

# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**INTERNATIONAL.** PONT ESSALAM A RABAT. LA ROUTE DES PECHES AU BENIN. NOUVEL EMISSAIRE DE REJET DE LA STATION D'EPURATION D'ANNACIS ISLAND AU CANADA. COMPLETION OF THE PADMA BRIDGE IN BANGLADESH. EXTENSION DU PORT DE PUERTO BOLIVAR EN EQUATEUR. REHABILITATION DU BARRAGE DE KARIBA. HOLISTIC PROOF ENGINEERING ON THE SYDNEY GATEWAY PROJECT. NOUVELLE LIGNE FERROVIAIRE AUX EMIRATS ARABES UNIS. TRESORS DE NOS ARCHIVES : LE METROPOLITAIN DE MOSCOU

N° 986 AVRIL/MAI 2023



PONT DE PADMA,  
LE PLUS LONG  
DU BANGLADESH  
© MBEC



# Tunnels & microtunnels

Sur les **5 continents**,  
nos équipes  
de spécialistes  
construisent les  
**infrastructures**  
de demain



Z.I. de la Pointe  
31790 Saint Jory - France  
+33 5 61 37 63 63  
[www.bessac.com](http://www.bessac.com)

Crédits photos : Photothèque Bessac



**BESSAC**

The logo consists of a circular emblem with a grid of blue and white squares, some containing smaller circles, positioned above the word "BESSAC" in a bold, red, sans-serif font.

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@fnfp.fr

Comité de rédaction

Jean-Bernard Datry (Setec),  
Denis Etienne (Bouygues),  
Philippe Gotteland (Fnfp),  
Ziad Hajar (Systra),  
Florent Imbert (Razel-Bec),  
Nicolas Law de Lauriston (Vinci),  
Romain Léonard (Demathieu Bard),  
Claude Le Quéré (Egis),  
François Louvel (Spie Batignolles),  
Véronique Mauvisseau (Ingerop),  
Stéphane Monleau (Soletanche Bachy),  
Laetitia Pavel (Arcadis),  
Claude Servant (Eiffage),  
Nastaran Vivan (Artelia),  
Michel Morgenthaler (Fnfp)

Ont collaboré à ce numéro

Rédaction  
Sophie Le Renard (actualités),  
Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente  
TBS GROUP

Service Abonnement Revue Travaux  
235, avenue le Jour se Lève  
92100 BOULOGNE BILLANCOURT  
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  
10, rue du Progrès - 93100 Montreuil  
Tél. : 01 41 63 10 30  
www.rive-media.fr

Directeur de clientèle  
Bertrand Cosson -  
b.cosson@rive-media.fr  
L.D. : 01 41 63 10 31

Site internet : [www.revue-travaux.com](http://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  
ISSN 0041-1906

# L'INGÉNIERIE FRANÇAISE, UNE FRENCH TOUCH RECONNUE AUX QUATRE COINS DU GLOBE !



© DR

Alors que la France représente 3% du PIB mondial, l'ingénierie française constitue 6% du marché mondial en termes de chiffres d'affaires et 10% en ce qui concerne les effectifs. Au total, ce sont plus de 300 000 professionnels qui travaillent pour des entreprises françaises, en France comme à l'étranger. C'est dire si la profession s'exporte bien ! Parmi les services de prestations intellectuelles, c'est d'ailleurs l'ingénierie qui tire le mieux son épingle du jeu à l'étranger.

Comment expliquer un tel succès ? La première raison a sans doute à voir avec l'aura dont continuent de jouir les ingénieurs et ingénieures français aux quatre coins du globe. Ils ont, en effet, la réputation d'avoir la meilleure formation au monde et d'offrir un profil généraliste, et donc d'être à même de travailler sur tout type de projet. De la même manière, les entreprises d'ingénierie se distinguent de la concurrence par leur capacité à adresser une grande diversité de secteurs d'activité : énergie, infrastructures, industrie, bâtiment, transports, eau & déchets, ville durables... nos entreprises affichent un savoir-faire pluridisciplinaire.

Mais si la profession s'exporte en particulier en Europe et au Moyen-Orient, c'est avant tout pour son expertise technologique. Avec 6,2% de leur chiffre d'affaires consacré à la R&D, nos entreprises proposent des prestations à très haute valeur ajoutée. Au Royaume-Uni, nos professionnels sont mobilisés sur le projet d'EPR Hinkley Point C, en Norvège, ils travaillent à transformer Nyhavna, ancien port

commercial, en un quartier animé comprenant des logements, des bâtiments commerciaux, des espaces urbains et des espaces verts. Autre exemple : en Italie, nos ingénieurs sont sollicités pour le management de projet, la conception et les études environnementales d'une nouvelle Gigafactory de haute technologie pour batteries au lithium 4.0 innovantes.

Dans un contexte où la France a été pionnière en matière de législation environnementale, nos entreprises bénéficient également d'une longueur d'avance sur tous les sujets environnementaux et de biodiversité. Étude de la faune et de la flore locales, préservation des espèces menacées, mesures compensatoires... L'expertise française s'exporte hors de nos frontières. Un avantage compétitif décisif, à l'heure des bouleversements climatiques et énergétiques.

Enfin, l'ingénierie française reste une référence dans les zones en voie de développement pour tout ce qui a trait aux projets d'infrastructures vitales, tels que les réseaux de transport et d'eau potable, la gestion des déchets ou encore le traitement des eaux usées. Métro de Manille aux Philippines, exploitation de 17 péages au Cameroun, barrage Sambangalou au Sénégal... Dépositaires d'un savoir-faire historique, nos entreprises ont beaucoup à apporter.

On l'aura compris, l'ouverture à l'international est un enjeu majeur pour les entreprises d'ingénierie. Dans ce contexte, Syntec-Ingénierie, la fédération professionnelle de l'ingénierie soutient et accompagne ses 400 entreprises adhérentes dans leur développement à l'export. À travers un partenariat avec ALTIOS, le leader du conseil en implantation et développement international des PME & ETI, Syntec-Ingénierie propose ainsi un appui sur mesure : flashes infos, guides pays, ateliers de travail, etc. Les Rencontres Internationales de l'Ingénierie, organisées par Syntec-Ingénierie pour la 3<sup>e</sup> fois en 2022 ont ainsi réuni plus de 200 participants et seront de retour en décembre 2023. Une preuve supplémentaire, s'il en fallait, de la belle dynamique au sein de la profession !

Les entreprises d'ingénierie ont beaucoup à apporter à l'international. Elles le prouvent tous les jours à travers les grands projets qu'elles conçoivent, conduisent et entretiennent. Nous leur souhaitons longue vie !

**ANTOINE PIGOT**

PRÉSIDENT DE LA COMMISSION INTERNATIONALE  
DE SYNTEC-INGÉNIERIE



# INTERNATIONAL

PONT DE HONG KONG ZHUJIAH MACAO : 5714 VOUSOIRS PRÉFABRIQUÉS, POSÉS AU RYTHME DE 18 PAR JOUR © DR



04 ALBUM

08 ACTUALITÉ



18

**ENTRETIEN AVEC VINCENT AVRILLON**  
BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS À L'INTERNATIONAL - RÉPONDRE AUX DÉFIS ÉCONOMIQUES, CLIMATIQUES, SOCIÉTAUX ET NUMÉRIQUES

26 GEOS - L'INGÉNIERIE DU RISQUE PARTOUT DANS LE MONDE... OU PRESQUE



32

**LE PONT ESSALAM**  
à Rabat



40

**LA ROUTE DES PÊCHES ENJAMBE LA LAGUNE**  
au Bénin



46

**NOUVEL ÉMISSAIRE DE REJET DE LA STATION D'ÉPURATION D'ANNACIS ISLAND**  
à Vancouver, Canada



55

**COMPLETION OF THE PADMA BRIDGE**  
the longest in Bangladesh



62

**EXTENSION (PHASE 1) DU PORT DE PUERTO BOLIVAR**  
en Équateur



68

**RÉHABILITATION DU BASSIN DE DISSIPATION DU BARRAGE DE KARIBA**  
à la frontière entre la Zambie et le Zimbabwe



76

**HOLISTIC PROOF ENGINEERING ON THE SYDNEY GATEWAY PROJECT**



82

**CONSTRUCTION D'UNE NOUVELLE LIGNE FERROVIAIRE**  
aux Émirats Arabes Unis



87

**TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : LE MÉTROPOLITAIN DE MOSCOU**  
Travaux n°41 - mai 1936

## LA ROUTE DES PÊCHES AU BÉNIN DÉSENCLAVE LA LAGUNE

**Sogea Satom Bénin (groupe Vinci)** est à son affaire sur ce chantier difficile de route littorale de 42 km, comportant 5 ponts mixtes, sur la grande lagune à l'ouest de la capitale Cotonou. Les sols très médiocres et compressibles nécessitent des pré-chargements et des pieux jusqu'à 55 m, exposés à l'affouillement. Une protection cathodique galvanique est installée pour se protéger de la haute agressivité du milieu marin. Les accès sont difficiles. Le dimensionnement est optimisé avec des tabliers en dalles minces fortement ferrillées préfabriquées. (Voir article page 40).



© STEPHANE BRABANT / AFRICAFLUN

## À PUERTO BOLIVAR EN ÉQUATEUR, GRANDS TRAVAUX D'EXTENSION PORTUAIRE SANS DÉRANGER LES BALEINES

**Soletanche Bachy Colombia, Soletanche Bachy International et Cipte** en joint venture construisent, pour l'opérateur portuaire Yilport, l'extension du port de Puerto Bolivar en Équateur, comprenant un quai de 450 m et une plateforme logistique de 12 hectares. Cet aménagement accueillera les plus grands porte-containers. La zone est exposée à une sismicité de niveau élevé. 820 pieux métalliques profonds sont mis en place et d'importants traitements de sol sont réalisés. Il faut aussi veiller à ne pas déranger les baleines en migration. (Voir article page 62).



© SOLETANCHE BACHY

© SOLETANCHE BACHY

## UN PLAN D'AVENIR POUR RÉSEAU FERRÉ

Élisabeth Borne a annoncé le 24 février 2023 un vaste plan de 100 Mds€ à l'horizon 2040, pour le ferroviaire. Moderniser et mettre fin au vieillissement du réseau ferré, créer de nouvelles lignes, développer des "RER métropolitains" constituent les axes de ce programme en faveur du train.



« soit davantage de trains, une meilleure ponctualité et des temps de parcours moins longs. C'est à ces conditions, et à ces conditions seulement, que le train sera pleinement une alternative attractive et crédible à la voiture, » a souligné Élisabeth Borne.

### → Annonces ambitieuses

Une des premières concrétisations sera le lancement de "RER métropolitains" dans les métropoles régionales. La programmation de ces infrastructures dans les collectivités territoriales concernées, se fera dans le cadre des volets mobilité des contrats de plan État-région (CPER). Les préfets de région ont reçu leurs mandats de négociation en mars, pour une planification précise au mois de juin 2023. « Je souhaite que ces nouveaux contrats permettent de mesurer davantage les effets de notre action, notamment en matière de décarbonation et de report modal, et qu'ils permettent de relier le financement des infrastructures aux usages qui en seront faits. Nous veillerons à ce que l'ensemble des outils de la loi d'orientation des mobilités soient mis en œuvre, en particulier la cartographie des bassins de mobilité et les contrats opérationnels de mobilité, » a-t-elle précisé. Syntec-Ingénierie a salué les annonces ambitieuses de la locataire de Matignon et la priorité donnée au scénario de planification écologique. Mais la fédération professionnelle de l'ingénierie a appelé « à accélérer le calendrier des grands projets déjà engagés et ceux répondant aux mobilités du quotidien : LGV, pôles d'échanges multimodaux, redistribution des espaces de la voirie... Tous ces projets sont essentiels à la décarbonation des transports et jouent un rôle central dans les déplacements dans nos territoires. » Elle a aussi alerté sur l'importance d'une clarification de la gouvernance des projets. ■

Le scénario dit de "planification écologique" élaboré par le Conseil d'orientation des infrastructures (COI) mettait la priorité sur les réseaux existants et stipulait des investissements, chiffrés à 80 Mds€ sur la période 2023-2027. L'objectif de ce rapport est de moderniser le réseau ferré, de développer les "RER métropolitains", d'engager la transition des routes existantes et d'investir sur

les voies d'eau. Le COI l'a rendu à la Première ministre, le 24 février dernier. Élisabeth Borne a alors, fait des annonces importantes pour le ferroviaire, soit un plan de 100 Mds€ à l'horizon 2040. Cette somme sera apportée par l'Etat mais aussi par les collectivités, les opérateurs et les investisseurs. « Ces moyens exceptionnels seront dédiés à deux objectifs : mettre un terme

au vieillissement du réseau ferré existant et le moderniser (soit 1 MD€ supplémentaire par an pour la régénération du réseau et 500 M€ par an pour sa modernisation) ; poursuivre le développement de nouvelles lignes et développer de nouveaux services avec les RER métropolitains, » a détaillé la Première ministre. Ces dispositions devront avoir des effets concrets pour les usagers des transports,

## LA SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS AU CŒUR DU DÉVELOPPEMENT DES RER MÉTROPOLITAINS

Après des annonces présidentielles peu précises, en novembre 2022, sur le développement des RER métropolitains, Élisabeth Borne a donné quelques précisions sur le développement de ces nouvelles infrastructures. La Société du Grand Paris (SGP) est appelée à être un acteur important en tandem avec SNCF Réseau pour conce-

voir ces nouvelles liaisons. Forte de son expérience du Grand Paris Express en cours de développement, soit 200 km de métro, 4 nouvelles lignes, 68 gares, la SGP interviendra dans une douzaine de grandes agglomérations hors Île-de-France, telles que Strasbourg, Bordeaux, Grenoble ou Lyon. Ces collectivités avaient déjà engagé des réflexions sur de

nouvelles liaisons péri-urbaines dans leur territoire. « La SGP va mettre ses compétences au service des régions et entamer dès le mois de mars des discussions avec les exécutifs locaux concernés pour déterminer le calendrier, les modalités opérationnelles et de financement pour les nouveaux projets de RER

métropolitains, » a indiqué la Première ministre. Des dispositions législatives seront nécessaires pour élargir les missions de la SGP. Pour contribuer à financer ces investissements, le gouvernement envisage de mettre à contribution l'aérien et les sociétés d'autoroute. ■



En 2023,  
votre assureur unit  
toutes ses forces sous  
une nouvelle identité



Retrouvez tous nos produits  
d'assurance sur [smabtp.fr](https://smabtp.fr)



**VOTRE ASSUREUR  
PARTENAIRE**

## UN PARTENARIAT POUR LE RECRUTEMENT DE 50 CDI

Face à la pénurie de candidats dans le secteur du BTP, NGE et Pôle emploi de la région Provence Alpes Côte d'Azur (Paca) se sont associés à un acteur de l'insertion professionnelle Les Entreprises éphémères. Ce partenariat a abouti à ce que NGE embauche 50 personnes en CDI, initialement éloignées de l'emploi et qui a priori ne connaissaient pas le BTP. Les seuls critères pour être embauché étaient la motivation, le savoir-être et faire des candidats. Cette démarche, qui a duré autour de 3 mois, s'est déroulée en 3 phases : détection de 50 profils par les équipes des Entreprises éphémères et les agences Pôle emploi, 3 semaines d'immersion avec les équipes et coaches de l'entreprise d'insertion, et un mois de formation financée par Pôle emploi et dispensée au sein de l'école interne de NGE.

