRESTI, ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT - MATHIEU GEOFFREY, ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT - PIERRE-YVES MOULLARD, ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT, OMAN

The Umti dam in the Sultanate of Oman is designed to refill the aquifers. It stores the intense and brief floods which occur in the Jebel Akdar mountains in order to resupply the traditional irrigation system of the Izki palm grove. This dam, 23 m high on its foundations and 150 m long, was built in hardfill, a compacted mixture of alluvia and cement with an exceptionally low cement factor (60 kg/cu.m). □

LA PRESA DE WADI UMTI EN EL SULTANATO DE OMÁN

PIERRE AGRESTI, ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT - MATHIEU GEOFFREY, ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT - PIERRE-YVES MOULLARD, ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT, OMAN

La presa de Umti en el Sultanato de Omán tiene por vocación recargar las capas freáticas. Almacena las crecidas intensas y breves que se producen en el macizo de Jebel Akdar para realimentar el sistema tradicional de riego del palmar de Izki. Esta presa de 23 m de altura sobre cimientos y 150 m de longitud ha sido construida en relleno duro (hardfill), una mezcla compacta de aluviones y cemento dosificado en una proporción excepcionalmente baja (60 kg/m³). □



1
© SOLETANCHE BACHY

DUBAI CREEK TOWER À DUBAÏ - 473 BARRETTES POUR FONDER L'UNE DES PLUS HAUTES TOURS DU MONDE

AUTEURS : ALEXANDRE ABINADER, DIRECTEUR MOYEN-ORIENT, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL - VINCENT LEBLOIS, DIRECTEUR DE PROJET, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

PIÈCE MAÎTRESSE DU FUTUR QUARTIER DE DUBAI CREEK HARBOUR À DUBAÏ, DUBAI CREEK TOWER POURRAIT BIEN DEVENIR LA PLUS HAUTE TOUR DU MONDE. EXTRÊMEMENT ÉLANCÉ, SOUTENU PAR DES HAUBANS QUI LE MAINTIENNENT EN PLACE, CE MÂT D'OBSERVATION GIGANTESQUE EST UNIQUE EN SON GENRE. GRÂCE À UNE ORGANISATION MILLIMÉTRÉE ET CHRONOMÉTRÉE, SES FONDATIONS, CONSTITUÉES DE 473 BARRETTES À LA (DÉ)MESURE DE L'OUVRAGE, ONT ÉTÉ RÉALISÉES EN SEULEMENT 12 MOIS.

CONTEXTE DU PROJET

Culminant à 828 m, Burj Khalifa à Dubaï est actuellement la plus haute tour du monde. Mais la course vers le ciel n'est pas terminée et ce record devrait être prochainement battu.

À cette date, deux tours au moins l'auront dépassée.

La tour de Jeddah, en Arabie Saoudite, annoncée comme atteignant le kilomètre et une autre tour, située à Dubaï. Baptisée Dubai Creek Tower in Dubai Creek Harbour, sa hauteur finale n'est pas encore connue. Elle se situera au fond de la crique de Dubaï, dans une partie de la cité non encore urbanisée

(figure 2) appelée à être un quartier résidentiel émergent.

Bâti par la société Emaar Properties, qui a développé la plus grande partie du centre ville de Dubaï (dont Burj Khalifa), le futur quartier devrait comprendre des dizaines de tours de logements haut de gamme ainsi qu'un secteur de commerce destiné à devenir le plus grand du monde.

UN EXTRAORDINAIRE ÉLANCEMENT

Conçue par l'architecte-ingénieur espagnol Santiago Calatrava, Dubai Creek Tower constituera le centre de ce futur

1- Vue d'ensemble du chantier. Au cœur de la paroi moulée circulaire de soutènement, apparaissent les 145 barrettes fondant le fût de la tour.

1- Overall view of the construction site. In the centre of the circular diaphragm retaining wall appear 145 barrettes serving as foundations for the tower shaft.

ensemble. À l'instar de la tour Eiffel, elle sera une pure tour d'observation, ne comprenant ni logements ni bureaux. À son sommet, seront implantés une terrasse panoramique et un jardin suspendu.

