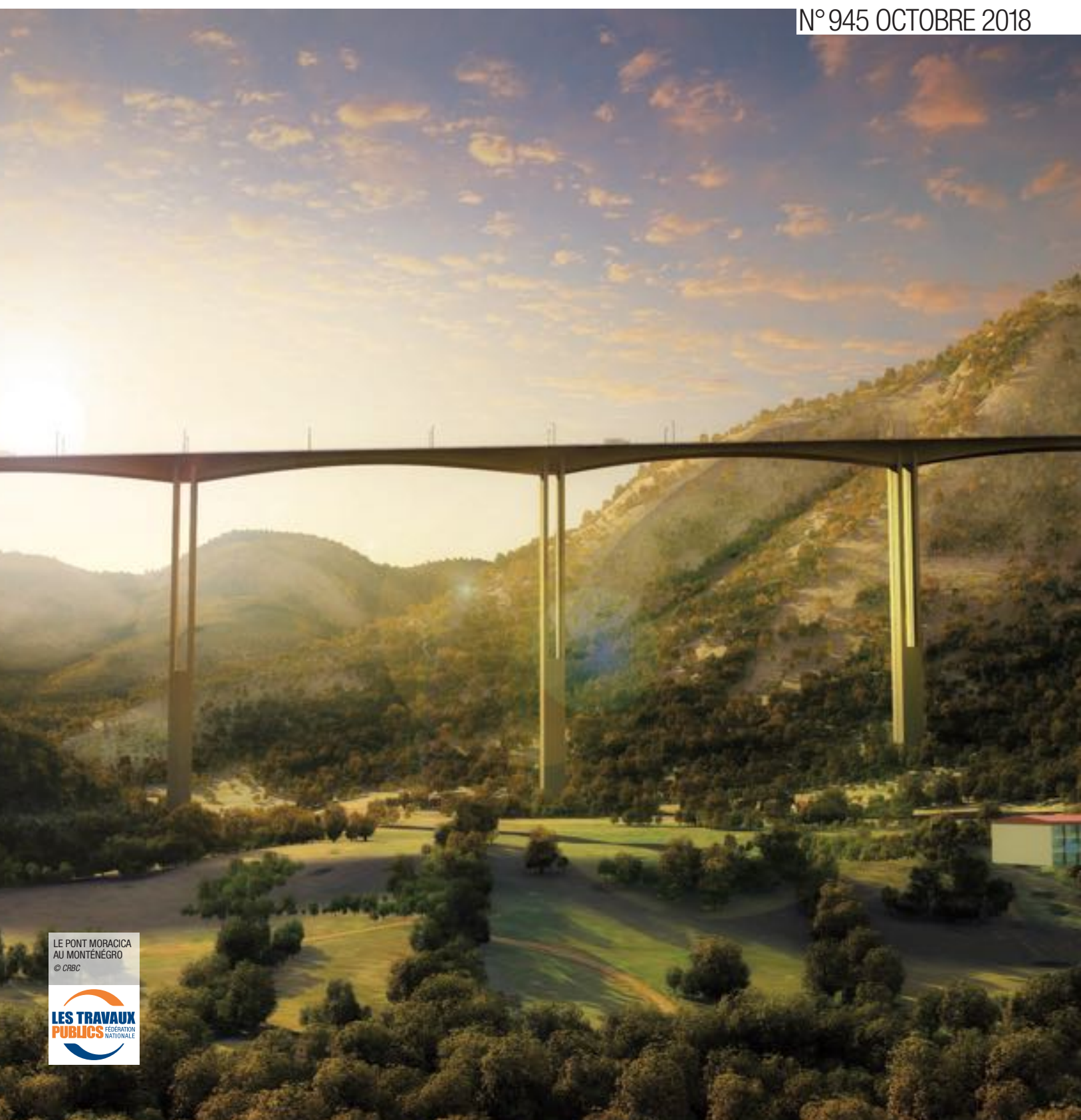


TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

INTERNATIONAL. RESERVOIRS GNL SUR INCLUSIONS RIGIDES AU KOWEIT. SHEIKH JABER AL HAMAD AL SABAH CAUSEWAY AU KOWEIT. LE NOUVEAU PONT CHAMPLAIN AU CANADA. NAMHANGANG BRIDGE IN KOREA. LUCKNOW METRO 1 IN INDIA. EXTENSION DE LA MINE D'OR DU TASIAST EN MAURITANIE. UN CHANTIER D'ENVERGURE AU MONTENEGRO. TESTIMONIO II A MONACO. RAFFINERIE D'AL-ZOUR AU KOWEIT

N° 945 OCTOBRE 2018



LE PONT MORACICA
AU MONTÉNÉGRO
© CRBC



PARTNER WITH A BRIDGE SPECIALIST

Sheikh Jaber Al-Ahmed Al-Sabah Causeway
© Panama 2012



3rd Panama Canal Crossing
© West Coast 2012



Otay River Bridge
© Otay River 2012



**WORLD'S
LONGEST
CONCRETE
SPAN**

Panama
Canal crossing

**BRIDGE
SPECIALISTS**
350

**BRIDGE DESIGN
CENTRES**
6

San Diego, Montreal, Paris,
Dubai, Delhi, Seoul

**WORLD'S
LONGEST
DOUBLE
SUSPENSION
BRIDGE**

Chacao, Chile

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
Erica Calatozzo (Systra), Jean-Bernard
Datry (Setec tpi), Philippe Gotteland
(Fnpt), Jean-Christophe Goux-Reverchon
(Fnpt), Florent Imberty (Razel-Bec),
Nicolas Law de Lauriston (Léon Grosse),
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 (Fnpt)

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. Edouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.fr

France (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

Directeur de clientèle
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@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

LA PLACE DE L'INGÉNIERIE FRANÇAISE À L'INTERNATIONAL. PEUT-ON FAIRE MIEUX ?



© DR

Saviez-vous que la conception de la plus grande portée au monde pour un pont suspendu à deux travées est française ? Il est en construction au Chili. Si on sait que certaines des réalisations historiques de génie civil à l'international sont françaises, on a souvent du mal à estimer la place actuelle de l'ingénierie française. Elle représente seulement 1,4% du marché mondial (ENR The Top 225 16 July 2018). Face à la concurrence de mastodontes anglo-saxons qui ne cessent de grandir à coups d'acquisitions, ou encore de sociétés asiatiques assises sur des investissements colossaux sur leurs marchés, la France a-t-elle toujours une place ? 22 ans après avoir quitté la France pour exercer mon métier d'ingénieur à l'international, je serais bien gêné de dire le contraire ! L'ingénieur français est différent. Ceci démarre par l'éducation où nous donnons une part importante aux expériences professionnelles et à la créativité. Les jeunes ingénieurs français sont vus par nos collègues anglo-saxons ou asiatiques comme capables de challenger des schémas préconçus - voire leur hiérarchie - sur des sujets techniques. Ceci est renforcé par une approche très française de l'ingénierie qui laisse la place à l'imagination et, parfois, à la capacité d'aller aux limites des codes et des habitudes, que l'on retrouve beaucoup moins à l'international. Les instances techniques

françaises ont toujours eu un haut niveau de technicité, offrant ainsi aux ingénieries et constructeurs la possibilité d'un véritable dialogue technique pouvant aller au-delà de l'application stricte et parfois très conservatrice des codes. Les entreprises françaises ont pu innover bien plus que nos partenaires ou concurrents internationaux. Prenons le cas des ponts. Combien d'inventions sont d'origine française ? Il est vrai qu'aujourd'hui la Chine est détentrice de la majorité des records (portée, charges, etc.) mais y-a-t-il vraiment des innovations importantes dans ces constructions ? Les ouvrages sont-ils si différents et plus économiques ? Ils sont en tous cas nombreux et impressionnants ! Une des caractéristiques de ces projets est une dissociation forte, voire totale, entre les études et la construction. C'est là, sans doute, qu'il y a également une différence majeure entre notre histoire et celle de ces grands bâtisseurs chinois. Il y a une valeur ajoutée forte à associer construction et conception qui conduit à chercher les solutions techniques optimales. Ceci ne les empêche évidemment pas de gagner de nombreux projets avec des politiques de prix très bas mais combien sont de vrais succès ? Certaines de ces entreprises ont d'ailleurs fait le choix de ne plus répondre à des appels d'offres de conception-réalisation. D'autres ont décidé de s'associer avec des ingénieries internationales les aidant à s'intégrer dans un mode de fonctionnement international parfois très éloigné du fonctionnement dans leur pays d'origine. Là encore, les ingénieries asiatiques et anglo-saxonnes qui, traditionnellement, étaient plus habituées à exercer du côté du client final ont souvent moins d'expérience à travailler avec des entreprises de construction. C'est assurément un domaine dans lequel nos sociétés d'ingénierie ont une valeur ajoutée forte sur le marché international. Alors ne soyons pas timides ! Nous avons beaucoup à apporter à la construction, dans le monde entier. Il suffit de trouver la bonne manière de le faire.

JEAN-CHARLES VOLLERY
DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT
INTERNATIONAL ET DÉVELOPPEMENT
SYSTRA



INTER NATIONAL



TESTIMONIO II A MONACO © CÉDRIC HELSLY



04 ALBUM

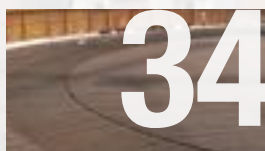
08 ACTUALITÉ



18

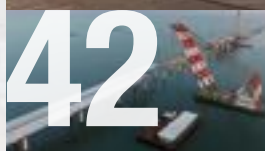
**ENTRETIEN AVEC
VINCENT DE VILLE DE GOYET**
TOUT LE GÉNIE CIVIL,
SANS OSTENTATION

26 MACCAFERRI : CONCEVOIR ET PROPOSER
LA SOLUTION OPTIMALE



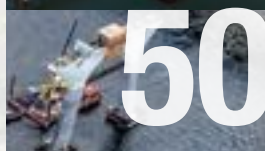
34

**RÉSERVOIRS GNL
SUR INCLUSIONS RIGIDES**
au Koweït



42

**SHEIKH JABER AL HAMAD
AL SABAH CAUSEWAY**
au Koweït



50

**LE NOUVEAU PONT
CHAMPLAIN**
au Canada



58

NAMHANGANG BRIDGE
Korea



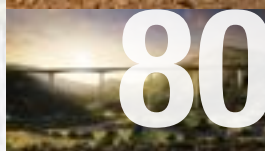
68

LUCKNOW METRO 1
India



74

**EXTENSION DE LA MINE
D'OR DU TASIAST**
en Mauritanie



80

**UN CHANTIER
D'ENVERGURE**
au Monténégro



86

**TESTIMONIO II -
LES CHANTIERS D'ENVER-
GURE SE SUCCÈDENT**
à Monaco



94

RAFFINERIE D'AL-ZOUR
Projet de taille mondiale
au Koweït





SUR LE SAINT-LAURENT À MONTRÉAL LE NOUVEAU PONT CHAMPLAIN EST CALCULÉ POUR 125 ANS

SYSTRA International Bridge Technologies Canada Inc., en joint venture avec T.Y. Lin International Canada Inc et SNC Lavalin Inc. a participé aux études de ce pont de 3,4 km situé dans la métropole de Montréal. L'ouvrage s'insère dans un projet beaucoup plus large et important, le "Projet de Corridor du Nouveau Pont Champlain".

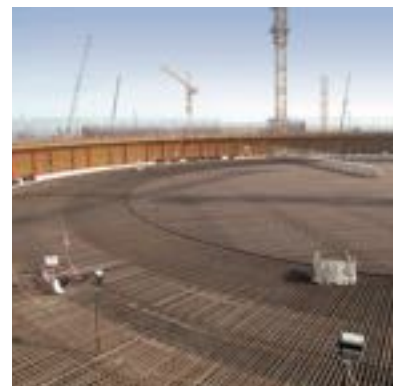
(Voir article page 50).





GAZ LIQUÉFIÉ REPOSANT SUR INCLUSIONS RIGIDES AU KOWEÏT

TERRASOL et HDEC ont proposé un système de fondation sur sol renforcé par inclusions rigides pour la construction de 8 réservoirs de stockage de GNL de 225 000 m³ de capacité unitaire sur le gigantesque terminal d'Al-Zour au Koweït, pour le compte de Kuwait National Petroleum Company (KNPC).
(Voir article page 34).



OUVRAGES D'ART EUROPÉENS DANS LA SÉLECTION FINALE DU PRIX DE L'IABSE



1^{er} prix : pont autoroutier et ferré Yavuz Sultan Selim qui relie Asie et Europe à Istanbul (Turquie), au-dessus du Bosphore.

© T'INGÉNIERIE

Chaque année, l'association IABSE distingue des ouvrages remarquables tant en esthétique qu'en ingéniosité à résoudre les difficultés. En tête en 2018 : le dernier franchissement sur le Bosphore (Turquie). Autres ponts finalistes au Danemark, en Espagne et en Écosse.

Le 3^e pont sur le Bosphore à Istanbul (Turquie) a remporté le 1^{er} prix 2018 de l'International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE).

Le pont Yavuz Sultan Selim, mis en service en août 2016, porte deux voies ferrées entourées de 4 voies autoroutières de chaque côté, ainsi que des cheminements pour l'entretien et la maintenance. Suspendu à haubans, il mesure 1 875 m de long avec une portée principale de 1 408 m, près de 59 m de large et 322 m de haut.

Le ministère des Transports de Turquie, KGM, a voulu faire de ce lien entre rive européenne et rive asiatique du Bosphore, un symbole du rapprochement entre deux continents tout en l'harmonisant avec les deux franchissements existants : le pont des Martyrs du 15 juillet (1973) et le pont Fatih Sultan Mehmet (1988).

Ingénieurs et architectes ont conçu un ouvrage élégant tout en tenant compte des charges à supporter, du gabarit nécessaire à la navigation et du temps court de réalisation - trois ans.

CONGRÈS IABSE 2019 À NEW-YORK

Le prochain congrès annuel de l'IABSE se tient du 4 au 6 septembre 2019 à New-York (États-Unis).

Thème : maîtrise du coût des infrastructures, durabilité et sécurité dans les métropoles en évolution.

www.iabse.org/newyork2019

Conception structure et architecture : T-ingénierie (Suisse) dont Jean-François Klein (architecte), et Michel Virlojeux. Trois autres ouvrages d'art étaient en compétition pour le prix IABSE.

→ Processus de construction remarquable

Le Circle Bridge à Copenhague (Danemark) mesure 35 m de long (2015). Ses cinq plateformes métalliques créent un passage piéton et cyclable sur le Canal Christianshavns. L'une d'entre elles se rabat pour les bateaux. Deux seulement ont des fondations, les trois autres étant reliées à une colonne. Grâce à un système de flottaison, les plateformes bougent sur l'eau comme un bateau (ville de Copenhague ; conception : Olafur Eliasson et Ramboll Denmark).

En Espagne, le pont ferré sur la rivière Almonte supporte depuis fin 2016 une ligne à grande vitesse (350 km/h) près de Cáceres, entre Madrid et l'Estréma-

ture (à l'ouest). Il a fallu cinq ans de travaux pour élever l'ouvrage en béton de 996 m de long avec un arc en dessous de 384 m reposant sur deux fois deux points. Le processus de construction en lui-même est remarquable (maître d'ouvrage : Adif Alta Velocidad ; conception : DJV Arenas & Asociados-Idom).

→ Des câbles se chevauchent

Enfin, participait également au prix, le Queensferry Crossing (2017), 3^e pont au-dessus de l'estuaire du Forth, à l'est d'Édimbourg (Écosse). Au centre de ses 2,7 km de long, il est doté de trois mâts à haubans dont les câbles se chevauchent un peu en pied (Agence écossaise de transport national avec Ramboll, Sweco, Leonhardt Andra and Partner). ■

¹⁾ Cf. "The behavior of the Third Bosphorus Bridge related to wind and railway loads" de Vincent de Ville de Goyet, Yves Duchêne, Jean-François Klein, Michel Virlojeux, conférence IABSE, Genève, septembre 2015, pp. 2109-2116.

PRIX POUR 2 ARTICLES

L'IABSE vient aussi de distinguer deux articles parus en 2017 dans sa revue *Structural Engineering International* (SEI).

Catégorie reportage technique : "The New Old Bridge : Renovation of the Macdonald Suspension Bridge" de D. Radojevic, K. F. Kirkwood, Canada, SEI 1/2017 février, pp 32-37.

Catégorie article scientifique : "Considerations for Robustness in the Design of Steel and Composite Frame Structures" de P. Stylianidis, D. Nethercot, UK, SEI 2/2017 mai, pp 263- 280.

LA MODÉLISATION ET LE NUMÉRIQUE CONTRIBUENT À MIEUX PROTÉGER DES CHUTES DE BLOCS



© MYOTIS

Les blocs de la faille au Mont Faron (métropole de Toulon) sont surveillés par un système avec capteurs de déplacement, de température et sismiques, alertes, portail internet, alimentation solaire, pour sécuriser des habitations.

Un filet ne dissipe pas l'énergie d'un rocher qui tombe mais il la diffuse vers les freins qui, eux, la dissipent. Philippe Robit (NGE Fondations) a volontiers développé le fonctionnement d'un écran pare-pierres, à la demande de l'auditoire de la réunion technique du projet Chutes de blocs, risques rocheux et ouvrages de protection (C2rop)⁽¹⁾. NGE Fondations et Can travaillent de concert dans le cadre du C2rop sur le rapprochement entre essais de terrain et modélisation des écrans pare-pierres. Objectif : mieux connaître leurs limites tout en réduisant le nombre d'essais, coûteux. La modélisation sur 2 expérimentations a été satisfaisante. Leur collaboration se poursuit pour modéliser les impacts sur des écrans déjà chargés en petites roches, situation fréquente, deux impacts simultanés, un impact latéral ou sur un poteau, des filets plus longs.

→ Parler le même langage

La modélisation est aussi au programme du groupe qui s'intéresse au comportement de parades de faible emprise. Un Bloc armé (Géolythe) et un parement Terre Armée ont été testés à Montagnole, site Ifsttar (Savoie), et sur modèle réduit, avec l'Irstea. Résultats à Rock Slope Stability (13-15 novembre, Chambéry). La conception d'outils pratiques fait partie du projet C2rop. Le groupe des maîtres d'ouvrage partage des expériences « afin d'apprendre des autres ». Encore, faut-il parler le même langage,

1^{re} tâche à laquelle il s'est attelé avant de hiérarchiser les critères de vulnérabilité d'une infrastructure face à un risque rocheux. La vulnérabilité inclut le temps d'intervention suite à une chute, la présence d'humains ou non, etc.

→ Bonnes pratiques surveillance

Parler le même langage préoccupe aussi le groupe réuni sur "la surveillance, alternative aux parades". Ceci d'autant plus qu'il y a beaucoup d'innovations et de diversité dans les dispositifs. « Grâce à la surveillance, en 2014, nous avons pu fermer la route au dernier moment - huit jours avant - quand 9000 m³ instables menaçaient les Gorges de l'Arly, » a témoigné Roland Mistral, président du projet C2rop et directeur des infrastructures de la Savoie.

Les maîtres d'ouvrage ont des réticences. « Il est vrai que ça disfonctionne plus que

les parades concrètes à l'heure actuelle, a reconnu Lucas Meillan, président de Géolithe, participant à ce groupe du C2rop. *Nous partageons des bonnes pratiques et voulons rédiger des recommandations sur des solutions globales depuis les besoins du gestionnaire jusqu'à la gestion de crise.* »

→ Une vraie communauté métier

Le projet C2rop mis en œuvre par l'Irex se termine en 2019. Les participants s'interrogent sur la suite, vu la communauté métier qu'ils ont su créer. Lancé en 2015, il réunit 45 partenaires dans l'optique de produire des documents exploitables par tous. Trois axes de travail : aléas, risques, parades.

www.C2rop.fr ■

⁽¹⁾ Le 12 septembre à Paris.



Blocs tombés sur une route en Isère.

© DÉPARTEMENT DE L'ISÈRE

APPEL À PROJETS URBANISME ET CANICULE

La canicule peut être tempérée par l'aménagement urbain en limitant les zones goudronnées et en plantant de la végétation dont des arbres pour l'ombre.

Ces mesures sont optimisées quand elles s'articulent entre elles et avec l'urbanisme.

Ce sera un des axes de l'appel à projets "Modélisation et évolution au service des acteurs des territoires et des villes de demain" (Modeval-Urba, Ademe) en 2019.

www.ademe.fr/surchauffe-urbaine-recueil-methodes-diagnostic-dexperiences-territoriales.



© MT

L'ombre et les massifs limitent la chaleur réfléchiée par le sol.

ÉNERGIE : 3 DOMAINES À CREUSER

Trois thèmes ont été ajoutés dans l'édition 2018 de l'appel à projets "Énergie durable : production, gestion et utilisation efficace" de l'Ademe car « ils n'ont pas été suffisamment approfondis, jusqu'à présent » : impacts environnementaux de la filière éolienne ; intégration du vecteur hydrogène ou biométhane dans les systèmes énergétiques multi-échelles ; évolution des mobilités (lien solutions/infrastructures). Résultats de l'appel en avril 2019.

<https://appelsaprojets.ademe.fr/laap/APRED2018-57-1#resultats>.

L'ÉTAT PROPOSE 13-14 MILLIARDS/AN POUR LES TRANSPORTS

L'État propose d'investir 13,4 milliards d'euros dans les transports de 2018 à 2022 puis 14,3 milliards de 2023 à 2027. C'est mieux que 2013-2017 avec 9,2 milliards/an.

Cette programmation 2018-2027 devait être présentée en octobre en conseil des ministres (loi d'orientation des mobilités), puis débattue au Parlement.

La ministre des Transports, Elisabeth Borne, a tenu compte de l'avis du Conseil d'orientation des infrastructures et devait finaliser cet engagement avec les Régions. Voici ses propositions au 11 septembre.

Le budget routes nationales, entretien, exploitation et modernisation monte à 800 millions d'euros en 2018 puis à 930 à partir de 2023. 20 opérations de désenclavement routier, villes moyennes et territoires ruraux : 1 milliard d'euros/an.

Renouvellement du réseau ferroviaire : 3,6 milliards par an sur dix ans. Désaturation des nœuds : 2,6 milliards d'euros/an.

Fluvial : 110 millions/an à partir de 2019 et progression jusqu'à 160 en 2027.

Mobilités propres, partagées et actives (dont pôles d'échanges) : 1,2 milliard/an.

Report modal transport marchandises : 2,3 milliards/an.



© EUROVA

De 800 à 930 millions pour l'entretien des routes nationales. Ici, travaux sur la RN4 dans la Meuse.

COUP DE POUCE AUX RÉSEAUX D'EAU ET D'ASSAINISSEMENT



© JULIEN PIFFAUT/SUEZ

Pose d'une conduite d'eau potable sous la Saône à Chalon-sur-Saône.

41 milliards d'euros seront consacrés au renouvellement des réseaux d'eau et d'assainissement de 2019 à 2024. C'est 5 de plus que prévu. Cet effort résulte de la 1^{re} partie des Assises de l'eau (24 avril-juillet 2018). Une concertation auprès des élus locaux et des professionnels a mis en lumière les difficultés, notamment des communes rurales.

Il ressort que 42% des élus ne connaissent pas l'état de leurs conduites. Une enveloppe de 50 millions d'euros va être réservée au diagnostic.

→ 2 milliards pour les territoires ruraux

Grâce aux aides financières, les réseaux devraient pouvoir être renouvelés au bout de 85 ans au lieu de 170 ans jusqu'à maintenant. Un litre d'eau potable sur cinq se perd en chemin et des communes baissent les bras devant l'ampleur de la tâche.

L'aide des agences de l'eau est portée à 2 milliards pour les territoires ruraux, dans le cadre des 11^e programmes d'intervention 2019-2024. De plus, 1 milliard servira à la gestion des eaux pluviales.

→ Suivre les mesures prises

Les collectivités pourront emprunter à la Caisse des dépôts et consignations à 0,75% sur soixante ans si besoin. La profession des travaux publics « souhaite qu'un suivi associant acteurs publics et privés, à l'image des assises, ait lieu pour mesurer la mise en œuvre des engagements et accompagner le dispositif », a indiqué la Fédération Nationale des Travaux Publics.

→ 2^e volet des Assises de l'eau

La 2^e partie des Assises de l'eau, lancée par le gouvernement à l'automne, porte sur le lien entre changement climatique et ressource en eau : économies d'eau, infiltrations dans le sol, zones humides, restauration des rivières. ■

CHALEUR ET FROID RENOUVELABLES À LA TRAÎNE

« Nous sommes peut-être sur la voie d'une électricité 100% renouvelable mais, en matière de chaleur, de froid et de mobilité, nous nous comportons comme si nous avions tout le temps du monde, » a déclaré Rana Adib, secrétaire exécutif de REN21, réseau de 900 informateurs dans le monde.

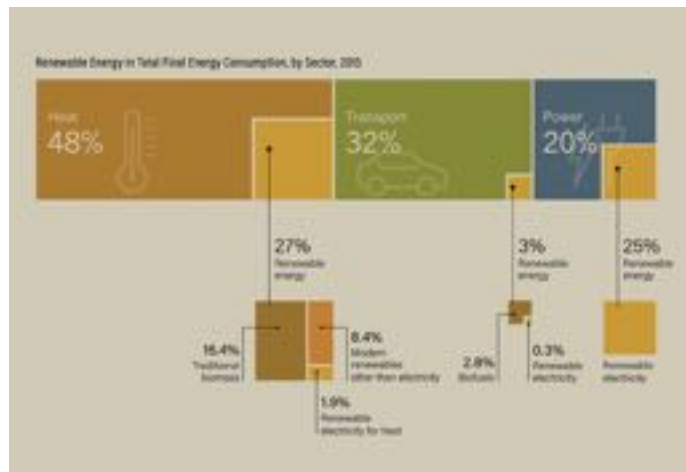
La chaleur issue de renouvelables a cru de 20,5% de 2007 à 2015 alors que l'électricité d'origine solaire, éolienne, hydraulique, végétale, a augmenté de 56,6%.

Or, le chauffage et le refroidissement consomment 48% de l'énergie finale utilisée sur la planète contre 32%, pour le transport, et 20% pour les besoins en électricité.

Sur ces 48% (cf. figure), 27% sont fournis par des renouvelables : biomasse traditionnelle (16,4%) et solaire thermique, géothermie (10,3%).

→ Leadership politique nécessaire

« Pour réussir la transition énergétique, il faut un leadership politique sans lequel il sera difficile de respecter les engagements en matière de climat, a insisté Arthouros Zervos, président de REN21. Il faut établir des objectifs et des politiques strictes en matière de chauffage,



© REN 21

Part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie par secteur dans le monde (2015).

de refroidissement et de transports, et investir en conséquence. »

Seuls 48 pays des 180 pays ayant des objectifs en énergies renouvelables, les déclinent aussi en thermique. En Inde, les installations de capteurs solaires thermiques ont cru de 25% en 2017 par rapport à 2016.

→ Réseau de froid à Paris-Saclay

En France, citons le partenariat entre

l'établissement public d'aménagement Paris-Saclay et l'Ademe pour un réseau qui fournit chauffage, eau chaude et climatisation, alimenté à 60% en 2021 par des énergies renouvelables ou de récupération.

En savoir plus sur www.ren21.net/gsr-2018 ; www.observatoire-des-reseaux.fr/les-reseaux-de-froid/ ■





terrasol

setec

L'ingénierie géotechnique
à forte valeur ajoutée

www.terrasol.com

INGÉNIERIE

LOGICIELS

» Conception, Maîtrise d'oeuvre, Expertise Développement, Assistance technique, Formation «

Terrasol est un leader reconnu dans le domaine de l'ingénierie géotechnique, en France comme à l'étranger.
Parmi nos références récentes en France : Grand Paris Express, Eole, Port de Brest, Barrages Aisne et Meuse, Projet Cigéo, Kourou Ariane 6, Soufflerie de l'Onera, Tour Trinity, Projet Lyon Part-Dieu...
Et à l'étranger : Aéroport des Maldives, Dubaï Creek Harbour Tower, Ligne à Grand Vitesse HS2, Réservoirs Al-Zour, Pénétrante de Tizi Ouzou, TER de Dakar, Baie de Cocody, Transgambia Bridge, Cap Lopez...



Paris	Lyon	Maroc	Tunisie
Tél : +33 (0)1 82 51 52 00 Fax : +33 (0)1 82 51 52 99 Email : info@terrasol.com	Tél : +33 (0)4 27 85 49 35 Fax : +33 (0)4 27 85 49 36 Email : lyon@terrasol.com	Tél : +212 (061) 25 53 89 Fax : +212 (529) 03 64 00 Email : telmaki@terrasol.com	Tél : +216 71 23 63 14 Fax : +216 71 75 32 88 Email : info@terrasol.com.tn

GRENOBLE : LA PASSERELLE SAINT-LAURENT EN HABIT DU XX^e SIÈCLE



La passerelle confinée sous des bâches pendant sa restauration.

© VILLE DE GRENOBLE

La rénovation de la passerelle Saint-Laurent à Grenoble (Isère) arrive à son terme. L'ouvrage suspendu réapparaît dans toute son élégance après avoir été enfermé plusieurs mois sous une bâche blanche et rénové. Les peintures contenaient de l'amiante et du plomb, d'où la mise en dépression lors du décapage. Un millier de personnes l'empruntaient chaque jour. « La moitié de la passerelle ne résistait plus aux 400 kg/m², norme de sécurité, indique Grenoble Alpes Métro-

pole. Elle était rongée par une corrosion importante sur ses parties latérales. »

Les pièces corrodées de la structure ainsi que le tablier métallique ont été changés. Des parties maçonnées ont été nettoyées et réparées.

Coût : 2,31 millions d'euros dont 1,3 million payé par la Métropole, 550 000 euros par le Département et 462 500 euros par la Ville.

Bureaux d'études : B et M Engineering et Icaad (amiante). Entreprise principale : Lassarat.

→ Déluge en 1219

La rénovation de la passerelle Saint-Laurent est la seconde dans l'histoire de ce franchissement de l'Isère à Grenoble. En 43 avant JC, est attesté un pont provisoire contre les crues du Drac et de l'Isère. Le 1^{er} pont en pierre, au XI^e siècle, résiste une centaine d'années aux assauts des eaux mais cède lors du "déluge de Grenoble" en septembre 1219.

Plus tard, un tablier en bois remplace celui en pierre car il coûte moins cher à réparer après écroulement.

→ Améliorations au XIX^e siècle

Premières digues sur l'Isère dans la 1^{re} moitié du XIX^e. En 1837, le pont suspendu "en fil de fer", tablier en bois sur piles en pierre, tient bon face à des crues importantes.

La passerelle est secondée par le pont Marius-Gontard au XVII^e et, par le pont de la Citadelle, en 1865.

En 1909, 1^{re} rénovation : le tablier passe du bois au fer, les piles sont consolidées. ■

© LUCAS FRANGELLE/GRENOBLE-ALPES MÉTROPOLE



L'ouvrage d'art tout en finesse, avant rénovation.

PLUS D'EAU POTABLE À DHAKA

Veolia a remporté avec Suez la conception, construction et exploitation (trois ans) d'une usine de production d'eau potable à Dhaka (Bangladesh).

Le niveau des nappes phréatiques a baissé dans le secteur de la capitale et les besoins vont doubler d'ici à 2030.

Le contrat de 275 millions d'euros signé avec la Dhaka Water Supply and Sewage Authority, comprend une usine de traitement à partir d'une prise d'eau à 22 km sur la rivière Meghna.

L'eau potable ainsi produite dans quatre ans, alimentera 4,3 des 11 millions d'habitants de l'agglomération. L'installation doit résister aux inondations et aux tremblements de terre.

TERRE ARMÉE
SUSTAINABLE TECHNOLOGY

Pour tous les grands projets d'infrastructure, nous concevons des solutions de soutènement, de franchissement et de protection

RETAIN
CROSS
PROTECT

Ligne à grande vitesse Sud Europe Atlantique France

Quadrilatero Marche-Ombrie Italie

www.terre-armee.com

MURS DE SOUTÈNEMENT • TALUS RAIDIS • CULÉES DE PONTS • TRANCHÉES COUVERTES • SOLUTIONS DE STABILISATION DE PENTE

VINCI AIRPORTS REPREND 8 AÉROPORTS

Vinci Airports ajoute 8 aéroports d'Airports Worldwide (Omers) à son portefeuille.

La filiale de Vinci Concessions détient désormais à 100% l'aéroport de Belfast International (Irlande du Nord) et à 90% celui de Skavsta (Stockholm, Suède). Aux États-Unis, elle reprend la concession de l'aéroport Orlando-Sanford International en Floride. Elle hérite de l'exploitation totale des plateformes Hollywood Burbank et Ontario International (Californie), et Macon Downtown et Middle Georgia Regional (Géorgie).

Au Costa Rica, elle prend 45% de la concession de l'aéroport international Daniel Oduber Quiros de Liberia.

La cession d'Airports Worldwide inclut des gestions partielles d'aéroports dont celui d'Atlanta (Géorgie).

EGIS AU CANADA ET À LYON

Le ministère des Transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec a choisi le consortium Cima+/Egis comme conseiller-expert et ingénieur indépendant

de la rénovation lourde du tunnel Louis-Hippolyte-La-Fontaine à Montréal. Ce tunnel autoroutier date de 1967. Avec 1 400 m, il est le plus long tunnel immergé du Canada, selon Egis.

Les travaux auront lieu sans coupure de circulation (120 000 véhicules/jour). Le chantier ne peut excéder quatre ans dont deux seulement avec « impact majeur » sur le trafic.

→ Extension de la ligne 2 du tram lyonnais

En France, Egis a été choisi pour les études préliminaires et le suivi des travaux d'une nouvelle extension de la ligne 2 du tramway à Lyon. Le groupe avait déjà assuré la maîtrise d'œuvre du 1^{er} prolongement en 2016.

L'opération comprend la suppression du tiroir de retournement actuellement sous la gare Perrache au-delà de laquelle la 1^{re} extension avait eu lieu. Une zone de retournement et de stockage de deux rames est créée au nouveau terminus à Montrouget. Ce rameau desservira le quartier de La Confluence (Lyon 2^e) qui entre dans sa 2^e phase d'aménagement (zone du Champ et hôtel de région). Mise en service de ce prolongement : 2020. ■



© JAMES DUPONT/EGIS

Le tunnel Louis-Hippolyte-La-Fontaine à Montréal (Canada), qui date de 1967, va être rénové.

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

DÉMANTÈLEMENT ET DÉCHETS NUCLÉAIRES : EDF TROUVE DES PARTENARIATS



Cœur du réacteur à eau pressurisée de la centrale de Chooz (Ardennes) en cours de démantèlement.

La déconstruction des 130 réacteurs nucléaires à l'arrêt dans le monde représente un marché de 200 milliards d'euros d'ici à 2050. EDF, qui en démantèle 9 actuellement, a signé des accords avec des sociétés européennes sur le salon World Nuclear Exhibition du Bourget (Seine-Saint-Denis, 26-28 juin). Celui avec Veolia porte sur des robots qui travaillent au cœur de réacteurs de type uranium naturel graphite gaz (UNPGR), comme ceux de Bugey (Ain), Chinon

(Indre-et-Loire) et Saint-Laurent-des-Eaux (Loir-et-Cher).

→ 27 réacteurs Magnox au Royaume-Uni

D'autres accords rapprochent EDF et des acteurs du secteur : au Japon avec Orano (ex-Areva) pour le réacteur à neutrons rapides de Monju ; en Finlande et dans les pays nordiques, avec Fortum ; en Italie, avec la Società Gestione Impianti Nucleari, entreprise publique de déconstruction et déchets.

Les bases d'une coopération avec la Nuclear Decommissioning Authority britannique, chargée du démantèlement de 27 réacteurs Magnox (graphite), ont été paraphées.

Le numérique entre en force dans l'activité de démantèlement. Le CEA développe des outils numériques pour EDF.

→ Chantier virtuel

L'ingénierie nucléaire va être rassemblée sur la plate-forme 3DExpérience de Dassault Systèmes avec Capgemini. Y figurera, par exemple, un double numérique des centrales.

La maquette 3D de Demplus for nuclear, d'Oreka Solutions, rejoint le groupe EDF à travers le rachat de cette société⁽¹⁾. Les centrales y sont représentées en maquette numérique avec les données associées. Une entreprise de déconstruction peut visualiser son chantier, y déplacer un robot ou du personnel, simuler une découpe, évaluer un temps d'intervention, la sécurité, etc. ■

⁽¹⁾ Actionnaires : 90 % EDF Nouveaux Business, Luc Ardellier, fondateur, et CEA Investissement.

STOCKAGE : 10 GW D'ICI À 2035

EDF entend installer 10 GW de stockage d'électricité dans le monde d'ici à 2035, un investissement de 8 milliards d'euros, a-t-il annoncé fin mars.

Le stockage contribue à la transition énergétique, à côté de l'efficacité énergétique, de l'énergie nucléaire et des renouvelables.

Deux technologies sont utilisées. Les stations de transfert d'énergie par pompe - 6 installations en France - pourront être plus nombreuses mais il faut trouver des sites⁽¹⁾.

Le développement sera plus rapide avec les batteries. EDF en propose déjà aux particuliers équipés de capteurs photovoltaïques en auto consommation. Il s'intéresse à la Côte-d'Ivoire où il a déjà vendu plus de 15 000 kits solaires (panneau et batterie), et au Ghana, récemment pour les mêmes produits.

→ Batterie de 49 MW en Angleterre

En Outre-Mer, La Réunion, par exemple,

est équipée d'une batterie sur réseau, du type sodium-soufre (NaS), de 1 MW. Ce "stockage stationnaire" capte les kilowattheures éoliens ou photovoltaïques, et les relâche si besoin, en particulier pour équilibrer la fréquence du courant. Les projets de ce type en métropole ne sont pas mûrs.



Batterie de 49 MW en 20 conteneurs à la centrale à gaz de West Burton B (Angleterre).

Au Royaume-Uni, EDF Renewables⁽²⁾ a mis en service en juin une batterie de 49 MW lithium-ion à la centrale à gaz à cycle combiné de West Burton B, au nord de Nottingham (Angleterre). La batterie - 20 conteneurs de 2,45 MW (Nidec) - stocke jusqu'à 24,5 MWh. Elle est pilotée par un système d'EDF Store & Forecast (filiale).

→ 70 millions d'euros en R&D

Par ailleurs, le groupe double son budget recherche et développement dans ce domaine, soit 70 millions d'euros jusqu'à 2020.

Pour en savoir plus : www.edf.fr/plan-stockage-electrique ; www.edf-energies-nouvelles.com ; www.edf-re.com ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux n°903, janvier-février 2014, page 8.

⁽²⁾ EDF Renewables : filiale d'EDF Energy (Royaume-Uni) et d'EDF Énergies nouvelles (France).

3^e PONT SUR LA CATARAQUI (ONTARIO)

Le 3^e pont sur la Cataraqui à Kingston (Ontario, Canada) a été confié en conception-réalisation* à Systra associé à Kiewit et à Hatch.

Les partenaires partagent les risques et les bénéfices à parts égales. Le contrat de 180 millions de dollars (155 millions d'euros) a été remporté suite à une pré-sélection de 3 équipes.

Les travaux préparatoires ont débuté en septembre.

La construction de l'ouvrage doit commencer à l'été 2019 pour s'achever en 2021.

Le pont à arc en métal traverse la rivière sur 1,2 km, entre l'Est et l'Ouest de la ville.

Il comprend trottoirs et pistes cyclables.

* Integrated Project Delivery.



Vue actuelle du projet de pont à Kingston (Canada).

RACHATS CHEZ SOGECER

Malet (filiale de Spie Batignolles) a repris Sogecer équipement routier et Sogecer location. Le groupe Sogecer conserve ses activités génie civil et foncier/immobilier.

SOCOTEC DANS BIM IN MOTION

Socotec entre au capital de Bim in Motion, jeune entreprise française spécialisée dans l'assistance à maîtrise d'ouvrage, le pilotage et le Bim management de projets. L'entreprise coordonne, notamment, la convention Bim type suite à un appel à projets du Plan transition numérique du bâtiment.

COMPARATEUR RÉALITÉ/PROJET

Visual Inspect compare ce qui est réellement construit au projet. La solution relie une plate-forme internet à un Ipad (tablette). Les données de conception assistée par ordinateur sont chargées en 3D, en format compressé, et peuvent alors être rapprochées de celles du terrain. L'utilisateur relève les différences, documente les problèmes à l'aide de texte et d'images, et les réexporte vers la plate-forme.

Pour cela, il convient bien sûr de télécharger l'application mais aussi d'étalonner la tablette.

D'après Faro, éditeur de solutions de mesure et d'imagerie pour la métrologie, Visual Inspect peut s'utiliser en Bim.

RENFORCEMENT DE BÉTON EN MILIEU HUMIDE

La seconde génération des fibres synthétiques Strux 75/32, destinées au renforcement du béton, est compatible avec l'eau potable.

GCP qui le propose a obtenu un certificat de conformité du ministère de la Santé, en avril.

Ces macro-fibres sont utilisées à la place de fibres ou armure métalliques, afin d'écartier le risque de corrosion en milieu humide.



Bassin de rétention à Miramas (Bouches-du-Rhône) où la fibre a été testée.

PRÉPARER LE PASSAGE DU TUNNELIER EN COMBLANT LES CARRIÈRES



Les carrières sont comblées à partir de la surface, ici dans le secteur de Bagneux (Hauts-de-Seine).

La Société du Grand Paris (SGP) a décidé que la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express passerait sous les carrières là où elle en croise. Le tracé est plus profond que si elle les traversait. Le tunnel remonte aux emplacements des gares comme à Bagneux (Hauts-de-Seine). Il les traverse alors sur une courte distance.

Que le tunnel passe au-dessous d'une carrière ou à travers ponctuellement, l'ancien site d'extraction est comblé, en fonction des secteurs, sur une largeur de

30 m environ - 15 m de part et d'autre de l'axe du tunnel - ici donc, le plus souvent dans la partie de carrière située au-dessus du tracé.

« Deux secteurs sont surtout concernés par les carrières sur la 15 sud, environ 4 km entre Arcueil-Cachan (Val-de-Marne) et Châtillon-Montrouge (Hauts-de-Seine), et le quartier des Buttes-Halage à Créteil (Val-de-Marne), » informe Thierry Huyghues-Beaufond, responsable de l'unité infrastructure et méthodes constructives à la SGP. Dans

les Hauts-de-Seine, les travaux ont démarré à la mi-2017 et durent trois ans. Ces carrières de calcaire grossier appartiennent à l'État et dépendent de l'Inspection générale des carrières qui les surveillent.

→ Une opération en plusieurs étapes

La mise en sécurité des galeries d'une hauteur de 0,70 m à 1,80 m, a donné lieu à des études complémentaires et à une cartographie plus précise.

Les veines d'extraction sont d'abord bouchées aux extrémités de la zone à traiter. Les "masques" ou "barrages" sont réalisés en maçonnerie par du personnel ou par forage depuis la surface.

Puis les carrières sont remplies de ciment par gravité à partir de petits forages en surface. Du coulis est ensuite injecté sous pression pour un bon clavage des plafonds de galeries. Pour éviter une décompression, les terrains situés au-dessus sont renforcés par injection à partir d'autres forages sur une épaisseur variable selon les besoins.

→ Zone pavillonnaire

Le second secteur, à Créteil, est plus complexe à traiter car il s'agit d'une zone pavillonnaire. Les carrières sont bouchées par la technique gravitaire. Ici, le chantier a débuté au printemps 2018 pour se terminer un an plus tard.

Maîtrise d'œuvre : Setec (secteur de Bagneux) et Systra (Créteil). ■



Sondage de la profondeur.

25 YEARS OF THE U-SHAPED VIADUCT **1,000KM** DESIGNED IN **27** CITIES

Michael Wolff,
RMTA, UAE, 2014



SYSTRA's patented U-shaped viaduct is a low-cost, efficient, environmentally friendly mass and light rail transit solution that seamlessly integrates with the urban landscape. It is extremely fast and simple to build, offering unmatched construction flexibility in a complex urban environment.

"This innovation has been adopted worldwide since 1992 and is proven to be the best solution for urban transit."

Daniel Dutoit, Inventor of SYSTRA's U-shaped Viaduct

Dubai Metro Red and
Green Lines, Dubai, UAE



CHALEUR FATALE RÉUTILISÉE

La récupération de calories sur un four d'Arcelor Mittal fournit à elle seule l'eau chaude nécessaire en été au réseau de chaleur de Saint-Chély-d'Apcher (Lozère). La ville peut éteindre sa chaufferie bois.

Un échangeur récupère la chaleur du four de recuit qui monte à 1 000 °C et doit être refroidi. Il la transmet à un circuit dans l'usine, soit 8 à 10 GWh/an (chauffage et process). Puis le reste - 1 à 4 GWh/an - part dans le réseau urbain.

L'installation de 5,6 millions d'euros est aidée par l'Ademe (1,4 million) et par la région Occitanie (650 000 euros). Le projet est porté par Kyotherm (financeur).



© ARCELOR MITTAL

Échange de chaleur avec le four de recuit.

ÉCLAIRAGE MOBILE MOINS BRUYANT

Le mât d'éclairage Hilight B5+, alimenté par un moteur diesel, émet 55 dB(A) à 7 m au lieu des 58-66 courants sur ces équipements.

Pour y arriver, Atlas Copco a agi sur le bruit du moteur et du système de refroidissement (échappement et entrées d'air), et a utilisé des matériaux très isolants.



© DOMINIQUE EGRET

Panneaux hors d'eau lors d'une inondation.