## PRIX DU TRANSPORT DURABLE 2023

La Ville de Paris a reçu le Prix du transport durable 2023 (Sustainable Transport Award -STA-) pour ses innovations dans la promotion de la mobilité inclusive et active, dans le développement d'infrastructures cyclables et dans la reconquête de son espace précédemment dédié à la voiture individuelle. Ce prix est remis tous les ans par l'Institut pour les politiques de transport et de développement, organisme international qui conçoit et met en œuvre des systèmes de transport dans de nombreuses villes du monde. La capitale avait déjà reçu ce prix en 2008.

## ERIK ORSENNA SE PENCHE SUR L'AVENIR DE L'EAU

Pour la journée mondiale de l'eau, le 22 mars 2023, les Canalisateurs ont organisé la matinée de l'Eau, sur le thème de la "Sécurisation et préservation de la ressource". En effet, à l'heure où le gaspillage d'1 milliard de m<sup>3</sup> chaque année en France, l'organisation professionnelle souhaitait rappeler que « la ressource en eau est devenue un enjeu écologique vital pour les territoires, tous aujourd'hui confrontés à la récurrence des épisodes intenses de sécheresses et d'inondations et à l'épuisement de la ressource (...). Il est plus que jamais impératif de maintenir la qualité et la pérennité des infrastructures de réseaux. » Lors de cette matinée consacrée à la préservation de l'eau, Pierre Rampa, président des Canalisateurs, a échangé avec Erik Orsenna juste avant l'intervention de ce dernier à New-York aux Nations Unies, au sujet des grands fleuves.

### → Une dette pour les nouvelles générations

L'écrivain avait publié il y a quinze ans L'avenir de l'Eau (Livre de poche). « Quand je l'ai écrit tout le monde pensait que la France ne serait jamais touchée avec son climat tempéré. Il faut apprendre à nos compatriotes que l'eau n'est pas un cadeau du ciel, que pour disposer au robinet d'une eau de qualité 24h sur 24h, il faut travailler en amont. Si Dieu



Pour la journée mondiale de l'eau, la campagne portée par l'ONU, a pour message "Soyez le changement", un appel pour modifier les manières de consommer et de gérer l'eau.

nous a donné de l'eau, il ne nous a pas donné les filtres, les canalisations, » a-t-il déclaré, tout en insistant sur la responsabilité des autorités, « de ne pas préparer l'avenir, ne pas investir dans les infrastructures, ce qui est une dette pour les nouvelles générations. » Faisant référence à Israël et à Singapour, deux pays qui souffrent de pénuries d'eau et qui recyclent massivement leurs eaux usées, il estime « que l'on peut aller plus loin en France sans remettre en cause la santé de nos contemporains. On est trop jacobin, on veut tout généraliser alors que

notre trésor c'est la diversité, ce sont les écosystèmes. » L'eau représente donc un défi pour la démocratie.

Lors de cette matinée, les Canalisateurs ont présenté le Livret bleu, des propositions pour faire face à la crise de l'eau et offrir un approvisionnement de qualité. Cet ouvrage se décline en 4 chapitres : le renforcement de la connaissance du patrimoine pour des investissements efficaces, l'amélioration de la performance des réseaux, la question de la réutilisation des eaux usées et enfin la préservation des sols et de la biodiversité. ■

## UNE DÉMARCHE "ECOTransPort" POUR LES VÉHICULES DES TP

Pour arriver à la neutralité carbone en 2050, et réduire de façon substantielle les émissions de gaz à effet de serre dès 2030, le secteur des Travaux publics (TP) doit agir sur les transports. En effet, les carburants fossiles dans les véhicules de chantiers des TP représentent 10% de émissions de CO<sub>2</sub>. Aussi la FNTP s'est associée à l'Ademe, l'agence de la transition écologique et à l'Association des utilisateurs de transport de fret (AUTF), association professionnelle des chargeurs, pour proposer aux entreprises adhérentes une démarche gratuite intitulée "ECOTransPort".

### → Diagnostic et plan d'action

Il s'agit d'un accompagnement pour une utilisation différente et moins impactante pour l'environnement, des poids lourds, véhicules utilitaires légers et voitures. Son objectif est à la fois économique en réduisant les consommations, et écologique par une baisse des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le taux de chargement, les distances parcourues, les achats responsables et le choix avec d'autres moyens de transport, sont les leviers sur lesquels les entreprises peuvent agir. Ces dernières doivent alors établir un diagnostic à partir d'outils

opérationnels et d'un catalogue de solutions approuvées par l'Ademe. Elles peuvent aussi, sur cette phase, être accompagnées par un expert en transport spécialisé dans les Travaux publics. Un plan d'actions sur trois ans est ensuite établi, qui aboutira à l'obtention d'une reconnaissance officielle de la part de l'Ademe.

L'engagement des entreprises à cette démarche peut être valorisé lors des appels d'offre, sur les supports de communication et même sur les véhicules avec le logo "ECOTransPort" collé sur les pare-brises. ■

## UN PLAN POUR ACCÉLÉRER LA GÉOTHERMIE

Crise énergétique et écologique oblige, le potentiel géothermique jusque-là sous-exploité, est aujourd'hui mis en avant dans le cadre d'un plan gouvernemental, annoncé le 2 février dernier. L'objectif est de multiplier par 5 la quantité de chaleur et de froid issue d'énergies renouvelables et de récupération, livrée par les réseaux, à l'échéance de 2030. La géothermie sous toutes ses formes, produit de la chaleur et du froid décarbonés mais en 2021, elle ne représentait que 1% de la consommation finale de chaleur soit environ 7 TWh. Aujourd'hui, les sources d'énergie alimentant les réseaux de chaleur sont encore à 60% d'origine fossiles. Ce plan comporte une quinzaine d'ac-

tions pour structurer la filière et renforcer sa capacité de production et de forage, accompagner les porteurs de projet mais aussi les usagers, développer l'offre de formation, sensibiliser les acteurs locaux, simplifier la réglementation et améliorer la connaissance du sous-sol.

### → 30 nouveaux projets de géothermie profonde

Une aide à hauteur de 5 000 €, contre 2 500 auparavant, est mobilisée pour tous les ménages qui convertiraient leur système de chauffage à la pompe à chaleur. Les plus modestes pourront obtenir jusqu'à 90% du coût de leur installation. Les communes et intercommunalités doivent aussi multiplier les projets sur

leurs bâtiments publics bénéficiant ainsi du "fond chaleur" de l'Ademe. Les réseaux de chaleur valorisés par la géothermie sont appelés à se développer. D'ici 2030, une trentaine de nouveaux projets de géothermie profonde doivent voir le jour. L'Association française des professionnels de la géothermie (APFG) et le Syndicat des énergies renouvelables (SER) se sont réjouis de ce plan d'action. Mais ces acteurs considèrent néanmoins que « toute une filière mobilisée pour un changement d'échelle, devra se traduire dans la prochaine loi de programmation énergétique en fixant des objectifs ambitieux de déploiement de cette source d'énergie renouvelable. » ■

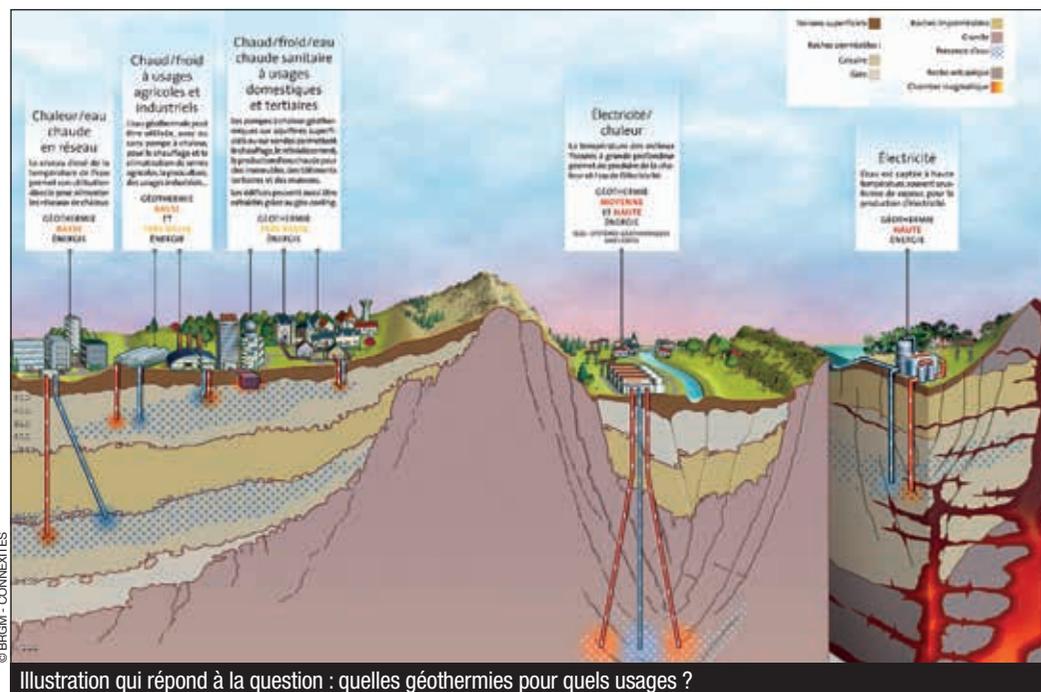
## SYMPOSIUM INTERNATIONAL COULOMB

Afin de rendre hommage aux contributions de Charles-Augustin Coulomb (1736-1806), le Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS) organise un symposium international. Il s'agit de mettre en lumière les divers apports de la théorie de Coulomb à la géotechnique et de célébrer le 250<sup>e</sup> anniversaire de la parution de son mémoire intitulé "Essai sur une application des règles de maximis et de minimis à quelques problèmes de Statique relatifs à l'Architecture". Cet évènement, en anglais, aura lieu les 25 et 26 septembre 2023 et donnera l'opportunité à des experts français et européens de témoigner de l'importance de l'héritage des travaux de Coulomb dans la géotechnique d'aujourd'hui, y compris dans ses développements les plus récents.

Lors du symposium, la conférence honorifique annuelle "Conférence Coulomb" sera présentée par le professeur Robertson. Placé sous le haut patronage de l'Académie des sciences, de l'Académie des technologies, de la Société internationale de mécanique des sols et de géotechnique (ISSMGE), cette conférence a reçu le soutien de la Fédération nationale des Travaux Publics (FNTF). Elle se déroulera au siège de la FNTF, 3 rue de Berri, 75008 Paris. Les actes du symposium feront l'objet d'un numéro spécial de la Revue française de la Géotechnique.

### Inscriptions :

<https://www.ecolloque.com/coulomb2023/fr/new/>



## +4,7% D'APPRENTIS DANS LE BTP

102 900\* jeunes en apprentissage préparent, en 2023, un métier du bâtiment ou des travaux publics. Ce chiffre établi par le Comité de concertation et de coordination de l'apprentissage du bâtiment et des travaux publics (CCCA-BTP) marque une hausse par rapport à la période 2021-2022, soit +4,7% tous champs professionnels confondus et dans toutes les régions. Cette augmentation est encore plus significative en se référant à 2016-2017 soit 50% d'apprentis supplémentaires. 57% des apprentis sont de niveau 3, composé à

plus de 90% de CAP soit une hausse de +5,7% dans toutes les régions, à l'exception de la région Centre-Val de Loire. Le niveau 4, composé de près de 60% de brevets professionnels et 36% de bacs professionnels, est quasiment stable. Les formations du supérieur ont progressé au point de concerner près d'un apprenti sur cinq, dont près de la moitié prépare un BTS. L'évolution entre 2021-2022 et 2022-2023, varie de -2,7% pour la métallerie à +12% pour les études et l'encadrement.

Le secteur des travaux publics voit la progression du nombre d'apprentis s'essouffler passant de +10,8% à +5,4%, pour la période la plus récente. 48% des jeunes en apprentissage dans le domaine des TP sont en niveau 3 soit une augmentation de +16%, 28% en niveau 4 et 24% en supérieur. ■

(1) L'effectif d'apprentis concerne ici les apprentis se formant à un métier du BTP dans une entreprise du BTP ou dans le secteur public. Les données ne prennent pas en compte les apprentis en formation dans d'autres métiers (exemple : postes administratifs) et pouvant être dans les entreprises du BTP.



Timbre paru en 1961, en hommage à Charles-Augustin Coulomb.

## AGILIS SÉCURISE LES ROUTES DU DÉPARTEMENT DE VENDÉE

Titulaire du marché d'entretien de "fourniture et pose de dispositifs de retenue sur le réseau routier départemental" auprès du Conseil départemental de Vendée, la société Agilis filiale de NGE, est intervenue pour sécuriser les routes de la commune de La Châtaigneraie. Cette opération réalisée jusqu'à la fin de mois de mars 2023, comprenait la dépose et la pose de plus de 2200 mètres de glissières pour répondre aux nouvelles normes de sécurité. De nouveaux équipements, à la fois en bois et en métal (nommés N2W3 et N2W4), ont été mis en place.

### → Un chiffre d'affaires de 120 M€

Ces dispositifs doivent augmenter la sécurité des usagers de la route. En cas de choc, les supports se plieront, se détacheront des lisses, et la glissière formera une poche. Le véhicule sera alors redirigé par la lisse qui jouera le rôle d'entretoise. Ce marché d'entretien d'une durée d'un an est reconductible trois fois, afin de mener cette opération sur toutes les routes du département.

Des grandes infrastructures de transport aux réalisations de proximité, l'entreprise qui intervient dans toute la France, réalise un chiffre d'affaires de 120 M€ par an et emploie 560 salariés. Elle sécurise plus de 1 000 chantiers par an pour des clients publics et privés.



© AGILIS

Chantier, en Vendée, de dépose et pose de 2200 mètres de glissières, le long des routes départementales.

## LACROIX PERMET UNE MEILLEURE EFFICACITÉ DU RÉSEAU DE CHALEUR URBAIN DE CHALON-SUR-SAÔNE



© LACROIX

Les boîtiers intelligents délivrent des informations permettant une optimisation de la distribution d'énergie. Ce sont aussi des outils de cybersécurité.

« Avec le réseau de chaleur urbain de Chalon-sur-Saône, les solutions intelligentes et durables que nous déployons sont plus massives, par rapport à ce qui s'est déjà fait, » explique Cédric Castella, Responsable grands comptes pour l'activité environnement du groupe Lacroix. L'entreprise a été retenue par Engie, pour moderniser et digitaliser les sous-stations, points de livraison de chaleur dans chacun des bâtiments raccordés. Ce réseau, dans la ville la plus peuplée de Saône-et-Loire (45094 hab.), connaît une migration vers une chaufferie "bois énergie", à base de déchets de bois non utilisés provenant d'élagages, et autres résidus forestiers, produits connexes de scieries, broyat de palettes ou cagettes... L'utilisation de ressources renouvelables locales a pour ambition de

diminuer de plus de 15% les consommations de gaz du territoire et d'éviter ainsi l'émission de près de 30 000 tonnes de CO<sub>2</sub> chaque année. Le réseau de chaleur urbain va aussi être étendu avec un gain total de 11 km, soit l'équivalent de 3 000 logements desservis supplémentaires.