Structurellement, la tour se présente comme un cylindre de béton armé vertical évidé de 25 m de diamètre et d'au moins 700 m de hauteur.

Son élancement est si grand (il sera au moins égal à 27), qu'elle ne pourrait pas être constamment auto-stable. C'est pourquoi, à la manière d'un gigantesque mât de bateau, elle est maintenue sur les deux premiers tiers



© SANTIAGO CALATRAVA
2

de sa hauteur par des haubans, dont la courbure fait également écho à la tour Eiffel (figure 3). Répartis de manière équitable sur les faces Est et Ouest de la tour, les haubans, dont les plus longs atteignent 700 m environ, viennent s'ancrer au sol selon deux nappes de forme ellipsoïdale.

LE MARCHÉ INITIAL

Les fondations de la tour sont à la mesure de son gigantisme. Elles consistent en un ensemble de 473 barrettes disposées d'une part sous la tour elle-même, d'autre part sous les deux massifs d'ancrage des haubans

2- Vue d'avion. La tour est construite dans un quartier encore vierge, destiné à devenir un nouveau centre-ville.

2- Aerial view. The tower is being built in a district that is as yet undeveloped, intended to become a new city centre.

(figure 4). À l'issue d'un appel d'offres auquel concourraient plusieurs candidats, Soletanche Bachy s'est vu attribuer en juin 2016 le marché de réalisation des fondations et des soutènements de la tour.

Le principal défi de ce projet était le délai de réalisation, extrêmement resserré puisque l'ensemble des ouvrages devait être livré fin août 2017, soit un peu plus d'un an après l'attribution du marché.

Inscrites dans ce délai, des réceptions partielles étaient par ailleurs programmées, dont celle de la zone située sous la tour, pour permettre aux entreprises

chargées de la réalisation du radier et de la superstructure de démarrer leurs travaux.

REDIMENSIONNEMENT DES BARRETTES

Fort de sa présence depuis près de 35 ans aux Émirats Arabes unis dont les 15 dernières années avec une activité assez soutenue, et disposant donc de matériels et de personnels facilement mobilisables dans la zone, Soletanche Bachy a ainsi pu s'engager auprès du maître d'ouvrage à démarrer les travaux sous un mois après l'attribution du marché. ▷

Dans ce laps de temps très court, Soletanche Bachy a pu également proposer, en coopération avec le designer, une variante sur le dimensionnement des barrettes. Initialement d'une profondeur de 102 m et d'une épaisseur de 1,20 m. Il est apparu que la reprise des charges (environ 10000 t par barrette sous la tour) serait optimisée en augmentant l'épaisseur et le nombre des barrettes et en les raccourcissant. C'est ainsi qu'une épaisseur de 1,5 m et une profondeur de 74 m ont été retenues. Sans impact sur le volume de matière utilisé, compatible avec la prise en compte des contraintes sismiques de la région (zone 2B, accélération de 0,2 g), cette variante avait pour avantage d'optimiser la reprise et distribution des charges tout en assurant la tenue des cadences de production sur le chantier.

RECORD DU MONDE DE CHARGEMENT

Après la phase de redimensionnement et la mise en place des installations de chantier, les mois d'août et septembre 2016 ont été consacrés aux essais préliminaires de chargement statique des barrettes. Pour cela, plusieurs cellules Osterberg ont été utilisées. Installées dans les cages d'armature des barrettes d'essais (figure 5), munies de vérins plats, ces cellules permettent de valider à échelle 1 la capacité portante d'une fondation profonde soumise à de fortes charges. À l'occasion de ce chantier, le record du monde de char-



3 © SOLETANCHE BACHY

3- La tour, dont la hauteur finale n'est pas annoncée mais dépassera celle de Burj Khalifa, sera maintenue par des haubans.

4- Alors que le fût de la tour est fondé sur 145 barrettes concentrées en un disque, les 328 points d'accrochage des haubans sont fondés sur autant de barrettes réparties selon deux nappes ellipsoïdales.

5- Les cellules Osterberg (en bleu) sont fixées directement dans les cages d'armatures des barrettes d'essai.