© JF MOUSSEAU

Le champ de capteurs solaires thermiques occupe une ancienne décharge en bord de rivière.

L'eau chaude fournie à 500 logements, une piscine, un hôpital, une maison de retraite et un abattoir, l'a été à 100% cet été par des capteurs solaires thermiques à Châteaubriant (Loire-Atlantique).

En moins de trois mois, de sa mise en service début juin à fin août, l'installation a produit 300 MWh de chaleur, soit un tiers de la production annuelle garantie par l'exploitant, Cofely. Les 2 400 m² solaires sont raccordés au réseau de chauffage urbain de près de 10 km, boucle alimentée depuis 2011 par une chaufferie bois.

→ Nombreuses demandes de visite

L'opération, exceptionnelle par sa taille, a fait l'objet d'études approfondies dont les premières ont débuté à l'occasion de l'appel à projets de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) en 2012. « Nous faisons un premier bilan début octobre avec l'Ademe qui suit régulièrement l'installation et nous conseille, informe Dominique Egret, chargé du dossier à Châteaubriant, porteur du projet quand il était directeur des services techniques. Les demandes

pour visiter l'installation sont nombreuses, des collectivités s'y intéressent⁽¹⁾, des universitaires. »

La récupération de chaleur solaire a été importante. Trois ballons implantés sur le site peuvent recevoir 50 m³ chacun.

→ Sol très hétérogène

Le BRGM s'est déclaré intéressé par un

stockage de la chaleur en trop dans la nappe phréatique, l'été. En hiver, cette eau, moins froide, alimenterait une grosse pompe à chaleur qui, à son tour, remonterait la température du réseau, le but étant d'utiliser au maximum les calories gratuites.

Les 200 capteurs de 12 m² chacun sont implantés sur une ancienne décharge, revégétalisée. Ce sol étant très hétérogène, les 800 poteaux ont été noyés dans du béton pour empêcher leur arrachement.

La zone, le long de la rivière La Chère, est inondable. Les panneaux solaires et leurs dispositifs électriques sont "perchés" hors des hautes eaux.

→ Subvention : 70 %

L'installation solaire dont sa sous-station d'échange avec le réseau de chauffage urbain a coûté 1,5 million d'euros payés à 70% par le Fonds chaleur (Ademe). La municipalité s'est engagée à ce que la facture des abonnés baisse de 5%. ■

⁽¹⁾ Réseau Amorce : carrefour des collectivités territoriales et de professionnels pour une bonne gestion locale des déchets, des réseaux de chaleur et de l'énergie.



© DOMINIQUE EGRET

Les poteaux de chaque capteur de 12 m² sont stabilisés par micropieux.

INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : ville de Châteaubriant (Loire-Atlantique).

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Tecsol (solaire) et MCM (bâtiment sous-station, abords, etc.). Avant-projet détaillé : Girus. Bureau d'études sols : Ginger, Hydrogeotechnic.

INSTALLATION SOLAIRE : Pasquet Équipements.

PANNEAUX SOLAIRES : KBB.

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 7 AU 10 NOVEMBRE

BFUP et structures

Lieu : Fuzhou (Chine)
<http://2018uhpc.fzu.edu.cn/conf/>

• 13 AU 15 NOVEMBRE

Rock Slope Stability (C2rop)

Lieu : Chambéry (Savoie)
www.c2rop.fr/symposium-rss-2018/

• 14 ET 15 NOVEMBRE

Journées techniques du Groupement pour la recherche sur les échangeurs

Lieu : Aix-les-Bains (Savoie)
www.greth.fr

• 20 AU 22 NOVEMBRE

Salon des maires et des collectivités locales

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

• 22 NOVEMBRE

11^e rencontres de l'assurance construction

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

• 22 NOVEMBRE

2^e assises nationales de l'éolien terrestre

Lieu : Paris
<https://ser-evenements.com>

• 24 AU 28 NOVEMBRE

Geomeast : infrastructures durables, intégrité structurelle

Lieu : Le Caire (Égypte)
www.geomeast.org

• 27 ET 28 NOVEMBRE

Réhabilitations et maintenance des barrages et des digues

Lieu : Chambéry (Savoie)
www.barrages-cfbr.eu

• 27 AU 30 NOVEMBRE

Pollutec

Lieu : Lyon
www.pollutec.com

• 4 AU 6 DÉCEMBRE

Semaine de la chaleur renouvelable

Lieu : Paris (Forum des Halles)
www.clubinternational.ademe.fr

• 11 DÉCEMBRE

Energy Class Factory (performance énergétique et hydrique, usines et infrastructures)

Lieu : Lyon (Cité internationale)
www.ademe.fr

• 6 ET 7 FÉVRIER

Colloque annuel du Syndicat des énergies renouvelables

Lieu : Paris (Unesco)
www.enr.fr

• 11 AU 13 MARS

12^e rencontres géosynthétiques

Lieu : Nancy
www.rencontresgeosynthetiques.org

• 12 AU 14 MARS

JEC World (composites)

Lieu : Paris Nord-Villepinte
www.jecomposites.com

• 20 ET 21 MARS

Digues 2019 : systèmes et ouvrages de protection contre les inondations marines et fluviales

Lieu : Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône)
www.cfg.asso.fr

• 27 AU 29 MARS

Symposium Iabse : pour un environnement construit résilient (infrastructures)

Lieu : Guimarães (Nord-Ouest Portugal)
www.iabse.org

• 2 ET 3 AVRIL

Bim World

Lieu : Paris (Porte de Versailles)
www.bim-w.com

• 3 AU 9 MAI

Ingénierie et innovation à la rencontre de l'archéologie, de l'architecture et de l'art (45^e congrès ITA-AITES)

Lieu : Naples (Italie)
www.wic2019.com

FORMATIONS

• 5 ET 6 NOVEMBRE

Mesures compensatoires pour la biodiversité

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

• 13 ET 14 NOVEMBRE

Sédiments de dragage : traitement à terre et valorisation

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

• 14 AU 16 NOVEMBRE

Concevoir et gérer les pôles d'échanges multimodaux

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

• 15 ET 16 NOVEMBRE

Dimensions juridiques du Bim

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

• 19 ET 20 NOVEMBRE

Gares : dimensionnement et éléments de coût

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

• 21 AU 23 NOVEMBRE

Piloter les études acoustiques des transports

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

• 28 AU 30 NOVEMBRE

Risques juridiques et réglementaires des projets d'infrastructure

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

NOMINATIONS

AECON :

Jean-Louis Servranckx quitte Eiffage pour présider l'entreprise canadienne de BTP, Aecon où il remplace John Beck.

BOUYGUES CONSTRUCTION :

Trois personnes rejoignent le comité exécutif : Bernard Mounier, en tant que directeur général délégué chargé de Bouygues Bâtiment France et Europe (Suisse, Belgique, Luxembourg, Espagne, Pologne, République tchèque, Roumanie), Nicolas Borit, président de Bouygues Bâtiment International et Marie-Luce Godinot directrice adjointe de Bouygues Construction chargée de la transformation numérique, de l'innovation et du développement durable. Quant à Olivier-Marie Racine, directeur général délégué, il prend aussi la responsabilité

du nouveau pôle énergies et services.

CIDB :

Le Centre d'information et de documentation sur le bruit est désormais présidé par Jean-Claude Scoupe à la suite de Dominique Bidou.

EPAMSA :

Damien Behr devient directeur général par intérim de l'Établissement public d'aménagement du Mantois-Seine Aval après le départ en retraite de Xavier Hemeury.

GICAN :

Suite à la réorganisation du Groupement des industries de construction et activités navales, Arnaud Martins Da Torre est nommé délégué à l'internationalisation des entreprises et à l'export, Jacques Orjubin, délégué à la communication et aux relations publiques, et Jean-Marie Dumon, délégué à la sécurité.

GRAND PARIS :

Patrick Braouezec a été élu président du conseil de surveillance de la Société du Grand Paris, et François Poupard, vice-président.

SNBPE :

Pascal Philibert a été élu président en Lorraine du Syndicat national du béton prêt à l'emploi.

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE :

Le député Julien Dive (Aisne) préside la mission d'information sur les freins à la transition énergétique (Assemblée nationale) et Bruno Duvergé (Pas-de-Calais) en est le rapporteur.

VEOLIA :

Estelle Brachlianoff est directrice générale adjointe chargée des opérations depuis le 1^{er} septembre, et Claude Laruelle est directeur général adjoint aux finances.

TOUT LE GÉNIE CIVIL, SANS OSTENTATION

« EFFICACE SANS OSTENTATION, MAIS RECOURANT AUX TECHNIQUES LES PLUS POINTUES ET LAISSANT DEVINER UNE PERFECTION D'EXÉCUTION INCOMPARABLE ». TELLE ÉTAIT LA PHILOSOPHIE DE SON FONDATEUR RENÉ GREISCH EN 1959. **ENTRETIEN AVEC VINCENT DE VILLE DE GOYET, PRÉSIDENT ET DIRECTEUR SCIENTIFIQUE DE GREISCH.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



EN 2018, RENÉ GREISCH ANIME TOUJOURS LES 200 COLLABORATEURS DU BUREAU D'ÉTUDES GREISCH QUI FÊTERA L'ANNÉE PROCHAINE SES 60 ANS, AVEC UNE DIVERSITÉ ET UNE QUALITÉ DE RÉFÉRENCES À FAIRE PÂLIR TOUS SES CONFRÈRES. MAIS AUSSI AVEC DES SPÉCIFICITÉS QUE MET EN ÉVIDENCE POUR TRAVAUX SON PRÉSIDENT ET DIRECTEUR SCIENTIFIQUE VINCENT DE VILLE DE GOYET.

Quelles sont les origines de Greisch et les moments les plus significatifs de son histoire ?

Le bureau Greisch a été fondé en 1959 par René Greisch qui était à la fois ingénieur et architecte. Installé dès le départ au cœur de la région liégeoise qui, il y a deux siècles, a vu naître la révolution industrielle et possède une longue tradition d'ingénierie, ses bureaux sont aujourd'hui situés dans le Liège Science Park de l'Université de Liège. Il dispose également de deux autres implantations : à Bruxelles et au Grand-Duché de Luxembourg.

C'est à partir de 1974 que le bureau débute ses premières études d'ouvrages d'art avec la construction du viaduc de Vilvorde, sur le grand ring de Bruxelles, point de départ de l'aventure des ponts.

En 1984, René Greisch en fait la S.A. Bureau d'Études Greisch (BEG), tel qu'on le connaît aujourd'hui, en association avec Raymond Louis et Jean-Marie Cremer.

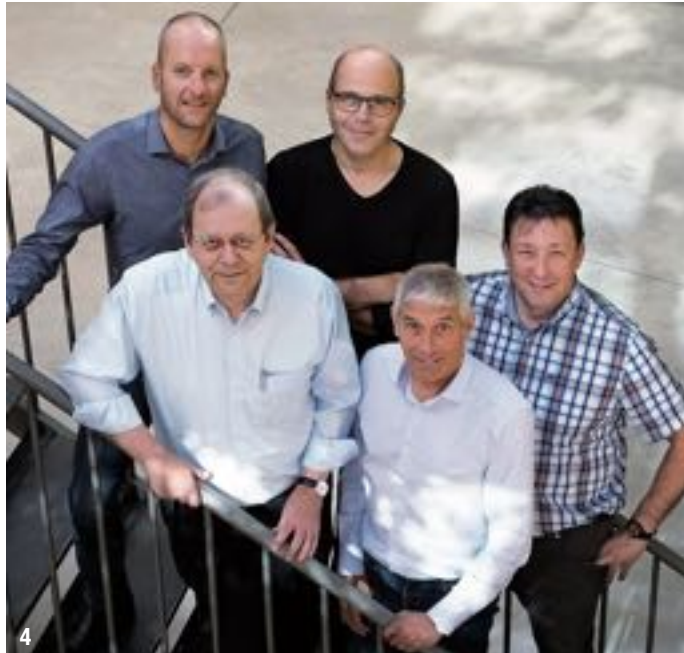
L'aventure se poursuit en 1987 avec le pont à haubans de Ben-Ahin, en Belgique, qui, avec une mise en place par rotation, va contribuer à la renommée du bureau à l'international et initier les

FIGURE 1 © GREISCH - FIGURE 2 © GREISCH - FIGURE 3 © GREISCH



- 1- Vincent de Ville de Goyet, président et directeur scientifique de Greisch.
- 2- Le viaduc de Vilvorde, point de départ de l'aventure des ponts.
- 3- Le Ferrari World d'Abu Dabi.
- 4- De gauche à droite et de haut en bas, le Comité de Direction de Greisch : Luc Demortier, Vincent Servais, Jean-Yves Del Forno, Vincent de Ville de Goyet, Pierre Baar.
- 5- Le troisième pont sur le Bosphore : montage des segments suspendus.
- 6- Le pont "bowstring" à deux arcs de Haccourt sur le canal Albert.

© GREISCH



VINCENT DE VILLE DE GOYET : PARCOURS

Vincent de Ville de Goyet est ingénieur civil des constructions de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège et docteur en sciences appliquées après avoir soutenu une thèse dans le domaine du calcul numérique.

Il passe dix ans dans cette université, y étant chargé notamment de la création et du développement du programme de calcul FinelG.

Puis, il intègre le bureau d'études Greisch en décembre 1989, apportant dans ses "bagages", en accord total avec l'Université de Liège, le programme FinelG, dont il continue à assurer le développement aussi bien au sein de Greisch qu'à l'Université dont il fait partie du corps enseignant.

Parallèlement, il lance plusieurs programmes de recherche financés par la Région wallonne tout en supervisant, au sein de Greisch, les études spéciales, qu'il se plaît à appeler « *les moutons à cinq pattes* ».

Également directeur scientifique de Greisch, il veille, au sein du bureau d'études, à maintenir la dynamique d'une équipe de recherche et développement de cinq personnes créée en 1990.

Il assure plusieurs cours à l'Université de Liège (conception des ouvrages d'art et calcul numérique en Génie Civil) ainsi qu'au CHEC à Paris.

Vincent de Ville de Goyet est président de Greisch depuis mi- 2015.

collaborations sur de nombreux projets en France.

Après le décès de René Greisch en 2000, la société continue de se développer sous la direction de Jean-Marie Crémer puis de Clément Counasse, et prend une nouvelle dimension avec la réalisation, de 2000 à 2004, du viaduc de Millau. La création de Canevas (bureau d'architecture) en 2004, l'acquisition du bureau bruxellois bgroup Infra en 2006 puis de Neo-Ides, en 2015, spécialisée dans la conception énergétique des bâtiments confèrent à la société sa structure actuelle, offrant aux clients tant institutionnels que pri-

vés une offre de services diversifiée et complète.

Notre volonté est de couvrir tout le Génie Civil tout en maintenant une relation privilégiée entre architectes et ingénieurs.

L'une des particularités de Greisch est la présence d'architectes au sein de son équipe, menant à bien la conception d'ouvrages, parallèlement à des missions de conseil en stabilité. Cette double activité remonte à ses origines et à la double formation de son fondateur.

Elle l'amène à concevoir ses propres ouvrages d'art et sa propre architecture, à côté des missions où il s'efforce de servir au mieux les auteurs de projets, les architectes extérieurs à la société ayant développé le principe théorique d'un ouvrage ou le concept esthétique d'un bâtiment, mais aussi les entreprises lors des études d'exécution en les accompagnant pour définir la méthode de construction la plus efficace.

Par ailleurs, sa localisation dans le parc scientifique de l'Université de Liège et sa collaboration étroite avec les professeurs et les chercheurs de la Faculté des Sciences Appliquées de cette université lui permet d'être à la pointe du savoir, de disposer des résultats des études les plus récentes et de développer lui-même des outils de calcul très performants, à l'aide d'une cellule de cinq personnes affectées exclusivement à la R&D.

Greisch en 2018 en quelques chiffres et quelques mots ?

Greisch emploie actuellement 200 collaborateurs au nombre desquels 100 ingénieurs, 12 architectes, 75 techniciens, 2 graphistes designers, 6 informaticiens et 6 employés administratifs. ▷

© ICA



© GREISCH



La société a réalisé en 2017 un chiffre de 18 millions d'euros dont environ 25 % à l'international.

Le bureau est aujourd'hui dirigé par un Comité de Direction comprenant cinq collaborateurs : Luc Demortier, directeur du pôle Bâtiments, Vincent Servais, directeur de la conception, Jean-Yves Del Forno, directeur du pôle Infrastructures, c'est-à-dire Génie Civil et ouvrages d'art, Pierre Baar, directeur administratif et de la gestion journalière et moi-même, président et directeur scientifique.

Quelle est la présence de Greisch à l'international ?

À l'international, Greisch est présent essentiellement en Europe (Allemagne, Espagne, France (plus de 50 projets achevés ou en cours), Luxembourg, Portugal) mais nous avons aussi quelques grandes références en Russie, aux États-Unis et en Amérique du Sud, en particulier dans le domaine des halls industriels ainsi que dans les Émirats Arabes Unis : Abu Dabi avec le Ferrari World et la clinique Cleveland et Riyadh avec les études d'exécution de la couverture de 11 stations des lignes de métro 1 et 2 confiées à Eiffage. À noter que ces études sont réalisées à l'aide d'outils BIM (Rhino, Grasshopper, Tekla) en collaboration avec les équipes d'Eiffage et du bureau d'études de la façade. Pour la clinique Cleveland, hôpital avant-gardiste en matière de techniques hospitalières, nous avons réalisé l'étude de la stabilité des façades vitrées de l'ensemble des galeries.

Pour le parc d'attraction de 200 000 m² du Ferrari World, la mission concernait le design des façades et de la couverture métallique.

Parmi les projets en cours dans les Émirats Arabes Unis, il faut également



© GREISCH

7

FinelG : UNE SPÉCIFICITÉ

L'une des spécificités de Greisch réside dans le fait qu'il a développé son propre programme de calcul : FinelG.

Créé en collaboration avec l'Université de Liège, ce programme qui concerne la modélisation du comportement des structures est un outil de calcul informatique complexe approprié à différentes missions. Ce programme a été utilisé pour des ponts à tablier métallique tels que le viaduc de Millau et le troisième pont sur le Bosphore mais aussi en béton comme le pont de Coimbra au Portugal et le pont-canal du Sart ainsi que pour la plupart des projets du bureau depuis plus de 30 ans.

Pour les ouvrages les plus complexes, Greisch réalise également des essais en soufflerie dans des installations basées à Aix-la-Chapelle, Liège, Milan et Nantes.

citer le Qatar Bahrain Causeway, une chaussée reliant les deux états du Qatar et de Bahrain, d'une quarantaine de kilomètres de long, composée de deux viaducs sur environ 22 km. Ces deux ponts dessinés par les architectes Lavigne et Chéron, initialement conçus par une compagnie d'ingénierie danoise, ont été optimisés par Greisch grâce à l'utilisation de l'acier pour toutes les structures principales. Une méthode de construction a également été élaborée. La travée principale du

plus grand pont mesure 250 m de long. Au Portugal, nous avons réalisé le viaduc ferroviaire du Sado en partenariat avec le bureau d'études GRID (Lisbonne). La mission de Greisch comprenait l'avant-projet, le projet et l'exécution de l'ouvrage de franchissement, GRID étant en charge de l'étude des viaducs d'accès et des fondations. La particularité de cet ouvrage de 480 m de long prolongé par deux viaducs de plus de 1 100 m chacun, réside dans la section droite hexagonale des arcs

et la continuité structurelle du tablier entre les trois ponts. Implanté dans une zone de forte sismicité, il est pourvu de transmetteurs longitudinaux au droit des appuis.

En Turquie, Greisch a participé à la construction du troisième pont sur le Bosphore, dont l'avant-projet est le résultat d'un concours remporté par Michel Virlogeux (France) et Jean-François Klein (Suisse), la phase projet étant assurée par T-Ingénierie et Greisch pour le compte de İçtaş-Astaldi⁽¹⁾.

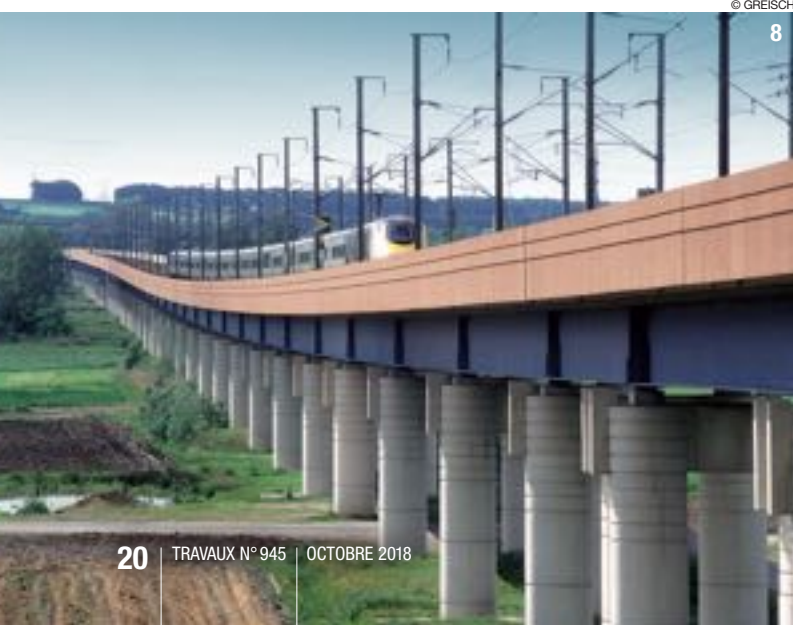
Notre mission était très complète : calculs généraux de la structure en service, propositions de méthodes de construction, plans du tablier métallique de la travée principale, études dynamiques pour vérifier le comportement de la structure sous les effets du vent durant les phases de construction et en service, du passage de trains et d'un séisme.

Pour terminer avec ce bref panorama de nos interventions à l'international, il convient de citer la construction de quatre nouveaux ponts routiers haubanés sur le Rio Wele à Oyala, en Guinée Équatoriale. Il s'agit d'une mission complète pour l'entreprise Besix.

Les ouvrages sont constitués d'un tablier en béton précontraint porté par deux nappes latérales de 2x8 haubans s'accrochant au total sur quatre pylônes. La partie inférieure des pylônes est en béton armé tandis que la partie supérieure, sur lesquels s'ancrent les haubans, est métallique.

Dans quels domaines les premières réalisations ont-elles été effectuées lors de la création du bureau ?

Nos premières réalisations ont concerné le domaine du bâtiment mais elles se sont également élargies rapi-



© GREISCH

8



© GREISCH

9

dement aux bâtiments industriels, plus particulièrement à la conception de structures d'entrepôts, qui demeure une activité de fond de Greisch, en collaboration avec l'ensemblier allemand Kocher, dans le dimensionnement de halls de stockage dont les dimensions peuvent atteindre 7000 m² (115 m x 50 m).

Greisch réalise de tels entrepôts en permanence, en Belgique mais aussi en Allemagne, au Brésil, au Chili, au Mexique, notamment, en intervenant toujours avec cet ensemblier.

Depuis la première réalisation de rayonnages pour une entreprise allemande en 1969, Greisch s'est fait une spécialité de ce vaste domaine qui va de l'entreposage de livres pour un éditeur jusqu'à la construction de bâtiments de type silo où se combinent la charpente des rayonnages et celle de l'édifice. Cette architecture qui intègre les contraintes de charge, de circulation, de manutention - celle-ci étant souvent automatisée - est au service de l'efficacité industrielle et trouve sa beauté dans une parfaite adéquation aux exigences de fonctionnement. Quelques 250 réalisations de ce genre sont déjà à notre actif.

Parmi les premiers ouvrages réalisés par Greisch, quels sont ceux qui ont le plus contribué à asseoir sa réputation ?

Le viaduc de Vilvorde, en 1974, l'une des composantes du grand ring de Bruxelles, a apporté une solution innovante dans la conception du tablier métallique au niveau du renforcement des poutres transversales supportant le platelage en dalle orthotrope. Il a d'ailleurs été couronné par le Prix européen de la Construction Métallique en 1979.



10

© GREISCH

7- Le viaduc de Millau avant le dernier poussage.

8 Le viaduc de la Haute Colme près d'Arras, sur la ligne TGV Nord.

9- Le viaduc de l'Arc sur la ligne TGV Méditerranée.

10- Mise en place par redressement du pylône de télécommunications de la RTBF à Anlier.

11- Le viaduc de la Savoureuse sur la LGV Rhin-Rhône.

12- Le viaduc de la Grande Ravine, à La Réunion.

À noter qu'à cette époque, alors que la règle à calcul était encore l'instrument des ingénieurs, René Greisch et son équipe étaient les premiers à faire des calculs par ordinateurs, avec le Centre de Calcul de Liège, et qu'ils ont d'ailleurs utilisé les ordinateurs personnels dès qu'ils sont apparus sur le marché.

Le bureau Greisch s'est ainsi imposé en proposant aux maîtres d'ouvrage et aux entreprises ses solutions novatrices, ses variantes structurellement plus efficaces, moins coûteuses et plus légères, pour une série d'autres projets qui étaient alors en préparation dans le pays.

Pour les ponts sur le canal Albert, qui relie le bassin industriel liégeois au port d'Anvers, Greisch s'est imposé pour le remplacement de sept ouvrages de franchissement dont quatre *bow-string*

d'une conception inédite. Celui de Haccourt, en particulier, présente une structure à deux arcs formés de caissons en tôles soudées, complètement lisses extérieurement, en supprimant les contreventements entre les arcs et formant des lignes continues : les nouveaux logiciels de calcul ont permis de simplifier la forme et les modes d'assemblage, réduire la main d'œuvre et le nombre des soudures ainsi que les points de corrosion.

Le pont de Ben-Ahin, sur la Meuse, construit entre 1984 et 1987, est l'ouvrage qui nous a fait connaître à l'international. Il s'agit d'un ouvrage haubané en béton précontraint dont le pylône est l'unique support, au moyen d'une nappe centrale de haubans symétriques un tablier offrant une travée suspendue de 168 m pour une longueur totale de 350 m. Le tablier a été construit sur cintres en même temps que le pylône, ce qui a permis de gagner un an sur les délais. Après la mise en tension des 40 haubans, on a fait pivoter le tout par une rotation de 70° autour de l'axe du pylône, afin d'amener le pont dans sa position définitive en une seule opération, particulièrement spectaculaire.

Comment Greisch a-t-il été amené à travailler en France et en particulier sur le viaduc de Millau ?

Si le bureau d'études Greisch avait déjà dépassé les frontières, notamment après la réalisation des ponts de Ben-Ahin et de Wandre, c'est à partir de ce moment que la visite de ces ouvrages par un groupe d'ingénieurs français mené par Michel Virlogeux a entraîné un désir de collaboration et que notre bureau d'études a été appelé en France pour réaliser les études d'exécution de nombreux ouvrages. ▶

© GREISCH

11



© THIERRY DUVIVIER

12





13

SANS OUBLIER LE BÂTIMENT

Pour être complet, il est intéressant d'ajouter quelques lignes sur des réalisations récentes ou en cours de Greisch dans le domaine du bâtiment.

Pour la Tour des Finances de Liège, de 120 mètres de hauteur, le bureau a assuré une mission complète de stabilité.

Greisch a également assuré une mission complète de stabilité pour le Centre hospitalier Delta à Bruxelles ainsi que pour l'hôpital de Knokke-Heist (en association avec SCES).

Pour le nouveau siège du journal Le Monde, à Paris (architectes Snøhetta, Oslo, & SRA, Paris), la mission porte notamment sur l'étude de vérification et de renforcement des couvertures de voies existantes, franchies par cet ouvrage-pont à structure métallique, et les études de montage et de contreflèches de cette charpente complexe ainsi que la vérification structurelle des nœuds principaux.



14



15

Après le pont de Layrac sur le Tarn en 1989, il a réalisé les études d'exécution d'une vingtaine d'ouvrages principalement des viaducs ferroviaires en France. L'étude du viaduc TGV de la Haute Colme, le plus long de France à cette époque, près de Saint-Omer a été menée en 1992. Elle a été l'occasion d'étudier le comportement dynamique de ce nouveau type d'ouvrage que la SNCF commençait à édifier sur son nouveau réseau à grande vitesse, à savoir des ponts bipoutres avec contreventement horizontal inférieur.

Greisch a ensuite participé à la construction des quatre grands ouvrages métalliques sur la ligne TGV Méditer-

ranée entre 1996 et 1999 et qualifiés d'exceptionnels par la SNCF, notamment le viaduc de Donzère (1998) sur le canal du Rhône, avec l'architecte Marc Mimram, les viaducs de Mornas (1998) et Mondragon (1999) avec l'architecte Jean-Pierre Duval, le viaduc de l'Arc (1998), avec l'architecte Bruno Gaudin.

En 2000, le calcul du pont routier au-dessus de la Loire à Orléans, dessiné par Santiago Calatrava et baptisé Pont de l'Europe, a représenté un véritable défi. La structure imaginée par Calatrava, un arc *bow-string* décentré et incliné, appuyé sur deux tripodes inversés, ainsi que la mise en place

de l'ouvrage par lancement nécessitaient des calculs extrêmement complexes. Le groupe Eiffage s'est tourné vers nous en 2000 afin d'étudier la faisabilité de la construction du viaduc de Millau, avec un tablier métallique. La nouveauté structurelle de cet ouvrage dont le dessin est dû à Michel Virlogeux et à l'architecte anglais Norman Foster résidait dans la multiplication des pylônes supportant le tablier, système de fonctionnement encore non utilisé jusque-là. Eiffage a fait appel à nous pour l'ensemble des calculs généraux, le dimensionnement final du tablier métallique, des pylônes et des haubans mais également pour la définition de la méthode

de montage et le suivi complet de la construction.

Pour situer l'ampleur de l'opération, notre équipe a travaillé 80 000 heures sur l'ouvrage et consacré entre 10 et 15% de ce temps pour le comportement de la structure telle qu'elle existe aujourd'hui. Le reste - de l'ordre de 85 à 90% - a été mobilisé uniquement pour le phasage de construction. 80 000 heures, cela représente le travail d'une personne pendant 55 ans. Fort de l'expérience du viaduc de Millau, Greisch a de nouveau apporté son concours à Eiffage pour le viaduc de la Grande Ravine, à La Réunion (2006-2009) : un pont à béquilles muni d'un



16



17

tablier métallique avec dalle orthotrope de 288 m de long, conçu par l'architecte A. Spielmann et le bureau d'études Setec, mis en place par poussage à partir de chacune des rives de la vallée. C'est pour l'étude d'exécution complète de la structure et particulièrement pour l'opération difficile et périlleuse du lançage au-dessus d'une vallée très profonde que Greisch a apporté son concours, en simplifiant la procédure initialement prévue et en l'accompagnant sur place au cours des phases les plus délicates.

Toujours à La Réunion, pour le viaduc de la Ravine Fontaine, au-dessus de la même vallée au profil en V très aigu, malgré les inquiétudes du maître d'ouvrage concernant l'instabilité du sol, Greisch est également intervenu avec les architectes F. Zirk et G. Dezeuze et a fait prévaloir le principe d'un pont en arc unique, avec un tablier supporté par des pilettes radiales et non verticales. L'arc présentant une ouverture de 170 m a été réalisé en acier et supporte un tablier mixte acier et béton de 200 m de long. Compte tenu de la géométrie générale de la structure soutenant l'ouvrage, l'arc varie en épaisseur et en largeur. Ainsi conçue, la structure offre à la fois originalité et rare élégance. Mais elle a nécessité une longue élaboration.

Parmi les nombreuses références à la construction desquelles Greisch a participé en France, deux d'entre elles sont particulièrement emblématiques, ne serait-ce qu'aux yeux du grand public : le Stade de Lille et la Fondation Louis Vuitton.

Pour le Stade de Lille (2009-2011), dont le dessin général a été conçu par les architectes Valode & Pistre (Paris)

et Ferret (Bordeaux), et l'avant-projet par Arcora, Eiffage Construction Métallique a fait appel à Greisch afin d'apporter des améliorations structurelles à l'avant-projet, mettre au point les études d'exécution complètes et aider à concevoir les opérations de montage, en particulier les phases de hissage de la charpente.

Schématiquement, l'édifice comporte deux grandes poutres de 200 m reliées entre elles par deux poutres transversales formant une structure quadrilatère permettant de faire coulisser les éléments de la toiture amovible sur deux poutres de roulement.

La conception des méga-poutres a été revue en fonction d'un raisonnement lié à la problématique du temps de

soudure mais aussi d'un raisonnement industriel qui intègre au maximum la préfabrication des éléments métalliques en usine et simplifie le processus d'assemblage. Elle a aussi fait intervenir dans le domaine de la construction métallique des procédés de précontrainte utilisés essentiellement dans celui de la construction en béton.

L'étude du montage et du hissage de la toiture était un autre aspect de la mission. Les méga-poutres sans leurs mailles d'extrémité ont été assemblées à plat au sol et pourvues des éléments de fléaux, bracons, pannes et contreventements qui constituent les trois parois de la poutre triangulée. Puis, les méga-poutres ont été relevées à 90° et placées à la verticale au moyen de grues. Elles ont ensuite été munies de leurs mailles d'extrémité avec les poteaux d'about insérés dans les méga-poteaux d'appui en béton, puis ont été assemblées entre elles par les poutres transversales pour former le grand quadrilatère d'ouverture. Enfin, cette structure encore au sol a été pourvue des quatre éléments de la toiture mobile puis a été hissée. L'ouvrage de plus de 200 m de long a pu ainsi être relevé par des vérins hydrauliques de grande capacité pour atteindre sa hauteur définitive à 20 m au-dessus du sol.

Et pour la Fondation Louis Vuitton ?

La Fondation Louis Vuitton (2009-2012), dans le Bois de Boulogne à Paris, conçue par l'architecte Frank Gehry, se présente extérieurement comme "un gigantesque nuage de verre posé sur un plan d'eau".

La façade du bâtiment, appelée "iceberg" est faite de grandes surfaces en panneaux de Ductal aux géométries complexes et d'enveloppes vitrées.

L'ensemble forme le clos et couvert tandis qu'une deuxième peau, la verrière, constituée de 12 voiles de verre toutes différentes et construites par Eiffage, l'enveloppe de manière fluide sans créer de nouveaux espaces fermés. Pour l'ensemble des 12 voiles, le bureau d'études Greisch a été chargé d'une mission de mise au point du projet d'étude d'exécution : conception des assemblages mixtes bois-acier, très complexes, vérification des charpentes métalliques et en bois et du vitrage, études statistiques et dynamiques liées aux effets du vent, analyse structurelle de la résistance au feu, études liées au processus de montage et aux différentes phases de construction.

La difficulté de la mission tenait notamment à la géométrie hors du commun des verrières, rendant obligatoire l'utilisation de logiciels informatiques de haut niveau dès la conception, spécialement pour le dimensionnement.

Elle demandait aussi une connaissance approfondie du comportement des quatre matériaux utilisés - inox, verre, bois et acier - qui travaillent en commun, malgré leurs propriétés mécaniques et thermiques fort différentes les unes des autres.

Nous avons d'abord été connus en France pour les structures métalliques mais les entreprises françaises reconnaissent aujourd'hui que les ingénieurs belges ont également une très bonne formation dans le domaine des ouvrages en béton.

Pourriez-vous évoquer maintenant quelques chantiers mettant en évidence certaines des spécificités de Greisch ?

Dans le domaine fluvial, l'une de nos références importantes demeure le pont-canal du Sart à Houdeng. ▶

13- La Tour des Finances à Liège, de 120 m de hauteur.

14- L'hôpital de Knokke-Heist.

15- Le futur siège du journal Le Monde, à Paris.

16- Le viaduc de Ravine Fontaine, à arc unique, à La Réunion.

17- Le Grand Stade de Lille.

18- La Fondation Louis Vuitton pour la Création, à Paris : "un gigantesque nuage de verre".

19- Le pont-canal du Sart à Houdeng, mis en place par poussage.

© MARC MONTAGNON

18



© GREISCH

19



Long de 498 m et large de 46 m, il offre une structure en béton précontraint portée par deux files de colonnes de 3 m de diamètre.

Le bureau Greisch a emporté le marché en démontrant que les progrès de la technique de précontrainte survenus dans les années 80-90 avec l'utilisation de câbles gainés et graissés remplaçables pouvaient trouver de nouvelles applications dans le cas précis.

La réflexion architecturale et paysagère sur ce pont a priori assez massif a été menée par Greisch avec la réflexion sur son mode de construction de façon à créer un ouvrage qui, malgré son volume inévitable, s'impose d'abord par la simplicité de ses lignes et sa lisibilité fonctionnelle.

La réalisation du tablier s'est déroulée sur un chantier fixe et l'ouvrage a été mis en place par poussage, ce qui a conduit à déplacer au cours des dernières phases du poussage quelque 64 000 tonnes (l'équivalent de 10 Tour Eiffel), battant les records des plus lourds tabliers mis en place par ce procédé à ce jour. C'est aussi le premier pont-canal réalisé en béton précontraint à ce jour, ce qui lui a valu en 2003 un prix décerné à Osaka par la Fédération Internationale du Béton.

Le poussage est une technique que nous avons utilisée à de nombreuses reprises avec succès. Elle présente plusieurs avantages tant en ce qui concerne la qualité et la rapidité de fabrication sur la terre ferme que de la sécurité des équipes qui ne travaillent jamais dans le vide. Il en a été de même à Millau dont le tablier est à 260 m de hauteur.

À côté de ces ouvrages qui nous ont fait connaître à l'international, il faut souligner qu'une grande partie de nos études couvrent le génie civil à

GREISCH : L'AVENIR

« Depuis une quinzaine d'années, nous veillons à diversifier notre offre de service. Cette diversification insufflé une dynamique de croissance notable.

Outre le domaine des ouvrages d'art, bien connu, notre équipe a acquis une solide expérience dans le domaine du bâtiment, incluant la stabilité de bâtiments de grande hauteur, l'expertise énergétique allant de la conception à l'équipement technique et son suivi énergétique. Plusieurs projets sont actuellement en cours d'études et de réalisation dans les domaines hospitalier, administratif ou scolaire.

Dans le secteur des infrastructures, les études de grands projets comme le tram de Liège, le métro de Bruxelles, l'écluse à grand gabarit d'Ampsin-Neuville ou les extensions des aéroports de Liège et Charleroi aiguisent nos compétences et nous permettent de nous positionner sur de grands projets à l'étranger tels que le Canal Seine Nord, le Grand Paris ou divers aéroports à travers le monde.

Tous ces projets sont aujourd'hui abordés par la porte du BIM, dans l'optique de fournir un outil à haute valeur en complément de nos études.

Avec ses valeurs fondamentales, la recherche d'excellence, la collégialité et l'épanouissement personnel, le bureau Greisch est résolument tourné vers l'avenir ».

proprement parlé et/ou les bâtiments. Citons, par exemple, la station de métro Art Loi à Bruxelles, des tranchées couvertes, des murs de quai, de nouvelles liaisons routières Cerexhe-Heuseux-Beaufays autour de l'agglomération de la ville de Liège ou un nouvel aménagement des quais de Meuse à Liège avec l'aide de l'Atelier Corajoud-Salliot-Taborda, auteur du même type d'aménagements à Bordeaux.

Dans le même domaine, nous venons de dessiner et calculer trois nouvelles écluses sur la Meuse, pour des bateaux d'une capacité de 9 000 tonnes, ce qui correspond à des convois poussés de quatre barges.

La nouvelle gare TGV de Liège-Guillemins a été également construite par poussage en raison de l'impossibilité

d'interrompre la circulation des trains de façon permanente pendant les travaux : les 39 arcs constituant la toiture ont été construits à côté de la gare

20- La nouvelle gare de Liège-Guillemins due à l'architecte/ingénieur S. Calatrava.

21- La conception de structures d'entrepôts demeure une activité de fond de Greisch, tant en Belgique qu'à l'international.

existante puis mis en place par poussage perpendiculairement aux voies. Autre exemple de la capacité de Greisch d'innover dans le domaine des structures spéciales, même s'il est un peu ancien : pour le pylône de télécommunications d'Anlier, une structure métallique de 185 m de hauteur, construite pour remplacer un pylône abattu par la tempête de 1990, les études menées avec l'aide du logiciel FinelG ont permis de simuler son comportement sous les vents extrêmes. Elles ont conduit à l'utilisation de profilés tubulaires plus aérodynamiques ainsi qu'à l'élimination de nombreux éléments secondaires de stabilisation. De plus, la mise en place, au lieu de se faire en hauteur à la grue, a été réalisée par une méthode inédite de levage de l'ouvrage construit au sol et redressé ensuite par rotation autour d'un axe horizontal fixé au niveau des fondations.

Nous abordons par ailleurs des domaines extrêmement différents de ceux des ouvrages d'art, des terrains de sport, des bâtiments classiques, des tours de grande hauteur et des halls industriels : tranchées couvertes, centrales hydro-électriques, lignes de tramway, antennes et pylônes de télécommunication en acier ou en béton, pylônes de ligne à haute tension, tour solaire, en l'occurrence dans le désert d'Atacama au Chili, aménagement de quais, plateformes multimodales, verrières ultra légères et même œuvres d'art avec, par exemple, les arcs métalliques de Bernar Venet à Séoul.

Comme je le disais en introduction, l'une des volontés de Greisch est de couvrir l'ensemble des ouvrages de génie civil, qu'ils soient en acier, en béton, en verre ou en bois, sans exclusive. □

⁽¹⁾ Voir *Travaux* n°923 - avril/mai 2016.



© GREISCH
20



© GREISCH
21

Drones

BIM

Cyberattaques



Bienvenue dans un monde qui se construit autrement.

Votre environnement de travail et votre métier évoluent, vos risques aussi !
SMABTP s'engage durablement à vos côtés, en créant de nouvelles solutions
d'assurance, pour mieux protéger votre activité.

Notre métier : assurer le vôtre.

www.groupe-sma.fr

SMABTP - Société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics.
Société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances
RCS PARIS 775 684 764 - 8 rue Louis Armand - CS 71201 - 75738 PARIS CEDEX 15



SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

**1^{er} assureur
de la construction**



© MACCAFERRI
1

MACCAFERRI CONCEVOIR ET PROPOSER LA SOLUTION OPTIMALE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

CRÉÉE EN 1986, FRANCE MACCAFERRI EST LA FILIALE FRANÇAISE DU GROUPE OFFICINE MACCAFERRI. LA SOCIÉTÉ CONÇOIT, FABRIQUE ET COMMERCIALISE DES SOLUTIONS TECHNIQUES POLYVALENTES ET RESPECTUEUSES DE L'ENVIRONNEMENT DANS LE DOMAINE DES TRAVAUX PUBLICS : OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT, OUVRAGES HYDRAULIQUES, LUTTE CONTRE L'ÉROSION, PROTECTION CONTRE LES RISQUES NATURELS, RENFORCEMENT ET DRAINAGE EN GÉOSYNTHÉTIQUES ET AMÉNAGEMENT DU LITTORAL. TOUR D'HORIZON DE L'ENTREPRISE, DE SON HISTOIRE, DE SES PRODUITS ET DE LEURS APPLICATIONS AVEC LA COLLABORATION DE ROBERTO PENZO, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE FRANCE MACCAFERRI ET ALEXANDRE PLASTRE, DIRECTEUR TECHNIQUE.

C'est en 1879 que Raffaele Maccaferri fonde la "Ditta Maccaferri Raffaele, Officina de Fabbro", à Lavino (province de Bologne), en Italie, pour la fabrication d'articles en fer forgé. En 1893, l'invention du gabion permet à l'entreprise de passer au stade industriel.

À partir de 1907, les gabions "sacs" d'origine reçoivent un nouveau design en forme de boîte tel qu'on le trouve encore aujourd'hui pour certaines applications.

La période d'entre-deux guerres (1914-1940) voit une diversification de l'entre-

1- C'était il y a plus de 130 ans : les premiers gabions mis en place sur le fleuve Reno à Bologne.

prise dans plusieurs secteurs industriels parallèlement à la création de 18 nouvelles sociétés.

Mais ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale, à partir des années 50, que la production est relancée et réorganisée avec la création de nou-

2- Roberto Penzo, directeur général de France Maccaferri et Alexandre Plastre, directeur technique.

veaux produits et, notamment, avec l'introduction pour la première fois en Europe de la galvanisation "riche" assurant une protection supérieure de l'acier contre la corrosion.

DES GABIONS AUX GÉOSYNTHÉTIQUES

À partir des années 70, Maccaferri connaît un développement géographique très important avec la création et l'implantation de filiales industrielles et commerciales aux États-Unis, au Brésil, en Afrique du Sud et en Indonésie. Au niveau industriel, la société se lance également sur le marché des géosynthétiques, produits déjà complémentaires à ceux traditionnellement proposés par Maccaferri mais dont elle assure désormais elle-même la fabrication et la commercialisation : les géosynthétiques (géogrilles, géomatelas et géocomposites de drainage) représentent actuellement près de 30 % du chiffre d'affaires de l'entreprise alors que les produits dits à double torsion (gabions) dépassent les 30 % et que les dispositifs de protection contre les chutes de blocs et les risques naturels tutoient les 10 %, le reste du chiffre d'affaires étant réalisé avec les services et des produits pour des utilisations spécifiques (étanchéité, filtration, ouvrages d'urgence, câbles et accastillage, supports de caténaires, ...).

100 PAYS DANS LE MONDE

Aujourd'hui, la division Maccaferri du groupe est présente partout dans le monde - plus de 100 pays - avec 70 filiales commerciales, plus de 30 usines et de l'ordre de 3000 employés. « Chez Maccaferri, précise Roberto Penzo, directeur général de France Maccaferri, nous ne nous contentons pas de vendre des produits : nous proposons les solutions qui nous semblent les meilleures, en identifiant et en répondant aux besoins spécifiques de chaque client. Nous cherchons à être la référence technique dans la conception et le développement de projets complexes. Nous accompagnons nos clients depuis le début d'un projet grâce à notre expertise technique et notre vaste gamme de solutions ».