### → Alerter le fournisseur d'énergie en cas de dysfonctionnement

L'entreprise Lacroix a fourni des "automates de télégestion", permettant à Engie une optimisation de la distribution d'énergie en fonction des besoins, de la météo ou des conditions d'occupation de l'immeuble concerné. « Ces boîtiers sont aussi des outils de cybersécurité. Ils alertent très rapidement le fournisseur d'énergie en cas de dysfonctionnement. En effet, ces équipements sont des

portes d'entrée dans le système d'information d'Engie ou d'un autre distributeur d'énergie. Ces acteurs redoutent des attaques, qui ont pour conséquence une perte de réputation, » détaille Cédric Castella. Ces équipements permettent aussi une meilleure efficacité du réseau, détectant tous les signes d'encrassement, dus à des infiltrations produisant de la boue. Un logiciel va aussi permettre que des informations soient diffusées en masse et instantanément sur les boîtiers des 250 sous-stations, perpétuellement à jour.

Ce projet a commencé à se déployer en mars 2023, pour une livraison à la fin de l'année. L'ensemble de l'investissement porté par Engie solutions pour la modernisation de ce réseau de chaleur est de 25 M€. ■

## EGIS ACQUIERT ITALROM, UNE SOCIÉTÉ D'INGÉNIEURIE OPÉRANT EN ROUMANIE ET EN POLOGNE

Egis est en train de réaliser l'acquisition de la société d'ingénierie roumaine Italrom, qui intervient dans le domaine des grands travaux d'infrastructures et de génie civil routiers et ferroviaires. Basée à Bucarest et en Pologne, l'entreprise fournit des services de conception et d'assistance technique, d'études de faisabilité et de supervision des travaux. Dans son portefeuille de projets, Italrom compte des interventions majeures sur

les Lignes M4 et M5 du métro de Bucarest, sur le pont de Braila (à l'est du pays), les travaux de conception ferroviaire pour Craiova-Caransebes, Curtici-Simeria et Predeal-Brasov en Roumanie, ainsi qu'une importante section de tunnel (à construire avec un tunnelier de 15 mètres de diamètre) de la route express S-19 Rzeszow - Babica, en Pologne. Par cette acquisition, soumise aux approbations réglementaires et qui

devrait être conclue au premier trimestre 2023, Egis renforce sa présence en Roumanie, pays dans lequel la société intervient depuis 1996. Cette opération permettra d'amplifier ses services de conception, de se développer sur les futurs marchés pour la réalisation d'infrastructures importantes (trains et métros), et ainsi d'étendre son expertise auprès de clients des secteurs publics et privés. ■



## SÉCURISATION DE LA ROUTE DES ÉCOUGES, DANS LE VERCORS

Dans un décor à couper le souffle, la route des Écouges dans le massif du Vercors, qui relie Rencurel à Saint-Gervais, a connu plusieurs phases de travaux de sécurisation. En effet, la RD35 présente un danger pour les personnes qui l'empruntent, à savoir de nombreuses chutes de pierres et blocs récurrentes. Le département de l'Isère a passé un marché avec Hydrokarst, entreprise locale spécialisée dans les travaux d'accès difficile. Au printemps 2023, elle réalise la dixième étape de ce chantier complexe. En effet, outre la verticalité sur toute la longueur de la route, ce projet est confronté à de fortes contraintes en termes de planning du fait de la fréquentation de ce site naturel, par les canyoneurs en particulier. Les premières phases ont permis de réaliser des travaux de purge et de minage, mais aussi de poser du grillage et des filets plaqués, des ancrages de confortement, et des écrans pare-blocs jusqu'à 5000 KJ. Une des particularités des travaux de cette année est l'adaptation aux contraintes du site de ces écrans de protection et aux différentes chutes de pierre. Cette route dispose aussi d'un tunnel de 491 m de longueur, avec une chaussée bidirectionnelle à une voie. Pour une meilleure sécurité, le département a aussi souhaité l'équiper d'un éclairage LED par détection de présence. Le tunnel ne disposait jusque-là d'aucun éclairage.



Pose de grillage et montage des écrans pare-blocs sur la RD35, dans le massif du Vercors.

## NGE ET SES FILIALES LIVRENT LE VASTE PROJET DU CONTOURNEMENT EST DE VALENCIENNES



Lançage du viaduc de type " bow-string " enjambant l'Escaut.

« Le projet de contournement Nord de Valenciennes contribue à favoriser l'implantation de nouvelles entreprises pour générer de l'emploi, à aménager les territoires pour favoriser la mobilité des Nordistes et à contribuer au dynamisme économique des bassins de vie. C'est un projet majeur pour le Nord, de plus de 100 M€. Il a vocation à faire du Valenciennois un territoire dynamique, accessible, positif, où il fait bon vivre, » déclarait Christian Poirer, président du département du Nord, le lundi 6 mars 2023, lors de l'inauguration de la section Est de ce projet de contournement. En effet, à terme, ce sont plus de 20 000 véhicules qui pourront emprunter ce nouvel axe quotidiennement.

### → 7 filiales de NGE

Plus de 4 ans de travaux ont été nécessaires pour réaliser ce vaste projet, qui trouvera son point final en 2025. Un groupement mené par NGE comprenant 7 de ses filiales (NGE GC ouvrage d'art, Guintoli VRD et terrassement, EHTP canalisations et réseaux, Agilis équipement de la route, NGE fondations travaux géotechniques et de sécurisation, Siorat route et Offroy travaux ferroviaires) s'est vu attribuer ce marché en vue de raccorder la zone d'activités Poléco de Bruay-sur-l'Escaut situé au nord de Valenciennes à Saint-Saulve, plus à l'est. Dans un environnement semi-urbain à fort trafic, les chantiers se sont révélés complexes car la circulation a été maintenue. « Nos équipes ont su relever le défi de

réaliser ce projet majeur pour le Nord. Elles ont mis en œuvre notre savoir-faire multi métiers ainsi que notre expérience dans les travaux sous-circulation. Nous sommes fiers d'avoir réalisé ce projet tant attendu dans la région, » s'est réjoui Olivier Lamerant, directeur régional NGE.

### → 53,5 M€, montant de travaux pour le contournement Est

Ces travaux d'infrastructures ont commencé en septembre 2016 et se sont déroulés en trois étapes. Tout d'abord, la création d'un giratoire dénivelé à Saint-Saulve en 13 phases de travaux. Quatre ouvrages d'art ont été créés pour réhausser le giratoire ovale. Puis, la construction de la trémie Jean Jaurès à Bruay-sur-l'Escaut avec la constitution d'une nouvelle voie du tramway. La trémie permet au contournement de passer sous cette

ligne de tramway. Et enfin, des travaux de terrassements, ouvrages d'art et rétablissement de chaussées pour raccorder le giratoire de la zone d'activités à celui de Saint-Saulve. Ces travaux comprennent la création de trois ouvrages d'art dont un pont de 75 mètres de portée, de type " bow-string " enjambant l'Escaut et reliant Bruay-sur-l'Escaut à Saint-Saulve. Une plateforme de tri a été installée pour nettoyer les 27 000 m<sup>3</sup> de terres polluées. Le montant total des travaux pour le contournement Est de la ville de Valenciennes s'élève à 53,5 M€. Le coût global de cette opération en prenant en compte la section Ouest est de 106,1 M€ dont 90,7 M€ financés par le Département du Nord et 15,4 M€ pris en charge par la Communauté d'agglomération Valenciennes Métropole. ■



Giratoire de Saint-Saulve, qui a nécessité la création de 4 ouvrages d'art.

## L'IA AU SECOURS DE LA DÉGRADATION DES ROUTES

« *Bridgestone road conditions veut contribuer à accroître la sécurité et le confort sur la route en fournissant des informations en temps réel sur les dégradations des chaussées. Cela permet la maintenance préventive des routes, la planification des infrastructures et l'optimisation de la circulation* », explique Raghunath Banerjee, vice-président de Data solutions de Bridgestone mobility solutions. Le groupe international a développé des solutions basées sur l'Intelligence Artificielle (IA) pour numériser l'état et la qualité des routes. Les dégradations de la chaussée sont ainsi identifiées, permettant de prévenir les accidents. Les informations sont issues des données

agrégées et anonymisées en provenance de véhicules connectés à des capteurs.

### → Connaître l'état et la qualité des routes

À l'aide de ces capteurs et des données télématiques du véhicule, "Bridgestone road conditions" localise les dégradations de la chaussée, telles que les nids-de-poule, les fissures et autres plaques d'égout. L'algorithme d'IA définit alors la gravité des irrégularités de la chaussée. Cette technologie est destinée aux collectivités territoriales, aux autorités routières, fournisseurs de cartes et autres propriétaires de flottes commerciales et permet de mieux connaître l'état et la qualité des routes. En plus de capteurs

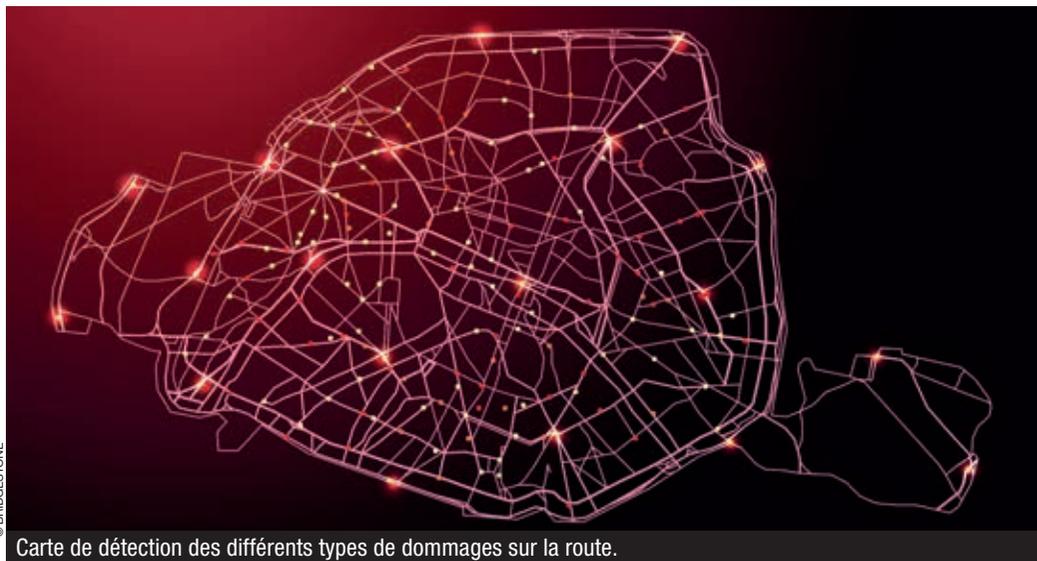
connectés, des caméras embarquées sur les véhicules concernés communiquent des informations qui peuvent être visualisées en temps réel. Ainsi la signalisation routière, panneaux, feux de circulation et marquages au sol, peut être visualisée et signalée si elle est endommagée, vandalisée ou dissimulée par la végétation. La confidentialité est garantie, car seules les données anonymisées sur le cloud sont téléchargées, pour une analyse plus approfondie. La solution "Bridgestone road conditions" peut se déployer au Royaume-Uni, en Irlande, en France, en Espagne, au Portugal, en Italie, en Pologne, aux Pays-Bas, en Belgique, en Allemagne, en Suisse et en Autriche. ■

## PREMIER TRACTEUR DE CHANTIER ROULANT À L'HYDROGÈNE VERT

*Entreprise implantée en Loire-Atlantique, Charier a inauguré, en février 2023, son premier tracteur de chantier pour les Travaux publics roulant à l'hydrogène vert. Après deux années de recherches, cet engin est encore en phase d'expérimentation sur le chantier d'extension du Port de La Turballe. Pour mener à bien cette innovation, Charier a travaillé avec la société e-Néo, située en Vendée. Celle-ci est spécialisée dans la conversion des véhicules thermiques en électrique et a mené une expérience de transformation d'un tracteur agricole d'occasion du gasoil vers l'hydrogène. Une fois ce défi réalisé, d'autres problématiques devaient être résolues comme la production d'hydrogène vert, son transport et son stockage.*

### → Prix "Sobriété et décarbonation des engins"

*Deux nouvelles entreprises de la région, ont été impliquées dans le projet. Il s'agit de Lhyfe, spécialisée dans la production d'hydrogène à partir d'éoliennes en mer et de la société nantaise Europe Technologies, responsable de l'acheminement de cette énergie vers une station de distribution expérimentale installée sur le site de l'agence Charier de La Turballe, à quelques kilomètres du chantier d'agrandissement du port. Ce projet est soutenu par la Région Pays de la Loire dans le cadre de l'appel à projets "Écosystèmes territoriaux hydrogène". Il a reçu le Prix "Sobriété et décarbonation des engins" aux Trophées des TP 2022 de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP).*



Carte de détection des différents types de dommages sur la route.

## QUAND LES EAUX USÉES DEVIENNENT UNE RESSOURCE

Après 5 années de R&D, NXO engineering a conçu un nouveau processus dans le traitement des eaux usées. Les microalgues sont au cœur de cette technologie qui a été testée dans une station d'épuration nouvelle génération, dénommée NxSTEP. La bioremédiation microalgale s'appuie sur le fait que les eaux usées sont très riches en macro et micronutriments et propices à la croissance des algues. Ils fixent le carbone grâce à la photosynthèse. Cela résout donc une des problématiques du traitement des eaux d'égout, qui est consom-

mateur d'énergie, producteur d'émissions de gaz à effet de serre, et coûteux. Selon la communication de l'entreprise, « *NxSTEP marque un tournant majeur dans l'assainissement. Ce procédé ambitionne de répondre à l'amélioration continue des performances épuratoires en étant partie prenante de la transition énergétique et environnementale.* »

En effet, cette station présente l'avantage d'être autonome grâce à la production des énergies renouvelables (méthane) à partir des eaux usées. Les boues génèrent un surplus énergétique qui peut être

utilisé en cogénération mais aussi commercialisable en cas de surplus. Les eaux usées ne sont ainsi plus traitées mais valorisées comme des ressources. De plus, la consommation énergétique de la station NxSTEP est réduite, elle s'établit à 0,12 kWh/m<sup>3</sup> d'eau traitée contre 0,8 kWh/m<sup>3</sup> pour une station française classique. La technologie NXO engineering a été lauréate du concours d'innovation "I-NOV" porté par l'Ademe et la Banque publique d'investissement (BPI) dans le cadre des Projets d'investissements d'avenir. ■

## UN JUMENT NUMÉRIQUE, TWIN 2030, POUR UNE PLANNIFICATION GLOBALE, À GRANDE ÉCHELLE

Twin 2030 a été conçu pour les projets d'aménagement, de mobilité, d'économie circulaire, de réduction des consommations énergétiques et de décarbonation...

Ce jumeau numérique territorial est un outil d'aide à la décision et de pilotage des projets. L'agglomération Paris-Saclay, en partenariat avec Dassault Systèmes et sa plateforme 3DExperience et un consortium d'une trentaine d'organisations publiques et privées, a utilisé cet outil sur son territoire pour mettre en œuvre un plan climat. Cette première version a été développée en coopération avec l'Institut de recherche technologique SystemX et l'entreprise Cosmo Tech spécialisée dans les jumeaux numériques permettant à tous les acteurs engagés des prises de décision favorisant la plus grande sobriété énergétique possible à long terme. Mais aujourd'hui, l'agglomération Paris-Saclay souhaite étendre la portée de son jumeau numérique pour une meilleure planification, avec une vision de ce territoire au-delà de 15 ans. En effet, cette nouvelle version, va permettre de modéliser les décisions selon une approche globale et non plus projet par projet. « Nous sommes honorés de participer au projet Twin 2030 (...) pour agréger des données sur le territoire, ouvrir un espace de collaboration entre tous les acteurs, citoyens inclus et offrir une plateforme scientifique qui permet d'éclairer la décision publique, » a déclaré Jacques Beltran de Dassault Systèmes, qui développe le jumeau numérique.