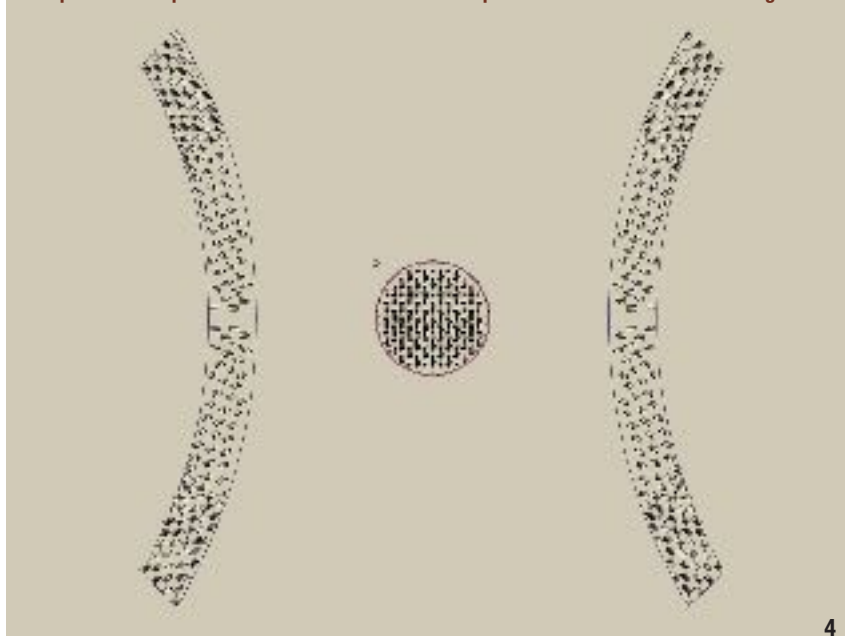
3- The tower, whose final height has not been announced, but which will exceed the height of Burj Khalifa, will be held in position by stay cables.

4- Whereas the tower shaft is supported on foundations of 145 barrettes concentrated on a disc, the foundations for the 328 stay cable fastening points are as many barrettes distributed in two ellipsoidal layers.

5- The Osterberg Cells (in blue) are fastened directly in the concrete reinforcing cages of the test barrettes.

LES 473 BARRETTES

Disposées d'une part sous la tour elle-même et d'autre part sous les deux massifs d'ancrage