© MARC MONTAGNON



2

LA HOLDING SECI EN BREF

Officine Maccaferri et sa filiale France Maccaferri font partie de la holding SECI dont les activités réparties en 7 divisions couvrent les domaines de la construction (Travaux Publics et Bâtiment) et des énergies renouvelables mais aussi de l'industrie agro-alimentaire :

- **SAMP**, ingénierie mécanique, 163 millions € de chiffres d'affaires, 13 usines ;
- **SECI Real Estate e Costruzioni**, dans la construction immobilière, 51 M€ de CA, une unité de préfabrication ;
- **SECI Energia**, dans le domaine des énergies renouvelables, 188 M€ de CA, 4 usines ;
- **Sadam**, dans l'industrie agro-alimentaire (sucre), 55 M€ de CA, 2 usines ;
- **Toscana**, manufacture de cigares, 103 M€, 4 usines ;
- **JCubE**, start-up de recherche dans le domaine des écosystèmes créée en 2012 ;
- **Officine Maccaferri** représente la division la plus importante avec un chiffre d'affaires de 479 M€ et 31 usines.

Le groupe Seci emploie près de 4900 personnes et dispose de 55 usines dans le monde : 3 en Amérique du Nord, 12 en Amérique Centrale et Amérique du Sud, 14 en Asie, 25 en Europe dont 17 en Italie et une en Afrique du Sud.

Il a réalisé en 2017 un chiffre d'affaires de 1 039 M€.

France Maccaferri (anciennement France Gabion), filiale française du groupe Officine Maccaferri, est dirigée par Roberto Penzo.

Elle est membre du Comité Français des Géosynthétiques (CFG), de l'Association Française des Producteurs de Géotextiles et produits Apparentés (AFPAG), de l'International Geosynthetic Society (IGS), de la BN Acier (Bureau de Normalisation de l'Acier) ainsi que du Comité technique NF Acier.

C'est un point sur lequel insistent nos deux interlocuteurs : de la conception à la fabrication et de l'assistance technique sur site à l'entrée sur de nouveaux marchés, Maccaferri a acquis des connaissances approfondies et les a transformées en un capital qu'elle partage avec ses clients par le biais de ses filiales locales.

L'ACCOMPAGNEMENT

Ce capital de connaissances est constamment amélioré par le réseau mondial d'entreprises locales travaillant pour Maccaferri, chacune d'elles partageant ses connaissances.

« Sur tous les fuseaux horaires dans le monde, indique Alexandre Plastre, directeur technique de France Maccaferri, nos ingénieurs, concepteurs et techniciens coopèrent pour enrichir l'expertise technique des uns et des autres afin de proposer des solutions polyvalentes, rentables et respectueuses de l'environnement ».

Il est vrai que, forte d'une expérience de près de 140 ans, l'équipe d'ingénieurs de Maccaferri peut fournir des séries de solutions sur-mesure pour répondre aux besoins variés des clients, de propositions conceptuelles à la conception totale et à la fourniture d'une solution globale.

La structure intégrée verticalement du groupe signifie que, non seulement, il conçoit la solution mais encore qu'il fabrique les produits et peut même offrir des services d'assistance au démarrage des travaux.

« Ce lien avec nos sites industriels, ajoute Roberto Penzo, nous permet souvent de personnaliser nos produits afin de proposer une solution optimisée et sur-mesure à nos clients ».

L'offre de la filiale française va d'ailleurs au-delà puisqu'elle a fait, en plus, le choix de surveiller ou d'être associée elle-même à la pose des produits ce qui lui permet de s'assurer qu'ils sont correctement posés afin de garantir la pérennité des solutions recommandées et de réduire les pathologies éventuelles.

CERTIFICATION ASQUAL

Dans le cadre de cette démarche de qualité au niveau de la préconisation et de la pose, France Maccaferri a d'ailleurs participé à la finalisation d'un référentiel validé par l'ASQUAL, garantissant une pose de gabions sécurisée et conforme aux attentes et elle a été l'une des premières à recevoir cette qualification en décembre 2017.



3

© MACCAFERRI

Pour Roberto Penzo et Alexandre Plastre : « La démarche est importante et significative : en effet, face à l'important développement du marché des gabions en France, les professionnels du métier ont souhaité proposer aux maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises de Travaux Publics une qualification portant sur la réalisation des ouvrages en gabions. Désormais, ces ouvrages réalisés sous qualification d'entreprise ASQUAL sont mis en œuvre avec des gabions à maille hexagonale double torsion ou à maille soudée conformément à un référentiel basé sur les normes existantes et les "règles de l'art" ayant fait consensus avec les parties prenantes du secteur ». Maccaferri a obtenu la certification ASQUAL produit pour ses géogrilles Paragrid®, principalement utilisées dans le domaine des renforcements de sols, des remblais sur sols compressibles, sur cavités ou sur pieux.

POLIMAC™ : LE POLYMÈRE DE L'AVENIR

Le groupe est également très actif au niveau de l'innovation. C'est ainsi qu'il a créé en 2015 le MIC (Maccaferri Innovation Center) dont la mission est d'améliorer les processus de fabrication et les logiciels de dimensionnement ainsi que de concevoir de nouveaux produits ou solutions techniques. En effet, si le gabion en tant que tel est un produit ancien, les matériaux qui le composent n'ont cessé, dans la gamme Maccaferri, d'évoluer au fil des années afin d'en améliorer la durabilité et la résistance.

Dans cette optique, Maccaferri a développé et propose désormais le Galmac™ 4R (90 % zinc et 10 % aluminium), un nouveau revêtement métallique offrant une résistance au vieillissement et à la corrosion deux fois supérieure aux Galfan standard ainsi que le PAG, un revêtement organique plus résistant aux rayons UV et à l'abrasion et ne contenant ni métaux lourds, ni phtalates ou produits chimiques.

De même, est apparu récemment le revêtement PoliMac™, un composé polymère inerte et non polluant, qui pré-

3- Protection contre les chutes de blocs par écrans pare-blocs du village de Guilherand-Granges, dans l'Ardèche.

4- Constitution de murs de rétention de sédiments en gabions sur le barrage de Vezins, dans la Manche.

sente une résistance élevée à l'abrasion (10 fois supérieure à celle du PVC), adapté aux conditions d'application les plus sévères, en milieu côtier ou torrentiel ainsi que dans des environnements extrêmement agressifs, chimiquement contaminés et fortement exposés aux rayons UV.

En raison de la rareté attendue des ressources naturelles, les matériaux synthétiques sont devenus une option de plus en plus viable dans la résolution de problèmes dans l'ingénierie moderne, en particulier dans le domaine de l'ingénierie géotechnique, hydraulique,



4

© MACCAFERRI

environnementale et dans le contrôle de l'érosion.

« Afin de répondre à cette évolution, fin 2018, précise Roberto Penzo, l'ensemble des usines du groupe sera en mesure de fabriquer des produits double torsion à revêtement en matière organique à base de PoliMac™ ».

L'arrivée du PoliMac™ que l'on considère chez Maccaferri comme une innovation déterminante en matière de revêtement pour les applications pour les ouvrages hydrauliques correspond d'ailleurs à la volonté du groupe de développer - et cela remonte à déjà très longtemps - ses propres logiciels de calcul dans tous les domaines d'application afin de maîtriser le dimensionnement mais aussi d'intégrer dans le logiciel les propriétés intrinsèques de ses produits.

Le rôle du MIC, évoqué précédemment, est d'ailleurs aussi bien de concevoir les produits de demain qui n'existent pas encore sur le marché, que de travailler à l'évolution de ceux existant, comme par exemple le PoliMac™, à l'amélioration des procédés industriels,

au développement de logiciels, voire à la réflexion et l'optimisation sur un projet particulier de grande ampleur afin de trouver une solution sur mesure pour sa réalisation. Parmi les derniers

5- Remblai renforcé en parement végétalisé Terramesh® Vert dans la station de Val Cenis en Savoie.

6- Remblai renforcé avec parement béton MacRes® sur la nouvelle Route de la Corniche de Brazzaville, au Congo.

7- Digue de protection de la Nouvelle Route du Littoral en gabions en grillage double torsion sur l'île de La Réunion.

sujets étudiés et émanant de la filiale française, on peut citer le dispositif anti intrusion de véhicule Macsafe™ développé en réaction aux attentats de Nice en 2016 (voir encadré).

7 FAMILLES DE PRODUITS POUR DES APPLICATIONS MULTIPLES

Les produits Maccaferri répondent à 7 grandes familles d'utilisation auxquelles s'ajoutent quelques systèmes pour des applications spécifiques telles qu'étanchéité, séparation / filtration, assèchement des boues et ouvrages d'urgence :

- Ouvrages hydrauliques ;
- Murs poids et remblais renforcés ;
- Protection contre les risques naturels ;
- Applications paysagères et architecturales ;
- Végétalisation et drainage ;
- Renforcement ;
- Ouvrages maritimes.

Dans chacune des familles, le produit de base est décliné, la plupart du temps, en plusieurs versions dont les caractéristiques et les performances

sont spécialement définies en fonction des applications auxquelles il est destiné.

Sans entrer dans le détail d'un guide-produits, il est intéressant de passer en revue quelques-uns d'entre eux, sinon les plus emblématiques du moins les plus représentatifs de Maccaferri, c'est-à-dire d'un fournisseur tout autant de produits que de solutions spécifiques à chacun des problèmes qui lui sont soumis par ses clients.

OUVRAGES HYDRAULIQUES

Les Matelas Reno®, du nom de leur première utilisation pour protéger les berges du fleuve Reno à Bologne, constituent une référence dans le monde de l'hydraulique, à telle enseigne que leur nom est quasiment générique au même titre que "Frigidaire" pour réfrigérateur ou "Kärcher" pour nettoyeur haute pression.

Il s'agit de gabions de faible épaisseur et de grande largeur qui se substituent à des solutions traditionnelles d'enrochements d'épaisseur trois fois supérieures. ▷





8
© MACCAFERRI

Ils sont fabriqués par pliage d'une seule nappe de grillage double torsion constituant les côtés, le fond et les doubles diaphragmes apportant une meilleure résistance à l'écoulement que les structures équipées d'un simple diaphragme indépendant et ajouté postérieurement à la cage. Les fils sont revêtus de Galfan ou Galmac™ 4R de classe A et d'une gaine organique assurant une grande durabilité à l'ouvrage. Lors d'une mise en œuvre à sec, l'agrafage des cages entre elles assure un parfait monolithisme de l'ensemble.

Ils existent également en versions à cellules multiples avec débord pour la protection de piles de pont et de travaux subaquatiques ainsi que sous forme de "sacs", principalement utilisés pour réaliser des digues, des épis et des protections anti-affouillement de quais ou de piles de pont.

Par exemple, sur le chantier de la Nouvelle Route du Littoral, à La Réunion, France Maccaferri fournit au groupement d'entreprises 60 000 m³ de gabions double torsion destinés à habiller sur une longueur de l'ordre de 3 km le parement de la digue côté terre afin d'assurer sa protection contre les éventuelles chutes de blocs, sur une hauteur variable de 1 à 15 m.

MURS POIDS ET REMBLAIS RENFORCÉS

Cette famille est constituée de gabions, c'est-à-dire de boîtes divisées en cellules constituées de grillage double torsion en acier revêtu de Galfan ou Galmac™ 4R de classe A pouvant être revêtus d'une gaine organique.

Le Terramesh® System est une structure préfabriquée en usine, protégée par un revêtement organique (PVC ou PAG) constituée d'un parement gabion

et d'une nappe de renfort continue, ce qui assure une parfaite connexion entre le parement et le renforcement. Cette technologie peut être associée à des géogrilles de renfort Paragrid® et a une durée de vie estimée à 120 ans. Sa variante le Terramesh Vert, également une structure préfabriquée en usine, associe un parement rigidifié par un coffrage perdu et un géotextile tissé à une nappe de renforcement. Il permet d'obtenir un parement végétalisé incliné jusqu'à 70° par rapport à l'horizontale. Sa durée de vie estimée est identique. Dans la même famille, le Macres® est un procédé de remblai renforcé associant un parement en béton préfabriqué à des armatures de renforts à haute adhérence en acier ou géosynthétiques.

8- Géogrilles de renforcement Paralink® pour l'assise de remblais sur pieux sur la LGV Kénitra-Tanger, au Maroc.

9- Confortement de la digue Est de La-Faute-sur-Mer, en Vendée en Géomatelas MacMat® R Polymère pour la protection contre l'érosion.

Les caractéristiques du procédé Macres® permettent la construction d'ouvrages de grande hauteur capables de supporter des charges importantes.

PROTECTION CONTRE LES RISQUES NATURELS

Dans le secteur de la prévention contre les risques naturels, l'entreprise a récemment développé deux nouveaux écrans pare-blocs de 100 kJ et de 1 000 kJ qui s'insèrent dans une gamme comprenant également des filets paravalanches ainsi que les structures Erdox® Neige de consolidation et revêtement de talus utilisables comme paravalanches et des barrières Debris-Flow destinées à l'arrêt de masses déformables constituées de boue et d'eau.



9
© MACCAFERRI



10

© MACCAFERRI

À noter également pour la protection contre les risques naturels (chutes de blocs et confortement de falaises), le Macmat® HS, un tapis anti-érosif associé à un Steelgrid® HR, lors de sa fabrication en usine.

Ce produit est particulièrement indiqué pour la stabilisation de talus sujets à érosion.

Le Steelgrid® constitue lui-même un système complet associant pendant la fabrication un grillage double torsion à câbles métalliques tissés longitudinalement. Offrant des résistances à la traction jusqu'à 177 kN/m, il permet de réaliser d'importantes économies par rapport aux solutions concurrentes. Grâce au revêtement Galfan et la gaine organique, le Steelgrid® HR garantit une

10- Déplacement de digues sur le Vidourle à Lunel, dans l'Hérault, et à Gallargues-le-Montueux, dans le Gard, en gabions double torsion et matalas Reno®.

11- Parement minéral Terra-mesh® system dans la ZAC de la Courrouze à Saint Jacques de La Lande, en Ile-et-Vilaine.

12- Stock de gabions préremplis Cubiroc® en carrière.

résistance à la corrosion supérieure à 120 ans.

PAYSAGE ET ARCHITECTURE

Dans ce domaine des applications paysagères et architecturales, le produit-phare est le Cubiroc®, disponible en deux fabrications : les Cubiroc® électrosoudés, modules de gabions électrosoudés en fil acier revêtu de Galmac™ 4R et les Cubiroc® double torsion fabriqués en grillage à maille hexagonale en fil acier revêtu de Galfan ou Galmac™ 4R. Les Cubiroc sont préremplis en carrière et équipés de suspentes de levage. Outre les application paysagères et architecturales, les deux versions sont également destinées à des ouvrages d'urgence ou d'accès difficile.

VÉGÉTALISATION ET DRAINAGE

Pour la végétalisation et le drainage, le Macmat® est un tapis anti-érosif en filaments de polypropylène stabilisés aux UV conçu pour lutter contre l'érosion superficielle des talus. Il est adapté aux applications à faible pente tels que les parements amont de digue ou le lit majeur de rivière. Grâce à sa structure tridimensionnelle, il retient la terre végétale et favorise le développement de la végétation. Dans sa version Macmat® R - Polymère, cette structure peut être utilisée sur des talus fortement inclinés comme les couvertures de casiers de stockage de déchets et sur les flancs de bassins car il cumule deux fonctions : la résistance à la traction et une retenue de la terre. ▷



11



12

© MACCAFERRI



13

© MACCAFERRI

Dans sa version Macmat® R - Acier, il est associé à un grillage double torsion en Galmac™ avec la possibilité d'un revêtement organique supplémentaire si nécessaire lors de sa fabrication en usine.

Dans cette configuration, il est adapté aux talus à forte pente et aux parements de parois clouées.

Les deux produits se présentent sous forme de rouleaux ce qui facilite leur mise en œuvre.

En matière de végétalisation, c'est, par exemple, le Macdrain® qui a été mis en œuvre pour l'engazonnement des voies du tramway T7 dans la région parisienne. En effet, dans une démarche esthétique et écologique, les concepteurs de la ligne ont choisi d'engazonner la voie pour mieux l'inscrire dans le paysage urbain. Afin de lui assurer

un support de qualité, ils ont retenu le géocomposite de drainage Macdrain®, constitué de mono-filaments de polypropylène, très résistants à la compression.

Toujours en matière de végétalisation, une réalisation récente illustre l'approche personnalisée de France Maccaferri en fonction du problème à résoudre.

Lors de la construction de la "Seine Musicale" à Boulogne Billancourt, le problème était d'accrocher une toiture végétalisée sur des terrains parfois très pentus (de 15° à 35°).

Pour cette salle de spectacles qui se veut respectueuse de l'environnement, l'objectif visait à créer des zones de végétation qui soient accessibles au public sur la plupart des terrasses qui couvrent le toit du bâtiment.

13- Toiture végétalisée de la Seine Musicale à Boulogne-Billancourt, dans l'Ouest parisien.

14- Confortement de la falaise du "Jardin Exotique" dans la Principauté de Monaco en Steelgrid® HR.

15- Mise en œuvre de Macdrain® pour la végétalisation des voies du tramway T7 au Sud de Paris.

Pour y parvenir, France Maccaferri a choisi de dimensionner une des ses solutions pour répondre à ces exigences tout créant une "infrastructure verte" limitant les problèmes d'écoulement des eaux.

Ainsi, pour recouvrir de végétation les 15000 m² de la "Seine Musicale", elle a développé une solution sur-mesure consistant à habiller le toit : dans les zones à fortes pentes, des matelas gabions de 40 cm d'épaisseur, remplis à 70% de pierres et 30% de terre végétale ont été spécifiquement fabriqués et mis en œuvre, alors que dans les zones à plus faibles pentes, la solution s'est orientée vers deux niveaux de géomatelas accroche-terre renforcés avec du grillage double torsion. Des plots en béton ont été conçus spécialement pour soutenir cette toiture végétalisée.



14



15

© MACCAFERRI

MACSAFE™ À NICE ET À MONACO : PROTECTION CONTRE L'INTRUSION

L'innovation la plus récente en date de Maccaferri, qui a d'ailleurs reçu le prix de l'innovation 2018 du salon Préventica à Lyon est le MacSafe™, une protection contre l'intrusion de véhicules.

En se basant sur ses années d'expérience dans la protection contre les risques naturels, Maccaferri a développé un système pour protéger les personnes contre les menaces terroristes.

Cette barrière anti-intrusion a été conçue à la demande de la Ville de Nice avec la volonté d'être parfaitement intégrée dans les espaces publics à forte affluence tels que les aéroports, les écoles, les hôpitaux et les zones d'attractions touristiques. Le système a été testé et accrédité par l'UIAV (Université de Venise).

La première installation de MacSafe™ a été effectuée en 2017 sur une longueur d'un kilomètre sur la Promenade des Anglais à Nice, en France. Dans cette application, elle a été dimensionnée pour arrêter un camion de 19 tonnes circulant à 50 km/h, avec un angle de 20°.

Un dispositif identique mais deux fois plus résistant afin de répondre à un cahier des charges différent incluant un choc frontal, est actuellement en cours d'installation devant le stade Louis II à Monaco.

MacSafe™ se compose de deux câbles longitudinaux en acier et à haute résistance, ancrés à chaque extrémité avec un dispositif de dissipation d'énergie breveté. Les câbles sont soutenus par des poteaux en acier espacés de 3 mètres reposant sur un système de fondation robuste.

La force de l'impact du véhicule est répartie à travers les câbles et les poteaux. Elle est absorbée par les dissipateurs d'énergie par une déformation compressive et non par frottement. Cela garantit meilleure performance et fiabilité de la barrière sur le long terme.

Par ailleurs, la barrière peut être facilement démontée, partiellement ou totalement, quand le niveau d'alerte diminue ou pour laisser le passage à des véhicules d'entretien, par exemple, d'où le choix de l'espacement des poteaux de 3 m.



16

© MACCAFERRI



17

© MACCAFERRI

RENFORCEMENT

Maccaferri a développé une gamme de géogrilles de renforcement destinées à différentes applications.

Pour les renforcements lourds requérant des résistances à la traction élevées tout en ayant une longévité importante et une grande résistance aux agressions chimiques, les géogrilles Paragrid® et Paralink® de résistance à la traction allant de 30 à 200 kN/m et de 200 kN/m à 1500 kN/m sont les produits phares.

Constituées de bandes thermocollées en fibres polyester à haute ténacité protégées par une gaine en polymère leur assurant une grande résistance à l'endommagement lors de la mise en œuvre et à la dégradation chimique, elles sont utilisées dans les remblais renforcés, à la base de remblai sur sols compressibles, sujets à cavité ou renforcés par inclusion rigide.

Les Macgrid® EG et CE sont principalement utilisées pour la stabilisation de sols et le renforcement de couche de forme sous chaussées. Il s'agit de

16- Barrière anti-intrusion de véhicules MacSafe™ sur la Promenade des Anglais à Nice.

17- Détail d'un poteau de fixation de la barrière MacSafe™ mise en place au stade Louis II à Monaco.

géogrilles bidirectionnelles extrudées en polypropylène, associées, pour la Macgrid® CE à un géotextile anti-contaminant. Les Macgrid® sont inertes à l'agression chimique et environnementale dans des sols normaux naturels ($4 < \text{pH} < 9$).

À ces produits s'ajoutent les Macgrid® AR, constituées de fibres de verre ou polyester assemblées en grille à mailles carrées revêtues d'un polymère compatible avec les enrobés. Placées sous la couche de roulement, elles ont été

développées pour le renforcement de chaussées (autoroutes, aéroports, dallages industriels) afin de retarder la remontée de fissures et limiter les opérations de maintenance. Elles sont proposées avec ou sans géotextile non tissé : sans géotextile, la quantité d'émulsion de bitume nécessaire au collage est réduite d'environ 20%.

OUVRAGES MARITIMES

Les Matelas Articulés en Blocs Bétons (ACBM), sont des structures préfabriquées blocs bétons reliées par des cordes en polypropylène et prenant la forme de matelas. D'épaisseur et de dimensions variables, ces structures très flexibles sont utilisées pour le lestage, l'assise et le croisement de canalisations et de câbles immergés. Maccaferri propose également des structures utilisables en milieu maritime pour la réalisation de brise-lames, d'épis, de corps de digues ou de dunes : il s'agit de tubes géotextiles Mactube®, constitués d'un géotextile tissé de grande résistance remplis par

dragage avec des matériaux extraits du site.

Les Macbag® en sont une déclinaison : il s'agit de "sacs" constitués d'une enveloppe en géotextile tissé à haute résistance dont les coutures de haute technologie sont effectuées en usine à l'exception de la couture supérieure réalisée in situ après remplissage.

Parmi ses chantiers les plus emblématiques, la société cite les matelas filtrants ballastés anti-affouillement qu'elle a posés sous les enrochements placés sous les vannes anti-inondations de Venise.

La devise de Maccaferri est "Engineering a Better Solution". Fondée en 1879, Officine Maccaferri est rapidement devenue une référence mondiale dans la conception et le développement de solutions de pointe pour les travaux hydrauliques et les structures de soutènement. Fidèle à sa devise depuis près de 140 ans, elle traverse le présent et aborde l'avenir avec des armes pour le 21^e siècle et la même volonté d'innovation qu'au premier jour. □



1

© HDEC

RÉSERVOIRS GNL SUR INCLUSIONS RIGIDES AU KOWEÏT

AUTEURS : CHARLES BERNUY, INGÉNIEUR PRINCIPAL, TERRASOL - NICOLAS FRATTINI, INGÉNIEUR CHEF DE PROJET, TERRASOL - BORAMY HOR, MANAGER/INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN SÉNIOR, HYUNDAI ENGINEERING & CONSTRUCTION CO. LTD. (HDEC) - SUNGYONG KIM, TANK CIVIL GENERAL MANAGER, HYUNDAI ENGINEERING & CONSTRUCTION CO. LTD - MYUNGJUN SONG, PILE SPECIALIST, HYUNDAI ENGINEERING & CONSTRUCTION CO. LTD.

AFIN DE SÉCURISER SES EXPORTATIONS DE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ, LA KUWEIT NATIONAL PETROLEUM COMPANY (KNPC) A LANCÉ LA CONSTRUCTION D'UN GIGANTESQUE TERMINAL SUR LE SITE D'AL-ZOUR, AU KOWEÏT, COMPRENANT LA CONSTRUCTION DE 8 RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'UNE CAPACITÉ UNITAIRE DE 225 000 m² (96 m DE DIAMÈTRE, 45 m DE HAUTEUR). HDEC ET TERRASOL ONT PROPOSÉ POUR CE PROJET UN SYSTÈME DE FONDATION SUR UN SOL RENFORCÉ PAR INCLUSIONS RIGIDES, SOLUTION INNOVANTE ET INÉDITE POUR DES RÉSERVOIRS DE DIMENSIONS AUSSI IMPORTANTES.

PRÉSENTATION DU PROJET

Le contrat en "Design & Build" relatif à la construction d'une usine de regazéification sur le site de Al-Zour a été remporté par Hyundai Engineering & Construction, qui en a confié le design au bureau coréen Kogas Tech, spécialisé dans l'ingénierie et la maintenance des installations gazières on-shore

et off-shore, qui a lui-même confié à Terrasol le dimensionnement des fondations des réservoirs (sur inclusions rigides). Ces huit ouvrages en béton précontraint doivent pouvoir en particulier vérifier des critères de tassements différentiels assez stricts et encaisser de fortes accélérations sismiques avec une période de retour de 2475 ans.

1- Travaux de fondation sur un réservoir.

1- Foundation works on a tank.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Le projet est implanté sur une plateforme gagnée sur la mer (figure 2). La lithologie sous la mer, avant réalisation du remblai, est une succession de couches sableuses dont la densité augmente avec la profondeur, jusqu'à un substratum situé à 70 m de profondeur environ sous le niveau de la mer.

Afin de limiter le risque de liquéfaction, il a été décidé de draguer, préalablement aux travaux de remblais, les couches de caractéristiques les plus faibles, sur 6 à 7 m de profondeur. Des remblais hydrauliques sont ensuite mis en place et vibro-compactés sur une épaisseur de 20 m environ.

DIMENSIONNEMENT DES INCLUSIONS RIGIDES

La solution retenue pour les fondations de ce projet consiste en la réalisation d'inclusions rigides à la tarière creuse, de diamètre 0,8 m, non armées, avec un maillage de 2,80 x 2,80 m au centre du réservoir, et 2,40 x 2,40 m en périphérie (figure 3). Les inclusions sont ancrées de 1 m dans la couche de sable dense (DSD). Les inclusions rigides sont surmontées d'un matelas de 2 m d'épaisseur, de paramètres de cisaillement $\phi' = 38^\circ$ et $c' = 0$ kPa, et

de module de déformation $E = 60$ MPa. Sous chaque réservoir, 1128 inclusions rigides sont mises en place, avec une longueur variant entre 20,65 et 28,65 m.

L'avantage principal de cette solution est qu'elle assure une rigidité verticale importante, en réduisant les déformations (tassements) sous les réservoirs, tout en absorbant, via le matelas de répartition situé entre le radier de la superstructure et les inclusions rigides,

une grande partie des efforts statiques et sismiques, ce qui permet de limiter les efforts (moments, efforts tranchants) dans les inclusions.

Le dimensionnement statique a été classiquement réalisé à partir d'approches homogénéisées (modèles de cellule élémentaires permettant de modéliser le renforcement de sol par un monolithe équivalent).

Au séisme, la réponse de l'ensemble (sol+structure) a été déterminée par application du principe de superposition. L'analyse cinématique permet d'abord de déterminer l'action sismique appliquée à la base de la structure (spectre de réponse) ainsi que la déformée en champ libre impactant les inclusions rigides sur leur longueur. La démarche générale d'interaction sol-structure consiste ensuite à estimer les raideurs dynamiques (impédances) qui, combinées à l'action sismique,

permettent à l'ingénieur structure, par une analyse structurelle, de déterminer les descentes de charges inertielles. La justification des inclusions est enfin menée en combinant les effets inertiels et cinématiques.

MOYENS ET MÉTHODES DE RÉALISATION

MODE D'EXÉCUTION À LA TARIÈRE CREUSE

Équipement et matériaux

La foreuse utilisée pour la réalisation des inclusions à la tarière creuse est une foreuse hydraulique à montage rapide de type Soilmecc SR-100. Chaque foreuse est équipée d'un système informatique spécifiquement adapté Soilmecc DMS permettant de suivre et d'enregistrer les paramètres de forage pendant les phases de forage et de bétonnage, tels que l'inclinaison du mât, la profondeur, la vitesse de forage, ►

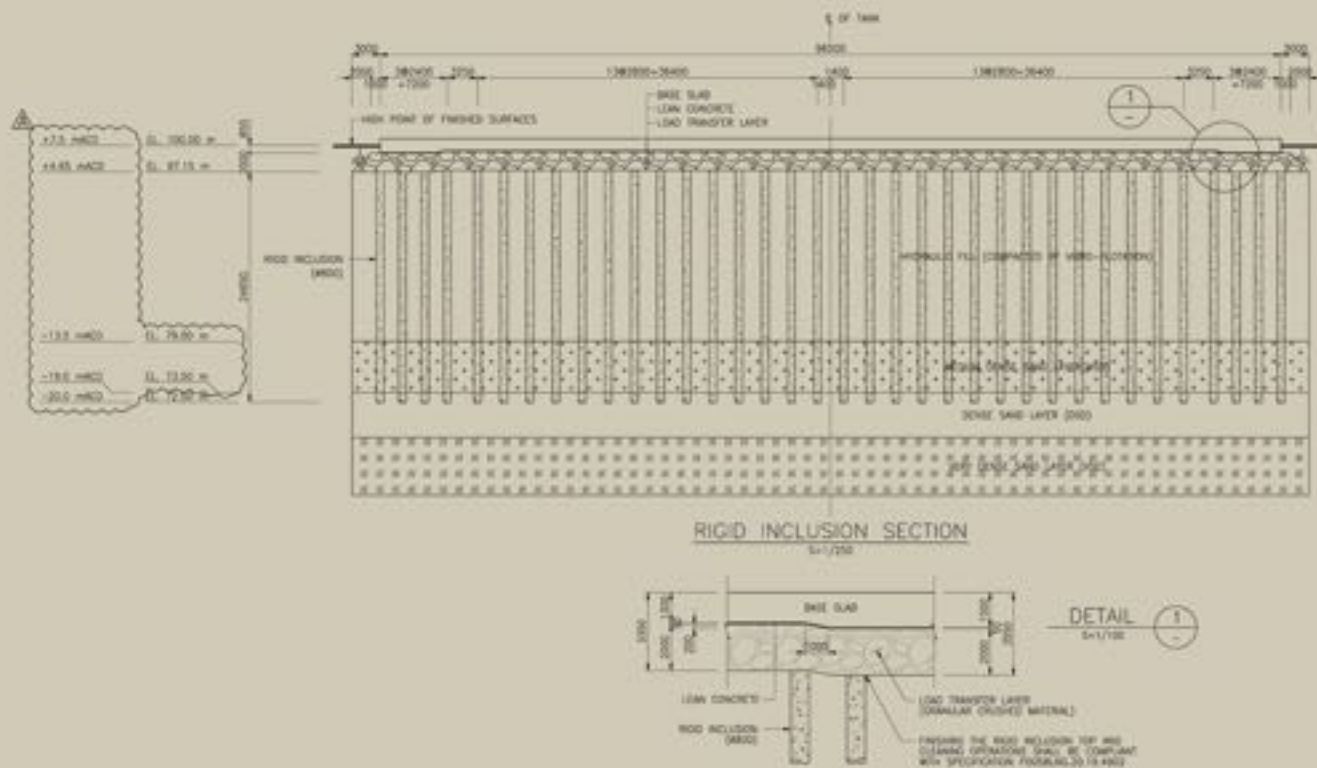
2- Vue en plan et position des investigations réalisées.

2- Plan view and location of investigations.

VUE EN PLAN ET POSITION DES INVESTIGATIONS RÉALISÉES



VUE EN PROFIL DES INCLUSIONS RIGIDES SOUS L'UN DES RÉSERVOIRS



3

© HDEC

la pression hydraulique de rotation, le nombre de tours par minute de l'outil, les débits et volumes de béton, la pression de bétonnage et la consommation instantanée de béton.

La tarière est équipée de dents adaptées à chaque type de terrain. Si nécessaire, un système de nettoyage de l'outil de forage, qui sert également de guidage de la tarière, peut être activé. Lors de la phase d'extraction, le nettoyeur enlève alors le sol contenu entre les spires de la tarière, le faisant tomber à l'extérieur du nettoyeur.

Le matériau mis en place dans les inclusions rigides non ferrallées est du béton dont les caractéristiques (ouvrabilité du béton avant bétonnage et résistance à la compression à 28 jours) ont été contrôlées périodiquement. La consistance du béton (slump flow) a été maintenue à 600 ± 50 mm conformément au cahier des charges du projet.

Exécution

La réalisation des inclusions rigides se déroule en 4 phases : mise en place, forage, bétonnage, et nettoyage et recépage. Les trois premières étapes sont illustrées (figure 4).

La position de chaque inclusion est localisée par un suivi topographique. L'équipement est déplacé et l'outil tarière est centré sur la position théorique. La verticalité est contrôlée par un

système d'acquisition de données. Les tolérances d'exécution sont fixées à 2% en verticalité et 10 cm en excentricité. L'outil tarière est inséré par rotation dans le sol jusqu'à ce que le niveau requis soit atteint. Le type de dents de forage a été choisi en effectuant des forages expérimentaux préalables, dans une zone située hors de l'emprise des réservoirs mais présentant des conditions de sol similaires (remblai hydraulique vibrocompacté).

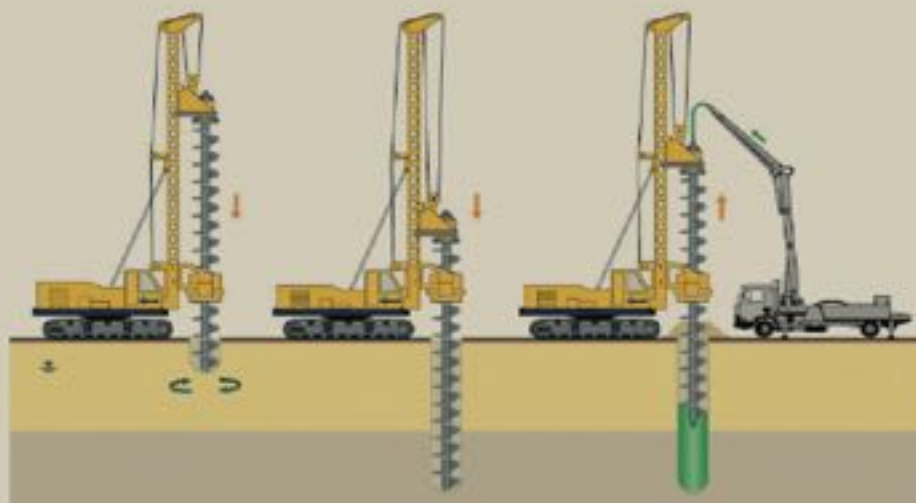
3- Vue en profil des inclusions rigides sous l'un des réservoirs.
4- Phasage de réalisation.

3- Profile view of rigid inclusions under one of the tanks.

4- Work sequencing.

Après atteinte de la profondeur de forage fixée par les études de conception, le béton est injecté à travers le tube de bétonnage de l'outil de forage au moyen d'une pompe de bétonnage, raccordée par des tuyaux flexibles au pivot d'alimentation situé sur la tête rotative. Le béton prêt à l'emploi est fourni par camion-toupie. Avant bétonnage, un contrôle est effectué pour s'assurer que l'approvisionnement continu en béton pourra être assuré.

PHASAGE DE RÉALISATION



4

© HDEC



5

© HDEC

La tarière est relevée de quelques centimètres (selon la configuration de la foreuse) et le pompage démarre avec une pression d'environ 2 à 3 bars contrôlée au moyen d'un capteur de pression. Une telle pression provoque le soulèvement de l'extrémité inférieure de la tarière et l'espace sous celle-ci est comblé. La tarière est remontée lentement, le béton remplissant progressivement le vide laissé entre la tarière et le sol extrait. Afin d'assurer l'intégrité de l'inclusion rigide, il était nécessaire de maintenir une pression constante du béton injecté et d'effectuer une remontée de la tarière à une vitesse lente et constante. Le bétonnage a été arrêté au niveau de la plate-forme de réalisation. En dernière étape de réalisation, la zone autour de l'inclusion rigide est nettoyée et la tête est recépée jusqu'au niveau

5- Séquence de réalisation pour gérer la concomitance des travaux.

5- Work sequence to manage concomitant works.

fixé par les études de conception, à une cote inférieure au niveau de la plate-forme. Un nettoyage complémentaire du béton est effectué (si nécessaire) manuellement. Les plans de récolement sont ensuite produits au moyen d'instruments topographiques (coordonnées du centre de l'inclusion et élévation).

Planning et cadences de réalisation

Un total de 9024 inclusions rigides de diamètre 800 mm a été mis en place pour les 8 réservoirs (1 128 inclusions par réservoir). Les longueurs exécutées sont comprises entre 20,65 m et 28,65 m.

Les travaux, qui se sont déroulés de juin 2017 à janvier 2018, représentent un linéaire total d'inclusions rigides d'environ 220 000 m.

L'atteinte d'une telle productivité a été rendue possible par la mise en place de 3 à 4 foreuses par réservoir, travaillant simultanément depuis le centre du réservoir comme indiqué sur la figure 5.

En moyenne, environ 6 semaines ont été nécessaires pour compléter les opérations de mise en œuvre des

inclusions rigides pour un réservoir. Le planning de réalisation a par ailleurs intégré les essais de chargement statique (essais de contrôle au sens des recommandations ASIRI) sur les inclusions du projet. Ces essais ont été réalisés au minimum 3 à 4 semaines après l'exécution des inclusions, afin de s'assurer d'une résistance suffisante du béton.

ADAPTATIONS EN PHASE CHANTIER

Certaines difficultés ont été rencontrées en phase chantier, telles que des défauts de réalisation sur certaines têtes d'inclusion, des déviations (hors tolérance) des inclusions par rapport à leur position théorique, ou encore des limitations des foreuses à réaliser les inclusions les plus longues. ▷



6

© HDEC

Sur les inclusions rigides du premier réservoir, des difficultés à atteindre le diamètre nominal de 800 mm ont été observées. Il a pu être mis en évidence que ces défauts étaient liés à la faible compacité des terrains superficiels au niveau de la plate-forme de travail. La méthode de réparation mise en place a été de refore et répéter l'opération de coulage sur une profondeur de 1,5 m environ depuis la plate-forme de travail, immédiatement après achèvement de l'inclusion, lorsque le béton était encore frais. L'excavation et le recépage de la tête sont réalisés ensuite après durcissement du béton (figure 6). La problématique de déviation de l'inclusion était également liée à la faible compacité des terrains superficiels. L'amélioration a été réalisée grâce à une modification de l'outil de nettoyage de la foreuse, par installation d'un centreur connecté au mât.

Enfin, pour le dernier réservoir (tank N°4), il a été jugé nécessaire, conformément aux études de conception, de traverser une lentille argileuse profonde (épaisseur 2 m, à 20 m de profondeur environ) et de s'ancrer dans l'horizon des sables denses sous-jacents. Cet approfondissement local des longueurs d'inclusions devenant supérieur à la longueur maximale d'exécution permise par

la foreuse, des modifications ont dû être effectuées sur la foreuse et le phasage d'exécution a été légèrement modifié. Des essais préalables ont été réalisés pour caler la méthode de réalisation permettant d'atteindre ces sur-profondeurs.

CONTRÔLES SUR LA RÉALISATION

Avant la phase d'exécution, des essais préliminaires de chargement statique ont été effectués. Sur la base des résul-

tats d'essais de chargement (courbes d'évolution du tassement en fonction de la charge appliquée), le dimensionnement a pu être validé. Trois essais de chargement ont été réalisés à proximité de la zone des réservoirs, sur la même zone de remblaiement. Le massif de réaction est constitué d'une couronne en acier reliée à des tirants d'ancrage, permettant de supporter la charge maximale imposée à l'inclusion pendant l'essai (figure 7).

La charge maximale appliquée correspond à la charge de calcul augmentée du frottement négatif (essai de qualité au sens des recommandations ASIRI, pour des inclusions ne servant qu'en réduction de tassement).

Pendant l'exécution, la vérification de la verticalité, du diamètre, de la longueur et de la position a été contrôlée en surveillant les enregistrements de forage comme décrit plus haut. La qualité du béton a été contrôlée par des vérifi-



7

© HDEC

6- Recépage et nettoyage des têtes d'inclusions.

7- Massif de réaction pour les essais de chargement préliminaires.

6- Trimming and cleaning of inclusion heads.

7- Reaction head for preliminary loading tests.



© HDEC 8

cations sur la consistance et par des essais de résistance à la compression. Après exécution, l'intégrité structurelle de chaque inclusion a été contrôlée au moyen d'un test d'intégrité du pieu (PIT) basé sur la méthode d'impédance dynamique à faible déformation. Des essais de chargement statique ont été effectués sur des inclusions de l'ouvrage, en utilisant comme massif de réaction une poutre de résistance adéquate connectée à deux barres

Dywidag de 40 mm préalablement coulées dans deux inclusions rigides périphériques. Ce système de réaction permettant d'appliquer la charge d'essai est présenté (figure 8). Le nombre total d'inclusions rigides est de 1 128 par cuve, ce qui oblige, en conformité avec les recommandations ASIRI, à effectuer six essais de chargement. Toutefois, afin de disposer dès le départ d'une base de données plus fiable permettant de valider la conception, onze essais

ont été effectués sur le premier réservoir (réservoir N°8). En raison d'une géologie plus hétérogène (présence d'une lentille argileuse d'épaisseur variable sur une moitié de l'emprise du réservoir), onze essais ont également été réalisés sur le réservoir N°4.

MATELAS DE RÉPARTITION Matériaux et équipements

Pour satisfaire aux exigences strictes de mise en remblai et de compactage

de la couche de transfert de charge, un matériau concassé granulaire ayant un diamètre maximal de 20 mm a été utilisé pour réaliser le matelas granulaire. Le matériau a été fourni par une entreprise locale située à environ 64 km du site.

La qualité du gravier a été soigneusement vérifiée par un certain nombre d'essais standards tels que des analyses de granulométrie, des essais au bleu de méthylène (test de teneur en argile), des essais micro-Deval (test d'abrasion), et des essais visant à contrôler l'angle de frottement du matériau (essai de cisaillement direct). Les équipements pour la mise en place et le compactage du matériau granulaire comprennent une excavatrice, un camion à benne basculante, une niveleuse, un rouleau vibrant (avec une capacité de compactage de 10 t) et un camion-citerne (5 000 gallons).

Exécution et contrôles sur la réalisation

Le matelas de répartition au-dessus des inclusions rigides doit avoir une épaisseur totale de 2 m. Pour répondre aux critères de remblaiement et de compactage, un plot d'essai a été réalisé dans l'emprise du premier réservoir, préalablement à la réalisation du matelas (figure 9).

8- Massif de réaction pour les essais de chargement sur inclusions de l'ouvrage.

9- Plot d'essai pour la réalisation du matelas granulaire.

8- Reaction beam for loading tests on the structure's inclusions.

9- Test section for execution of the granular mattress.



© HDEC 9



Les essais ont permis de caler les épaisseurs optimales de chaque passe de remblaiement ainsi que l'énergie de compactage nécessaire, de contrôler la compacité des terrains après compactage et de valider les procédures d'exécution sur un cycle complet (délais pour la mise en œuvre et la réalisation des essais de contrôle).

Après cette phase de validation, l'exécution a été réalisée par remblaiement et compactage en passes successives de 300 mm d'épaisseur jusqu'à atteinte

de la cote projet. Pour chacune des passes, un compactage intensif à l'aide du rouleau vibrant a été effectué, combiné à une humidification 95% de la valeur de l'Optimum Proctor Modified. Le phasage d'exécution du matelas de répartition comprend d'abord la mise en place du matériau granulaire sur une moitié du réservoir, par mise en place d'une passe de remblaiement dont l'épaisseur a été déterminée au préalable. Après compactage, des essais de contrôle comprenant 5 essais à la

10- Essais à la plaque.

11- Essais in situ de mesure de la densité.

12- Vue d'ensemble du ferrailage du radier.

10- Plate tests.