## DES RECHERCHES POUR UN ÉCLAIRAGE MIEUX ADAPTÉ À L'ŒIL DES USAGERS DE LA ROUTE



Mise en place de méthodes et d'outils pour mesurer et optimiser l'impact de l'éclairage artificiel sur les usagers.

Quelles sont les conditions de visibilité des usagers de la route lorsque celle-ci est éclairée artificiellement la nuit ? Pour répondre à cette question, une équipe de recherche "Éclairage et lumière" a été créée au Cerema au début de l'année 2023. Celle-ci s'est associée au laboratoire "Perceptions, interactions, comportements et simulations des usagers de la route et de la rue" de l'université Gustave Eiffel et à l'équipe de recherche "Systèmes de transports intelligents", du Cerema. Les recherches doivent permettre de donner aux usagers la juste quantité de lumière quand le besoin d'éclairage est avéré. Il s'appuie sur les fondamentaux de la perception visuelle, à savoir les sources de lumière, les revêtements qui la réfléchissent et l'œil humain qui la perçoit. L'objectif est d'améliorer le dimensionnement des installations d'éclairage, en optimisant le flux des luminaires pour offrir la bonne luminance aux usagers.

### → Optimiser l'éclairage public

L'équipe de recherche travaille donc sur la définition de nouvelles géométries qui vont permettre de réviser les niveaux de luminance des voiries urbaines. En effet, jusque-là, l'éclairage en ville était dimensionné pour des véhicules circulant autour de 90 km/h. Or la vitesse moyenne est bien moindre dans l'espace urbain et il faut aussi intégrer les voies piétonnes et cyclistes. Les propriétés optiques des revêtements constituent un autre levier pour optimiser l'éclairage public artificiel. En effet, aujourd'hui, les modèles de réflexion utilisés datent des années 70.



Visualisation d'une voirie avec le système HDR à 4 caméras.

« Mais il est possible de réduire la consommation d'énergie de 50 % en adaptant le couple revêtement/luminaire et en arrêtant d'utiliser les vieux modèles. Le besoin de connaissance autour de ces propriétés dépasse de plus les seuls enjeux nocturnes car le revêtement joue aussi un rôle en participant au phénomène d'îlot de chaleur urbain, » explique Florian Greffier, responsable au Cerema de l'équipe de recherche "Éclairage et lumière". Celle-ci travaille aussi sur la perception de la signalisation horizontale pour les véhicules autonomes. Ainsi il s'agit de définir des critères de performance pour que le marquage au sol soit visible à la fois pour l'œil humain et pour les capteurs des véhicules autonomes.

### → Outils sans équivalent

Pour atteindre les différents objectifs, l'équipe de recherche a mis en place des

méthodes et outils dont un système d'imagerie HDR à 4 caméras pour la mesure de la luminance et de la couleur, fidèle à ce que l'œil humain perçoit. Les images fournies par les quatre caméras sont ensuite fusionnées pour obtenir une unique image haute définition. Cela permet de caractériser les conditions de visibilité des usagers et de modéliser des mécanismes physiologiques comme l'adaptation visuelle ou l'éblouissement.

Le système peut être embarqué dans un véhicule pour faire des mesures en condition dynamique jusqu'à 50 km/h. « C'est un outil de diagnostic qui permet de mieux adapter l'éclairage, en prenant en compte les trois composantes du système. À notre connaissance, il n'a aujourd'hui pas d'équivalent, » note Florian Greffier. ■

## AGENDA

### ÉVÈNEMENT

#### • 8 JUIN

Les rencontres des ouvrages d'art organisés par le Cerema et l'université Gustave Eiffel

Lieu : Université de Marne-la-Vallée

#### • 14 ET 15 JUIN

Le salon Solscope consacrée à la géotechnique fêtera ses 30 ans. Un colloque se tiendra lors de ce rendez-vous professionnel, intitulé "Pour une géotechnique responsable".

Lieu : parc Eurexpo à Lyon

#### • 25 ET 26 SEPTEMBRE

Conférence honorifique annuelle "Conférence Coulomb" présentée par le professeur Robertson

Pour plus d'informations, voir la brève page 11.

Lieu : FNTP

### FORMATIONS

Nous invitons les lecteurs à vérifier par internet que les formations annoncées dans cette rubrique sont maintenues, à quelle date et dans quelles conditions (en présentiel et/ou à distance).

#### • 14 AU 16 JUIN

Appréhender l'ensemble des procédures pour les projets d'infrastructures et élaborer leur planning

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

#### • 26 AU 28 JUIN

Le management d'équipes dans le BTP

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

#### • 28 AU 30 JUIN

Mettre en cohérence urbanisation et déplacements : les conditions de la réussite

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

#### • 20 AU 22 SEPTEMBRE

Conduire et réussir les négociations dans les projets

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

#### • 26 AU 28 SEPTEMBRE

Les fondamentaux de la technique routière : le fonctionnement et la constitution d'une chaussée

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

#### • 4 ET 5 OCTOBRE

Gérer les déchets de chantier

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

### NOMINATIONS

#### ÉCOLE FRANÇAISE DU BÉTON

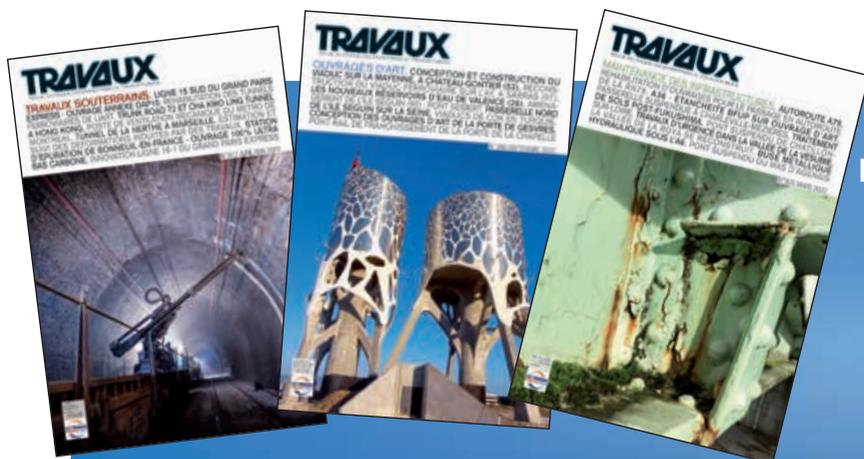
Pascal Bodet est le nouveau président pour le conseil scientifique de l'École française du béton.

#### GROUPE ERI

Karim Erfad est nommé Directeur des achats et de la chaîne logistique du groupe ERI.

#### NGE BÂTIMENT

Trois nouvelles prises de poste pour le pôle bâtiment du Groupe NGE : Roger Lopes, en qualité de Directeur Général Adjoint, Benjamin Cardinal, en qualité de Directeur régional adjoint Île-de-France des travaux neufs et Matthieu de Reneville, en qualité de Directeur Général de Menuiserie Cardinal, pôle bois du groupe.



# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

Retrouvez l'actualité de la profession, les chantiers en images, les interviews des grands décideurs, le point de vue des ingénieurs. Pour réserver votre emplacement publicitaire dans Travaux, contactez :

#### Prochains numéros :

- TRAVAUX n° 987 "Travaux maritimes et fluviaux"
- TRAVAUX n° 988 "Ouvrages d'art"



#### Bertrand COSSON

Tél. 01 41 63 10 31

[b.cosson@rive-media.fr](mailto:b.cosson@rive-media.fr)

# BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS À L'INTERNATIONAL RÉPONDRE AUX DÉFIS ÉCONOMIQUES, CLIMATIQUES, SOCIÉTAUX ET NUMÉRIQUES

La prise en compte de l'urgence climatique, la différenciation par l'innovation, l'éolien flottant, la mobilité urbaine sous une nouvelle forme, la sécurité, tels sont quelques-uns des enjeux auxquels est confrontée Bouygues Travaux Publics à l'international. L'entreprise est implantée durablement à l'international dans certains pays, de manière ciblée dans d'autres, de façon à profiter des opportunités de croissance qui répondent à ses exigences en matière de gestion des risques. **Entretien avec Vincent Avrillon, directeur général adjoint "Grand International" de Bouygues Travaux Publics.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1- Vincent Avrillon, directeur général adjoint "Grand International" de Bouygues Travaux Publics.

**Bouygues est un groupe de services diversifié présent dans plus de 80 pays. Comment la division Travaux Publics est-elle organisée à l'international ?**

À l'international, Bouygues Travaux Publics est organisée en cinq pôles : le pôle France et Europe, hors Angleterre et Croatie, le pôle Hong Kong, le pôle Australie, le pôle Mines et Carrières et routes africaines, le cinquième pôle concernant le reste du monde dont j'ai la responsabilité.

Ce pôle représente environ 30 % du chiffre d'affaires de Bouygues Travaux Publics, l'international représentant lui-même 60 % du chiffre d'affaires total de Bouygues Travaux Publics.

L'organisation à l'international est structurée autour de points d'implantation forts, c'est-à-dire permanents où nous réalisons des travaux de façon récurrente.

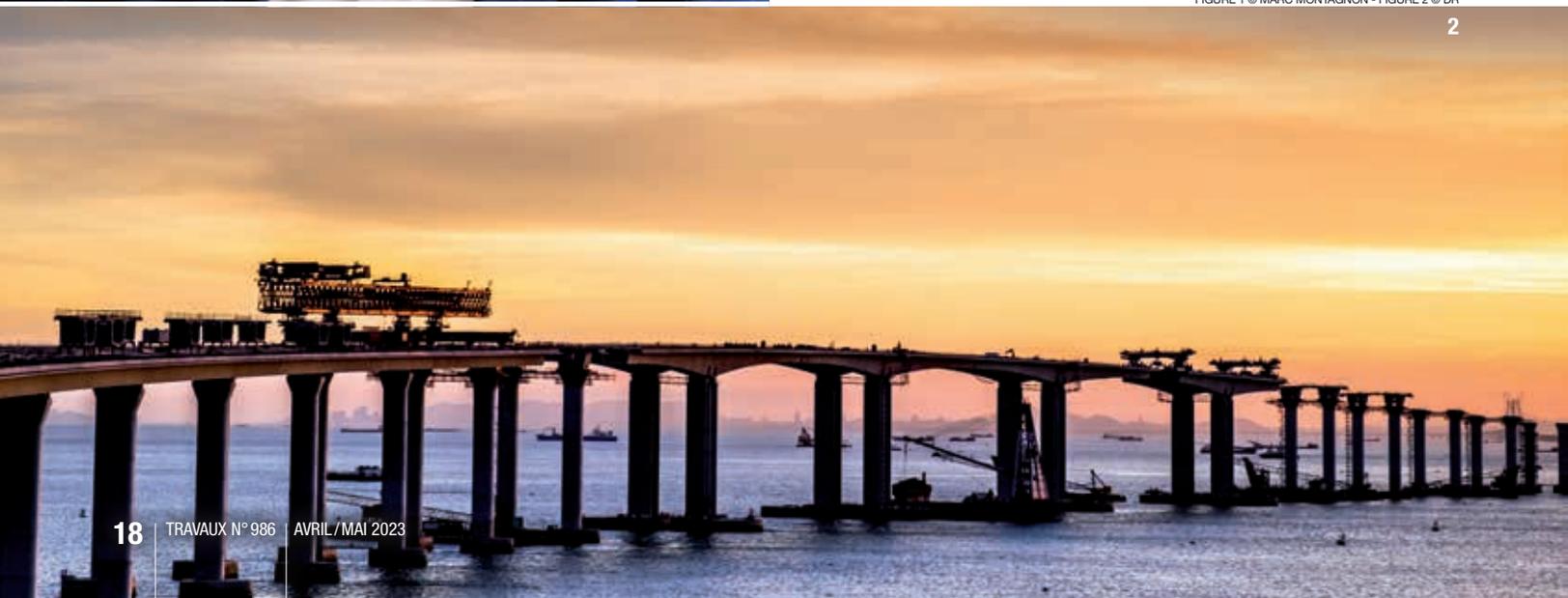
Le premier est Hong Kong où l'entreprise est présente depuis 1986. Vient ensuite l'Australie où, après le premier chantier de réalisation de l'Airport Link de Sidney en 2000, une présence permanente est effective depuis 2006.

Nous sommes également présents en Suisse où la filiale est active de très longue date.

Enfin, l'Angleterre qui est devenue un pays où les grands projets se multiplient depuis 2014/2015 avec des

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © DR

2



projets majeurs tels que la centrale nucléaire d'Hinkley Point C et la ligne à grande vitesse HS2 (21,6 km) le plus important projet d'infrastructure de transport au Royaume-Uni, qui partira de Londres pour desservir sans arrêt Birmingham pour ensuite bifurquer en direction des villes de Manchester et de Leeds.

Notre ambition est de maintenir ces places fortes et de les développer, en particulier Hong Kong où la présence chinoise de plus en plus affirmée modifie le contexte dans lequel nous opérons.

Un autre axe de réflexion pour notre développement international concerne les États-Unis et le Canada qui constituent pour Bouygues Travaux Publics un territoire en devenir. L'entreprise veut en faire une nouvelle force permanente comme c'est le cas de l'Angleterre et de Hong Kong.

**2- Le pont de Hong Kong Zhuahai-Macao : 5714 voussoirs préfabriqués, de 250 types différents, posés au rythme de 18 par jour.**

**3- Le pont Hong Kong Zhuahai-Macao (55 km) le plus long système pont-tunnel au monde, traversant les eaux du canal de Lingdingyang dans l'estuaire de la rivière des Perles.**

**4- Métro de Manille.**

Bouygues Travaux Publics axe son développement sur les opérations à grande technicité et à forte valeur ajoutée : le pont Hong Kong-Zhuahai-Macao, le tunnel du port de Miami, le contournement ferroviaire Nîmes-Montpellier... En résumé, pour réaliser ces grands projets, l'entité s'appuie d'une part sur ses implantations pérennes en France, en Suisse, à Hong Kong et en Australie, et, d'autre part sur sa capacité à inter-

venir ponctuellement sur des grands projets à très forte technicité.

**Quelles sont vos ambitions ou vos projets dans des pays où votre présence est moins affirmée ?**

Autour de cela, nous avons des ambitions dans un certain nombre de pays où nous observons les opportunités de nous y développer dans une logique

d'implantation de type "fly in fly out" (FIFO).

En Afrique, nous sommes vraiment à l'écoute d'opportunités. Nous avons longuement travaillé sur le projet du métro d'Abidjan, que nous espérons pouvoir lancer définitivement début 2023. C'est un projet qui doit avoir un impact significatif sur la mobilité des habitants de cette ville et que nous projetons de répliquer dans d'autres pays africains.

Au Moyen-Orient, nous observons plusieurs projets en Arabie Saoudite, en particulier ceux de Neom et de Al-Ula. Au-delà des défis techniques qu'ils représentent, de tels projets sont à la croisée de nombreuses questions dans l'air du temps et nous mettent face à des enjeux de changements climatiques qui nous imposent de sortir de nos façons de penser habituelles.

Si on prend l'exemple de Neom, c'est un projet qui se veut être un "accélérateur de progrès humain", un projet qui entend révolutionner la façon de concevoir la ville. Il s'agit d'une ligne droite, la ville se résumant en réalité à la construction sur 300 m de large de deux barres parallèles de 170 km de long et 500 m de haut. Nous ne nous sommes pas encore positionnés sur Neom bien que nous ayons déjà été sollicités.