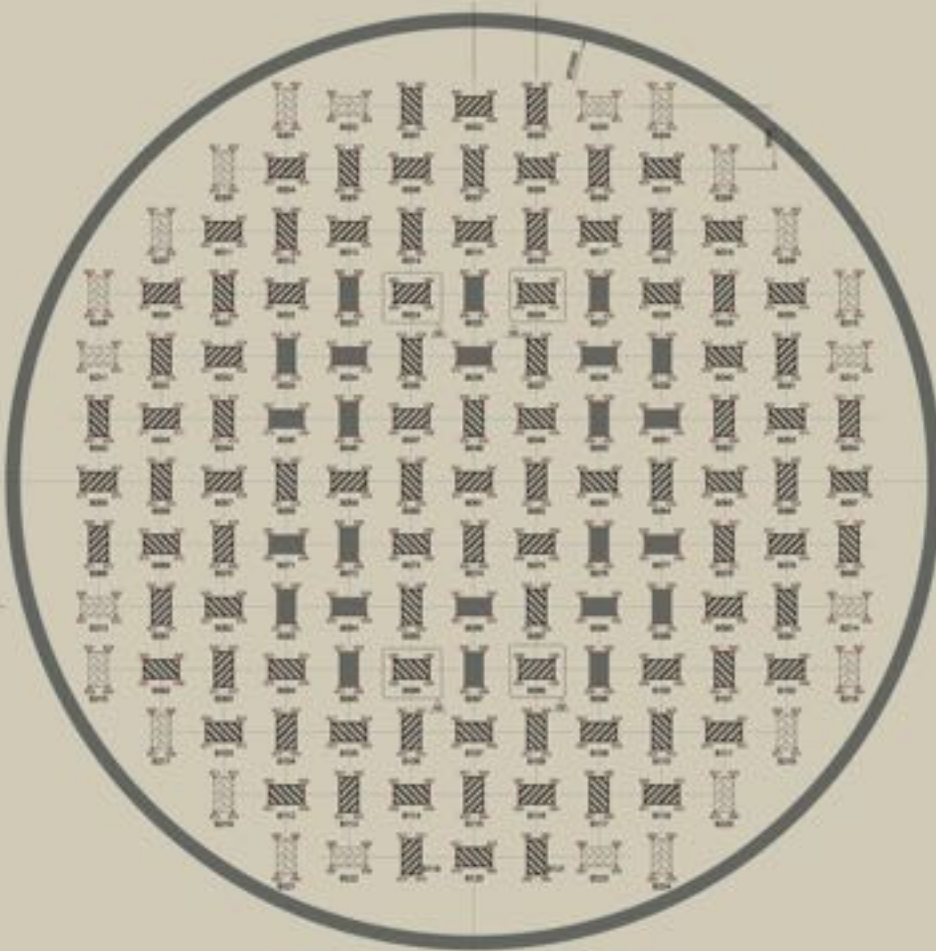
4



5

© SOLETANCHE BACHY

LES 145 BARRETTES IMPLANTÉES SOUS LA TOUR



6- Du fait de la très forte concentration de barrettes sous la tour, la tolérance sur leur verticalité était très faible, égale à 0,3%.

7- Les barrettes seront connectées à un radier géant de 17 m d'épaisseur.

6- Due to the very high concentration of barrettes under the tower, the tolerance on their verticality was very low, equal to 0.3%.

7- The barrettes will be connected to a huge foundation raft 17 metres thick.

gement a été battu, avec une valeur de charge statique exercée par les cellules Osterberg atteignant 36300 t - plus de trois fois la valeur de la charge nominale s'exerçant sur les barrettes - soit l'équivalent d'un bloc de béton de 10x16x100 m de haut environ reposant de tout son poids sur une seule barrette ! Cette méthode a permis de valider le dimensionnement choisi : malgré la charge importante appliquée, ni le sol ni les barrettes n'ont atteint le seuil de rupture.

Parallèlement à ces essais de chargement, l'ensemble des démarches préalables au chantier - contacts avec les concessionnaires des réseaux, validation du projet et des notes de calculs par le comité technique de la Municipalité de Dubaï - ont été menées et validées. Si bien que les travaux de réalisation des barrettes ont pu démarrer en octobre 2016, conformément au planning de travaux.

UNE TRÈS FORTE CONCENTRATION DE BARRETTES

Situées sur le chemin critique du chantier, ce sont les barrettes implantées sous la tour qui ont été réalisées en premier. Confinées à l'intérieur d'un cercle de 72,5 m de diamètre, les 145 barrettes de 2,8x1,5x74 m sont régulièrement implantées, selon une maille carrée de 5 m centre à centre telle que leurs sections horizontales sont deux à deux perpendiculaires (figure 6) créant une très forte concentration (figure 7).

6



7



8

© SOLETANCHE BACHY

Pour éviter leur intersection en pied, il fallait qu'elles soient excavées avec une parfaite verticalité. Ce fut le cas grâce à l'utilisation d'hydrofraises et de l'équipement informatique embarqué. Le contrôle en temps réel du positionnement du forage, a permis de garantir une verticalité de 0,3%.

La mobilisation simultanée de quatre ateliers complets d'hydrofraises (figures 8 et 9), comprenant chacun la machine elle-même, une grue à benne, une centrale de traitement des boues de forage et une grue de manutention pour l'installation des cages d'arma-

tures (figure 10), a permis à ce premier chantier de s'achever en février, après quatre mois de travaux. Pour cela, les équipes, comptant 600 personnes au pic du chantier, se sont relayées 6 jours sur 7 et sur deux postes de 12 heures. Malgré la grande profondeur de forage, le rendement de production s'est avéré conforme aux attentes avec, en moyenne, 8,5 barrettes bétonnées par semaine, soit 1,5 par jour.