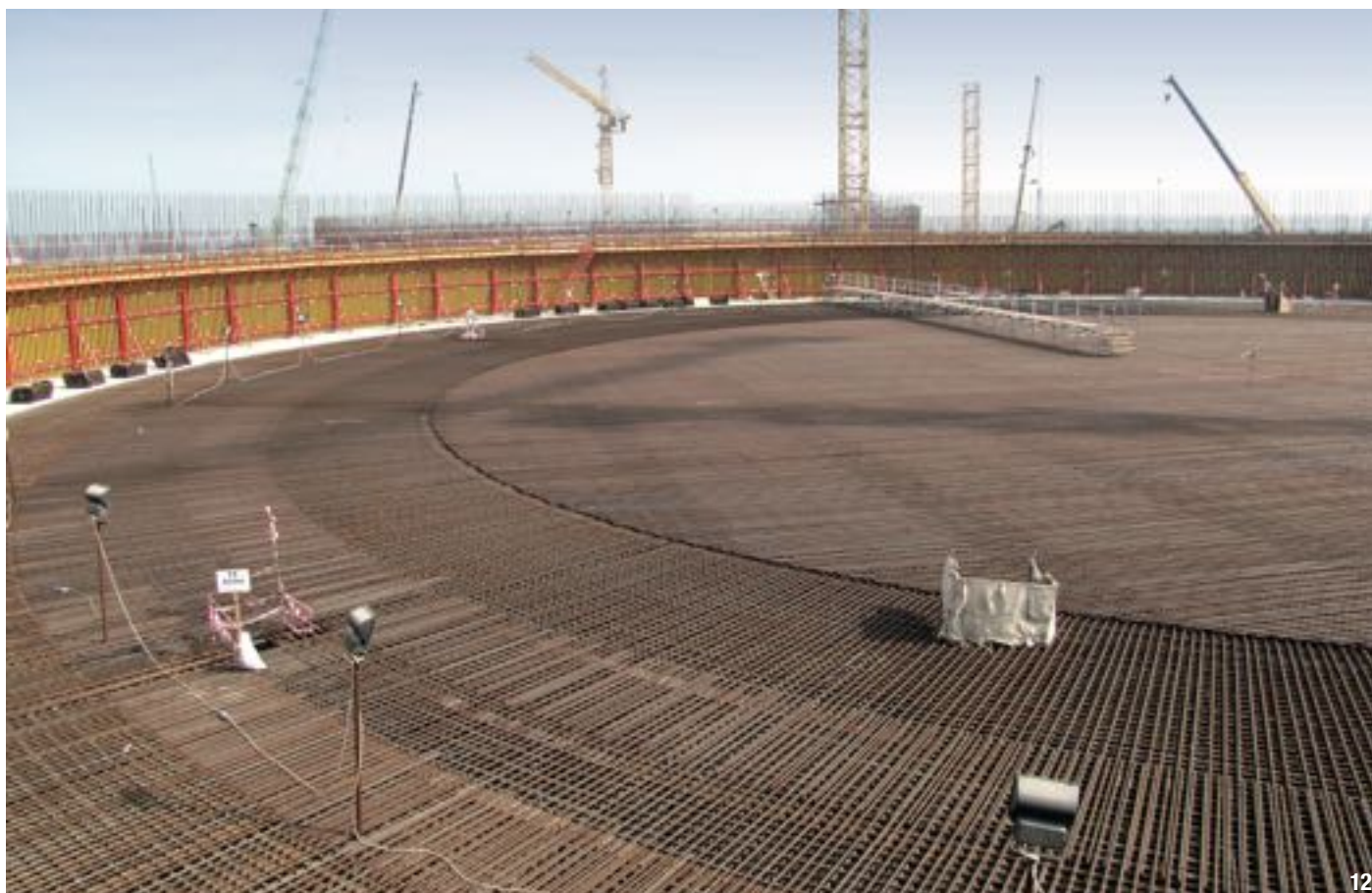
11- In-situ density measurement tests.

12- General view of foundation-raft reinforcements.

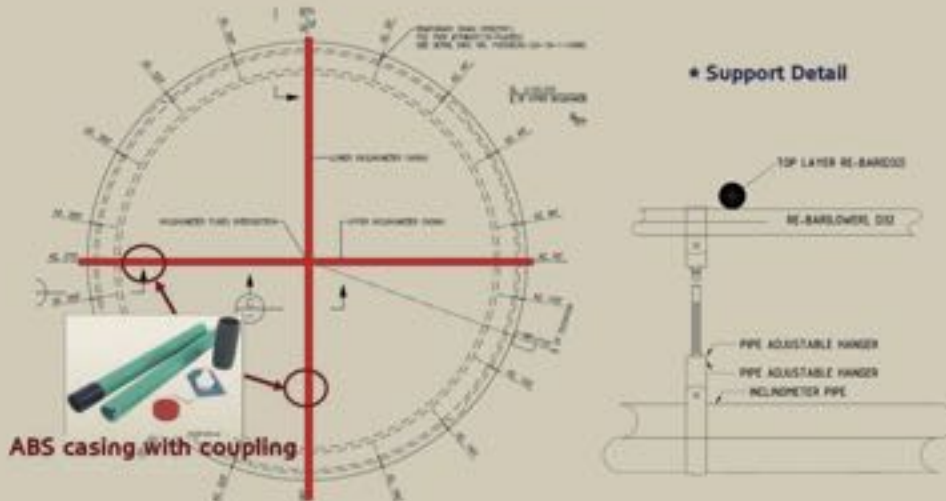
plaque (figure 10) et 6 essais in situ de mesure de la densité (figure 11) sont réalisés, pendant que les travaux de remblaiement et de compactage se poursuivent en parallèle sur l'autre moitié du réservoir. Le cycle d'exécution est ainsi réalisé en alternance de manière continue jusqu'à atteinte du niveau final.

Planning et cadences de réalisation

La réalisation du matelas granulaire pour un seul réservoir représente un



IMPLANTATION DES PROFILOMÈTRES



© HDEC

13

volume théorique de 15865 m³ qui a nécessité un temps de réalisation d'environ 4 semaines. Chaque passe de remblaiement et de compactage a pu être réalisée en 3 jours, mobilisant le matériel d'exécution et 15 ouvriers sur un total de 14h/jour (en travaux postés).

SUIVI D'INSTRUMENTATION DES INCLUSIONS RIGIDES ET DU RÉSERVOIR

Une instrumentation a été installée pour suivre le transfert de charge de la structure vers les inclusions rigides et contrôler les tassements des réservoirs. 6 cellules de charge conçues pour mesurer la pression de surface (plages de mesure de 1 à 3 MPa) ont été placées au niveau des têtes d'inclusion mais aussi au niveau du sol, à demi distance entre 2 inclusions (horizontalement et diagonalement). Un plot

13- Implantation des profilomètres.

13- Layout of profilometers.

d'instrumentation est placé en périphérie du réservoir (sous les voiles), le second au centre du réservoir. Ces cellules de pression, placées à la cote des têtes d'inclusions, permettront de mesurer les transferts de charge entre les inclusions et le sol. Afin de contrôler le transfert de charge en profondeur le long des inclusions, un total de 16 jauges de déformation ont été installées à différentes profondeurs sur 2 inclusions situées au centre du réservoir, tandis que 12 jauges supplémentaires ont été installées sur 2 inclusions situées en périphérie. Le monitoring a débuté et sera comparé

avec les résultats du dimensionnement. Le contrôle du tassement de chaque réservoir est effectué par un suivi topographique de 32 marqueurs répartis sur la circonférence du réservoir (selon un pas maximal de 10 m) et implantés sur le bord extérieur du radier de fondation. En complément, deux inclinomètres horizontaux de type Digitilt sont placés dans le radier (figure 12) de chaque réservoir, selon 2 directions perpendiculaires (figure 13). Les tassements des réservoirs sont relevés et contrôlés sur une base mensuelle.

Le suivi d'instrumentation est actuellement en cours. Afin de s'assurer que les critères de dimensionnement et de sécurité sont validés, ce suivi sera poursuivi jusqu'à l'épreuve hydraulique (hydrotest, à horizon 2019 ou 2020) puis jusqu'à mise en service des réservoirs à l'horizon 2020. □

LE CHANTIER EN CHIFFRES

BUDGET : 1.52 Milliards USD

REMBLAI GAGNÉ SUR LA MER : 1 000 x 500 m

RÉSERVOIR LNG : 8 réservoirs de 96 m de diamètre et 45 m de haut

STOCKAGE TOTAL LNG : 1 800 000 m³

LINÉAIRE DES INCLUSIONS : 200 km environ

VOLUME BÉTON DES INCLUSIONS : 100 000 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Kuwait Integrated Petroleum Industries Company (Kipic)

PROJECT MANAGEMENT CONSULTANT : Amec Foster Wheeler

ENTREPRISE CONTRACTANTE EN DESIGN & BUILD : Hyundai Engineering & Construction

BUREAU D'ÉTUDES STRUCTURE : Kogas Tech

BUREAU D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUE : Terrasol

BUREAU D'ÉTUDES REMBLAI HYDRAULIQUE : Cowi

ABSTRACT

LNG TANKS ON RIGID INCLUSIONS IN KUWAIT

CHARLES BERNUY, TERRASOL - NICOLAS FRATTINI, TERRASOL - BORAMY HOR, HDEC - SUNGYONG KIM, HDEC - MYUNGJUN SONG, HDEC

In order to secure its exports of Liquefied Natural Gas, the Kuwait National Petroleum Company (KNPC) has started construction of a giant terminal on the Al-Zour site in Kuwait. This project includes the construction of eight storage tanks of unit capacity 225,000 m³ (96 m in diameter and 45 m high). For this project, Hdec and Terrasol have proposed a foundation system on soil reinforced by rigid inclusions, which is an innovative and unprecedented solution for such large tanks. The project, currently underway, demonstrates that a rigid inclusions solution for tank foundations is an interesting and appropriate approach from both the technical and economic viewpoints. □

DEPÓSITOS DE GNL SOBRE INCLUSIONES RÍGIDAS EN KUWAIT

CHARLES BERNUY, TERRASOL - NICOLAS FRATTINI, TERRASOL - BORAMY HOR, HDEC - SUNGYONG KIM, HDEC - MYUNGJUN SONG, HDEC

Para proteger sus exportaciones de gas natural licuado, la sociedad Kuwait/National Petroleum Company (KNPC) ha iniciado la construcción de una terminal gigante en la planta de Al-Zour, en Kuwait. El proyecto incluye la construcción de 8 depósitos de almacenamiento, de una capacidad de 225.000 m³ cada uno (diámetro de 96 m, altura de 45 m). Para este proyecto, Hdec y Terrasol han propuesto un sistema de cimentación sobre un suelo reforzado por inclusiones rígidas, una inédita e innovadora solución para depósitos de tan grandes dimensiones. Este proyecto, actualmente en curso, demuestra que una solución de inclusiones rígidas para cimentar depósitos constituye una alternativa técnica y económicamente interesante y práctica. □



1

© HDEC

SHEIKH JABER AL HAMAD AL SABAH CAUSEWAY AU KOWEÏT

AUTEURS : MOHAMED AKRAA, DIRECTEUR DE PROJET, SYSTRA - ÉLODIE FAVRE, DIRECTEUR DE PROJET ADJOINT, SYSTRA - GEORGES MAURIS, RESPONSABLE TECHNIQUE PONTS, SYSTRA - CÉDRIC AUBAZAC, COORDINATEUR TECHNIQUE, SYSTRA

LA TRAVERSÉE MARITIME « SHEIKH JABER AL-AHMED AL-SABAH » CONSTITUE L'UN DES PROJETS LES PLUS EMBLÉMATIQUES AU KOWEÏT. CE PROJET, PORTÉ PAR L'AUTORITÉ PUBLIQUE POUR LES ROUTES ET LE TRANSPORT (PART), SERA L'UN DES PLUS LONGS PONTS MARITIMES DU MONDE (LONGUEUR TOTALE DE 48,5 km EN INCLUANT LA LIAISON DESSERVANT LA ZONE DE « DOHA »). CE PROJET SERA MIS EN SERVICE EN NOVEMBRE 2018, IL EST BAPTISÉ EN L'HONNEUR DU DÉFUNT ÉMIR « SHEIKH JABER AL-AHMED AL-SABAH », QUI RÉGNA ENTRE 1977 ET 2006.

PRÉSENTATION DU PROJET

L'État du Koweït affiche une volonté de créer dans les prochaines années une ville nouvelle à l'extrémité Nord-Est de la baie : la cité de la soie « Madinat Al-Hareer ». La création de cette ville est présentée comme un projet emblématique pour l'émirat avec une tour de 1001 m de haut en référence aux contes des 1001 nuits, passerelle littéraire entre l'Orient et l'Occident. Pour faciliter les échanges entre cette ville nouvelle et la capitale, l'État a décidé la construction d'une route pour rejoindre

l'extrémité Nord-Est du Koweït par la mer. Cette route permet également de recréer la route de la soie, voie terrestre empruntée pour l'essentiel du commerce entre l'Europe et l'Asie durant l'Antiquité et le Moyen-Âge.

Ce projet consiste en (figure 2) :

→ Un pont routier principal (Main Link) de 36,1 km de long dont 27 km au-dessus de la mer avec un pont haubané libérant un gabarit de navigation de 120 m de large par 23 m de haut. L'ouvrage permet de stimuler les échanges dans l'émirat,

1- Installation des travées par grue flottante.

1- Installation of the spans by floating crane.

de relier la capitale à la nouvelle cité de la soie (la localité de Subiyah) et au port international de Bubiyan. Le temps de transport est réduit d'une heure (30 minutes contre 1h30 actuellement).

→ Un deuxième pont routier de 12,4 km (Doha Link) également en cours de construction, fait l'objet d'un deuxième contrat avec un autre groupement constructeur et permet de connecter le quartier de Shuwaikh au quartier de Doha (ouest de la capitale).

Le projet principal (Main Link) consiste également en la création de deux îles artificielles de 30 ha et leurs marinas et de deux polders (étendues artificielles de terre gagnées sur l'eau). Les îles et polders accueillent les



échangeurs routiers et 30 bâtiments supports pour la gestion de l'infrastructure liée au projet (maintenance, supervision, exploitation, premiers secours...).

Une tour panoramique permet aux visiteurs d'admirer le projet depuis le polder créé côté capitale (figures 3, 4 et 5).

RECORD DU MONDE DES TRAVÉES PRÉFABRIQUÉES AVEC LARGE UTILISATION DE PRÉ-TENSION

Pour l'ensemble des travées du tablier qui représente la clef de succès du projet tant d'un point de vue économique que d'un point de vue planning, un effort tout particulier a été fait pour optimiser ces structures au maximum compte-tenu de leur répétitivité.

La conception du pont a été innovante par les choix intégrant différentes méthodes de construction :

2 © SYSTRA



- 2- Carte du projet.
- 3- L'île Sud - Vue générale.
- 4- Visitor Center - Vue générale.
- 5- Visitor Center - Vue de la tour panoramique.

- 2- Map of the project.
- 3- The South Island - General view.
- 4- Visitor Center - General view.
- 5- Visitor Center - View of the panoramic tower.

3 © SYSTRA



4 © SYSTRA

5



© SYSTRA

6- Construction du tablier avec équipage MSS.
7- Travée préfabriquée de 60 m.
8- Transport de travée de 60 m.

6- Deck construction with MSS rig.
7- 60-metre prefabricated span.
8- Transporting 60-metre span.

1- Les 10 rampes de l'échangeur du Shuwaikh (environ 2 km de rampes) ainsi que le pont de Ghazali (environ 500 m) qui est en interface avec un autre projet, sont construits par méthode traditionnelle, sur échafaudage.

2- Les ponts adjacents ; Shuwaikh Port Bridge et Shuwaikh Port Interchange Bridge (environ 2 km), situés sur terre, ont été conçus en prenant en compte l'utilisation de cintres auto lanceurs (Movable Scaffolding System - MSS) (figure 6).

3- Les ponts en mer ont été construits par des travées entières préfabriquées dans une usine créée spécifiquement pour le projet. Cette méthode de construction permet de limiter considérablement les impacts sur les écosystèmes marins ainsi que les risques de construction associés à la construction en mer. Le pont est constitué de travées préfabriquées de 40 m (environ 4,5 km) et de 60 m (environ 21,5 km) de portée, amenées par barge ou transporteur puis mises en place par grue flottante ou par poutre de lancement (figures 7 et 8).



© SYSTRA



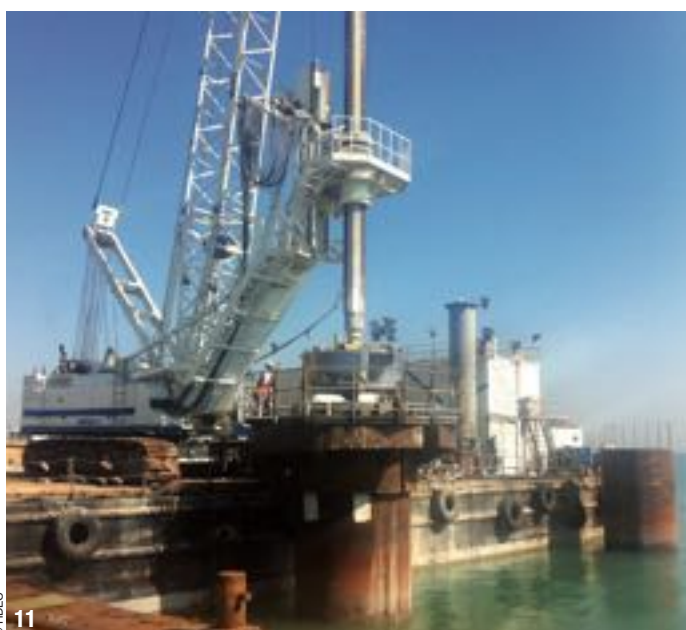
© SYSTRA



© HDEC 9



© HDEC 10



© HDEC 11

9- Installation des travées par poutre de lancement sur mer.

10- Installation des travées par poutre de lancement zone Interchange.

11- Excavation de pieux.

9- Installation of the spans by launching girder over the sea.

10- Installation of the spans by launching girder in interchange area.

11- Pile excavation.

4- Une conception innovante a été adoptée en construisant en une seule fois les travées entièrement préfabriquées de 60 m et 40 m avec l'utilisation de pré-tension dans le sens longitudinal et transversal (pour la dalle supérieure).

Pour l'installation des travées préfabriquées à leur position définitive, l'utilisation de la grue dans les zones avec un tirant de navigation suffisant permet une pose très rapide. L'utilisation de cette méthode de construction a été utilisée pour environ 450 travées (13,5 km de linéaire). Les travées préfabriquées sont acheminées par bateau jusqu'au lieu d'installation puis posées à la grue (figure 1).

On a utilisé la poutre de lancement dans les zones à faible tirant d'eau. Cette méthode de construction a été utilisée pour environ 500 travées (13,5 km de linéaire). Pour ces zones, les travées préfabriquées sont acheminées par bateau à la zone de levage par grue. Les travées sont ensuite installées par grue sur le transporteur qui permet d'acheminer les travées sur le tablier déjà installé afin d'accéder à la zone de pose. À proximité de la zone de pose, les travées sont soulevées par la poutre de lancement et mises en place à leur position définitive (figures 9 et 10). En phase de construction, les pieds de la poutre de lancement exercent des efforts importants sur les travées posées préalablement. Pour chaque étape de pose, des vérifications sont menées : une des étapes critiques est le moment où la travée va être soulevée du transporteur et déplacée par la poutre de lancement.

À ce moment, chacune des roues (20 axes constitués de 8 roues) exerce une force de 3,7 t et la jambe arrière de la poutre de lancement exerce sur chaque âme un effort de 260 t. Il faut veiller à maîtriser à cet instant les fissures dues aux contraintes principales s'exerçant dans les âmes. L'ensemble de ces efforts extérieurs ainsi que la précontrainte a été pris en compte dans des modèles à plaques ; la diffusion jouant un large effet dans l'angle et la magnitude de ces contraintes principales.

CHOIX DE MONO-PIEUX OPTIMISANT LES COÛTS ET LE TEMPS DE CONSTRUCTION.

Dans le cadre de ce projet, un système de mono-pieux de 3 m de diamètre (pour les travées de 60 m) et 2,5 m de diamètre (pour les travées de 40 m) a été proposé. ▷



12

© HDEC

12- Pont principal.

13- Construction du pylône.

14- Connexion de deux caissons par des entretoises.

12- Main bridge.

13- Construction of the pylon.

14- Connection of two box girders by cross ties.



13

© HDEC

L'utilisation du monopieu permet une structure plus souple, réduisant les efforts sismiques et les besoins en ressources naturelles par rapport à une solution multi-pieux.

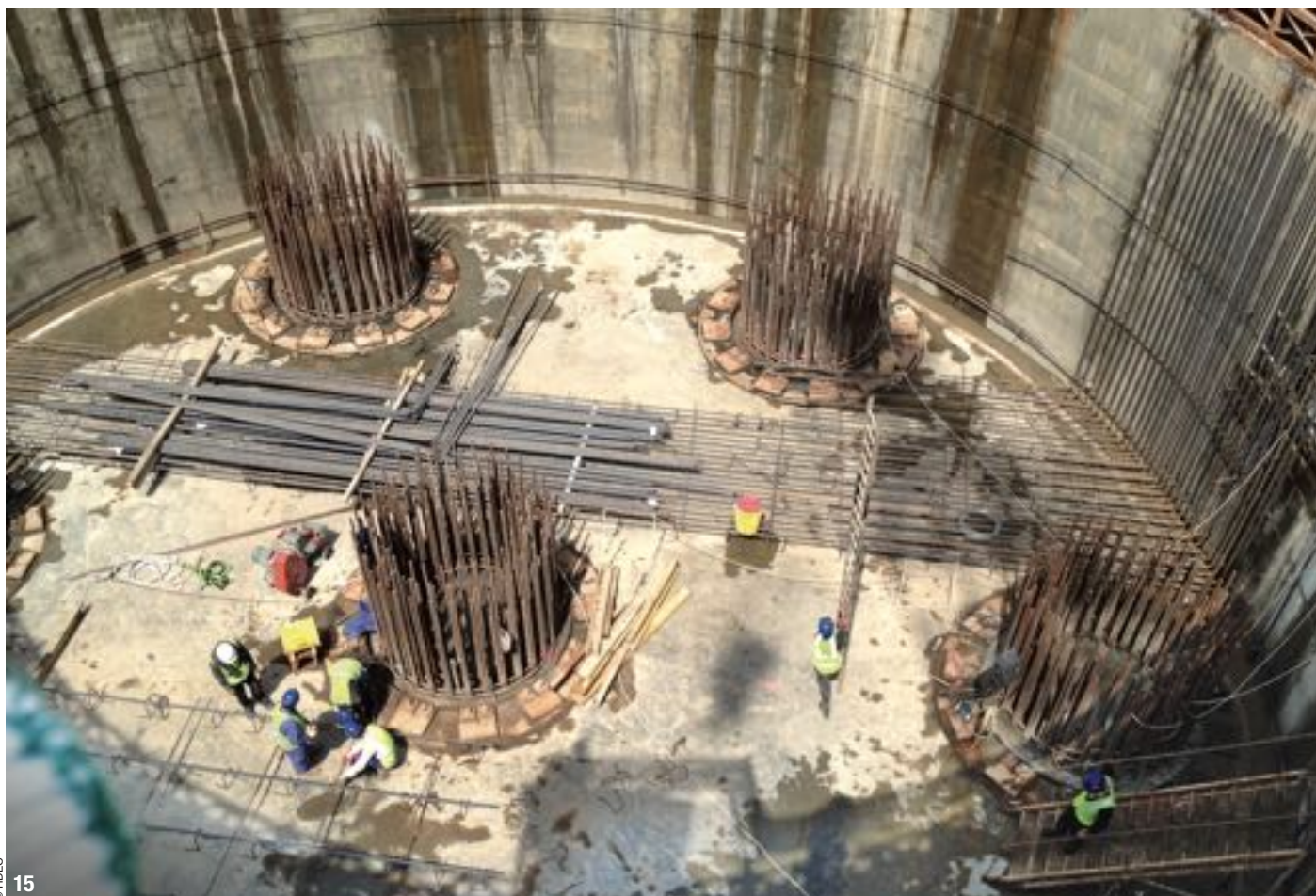
Des chemises métalliques permanentes d'une épaisseur de 19 mm sont installées avant l'excavation du sol. Ces chemises permettent une tenue du sol lors de l'excavation, l'installation des cages d'armatures et le bétonnage (figure 11). Les cages d'armatures sont assemblées et soudées avec une machine avant d'être transportées sur site par bateau et installées par grue marine. Le bétonnage des pieux s'effectue depuis une usine de bétonnage sur bateau. Dans un souci d'esthétique, la partie visible de la chemise métallique est ensuite découpée. La construction de la pile est réalisée en reprise de bétonnage avec utilisation d'un coffrage fixé sur la chemise.

Les mono-pieux sont conçus dans un environnement particulièrement défavorable, ce qui a constitué un réel challenge pour les ingénieurs du projet :



14

© HDEC



© HDEC

- La couche supérieure d'argiles molles varie de 10 à 40 m.
- La hauteur libre, fond marin - arase inférieure de tablier, varie entre 10 et 25 m ; les quelques piles qui vont au-delà de cette hauteur sont sur groupe de pieux.
- La profondeur (sous le fond marin) des pieux en mer varie de 40 à 70 m.

Des analyses poussées, considérant les non linéarités géométriques du sol et des matériaux, ont été menées par Systra pour améliorer la précision des dimensionnements des mono-pieux sous sollicitations sismiques. Cela permet de vérifier le comportement des mono-pieux par analyse non linéaire du second ordre en considérant l'influence des déplacements de la structure sous charge axiale (p -deltas) et l'amplification de ces déplacements résultants de la plastification des matériaux et du sol (épaisses couches d'argile) en plus de l'amplification géométrique.

L'analyse a également permis de s'affranchir des règles de calcul forfaitaires d'amplification du moment préconisées par les normes AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), qui conduisent

15- Construction de la semelle du pylône.

16- Connexion pylône-semelle.

15- Construction of the pylon foundation slab.

16- Pylon/foundation slab connection.

à des taux de ferrailage artificiellement élevés lorsque l'élançement dépasse 60-70. Des calculs en analyse statique non-linéaire en poussée progressive (Pushover) ont aussi permis de vérifier que le point de fonctionnement de ces mono-pieux correspond à un niveau de plastification faible des matériaux. La demande en ductilité est donc faible pour un séisme dont la période de retour prescrite par le client

est de 500 ans pour le cas extrême et de 100 ans pour le cas de service. Les calculs ont démontré en outre une bonne ductilité de mono-pieux pour des séismes de plus grandes périodes de retour.

De multiples vérifications ont aussi été menées afin de limiter les déplacements en service. Tous ces calculs fins ont permis de concevoir un système de fondation économique en ressources avec une bonne fiabilité structurelle.

© SYSTRA



PONT PRINCIPAL EMBLÉMATIQUE

Le projet comporte également un ouvrage spécial de type pont à haubans en forme de voile de bateaux traditionnels utilisés au Koweït (figure 12).

Il s'agit d'un ouvrage à pylône treillis mixte métal-béton et d'un tablier hybride (un tronçon en dalle orthotrope connecté à un tronçon en béton précontraint) dont la travée principale de 177 m libère un gabarit de navigation de 120 m de large et 23 m de haut. Le pylône de 153 m est constitué d'une membrure avant de section variable en béton (demi-cercle de 7,2 m de diamètre en base), connectée à un treillis en métal avec la membrure arrière métallique du pylône.



17

© HDEC

Les nœuds du treillis au niveau de la jambe avant sont réalisés à l'aide de connexions mixtes (goussets munis de connecteurs noyés dans le béton). La structure métallique du pylône est levée d'un seul tenant en construction puis la jambe avant est bétonnée à l'avancement avec un coffrage grim-pant (figure 13).

Les tabliers à caissons jumelés, de part et d'autre du pylône, sont encastés dans les deux jambes du pylône avec des entretoises précontraintes. Ils sont aussi soutenus par des haubans ancrés dans les entretoises qui relient les deux tabliers transversalement.

La continuité mécanique entre les deux tabliers hybrides béton-métal est assurée en utilisant des barres et des câbles de précontrainte (figure 14).

Les semelles pour les groupes de pieux sont coulées en place dans des coques préfabriquées en béton. Ces coques connectées à des rehausses provisoires en métal permettent la construction en pleine mer à sec en toute sécurité (figure 15).

L'une des complexités de ce type de structure est la maîtrise de la connexion de la jambe arrière du pylône en métal avec la semelle béton. Dans cette zone, une traction de 30 MN sous séisme est reprise par les 2 tubes verticaux de la jambe arrière (figure 16).

Cette connexion est assurée par :

→ 2x18 barres de précontrainte diamètre 95 mm et 2x4 barres de précontrainte diamètre 85 mm (effort vertical).

→ 2x12 barres de précontrainte diamètre 80 mm au niveau de la première diagonale.

CONCEPTION ET RÉALISATION DE REMBLAIS MARINS SUR DES SOLS MEUBLES

Les îles artificielles et les polders sont construits sur des argiles molles (plus de 30 m d'argile molle pour l'île Nord et le polder de Subiyah). Ces conditions ont imposé une conception intégrant une consolidation de sol par drains verticaux avec application de surcharge. Les critères sur le tassement résiduel à la mise en service (40 mm) ont été

dimensionnants dans la conception qui devait proposer un optimum en termes de planning, de méthodes et de coûts de construction (figure 17).

Pour réaliser l'île Nord, le transport du sable nécessaire à la construction a été réalisé par bateaux depuis un quai temporaire situé à Subiyah, à 7 km. Une fois la plateforme intermédiaire réalisée (5 m de remblais dans l'eau et 5 m de remblais au-dessus du niveau de la

17- Construction de l'île Sud.

17- Construction of the South Island.

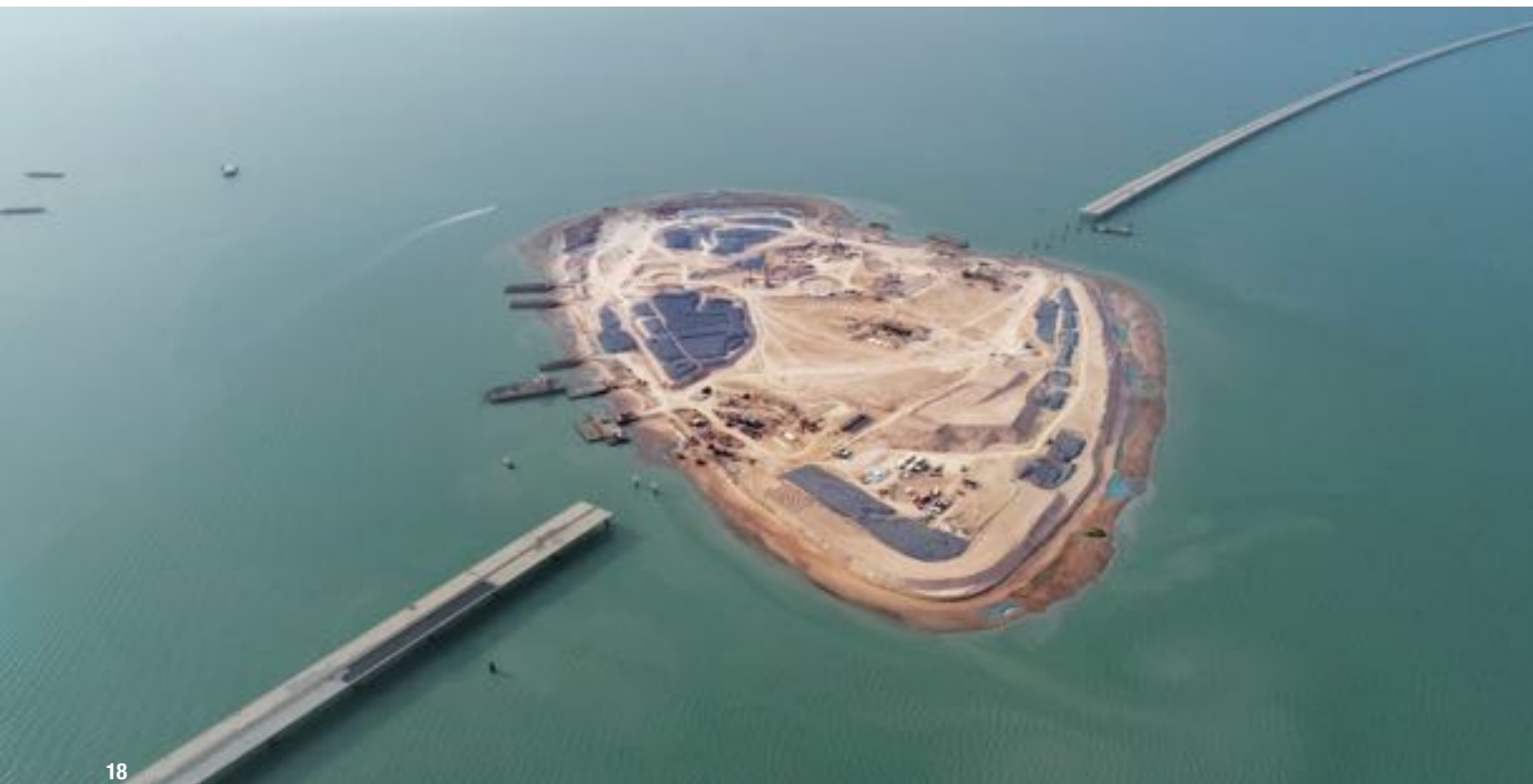
mer), des drains verticaux en géotextile (PVD) de 30 m de profondeur ont été installés. L'objectif de ces drains est d'accélérer l'évacuation de l'eau lors de la consolidation de l'argile. Une fois ces drains installés (maillage triangulaire avec un espacement de 1,2 m), la surcharge de la plateforme peut alors être réalisée avec la construction par phase d'un remblai temporaire de 25 m de haut par rapport au niveau initial du sol (figure 18).

La construction d'un tel remblai nécessite des calculs aux éléments finis très poussés prenant en compte le phasage des travaux afin de vérifier la stabilité du remblai dans toutes les phases de construction. En phase de construction, les mesures in-situ définies lors de la conception de l'ouvrage sont comparées aux valeurs cibles définies lors des études afin de vérifier que le comportement de l'ouvrage est conforme à la conception et d'autoriser le retrait de la surcharge. Tout écart entre les valeurs mesurées et les valeurs attendues est analysé afin d'assurer la sécurité de l'ouvrage et du personnel en phase de construction.

Des essais en laboratoires avec modélisation des sections critiques de l'île ont permis de définir les protections nécessaires afin d'assurer la durabilité de l'île et sa résistance en cas de séisme avec tsunami.

LE PROJET EN QUELQUES CHIFFRES

- Longueur totale de la traversée maritime : 48,5 km
- Longueur totale de la liaison principale : 36,1 km (en mer : 27,5 km et sur terre en incluant 8,6 km en zones de remblais maritimes)
- Longueur de la liaison vers la zone dite « Doha » : 12,4 km
- Coût de construction : 3,6 milliards de dollars
- Nombre de pieux : environ 1 500 jusqu'à 70 m de profondeur
- Nombre de travées préfabriquées : environ 950
- Nombre de travées coulées en place : environ 200
- 5 ans d'études et construction



18

© HDEC

La conception et la réalisation d'île artificielle sur des sols très meubles avec plus de 30 m d'argile molle, comme l'île Nord, est un réel challenge et a fortement contraint le planning de réalisation du projet.

CONCLUSION

Dès le stade de l'offre pour un contrat de conception-réalisation, Systra a proposé une conception innovante, permettant au groupement constructeur de se distinguer par ses solutions techniques optimisant la maîtrise des coûts et des délais de construction. L'utilisation d'un système de monopieux comparée à la solution multipieux-semelles a permis de réduire considérablement le temps de construction, de limiter les travaux marins et de réduire les quantités de maté-

riaux nécessaires pour la construction. La conception des travées entières préfabriquées à la place des voussoirs et en utilisant la pré-tension longitudinale et transversale pour des longueurs de travées de 60 m et de 40 est une innovation mondiale. Cette solution a permis de produire les travées à l'échelle industrielle, d'accélérer la construction, d'assurer une durabilité accrue de l'ouvrage et de limiter les opérations de construction in-situ au strict minimum. □

18- Construction de l'île Nord.

18- Construction of the North Island.

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 2 îles artificielles de 30 ha et 2 polders d'environ 30 et 60 ha
- 1,1 millions de m³ de béton
- 180 000 t d'acier
- 28 000 t de précontrainte
- 11 millions de m³ de remblais maritimes

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE :

Autorité Publique pour les Routes et le Transport (PART)

AMO : DAR Beyrouth - Le Caire / TY Lin San Francisco et SSH Koweït

ÉTUDES DE CONCEPTION ET D'EXECUTION : Systra

ENTREPRISE :

Consortium Hyundai Engineering and Construction (Hdec), Corée du Sud, et Combined Group Contracting Co (Cgcc), Koweït

ABSTRACT

SHEIKH JABER AL HAMAD AL SABAH CAUSEWAY IN KUWAIT

MOHAMED AKRAA, SYSTRA - ÉLODIE FAIVRE, SYSTRA - GEORGES MAURIS, SYSTRA - CÉDRIC AUBAZAC, SYSTRA

The Sheikh Jaber Al Hamad Al Sabah Causeway, 48.5 km long with its two links, is one of the longest sea crossings in the world. The project is undergoing construction, and commissioning is scheduled for November 2018. The project links the capital to the new Silk City and the new international port of Bubiyan, reducing transport times by one hour. □

PUENTE SHEIKH JABER AL HAMAD AL SABAH EN KUWAIT

MOHAMED AKRAA, SYSTRA - ÉLODIE FAIVRE, SYSTRA - GEORGES MAURIS, SYSTRA - CÉDRIC AUBAZAC, SYSTRA

De 48,5 km de longitud con sus dos enlaces, el puente Sheikh Jaber Al Hamad Al Sabah es una de las carreteras sobre el mar más largas del mundo. El proyecto, que se encuentra en fase de construcción y que entrará en servicio en noviembre de 2018, enlaza la capital con la nueva Ciudad de la Seda y el nuevo puerto internacional de Bubiyan, reduciendo en una hora el tiempo de transporte. □



1
© INFRASTRUCTURE CANADA

LE NOUVEAU PONT CHAMPLAIN AU CANADA

AUTEURS : MARWAN NADER, SENIOR VICE-PRES., T.Y.LIN INTERNATIONAL - ZACHARY MCGAIN, GENERAL MANAGER (CANADA), SYSTRA INTERNATIONAL BRIDGE TECHNOLOGIES - SEVAK DEMIRDJIAN, VICE-PRES., ROADS AND BRIDGES, SNC-LAVALIN - JEFF ROGERSON, TECHNICAL MANAGER, FLATIRON CONSTRUCTION CORP.

DU FAIT DE LA DÉTÉRIORATION PRÉMATURÉE DE LA STRUCTURE EXISTANTE ET DE SA VISIBILITÉ DANS LA MÉTROPOLE DE MONTRÉAL, LE NOUVEAU PONT CHAMPLAIN EST, DU POINT DE VUE ÉCONOMIQUE, UN TRÈS IMPORTANT PROJET D'INFRASTRUCTURE EN AMÉRIQUE DU NORD. LA DURABILITÉ EST UN ASPECT CLÉ DE LA CONCEPTION AVEC UNE DURÉE DE VIE DE L'OUVRAGE DE 125 ANS. L'UN DES FACTEURS LES PLUS CONTRAIGNANTS EST LA NÉCESSITÉ DE RÉALISER LA CONSTRUCTION EN UN TEMPS RÉDUIT, AVEC UN DÉMARRAGE EN MAI 2015 POUR UNE DURÉE DE 42 MOIS.

INTRODUCTION

Traversant le fleuve Saint Laurent entre l'île des Sœurs et la rive de Brossard à Montréal, Québec, le remplacement du pont Champlain s'insère dans un projet beaucoup plus large et important, le "Projet de Corridor du Nouveau Pont Champlain". Ce projet global inclut en effet, au-delà du Nouveau Pont

Champlain qui est le sujet de cet article, le nouveau pont de l'île des Sœurs et la reconstruction et l'élargissement de la partie fédérale de l'autoroute 15. Ce projet est l'un des plus importants en Amérique du Nord. Les coûts de maintenance du pont Champlain existant augmentant rapidement, la construction d'un nou-

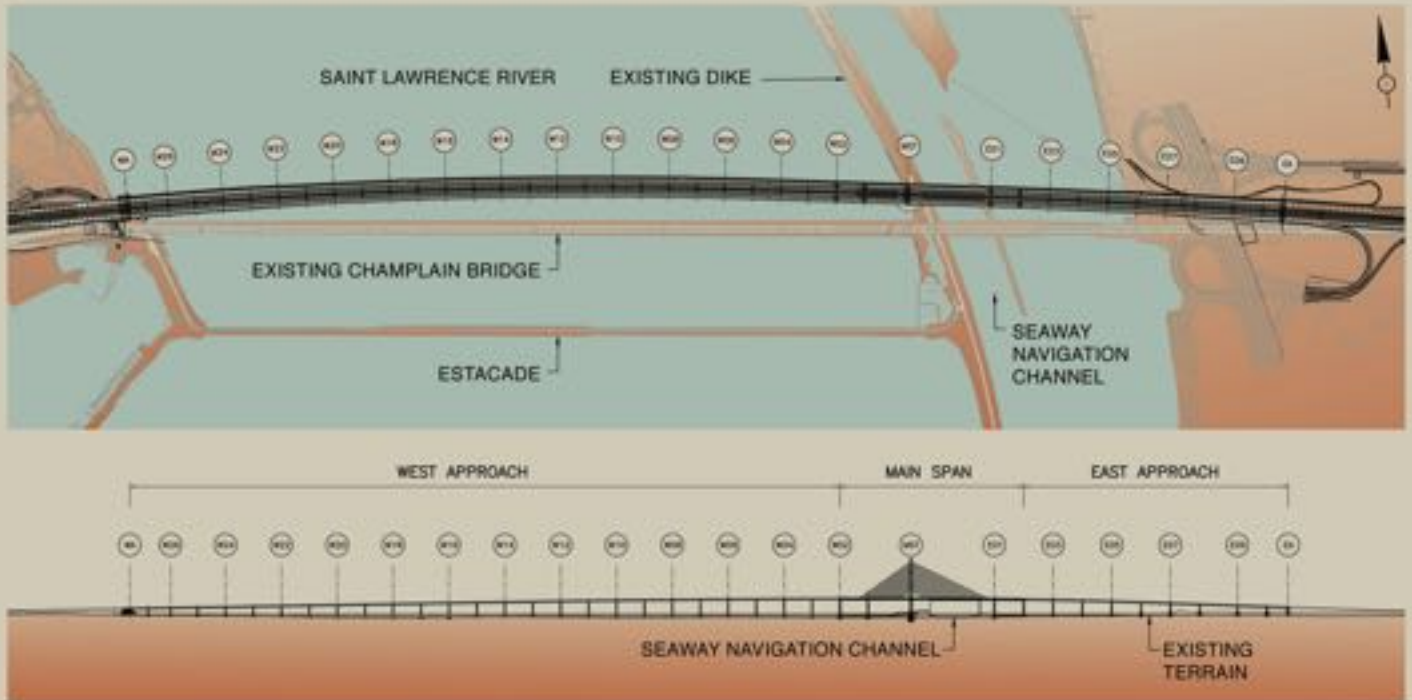
1- Le pont haubané et le viaduc d'Approche Est.

1- The cable-stayed bridge and the East Approach viaduct.

vel ouvrage en remplacement a été considérée comme économiquement et socialement plus bénéfique pour la région.

Ce nouveau pont de 3,4 km consiste en trois structures indépendantes : le viaduc de l'Approche Ouest, le Pont Haubané (*Cable-Stayed bridge, CSB*) et le viaduc d'Approche Est (figure 2).

LE NOUVEAU PONT CHAMPLAIN : VUE EN PLAN ET PROFIL EN LONG



2

© TYLI-HBT-SLI JOINT VENTURE

Le pont haubané, avec sa travée principale de 240 m, constitue un élément signature du projet. Son unique pylône de 160 m de hauteur présente une forme de diapason avec deux mâts parallèles en partie haute. En partie basse, en-dessous du tablier, les jambes du pylône, inclinées, présentent la même forme que les piles des viaducs d'Approche (figure 1).

Les chevêtres des piles des viaducs d'Approche présentent une forme de W, définissant l'esthétique unique de ce pont (figures 3 et 4).

2- Le nouveau pont Champlain : vue en plan et profil en long.
3- Rendu 3D du nouveau pont Champlain.

2- The new Champlain Bridge: plan view and longitudinal profile.

3- 3D depiction of the new Champlain Bridge.

Le projet a été élaboré au travers d'un Partenariat Public Privé (PPP) incluant la Conception, la Construction, le Financement, l'Exploitation et l'Entretien pendant une période de 30 ans.

Un processus de sélection compétitif a été entrepris avec les trois équipes sélectionnées parmi les six candidats initiaux.

L'offre gagnante présentait le prix le plus bas tout en satisfaisant aux critères de sélection techniques obligatoires du point de vue architectural, de la durabilité et du planning.

HYPOTHÈSES DE CONCEPTION

La conception de l'ouvrage est basée sur les principaux codes du CAN/CSA-S6-06 (R2013) Canadian Highway Bridge Design Code, Ministère des Transports du Québec (MTQ) Manuel de Conception des Structures, Volumes 1 and 2, MTQ Collection Normes - Ouvrages Routiers, Volumes I et VII, et les Eurocodes avec les Annexes Nationales anglaises.