En revanche, Bouygues Travaux Publics est présente sur Al-Ula. Au centre du plan Vision 2030 initié par le gouvernement saoudien pour moderniser le pays, Al-Ula fait partie d'une série de projets hors normes qui visent à développer l'offre culturelle et touristique du Royaume.

L'architecte de l'opération est Jean Nouvel et le projet est parrainé par l'Agence française pour le développement d'Al-Ula. ▶

## VINCENT AVRILLON : PARCOURS

**Vincent Avrillon est ingénieur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Nancy (1990). Dans un premier temps, il entre chez Bouygues Offshore dans le cadre d'un VIE, en Australie, avant d'intégrer la structure parisienne de l'entreprise en 1992, plus précisément Bouygues TP RP, au sein de laquelle il est en charge d'études de prix.**

**À partir de 1994 et, jusqu'en 2000, il est responsable de projets en région parisienne : bow-string dans le centre-ville de Pontoise, pour la SNCF, viaduc de Triel-sur-Seine, tranchée couverte de Jouars-Pontchartrain sur la RN12.**

**En 2000, il prend la direction travaux de Bouygues TP pour la région parisienne, ce qui lui permet de découvrir l'activité tunnel au travers de SEP pour la RATP et pour le SIAAP.**

**À partir de 2006, Vincent Avrillon change d'orientation en se voyant confier la création de Bouygues TP en Australie.**

**En 2009, il quitte l'Australie et rejoint Hong Kong où il prend la direction de l'activité Génie Civil de Bouygues TP, au sein de Dragages Hong Kong jusqu'en 2013.**

**Cela l'amène à participer à la réalisation de grands ouvrages tels que le pont de Hong Kong-Zhuahai-Macao (55 km) et le tunnel de Tuen Mun - Check Lap Kok (5 km).**

**En 2014, de retour en France, il prend la direction d'une zone géographique - commerce et travaux - orientée plus spécialement sur des pays européens tels que l'Angleterre et Suisse.**

**En 2022, la zone géographique dont il est responsable s'est considérablement élargie puisqu'elle couvre l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud, l'Afrique, le Moyen-Orient, l'Asie du Sud-Est, l'Angleterre et la Croatie.**

**En 2023, Vincent Avrillon devient directeur général adjoint du Grand International chez Bouygues Travaux Publics.**

© DR

3



© DR

4





5

© NEOM



6

© NEOM

Il prévoit la création, sur un site de la taille de la Belgique, d'un complexe archéologique, culturel et touristique, aux allures de musée vivant à la fois à ciel ouvert et de type troglodytique. Un investissement majeur qui ambitionne de faire d'Al-Ula la capitale culturelle du Royaume. La mise en route d'un contrat sur le projet d'Al-Ula pourrait être l'un des événements de l'année 2023.

Dans le cadre d'une stratégie à moyen terme, nous suivons également le projet de ligne de métro à Tel Aviv, en Israël, qui pourrait être lancé en 2025.

En Asie du Sud-Est, nous sommes déjà présents aux Philippines avec des métros aériens et nous suivons de près les projets en Thaïlande et en Indonésie. À Hong Kong, plusieurs projets de transport sont en cours tandis qu'en

## À PROPOS DE NEOM : THE LINE

**Neom serait une ville linéaire de 170 kilomètres de long sur 500 mètres de large avec à chaque extrémité deux gratte-ciel de 500 mètres de haut.**

**Selon le site de Neom, The Line pourra accueillir jusqu'à neuf millions d'habitants, 95% des terres seront préservées pour la nature et la ville sera alimentée à 100% d'énergies renouvelables. Le tout sera desservi par un train haute vitesse permettant de parcourir les 170 kilomètres en vingt minutes et des déplacements en taxis volants. Des robots domestiques seront déployés pour répondre aux attentes des riches habitants. Les services tels que les écoles, parcs, etc. seront disposés en hauteur et accessibles en moins de cinq minutes.**

Australie, plusieurs opérations de transport routier et de transport urbain sont en préparation.

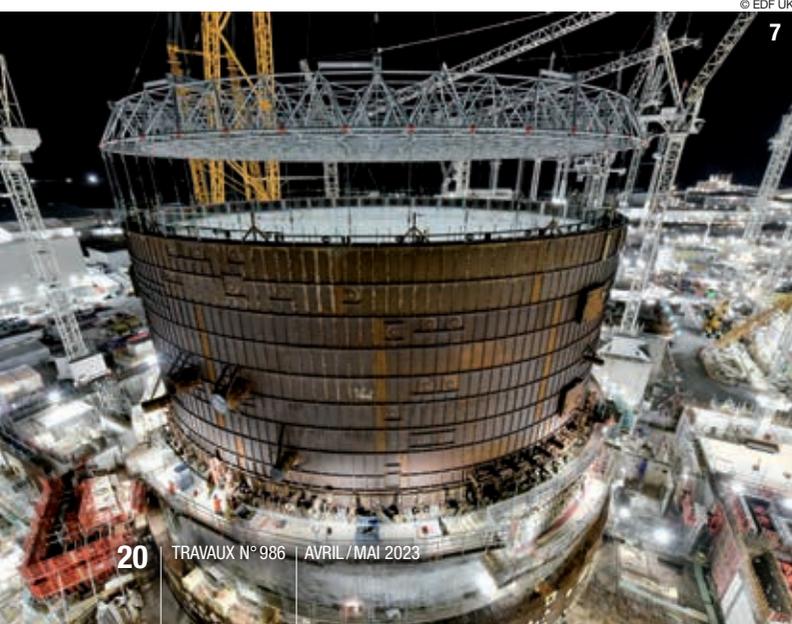
En dehors de ceux que je viens d'évoquer, nous sommes sélectifs sur des

projets "fly in fly out" où nous pensons pouvoir nous apporter, dans un cadre très structuré, nos compétences techniques mais aussi les standards de sécurité et de qualité du groupe.

**5 & 6- Le projet de Neom en Arabie Saoudite : une ligne droite, la ville se résumant à la construction de deux barres de 170 km de long.**

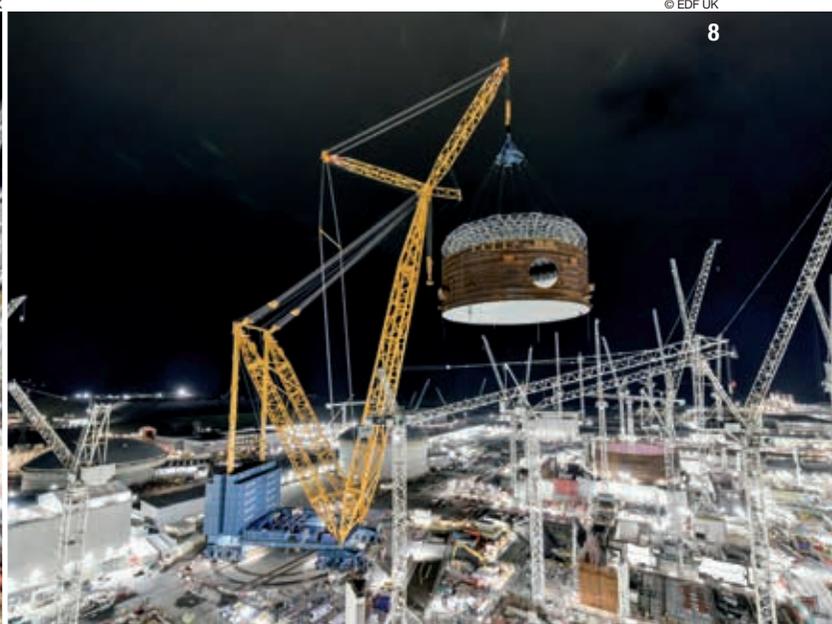
**7- Bouygues TP réalise, en groupement avec Laing O'Rourke, la construction des bâtiments qui abriteront les deux réacteurs nucléaires EPR de la centrale d'Hinkley Point C.**

**8- Mise en place de la structure du dôme de l'un des deux réacteurs de Hinkley Point C.**



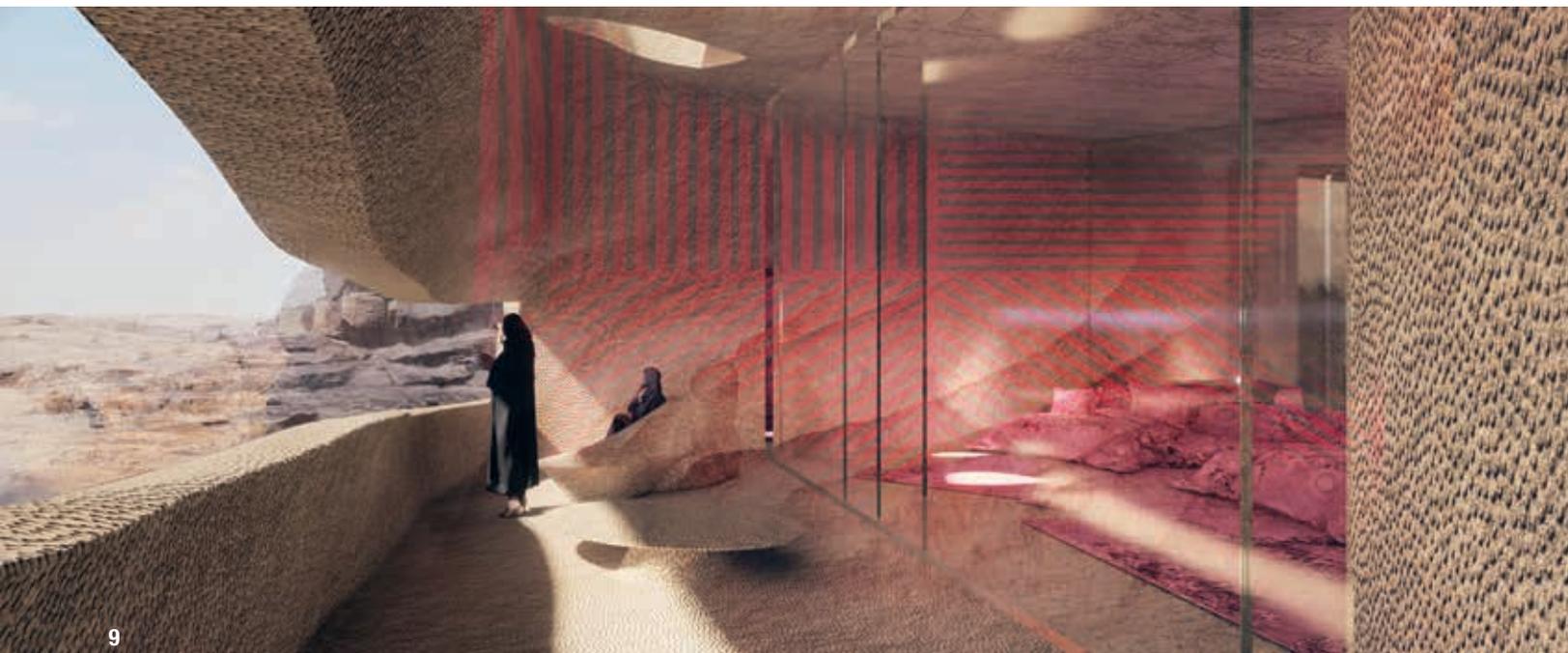
7

© EDF UK



8

© EDF UK



9

© JEAN NOUVEL

**Quels sont les métiers dans lesquels l'entreprise fait la différence par rapport à ses concurrents ?**

Au niveau des métiers, nous estimons être le leader dans celui des tunnels à partir d'un certain diamètre - supérieur à 6/7 m - creusés dans des sols compliqués exigeant des techniques bien maîtrisées.

Ces tunnels s'intègrent dans des ouvrages souvent complexes, voire sophistiqués, pour lesquels nous proposons des solutions inédites de mobilité des personnes, des matériaux, de l'eau.

Le secteur des infrastructures productrices d'énergies décarbonée se développe de plus en plus rapidement. Pour répondre à ces attentes, nous avons créé une entité interne

**9- Bouygues TP est présente sur Al-Ula, au centre du plan Vision 2030 initié par le gouvernement saoudien pour moderniser le pays.**

**10- Le dôme du réacteur de l'EPR de Flamanville.**

**11- En Finlande, Bouygues Travaux Publics a assuré la construction de l'îlot nucléaire du réacteur EPR de l'Olkiluoto et des bâtiments de sauvegarde et de stockage.**

spécialisée dans les travaux d'éolien en mer et les ouvrages nucléaires. Il s'agit d'une business unit dédiée aux énergies nouvelles et décarbonées que nous avons appelé NOW pour Nuclear Offshore Wind.

Nous considérons l'éolien et le nucléaire comme deux acteurs essentiels de la transition énergétique et deux secteurs dans lesquels nos compétences techniques et notre savoir-faire acquis feront la différence.

Pour être en mesure de répondre dès aujourd'hui aux attentes du secteur de l'éolien en mer, Bouygues a racheté un brevet de concept d'éolien en mer flottant à FWS (Floating Wind Solutions).

Elle enrichit ainsi son offre de solutions d'infrastructures pour l'éolien offshore, avec l'acquisition exclusive de la tech-

nologie d'embase flottante OO-STAR, détenue par FWS. Cette technologie permet de s'adapter à un grand nombre d'environnements marins, de réduire l'empreinte carbone de l'infrastructure des fermes éoliennes et de diminuer les coûts d'exploitation et de maintenance.

OO-STAR est un concept breveté d'embase semi-submersible pour les éoliennes offshore, développé à l'origine par Olav Olsen puis transféré à Floating Wind Solutions (FWS), dont Bouygues Travaux Publics vient de faire l'acquisition.

Le comportement hydrodynamique et structurel de l'embase permet de garantir une performance optimale de la turbine et une grande durabilité de l'ouvrage, permettant un meilleur rendement. ▶

© ANTOINE SOUBIGOU

10



© DR



Bouygues Travaux Publics et Olav Olsen entendent désormais allier leurs expertises en ingénierie et en construction, afin d'optimiser le processus de conception et de mise en œuvre de cette technologie, dans le but de fournir une solution intégrée, innovante et compétitive pour le marché de l'éolien offshore flottant.

La production des embases semi-submersibles en béton sera faite en série, dans des délais performants et à un coût compétitif.

Cette acquisition reflète notre ambition en matière d'éolien et confirme notre volonté et notre capacité à réduire l'empreinte carbone de nos activités.

L'investissement dans cette technologie est une étape importante car il nous offre une avance technologique significative pour accompagner plus rapidement le marché dans la phase de transition énergétique que nous abordons. Ce marché est en cours de développement en France mais aussi au Royaume-Uni, au Japon et aux États-Unis. Nous avons à ce sujet une vraie stratégie en matière d'éolien flottant, porté par la réussite du projet de Fécamp.

Nous avons démontré à travers le projet de Fécamp notre capacité à construire à quai des ouvrages en béton remarquables par leurs dimensions et à les transporter en mer. Fécamp constitue une première mondiale avec la construction de 71 éoliennes avec des embases en béton de grande hauteur et de grand diamètre qui nous permettra de développer le flotteur de demain.