Une fois les barrettes de la tour terminées, 2 hydrofraises ont été affectées à la réalisation d'une paroi moulée circulaire de 72,5 m de diamètre (épaisseurs

de 1,20 m et profondes de 32 m) durant les mois de février et mars 2017. À l'abri de ce soutènement, le volume de terre intérieur a été totalement excavé pour permettre le coulage de l'imposant radier de la tour, de 17 m d'épaisseur, objet d'un autre marché.

SOUS LES HAUBANS, DES BARRETTES

Pendant la période de construction de la paroi moulée, les installations de chantier ont été déplacées pour préparer le démarrage de la seconde série de barrettes : celles situées sous les

futurs massifs d'ancrage des haubans. Les points d'accroche des haubans se répartissent géométriquement suivant deux lignes ellipsoïdales de 400 m de long environ, symétriques par rapport à l'axe Nord-Sud. Si les barrettes situées sous la tour travaillent en compression verticale, les barrettes situées sous les massifs d'ancrage des haubans travaillent, quant à elles, principalement en cisaillement horizontal.

Suite à la réalisation d'essai de chargement latéraux au moyen d'O-Cells, également une première mondiale pour des barrettes, les dimensions des



9

© SOLETANCHE BACHY

8- Pour tenir les délais très serrés, quatre ateliers complets d'hydrofraises évoluaient simultanément.

9- Les hydrofraises en action. Au loin, Burj Khalifa, actuelle plus haute tour du monde avec ses 828 m.

8- To meet the very tight deadlines, four complete hydrofraise rigs operated simultaneously.

9- The hydrofraises in action. In the distance, Burj Khalifa, currently the highest tower in the world, at 828 metres.

10- Le site du chantier étant vaste, les cages d'armature ont pu être réalisées sur place. Une centaine de compagnons était affectée à cette tâche.

11- Les barrettes sous haubans sont orientées vers l'axe de la tour, selon leur plus grande dimension.

10- The construction site is vast, so the concrete reinforcing cages were able to be produced on the spot. About one hundred workers were assigned to this task.

11- The barrettes under cable stays are oriented toward the centre-line of the tower, on their largest dimension.



© SOLETANCHE BACHY

10

barrettes situées sous les massifs d'ancrage des haubans ont été ajustées : plus longues (6,2 m), elles sont moins épaisses (1,2 m) et moins profondes (25,5 m). Leur plus grande longueur, orientée radialement par rapport à la tour, optimise la reprise des charges

grâce à la mobilisation de leur grande inertie (figure 11).

Pour optimiser les moyens logistiques et l'avancement du chantier, il a été décidé d'installer un atelier complet de réalisation des barrettes à chacune des quatre extrémités. Chaque atelier avait

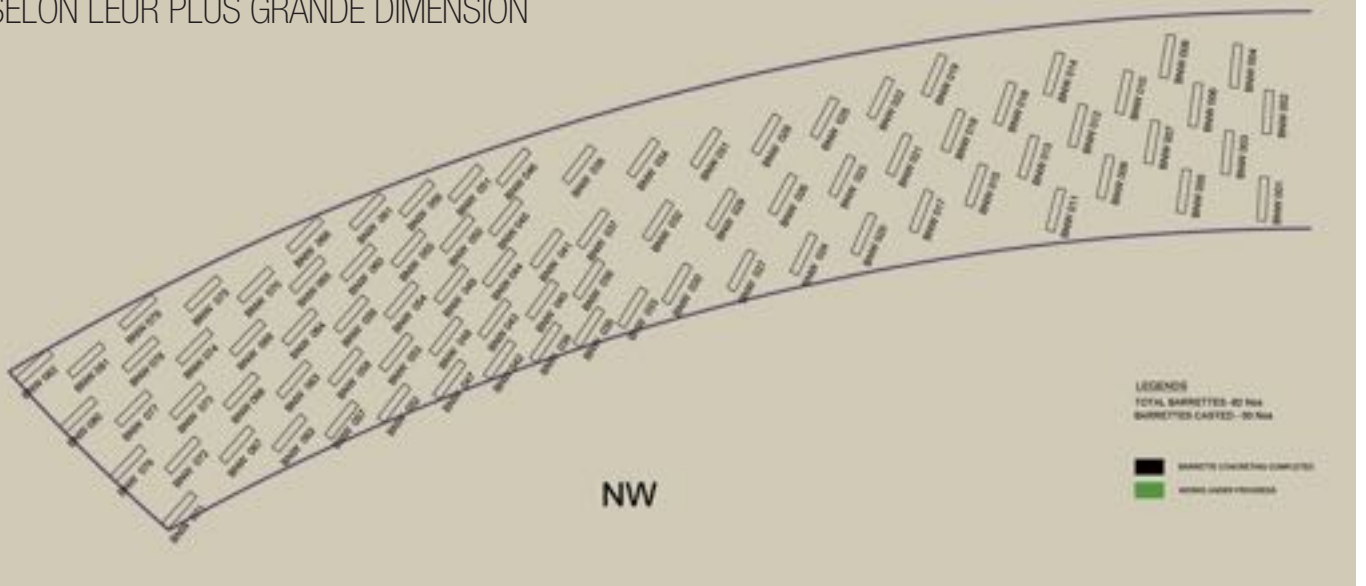
en charge la réalisation des barrettes sur une demi-ellipse, l'avancement se faisant par pianotage de l'extrémité vers le centre. Les travaux se sont déroulés pendant 4 mois, d'avril à juillet 2017, à un rythme soutenu de près de 20 barrettes réalisées par