Les conditions géologiques locales et les risques climatiques et sismiques ▷



3

© TYLI-HBT-SLI JOINT VENTURE



4

© INFRASTRUCTURE CANADA

du site présentent des défis uniques vis-à-vis de la conception et de la construction du pont. Des études spéciales quant au vent, à la sismicité, au risque d'affouillement, aux chocs des bateaux et aux effets dus à la glace ont été menées

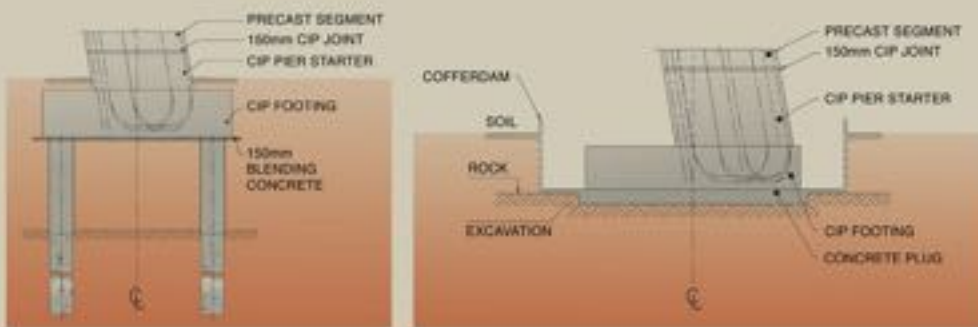
afin d'être prises en compte dans les hypothèses de conception. L'aspect durabilité a fait l'objet d'une attention particulière au travers de l'approche de la protection contre la corrosion des éléments du pont, en tenant compte des critères environnementaux,

de la qualité de la construction et de son accessibilité pour la maintenance, l'inspection, la réparation et le remplacement. Le pont a été conçu pour une durée de vie de 125 ans dans les conditions particulières évoquées ci-dessus.

INFRASTRUCTURE FONDATIONS

Le viaduc d'Approche Ouest a une longueur de l'ordre de 2000 m. Les travées sont supportées par 25 piles fondées sur des semelles reposant sur du rocher.

FONDATIONS : PIEUX FORÉS ET SEMELLE SUPERFICIELLE



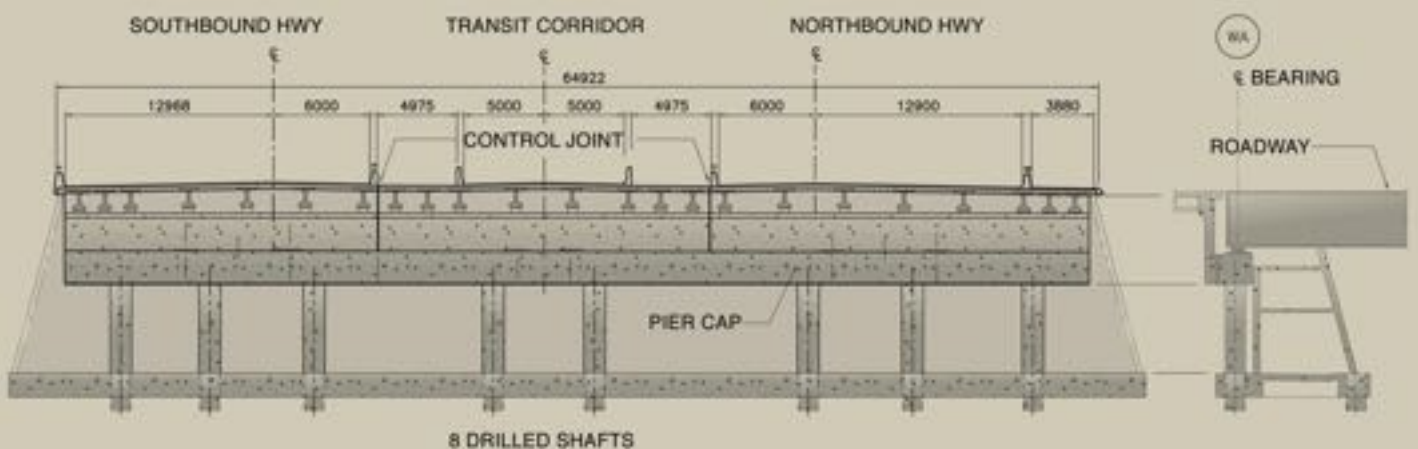
- 4- Pier cap.
- 5- Fondations : pieux forés et semelle superficielle.
- 6- Culée Ouest.

- 4- Pier cap.
- 5- Foundations: bored piles and shallow foundation slab.
- 6- West abutment.

5

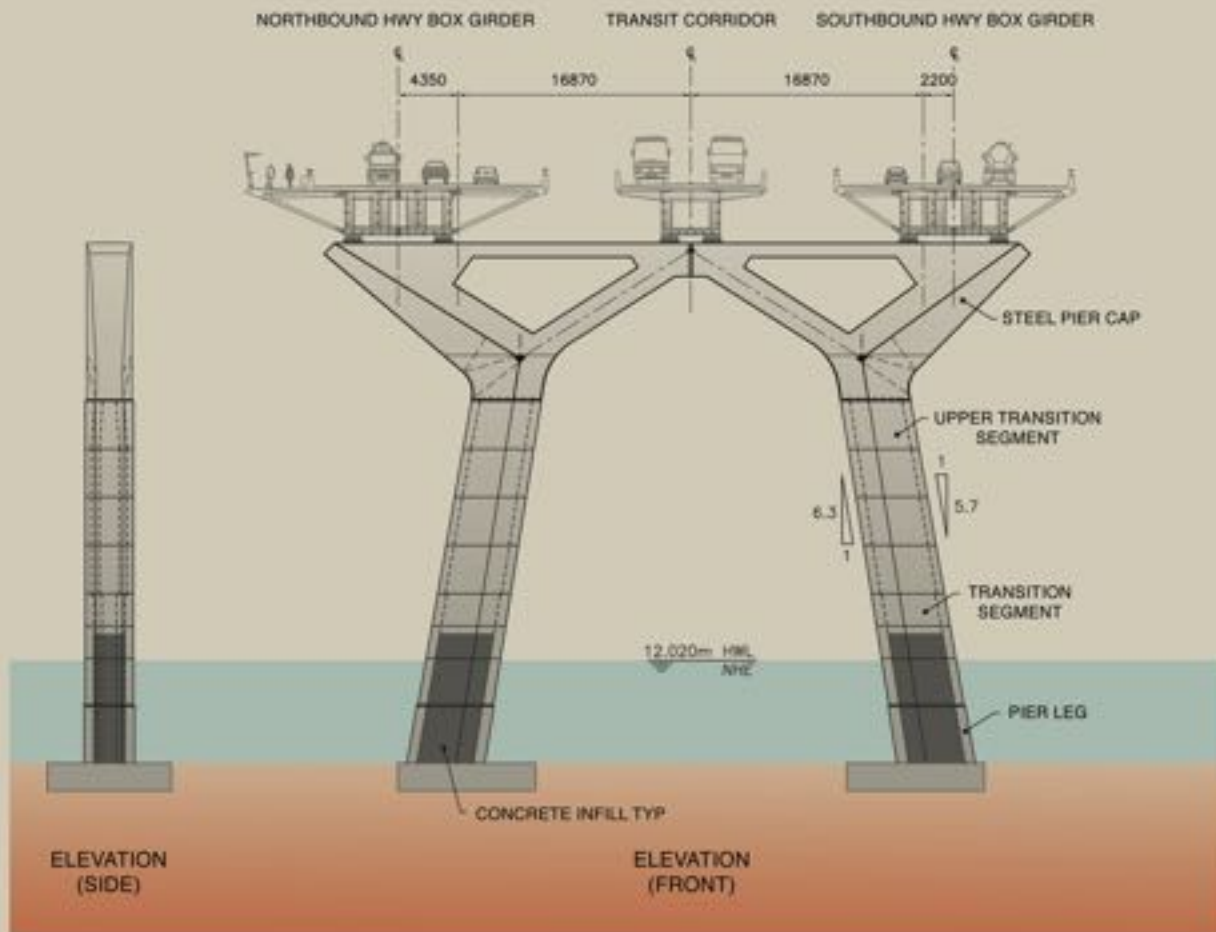
© TYL/IBT-SLI JOINT VENTURE

CULÉE OUEST



6

© TYL/IBT-SLI JOINT VENTURE



© TYU-IBTSU JOINT VENTURE

7



© INFRASTRUCTURE CANADA

8

Le viaduc d'Approche Est est long d'environ 760 m et comprend deux types de fondations : des fondations superficielles - semelles reposant sur du rocher - et des fondations profondes - pieux forés ancrés dans le rocher. Les fondations du pont haubané consistent en des semelles coulées en place sur des pieux forés, à l'exception de la pile E02 fondée sur une semelle coulée en place.

7- Piles : Élévation.
8- Poutres caisson : viaduc d'Approche Ouest.

7- Piers: elevation view.
8- Box girders: West Approach viaduct.

La figure 5 présente un exemple de pieux forés surmontés par une semelle. La conception des fondations est basée sur la résistance et la stabilité (résistance au glissement, au soulèvement, et au renversement) pour les combinaisons de charges dimensionnantes.

CULÉES

La culée Est est formée de trois structures indépendantes qui supportent le

tablier Nord, le tablier du Corridor de Transport et le tablier Sud. Chaque chevêtre repose sur deux pieux forés ancrés dans le rocher.

Des murs en terre armée sont placés à la base de ces chevêtres afin de respecter une unité architecturale avec le reste de la structure.

La culée Ouest est formée de deux séries de colonnes liées en tête par un chevêtre en béton armé formant un ensemble monolithique avec le mur garde grève. Ces colonnes reposent sur une semelle commune supportant la culée du Nouveau pont Champlain et celle du pont Autoroutier adjacent (figure 6).

PILES

Les fûts des piles sont constituées de segments en béton armé présentant une section rectangulaire creuse, empilés et assemblés par précontrainte. Les fûts des piles sont de hauteur variable afin d'obtenir le profil du pont requis.

La hauteur moyenne des piles est d'environ 11,4 m. Les chevêtres sont métalliques et constitués de caissons rigidifiés par des diaphragmes et des raidisseurs.

Le chevêtre forme deux triangles unis au centre reposant sur les piles prismatiques. Les membrures supérieures sont des éléments en traction (figures 7 et 8).



9

© INFRASTRUCTURE CANADA

SUPERSTRUCTURES DES VIADUCS D'APPROCHE

Les superstructures des viaducs d'Approche constituent environ 3 km des 3,4 km du pont (figures 9 et 10). La géométrie de la superstructure est dictée principalement par les critères de fabrication et de transport. Les voussoirs sont limités en poids pour faciliter la pose et le transport.

Pour faciliter le transport jusqu'au site de construction, les dimensions des structures principales sont limitées à 3 250 mm de hauteur et 4 400 mm de largeur (figure 11).

Le tablier est composé d'éléments préfabriqués en béton armé. Ces derniers sont liés à la structure métallique par des joints de béton armé coulés en place, permettant d'obtenir une section résistante mixte acier/béton.

Le ferrailage du tablier du pont est entièrement réalisé en acier inoxydable pour assurer une durée de vie de 125 ans. Les éléments de tablier préfabriqués incluent les barrières de sécurité autoroutières afin d'éviter des joints de construction et de réduire la fissuration dans le but d'augmenter la durabilité de l'ouvrage.

Ces mesures réduisent la quantité de travaux de finition requis permettant de minimiser le temps de construction. Pour compenser le coût important des armatures en acier inoxydable des dalles du pont, les poutres longitudi-

nales présentent une semelle supérieure plus grande afin de réduire la quantité de ferrailage.

Le design des caissons métalliques est conforme aux dispositions de l'Eurocode 3 : EN1993-1-56 tandis que le reste des éléments en acier et en béton ont été conçus selon le Code Canadien de conception des ponts routiers.

9- Viaduc d'Approche Ouest.
10- Viaduc d'Approche Est.

9- West Approach viaduct.
10- East Approach viaduct.

Ce mélange de codes a exigé un examen attentif afin d'assurer une conception cohérente et d'éviter les sur-conceptions ou les sous-conceptions.

L'utilisation de L'Eurocode 3 pour l'analyse du comportement longitudinal, associée aux préférences du fabricant, a abouti à une section en caisson sans



10

© SYSTRA

raideurs longitudinaux mais avec des âmes plus épaisses.

Une attention particulière a été donnée afin de maximiser l'efficacité de la section et limiter le poids des éléments en acier sur appuis.

L'addition d'une dalle de béton sur la semelle inférieure (action composite) au niveau des caissons sur piles a permis de descendre l'axe neutre élastique, ce qui a pour effet d'augmenter les contraintes dans l'armature des dalles du tablier.

Un bon compromis a été obtenu en optimisant la section des poutres afin de limiter le poids total de la structure en acier, tout en minimisant la quan-

tité de ferrailage en acier inoxydable nécessaire pour contrôler l'ouverture de fissure. Une attention particulière a été apportée à la compatibilité en déformation et le voilement local entre les

lignes de goujons a été vérifié sur la base des Eurocodes et des dernières recommandations des rapports du Florida Department of Transportation. Le phasage de construction classique du tablier consiste en l'assemblage des segments formant une travée entière, ensuite soulevée et accolée à la section précédemment mise en place. Une fois que les poutres sont positionnées, les éléments secondaires sont assemblés et prêts pour l'installation des dalles préfabriquées. Les joints en béton armé permettant la liaison entre la structure métallique et les dalles sont coulés en place suivant une séquence qui minimise les contraintes sur appuis.

LE PONT HAUBANÉ

Le pont haubané présente 4 travées, un pylône, des piles et un système de haubanage.

SUPERSTRUCTURES ET CROSS-BEAM

La superstructure est formée par 3 poutres-caissons longitudinales principales qui supportent respectivement le tablier Nord, le tablier Sud et le tablier central. Ces poutres sont constituées par des éléments en acier supportant des dalles préfabriquées en béton armé, conçues pour résister à toutes les charges y compris le séisme, le vent et les situations accidentelles. ▷

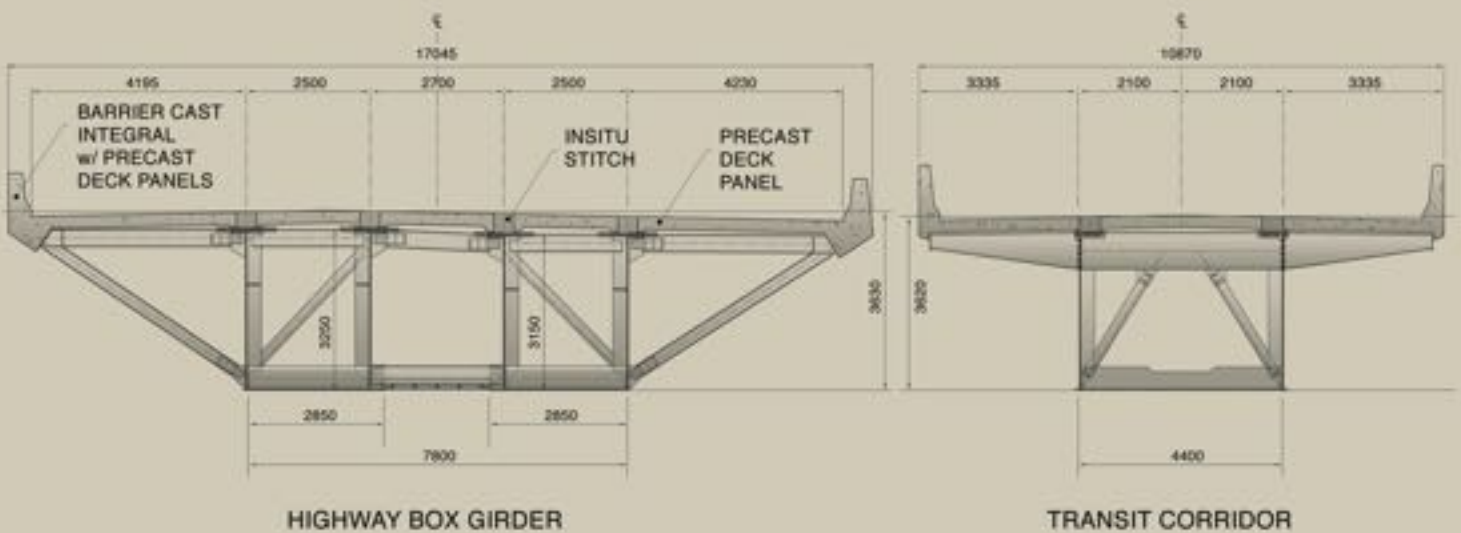
11- Sections courantes tabliers.

12- Superstructure cross-beam.

11- Standard deck sections.

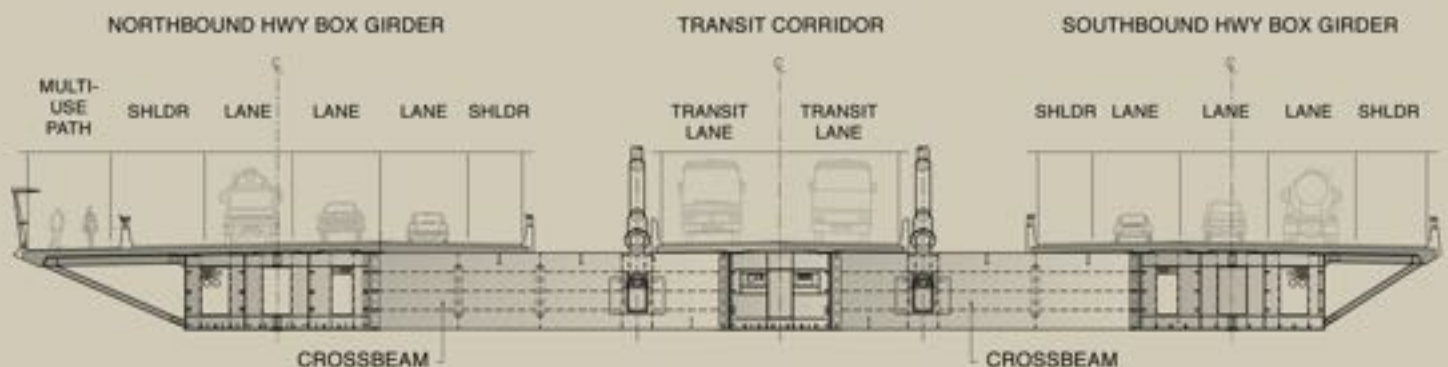
12- cross-beam superstructure.

SECTIONS COURANTES TABLIERS



11

SUPERSTRUCTURE CROSS-BEAM



12

© TYLI-HBT-SLI JOINT VENTURE

La structure de cet ouvrage n'étant pas symétrique pour des raisons architecturales, un contrepoids en béton a été utilisé au niveau de la travée arrière pour stabiliser le pylône.

Un *cross-beam* au niveau de chaque couple de haubans liaisonne les trois caissons longitudinaux pour former un grillage en plan de poutres. Cet élément transfère le poids des caissons vers les haubans, et facilite la distribution et le balancement des efforts dans le pylône. Le *cross-beam* est assemblé avec un segment de chacun des caissons principaux. Cet ensemble forme le segment de base pour la construction de la travée principale au-dessus du canal navigable (figure 12).

LE PYLÔNE

Le pylône présente deux fûts constitués par des éléments en béton armé préfabriqués et coulés en place, érigés sur une semelle de fondation en béton armé, elle-même coulée en place sur des pieux-caissons.

Les fûts du pylône sont creux afin de permettre la mise en place d'ascenseurs, d'échelles et de canalisations. Elles sont liées par deux traverses dont la supérieure évoque la forme d'un nœud papillon.

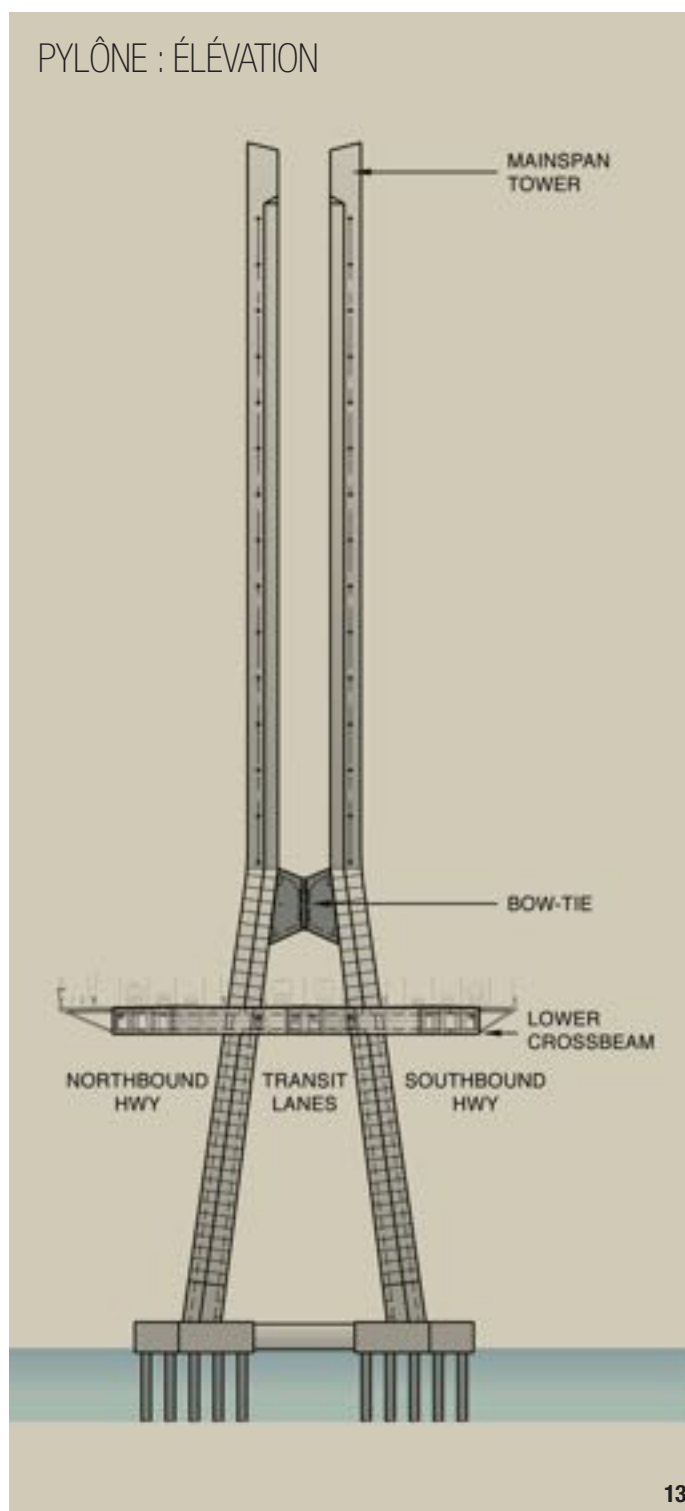
La traverse inférieure se trouve encadrée par la superstructure et le nœud papillon respecte le gabarit routier du tablier central (figure 13).

Les parties inférieures du pylône jusqu'au nœud papillon sont inclinées de 1/7 par rapport à la verticale, tandis que les parties supérieures sont verticales et autostables.

Les exigences architecturales concernant cette forme de pylône et la position des haubans le long des fûts induisent une excentricité de la composante verticale des forces dans les haubans. Ceci produit un moment permanent dans les fûts du pylône selon l'axe longitudinal, nécessitant une contreffèche initiale de ces derniers pour compenser la déformation due aux charges permanentes.

En plus de former la colonne vertébrale de la partie basse du pylône en forme de A, la traverse inférieure supporte environ 60 m des structures des travées secondaires et principales et elle résiste à la torsion induite par le différentiel de charge entre ces deux travées. Structurellement parlant, cet élément est l'un de plus rigides de l'ouvrage.

Fonctionnellement parlant, la traverse inférieure permet le passage entre les trois poutres principales longitudinales,



13- Pylône : Élévation.

13- Pylon: elevation view.

sert comme centre de coordination et de distribution des principaux réseaux circulant dans l'ensemble de la superstructure et du pylône, comme base des principaux ascenseurs et comme station principale pour le portique de maintenance circulant en sous-face des tabliers.

CONSTRUCTION

Le plus grand défi de la construction du pont haubané est de traverser le fleuve

être respecté afin de limiter l'impact sur la navigation.

La voie maritime peut geler de décembre à mars.

Ceci présente peu de restrictions vis-à-vis de la réalisation de travaux, cependant la sévérité de l'hiver rend le bétonnage difficile et la productivité globale est réduite.

Par conséquent, la construction de la travée principale s'est poursuivie durant les printemps et les étés 2017 et 2018, après l'obtention de la part de la société de gestion de la voie maritime de l'autorisation quant au passage des segments de pont à travers la partie restante du gabarit.

Chaque segment est soulevé par un portique qui le transporte sous la sous-face de la travée principale vers le front de montage au-dessus de la voie maritime (figure 14).

Un autre portique soulève alors le segment en position afin de le connecter aux segments précédemment mis en place.

Le déplacement au-dessus de la voie maritime a lieu sur une période de plusieurs heures.

Une fois que le segment est positionné, il n'obstrue plus le gabarit.

Des limitations de navigation sont imposées par la diminution du gabarit maritime de plusieurs mètres pendant le transport et la mise en place d'un segment.

Une des méthodes traditionnelles pour la réalisation d'un pont haubané est la construction par encorbellement : il s'agit tout d'abord de mettre en place le caisson métallique formant la poutre principale, puis d'y attacher les haubans et enfin de mettre en place la dalle en béton armé formant le tablier. Afin d'accélérer la construction, cette procédure a été modifiée et les caissons métalliques des poutres principales sont mis en place avec la majeure partie de la dalle béton armé déjà en place sur ce dernier.

De ce fait, le temps passé pour chaque voussoir est réduit.

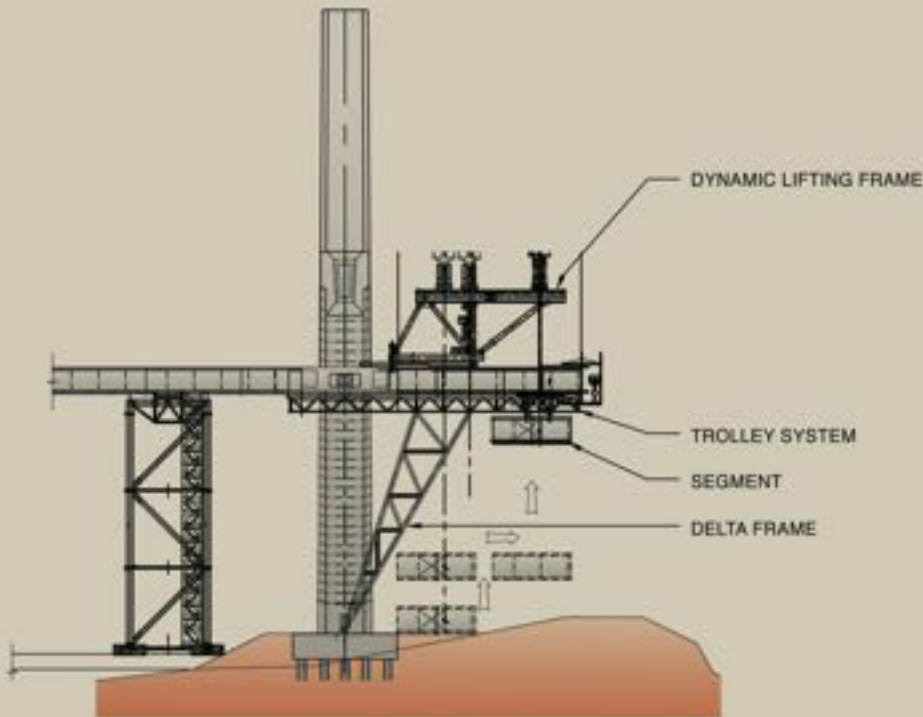
ÉLÉMENTS CLÉS DE CONCEPTION POUR ACCÉLÉRER LA CONSTRUCTION

D'autres éléments clés vis-à-vis du temps de réalisation sont présentés ci-dessous :

SEMELLES PRÉFABRIQUÉES

Certaines semelles de fondation superficielles ont été réalisées dans une installation temporaire certifiée

CONSTRUCTION DU PREMIER VOUSOIR DE LA TRAVÉE PRINCIPALE



© TYLI-IBT-SLI JOINT VENTURE

14

SEGMENTS DES FÛTS DE PILE PRÉFABRIQUÉS

Les fûts des piles sont construits en parallèle par éléments préfabriqués. La préfabrication facilite l'incorporation des éléments architecturaux et garantit une excellente qualité de réalisation.

CHEVÊTRES MÉTALLIQUES

Bien que la construction des chevêtres en béton soit possible, plusieurs problématiques augmentent le risque de non-respect des délais.

La forme complexe des éléments aurait nécessité des coffrages du même ordre et des temps de prise importants.

L'importante traction en partie supérieure du chevêtre aurait induit une forte concentration de précontrainte et l'emploi de cette dernière implique le respect d'un certain phasage de mise en tension successive des câbles.

Enfin le levage d'éléments en béton si lourds aurait été difficilement réalisable.

Les chevêtres en acier réduisent le temps de construction du fait de leur fabrication hors site, nécessitant moins d'étapes de construction et de pose, et aussi de plus petites grues.

de préfabrication sur site, permettant au chantier de poursuivre durant les périodes froides de l'hiver, lorsque le béton devient extrêmement difficile à couler.

Ceci permet de mener en parallèle la préparation des fondations et la réalisation des éléments préfabriqués, plutôt qu'un processus en série comme pour une construction conventionnelle.

14- Construction du premier voussoir de la travée principale.

14- Construction of the first segment of the main span.

SUPERSTRUCTURE DU PONT HAUBANÉ

Le pylône du pont haubané et ses fûts-tours formant sa partie supérieure sont des éléments préfabriqués en béton, sauf au niveau des transitions et au niveau du changement d'inclinaison le long du fût. □

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Gouvernement du Canada

AMO : Signature on the St. Lawrence Group

BUREAU D'ÉTUDES : TYLI-IBT-SLI Joint Venture (joint venture of T.Y. Lin International Canada Inc., International Bridge Technologies Canada Inc., and SNC Lavalin Inc.)

ENTREPRISES : Signature on the St. Lawrence Constructors (partnership of SNC Lavalin Major Project Inc., Dragados Canada, Inc., and Flatiron Constructors Canada Limited)

QUANTITÉS DU PONT PRINCIPAL

ARMATURES : 72 700 t

PRÉCONTRAÎTE : 1 110 t

BÉTON : 107 000 m³

HAUBANS : 1 120 t

COÛT (DESIGN + CONSTRUCTION) : 2,15 milliards CAD

ABSTRACT

THE NEW CHAMPLAIN BRIDGE IN CANADA

MARWAN NADER, T.Y.LIN INTERNATIONAL - ZACHARY MCGAIN, SYSTRA - SEVAK DEMIRDJIAN, SNC-LAVALIN - JEFF ROGERSON, FLATIRON CONSTRUCTION CORP.

The new Champlain Bridge is a very significant infrastructure project in North America. The unique environmental constraints, demanding sustainability requirements and architectural plans meant that special solutions had to be developed. The design was adapted to speed up construction work in order to complete the works by the planned date. □

EL NUEVO PUENTE CHAMPLAIN EN CANADÁ

MARWAN NADER, T.Y.LIN INTERNATIONAL - ZACHARY MCGAIN, SYSTRA - SEVAK DEMIRDJIAN, SNC-LAVALIN - JEFF ROGERSON, FLATIRON CONSTRUCTION CORP.

El nuevo puente Champlain es un excepcional proyecto de infraestructuras en Norteamérica. Las restricciones medioambientales únicas, las altas exigencias en términos de durabilidad y las voluntades arquitectónicas han obligado a desarrollar soluciones específicas. El diseño se ha adaptado para acelerar la realización de la construcción y poder finalizar las obras en el plazo previsto. □



1

© HYUNDAI

NAMHANGANG BRIDGE KOREA

AUTHORS: ERIC GOGNY, DESIGN MANAGER, VPP DEPARTMENT, SYSTRA - HYO KI PARK, SENIOR STRUCTURAL ENGINEER, SYSTRA KOREA - HONG YONG KIM, SENIOR STRUCTURAL ENGINEER, HYUNDAI ENGINEERING AND CONSTRUCTION - SERGE MONTENS, SCIENTIFIC MANAGER, VPP DEPARTMENT, SYSTRA

NAMHANGANG STEEL RAILWAY BRIDGE IS 480 m LONG WITH FIVE SPANS, AND CARRIES A DOUBLE-SLAB TRACK WITH A DESIGN SPEED OF 250 km/h AND A FUNCTIONAL WIDTH OF 10.9 m. IT CONSISTS OF THREE ALTERNATE BOWSTRINGS AND TWO UNDER-SLAB TRUSSES. THE FIRST (100 m), THIRD (120 m) AND FIFTH (100 m) SINGLE SPANS ARE BOWSTRINGS, WHILE THE SECOND AND FOURTH SPANS (80 m) ARE UNDER-SLAB TRUSSES. THIS COMBINATION OF ARCHES AND UNDER-SLAB TRUSSES CREATES A WAVE IMPRESSION OVER THE NAMHAN RIVER, WHICH BLENDS INTO THE SURROUNDING MOUNTAINS. THIS ORIGINAL CONCEPT, COMBINING TWO SIMPLE TYPES OF STRUCTURES, WAS IMAGINED BY SYSTRA DURING THE TENDER DESIGN STAGE.

INTRODUCTION

Korea Railway Network Authority planned to upgrade the line from Dodam to Youngchun on the existing Jungang Railway. The total length is approximately 135 km. In 2011, the invitation to tender for work package 1 was issued under a design and build contract. Work package 1 is 12.5 km long. It consists of 4.5 km of earthworks, 7.3 km of tunnel and 665 km of viaduct. The route

layout is shown in figure 2. One of the key structures is Namhangang Bridge. The bridge crosses the Namhan River. The structural layout in the basic planning stage was $6 \times 80 = 480$ m. It was a series of simple arches and looked boring. During the design and build stage, two bidders proposed their own basic design concepts. Hyundai E&C and SYSTRA proposed a combination of arches and trusses with the following

1- 3D view of the Namhangang Railway Bridge.

1- Vue 3D du pont rail de Namhangang.

spans: $100 + 80 + 120 + 80 + 100 = 480$ metres. This combination gave the bridge a more dynamic aspect, without modifying the vertical clearance height in the centre of the bridge for shipping. The other competitor's proposal was a single arch with a central pylon. After assessment by an independent expert, the combination of arches and trusses was selected for the detailed design. (figure 3).



BRIDGE DESCRIPTION

GEOMETRY AND CROSS SECTIONS
Bowstrings

A functional transverse distance of 10.9 m has been provided and the overall width of the cross section is 14 m. The slenderness ratio L/h , where L is the span length and h is the bridge depth, is taken as approximately 5.5

2- Location map.
3- Namhangang Railway Bridge concept designs.

2- Localisation géographique.
3- Les concepts du pont rail de Namhangang.

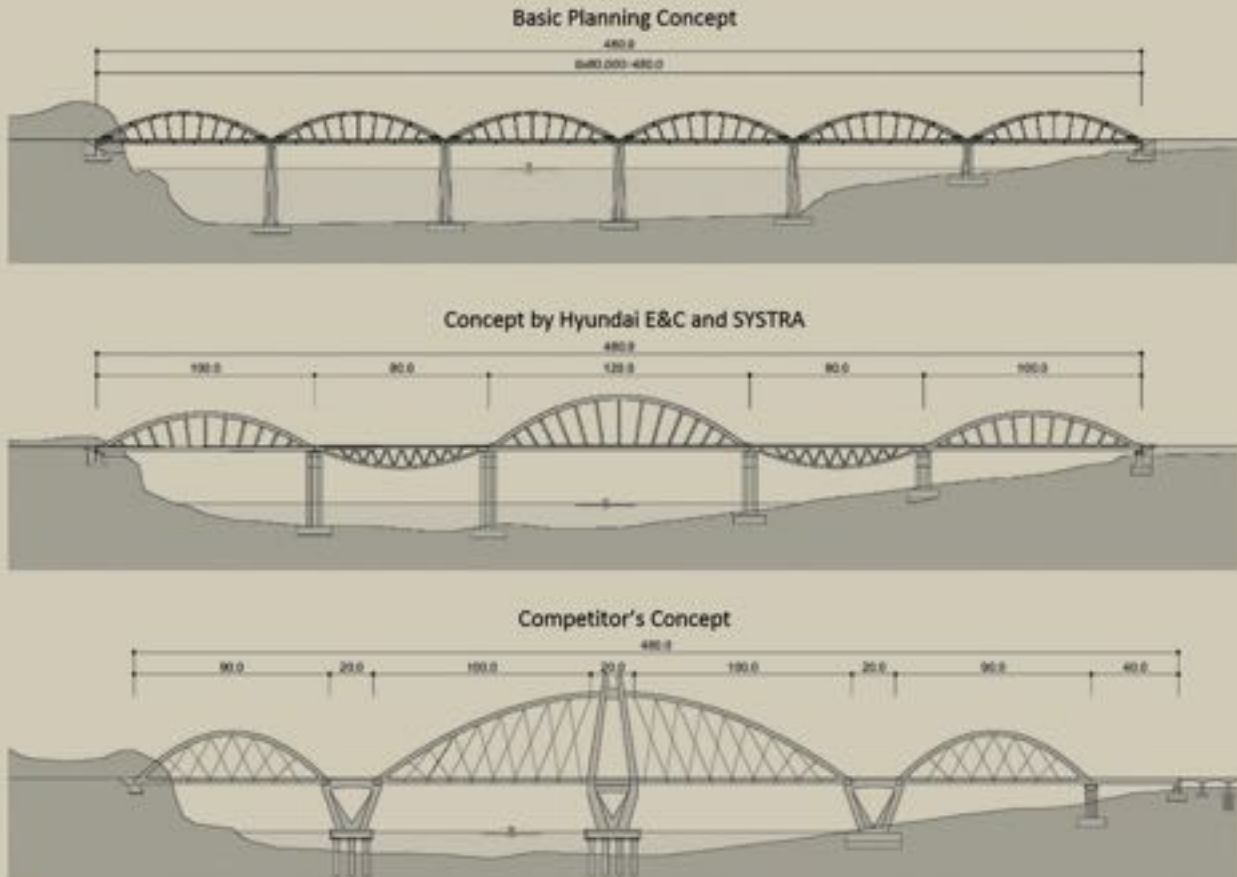
for the 100-m-long span and 4.7 for the 120-m-long span. The first arch is 18.0 m high and the second is 25.5 m. The 100-m span has 11 hangers and the 120-m span has 13, spaced 7.5 m apart. The hangers are arranged radially for aesthetic reasons.

Typology of the 100-metre span
The profile and cross section of the 100-m span are shown in figure 4.

→ **Arch and tie**

For the 100-metre-span arch, the box section tie beam is 1,500 mm by 2,000 mm. Flange thickness ranges from 18 to 20 mm and web thickness from 14 to 16 mm. The arch cross section is 1,500 mm by 2,000 mm, which is the same as for the tie section.

NAMHANGANG RAILWAY BRIDGE CONCEPT DESIGNS



© SYSTRA
3

The arch flange thicknesses are 18, 24 and 26 mm while the web thicknesses are 20, 22 and 24 mm.

Two types of strong end diaphragm sections are used. The first type is a 2,400 mm by 2,000 mm box section at both ends, and the second type is a 1,200 mm by 2,000 mm box section at the first intermediate diaphragm. A typical 'I' section is used for the other intermediate diaphragms. The diaphragm height is 2,000 mm and the width of the flanges is 660 mm. The flange thickness is 32 mm and the web is 20 mm thick.

Three bracings are provided at the top of the arches, to ensure trans-

verse stability. The box section is 1,200 mm by 1,100 mm and a plate of thickness 20 mm has been used.

→ **Diaphragms and stringers**

The diaphragms are linked by stringers beneath the tracks. The stringer consists of an 'I' section, 790 mm high with a flange width of 400 mm.

→ **Hangers**

Nowadays, most bowstrings are suspended by cables or circular bars. Such hangers have several advantages. Cable tension can be adjusted for dead loads, to distribute the loads evenly between the hangers. It is easy to replace a hanger in the event of a rupture

4- Elevation view and cross section of 100 m bow-string arch.

5- Elevation view and cross section of 120 m bow-string arch.

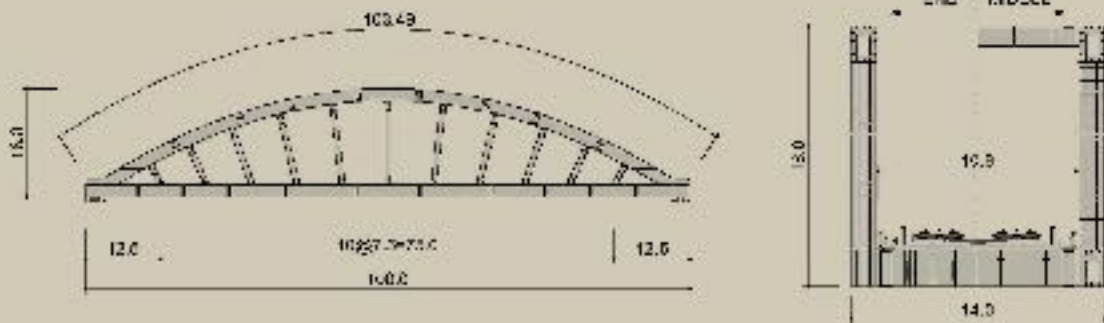
6- Elevation view and cross section of 80 m truss.

or damage, as they are connected at each end by pins. However, the connection systems are often made of mechanical devices which are more expensive than the connections normally used for steel structures. For this project, box-section hangers were chosen despite their unattractive appearance, but the hanger design replicates the diagonals of the truss beams.

The cross-section of a box-section hanger is 900 mm by 1,400 mm. The plate is 16 mm, the flanges are 20, 24 and 26 mm and the web is 30 mm thick.

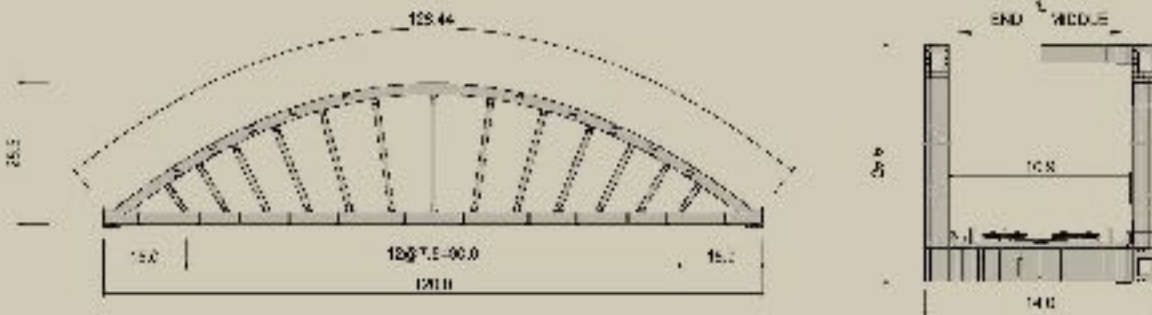
For loaded single and double tracks, including the dynamic impact, the

ELEVATION VIEW AND CROSS SECTION OF 100 m BOWSTRING ARCH



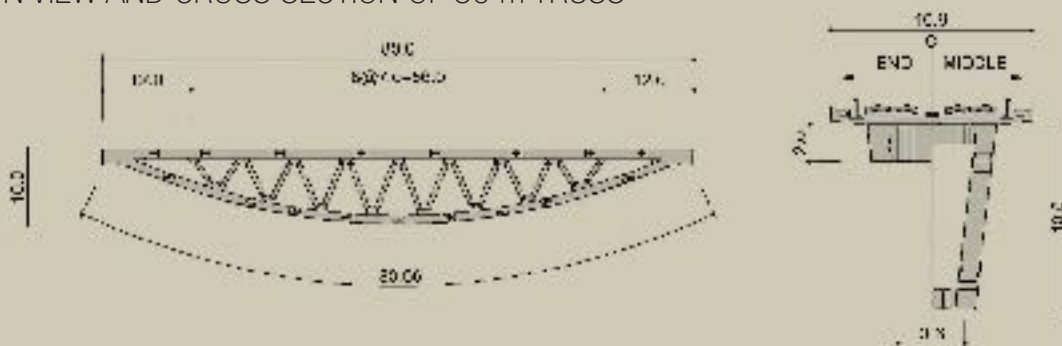
4 © SYSTRA

ELEVATION VIEW AND CROSS SECTION OF 120 m BOWSTRING ARCH



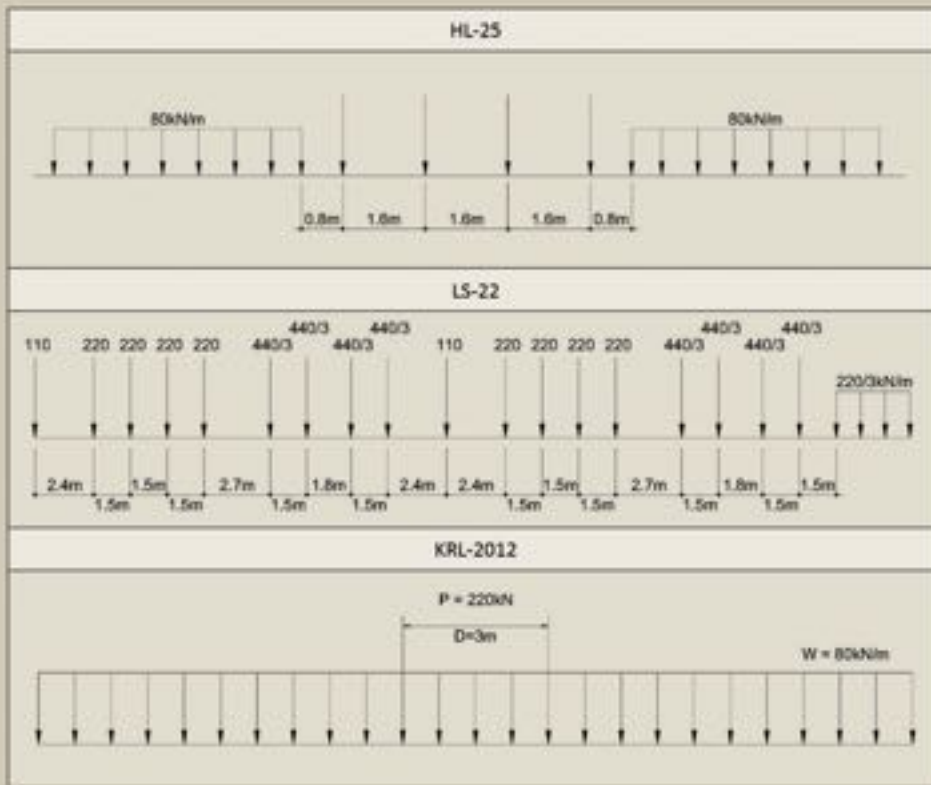
5 © SYSTRA

ELEVATION VIEW AND CROSS SECTION OF 80 m TRUSS



6 © SYSTRA

HL-25, LS-22, KRL-2012 TRAIN LOADING DIAGRAM



© SYSTRA
7

bridge deflection is approximately 25 mm and 45 mm respectively. This corresponds to ratios of approximately L/4,000 and L/2,200. Note that this structural articulation is quite stiff.