Comme expliqué précédemment, pour nous, le nucléaire et l'éolien offshore sont deux acteurs majeurs de la transition énergétique. Notre business unit est dimensionnée pour répondre aux

## LE PARC ÉOLIEN DE FÉCAMP

**Le chantier éolien en mer de Fécamp a franchi une étape importante en février 2022 avec la finalisation de sa première fondation gravitaire dans le grand port maritime du Havre. Cette étape fait suite à plusieurs mois de travaux de coffrage, ferrailage, bétonnage, peinture et d'installation des équipements.**

**Porté par EDF Renouvelables, EIH S.à.r.l. détenue par Enbridge Inc. et CPP Investments, ainsi que par wpd, le futur parc éolien en mer de Fécamp, composé de 71 éoliennes localisées à plus de 13 km au large des côtes, sera le premier en Normandie. À sa mise en service fin 2023, ce parc d'une capacité de près de 500 MW, produira l'équivalent de la consommation électrique annuelle de 770 000 personnes, soit 60 % des habitants de Seine-Maritime.**

**La construction des fondations gravitaires : un chantier de grande ampleur sur le port du Havre**

**Le consortium constitué de Bouygues Travaux Publics, Saipem et Boskalis a la charge de la construction, du transport et de l'installation en mer des fondations gravitaires sur lesquelles reposeront les éoliennes. Chaque fondation pèse 5 000 tonnes et mesure 31 mètres de diamètre à sa base. La hauteur de la fondation, allant de 48 à 54 mètres, dépend de sa zone d'implantation en mer.**

**Démarré début 2021, le chantier mobilise à son pic d'activité plus de 1 000 salariés. La fabrication des fondations restantes se poursuivra jusqu'à l'été 2022.**

**Dès le début de l'été 2022, le transport et l'installation en mer des fondations s'est fait au moyen de la Saipem 7000, l'un des plus gros navires de levage lourd "Heavy Lift Vessel" au monde. Boskalis préparera le sol marin sous la fondation puis ballastera la fondation une fois posée.**

**Les travaux en mer du parc se poursuivront jusqu'à fin 2023.**

attentes de ces deux secteurs voisins. Notre conviction que le nucléaire est un acteur majeur de la décarbonation de la société trouve écho dans les dernières déclarations du gouvernement et nous sommes aujourd'hui en mesure de contribuer à la construction des projets nucléaires, qu'il s'agisse des EPR 2 ou des SMR (Small Modular Reactor).

### Comment faites-vous face aux défis économiques de demain et, notamment, numériques ?

Le traitement digital de notre métier constitue une autre approche pour nous différencier. Nous avons ainsi créé une entité dédiée à l'utilisation de la data - UBY - pour nous permettre d'optimiser notre performance sur les chantiers à travers une logistique plus pointue et

des systèmes d'aide à la décision sur les projets, qu'il s'agisse des mouvements de grues et des moyens de transport mais aussi de la mesure des tassements sur les immeubles déjà construits ou en construction, de la mesure du bruit afin de rendre les chantiers moins perturbants pour l'environnement. Loin d'être un effet de mode, la digitalisation transforme nos manières de faire et, sur nos projets elle doit à la fois renforcer la productivité, avoir un impact positif sur la sécurité et améliorer la relation client.

### Parmi les grands chantiers en cours, quelques mots sur ceux qui vous semblent les plus significatifs des capacités de l'entreprise ?

Le premier est le métro de Melbourne par sa taille et sa complexité. C'est le plus gros contrat d'infrastructures remporté par Bouygues en 2017 : 4 milliards d'euros en consortium dont une part en propre de plus d'un milliard. Le boom de la construction d'infrastructures se poursuit en Australie.

Le gouvernement de l'État de Victoria en Australie a confié le financement, la conception, la construction et la maintenance pendant 25 ans du futur tunnel du métro de Melbourne au consortium Cross Yarra dont Bouygues Construction Australia, filiale de Bouygues Travaux Publics, fait partie.

Avec un tunnel bitube de 9 kilomètres, le nouveau métro accueillera cinq nouvelles stations : Arden, Parkville, CBD North, CBD South, Domain (l'acronyme CBD signifie Central Business District). Ce projet d'envergure comprend également l'aménagement de parcs, passerelles, zones piétonnes et commerces dans les espaces publics autour de ces stations. Cela permettra, à terme,

© JACQUES BASILE

12





13

© BOUYGUES TP



14

© BOUYGUES TP

12- À sa mise en service fin 2023, le parc de Fécamp, d'une capacité de près de 500 MW, produira l'équivalent de la consommation électrique annuelle de 770 000 personnes.

13- La technologie d'embase flottante OO-STAR pour l'éolien offshore.

14- OO-STAR : un concept breveté d'embase semi-submersible pour les éoliennes offshore de FWS (Floating Wind Solutions).

15- Chantier de construction des embases des 71 éoliennes du parc en mer de Fécamp (Seine Maritime).

## FLOATGEN : PREMIÈRE ÉOLIENNE FLOTTANTE CONSTRUITE EN FRANCE

Floatgen, est la première éolienne flottante 100% européenne construite et assemblée dans le port de Saint-Nazaire. D'une puissance de 2 MW, l'éolienne produira lors de sa mise en fonction l'équivalent de la consommation annuelle électrique de 5 000 habitants.

Cette innovation en matière d'énergies renouvelables est le fruit d'un travail de pointe entre Bouygues Travaux Publics et sept autres partenaires européens.

L'innovation majeure réside dans la fondation flottante construite pour accueillir l'éolienne. La filiale de Bouygues Construction a développé une formule de béton léger et auto-plaçant pour réduire au maximum le poids de la structure. Un savoir-faire qui confirme son expertise en matière de réalisation d'infrastructures portuaires et maritimes.

Le potentiel de l'éolien en mer flottant est immense puisqu'il permet de produire une électricité d'origine renouvelable loin des côtes, avec un impact paysager réduit et au meilleur coût grâce à la qualité du vent au large.

L'expertise de Bouygues Construction en matière de génie civil maritime est un atout essentiel pour accompagner la transition énergétique.

d'augmenter la capacité du réseau de transports publics et ainsi de décongestionner le réseau existant.

L'autre grand projet en cours est la centrale nucléaire d'Hinkley Point C au Royaume-Uni.

EDF a confié à Bouygues Travaux Publics, en groupement avec l'entreprise britannique Laing O'Rourke, la construction des bâtiments qui abriteront les deux réacteurs nucléaires de technologie EPR (European Pressurized Reactor) d'Hinkley Point C au Royaume-Uni.

D'une capacité totale de 3,2 gigawatts, la centrale d'Hinkley Point C fournira 7% de la consommation d'électricité du Royaume-Uni et permettra d'approvisionner plus de 5 millions de foyers en électricité.

Nous sommes aujourd'hui à peu près à 50% de l'avancement de la construction. Le chantier occupe 3 500 compagnons et 1 400 ingénieurs et techniciens.



© JACQUES BASILE

15



L'année 2023 sera marquée par la pose, au mois de novembre, du premier dôme de l'un des deux réacteurs. La mise en route est prévue en 2026. Hinkley Point C est un projet hors norme. Tout d'abord par sa taille : le hall abritant la turbine mesure 117 m de long, 56 m de large pour 56 m de hauteur, ce qui représentera plus de 8200 tonnes d'acier. Ensuite, nous évoluons dans un environnement contraint : réglementations nucléaire et britannique. Tous ces éléments nous ont conduits à repenser nos méthodes de travail. Les armatures sont ainsi réalisées en 3D grâce à une maquette Tekla collaborative (équipes charpente métallique, génie civil et architecte). Plusieurs autres projets devraient aboutir dans les mois à venir : réseau de traitement des eaux pluviales à Washington DC, construction d'un tunnel sous le lac Michigan au Nord de Chicago pour le transport de gaz entre le Canada et les États-Unis et enfin une ligne de métro à Hong Kong.

Nous commençons dans l'Ontario, au Canada, à travailler sur l'appel d'offres pour la construction d'une ligne de métro à Toronto et nous travaillons à un appel d'offres en cours pour la réalisation du Lower Thames Crossing sous la Tamise à l'Est de Londres.

### La sécurité sous toutes ses formes est-elle une démarche que vous incluez dans votre développement ?

Dans notre développement international, notre crédibilité ne peut être assurée que si nous avons des résultats irréprochables en matière de sécurité avec une approche sécurité structurelle et culturelle.

La culture de la sécurité que l'on trouve dans l'industrie pétrolière et gazière

## LA LIGNE À GRANDE VITESSE HS2

**La ligne à grande vitesse HS2 est le plus important projet d'infrastructure de transport au Royaume-Uni. Elle partira de Londres pour desservir sans arrêt Birmingham puis bifurquer en direction des villes de Manchester et de Leeds.**

**Le groupement ALIGN (Bouygues Travaux Publics / Sir Robert McAlpine / VolkerFitzpatrick) est en charge de la conception et de la construction de la section C1 du projet.**

**Ce tronçon de 21,6 kilomètres situé au nord-ouest de Londres inclut un viaduc emblématique de 3,4 kilomètres (Colne Valley Viaduct) et deux tunnels de 15,75 kilomètres chacun (Chilterns Tunnels).**

**Des tunneliers à densité variable - technologie déjà déployée par Bouygues Travaux Publics à Hong Kong ou sur le Grand Paris Express - seront utilisés afin d'adapter le creusement aux conditions géologiques spécifiques du terrain.**

**Les travaux comprennent également la réalisation des rameaux de communication (cross passages) entre les deux tunnels ainsi que 5 puits de ventilation.**

**Le développement des études et les travaux préparatoires ont démarré en 2017. La mobilisation des équipes va se renforcer progressivement pour mobiliser en pointe plus de 1 500 collaborateurs.**

**La durée du contrat est de 66 mois (5 ans et demi).**

n'est pas encore tout à fait présente dans l'industrie des Travaux Publics mais nous y travaillons en permanence avec la mise en place, depuis trois ans, d'une démarche "culture sécurité" qui doit aboutir dans les prochains 18 mois. L'approche est difficile car la notion elle-même ne recouvre pas les mêmes valeurs selon que le chantier se situe à Boston, à Hong Kong ou à Abidjan. Elle relève d'un comportement humain qui est différent d'un pays à un autre mais nous nous devons d'avoir notre propre culture en matière de sécurité et de l'exporter avec les valeurs d'exigences qui sont les nôtres, quel que soit le pays dans lequel nous intervenons. C'est à la fois une ambition et une nécessité, pour nous mais aussi pour nos clients.

### Comment envisagez-vous d'accompagner vos clients dans la réduction de leur empreinte carbone ?

C'est un sujet qui va nous occuper en permanence à l'international : nous nous devons de développer des projets qui auront des émissions de carbone limitées mais aussi de travailler sur de nouveaux matériaux. Nous disposons en interne d'un laboratoire de recherche pour optimiser l'émission de carbone de nos bétons. Le travail est important car il nous concerne en tant qu'entreprise mais il concerne également nos fournisseurs et nos clients avec des enjeux tout autant techniques que financiers. Pour réduire la trace carbone de notre activité il ne faut pas

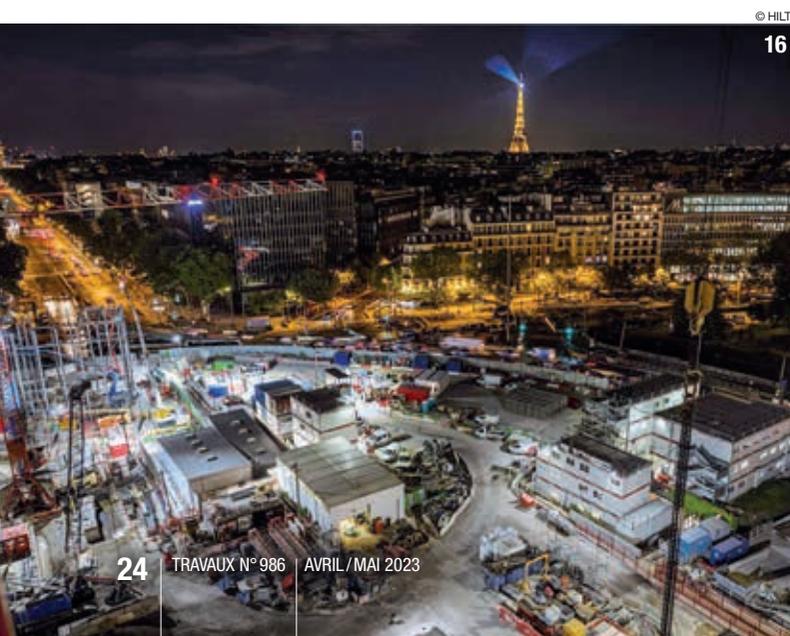
**16- De nuit, le chantier Eole de la gare "Porte de Maillot" à Paris.**

**17- L'État de Victoria (Australie) a confié le financement, la conception, la construction et la maintenance pendant 25 ans du tunnel du métro de Melbourne au consortium Cross Yarra dont Bouygues Construction Australia, filiale de Bouygues TP, fait partie.**

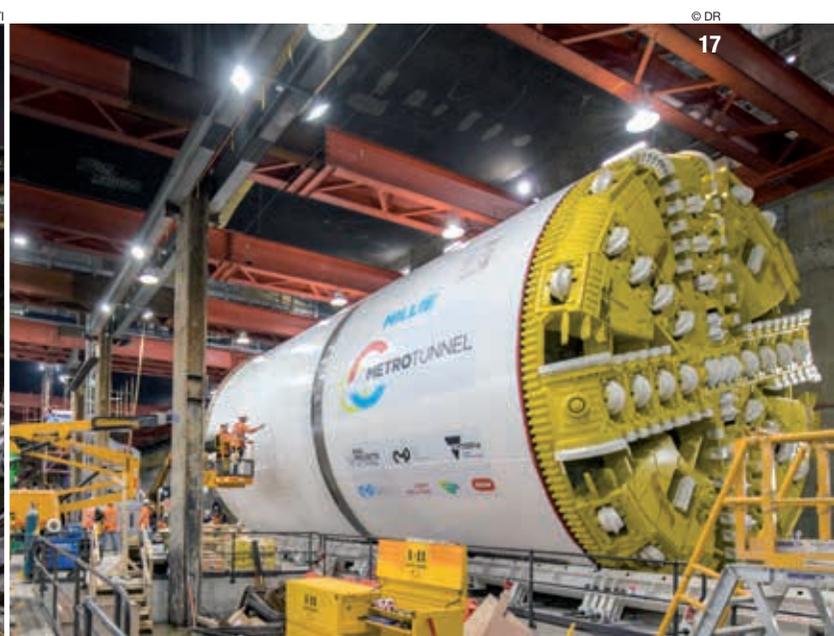
**18- Le métro d'Abidjan, en Côte d'Ivoire : un projet de réseau ferroviaire de transport urbain de 37,4 km dont les travaux principaux devraient débuter en 2023.**

**19- En 2013, Dragages Hong Kong et Bouygues Travaux Publics ont remporté le plus important contrat en conception-réalisation jamais attribué à Hong Kong : le tunnel routier sous-marin bitube de Tuen Mun-Chek Lap Kok (5 km).**

**20- Bouygues Construction Australia réalise les deux tunnels autoroutiers (conception et construction) du projet WestConnex à Sydney.**



© HILTI  
16



© DR  
17

## LE MÉTRO D'ABIDJAN

Le métro d'Abidjan est un projet de réseau ferroviaire de transport urbain, dont les travaux préparatoires ont débuté en 2018 et les travaux principaux devraient débuter en 2023, qui desservira l'agglomération d'Abidjan.

Il s'agit d'un métro aérien conçu aujourd'hui autour de deux lignes :

- Une première ligne de la commune d'Anyama jusqu'à celle de Port-Bouët, en passant par le quartier central d'affaires du Plateau2 ;
- Une deuxième ligne entre Yopougon et Bingerville.