semaine en moyenne, soit 3,3 par jour. Au final, la totalité du chantier a été livrée sans aléa notable dans les temps du marché, soit 13 mois après sa notification.

LES RAISONS DU SUCCÈS

Plusieurs facteurs ont participé à la bonne tenue des délais de ce chantier hors normes : la connaissance technique du marché, le contrôle de la chaîne et des coûts d'approvisionnement bien sûr, mais aussi la présence d'un personnel de chantier qualifié, compétent et expérimenté puisqu'ayant, pour sa grande majorité, déjà participé à des projets similaires à Dubaï. Les synergies internes de Soletanche Bachy ont également joué à plein, que ce soit avec le bureau d'études, le laboratoire matériaux à Paris ou avec les filiales de zones, qui ont permis de rassembler rapidement le matériel nécessaire. L'encadrement du chantier s'est pleinement mobilisé sur l'enjeu de la sécurité. Les quelque 600 personnes présentes sur le terrain, issues de plus de 15 nationalités différentes, ne parlant pas les mêmes langues, ont toutes été formées à la culture sécurité du groupe. La journée de chaque compagnon démarrait ainsi par un quart d'heure sécurité, au cours duquel toutes les règles à respecter et les tâches à réaliser étaient rappelées. Ces efforts se sont avérés payants puisque les taux de fréquences et de gravité ont été particulièrement bas (TF = 0,8 et Tg = 0), et qu'aucun accident grave n'a été à déplorer sur le chantier. ▷

LES BARRETTES SOUS HAUBANS SONT ORIENTÉES VERS L'AXE DE LA TOUR, SELON LEUR PLUS GRANDE DIMENSION



© SOLETANCHE BACHY

11



12

© SOLETANCHE BACHY

UN FORAGE AUX BOUES DE POLYMERES

Le fluide de forage utilisé pour stabiliser les parois de l'excavation pendant le creusement de fondations profondes, comme les barrettes ou les parois moulées, est traditionnellement de la boue bentonitique.

Cependant cette boue s'avère incompatible avec certaines roches : elles forment alors des pâtes épaisses qui influent négativement sur la qualité des ouvrages ainsi que sur la productivité pendant leur construction.

Or le sous-sol de Dubaï est constitué pour partie de telles roches - les calcarénites - que l'on trouve régulièrement sous l'épaisse couche de surface constituée de 12 à 15 m de sables.

Le taux de salinité très élevé de ces grès côtiers formés par la consolidation des sables calcaires accentue encore

12- Système de stockage et de recyclage des boues de forage au polymère.

12- System for storage and recycling of polymer drilling muds.

l'incompatibilité du sous-sol avec la boue bentonitique. Cet état de fait a conduit Soletanche Bachy à concevoir dès 2005 des fluides de forages alternatifs : les boues de polymères pures ou mixtes (figure 12).