Typology of a 120-metre span: The profile and cross section of a 120-metre span are shown in figure 5.

→ Arch and tie

For a 120-metre-span arch, the cross section of the box-section stiffening girder is 1,500 mm by 2,000 mm. Flange thicknesses are between 18 mm and 30 mm and web thicknesses are 20 mm and 32 mm. The cross section of the arch rib is 1,500 mm by 2,000 mm, which is the same as the girder section. The flanges of the arch rib measure 18, 20 and 24 mm. The webs of the arch rib measure 14, 16 and 18 mm.

→ Diaphragms and stringers

Two types of strong end diaphragm sections are used. The first type is a 2,600 mm by 2,000 mm box section at both ends, and the second type is a 1,500 mm by 2,000 mm

7- HL-25, LS-22, KRL-2012 train loading diagram.

7- Schéma des charges de train HL-25, LS-22, KRL-2012.

box section at the first intermediate diaphragm. A typical 'I' section is used for the other intermediate diaphragms. The height is 2,000 mm and the width of the flange is 700 mm. The flange thickness is between 26 and 34 mm and the web thickness is between

TABLE A: RAIL STRESS LEVELS

Case		Rail Stress (MPa)	Location
No REJ	Compression	139	A1
	Tension	105	A1
REJ at P4	Compression	84	P1
	Tension	70	P1

TABLE B: RESULTS OF THE DYNAMIC PERFORMANCE STUDY

	Train	Acceleration (m/s ²)	Deflection (mm)
120 m Arch	Freight	4.1	21.9
	EMU	4.0	11.2
100 m Arch	Freight	4.55	15.6
	EMU	3.19	7.5
80 m Truss	Freight	2.16	17.0
	EMU	3.22	8.5

20 and 30 mm. The stringer is an 'I' section of height 790 mm and flange width 400 mm. A total of three top bracings are provided. Each section is a 1,200 mm by 1,200 mm box section and a plate 20 mm thick has been used.

→ Hangers

The hanger is a 1,000 mm by 1,400 mm box section. The plate thickness is 18 mm and 20 mm for the flanges, and 24, 28 and 32 mm for the webs.

For loaded single and double tracks, including the dynamic impact, the deflection is approximately 35 mm and 63 mm respectively, which corresponds to approximately L/3400 and L/1900.

Under-Slab Trusses Bridge Typology

Usually, for a typical truss beam, the slab is at the level of the lower member and the train runs between the two main girders. This project, with a truss beam beneath the slab, creates an original bridge with ascending and descending bowstrings.

The longitudinal and cross sections for an 80-metre span are shown in figure 6.

The total depth of the truss is taken as 10 m and the main girders are inclined to make the bridge slender. The span-to-truss depth ratio is taken as 8, which is smaller than the span-to truss-rise ratio for the bowstrings. In order to maximise the vertical clearance above the highest water level in the flood season, the span-to-truss depth ratio has also been maximised.

Main trusses, cross-beams and stringers

The upper and lower chord section is a steel box 1,200 mm by 1,100 mm. The plate thickness ranges from 34 mm to 44 mm. The upper end bracing is a 900 mm by 2,000 mm box section with plate thicknesses from 20 mm to 22 mm.

The intermediate crossbeams are also steel boxes measuring 400 mm by 100 mm, with plate thicknesses from 16 mm to 20 mm.

The stringer is an 'I' section 600 mm high, with 400 mm wide flanges.

The lower bracing is made of three different box sections, 600 mm, 1,000 mm and 1,500 mm by 1,000 mm.

For a loaded single and double track, including impact, deflection is approximately 25 mm and 36 mm respectively, which corresponds to approximately L/3200 and L/2200.



8 © HYUNDAI

8- Bowstring arch erection (step 1).

9- Bowstring arch erection (step 2).

10- Bowstring arch erection (step 3).

8- Montage du bowstring (phase 1).

9- Montage du bowstring (phase 2).

10- Montage du bowstring (phase 3).



9 © HYUNDAI

MATERIAL

Two grades of steel have been used for the structure. Grade HSB500 steel is used for the main arch and truss members. The yield and tensile strength for this HSB500 is respectively 380 MPa, and 500 MPa for a 100 mm steel plate thickness. This grade of steel is similar to an S355 grade according to the Eurocode. Steel grade SM400 has been used for auxiliary members. The yield and tensile strength for this SM400 is 235 MPa (up to 40 mm) and 400 MPa up to 100 mm, which is equivalent to an S235 grade in Europe.

A normal grade for concrete, with $f_{ck}=27$ MPa, has been used for the deck slab and $f_{ck}=30$ MPa for the piers and abutments.

TRACK AND TRAINS

The bridge is ballastless, so the track is supported by a concrete slab.



10 © HYUNDAI



11- Bowstring arch erection (step 4).

12- Bowstring arch erection (step 5).

13- Bowstring arch erection (step 6).

11- Montage du bowstring (phase 4).

12- Montage du bowstring (phase 5).

13- Montage du bowstring (phase 6).

Two kinds of trains will be operated on the line:

- Freight trains running at 150 km/h with equivalent bogie spacings of 13.95 m. Axle loads will be 20 tons and 20-wagon trains are planned.
- High-speed electric multiple-unit trains running at 250 km/h, with a 23.5-metre bogie spacing. Axle loads will be 16 tons and 6-carriage trainsets are planned.

DESIGN LOAD

The live design loads do not differ greatly from the Eurocode recommendations.

The design for civil works is based upon the Korea Railway Design Standard (2011). Initially, railway loading should cover the greater of HL-25 loading (equivalent to the LM71 in Eurocode) and LS-22 loading. HS-25 is high-speed railway loading, while LS-22 is a general freight railway loading. During detailed design, railway loading in Korea was updated to KRL-2012, and the loading diagram is as follows. The real impact due to this change was not substantial. All train loadings are shown in figure 7.

Seismic loading is based upon an earthquake with a 1,000-year return period. The peak ground acceleration is taken as 0.154 g.

SUBSTRUCTURE

Ground conditions are quite good. Soft and hard rocks are found at shallow depths. The average thickness of the residual soil layer is approximately 3.7 m.

The pier stem is a solid rectangular section, 8.5 m by 7.5 m with circular corners. The overall pier heights from the base of the footing are 38 m, 39.3 m, 33 m and 21 m respectively. The piers are T type.



© HYUNDAI
11

© HYUNDAI
12

© HYUNDAI
13

14- Truss structure erection (step 1).

15- Truss structure erection (step 2).

16- Truss structure erection (step 3).

14- Montage de la structure treillis (phase 1).

15- Montage de la structure treillis (phase 2).

16- Montage de la structure treillis (phase 3).

Due to the good soil characteristics, spread foundations have been chosen for all supports. A square foundation of 16 m by 16 m is planned for tall piers (P1, P2 and P3) and a 15 m by 15 m square for the smallest pier (P4).

RAIL-STRUCTURE INTERACTION

The interaction between track and bridge can generate powerful forces which may damage both. The analysis of rail-structure interaction is of great interest for railway bridges when continuous welded rails are installed, to ensure the integrity and durability of the track. One of the rail-structure interaction criteria to be checked is the additional stress caused by this interaction, to anticipate stresses in the rail. To measure the forces caused by the interaction, a full model of the bridge was needed, including the stiffness of supports, representing the track, attached by spring clips to the deck and the abutments. For this project the track fastener resistance of 30 kN/m for an unloaded track was taken into account instead of the usual value of 40 kN/m. This was made possible by using RLR (reduced longitudinal restraint) fasteners.

The first calculation resulted in a peak stress of 139 MPa in compression and 105 MPa in tension, which is far beyond the permitted limit of 92 MPa. Consequently, a rail expansion joint was fitted at P4, to release the stresses in the rail.

In the basic design, the pier section was hollow. Following the RSI analysis, the pier stiffness needed to be increased and was changed to a solid section during the detailed design. Finally, rail stress was reduced to an acceptable level (table A).



14

© HYUNDAI



15

© HYUNDAI



16

© HYUNDAI



© HYUNDAI
17



© HYUNDAI
18



© HYUNDAI
19

DYNAMIC PERFORMANCE

The track is a ballastless system, so the track is supported by a concrete slab. The vertical acceleration limit for this type of track is 5 m/s^2 (compared to 3.5 m/s^2 for a ballasted track).

Two kinds of trains will be operated on the line, requiring a dynamic performance study.

- Freight trains running at 150 km/h.
- High-speed electric multiple-unit trains running at 250 km/h.

The results are summarised in the table B. As can be seen, the maximum acceleration is less than 0.5 g and the deflection is less than $L/1900 \sim 2200$.

CONSTRUCTION

Construction was scheduled from 2014 to 2016. Initially, the foundations for Abutment A1, Pier 1 and Pier 2 required temporary retaining structures to allow dry work, and other foundations ▷

17- Truss structure erection (step 4).

18- Truss structure erection (step 5).

19- Truss structure erection (step 6).

17- Montage de la structure treillis (phase 4).

18- Montage de la structure treillis (phase 5).

19- Montage de la structure treillis (phase 6).



20

© HYUNDAI

20- Placing the first bowstring arch.

21- Installation completed.

20- Mise en place du premier bowstring.

21- Mise en place complète.



21

© HYUNDAI

were planned as land work, using temporary embankments. In practice, the temporary retaining structures were not required due to low water levels, so the construction of piers and erection of steel structures were feasible behind temporary embankments.

All arches and truss structures were erected section by section. Small sections were joined by prestressed bolts on land, then large sections were erected by crane. Two temporary bents were erected to support the three bridge longitudinal sections. The stiffening girders were erected section by section with the crossbeam and

bolted together. The arch was divided into three sections, which were erected with their hangers from both sides. At the end, the central arch section was installed with its hangers. The erection sequences are shown in figures 8, 9, 10, 11, 12 and 13.

For the truss girder, the lower chord was first erected on temporary bents. Then sections composed of the upper chord and some diagonal members were connected to the lower chord. The erection sequences are shown in figures 14, 15, 16, 17, 18 and 19. Figures 20 and 21 show the first span and the final span erection stage. □

QUANTITIES FOR THE MAIN BRIDGE

ABUTMENTS: concrete 1,497 m³, reinforcement 131 metric tons

PIERS: concrete 9,891 m³, reinforcement 990 metric tons

SUPERSTRUCTURE DECK: concrete 2,170 m³, reinforcement 304 metric tons, structural steel 6,219 metric tons

STAKEHOLDERS

EMPLOYER: Korea Railway Network Authority

CONTRACTOR: Hyundai Engineering and Construction

BASIC AND DETAILED DESIGN: Systra

ABSTRACT

LE PONT DE NAMHANGANG EN CORÉE

ERIC GOGNY, SYSTRA - HYO KI PARK, SYSTRA KOREA - HONG YONG KIM, HYUNDAI ENGINEERING AND CONSTRUCTION - SERGE MONTENS, SYSTRA

Le pont ferroviaire de Namhangang, d'une longueur totale de 480 m, est composé de 5 ouvrages métalliques isostatiques. Il comprend trois bowstrings et deux structures treillis sous dalle. La première travée ainsi que la travée centrale et la dernière sont de type bowstring de 100 m, 120 m et 140 m de portée respectivement, alors que la seconde et la quatrième sont de type structure treillis de 80 m de portée. Ils supportent deux voies circulant à 250 km/h. La largeur fonctionnelle du tablier est de 10,9 m et la largeur totale de 14,0 m. La flèche de l'arc est de 18 m pour les travées de 100 m et de 25,5 m pour la travée de 120 m. Il y a 11 suspentes espacées de 7,5 m pour les travées de 100 m et 13 pour la travée de 120 m. Les suspentes sont inclinées pour donner un effet architectural. La hauteur totale des structures treillis est de 10 m. L'élanement, rapport entre la longueur de la travée et la hauteur de l'ouvrage, pris égal à 8 pour les poutres treillis, est plus faible que celui des bowstrings. La construction a été terminée en 2017 pour une mise en circulation en 2018. □

EL PUENTE NAMHANGANG EN COREA

ERIC GOGNY, SYSTRA - HYO KI PARK, SYSTRA KOREA - HONG YONG KIM, HYUNDAI ENGINEERING AND CONSTRUCTION - SERGE MONTENS, SYSTRA

El puente ferroviario Namhangang, de una longitud total de 480 m, está formado por 5 construcciones metálicas isostáticas. Incluye tres bowstrings y dos estructuras de celosía bajo losa. El primer tramo, el tramo central y el último tramo son de tipo bowstring de 100, 120 y 140 m de longitud respectivamente, mientras que el segundo y el cuarto son de tipo celosía de vigas de 80 m de longitud. Soportan dos vías centrales que circulan a 250 km/h. La anchura funcional del tablero es de 10,9 m y la anchura total, de 14,0 m. La flecha del arco es de 18 m para los tramos de 100 m, y de 25,5 m para el de 120 m. Los tramos de 100 m disponen de 11 colgantes con una separación de 7,5 m, y de 13 para el tramo de 120 m. Los colgantes están inclinados para lograr un efecto arquitectónico. La altura de las celosías es de 10 m. La esbeltez (relación entre la longitud del tramo y la altura de la construcción) es de 8 para los tramos en celosía de vigas y menor para los tramos en bowstrings. La construcción finalizó en 2017, con una entrada en servicio en 2018. □



**PRO BTP,
LE MEILLEUR DE LA
PROTECTION SOCIALE**

SANTÉ
PRÉVOYANCE
RETRAITE
ÉPARGNE
ASSURANCES
ACTION SOCIALE
VACANCES

PRO BTP
GROUPE



1
© LMRC

LUCKNOW METRO 1 INDIA

AUTHORS: ANAND PANDEY, PROJECT DIRECTOR, SYSTRA - SERGE MONTENS, BRIDGE SCIENTIFIC DIRECTOR, SYSTRA

LUCKNOW METRO IS THE FIRST METRO PROJECT IN UTTAR PRADESH STATE. IT COMPRISES TWO ROUTES: FROM NORTH TO SOUTH, WITH A TOTAL LENGTH OF 22.878 km, AND EAST TO WEST, WITH A TOTAL LENGTH OF 12 km. THE NORTH-SOUTH CORRIDOR WITH 21 STATIONS HAS ALREADY ACHIEVED THE DISTINCTION OF BEING THE FASTEST METRO PROJECT EVER PERFORMED IN INDIA.

PROJECT OVERVIEW

Lucknow Metro is the first metro project in the Uttar Pradesh state of India and will have two routes, from North to South and East to West.

The North-South corridor running from Amausi to Munshi Pulia has a total length of 22.878 km. The East-West corridor starting at Charbagh railway station and ending at Vasant Kunj has a total length of 12 km. Both lines

will intersect at Charbagh (figure 2). Systra is the Detailed Engineering Design Consultant for the North-South corridor, comprising 21 stations covering 22.878 km, which has already achieved the distinction of being the fastest metro project ever performed in India. The 8.5-km priority section of the North-South Corridor (Phase 1A) from Transport Nagar station to Charbagh is already operational and opened to the

1- View of completed 255.0-metre balanced cantilever span at Mawaiyah Railway Crossing.

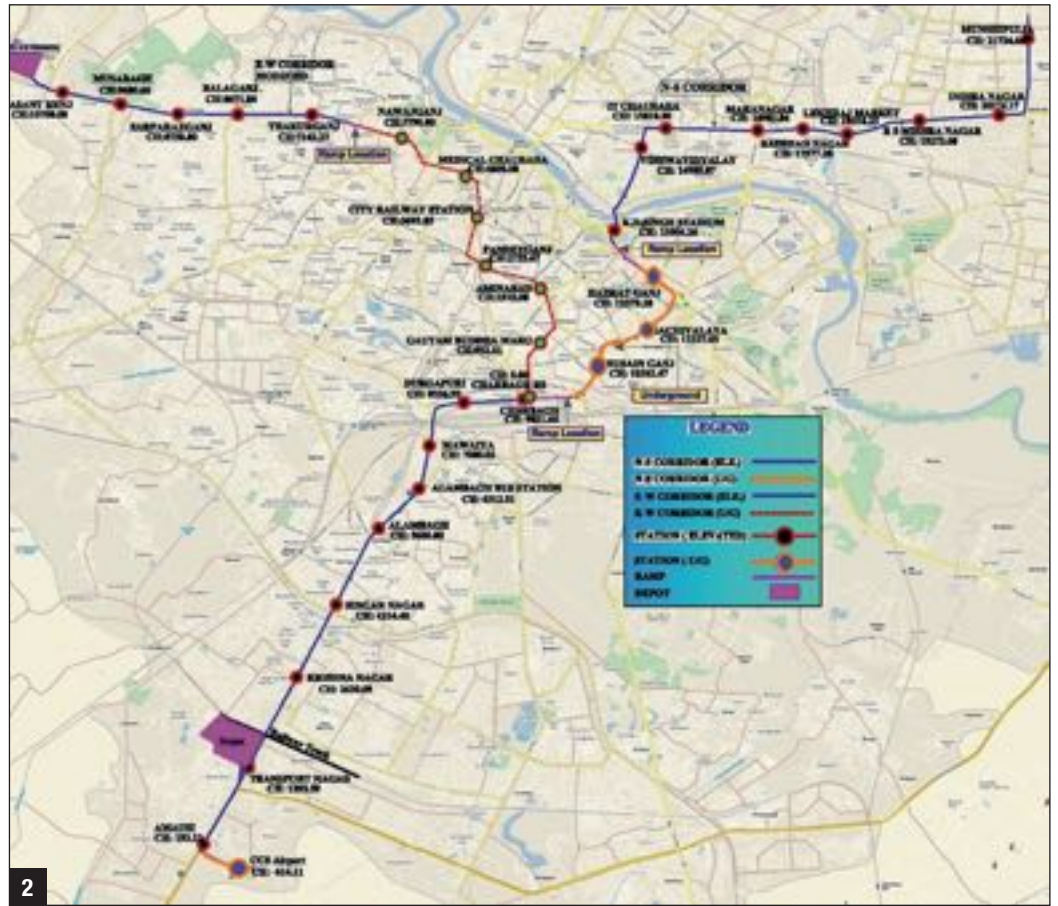
1- Vue en état d'achèvement de la travée de 255 m réalisée par encorbellements successifs au franchissement de la voie ferrée à Mawaiyah.

public in September 2017. The balance corridor, phase 1B, i.e. about 10.4 km, is under construction.

PROJECT DESCRIPTION

NORTH-SOUTH CORRIDOR (CCS AIRPORT-MUNSHI PULIA)

Total length: 22.878 km.
Elevated stations: 17.
Underground stations: 4.
Depot: 1.



2
© LMRC

ELEVATED SECTION

Lucknow Metro's elevated section consists of approximately 19 km of metro network. It comprises 17 elevated metro stations and 1 depot.

The elevated 8.5-km Stretch 1 from Transport Nagar Station to Charbagh Station has been operational since September 2017. The elevated Stretch 2, called the balance section, comprising 10.4 km from K.D. Singh Babu Stadium to Munshi Puliya, is now under construction. Amausi Station, between CCS Airport Station and Transport Nagar, is an elevated station that was added to the line later and is currently under construction.

UNDERGROUND SECTION

The 4-km underground stretch comprises CCS Airport, Sachivalaya, Hazratganj and Hussainganj metro stations. The first part of the underground section starts at CH: 9,700 m near Charbagh railway station and ends at CH: 12,939 m near K.D. Singh Stadium Station (approximately 3.239 km long). The second part of this section, starting at CH: -171.129 m and ending at CH: -989 m, is approximately 0.817 km long and runs from Transport Nagar to the airport.

2- Project alignment.

3- View of 60-metre steel span at Awadh Rotary.

2- Tracé du projet.

3- Vue de la travée de 60 m en acier au rond-point Awadh.

SPECIAL PROJECT FEATURES

FASTEST EVER METRO PROJECT PERFORMED IN INDIA

Services began on Lucknow Metro's 8.5-km priority section in September 2017, following construction work that started just three years earlier in 2014. In fact, trial runs began almost two years and two months after the depot's inauguration - a record pace for India.

SPECIAL BALANCED CANTILEVER METRO SPAN AT MAWAIYA RAILWAY CROSSING

Lucknow Metro Rail Corporation (LMRC) has constructed a special balanced cantilever metro span of 255 m (central span 105 m; end spans 75 m each). This is one of the most challenging and critical jobs to have been performed, at a height of 21.5 m above ground level and passing over a railway crossing at a height of 15.2 m above ground level, in extremely difficult conditions in the middle of the main road traffic (figure 1).

CONTINUOUS SPAN AT GOMTI RIVER

The continuous span, measuring 177 m (46 m + 85 m + 46 m), was constructed over Gomti River using the balanced cantilever technique.

AT AWADH ROTARY

Lucknow Metro has executed a 60-metre special steel span metro bridge that crosses Awadh Rotary over a statue in the middle of the roundabout.

This bridge has been built at a height of approximately 13 m above ground (figure 3).



3
© LMRC

AT THE RAILWAY CROSSING

LMRC is constructing a steel arch span 60 metres long at the Indira Bridge railway crossing.

SOLAR POWER INITIATIVES

Lucknow Metro has currently planned for 1.5 MW to 2 MW of electricity to be used from solar photovoltaic cells mounted on the roof of train stabling and inspection line sheds under the RESCO model.

ARCHITECTURE

North-South Corridor Stations (CCS Airport-Munshi Pulia):

The station finishes reflect a blend of Lucknow's rich heritage and today's modernism and growth. Simple, high-quality materials give the station interiors an impressive appearance (figure 4).

ELEVATED SECTION

The salient features of the elevated stations are as follows (figure 5):

- The platform length is 140 m and the concourse is 85 m. The average station width is 28 m.
- The concourse is approximately 8 m above the road and the platform is 13.5 m above road level.
- Wider platforms with a minimum width of 4 m.
- There are large public areas on the concourse that are divided into paid and unpaid areas by a row of automated fare collection machines (figure 6).
- The concourse level also has all the station's operating facilities such as a station control room, ticketing booths, customer care booths, signalling and telecommunication equipment rooms, along with necessary back-up power supplies, auxiliary sub-stations and staffrooms.
- The generator sets, water tanks and associated pump rooms are planned along the entry/exit structures.
- Premium interiors use:
 - Lacquered glass (matching the metro-line colour), granite and stainless steel in the wall and column cladding.
 - Baffle and perforated metal panels in ceilings that hide cable trays and structural beams.
 - Stainless steel directional tactiles on granite floorings.
- The iconic shape of the roof portal resembles the Rumi Darwaza Gateway, a popular monument in Lucknow (figures 7, 8).

4- Ticket counter in lacquered glass.

5- Elevated station finishes.

6- Spacious concourse with baffle ceiling.

4- Guichet en verre laqué.

5- Finitions de la gare surélevée.

6- Grand hall de gare avec plafond à baffles.



4

© LMRC



5

© LMRC



6

© LMRC



© UP Govt.
7

- The walls of the station box directly facing the road traffic are used as a canvas for artwork (figure 9).
- Tensile fabric in entry roofs and corridor roofs in the priority corridor.
- A perforated corrugated metal sheet and structure glazing in the facade for enhanced aesthetics.
- A glass lift from the concourse to the platform that is consistent with the lacquered glass used on the interiors.

7- Rumi Darwaza (Turkish Gate).
8- Roof profile.

7- Rumi Darwaza (Porte Turque).
8- Profil du toit.

UNDERGROUND SECTION

Lucknow Metro's North-South corridor comprises four underground stations: Sachivalaya (SVL) Station, Hussain Ganj (HSG) Station, Hazrat Ganj (HZG) Station and Choudhry Charan Singh (CCS) Station, as well as tunnelling. The first three stations are located at the heart of the city while the fourth, CCS, is an airport station at Amusi. Salient features of the stations are as follows:

- The rail level of the stations is approximately 15 m deep, except HZG Station which is 18 m below the existing road level.
- The length of the station box varies from approximately 233 m to 300 m, with CCS being the shortest station and HSG the longest.
- The station width varies from approximately 21 m to 23 m.
- The highlight of this section is a solar tube at HSG station that makes use of natural light inside the station.
- The above-ground structures made from glass and stainless steel are designed to give a facelift to Lucknow's skyline. The structures stand tall and yet they blend with the fabric of the city.

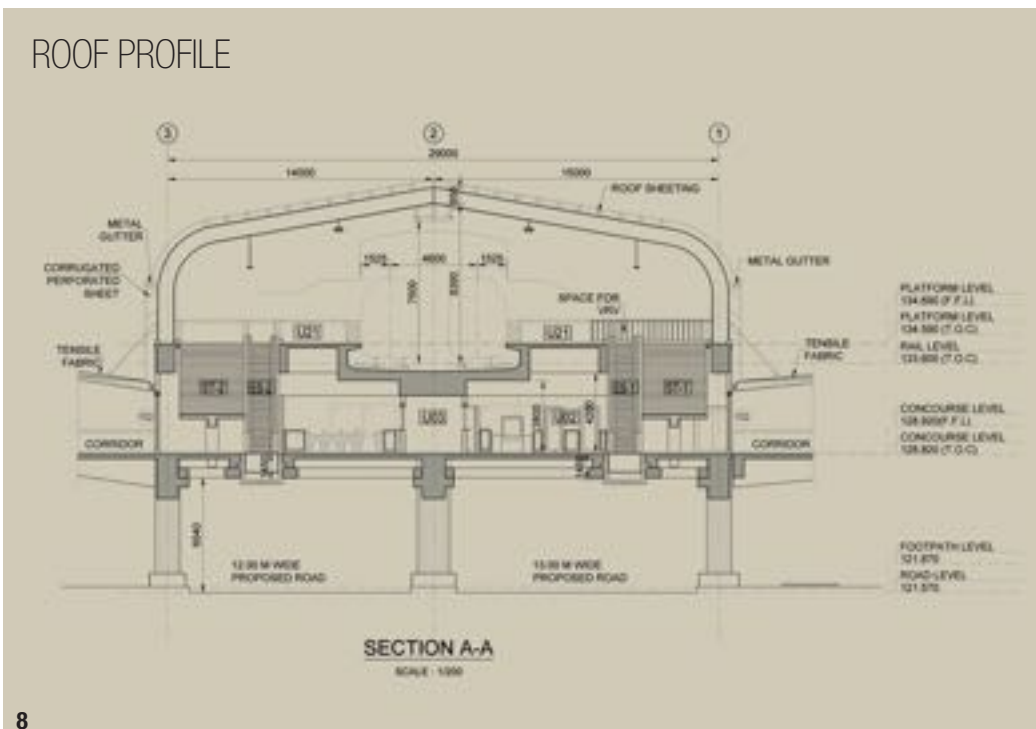
DEPOT

The 25.6-hectare depot is a modern facility with all the necessary amenities including a workshop, maintenance areas, administrative offices, a training centre, operation control centre, etc. This depot is currently operational (figure 10).

STRUCTURE

VIADUCT

Lucknow Metro's Phase 1A North-South Corridor runs from CCS Airport to Munshi Pulia. The total length of the elevated part is approximately 19 km and it is being constructed in two phases according to construction priorities. Below are the salient features of the viaduct:



© LMRC
8



9

Superstructure

Standard Superstructure

- Precast pre-tensioned U-girder for each track with spans ranging from 14 m to 27 m with a minimum alignment radius of 190 m and a maximum weight of 150 metric tons (figure 11).
- Precast pre-tensioned curved U-girder featuring spans from 17 m to 23 m with a minimum alignment radius of 120 m to 190 m and a maximum weight of 150 metric tons.
- Post-tensioned I-girders with cast-in-situ deck provided at crossover locations and above the railway crossing. The depth of the I-girders is 1.25 m to 2 m with a maximum span of 34 m and the maximum weight varies from 26 t to 68 metric tons.

Special Span Superstructure

- 255-metre continuous span (75 m + 105 m + 75 m) erected using the balanced cantilever construction method (CLC) at Mawaiya railway crossing in Phase 1.
- 177-metre continuous span (46 m + 85 m + 46 m) erected using the balanced cantilever construction method (CLC) over Gomti River in Phase 2 with a minimum radius of 190 m.
- A steel truss with a 60-metre span at Awadh Rotary and the P3 rail crossing.
- Steel I-girders with a 27-metre span and a steel box girder with a 45-metre span.

Substructure and Foundation

Pier cap

- Standard pre-cast post-tensioned pier cap supporting U-girders, I-girders and a U-girder on one side and an I-girder on the other side.
- Cast-in-situ post-tensioned extended pier cap.
- Cast-in-situ RCC cantilever pier cap for eccentricity less than 2.5 m and post-tensioned cantilever pier cap for eccentricity (e) between 2.5 m and 2.9 m.

Portal beams and piers

- Precast portal beam with a span up to 14 m in length with cast-in-situ rectangular piers (2.5 m to 3 m long and 1.7 m across).
- Cast-in-situ portal beam with a span up to 15 m in length with cast-in-situ rectangular piers (2.5 m to 3 m long and 1.7 m across) (figure 12).

9- Artwork at station box end. 10- Depot.

9- Créations artistiques au bout du bâti de la gare. 10- Dépôt.

Standard and cantilever piers

- Standard piers of 1.7 m in diameter and up to 17 m in height.
- Eccentricity for the cantilever piers varies from 0.5 m to 2.9 m.

Pile and pile cap

- Pile diameter: 1.2 m diameter for RCC bored piles with lengths ranging from 18 m to 40 m for standard spans and 1.5 m diameter for CLC.

- Pile cap is supported by 4-8 NOS piles. The spacing between piles is 3 times diameter. Pile-cap depth is 1.8 m.

Elastomeric bearing in standard spans and steel structures and POT PTFE bearing for CLC.

ELEVATED STATIONS

Structure type

- The station structures can be classified as two types.
- One is with a central single column and the second type has a three-column arrangement.
- The platform is 140 metres long and the concourse is 85 metres long (five 17-m bays). The extended platform length is 27.5 m either side of the concourse.
- Central single-column stations: 2.
- Three-column portal stations with extended platforms on either side of the concourse: 15.
- The extended platform is on a single-column system like a viaduct.

UNDERGROUND STATIONS

Salient features of the project regarding structure design and proof checking

- All the underground stations are designed based on the top-down construction concept, using a D-wall as a permanent outer wall that is 800 mm or 1,000 mm thick, with columns in the back-of-house zone and without columns in the central zone respectively.



10

© LMRC



11

© LMRC



12

© LMRC

- A cut and-cover tunnel is also designed using the top-down construction method, with a wall 600 mm to 800 mm thick depending on site requirements and time constraints.
- The open ramp is constructed using the bottom-up construction method, with a steel soldier pile supporting system.
- For launching and retrieving the TBM (for tunnel construction), the areas at each end of the stations were used as shafts. This was done to cater to the limited land availability at the site and to opti-

11- View of typical viaduct constructed with twin full-span precast U-girders.
12- View of finished depot entry line & crossover viaduct.

11- Vue d'un viaduc courant réalisé avec deux poutres en U préfabriquées à pleine portée.

12- Vue de la voie d'entrée au dépôt et du viaduc de franchissement à l'état achevé.

- The entrances to all stations is from the side, through a subway connection, which is also constructed using a top-down method with permanent D-wall.

- The design of Hazratganj Station with a gravity drain pipe running longitudinally over the top of the station (folding roof slab).
- Quick design was required to keep up with the fast pace of the project (regarded as one of the fastest metro projects). □

The challenges

- Tight, narrow and limited land area

QUANTITY

VIADUCT

CONCRETE: 220,000 cubic metres

REINFORCEMENT STEEL: 33,000 metric tons

PT: 3,150 metric tons

WEIGHT OF ONE STANDARD SPAN U-GIRDER: ~150 metric tons

WEIGHT OF ONE STANDARD PRECAST PIER CAP: ~65 metric tons

ELEVATED STATIONS

CONCRETE: ~ 214,200 cubic metres

REINFORCEMENT STEEL: ~30,600 metric tons

UNDERGROUND STATIONS

CONCRETE: ~13,200 cubic metres

REINFORCEMENT STEEL: ~20,000 metric tons

STAKEHOLDERS

- Client: Lucknow Metro Rail Corporation
- Detailed design consultant: Systra
- Civil contractor for the elevated section: Larsen & Toubro
- Civil contractor for the UG section for three stations: Gulermak-Tata Projects Limited JV
- Civil contractor for the UG section for CCS Station: Sam (India) Biltwell Pvt. Ltd.
- GC: Ayesa-Geodata-Aarvee-Korean Rail Consortium
- E&M contractor: Sterling & Wilson Pvt. Ltd.
- Consortium of Alstom Transport India Ltd., Bangalore & Alstom Transport SA France
- Larsen & Toubro Electrical
- S. P. Singla Constructions Pvt. Ltd.
- Delhi Metro Rail Corporation Ltd.
- Steel Authority of India
- Voestalpine Vae GmbH - Voestalpine Vae Vkn India Pvt. Ltd. (Consortium)
- Mitsui & Co. Pvt. Ltd
- Canon Fasteners, Delhi
- M/S Arch-En-Desig

ABSTRACT

LUCKNOW METRO 1 EN INDE

ANAND PANDEY, SYSTRA - SERGE MONTENS, SYSTRA

La partie nord-sud de la première phase du métro de Lucknow est opérationnelle depuis septembre 2017. La partie est-ouest en deuxième phase, consistant à réaliser le reste du projet, est en cours, avec une date de terminaison prévue en décembre 2018. □

LUCKNOW METRO 1 EN INDIA

ANAND PANDEY, SYSTRA - SERGE MONTENS, SYSTRA

La parte norte-sur de la primera fase del metro de Lucknow está operativa desde septiembre de 2017. La parte este-oeste, en segunda fase, que consiste en realizar el resto del proyecto, está en curso, con una fecha de finalización prevista para diciembre de 2018. □



1
© AUSENCO

EXTENSION DE LA MINE D'OR DU TASTIAST EN MAURITANIE

AUTEUR : ALEXANDRE PLASTRE, DIRECTEUR TECHNIQUE, FRANCE MACCAFERRI

LA MINE DU TASTIAST EST LA PLUS GRANDE MINE D'OR DE MAURITANIE. SON PLAN D'EXTENSION ENTREPRIS EN 2016 VISE À AUGMENTER LA CAPACITÉ D'EXTRACTION DU PRÉCIEUX MINÉRAI POUR EN QUADRUPLER LA PRODUCTION D'ICI À 2020. DANS LE CADRE DES AMÉNAGEMENTS RÉALISÉS, UN MUR DE CONCASSEUR PRIMAIRE DE PLUS DE 30 m DE HAUTEUR A ÉTÉ CONSTRUIT, NÉCESSITANT LA MISE EN PLACE DE MURS EN AILE DONT LA HAUTEUR MAXIMALE EST DE 32,50 m. CES OUVRAGES ONT ÉTÉ RÉALISÉS EN REMBLAIS RENFORCÉS DE TYPE TERRAMESH® SYSTEM ASSOCIÉS À DES GÉOGRILLES DE RENFORTS À HAUTE RÉSISTANCE À LA TRACTION PARALINK®.

LA MINE DU TASTIAST

La mine d'or à ciel ouvert du Tasiast est située en Mauritanie, à 300 km au nord de Nouakchott et à 160 km au sud-est de Nouâdhibou dans le massif de l'Adrar (désert mauritanien). Ouverte en 2007 et acquise par la société Kinross Gold en 2010, elle recouvre une surface au sol de 312 km²,

pour des ressources en or estimées à près de 150 t.

Son exploitation est prévue jusqu'en 2030 pour un rendement d'exploitation de 1,66 gramme d'or par tonne de matériaux extraits.

Un projet d'expansion en deux phases (2016-2018 et 2018-2020) prévoit de passer la capacité de traitement

1- Vue d'ensemble de l'ouvrage.

1- Overall view of the structure.

de l'usine de 8000 t/j à 30000 t/j. Cet accroissement de la production est rendu possible par la construction d'équipements de broyage et de concassage supplémentaires.

La phase I, terminée au deuxième semestre 2017 a permis le passage d'une capacité de traitement de l'usine de 8000 t/j à 12000 t/j.



L'OBJET DES TRAVAUX

La réalisation du mur du concasseur primaire a nécessité la mise en place de deux murs en aile pour soutenir les remblais adjacents.

Les travaux de maîtrise d'œuvre ont été assurés par la société Ausenco dont le choix technique s'est porté vers la réalisation d'un remblai renforcé en raison de la grande hauteur de l'ouvrage qui devait être construit en déblai/remblai par rapport au terrain existant.

La mission géotechnique, établie par Knight Piesold Consulting, a mis en évidence la présence d'un substratum volcanique altéré entre 2 et 6 m sous

2- Niveau de fondation de l'ouvrage.

3- Module Terramesh System module.

4- Vue en plan du projet - document d'origine.

2- Structure foundation level.

3- Terramesh System module.

4- Plan view of the project - original document.

le terrain naturel. Compte tenu de la descente de charge importante de l'ouvrage, la fondation de l'ouvrage a été calée à 2 m sous le niveau le plus pessimiste du substratum, soit près de 8 m sous le niveau du terrain naturel (figure 2).

La nature (parement, type de renfort) du remblai renforcé était laissée au libre choix du fournisseur qui devait respecter un cahier des charges drastique : assurer la stabilité, pour la durée de service de la mine (25 ans), d'un mur de 32,50 m de hauteur ayant un parement strictement vertical au niveau de son raccordement

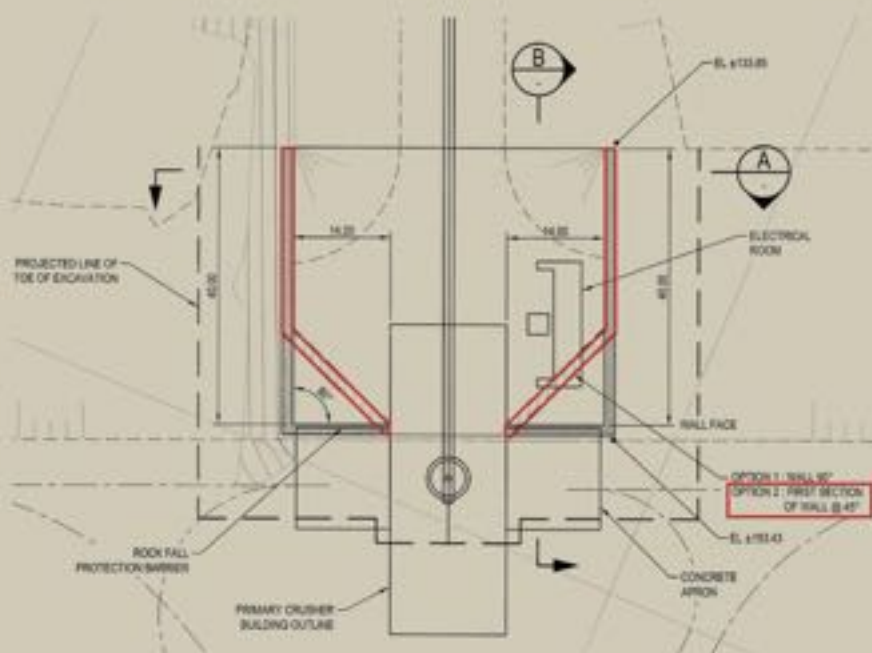
avec l'ouvrage de génie civil du mur de concasseur primaire. Chaque mur en aile présente une longueur de 45 m et la hauteur décroît progressivement jusqu'à 14,50 m, le niveau de fondation restant constant. Les murs se raccordent à l'ouvrage en béton avec un angle à 135°, puis sont disposés perpendiculairement à la plateforme de déchargement des dumpers (figure 4). Forte de son expérience dans le domaine minier où des remblais renforcés à parement béton et minéral sont fréquemment utilisés, Maccaferri a proposé sa solution Terramesh® System associée à des géogrilles de renforts à haute résistance à la traction ParaLink®.

Le Terramesh® System est un système modulaire développé dans les années 1980 associant un gabion de façade à une nappe de renfort en grillage continue du parement (figure 3).

La partie gabion assure à l'ouvrage un parement soigné tandis que le renfort grillagé permet un renforcement du remblai arrière et la tenue du massif. Le grillage constitutif du Terramesh® System est à maille hexagonale double torsion (indémaillable) de type 8x10 avec des fils d'acier de diamètre 2,7 mm revêtus d'un alliage Zinc 95%/aluminium 5% de classe A et encapsulé dans une gaine en PVC de 1 mm d'épaisseur sur le diamètre. Cette protection du fil, particulièrement résistante à la corrosion assure à l'ouvrage une durée de service de 120 ans.

En complément au grillage, des géogrilles de renfort de type ParaLink® 300 et ParaLink® 400 ayant respectivement des résistances à la traction de 300 kN/m et 400 kN/m ont été utilisées pour apporter le renforcement nécessaire au remblai.

VUE EN PLAN DU PROJET - DOCUMENT D'ORIGINE





5

© FRANCE MACCAFERRI

Les géogrilles sont disposées depuis le parement gabion en étant simplement pincées entre les modules (figure 5). Les géogrilles ParaLink® sont obtenues par thermocollage de bandes très résistantes à la traction, constituées d'un noyau de fibres en polyester apportant la résistance mécanique, et d'une gaine protectrice en polyéthylène basse densité apportant la résistance aux agressions chimiques et à l'endommagement lors de la mise en œuvre. Les géogrilles ParaLink® sont des renforts utilisés depuis plus de 40 ans dans les applications de renforcement de sol qui présentent les facteurs de réduction les plus faibles du marché (rapport entre la résistance à la traction nominale - sortie usine - et la résistance de calcul à long terme en tenant compte des paramètres réduisant ses performances). Les propriétés mécaniques du grillage et des géogrilles à long terme sont définies dans le tableau 1.

ÉTUDES

Le dimensionnement de l'ouvrage a été réalisé par le service technique de la société Maccaferri en utilisant le logiciel interne de stabilité de pente Macstars afin de définir la longueur, l'espacement et le type de renfort (figure 6) nécessaires pour assurer les stabilités externes (glissement et poinçonnement), internes, mixte et générales. Les vérifications de stabilité ont été réalisées selon la norme française NFP 94-270 d'application des Eurocodes 7 pour les remblais renforcés. La maîtrise d'œuvre étant d'origine canadienne, la détermination de la contrainte admissible s'est faite selon la méthode de Vesic (très utilisée en Amé-

rique du Nord) qui s'appuie les caractéristiques géomécaniques (c , φ , γ) du sol de fondation alors que l'approche française se base généralement sur des données pressiométriques ou pénétrométriques.

Pour un tel ouvrage, le remblai structural doit être soigneusement sélectionné afin de répondre à des critères mécaniques bien définis en vue d'assurer à la fois la stabilité du massif et le bon compactage de chacune des couches de remblais.

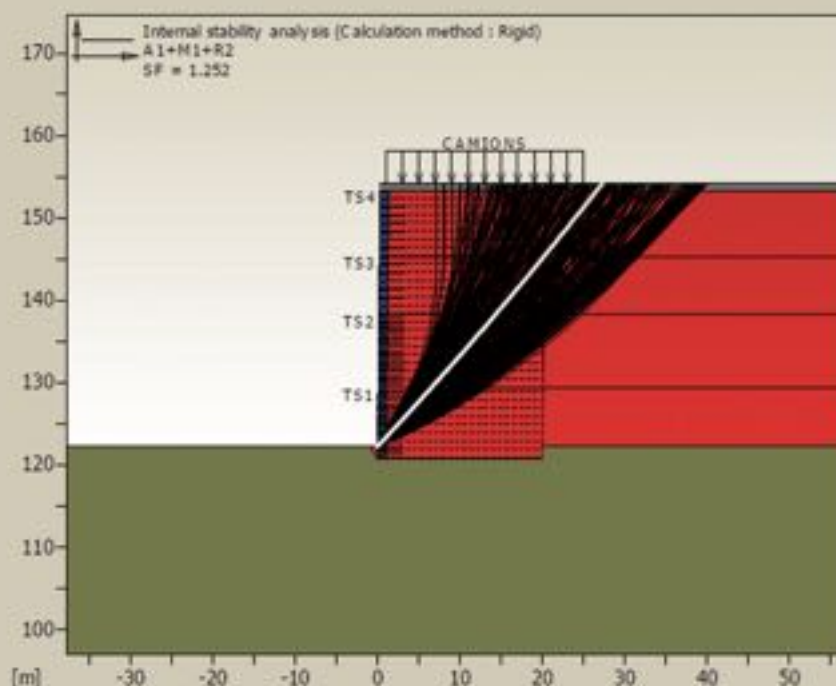
5- Terramesh system + Géogrille de renfort.
6- Extrait de note de calcul Macstars.

5- Terramesh System + reinforcing geogrid.
6- Excerpt from Macstars design note.

Le remblai structural a ainsi été sélectionné sur la base de sa granulométrie et de ses propriétés géomécaniques afin d'interagir au mieux avec les nappes de renforcement. Après analyse de plusieurs types de matériaux disponibles sur le site, le choix s'est porté vers un matériau latéritique présentant les caractéristiques indiquées dans le tableau 2.