Avec 37 kilomètres de voies, la première ligne représente un projet de grande ampleur, comparable aux lignes de métro de grandes villes.

Le métro d'Abidjan sera le quatrième métro à voir le jour en Afrique.

La STAR (Société de Transports Abidjanais sur Rail) est le contractant chargé de la conception, la réalisation, l'exploitation et la maintenance de la Ligne 1 du Métro d'Abidjan.

Ce groupement d'entreprises est composé de : Bouygues Travaux Publics (Infrastructures - Génie civil - Ouvrages d'art - Bâtiments), Colas Rail (voie - énergie - caténaire - traction), Alstom (matériel roulant - équipements industriels de l'atelier/dépôt-signalisation CBTC - systèmes courants faibles - telecom - billettique), Keolis (pré-exploitation, exploitation et maintenance).

**ENTRÉE EN SERVICE : 2025.**

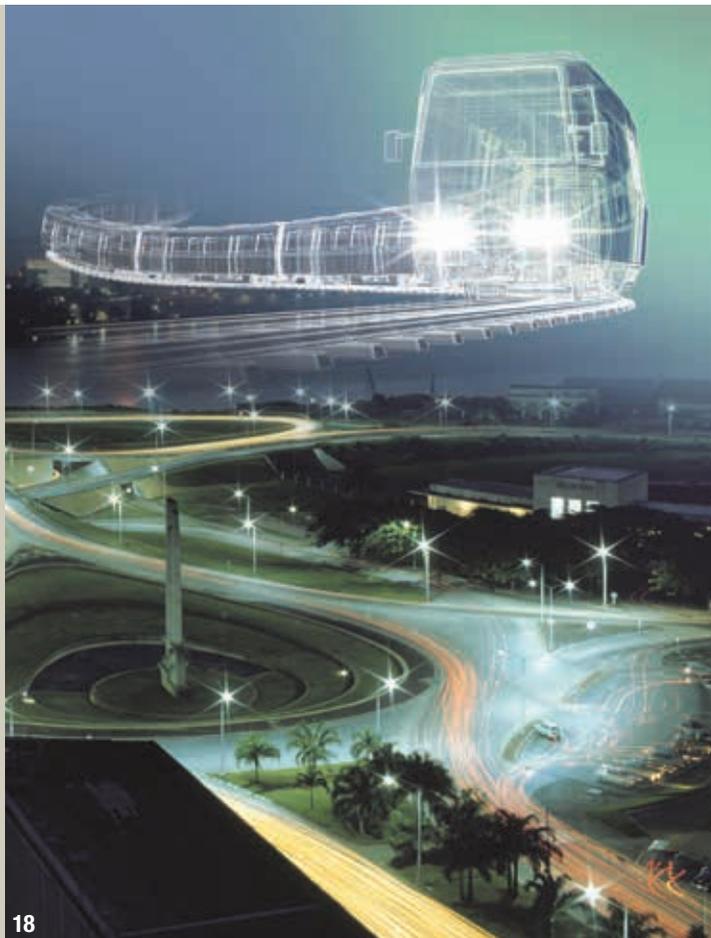
**LONGUEUR DU RÉSEAU : 37,4 km.**

**STATIONS : 18.**

**RAMES : 26 (Alstom).**

**FRÉQUENTATION : 540 000 passagers/jour.**

**VITESSE D'EXPLOITATION : 80 km/h.**



18

© CHRISTOPHE MARTIN

compter uniquement sur de grandes révolutions technologiques. Dès à présent nous agissons partout où nous le pouvons dans une optique de sobriété et de recherche d'optimisation.

C'est indispensable pour tenir les engagements à l'international pris par l'entreprise qui sont de -20% d'émissions de carbone par rapport aux matériaux utilisés couramment aujourd'hui<sup>(1)</sup>. Au-delà du seul choix des bétons qui pourraient nécessiter des mises en œuvre diffé-

rentes pour atteindre des performances équivalentes mais avec des prises plus lentes, cela implique des conséquences sur la conception même des ouvrages, sur les cycles de fabrication et, par voie de conséquence sur leur prix de revient. Ces changements devront par ailleurs être acceptés par les clients.

### Pour conclure ?

À l'international, outre la réduction de l'empreinte carbone et la sécurité

sous tous ses aspects, nous avons également engagé une démarche pour "internationaliser" les équipes de nos filiales.

Dans les pays où nous sommes présents de manière pérenne, il nous faut un management local avec de jeunes ingénieurs et ingénieures locaux.

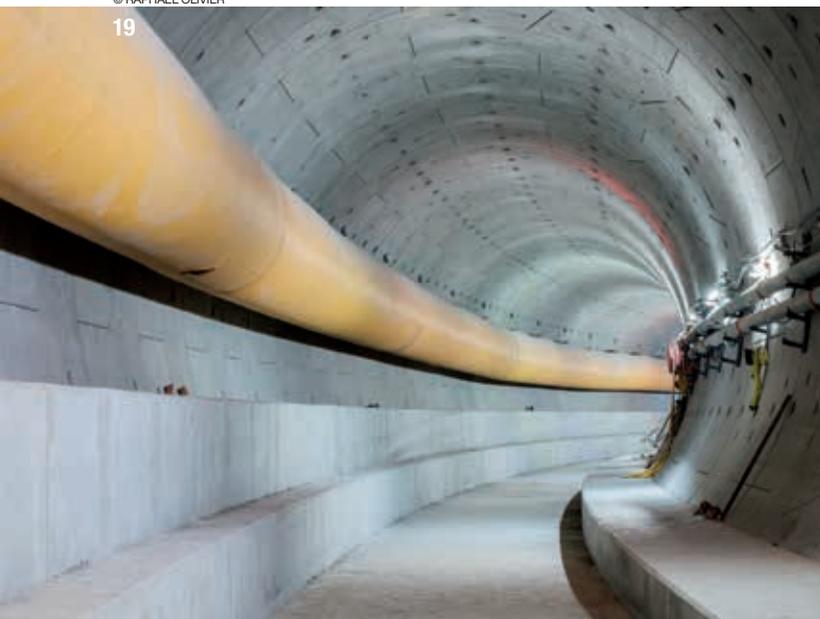
C'est une démarche que nous venons de réaliser à Hong Kong en confiant la direction de Dragages Hong Kong à Patrick Yu, un ingénieur local, que

nous avons formé et qui est d'ailleurs présent dans l'entreprise depuis de nombreuses années. □

1- Le scope 3 est l'un des trois niveaux d'émissions de gaz établis dans le GHG Protocol (Green House Gas Protocol). C'est un protocole concernant les gaz à effet de serre, qui a été lancé en 2001 par le WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) et le WRI (World Resources Institute). Son développement s'est effectué en partenariat avec un ensemble d'acteurs internationaux, tels que les gouvernements, ONG et entreprises.

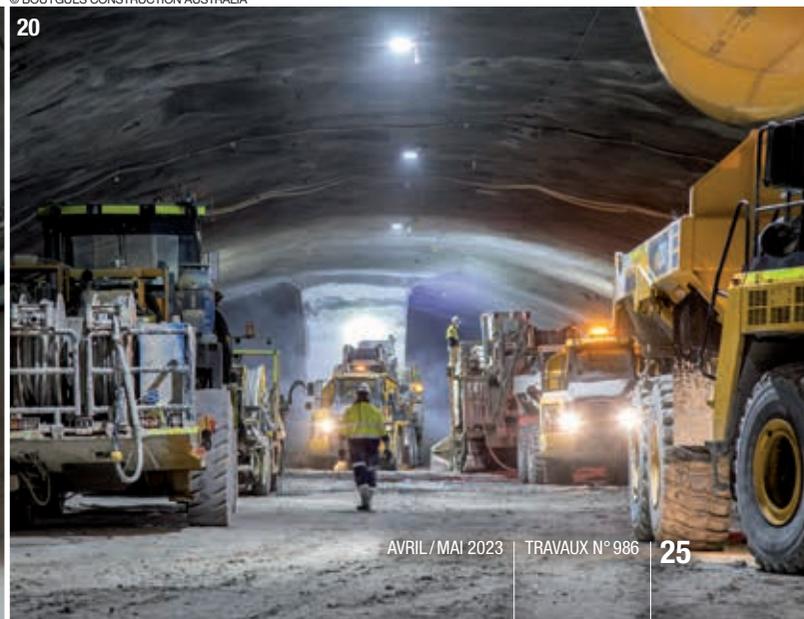
© RAPHAEL OLIVIER

19



© BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA

20





© GEOS 1

# GEOS L'INGÉNIERIE DU RISQUE PARTOUT DANS LE MONDE... OU PRESQUE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

DEPUIS 1998, GEOS EST LA RÉFÉRENCE FRANÇAISE AUPRÈS DES ENTREPRISES ET DES INSTITUTIONS DANS L'ACCOMPAGNEMENT ET LE DÉVELOPPEMENT DE LEURS PROJETS EN ZONES SENSIBLES. AFIN DE LEUR PERMETTRE D'EXPLOITER LEUR POTENTIEL INDÉPENDAMMENT DES RISQUES ENCOURUS, GEOS INTERVIENT DIRECTEMENT, OU PAR L'INTERMÉDIAIRE DE SES PARTENAIRES, PRINCIPALEMENT DANS DES PAYS CONSIDÉRÉS COMME CRISOGÈNES. JEAN-CHRISTOPHE GRIVAUX, VICE-PRÉSIDENT DÉLÉGUÉ AUX OPÉRATIONS DE GEOS, ET ALEXIS MAREZ, DIRECTEUR DES OPÉRATIONS DE LA BUSINESS UNIT " GESTION DES RISQUES ", LÈVENT LE VOILE SUR UNE ACTIVITÉ QUI SE DOIT, PAR NATURE-MÊME, DE S'EXERCER EN TOUTE DISCRÉTION.

La principale mission de Geos est de permettre aux entreprises d'exploiter sereinement leur potentiel de croissance et d'influence, sans que l'environnement ne mette en danger leurs collaborateurs ou leurs biens matériels ou immatériels. Dans les domaines des services, de l'assistance technique et de la sûreté, le Groupe accompagne toute entreprise ou insti-

tution en lui apportant des solutions en matière de gestion des risques et/ou de problématiques opérationnelles et humaines.

## UNE ENTREPRISE PRIVÉE DE GESTION DES RISQUES

« Nous faisons l'ingénierie du risque, indique Jean-Christophe Grivaux. Nous évaluons la dangerosité d'un projet,

**1 - Centre de supervision pour la Force Internationale d'Assistance et de Sécurité (ISAF) à Kaboul.**

les menaces et nous proposons à nos clients les solutions pour contrer ces menaces. Et lorsqu'il faut mettre en œuvre les moyens pour sécuriser - physiquement - nos clients, en l'occurrence les personnes et les biens, nous appuyons sur nos propres ressources ou sur nos partenaires locaux qui sont vérifiés en termes de compliance grâce à l'appui de notre actionnaire l'ADIT<sup>(1)</sup>.

**2- Jean-Christophe Grivaux, vice-président de Geos délégué aux opérations.**

**3- Le team Geos à Mossoul en Irak.**

*Cette règle éthique est très importante dans ce que l'on appelle les Entreprises de Service de Sécurité et de Défense (ESSD), dont nous faisons partie. Nous concevons l'ingénierie que nous faisons réaliser par des partenaires validés, nous contrôlons et nous portons la responsabilité de ces opérations vis-à-vis de nos clients. Contrairement à ce qui existe dans les pays anglo-saxons, par exemple, nous ne sommes pas une société militaire privée, ce qui explique pourquoi nous n'avons pas le droit de travailler armés, »* sauf exceptions (contrats de protection spécifiques au profit des représentations diplomatiques).

Créée en 1998, Geos est la toute première société de gestion des risques française pour accompagner les entreprises et les institutions dans le développement de leurs projets en zones sensibles.

Elle a rejoint en 2019 le groupe français ADIT, leader européen de l'intelligence stratégique et de la "compliance" (2), ancienne agence de l'État privatisée depuis 2011 et dont l'État français reste actionnaire.

À l'origine, l'objectif de Geos, voici plus de 25 ans, était d'accompagner les sociétés, principalement françaises, sur des zones dans lesquelles la sécurité était dégradée, voire plus, ou sur des zones "grises" et de leur permettre de continuer à opérer leur cœur de métier, Geos prenant à son compte la sécurisation des personnes et des biens. C'est le point commun que l'on trouve au sein de toutes les sociétés qui composent le monde des ESSD.

## DES COLLABORATEURS DE TERRAIN

Mais Geos a un atout supplémentaire : sur certaines zones d'opération, où les entreprises ne peuvent pas envoyer leurs propres collaborateurs sur le terrain pour des raisons sécuritaires, syndicales, et/ou assurantielles, elle leur propose d'entrer dans leur cœur de métier en mettant à leur disposition des collaborateurs (souvent des anciens militaires) qui possèdent les compétences industrielles requises, le background sécuritaire et la connaissance du pays.

© MARC MONTAGNON



2

## JEAN-CHRISTOPHE GRIVAUX : PARCOURS

**Jean-Christophe Grivaux intègre l'École Spéciale Militaire de Saint-Cyr en 1981 et passe parallèlement un master d'Économie de l'Université Panthéon-Assas (1983).**

**À sa sortie d'école, il entreprend une carrière militaire au sein des troupes de marine ce qui lui permet de travailler dans plusieurs pays africains : Tchad, Cameroun, Somalie, Djibouti, République Centrafricaine. Entre 1997 et 2005, il poursuit sa carrière dans les services de renseignement.**

**En 2005, il quitte l'institution pour rejoindre Geos comme directeur des opérations de la business unit "gestion des risques".**

**Entre 2006 et 2011, il est conseiller sécurité pour Thales Communication en Afghanistan.**

**En janvier 2011, il est nommé directeur régional CIS & Afghanistan et exerce ses fonctions à Moscou (Russie), Kiev (Ukraine) et Kaboul (Afghanistan).**

**Depuis septembre 2011, Jean-Christophe Grivaux est senior vice-président des opérations du groupe Geos.**

**Ses zones principales d'affectation sont la Libye, l'Irak, l'Asie Centrale, la Russie et la CEI (Communauté des États Indépendants)\*.**

\* - La Communauté des États Indépendants (CEI) a été créée en décembre 1991 par onze pays de l'ex-URSS : Arménie, Azerbaïdjan, Biélorussie, Kazakhstan, Kirghizstan, Moldavie, Ouzbékistan, Russie, Tadjikistan, Turkménistan, Ukraine.



3

© GEOS

En Afghanistan, de 2006 à 2021, un grand groupe industriel français - pour le compte de l'Otan - a externalisé le déploiement, l'installation et l'opération maintenance de son projet en mettant en place une équipe permanente de collaborateurs à tous les niveaux du projet (câbleurs, opérateurs, mainteneurs, installateurs, comptables).

## UNE DOUBLE CASQUETTE

L'intervention de Geos est toujours très ciblée sur un cœur de métier bien spécifique, comme par exemple protéger des Grands Comptes ou des Institutionnels à l'étranger, exploiter des systèmes d'information et réseaux classifiés, opérer des systèmes de surveillance ou de guerre électronique, effectuer des maintenances ou réparations de flotte de véhicules militaires, former sur des métiers de défense, etc.