Employées depuis avec succès sur plus de 60 chantiers à travers le monde, elles ont été choisies pour ce chantier. □

PRINCIPAUX CHIFFRES

NOMBRE DE BARRETTES : 473 u

FONDACTIONS ET SOUTÈNEMENT

QUANTITÉ D'ACIER : 16 000 t

VOLUME DE BÉTON COULÉ : 90 000 m³

VOLUME DE SOL EXCAVÉ : 180 000 m³

CHARGE EXERCÉE SUR LES BARRETTES LORS DES ESSAIS PRÉLIMINAIRES : 36 300 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

FINANCEMENT ET MAÎTRISE D'OUVRAGE : Emaar

PROJECT MANAGER : Parsons Overseas Limited

ARCHITECTE ET INGÉNIEUR PRINCIPAL: Calatrava International LLC

MAÎTRE D'ŒUVRE TECHNIQUE: Aurecon Engineering International (PTY)

ENTREPRISE FONDATION ET SOUTÈNEMENT : Soletanche Bachy

ABSTRACT

DUBAI CREEK TOWER - 473 BARRETTES AS FOUNDATIONS FOR ONE OF THE HIGHEST TOWERS IN THE WORLD

ALEXANDRE ABINADER, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL - VINCENT LEBLOIS, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

Soletanche Bachy has been commissioned by the Dubai developer Emaar to build the foundations of the future tower temporarily called "Dubai Creek Tower". The structure, whose final height is not yet known, is supported by stay cables. The foundation system is a set of barrettes placed partly under the tower (145 units) and partly under each of the foundation blocks anchoring the stay cables to the ground. To be able to meet the very tight completion deadline (13 months), Soletanche Bachy deployed four complete hydrofraise rigs operating at full capacity. Thanks to meticulous preparation, impeccable logistics and very experienced personnel, the project was able to be delivered on time, at end-July 2017. □

DUBAI CREEK TOWER - 473 PILOTES-PANTALLA PARA CIMENTAR UNA DE LAS TORRES MÁS ALTAS DEL MUNDO

ALEXANDRE ABINADER, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL - VINCENT LEBLOIS, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

Soletanche Bachy ha sido elegido por la promotora dubaítí Emaar para realizar los cimientos de la futura torre provisionalmente designada Dubai Creek Tower. Esta construcción, cuya altura final todavía no se conoce, está soportada por tirantes. El sistema de cimentación es un conjunto de pilotes-pantalla dispuestos debajo de la torre (145 unidades), por una parte, y bajo cada uno de los macizos de anclaje al suelo de los tirantes, por otra. Para poder respetar los plazos muy ajustados de realización (13 meses), Soletanche Bachy ha movilizó cuatro talleres completos de hidrofresado, que han trabajado a pleno régimen. Gracias a una minuciosa preparación, una logística impecable y un personal muy experimentado, la obra ha podido entregarse a tiempo, a finales de julio de 2017. □



**PRO BTP,
LE MEILLEUR DE LA
PROTECTION SOCIALE**

SANTÉ
PRÉVOYANCE
RETRAITE
ÉPARGNE
ASSURANCES
ACTION SOCIALE
VACANCES

PRO BTP
GROUPE



PRÉSERVONS L'AVENIR



Remblai renforcé à parement vertical MacRes® en béton dans le cadre de la construction de la route de la corniche de Brazzaville.

Dans une volonté de concevoir des solutions de soutènement durables et écoresponsables, Maccaferri apporte son expérience et sa capacité d'innovation dans la réalisation d'ouvrages de haute technicité et d'une exceptionnelle longévité.

Ses solutions sont pensées pour protéger les populations et les infrastructures autour d'une double préoccupation : s'intégrer au cadre naturel et réduire l'impact carbone du site.

Une réponse adaptée à la dimension financière et écologique de chaque projet.

MACCAFERRI

Brazzaville, Congo
Macres®, avec nappes de renforts synthétiques Paraweb® : 6000 m²

www.maccaferri.com/fr