Conformément à la norme NFP 94-270, l'influence de la cohésion a été négligée dans les calculs.

EXTRAIT DE NOTE DE CALCUL MACSTARS



6

© FRANCE MACCAFERRI

TABLEAU 1 : PROPRIÉTÉS DES RENFORTS UTILISÉS

Renfort		Grillage métallique double torsion Maille 8x10 fil 2,7/3,7 mm	Paralink® 300	Paralink® 400
Résistance nominale à la traction		$T_N = 50 \text{ kN/m}$	300 kN/m	400 kN/m
Coefficients de réduction	Incertitude de fabrication	1,04	1,00	
	Extrapolation des données	1,00	1,05	
	Endommagement lors de la mise en œuvre	1,15	1,05	
	Dégradation chimique	1,05	1,03	
	Fluage	1,00 (acier)	1,38	
	Norme	1,25		
	Total	1,58	1,96	
Résistance à la traction à long terme		$T_c = 39,80 \text{ kN/m}$	$T_c = 153 \text{ kN/m}$	$T_c = 204 \text{ kN/m}$

TABLEAU 2 : PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU MATÉRIAU DE REMBLAI

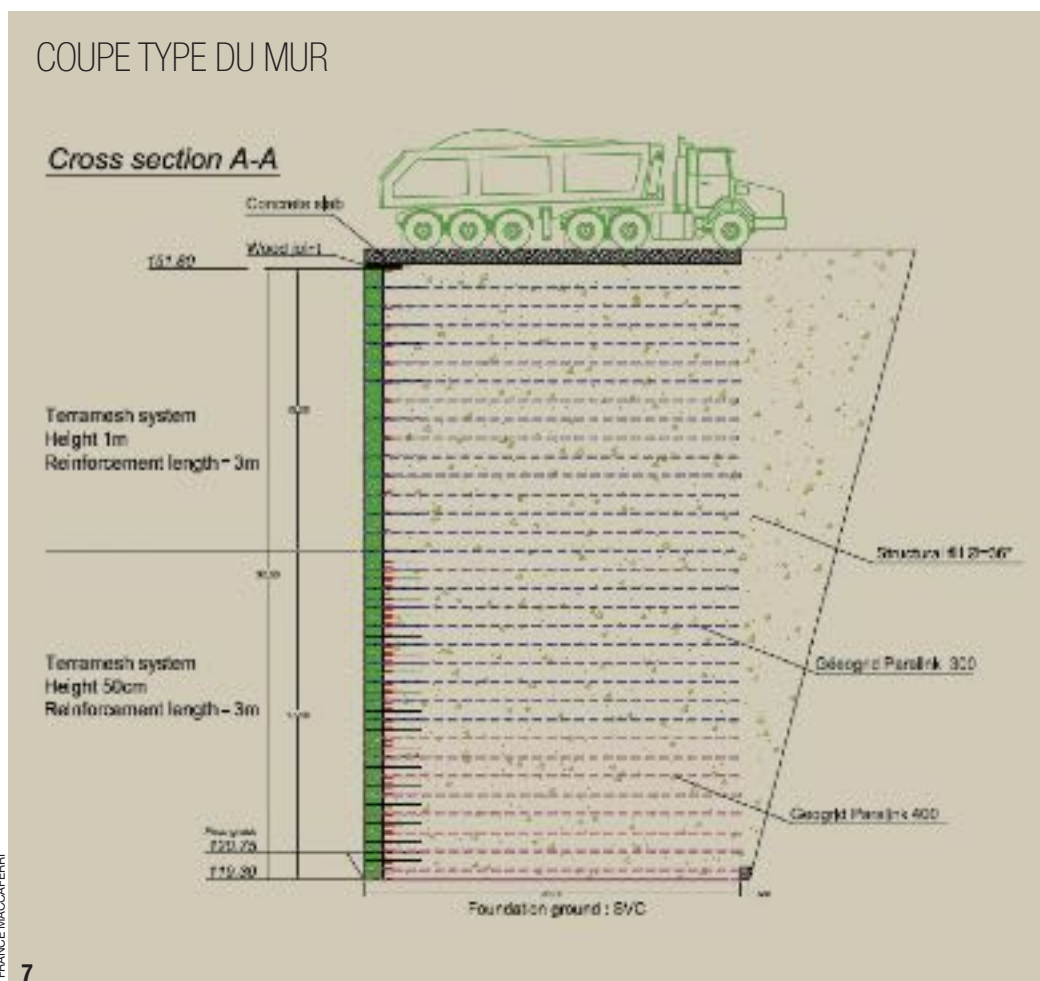
Remblai latéritique	
Granulométrie	0/50
Passant à 80 microns	9%
Poids volumique	2,0 t/m ³
Angle de frottement	37°
Cohésion	10 kPa

7- Coupe type du mur.

7- Typical cross section of the wall.

Le dimensionnement a conduit à utiliser des renforts ayant une longueur de 20 m et espacés verticalement de 1 m. Sur les 24 m supérieurs, la géogrille Paralink® 300 a été utilisée, la base du massif étant renforcée par de la Paralink® 400. En ce qui concerne le Terramesh® System, des nappes de renfort de 3 m ont été installées, servant à connecter le parement gabion au massif en sol renforcé. Sur les 15 m supérieurs, des modules de hauteur 1 m ont été installés, alors que, sur la partie inférieure des modules de 50 cm, ont été employés (figure 7). En effet, les cages ayant une hauteur de 50 cm présentent un meilleur comportement à la compression et se déforment moins que les cages ayant une hauteur de 1 m. Pour renforcer la résistance à la compression de la cage, des tirants préfabriqués en acier de 3 mm de diamètre, reliant la face avant à la face arrière du Terramesh® System ont été mis en place dans la partie inférieure de l'ouvrage, lorsque la hauteur au-dessus des blocs concernés dépassait 15 m de hauteur. Des redans de 5 cm espacés tous les 2 m en hauteur ont également été mis en place pour apporter un léger fruit à la façade.

COUPE TYPE DU MUR



ASSISTANCE TECHNIQUE

La réalisation d'un ouvrage de soutènement d'une telle ampleur nécessite une mise en place soignée des structures et un strict respect de la procédure travaux. Maccaferri a transmis une procédure travaux complète pour assister l'entreprise dans l'ensemble des étapes de réalisation de l'ouvrage. Par ailleurs, Maccaferri a mis à disposition un technicien pour trois interventions sur site d'une semaine afin d'assister l'entreprise de pose dans le montage des structures. Ces interventions ont permis de montrer les règles de l'art du montage des structures gabions, du positionnement et de la mise en tension des géogrilles de renfort et de la mise en place du remblai arrière. En effet, le parement gabion doit être mis en œuvre selon la norme NFP 94-325-1 qui définit les étapes de remplissage de la cage. Il convient notamment d'assurer une ligature de l'ensemble des cages entre elles au niveau des arêtes communes, de mettre en place des tirants constitués de fils d'acier reliant la face avant à la face arrière pour limiter les déformations du parement et assurer une mise en œuvre appareillée du parement (positionnement soigné des pierres à la main pour limiter les tassements interne des pierres dans la cellule).

La ligature des cages est réalisée à l'aide de fils en acier galvanisés et plastifiés. Au préalable la géogrille de renfort ParaLink® avait été disposée sur le plan de pose depuis la façade jusqu'à l'arrière du massif. Elle se retrouve ainsi pincée entre les modules de gabions. Pour la sécurité des ouvriers, des garde-corps ont été installés sur les parements gabions déjà remplis.

Lors de la mise en place, les ouvriers étaient équipés de harnais avec des systèmes stop-chute.

Les cages ont été remplies avec des pierres extraites du site et concassées sur site. Ces matériaux doivent être non évolutifs et présenter une granulométrie bien précise pour le remplissage.

Près de 4000 t de pierres ont ainsi été nécessaires pour remplir les cages. En considérant une concentration moyenne d'or de 5 g/t de pierres extraites, le mur est constitué d'environ 20 kg d'or ! À l'interface entre le remblai et le parement, un géotextile de filtration est mis en place pour éviter la migration de fine du remblai dans le gabion.

Le remblai latéritique a été soigneusement mis en œuvre, à raison de



8

© FRANCE MACCAFERRI

2 passes de 25 cm pour les cages de 50 cm de hauteur et de 3 passes de 30/35 cm pour les cages de 1 m de hauteur.

Le remblaiement a commencé par le milieu, puis à l'arrière du remblai et enfin contre le parement.

Le remblai était régulièrement arrosé pour assurer sa mise en œuvre à la

8- Arrosage du remblai et garde-corps.

9- Couche de remblai compacté.

8- Backfill spraying and guard rail.

9- Compacted backfill layer.

teneur en eau optimale (figure 8). À l'arrière du parement un compacteur plus léger (plaque vibrante) a été utilisé pour éviter les déformations du parement alors qu'un compacteur de type V3 a été utilisé pour le reste du massif.

À la fin de chaque passe de compactage, le remblai devait atteindre une



9

© FRANCE MACCAFERRI



© FRANCE MACCAFERRI

10a

portance de 80 MPa par essai à la plaque (figure 9).

La formation des équipes et le contrôle régulier sur chantier ont été des étapes primordiales dans la bonne réalisation de l'ouvrage. L'intervention d'un technicien spécialisé a permis aux ouvriers de bénéficier d'astuces de chantier facilitant la mise en œuvre, assurant un

10a- Mur en aile gauche.

10b- Mur en aile droit.

10a- Left-hand wing wall.

10b- Right-hand wing wall.

meilleur rendu esthétique et permettant une meilleure sécurité.

Des plans de contrôle ont été établis afin de suivre la progression du montage, de vérifier la qualité de la réalisation et d'assurer la stabilité du massif sans que des déformations excessives n'interviennent. Le montage de l'ouvrage a nécessité la participation

d'une cinquantaine d'ouvriers pendant 3 mois, ce qui a exigé une vigilance particulière pour éviter les risques de chute.

Il en résulte un chantier de terrassement exceptionnel et vertigineux (figures 10a et 10b) qui voit la réalisation du mur en Terramesh® System le plus haut dans le secteur minier. □



© FRANCE MACCAFERRI

10b

PRINCIPALES QUANTITÉS

TERRAMESH® SYSTEM : 2226 m²

PARALINK® 300 : 42 300 m²

PARALINK® 400 : 5 300 m²

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Tasiast Mauritanie Limited SA

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Ausenco

ENTREPRISE DE TRAVAUX : Azima

FOURNISSEUR DES PRODUITS : Maccaferri

ABSTRACT

TASIAST GOLD MINE EXTENSION IN MAURITANIA

ALEXANDRE PLASTRE, FRANCE MACCAFERRI

For extension of the Tasiast gold mine in Mauritania, a primary crusher wall was built, with wing walls executed using the Terramesh® System soil reinforcement technique combined with Paralink® reinforcing geogrids. The design of this structure of exceptional height (32.50 m) was researched in detail by the Maccaferri engineering department to cope with the project's geometric and technical constraints. The Macstars slope stability software was used to design the retaining walls. The erection phase was also carefully monitored by a technician providing several training sessions for the teams on site and by constant checking of the erection stages. □

AMPLIACIÓN DE LA MINA DE ORO DE TASIAST EN MAURITANIA

ALEXANDRE PLASTRE, FRANCE MACCAFERRI

En el marco de la ampliación de la mina de oro de Tasiast, en Mauritania, se ha construido un muro de agregado triturado primario cuyas paredes laterales se han realizado con la técnica de suelo reforzado Terramesh® System, combinada con geomallas de refuerzo Paralink®. El diseño de esta construcción, excepcional por su altura (32,50 m), ha sido estudiado con detalle por el departamento técnico de Maccaferri para responder a las restricciones geométricas y técnicas de la obra. Se ha utilizado el software de estabilidad de pendiente Macstars para dimensionar los muros de contención. Asimismo, la fase de puesta en servicio ha sido objeto de un cuidadoso seguimiento mediante la reiterada presencia de un técnico de formación de los equipos in-situ y un control permanente de las etapas de montaje. □



© INGÉROP

UN CHANTIER D'ENVERGURE AU MONTÉNÉGRO

AUTEURS : VINCENT GRANGE, DIRECTEUR DE PROJET, INGEROP - LOUIS DEWELLE, INGÉNIEUR, INGEROP - MILOSLAV MASIC, RESPONSABLE DU HIGHWAY PROJECT IMPLEMENTATION UNIT, MINISTÈRE DES TRANSPORTS ET DES AFFAIRES MARITIMES DU GOUVERNEMENT DU MONTÉNÉGRO

DEPUIS DÉCEMBRE 2014, L'ENTREPRISE CHINOISE CRBC RÉALISE LE CHANTIER DU LIEN FIXE QUI À TERME RELIERA LA SERBIE À LA MER ADRIATIQUE EN TRAVERSÉE DU MONTENEGRO DONT INGEROP EST EN CHARGE DE LA MAÎTRISE D'ŒUVRE. CE TRONÇON AUTOROUTIER PRÉSENTE UNE SUCCESSION DE TUNNELS ET DE PONTS REPRÉSENTANT 60 % DU LINÉAIRE, ENTRECOUPÉS DE REMBLAIS ET SOUTÈNEMENTS DE GRANDE HAUTEUR. LA MULTIPLICITÉ ET LA VARIÉTÉ DES SITES DE CONSTRUCTIONS SIMULTANÉMENT EN ACTIVITÉ AJOUTENT À LA COMPLEXITÉ DE CE CHANTIER HORS DU COMMUN.

LES ORIGINES DU PROJET

Le lien autoroutier reliant Belgrade capitale de la Serbie à Bar, ville portuaire et touristique monténégrine située sur la mer Adriatique, est communément appelé le corridor N° XI (figure 2). Il complètera les dix corridors paneuropéens définis lors de la conférence d'Helsinki tenue en 1997.

Ce projet qui facilitera l'intégration de cette région au flux des échanges Européens est attendu de longue date par les habitants du Monténégro qui reste à ce jour le seul pays des Balkans à ne pas avoir d'autoroute.

En 2009 un consortium croate avait remporté un appel d'offre international pour assurer la construction du tron-

1- Le relief montagneux impose une succession d'ouvrages.

1- The mountainous relief requires a series of tunnels and bridges.

çon monténégrin du corridor. Ils avaient malheureusement dû se retirer, n'ayant pu fournir les garanties bancaires demandées. En 2010, un consortium greco-israélien a ensuite connu la même mésaventure. Les discussions menées depuis 2011 par le gouvernement monténégrin avec des investisseurs chinois ont fini par porter leurs



© EREBLA DANAS
2

fruits et un accord était trouvé trois années plus tard avec l'entreprise Crbc (China Road and Bridge Corporation). Crbc a signé un contrat de Conception - Construction (FIDIC Jaune) pour réaliser la première section de cette autoroute qui relie Smokovac, à proximité de Podgorica, la capitale du pays, à Matasevo située 41 km au nord-est (figure 3). Ce contrat est assorti d'un prêt de l'Exim Bank chinoise.

2- Tronçons en cours de construction sur le corridor XI.

3- Le tracé du projet (trait rouge continu).

2- Sections undergoing construction on Corridor XI.

3- Project alignment (continuous red line).

Le montant total du contrat qui équivaut à environ 1 Md USD représente plus de 20% du PIB 2016 du Monténégro.

LES ACTEURS

L'organisation de ce projet répond à une double logique : il doit être effectué en accord avec les us et coutumes et la législation locale tout en respectant les règles du contrat FIDIC signé entre le maître d'ouvrage et l'entreprise.

Le maître d'ouvrage est le Ministère des Transports et des Affaires Maritimes du Gouvernement du Monténégro. Il est assisté par divers organismes monténégrins :

→ Le PIU (Project Implementation Unit) est le maître d'ouvrage délégué, en charge de la bonne marche générale des opérations.

→ Une équipe de management de projet (PMU : Project Management Unit) très complète, joue le rôle d'une assistance renforcée à la maîtrise d'ouvrage. Elle intervient dans tous les domaines contractuels et reporte au maître d'ouvrage. Entre autres tâches, le PMU s'assure de la bonne coordination entre l'ensemble des intervenants du projet et apporte son assistance pour toute interaction avec les diverses instances gouvernementales. Le PMU valide l'ensemble des documents émis par le maître d'œuvre.

→ Le SRP (State Review Panel) est en charge de l'approbation des études de détail produites par l'entreprise.

→ Le STAB (State Technical Audit Board) est en charge de la réception technique formelle des travaux pour le compte du maître d'ouvrage.

L'ingénieur : Le bureau d'ingénierie français Ingerop s'est associé avec Geodata (Italie) afin d'assurer la mission d'Ingénieur au sens FIDIC du terme. Le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre sont liés par un contrat FIDIC Blanc (Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils), spécifique aux contrats Client/Consultant.

L'équipe Ingerop - Geodata déployée sur le site du projet est composée d'environ quarante-cinq experts provenant de dix pays différents dont trente monténégrins (y compris le staff administratif). Elle administre l'ensemble des aspects du contrat signé entre le maître d'ouvrage et l'entreprise : revue du design et des méthodes constructives, suivi du planning, acceptation de l'ensemble des matériaux, supervision des travaux et suivi de leur impact environnemental, établissement des états d'acomptes, gestion des réclamations...

Des spécialistes reconnus et expérimentés interviennent dans chacun des domaines nécessaires à la construction de ce projet : géotechnique, hydrogéologie, hydraulique/drainage, ponts, tunnels, routes, topographie, matériaux, équipements (dimensionnement, installation, ...), signalisation, spécialistes courant fort/faible, santé/sécurité, environnement...



© CARTE DU MONDE.NET
3

Cette équipe est secondée par des intervenants basés en France qui interviennent autant que de besoin au cours de missions ponctuelles.

Afin de satisfaire la législation locale, Ingerop a créé une filiale Ingerop Monténégro employant l'ensemble des intervenants du projet mobilisés sur place et gérant ainsi le plus important projet d'infrastructure jamais initié dans le pays.

L'entreprise China Road and Bridge Corporation (Crbc) est en charge de la construction. Crbc est une filiale de China Communication Construction Company (Cccc) qui s'est spécialisée dans le génie civil et notamment la construction d'autoroute, de voies ferrées, de ponts ou encore de tunnels. Avec environ 120 000 employés et 63 Md USD de chiffre d'affaire (2015) Cccc est une des plus grandes entreprises de construction au monde.

L'une des obligations contractuelles de Crbc est de sous-traiter localement au minimum 30% des travaux à réaliser, d'où l'intervention de nombreuses entreprises locales sur ce chantier.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Les 2x2 voies (plus une voie véhicules lents quand les pentes excèdent 4%) permettront aux véhicules de franchir à une vitesse de 100 km/h le relief accidenté qui isole la partie Nord du pays, actuellement uniquement accessible

TABLEAU A : RÉPARTITION DU TYPE DE STRUCTURE LE LONG DE L'AUTOROUTE

Type de structure	km	%
Tunnels	17,7	43 %
Ponts	6,1	15 %
Autre	17,0	42 %
Total	40,8	100 %

© INGÉROP

par deux routes régionales souvent dangereuses.

Le franchissement de cette barrière montagneuse (figure 1) présente de nombreux challenges techniques et organisationnels impactant l'ensemble du projet :

→ Si le projet débute vers Podgarica à une altitude de 68 m avec un climat

méditerranéen, il atteint 1 161 m à Matesevo proche des stations de ski avec une partie du site parfois difficilement accessible jusqu'à 6 mois par an.

→ Les conditions géologiques sont variables tout au long du tracé. Sur la moitié Sud du projet, le terrain est principalement constitué

de roches calcaires stratifiées et fissurées. L'horizon de la seconde partie est composé de flysch (dépôts sédimentaires composés en grande partie de débris issus d'érosion rocheuse), de roches d'ardoise, de marne, de grès et de calcaire sableux et marno-calcaire. Le sous-sol de la région est également connu pour ses nombreux karsts (cavités issues de la dissolution des roches essentiellement calcaires) : lors du creusement des différents tunnels, des cavernes mesurant plus de 100 m de hauteur ont ainsi été découvertes (figure 4).

→ La configuration du terrain est telle que les collines, vallées et dépressions diverses alternent à très courtes distances, nécessitant

4- Karst sur le front de taille d'un tunnel.

5- Tunnel débouchant sur un ouvrage d'art.

4- Karst on a tunnel face.

5- Tunnel followed by a bridge.



4

© INGÉROP



5

© INGÉROP

l'enchaînement de ponts, de tunnels et de zones de remblais de grandes dimensions sur l'ensemble du tracé autoroutier (tableau A et figure 5). On dénombre au total une vingtaine d'ouvrages d'art, dont la plupart sont dédoublés et 16 tunnels bitubes, environ 5 millions de m³ de remblais et des murs de soutènement en remblai renforcé faisant plus de 30 m de haut. De nombreuses parties du site étaient inaccessibles même à pied au début du projet. Il a donc fallu réaliser ou élargir 70 km de pistes provisoires afin de pouvoir démarrer les travaux simultanément sur différentes structures et effectuer les diverses campagnes géologiques.

- Les 3600 ouvriers se relayant parfois 7/7j, 24/24h travaillent simultanément sur une centaine de sites de construction disséminés tout au long du projet. La logistique et les installations de chantier sont naturellement conséquentes : 17 centrales à béton ou encore 34 postes de transformation électriques, des installations sécurisées permettant le stockage de 4000 t d'explosifs sur site pour les 30 fronts de taille actifs simultanés de tunnels (figure 6).
- L'ensemble des équipements (sécurité, ventilation tunnel, péages, alimentation électrique etc.) est compris dans le marché, ce qui ajoute à la variété des prestations.
- L'autoroute longe et emprunte parfois le lit de la rivière Tara qui est classée parmi les sites protégés au patrimoine mondial de l'Unesco et est la plus importante source Européenne d'eau potable ; elle franchit également le canyon de la rivière Moracha (figure 7). Un suivi environnemental poussé avec des mesures efficaces est donc nécessaire, d'autant plus que le Monténégro est le premier pays à avoir inscrit la protection de l'environnement dans sa constitution.

UN PILOTAGE DE PROJET COMPLEXE

La complexité de ce projet trouve son origine tant dans sa taille que dans son extrême variété. De nombreux événements peuvent en gêner l'avancement, influant potentiellement de façon défavorable sur les coûts ou le délai. Par exemple, un retard sur l'obtention des permis de travail de 200 ouvriers chinois peut différer leur mobilisation et ainsi désorganiser le planning.



6
© INGÉROP

6- Préparation d'un tir sur un front de taille.

7- Le canyon de la rivière Moraca.

6- Preparation for blasting on a tunnel face.

7- The Moraca River canyon.

Un aléa géotechnique peut à son tour impacter le coût et le délai de réalisation d'une structure.

La probabilité pour qu'un mégaprojet comme celui-ci se déroule en parfaite concordance avec les projections initiales est faible car elle dépend de la non-occurrence de chacun des phénomènes adverses qui pourraient survenir pendant sa réalisation.



7
© INGÉROP

Le rôle du maître d'œuvre, qui apporte son expérience et sa maîtrise acquise au contact d'opérations antérieures d'envergure similaire, est d'être proactif afin d'éviter autant que faire se peut la survenance de ces problèmes.

Les spécificités du projet listées au paragraphe précédent laissent présager la grande variété de difficultés et d'aléas (géotechnique, approvisionnement, structurel, etc.) susceptibles d'advenir.

Outre les aspects technique et géographique, le pilotage de ce projet doit intégrer d'autres facteurs de complexité :

- Le chantier n'est pas exécuté par une, mais par quatre entreprises réalisant approximativement 10 km d'autoroute chacune, qui, même si elles appartiennent à un même groupe, sont dans les faits indépendantes avec des méthodes de construction, d'achat et de gestion distinctes.
- Ce projet est gigantesque à l'échelle du pays, ce qui complexifie chaque tâche qui serait anodine sans ce problème d'échelle : obtention de licences, expropriations, approvisionnement en matériaux, recrutement de main d'œuvre locale...
- C'est la première fois qu'un marché de travaux FIDIC Jaune (Conception-construction rémunéré au forfait) est signé au Monténégro.
- Le contexte international apporte également son lot d'incompréhensions entre des acteurs chinois, des différents pays de l'ex-Yougoslavie... ou encore français.

LES TUNNELS

Les conditions géologiques et géotechniques ont guidé le choix des technologies employées pour la construction, notamment au niveau des tunnels. Ils sont conçus et réalisés selon la New Austrian Tunneling Method (NATM) (figure 8).

Les tunnels sont tous bitubes, ils ont un gabarit de 4,70 m et 2 ou 3 voies de circulation selon qu'ils comportent ou non une voie pour véhicules lents (figure 9).

Pour répondre aux différentes spécifications relatives à la sécurité, ils comprennent : un passage transversal entre les tubes pour les piétons et véhicules d'intervention d'urgence tous les 250 m ainsi qu'un passage pour tout type de véhicule tous les 1 500 m, une place d'arrêt d'urgence tous les 500 m et des niches SOS et lutte incendie tous les 150 m.



8



9

© INGEROP

LES PONTS : DES DÉFIS TECHNIQUES IMPORTANTS

On compte 37 ouvrages d'art tous à tablier en béton précontraint avec une longueur cumulée d'un peu plus de 11 km sur l'ensemble du linéaire du projet. Ils portent un seul sens de circulation à l'exception du Moracica Bridge pour lequel un dédoublement d'appui n'est pas économique car il présente des piles de 160 m de haut.

Les ouvrages présentent une longueur variant de 68 m à 1432 m, leurs fondations sont superficielles ou sur pieux

selon les conditions de site. Les tabliers monodirectionnels ont une largeur de 9,90 m ou 13,40 m selon qu'ils portent ou non une voie réservée aux véhicules lents. Les travures standards des viaducs sont 22 m + nx28 m + 22 m ou 21 m + nx26 m + 21 m quand la hauteur des piles est réduite.

Le pont Moracica : ce viaduc de 960 m de long survolera le canyon de la rivière Morača du haut de ses grandes piles (figure 10). Il comporte 6 travées : 95 m + 170 m + 3x190 m + 125 m. Il est construit par encorbellements

8- Coffrage intérieur du tunnel.

9- Têtes de tunnels sur la partie Nord.

10- Le pont Moracica.

8- Tunnel interior formwork.

9- Tunnel portals on the northern section.

10- Moracica Bridge.

successifs à voussoirs coulés en place. Les piles sont dédoublées en tête pour diminuer leur rigidité longitudinale ce qui permet de diminuer les moments fléchissants induits par les dilatations (température, retrait) aux encastresments avec le tablier.

La vallée est très venteuse ce qui impacte le calendrier de construction en raison de l'effet venturi dû à la forme du site combiné à la hauteur des piles (figure 11). Le tablier, de hauteur variable, est précontraint transversalement et longitudinalement avec de la



10

© CRBC



11



12

précontrainte intérieure et extérieure, il comporte deux cellules et fait 22,70 m de large hors écrans pare-vent latéraux. À part le viaduc Moracica, l'ensemble des ponts et viaducs du projet est coulé en place, le coffrage étant supporté sur cintre classique.

Certaines parties du site très accidentées et peu accessibles imposent cependant des solutions alternatives à l'image du viaduc Uvac 4 (figure 12) dont les 900 m de tablier sont coulés travée par travée à l'aide d'une poutre coffrage fixée aux piles puis lancée sur la travée suivante.

CONCLUSION

Fin 2018, la construction aura bien progressé à l'image des tunnels qui seront tous excavés avec l'installation des divers équipements en cours.

11- Piles du pont Moracica.

12- Le viaduc Uvac4.

11- Moracica Bridge piers.

12- Uvac4 viaduct.

L'élan insufflé dès les premiers jours ne faiblit pas car chacun sait qu'il a une valeur ajoutée significative pour ce projet d'ampleur nationale, « *le plus important pour le pays depuis sa déclaration d'indépendance* », comme le confie volontiers M. Duško Marković, le Premier Ministre du Monténégro. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

LONGUEUR DU PROJET : 41 km

COÛT DU PROJET : 1 Md USD

PONTS/VIADUCS (MONO OU BIDIRECTIONNELS) : 28 ouvrages, longueur totale : 11 km

NOMBRE DE TUNNELS : 32 tubes, longueur totale : 36 km

LONGUEUR DES ROUTES D'ACCÈS : 70 km

VOLUME DES REMBLAIS : 5 millions de m³

VOLUME DES DÉBLAIS : 7 millions de m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ministère des Transports et des Affaires Maritimes du Gouvernement du Monténégro

MAÎTRE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉ : Monteput d.o.o

INGÉNIEUR (FIDIC BLANC) : Ingerop (mantataire), Geodata

ENTREPRISE (FIDIC JAUNE) : China Road and Bridge Corporation (Crbc)

ABSTRACT

A MAJOR PROJECT IN MONTENEGRO

VINCENT GRANGE, INGEROP - LOUIS DEWELLE, INGEROP - MILOSLAV MASIC, MINISTÈRE DES TRANSPORTS ET DES AFFAIRES MARITIMES DU GOUVERNEMENT DU MONTÉNÉGRO

The motorway passing through the Dinaric Alps in Montenegro consists, over a 41-km stretch, of alternating bridges (15%), tunnels (44%) and very high backfills/earth cuts. Of the project's 37 engineering structures, the Moracica Bridge, passing over a river at a height of 160 m, will become an emblem for the country. This project employs about 4,000 people and its cost represents more than 20% of the country's 2016 GDP. Carried out in a cosmopolitan environment with a local project principal, a Chinese contractor and a French-Italian engineer (contract management and work supervision), it involves very diverse challenges and its performance requires real collaboration by stakeholders coming from diverse cultures. □

UNA OBRA DE ENVERGADURA EN MONTENEGRO

VINCENT GRANGE, INGEROP - LOUIS DEWELLE, INGEROP - MILOSLAV MASIC, MINISTÈRE DES TRANSPORTS ET DES AFFAIRES MARITIMES DU GOUVERNEMENT DU MONTÉNÉGRO

La autopista que cruza los Alpes Dináricos en Montenegro está formada durante 41 km por una alternancia de puentes (15%), túneles (44%) y terraplenes/desmotes de gran altura. Entre las 37 construcciones del proyecto, el puente Moracica que cruza el río a 160 m de altura se convertirá en un emblema del país. Este proyecto moviliza cerca de 4.000 personas y su coste asciende a más del 20% del PIB nacional de 2016. Realizado en un contexto cosmopolita, con un contratista local, una empresa china y un ingeniero (gestión del contrato y supervisión de las obras) franco-italiano, presenta desafíos muy variados cuya superación exigirá un trabajo en estrecha colaboración entre sus actores, procedentes de distintas culturas. □



1
© SOLETANCHE BACHY

TESTIMONIO II LES CHANTIERS D'ENVERGURE SE SUCCÈDENT À MONACO

AUTEURS : PIERRE DE LAVERNÉE, INGÉNIEUR PRINCIPAL, BUREAU D'ÉTUDES SOLETANCHE BACHY FRANCE -
EMMANUEL OLLIER : ADMINISTRATEUR DÉLÉGUÉ DE SOLETANCHE SAM

DEPUIS 2016, LES ÉQUIPES DE SOLETANCHE SAM, FILIALE LOCALE DE SOLETANCHE BACHY, VINCI CONSTRUCTION MONACO ET GTM SUD ONT ENGAGÉ, EN PARTENARIAT AVEC LES ENTREPRISES CAROLI BAT ET CAROLI TP, LES TRAVAUX DU PROJET TESTIMONIO II. QUELQUES ANNÉES APRÈS LE CHANTIER HORS NORME DE LA TOUR ODÉON, LES MÊMES ÉQUIPES SE RETROUVENT POUR CETTE CONSTRUCTION D'ENVERGURE ET DE TRÈS GRANDE QUALITÉ ARCHITECTURALE DANS UN SITE PRÉSENTANT, COMME TOUJOURS À MONACO, DES CONTRAINTES EXCEPTIONNELLES : TRÈS FORTE DÉCLIVITÉ, EMPRISES RÉDUITES, HYDROGÉOLOGIE ET GÉOTECHNIQUE EXTRÊMEMENT COMPLEXES, PLANNING TRÈS TENDU IMPOSANT DES CO-ACTIVITÉS RAREMENT ÉGALÉES.

LE PROJET

À Monaco, les besoins de construire, que ce soient des logements ou des équipements, sont permanents. Cette "ambition bâtisseuse" qui ne se dément pas au fil des ans, se caracté-

térise, au fur et à mesure que les espaces disponibles se réduisent, par la réalisation de projets toujours plus complexes, innovants techniquement et d'un très grand standing architectural. Ainsi, après un concours lancé en

2013, le groupement de promoteurs Groupe Marzocco et Vinci Immobilier a été retenu par l'État monégasque pour construire, sur la dernière grande dent creuse de la Principauté (9755 m²), 150 logements dans une

tour de 25 étages, 49 logements privés, 1100 places de parking, une crèche de 50 berceaux, et l'École Internationale de Monaco qui pourra accueillir 700 élèves. L'ensemble de ces constructions se situe entre le boule-



LA CONCEPTION DU PROJET

SPÉCIFICITÉS DE LA "GRANDE FUILLE" ET ENJEUX D'ÉTUDES

L'ouvrage, dans la zone dite de la "Grande Fouille", prend la forme d'un très grand socle qui abritera notamment un parking et sur lequel sera bâtie la tour domaniale. Il s'installe dans une topographie naturelle faite d'une succession de talus et de murs dont le dénivelé, compté entre le boulevard d'Italie en amont et l'avenue Princesse Grace en aval, est de 40 m au total.

Ce socle est conçu pour être entièrement auto-stable sous l'effet de la poussée du massif de terres amont (y compris au séisme), sans aucun tirant. Les éléments stabilisateurs ne sont donc constitués que par :

→ L'enceinte périphérique en parois moulées et contreforts ; suivant une forme en U, elle borde le boulevard d'Italie et comprend deux branches de longueurs différentes, le "grand" et le "petit" accoudoir.

→ Les barrettes intérieures, orientées principalement dans le sens amont-aval.

La stabilité en phase de service est assurée grâce à la mobilisation de la butée des barrettes et contreforts dans le substratum, ainsi que par le frottement du terrain le long des accoudoirs. L'une des difficultés de la conception consiste à trouver le moyen de conférer suffisamment d'inertie à cette structure composée de panneaux de paroi jointifs et de barrettes discontinues pour que son déplacement soit compatible avec les seuils de tassement sous les immeubles voisins (10 mm en arrière du boulevard d'Italie).

L'excavation est menée "en taupé", avec coulage des dalles à l'avancement, ce qui permet de rigidifier la boîte au fur et à mesure de sa construction. Ces dalles jouent le rôle de diaphragmes et répartissent les poussées amont vers les accoudoirs et les barrettes intérieures ; mais elles ne limitent que très faiblement les glissements verticaux au droit des joints de panneaux. Ainsi, les

accoudoirs et les barrettes se comporteraient comme un portique bien trop souple pour répondre aux objectifs de déplacements, si les dispositions suivantes n'étaient pas mises en œuvre :

→ Le long des accoudoirs, les panneaux de paroi moulée sont "remordus" entre eux (lors de la réalisation d'un nouveau panneau, l'hydrofraise vient forer directement le béton du panneau précédent sur environ 20 cm) ; cette technique assure un contact rugueux béton/béton avec un frottement mobilisable amélioré par rapport à la configuration d'un joint water-stop avec coffrage lisse. Notons qu'au sein d'un même panneau de 7 à 9 m environ, les différentes cages d'armatures sont liaisonnées horizontalement pour bénéficier de l'inertie maximale (figure 2).

→ Les barrettes intérieures, au fur et à mesure des terrassements, sont clavées entre elles et liaisonnées dans le sens amont-aval afin de constituer in fine de très longs refends aux armatures continues.

Compte tenu de ce dernier point, le concepteur se trouve donc face à une structure dont l'inertie sera variable en fonction des phases de travaux.

De plus, la mobilisation de la butée devant les contreforts et barrettes implique des déplacements sous les niveaux de terrassements : les dalles de l'infrastructure sont donc coulées sur une enceinte qui se déforme progressivement.

Afin de rendre compte de la juste répartition des efforts entre les différents éléments (panneaux de paroi, contreforts, barrettes), l'idéal est, bien sûr, d'avoir recours à un modèle 3D de la structure aux éléments finis. Mais, chose plus rare, il est indispensable dans le cas présent d'intégrer à ce modèle le phasage complet de la construction puisque son effet est prépondérant et ne peut être appréhendé de façon simplifiée. En parallèle de la modélisation purement structurelle, un autre modèle 3D aux éléments finis a été initié, privilégiant cette fois les aspects géotechniques pour déterminer au plus juste les poussées exercées tout autour de l'enceinte, ainsi que les tassements aux abords du projet.

L'étude complète de la Grande Fouille s'est donc trouvée à la conjonction des compétences de quatre bureaux d'études travaillant de concert :

→ Seng (Vinci-Construction) étant responsable de la modélisation 3D structure ;

1- Vue d'ensemble du chantier.

2- Liaisonnement horizontal de cages d'armatures au sein d'un panneau.

1- General view of the project.

2- Horizontal linking of reinforcement cages in a panel.

levard d'Italie, situé à la cote 44 NGM, et la célèbre avenue Princesse Grace à 6 NGM, et englobe donc le boulevard du Larvotto.

Les terrassements, fondations profondes, soutènements, et le gros œuvre (macro lot 1), ont été confiés par les promoteurs à un groupement d'entreprises de Vinci Construction : Vinci Construction Monaco (mandataire), Soletanche SAM (filiale monégasque de Soletanche Bachy), Gtm Sud, associées aux entreprises Caroli Bat et Caroli Tp. Les travaux préparatoires ont démarré en 2016 et les logements privés devraient être livrés au macro lot 2 en charge des CES en 2021.



2
© SOLETANCHE BACHY

3a- Coupe en aval de la Villa Florida avec la plateforme pour paroi moulée (solution de base).

3b- Coupe en aval de la Villa Florida avec le bâtiment définitif au droit du patio, après détente des tirants de la paroi et vérinage des planchers (solution de base).

3a- Cross section downstream of Villa Florida with the platform for diaphragm wall (standard solution).

3b- Cross section downstream of Villa Florida with the final building at the patio level, after relaxation of the wall tie anchors and jacking of the floors (standard solution).

- Terrasol pour la modélisation 3D géotechnique ;
- Le bureau d'études de Soletanche Bachy France se chargeant de la coordination, de la définition des lois d'interaction sol-structure pour les calculs statiques du modèle 3D structure, et de l'établissement des plans d'armatures des parois et barrettes ;
- Enfin, Ap Consultant a fourni les impédances dynamiques de la paroi et des barrettes à intégrer au modèle 3D structure sous séisme.

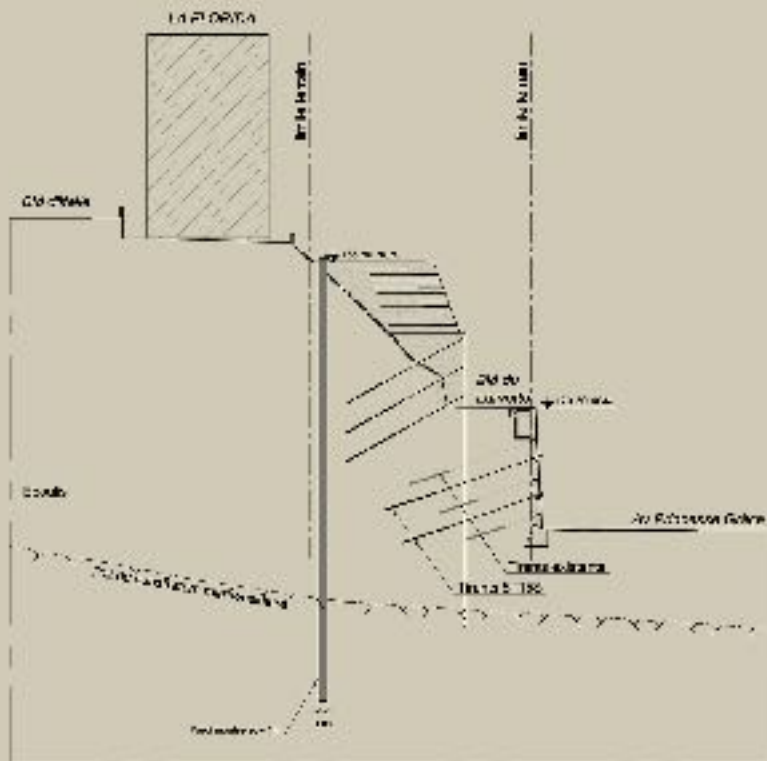
LE MODÈLE 3D GÉOTECHNIQUE

Le modèle 3D géotechnique a été élaboré par Terrasol sous le logiciel Plaxis. Le massif de sol y est entièrement représenté sur une emprise de 250 x 250 m avec les principaux ouvrages mitoyens (immeubles, murs, ...) et l'infrastructure du projet.

Les étapes de construction de la Tour (qui démarrent avant la fin de l'excavation) sont également intégrées dans ce modèle sous forme de surcharges sur la dalle de couverture, car son poids propre améliore la stabilité générale.

Enfin, certains détails structurels propres à influencer l'inertie de la boîte sont particulièrement soignés :

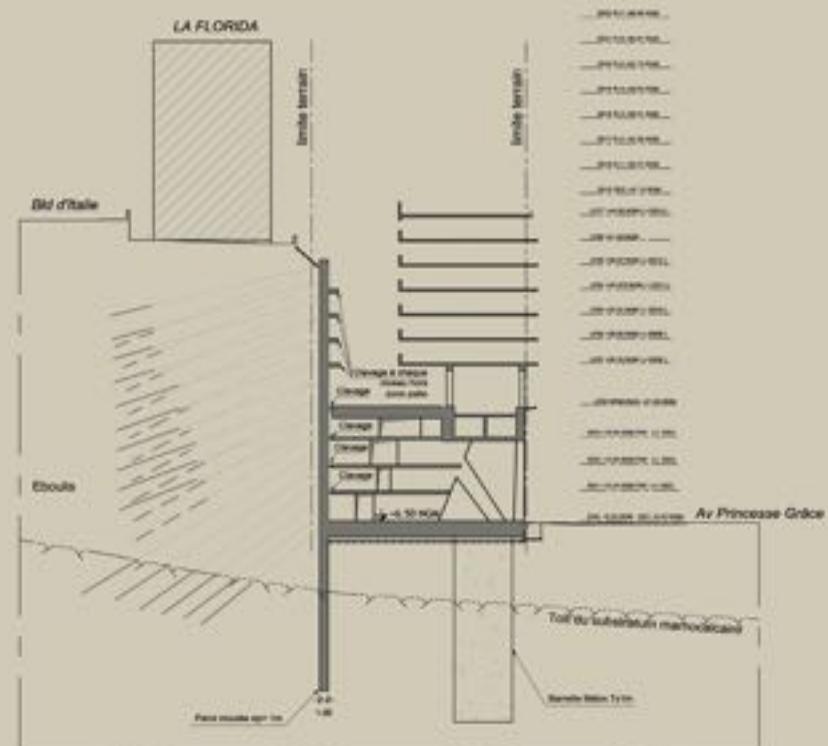
COUPE EN AVAL DE LA VILLA FLORIDA AVEC LA PLATEFORME POUR PAROI MOULÉE (SOLUTION DE BASE)



3a

© TRACTEBEL

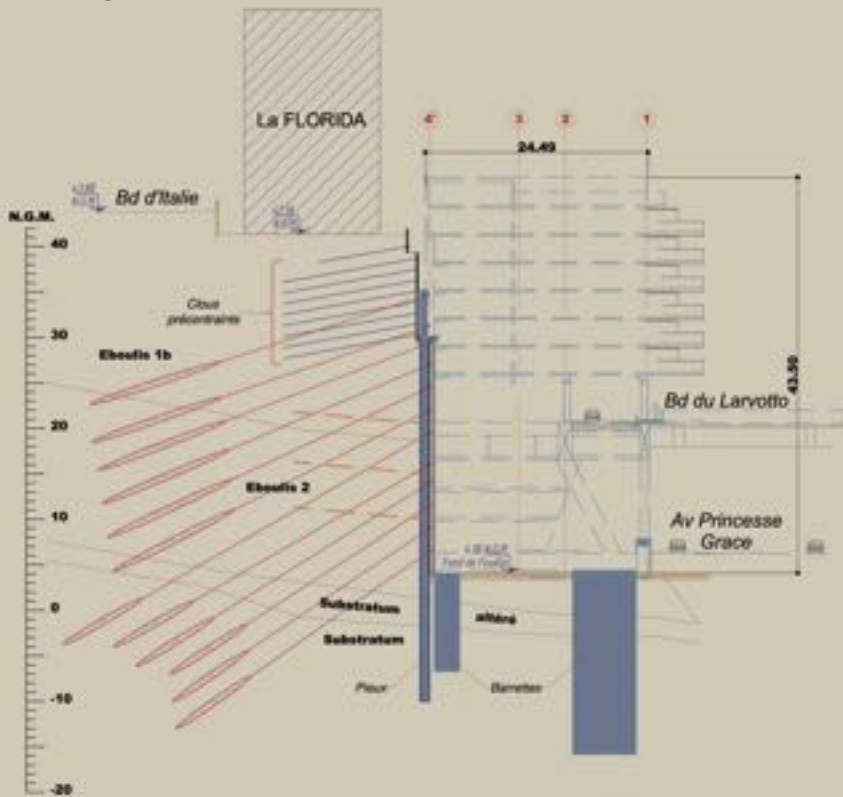
COUPE EN AVAL DE LA VILLA FLORIDA AVEC LE BÂTIMENT DÉFINITIF AU DROIT DU PATIO, APRÈS DÉTENTE DES TIRANTS DE LA PAROI ET VÉRINAGE DES PLANCHERS (SOLUTION DE BASE)



3b

© TRACTEBEL

COUPE EN AVAL DE LA VILLA FLORIDA DU SOUTÈNEMENT, VARIANTE ADOPTÉE



© SOLETANCHE BACHY

4

4- Coupe en aval de la Villa Florida du soutènement, variante adoptée.

5- Première phase du mur clouté sous la Villa Florida.

4- Cross section of retaining structure downstream of Villa Florida, variant adopted.

5- First phase of the soil-nailed wall under Villa Florida.

- Les joints entre panneaux de paroi sont pris en compte à l'aide d'interfaces frottantes à palier plastique ;
- Conformément au phasage travaux, la connexion horizontale entre les barrettes dans le sens amont-aval est reproduite au fur et à mesure des terrassements.

Les résultats de cette modélisation sont utilisés pour :

- Valider la stabilité de l'ouvrage à toutes les phases de construction ;



5

© SOLETANCHE BACHY

- Estimer les déplacements des ouvrages mitoyens ;
- Déterminer les poussées des terres tout autour de l'enceinte, qui se trouvent être sensiblement différentes de la poussée active (les déplacements en jeu étant faibles relativement à la grande masse de terre mobilisée tant en poussée qu'en butée).

LE MODÈLE 3D STRUCTURE.

Pour modéliser de façon fine la structure en béton armé, Seng a fait appel au logiciel Sofistik. L'un des points forts de ce logiciel est de pouvoir modéliser l'enchaînement des phases travaux, service et séisme. De ce fait, l'influence du phasage de construction sur les sollicitations dans la structure est directement et correctement traitée.

L'intégralité de la structure est donc modélisée : parois moulées et barrettes toute hauteur (y compris leur fiche), dalles, voiles intérieurs, tour, ... jusqu'aux principales ouvertures à percer dans la paroi en phase service pour les passages de réseaux ! Bien entendu, il est tenu compte de la présence des joints entre panneaux pouvant mobiliser un frottement plafonné (comme dans le modèle géotechnique) en fonction de l'effort de compression mobilisé.

Le point délicat dans un tel modèle qui n'est pas dédié à la géotechnique reste la prise en compte réaliste de l'interaction sol-structure. Dans les grandes lignes, il a fallu :

- Appliquer autour de l'enceinte les poussées des terres, variables en fonction des phases travaux ; ces poussées ont été tirées du modèle 3D géotechnique. Sous les fonds de fouille successifs, il a été appliqué plus précisément un différentiel entre la poussée côté terre et une pression de confinement correspondant au sol au repos, également variable selon les terrassements.

- La mobilisation de la butée est gérée par l'intermédiaire de ressorts élasto-plastiques ; Soletanche Bachy France a fourni à Seng les lois de comportement de sol pour les différents éléments (panneaux de paroi, contreforts ou barrettes), en s'appuyant sur les règles de l'Annexe I de la NF P 94-262, et en tenant compte des effets groupe.

- Afin d'intégrer l'effet de la dissymétrie du site vis-à-vis de la stabilité, le frottement mobilisable le long des accoudoirs a été cantonné forfaitairement à une zone délimitée par un cône de diffusion à 25° ▷



© SOLETANCHE BACHY

prenant son origine au niveau de l'avenue Princesse Grace ; la butée mobilisable devant les barrettes au cours des phases travaux a de même été systématiquement négligée au-dessus de ce cône de diffusion.

Après exploitation des résultats de ce modèle, Seng a pu fournir à Soletanche Bachy France les sollicitations et les sections d'aciers associées pour la paroi moulée et les barrettes. Des itérations ont été parfois nécessaires, afin de vérifier la faisabilité du positionnement des armatures dans les cages très denses (jusqu'à 200 kg/m³ !).

LA ZONE AVAL FLORIDA

Relativement indépendante de la Grande Fouille, la conception et la réalisation du bâtiment situé en aval de la Villa Florida représentent peut-être le plus grand défi technique du projet. Dans cette zone, en effet, le projet prend place sur une étroite bande de terre de 25 m de large, dans laquelle s'inscrivent un talus naturel très raide (sur 20 m de haut), et le boulevard du Larvotto soutenu par le mur Rocabella tirant sur 15 m. Au total, 35 m environ séparent donc le niveau de la Villa vers +40 NGM et le fond de fouille à +4,1 NGM.

Sur cette hauteur, le bâtiment définitif doit être auto-stable, car l'utilisation des tréfonds sous la Villa n'a été accordée que pour mettre en œuvre des ancrages à rôle strictement provisoire.

Solution de base

En solution de base, cette structure est constituée :

- De grands refends intérieurs équilibrant le renversement et d'un épais radier de transfert ;

- De barrettes aval de 7 m de long, espacées de 3 m et ancrées dans le substratum, faisant office de bèches pour reprendre les efforts horizontaux de poussée et la composante de compression liée au renversement ;

- D'une paroi moulée amont reprenant la composante de traction liée au renversement, notamment sous séisme ; cette paroi intégrée à l'ouvrage sert aussi de soutènement provisoire et définitif.

En phase de construction, la paroi moulée est tirantée. À la fin des travaux, ces tirants doivent être détendus : il s'agit alors de transférer la poussée du massif de terre à la structure du bâtiment. Afin de maintenir le massif dans un état de

6- Mur clouté en cour de réalisation permettant de créer la future plateforme pour la foreuse de pieux.

7- Pont provisoire.

6- Soil-nailed wall being executed to create the future platform for the pile driller.

7- Temporary bridge.

confinement constant, d'une part, et de compenser les déplacements inhérents à la mise en charge de la structure, d'autre part, cette opération se fait par vérinage en sollicitant l'ensemble des dalles simultanément (figures 3a et 3b). La présence d'un patio interrompant les dalles sur une grande hauteur du bâtiment ne simplifie pas la tâche.

Mais les difficultés techniques démarrent très en amont : pour réaliser la paroi moulée dans un tel environnement, il était prévu de créer une plateforme de forage en remblayant le talus. Outre que le dimensionnement d'une plateforme en remblais sur un talus de 20 m de haut constituait une gageure, l'apport d'une telle quantité de matériaux impactait le planning des travaux et impliquait un renforcement du mur Rocabella existant.

Solution variante

Les entreprises se sont donc appliquées à trouver une conception s'affranchissant de la paroi moulée, et offrant au maître d'ouvrage les mêmes fonctionnalités du bâtiment qu'en solution de base et les mêmes performances vis-à-vis des tassements attendus sous la Villa.

Après de multiples allers-retours entre les bureaux d'études et le chantier, il a été décidé de privilégier une solution découplant le soutènement provisoire et le bâtiment.

L'excavation se fait à l'abri de deux soutènements étagés (figure 4) :

- En partie supérieure, là où la solution naturelle à Monaco serait une microberlinoise, un voile cloué de 10 m de haut s'est imposé, compte tenu de l'impossibilité d'accéder en crête de talus avec une machine



© CÉDRIC HELSY

8- Vues 3D de plusieurs phases significatives.

8- 3D views of several significant phases.

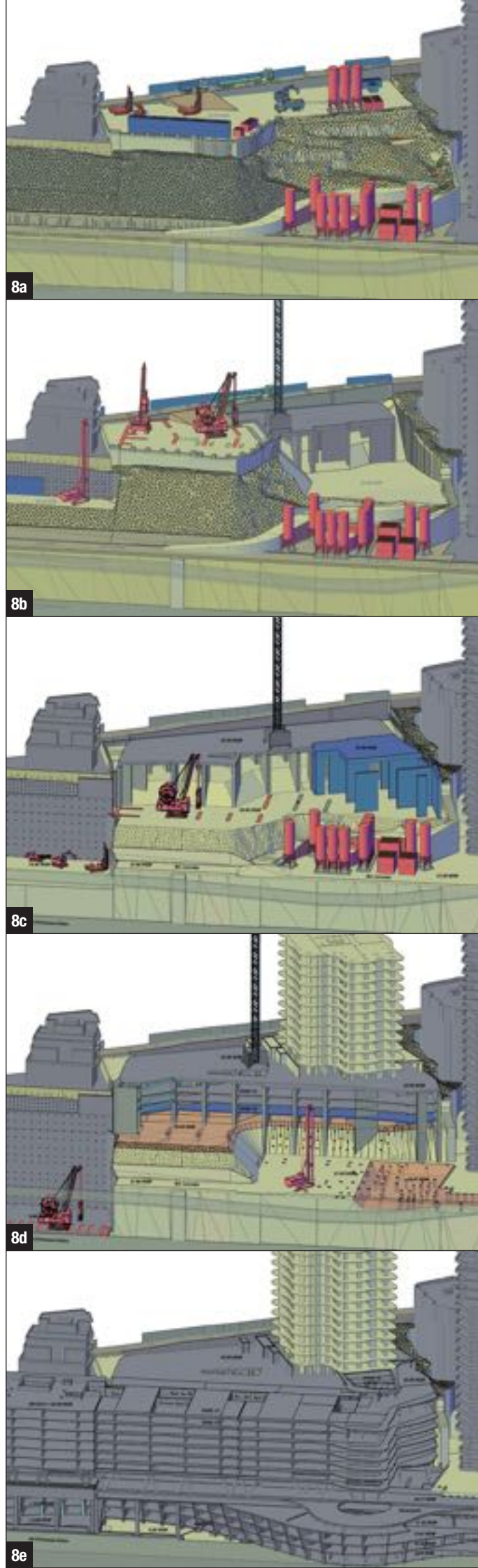
de forage de micropieux (figures 5 et 6). Afin de respecter les critères de tassements sous le mitoyen, les clous de 15 m ont été munis d'une partie libre de 6 m et précontraints.

→ Cette paroi clouée permet de dégager dans le talus une plateforme de 10 m de large environ, suffisante pour installer une foreuse de pieux ; le soutènement inférieur est donc constitué par une paroi lutécienne en pieux de 1 m de diamètre, espacés tous les 2,4 m. Les pieux sont prolongés par une rehausse en béton armé jusqu'à mi-hauteur du voile cloué, afin de pouvoir intégrer des tirants longs en partie supérieure. Au total, la stabilité de cette lutécienne est assurée par l'ancrage de 12 lignes de tirants, dont la moitié scellés dans le substratum. La longueur maximale pour les tirants supérieurs est de 42 m, et jusqu'à 50 m pour les tirants ancrés dans le rocher !

Le dimensionnement de ce soutènement a été justifié par le BE de Soletanche Bachy France à l'aide d'un modèle aux éléments finis sous Plaxis 2D : le tassement calculé à la fin de l'excavation est de 2 cm sous la Villa.

Concernant l'équilibre de la structure en phase de service, la conception a été également modifiée, du fait de la suppression de la paroi moulée : un voile béton armé de 60 cm est coulé devant la lutécienne provisoire et permet de contreventer le bâtiment sous séisme dans le sens Nice-Menton. La continuité d'armatures horizontales de ce voile facilite ce rôle de contreventement par rapport à la solution en paroi moulée munie de joints et donne plus de souplesse vis-à-vis de l'intégration de liernes structurelles dans les zones de trémies ou patio. Par ailleurs, la section de pieux n'étant pas suffisante pour reprendre les tractions voulues vis-à-vis du renversement amont-aval, une file de barrettes de fondations a été ajoutée en amont à l'aplomb des refends du bâtiment.

Pour le reste, la conception du bâtiment demeure inchangée.



LES TRAVAUX

Les projets à Monaco comportent, de façon quasi systématique, une part de logistique et de travaux préparatoires ou d'ouvrages provisoires nécessaires à la construction.

Le projet TestimoniII n'y échappe pas avec, notamment, la construction d'un pont provisoire (figure 7) pour dévier, le temps des travaux, le boulevard du Larvotto situé en plein milieu du projet et la construction d'une galerie drainante en traditionnel pour tenter de collecter les eaux de source traversant le projet.

Depuis le mois d'août 2017, ce sont les terrassements, les soutènements et les fondations profondes réalisées par les équipes de Soletanche SAM qui constituent l'activité principale.

Les travaux de génie civil sont en cours de lancement, avec la construction de la dalle de transfert.

Compte tenu de la géométrie du site, de sa très grande déclivité (près de 40 m sur une plateforme de parfois 30 m de large à peine), de la géologie monégasque complexe et chahutée (grosse frange d'éboulis à blocs de calcaire jurassique sur un substratum de marno calcaire crétacé, le tout entrecoupé de 2 paléothalwegs très ouverts), le projet constitue l'ABC des travaux spéciaux, avec un éventail de spécialités particulièrement riche qui fait le bonheur de tous les spécialistes. Sont, ou seront ainsi réalisés sur site, des parois moulées et barrettes à l'Hydrofraise, des soutènements de tous types (berlinoise tirantée, micro-berlinoise tirantée ou butonnée, mur cloué, ...) des injections de sol, des pieux de fondations, des micropieux et même des sondes géothermiques profondes.

L'ensemble de ces travaux est réalisé dans un cadre urbain extrêmement dense avec des ouvrages mitoyens occupés, très sensibles et de grande hauteur, en périphérie immédiate du projet. Cela impacte l'organisation du chantier de façon très particulière en exigeant une gestion des nuisances (vibrations, bruit, environnement, ...) permanente.

LES ÉTAPES DU PROJET

Il est difficile de décrire sans modèle 3D le phasage de construction de cette opération, tant il est complexe (figure 8). Cette complexité repose sur les éléments de géométrie du site évoqués plus avant et dont il est nécessaire de s'affranchir pour livrer les ouvrages aux dates contractuelles.



9

© CÉDRIC HELSLY

C'est pour cette raison que le projet a été découpé en 2 grandes zones : la première dite de la "Grande Fouille", et la seconde dite de "L'Aval Florida". Ces deux ouvrages très différents dans leur conception et dans la nature des travaux à réaliser (cf. partie conception du projet) doivent néanmoins converger vers le niveau bas à 6 NGM pour permettre de construire l'école internationale, de reconstruire le boulevard du Larvotto et de bâtir par-dessus les logements privés.

LA GRANDE FOUILLE

Concernant les travaux spéciaux, cette zone se caractérise par la réalisation d'un soutènement principal de près de 40 m de hauteur, réalisé depuis 2 niveaux de plateformes différents (44 et 30 NGM - figure 9). Il s'agit d'une paroi moulée à l'Hydrofraise, de 1 m d'épaisseur et jusqu'à 50 m de profondeur environ, stabilisée par des barrettes et contreforts d'épaisseur 1 m allant jusqu'à 61 m de profondeur et les planchers du parking qui sera réalisé en semi-taupe. Ces barrettes servent aussi de fondation à la tour de 25 étages. Pour réaliser ces parois, des travaux de soutènements provisoires ont été réalisés avec une microberlinoise le long du boulevard d'Italie, des talus cloués avec des clous en fibre de verre pour éviter de gêner la réalisation des futures barrettes, une microberlinoise au-dessus du boulevard du Larvotto, pour permettre de placer la centrale de fabrication et de recyclage des boues des parois moulées.

En complément, des travaux de pré-injection nécessaires à la réalisation des parois moulées sont réalisés préalablement à celles-ci, et des pieux viendront fonder le collège international.

Il est à noter que, afin d'optimiser la consommation énergétique des bâtiments, les fiches des pieux et barrettes sont équipés de tubes géothermiques qui seront complétés par des sondes géothermiques profondes (environ 180 m de profondeur).

L'ensemble sera connecté, via des réseaux circulant sous radier, à une pompe à chaleur.

9- Fin des injections et réalisation de la paroi depuis la plateforme haute.
10- Hydrofraise evolution 7.

9- End of cement grouting and construction of the wall from the high platform.
10- Evolution 7 Hydrofraise.

L'AVAIL FLORIDA

Cette zone se caractérise par un soutènement vertical de près de 35 m de haut. Pour le réaliser, se succèdent de haut en bas un mur cloué de 8 m de hauteur, une berlinoise tirantée et sa réhausse et, en fond de fouille, des barrettes de fondation du futur bâtiment et des barrettes de traction pour reprendre les efforts de renversement en phase définitive.

LES MOYENS ENGAGÉS

Pour réaliser ces travaux, Soletanche Bachy a mobilisé les outillages les plus



10

© CÉDRIC HELSLY



© CEDRIC HELSLEY
11

performants, de dernière génération. Forage des parois moulées : benne KS et Hydrofraise Evolution 7 (figure 10). Cette Hydrofraise, dernière-née du parc matériel de Soletanche Bachy, présente la particularité de développer une très

11- Centrale à boue.

11- Slurry mixing plant.

grande puissance de perforation avec un ensemble relativement compact, ce qui est essentiel, compte tenu de la petite taille des emprises. Cette Hydrofraise est par ailleurs équipée des systèmes de mesure et de contrôle des déviations

permettant de maîtriser la verticalité, y compris dans les éboulis de pente. Équipement des parois moulées : le design des parois moulées et barrettes a exigé que les cages des panneaux soient liaisonnées toute hauteur. Pour cette raison, il faut être en mesure de lever des cages jusqu'à 60 m de hauteur, pesant plus de 60 t. Il a fallu pour cela recourir à une grue de 400 t, avec plus de 70 m de flèche.

Boues pour parois moulées : une centrale avec plus de 1300 m³ de stock, un Sotress de 450 m³/h et une unité de destruction des boues ont été mis en place (figure 11).

Forage pour micropieux et pré-injection : jusqu'à 4 foreuses Hi'Drill ont été mobilisées pour ces travaux.

Pieux : les pieux de fondation du pont provisoire ont été réalisés en pieux Starsol. Les pieux berlinois dans les éboulis sont, quant à eux, réalisés à l'aide d'une foreuse Maît 420.

Pour faire tourner tous ces ateliers, très souvent en co-activité, ce sont 45 à 60 personnes qui sont mobilisées en poste. Elles sont encadrées par un conducteur de travaux et un ingénieur travaux, eux-mêmes secondés par 2 RCI et 3 chefs de postes. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROIS MOULÉES ET BARRETTES EN ÉPAISSEUR 1 000 mm : 23 600 m² (panneaux de 400 m² en moyenne sur la plateforme à 44 NGM)

PIEUX : 21 pieux berlinois de diamètre 1 000 mm et de 40 m de profondeur

MICROPIEUX : environ 4 000 m, dont une partie importante en gros diamètre (300 mm ou plus)

PIEUX : environ 5 000 m

TIRANTS : environ 14 000 m en 7 et 12 T15.

PRÉ-INJECTIONS : environ 19 500 m de forages pour injection solide et injection de coulis bentonite ciment

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : SAM Testimonio 2 (Groupe Marzocco et Vinci Immobilier)

MAÎTRISE D'ŒUVRE/ARCHITECTE : Arquitectonica et Cabinet Alexandre Giraldi

MAÎTRISE D'ŒUVRE STRUCTURE : Tractebel et Sidf

BET GÉOTECHNIQUE : Fondasol

BET FLUIDES : Ingetec

BUREAU DE CONTRÔLE : Socotec

SPS : Apave

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Groupement Vinci Construction Monaco, Soletanche SAM, Gtm Sud, Caroli Tp et Caroli Bat

BET TRAVAUX SPÉCIAUX : Soletanche Bachy

ABSTRACT

TESTIMONIO II - ONE MAJOR PROJECT AFTER ANOTHER IN MONACO

PIERRE DE LAVERNÉE, SOLETANCHE BACHY - EMMANUEL OLLIER, SOLETANCHE SAM

In Monaco a Soletanche Bachy subsidiary, Soletanche SAM, is taking part in the Testimonio 2 project, on land presenting a 40-metre difference in altitude. The two separate retaining structures, "Grande Fouille" and "Villa Florida", required a complex geotechnical model and finite-element calculations. A large number of techniques were employed: soil-nailed walls, Berlin-type retaining walls, pre-excavation grouting, diaphragm walls, barrettes, piles and tie anchors. The diaphragm walls were executed with the Evolution 7 hydrofraise, the latest addition to Soletanche Bachy's equipment, which features great drilling power developed by a relatively compact system. □

TESTIMONIO II - LAS OBRAS IMPORTANTES SE SUCEDEN EN MÓNACO

PIERRE DE LAVERNÉE, SOLETANCHE BACHY - EMMANUEL OLLIER, SOLETANCHE SAM

En Mónaco, Soletanche SAM, filial de Soletanche Bachy, participa en el proyecto Testimonio 2, sobre un terreno que presenta un desnivel de 40 m. Los dos muros de contención, la Grande Fouille y la Villa Florida, han requerido un modelo geotécnico complejo y cálculos con elementos finitos. Se han utilizado una multitud de técnicas: pantallas claveteadas, muros berlineses, pre-inyecciones, pantallas de hormigón, guías, pilotes y tirantes. Las pantallas de hormigón se han realizado con la hidrofresadora Evolution 7, última creación en equipamientos de Soletanche Bachy, que presenta la particularidad de desarrollar una muy alta potencia de perforación con un conjunto relativamente compacto. □



1
© EGCM

RAFFINERIE D'AL ZOUR, PROJET DE TAILLE MONDIALE AU KOWEÏT

AUTEURS : FRANÇOIS GLAISNER, PROJECT MANAGER, EGCM - DAVID FRONTINI, CONSTRUCTION MANAGER, EGCM

EIFFAGE GENIE CIVIL MARINE (EGCM) PARTICIPE À LA CONSTRUCTION DE LA PLUS IMPORTANTE CAPACITÉ DE RAFFINAGE JAMAIS DÉVELOPPÉE EN UNE SEULE PHASE. AU SEIN DE CET OUVRAGE QUI S'ÉTALE SUR 16 km², EGCM, EN PARTENARIAT AVEC 2 ENTREPRISES CORÉENNES, EST EN CHARGE DES INSTALLATIONS MARINES.

PRÉSENTATION DU PROJET

Kipic (Kuwait Integrated Petroleum Industries Company) a lancé, en octobre 2015, le projet de la nouvelle raffinerie d'Al-Zour.

Cette raffinerie, d'une capacité de 615 000 barils par jour, portera la capacité globale de raffinage du Koweït à 1,4 millions de barils par jour. Son schéma de raffinage est adapté aux bruts lourds et fortement souffrés extraits localement. Sa conception respecte des normes environnementales sévères en matière de rejets atmosphériques (oxydes d'azote et de soufre) et liquides, en particulier pour les installations en mer. Le projet est également remarquable par sa taille puisqu'il s'agit de la plus importante capacité de raffi-

nage jamais développée en une seule phase (figure 2).

L'usine produira une gamme d'hydrocarbures liquides (naphta, kérosène, diesel, fuel oil) ayant une teneur en soufre conforme aux normes internationales les plus strictes. Elle alimentera en fuel les centrales électriques locales, les autres produits étant destinés essentiellement à l'export.

L'ensemble de l'ouvrage s'étend sur 16 km² au sud du Koweït, à proximité d'une centrale électrique et d'une usine de dessalement d'eau de mer. Compte tenu de sa taille (13 milliards de dollars américains), le projet a été découpé en cinq lots (unités de traitement du brut, unités de support du procédé, production d'utilités, parc de stockage, instal-

1- Zone de réclamation.

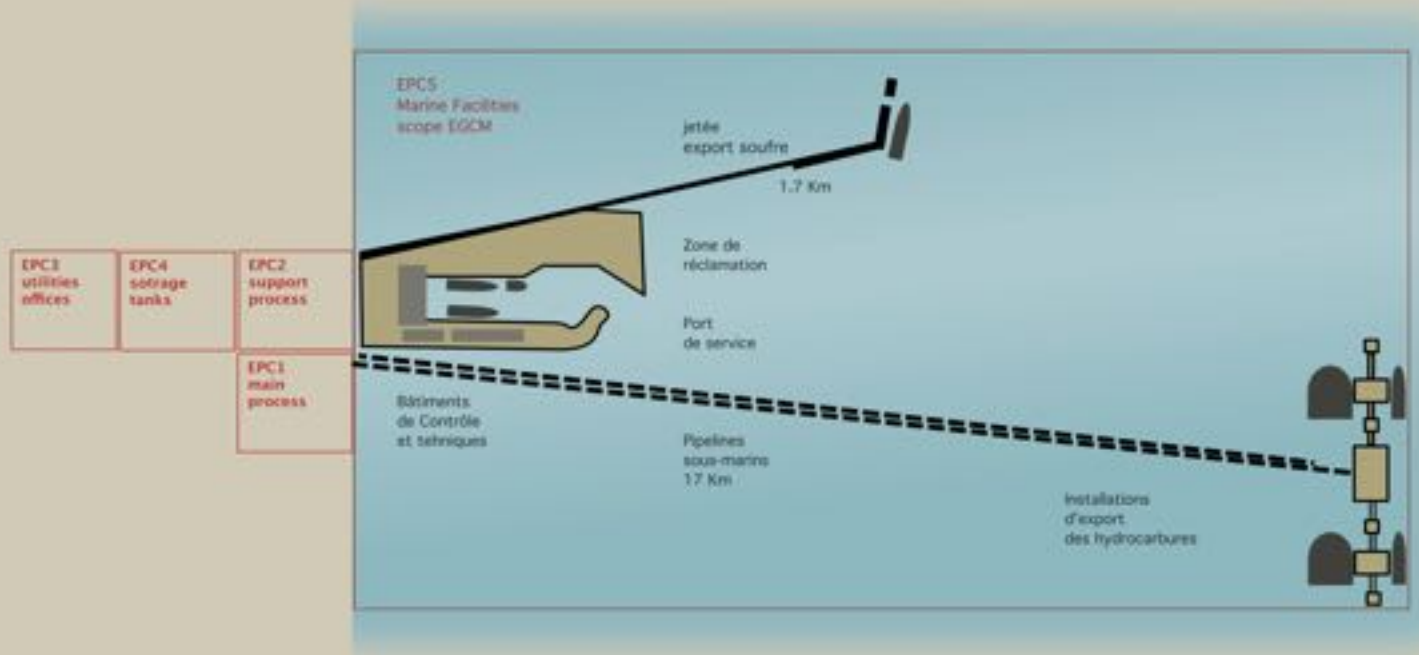
1- Reclaimed area.

lations marines) attribués à des groupements d'entreprises internationales. Eiffage Génie Civil Marine (Egcm) en association (*Joint Venture*) avec Hyundai Engineering & Construction (Hdec) et SK Engineering & Construction (Skec), deux sociétés coréennes, est en charge de la réalisation des installations marines. Ces installations permettront d'exporter les produits liquides raffinés ainsi que le soufre sous forme granu-

laire. Elles comprendront également un port de service pour le support des activités maritimes.

Le projet se déroule en parallèle de plusieurs autres développements dans l'industrie pétrolière koweïtite, créant un important besoin de main d'œuvre que le marché local n'est pas en mesure de satisfaire. En conséquence, un effort significatif de recrutement de personnel à l'extérieur du Koweït, particulièrement en Asie, a été lancé dès le début du projet. La mobilisation de plusieurs centaines de personnes (3 000 au pic d'activité) constitue en soi un défi logistique important, en particulier pour l'hébergement et le transport. Un camp, d'une capacité de 2 400 couchages a été construit à proximité du site pour

VUE GÉNÉRALE DES OUVRAGES DU PROJET



2

© EGCM

accueillir l'ensemble des personnels employés directement par les trois partenaires.

L'activité de construction pétrolière au Koweït est historiquement *onshore* et l'industrie locale compte peu de sociétés capables de travailler dans les conditions *offshore* imposées par la nature des installations marines. De ce fait le schéma d'exécution du

2- Vue générale des ouvrages du projet.

3- Port de service.

2- General view of the project works.

3- Service port.

projet inclut une part importante de travaux réalisés en moyens propres en s'appuyant sur les compétences internes des partenaires et sur les méthodes de construction éprouvées dans des projets précédents. D'autre part, les sous-traitants et moyens mobilisés pour les activités en mer sont, pour la plupart, d'origine étrangère. Les installations marines ont de fortes

composantes génie civil et infrastructure. Cependant, étant associées à une raffinerie, leur design est soumis aux codes et standards en usage dans l'industrie pétrolière dont les exigences sont en général plus sévères compte-tenu du danger inhérent aux procédés mis en œuvre pour le traitement, le stockage, le transport en canalisation des hydrocarbures et leur chargement en navire. ▷



© EGCM

3

Les installations marines exécutées par la JV comprennent 5 ouvrages principaux :

- Une zone de réclamation ;
- Un port de service ;
- Une jetée d'export de soufre ;
- Une île artificielle destinée à l'export de produits raffinés ;
- Une ligne de rejet des eaux résiduaires traitées.

Ces ouvrages et les principales méthodes de construction sont décrits dans les paragraphes suivants.

LES OUVRAGES

LA ZONE DE RÉCLAMATION

Ce terre-plein gagné sur la mer, (figure 1) d'une surface de 400 000 m², a nécessité 2,5 millions de m³ de remblais de dragage. Plusieurs dragues ont été mobilisées pour s'adapter aux différents types de sols sous-marins rencontrés. Le matériau de remblai provenait en partie du dragage du chenal d'accès au futur port de service. La zone réclamée a ensuite été protégée sur l'ensemble de son périmètre par des talus en enrochements ainsi que par des blocs en béton type Core Loc[®] sur les zones les plus exposées à la houle. Le remblai en sable de dragage a été compacté par vibroflottation pour la partie inférieure puis mécaniquement par couches successives pour la partie supérieure. Il permettra de recevoir dans le futur des bâtiments et installations liés à d'autres projets.



4

© EGCM

LE PORT DE SERVICE

Ce port de service est, lui aussi, gagné sur la mer (figure 3).

Il est constitué de 800 m de quai en palplanches couronnées d'une poutre en béton. Des pontons flottants reliés par des passerelles permettront d'accueillir les remorqueurs nécessaires aux futures opérations. Ce port de service est protégé par 2 digues en enrochements recouvertes de Core Loc[®].

Avant de commencer les quais en palplanches, la zone a été remblayée par du sable de dragage, y compris en avant des futurs quais. Cela a permis

4- Tour de contrôle du port.

5- Vue générale de la jetée et du quai de chargement de soufre en cours de construction.

4- Port control tower.

5- General view of the jetty and sulphur loading pier under construction.

de réaliser les rideaux de palplanches complètement par voie terrestre dans de meilleures conditions de sécurité et d'une manière plus efficace. Le quai est constitué d'un double rideau de palplanches relié par des tirants. Ensuite, à l'avant du quai, le sable a été dragué et utilisé en partie en tant que remblai à l'arrière de la poutre de couronnement. Le client est très sensible aux sujets de la corrosion. Un certain nombre de mesures ont été mises en place pour garantir la durée de vie de l'ouvrage de 30 ans, telles que palplanches avec surépaisseur, peinture sur les



5

© EGCM



6

© EGCM

deux faces et anodes sacrificielles. Ce port inclut également la conception et la réalisation des bâtiments nécessaires aux futures opérations marines. L'ouvrage principal est le Harbour Master Control Tower, tour de contrôle et d'administration du port de service, d'une surface de 9 000 m² (figure 4). Les autres bâtiments, liés aux opérations et à la maintenance, représentent environ 12 000 m².

Une mosquée et une clinique seront également construites sur le site. Tous ces bâtiments sont réalisés par des entreprises locales.

LA JETÉE D'EXPORT DE SOUFRE

La jetée est destinée à l'exportation de soufre en granulés. D'une longueur de 1,8 km (figure 5), elle s'élargit sur les derniers 100 m pour accueillir un bâtiment technique. Elle se termine par un quai de 260 m de long destiné à recevoir les navires.

Cette jetée supporte un convoyeur d'une longueur totale de 3,6 km reliant la zone de stockage du soufre à terre jusqu'au poste de chargement. Ce convoyeur, se termine au niveau du quai par un bras de chargement, avec une capacité de 1 500 t/h.

La jetée est une structure sur pieux métalliques de diamètre 1 473 mm constituée de 75 travées d'une longueur de 24 m chacune. Ces pieux sont reliés entre eux par des poutres et des structures métalliques puis recouverts de dalles en béton préfabriquées.

L'outil principal utilisé pour construire cette jetée est le Cantitravel, qui a précédemment été conçu et mis en œuvre sur plusieurs projets au Pérou, en Colombie, en Algérie, ... (figure 6).

6- Cantitravel.
7- Approvisionnement sur la jetée.

6- Cantitravel.
7- Material delivery on the jetty.

Le principe de cet équipement est de travailler depuis une plate-forme directement supportée par la structure de la jetée et d'installer la travée suivante. L'avantage est de pouvoir travailler au-dessus de la mer sans aucun équipement maritime et donc d'être indépendant des conditions de mer. La grue de 600 t à bord du Cantitravel permet d'installer des pieux d'une longueur de 55 m et d'un poids de 50 t sur la

travée suivante. Pendant qu'une partie de l'équipe installe les superstructures métalliques coiffant les pieux, une autre partie de l'équipe installe les dalles préfabriquées à l'arrière avec la grue. Une fois ces activités terminées, le Cantitravel peut avancer de 24 m sur la travée suivante grâce à un système de rails et vérins hydrauliques. Le travail du Cantitravel est cyclique et des activités similaires se répètent à chaque travée. La logistique d'approvisionnement en pieux, structures, dalles, avec la bonne séquence et le bon planning pour éviter tout retard et également un encombrement de la jetée sont primordiaux (figure 7).

La partie finale de la jetée s'élargit pour accueillir un bâtiment industriel de 3 étages comprenant une sous-station électrique et une salle de contrôle. De manière à optimiser le planning, ce

bâtiment a été préfabriqué en parallèle de la construction de la jetée. Tous les équipements électriques y ont été installés et testés directement sur le yard de fabrication. Avec une ossature métallique et un poids total de 1 200 t, ce bâtiment sera installé en un seul levage en utilisant une grue spécialisée de capacité 2 000 t.

À l'extrémité de la jetée, le quai de 240 m de long et de 27 m de large, accueille la partie finale du convoyeur, le bras de chargement du soufre en granulés, les défenses d'accostage et les bollards.

La méthodologie utilisée pour la construction du quai est différente. Les pieux sont battus depuis la mer à l'aide d'un *jack-up* (plate-forme élévatrice sur pieux) pour permettre de démarrer cette activité en parallèle de la construction de la jetée. Les pieux sont ensuite coiffés de chapiteaux, poutres et pré-dalles préfabriquées en béton. Une dalle finale coulée en place permet de liasonner tous ces différents éléments.

Au fur et à mesure de l'avancement de la jetée et du quai, un convoyeur est mis en place, ainsi que tous les systèmes associés tels que câbles électriques, câbles de contrôle, système incendie.

LES INSTALLATIONS D'EXPORT D'HYDROCARBURES LIQUIDES

Ces installations consistent en une île artificielle située à 17 km au large des côtes. Cette île permettra d'accueillir et de charger simultanément 4 navires. La localisation de cette île artificielle a été choisie pour avoir une profondeur d'eau suffisante sans nécessiter de dragage.



7

© EGCM



8

© EGCM

D'une longueur totale de 1,1 km, cette île est composée des éléments suivants :

- Une plateforme centrale de 170 m par 110 m qui accueille les équipements nécessaires aux opérations d'export ;
- 2 plateformes de chargement, chacune capable d'accueillir 2 navires de 300 m ;
- Les structures d'accostage ;
- Les structures d'amarrage ;
- Un héliport.

L'ouvrage est fondé sur 1 600 pieux battus. Ces pieux supportent les plateformes béton qui accueillent toutes les superstructures nécessaires pour les opérations futures (figure 8).

Les pieux ont tous été battus depuis une plateforme élévatrice (*jack-up*) équipée d'un système de guide hydraulique pour garantir le positionnement des pieux. Les pieux, d'une longueur de 45 à 55 m, ont été fabriqués à longueur et peints en Corée du Sud, puis livrés directement par lots au Koweït.

Un supportage temporaire est ensuite installé sur les pieux pour poser les éléments en béton préfabriqués telles que poutres et dalles. Ces pièces, préfabriquées sur le site à terre, sont liaisonnées entre elles grâce à un bétonnage en place puis une dalle de compression est coulée. De manière à réaliser ces bétonnages à 17 km en mer, 2 centrales à béton ont été mobilisées et installées sur des pontons flottants. Équipées d'un bras hydraulique, ces centrales à béton permettent la fabrication et la livraison du béton de manière continue directement sur l'île artificielle (figure 9).

Les 2 centrales à béton sur ponton retournent alternativement au port de service pour se recharger en agrégats, ciment et eau.

L'ensemble des infrastructures est construit avec une méthodologie similaire. La totalité de cette infrastructure représente 34 000 t de pieux et 55 000 m³ de béton armé (figure 10). L'installation des équipements sur ces plateformes en béton a démarré. De manière à optimiser le planning et les ressources, les équipements sont préfabriqués dans différents *yards* (usines) chez des sous-traitants ou des fournisseurs répartis à travers le monde.

Les équipements principaux sont : Les modules (*piperacks*) qui distribuent le réseau de tuyauteries, de câblage électrique et d'instrumentation depuis la plateforme centrale jusqu'aux plateformes de chargement des navires,

8- Vue générale de l'île artificielle.

9- Centrale à béton sur barge.

8- General view of the man-made island.

9- Concrete mixing plant on barge.

sont préfabriqués en Oman (figure 11). Sur le *yard* de fabrication, les tuyauteries sont soudées, préinstallées dans les modules et testées, de manière à minimiser ensuite le travail en mer au Koweït. Au total, 56 modules seront fabriqués avec des poids allant jusqu'à 150 t par module. Ils sont transportés par barge depuis Oman jusqu'au

Koweït avant d'être installés sur l'île. Pour cette installation, une grue de 600 t sur une barge de 90 m x 30 m a été mobilisée.

L'OSF building (Operation Support Facilities), qui est construit aux Émirats Arabes Unis, est un bâtiment préfabriqué de 6 étages accueillant la salle de contrôle, les locaux techniques, le quartier vie, etc. Les équipements y sont préinstallés sur le *yard* ainsi que toute la partie architecturale. Le bâtiment sera chargé en septembre 2018 sur une barge, transporté jusqu'au Koweït avant d'être levé en un seul colis sur l'île. Ce levage de 1 200 t sera effectué par une grue spécialisée d'une capacité de 2 000 t mobilisée spécifiquement sur le projet.

Une sous-station électrique est fabriquée au Koweït. De manière similaire à l'OSF building, la préfabrication a été privilégiée et ce module de 700 t sera



9

© EGCM



© EGCIM

10

amené par barge avant d'être installé par la même grue de capacité 2000 t. Toutes ces superstructures sont ensuite reliées et connectées ensemble au cours de l'opération de *hook-up* (interconnexion). Pour ce faire, des tuyautiers, soudeurs, échafaudiers, peintres, électriciens et instrumentistes seront mobilisés pendant plusieurs mois.

Cette île artificielle est reliée à la terre par 5 pipelines sous-marins qui permettent de l'alimenter en produits raffinés depuis la raffinerie à terre.

Ces pipelines, d'un diamètre de 750 mm et recouverts d'un béton de

10- Vue d'une plateforme de chargement et des structures d'amarrage.

11- Chargement des piperacks sur barge.

12- Installation d'un pipeline.

10- View of a loading platform and mooring structures.

11- Pipe rack loading on a barge.

12- Pipeline laying.

lestage de 50 mm d'épaisseur, ont été posés au fond d'une tranchée draguée dans le sol sous-marin puis ensuite recouverts de matériaux (figure 12). Sur les pipelines ont été accolés des câbles de fibre optique qui permettront la communication entre les bâtiments de contrôle à terre et le centre d'opération en mer pour le chargement des navires.

LIGNE DE REJET D'EAUX RÉSIDUAIRES

Cet ouvrage, situé à l'extrémité sud du site, est constitué principalement d'une conduite en PEHD (Polyéthylène Haute

Densité) de diamètre 600 mm et d'une longueur de 600 m lestée sur le fond marin, depuis de la plage jusqu'à un diffuseur situé dans 5 m d'eau. Cette conduite, reliée au site de la raffinerie, est destinée à évacuer les eaux résiduelles après traitement.

Préalablement, à l'installation de la conduite, une tranchée a été draguée en mer. La conduite de 600 m préfabriquée à terre, puis fermée à ses 2 extrémités, a été tirée en mer à l'aide de remorqueurs, puis immergée en la remplissant progressivement en eau (figure 13).



© EGCIM

11



12



13

© EGCM

LES SPÉCIFICITÉS DU PROJET

La communication est un point essentiel de ce projet. Plus de 20 nationalités coexistent avec des cultures et des approches différentes et souvent une faible maîtrise de l'anglais.

Le management de projet est réparti principalement entre des Coréens et des Français. Il aura fallu plusieurs mois de collaboration en début de projet pour mieux se connaître et se comprendre. L'ensemble de la conception du projet est réalisé sur un modèle 3D. Les études sont réparties entre 4 centres principaux : en France, en Corée du Sud, en Inde et au Pérou.

Le planning et la séquence de livraison de tous les modules provenant de différents fournisseurs sont primordiaux. Il existe un grand nombre d'interfaces entre tous ces modules reliés les uns aux autres, et un retard sur l'un d'entre eux aurait des conséquences immédiates sur d'autres équipements.

Les fournisseurs et les yards de fabrication sont répartis partout dans le monde. Par exemple les pieux provien-

ent de Corée du Sud, les *piperacks* d'Oman, le convoyeur d'Espagne, les bras de chargement d'Allemagne, ... Les fortes températures durant plusieurs mois en été sont un des points critiques du projet. En effet, le thermomètre atteint régulièrement 50°C. La santé et l'hydratation des collaborateurs dans de telles conditions sont particulièrement importantes. D'ailleurs, les lois locales interdisent le travail en extérieur entre 11h et 16h pendant 3 mois, de juin à septembre.

Les postes de travail doivent donc être adaptés et les principales activités se déroulent la nuit pendant la période d'été. De la même manière, ces fortes températures imposent l'utilisation de centrales à glace lors de la préparation du béton.

Le transport de la main d'œuvre depuis la terre jusqu'à l'île artificielle nécessite 4 navires de liaison. La majorité des activités au Koweït est exécutée directement par les équipes de la *Joint Venture*. Des sous-traitants ont été mobilisés pour les activités plus spécialisées comme le dragage, le bat-

13- Remorquage en flottaison de la ligne de rejet.

13- Towing the floating outfall line.

tage des pieux de l'île artificielle ainsi que des sous-traitants locaux pour la construction des bâtiments.

Des programmes de formation, prévention et contrôle dans le domaine de la

qualité et plus particulièrement de la sécurité ont été mis en place.

CONCLUSION

Ce projet hors norme en est à 75% d'avancement à fin juillet. La construction des infrastructures se terminera début 2019. L'installation des modules constituant les équipements de distribution des produits raffinés a démarré et va s'étaler sur une année environ. Le *hook-up* (interconnexions) débutera dans quelques semaines et se prolongera en 2019. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

DRAGAGES : 2 500 000 m³

REMBLAIS : 4 550 000 m³

PIEUX : 55 000 t

STRUCTURES MÉTALLIQUES : 10 000 t

BÉTON : 150 000 m³

PIPELINES : 85 km

EMPRISE AU SOL DES ÉQUIPEMENTS ET BÂTIMENTS : 50 000 m²

ABSTRACT

AL-ZOUR REFINERY IN KUWAIT, A PROJECT OF GLOBAL SCALE IN KUWAIT

FRANÇOIS GLAISNER, EGCM - DAVID FRONTINI, EGCM

Eiffage Génie Civil Marine (EGCM) is taking part in the construction, in Kuwait, of the largest refining production unit in a single development scheme. Given the size of the project (costing 13 billion dollars), it has been divided up into five sub-projects, and EGCM, with its Korean partners, is in charge of the marine facilities. This sub-project includes a jetty 2 km long for loading vessels with sulphur, a man-made island located 17 km from the coast capable of berthing four oil tankers, a service port and an extensive backfilled area in the sea. The island is connected to the refinery by a network of undersea pipelines. The project was 75% completed at end-July 2018. □

REFINERÍA DE AL-ZOUR EN KUWAIT, PROYECTO DE DIMENSIÓN MUNDIAL EN KUWAIT

FRANÇOIS GLAISNER, EGCM - DAVID FRONTINI, EGCM

Eiffage Génie Civil Marine (EGCM) participa en la construcción en Kuwait de la más importante unidad de producción de refinado en un único desarrollo. Habida cuenta de su tamaño (13.000 millones de dólares), el proyecto se ha dividido en cinco sub-proyectos y EGCM se encarga, con sus socios coreanos, de las instalaciones marítimas. Este sub-proyecto incluye un muelle de 2 km para cargar los buques de azufre, una isla artificial situada a 17 km de la costa que puede recibir cuatro petroleros, un puerto de mantenimiento y una amplia zona de diques sobre el mar. La isla está unida a la refinería por una red de oleoductos submarinos. A finales de julio, el proyecto se encontraba al 75% de su realización. □



BTP BANQUE

GRUPE CREDIT COOPERATIF

C'est le métier
qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

www.btp-banque.fr

© 2014 BTP Banque. Tous droits réservés. Toute réimpression ou utilisation non autorisée sans la permission écrite de la BTP Banque est formellement interdite. Toute réimpression ou utilisation non autorisée sans la permission écrite de la BTP Banque est formellement interdite. Toute réimpression ou utilisation non autorisée sans la permission écrite de la BTP Banque est formellement interdite.



PRÉSERVONS L'AVENIR



Réalisation d'un talus raidi avec parement gabions en protection contre les chutes de blocs.

Dans un contexte sensible, marqué par des phénomènes d'éboulements fréquents, 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

Nouvelle Route du Littoral (NRL)
île de la Réunion
Gabions double torsion - 60 000 m²

www.maccaferri.com/fr