*« Geos est quasiment la seule à disposer de cette double casquette, précise Jean-Christophe Grivaux. Un premier métier qui consiste à sécuriser nos clients, un deuxième que nous appelons "industrial services" ou service industriel dans lequel nous entrons dans le cœur du métier du client en lui fournissant les personnels adéquats, tout en assurant leur sécurité. »*

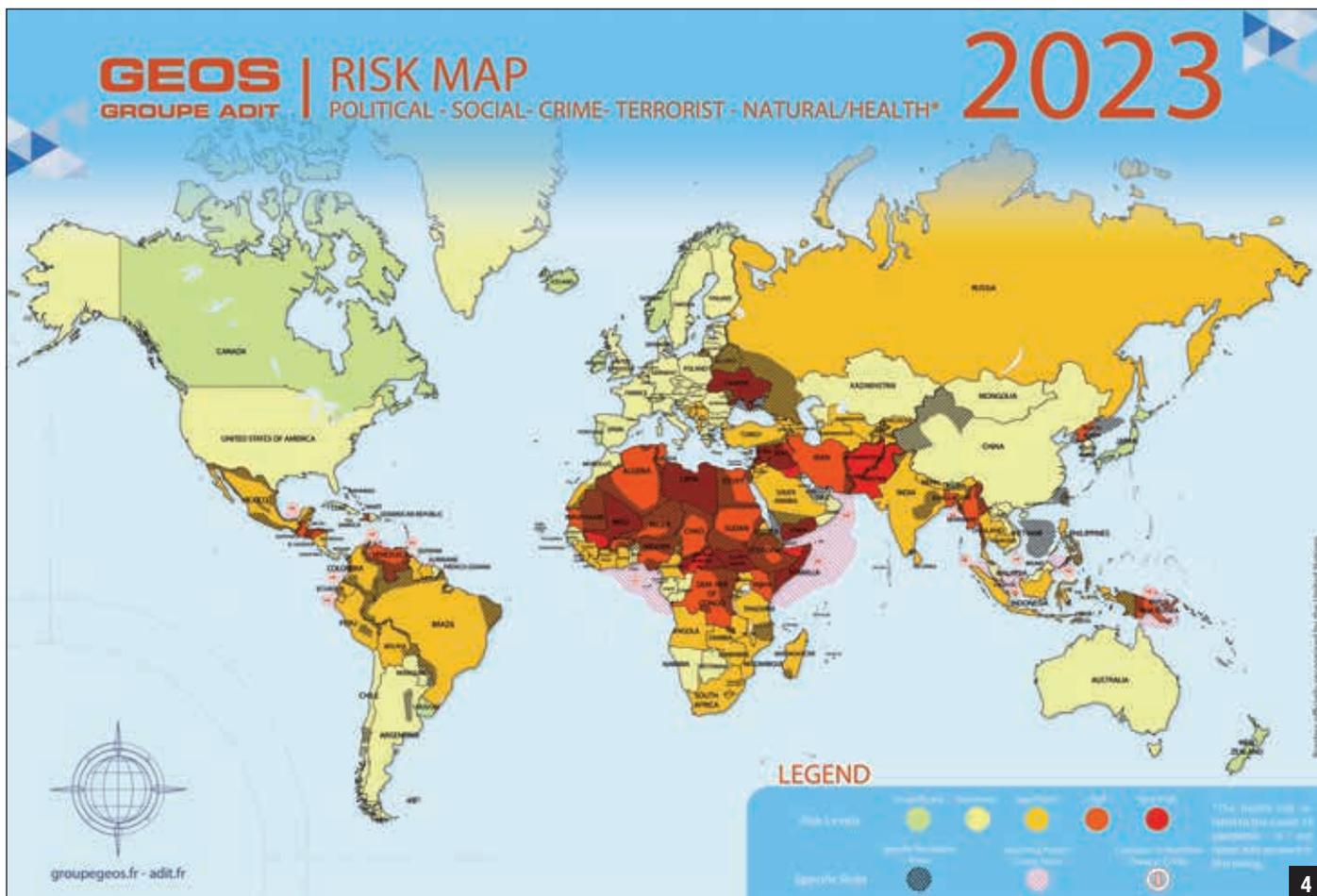
À ceci s'ajoute un troisième métier transverse aux deux premiers : le "Duty of Care" ou devoir de protection, impliquant la responsabilité des entreprises dans la préparation et l'accompagnement de leurs collaborateurs à l'international.

À ce titre, et depuis l'ordonnance Jolo de 1999 (3) et Karachi de 2002 (4), les entreprises françaises ont un devoir d'informer leurs collaborateurs sur la situation sécuritaire et sanitaire de leurs pays de déplacement et l'obligation de mettre en place les dispositifs de sûreté adéquats ou adaptés aux menaces préalablement identifiées.

Au cours de cette dernière décennie, la jurisprudence française s'est considérablement renforcée, obligeant les entreprises à solliciter les ESSD.

## LE SUIVI DES DONNÉES PNR

Les données PNR (dossier passager) sont toutes les informations liées à la réservation des voyageurs, contenues dans les dossiers créés par les compagnies aériennes pour chaque vol (ou réservation hôtels ou véhicules). Au travers d'une plateforme informatisée, elles permettent d'identifier chaque passager et d'avoir accès à aux renseignements concernant son voyage : vols d'aller et de retour, correspondances éventuelles, ▷



moyens de paiement utilisés, services particuliers souhaités à bord...

« Geos dispose d'une équipe spécialement affectée au suivi PNR des collaborateurs de tous ses clients dans le monde, ajoute Jean-Christophe Grivaux. Ce suivi lui permet de surveiller l'ensemble de leur activité pendant leur mission et de veiller ainsi à leur sécurité si une menace se précise. Il assure la protection physique des collaborateurs. »

Ce suivi est complété par une surveillance de l'environnement global du pays (géopolitique, diplomatique, économique, financier), permettant d'identifier les principaux risques encourus : troubles sociaux, troubles ethniques et religieux, délinquance et criminalité, kidnapping, risque terroriste, risque naturel (tremblement de terre, tsunami, ouragan, inondation...), risque sanitaire (Covid-19, peste, paludisme...), risque de conflit, etc.

Geos travaille au quotidien sur ces thématiques, en relevant les incidents s'y rapportant. Ils sont, par la suite, automatiquement transmis aux clients en fonction de leur position géographique, accompagnés de recommandations adaptées au risque encouru. Cela permet de dessiner en temps réel

## GEOS : DES CAPACITÉS INTERNATIONALES

- 350 collaborateurs.**
- + de 1 000 missions d'accompagnement par an.**
- 450 références clients dont 30 entreprises du CAC 40.**
- + de 100 partenaires qualifiés.**
- + de 185 pays suivis.**
- 8 représentations internationales.**
- 35 millions d'€ de chiffre d'affaires.**
- Le groupe ADIT (Compliance - IE - Due diligence) : L'Agence pour la Diffusion de l'Information Technologique (ADIT) est l'une des principales entreprises françaises du secteur de l'intelligence économique.**
- Geos : sécurisation et soutien des projets.**
- Eurotradia : pièces détachées défense.**
- Entreprise et Diplomatie : diplomatie d'affaires.**
- Salveo : portage salarial zones sensibles.**

les incidents en cours dans le monde. À partir de ces données, elle accompagne les entreprises dans le cadre d'avant-projets destinés à des appels d'offres. D'un côté, l'entreprise prend en charge la partie technique et de l'autre, Geos intervient sur la partie environnementale en déterminant le

périmètre du projet ainsi que le type de veille à mettre en place en prévision des risques identifiés. Pour cela, elle utilise à la fois les informations récoltées lors de la veille et se rend sur le terrain pour mettre en évidence des problématiques prévisibles, par exemple les problèmes fonciers, réguliers en Inde.

**4- La carte 2023 des risques établie par Geos : social, politique, crime, terrorisme, environnement/santé.**

### DES ÉQUIPES SUR PLACE

Pour chacun de ses clients, Geos est en mesure de dépêcher sur place une équipe de spécialistes du domaine concerné.

« Nous sommes une PME, indique Jean-Christophe Grivaux. C'est d'ailleurs la particularité de toutes les sociétés françaises intervenant dans le même domaine que nous, par opposition à nos concurrents anglo-saxons qui sont des géants. Par exemple, la société canadienne Garda, c'est 8 milliards d'euros de chiffre d'affaires, la société anglo-américaine G4S, c'est 3 milliards d'euros de chiffre d'affaires. Qui dit PME signifie par là-même qu'il ne nous est pas possible d'être implantés partout dans le monde. Nos implantations, qui figurent en bleu foncé sur la carte, sont celles où nous avons une permanence physique avec un bureau tenu par des filiales de Geos. »



5

© GEOS



6

© GEOS

Le siège social se situe à Paris-La Défense, dans la tour Franklin. Les filiales sont basées en Angleterre, à la City de Londres, et en Allemagne, à Bonn.

Geos dispose d'une représentation importante en Amérique latine avec une filiale à Mexico City, au Mexique, qui couvre d'autres représentations régionales comme le Venezuela (Caracas), la Colombie (Bogota), le Brésil (Rio de Janeiro), le Panama (Panama), l'Argentine (Buenos-Aires). Chaque filiale possède son propre directeur. Dans les pays où Geos n'est pas implantée physiquement, elle dispose d'un vivier de partenaires avec lesquels elle entretient des relations permanentes. Ces experts peuvent être "activés" dès lors que la demande d'un client est émise.

Alexis Marez précise à ce sujet que « Geos fait partie des consortiums très restreints autorisés à concourir auprès de l'Union européenne pour la sécurisation des observateurs envoyés dans

**5- Une équipe de Geos en opération au Mali avec un hélicoptère des Nations Unies.**

**6- Un ballon des Nations Unies à Kidal au Mali.**

**7- Une équipe Geos en cours de montage d'une installation de communication et de surveillance au Mali.**

**8- Une antenne de communication de Geos à Kaboul en Afghanistan.**

**9- Montage d'une antenne de communication en Haïti.**

le cadre des missions d'observation électorale. C'est le cas des élections au Kenya qui se sont déroulées en 2022, pour lesquelles Geos a été missionnée pour assurer la protection des observateurs neutres déployés sur place par l'Union Européenne. Après identification des risques et des menaces qui peuvent affecter les observateurs, nous mettons en place en amont un système de sécurisation préalablement au déroulement proprement dit des élections. Cela va de la gestion d'un incident localisé à une éventuelle évacuation complète de la mission en cas d'embrasement dans le pays, ce qui est déjà arrivé ailleurs. »

#### DES FILIALES CIBLÉES

Geos est présente en Afrique avec des filiales en Libye (Tripoli) et au Maroc (Casablanca).

Elle est également établie depuis quasiment deux ans, pour des missions de longue durée pour ses clients, au Tchad, au Cameroun et en République

Démocratique du Congo (RDC) dans le cadre de la construction de routes et de ponts.

« En RDC, précise Alexis Marez, où les projets d'infrastructures sont très nombreux, Geos est sollicitée par les entreprises pour détecter les problèmes éventuels qu'elles pourraient rencontrer dans la gestion de leurs chantiers et les risques que pourraient encourir leurs collaborateurs, tant au niveau sécuritaire que sanitaire. Dans ces pays, les entreprises opèrent dans des zones où il n'y a rien. Dans cette situation, il est demandé à Geos, outre d'assurer au quotidien la sécurité des personnes et des chantiers, d'établir par exemple des plans de contingence pour pallier toute éventualité. »

Dans des pays tels que l'Afghanistan et l'Irak, et bien que les diplomates n'y soient plus physiquement présents (Afghanistan), Geos sécurise les ambassades de France avec un dispositif opérationnel pour assurer la sécurité des bâtiments. ▷



7

© GEOS



8

© GEOS



9

© GEOS



10  
© GEOS



11  
© GEOS

Haïti constitue l'un des autres pays d'intervention majeurs de la société, en particulier dans le domaine de la construction d'infrastructures. Elle intervient, pour le compte de ses clients, à travers le déploiement d'experts sur place chargés de veiller au bon déroulement de la mission ou à des accompagnements sécuritaires. Chaque projet requiert une approche spécifique, selon ses caractéristiques comme sa localisation, sa dimension et les équipes sur place.

« Notre intervention se situe d'ailleurs très souvent dès la phase d'appel d'offres, précise Alexis Marez, au cours de laquelle nos clients nous sollicitent afin que nous puissions identifier avec eux tous les problèmes éventuels et les moyens de mitigation afin que ces derniers soient budgétés. Cela se traduit peut ainsi et ensuite concrètement se traduire par la mise en place sur le terrain d'un "security manager", membre de Geos, qui est responsable de la sécurité au sein du chantier et

des déplacements qu'il peut nécessiter, par exemple pour l'approvisionnement en matériaux, avec tous les risques que cela comporte dans un pays où les attaques de gangs, les enlèvements, les attaques de véhicules sont quotidiennes. Les convois de matériaux doivent être surveillés en permanence. »

Dans des pays en crise comme Haïti, la République Centrafricaine ou le Cameroun, les matériaux sont importés depuis l'étranger, ce qui nécessite une sécurisation de leur affrètement.

« Notre mission, précise Jean-Christophe Grivaux, c'est de préparer les déplacements d'un point de vue logistique et sécuritaire et de nous assurer que les flux logistiques soient bien assurés. Cela nécessite d'étudier des itinéraires de contournement, de sécuriser les routes lorsqu'elles sont coupées et de nous assurer, dans les phases d'attente, qu'il n'y aura pas de menace sur la sécurité des personnes du convoi et des biens. »

**10- L'équipe de Geos à Kaboul (Afghanistan).**

**11- Camp des Nations Unies à Kidal, au Mali.**

**12- Une équipe de mécaniciens en formation en Afrique.**

**13- Maintenance et formation en Afrique.**

pas autorisé, Geos assure l'interface entre le chantier et les autorités - police nationale ou armée - chargées d'assurer la sécurité dans le pays.

### SÉCURITÉ + ASSISTANCE TECHNIQUE

Les missions que se chargent d'exécuter les équipes de Geos ne se limitent d'ailleurs pas à la sécurité proprement dite.

Geos est chargée de maintenir en condition opérationnelle du matériel dans certains pays avec lesquels la France possède des accords de coopération civile ou militaire. Le gouvernement français envoie des véhicules et des engins militaires et civils pour équiper les forces armées, nécessitant une maintenance régulière.

C'est là que Geos intervient : « Nous sommes capables, précise Jean-Christophe Grivaux, d'envoyer des personnels techniques "Geos" qui possèdent à la fois connaissance métier et la connaissance pays et qui vont aller faire

Dans ce type de situation, Geos dispose de partenaires locaux, possédant une connaissance précise des caractéristiques du pays. Son rôle n'est pas d'intervenir directement, mais de concevoir les mesures de sécurité, de s'assurer de leur bonne mise en œuvre et de leur qualité. Elle fait donc appel à des prestataires, possédant des licences de sécurité et l'autorisation d'être armés, tout en s'assurant du respect des lois du pays dans lequel opère le partenaire. Dans les pays où le port d'arme n'est



12  
© GEOS



13  
© GEOS

14- Surveillance d'un chantier routier en Afrique.

15- Présence de l'ISAF sur l'aéroport de Kaboul Kaia en Afghanistan.

16- Centre de communication opéré par Geos pour l'ISAF à Kaboul.

17- Scheliter de communication de Geos au Mali.



© GEOS

14

le maintien en condition opérationnelle de ces véhicules, de ces engins de chantier au Cameroun, en Afghanistan, sur des théâtres d'opération, etc. Nous travaillons pour des opérateurs importants fournisseurs de la Direction Générale de l'Armement (DGA) qui ont des contrats principalement avec des pays africains mais aussi, par exemple, en Indonésie. Dans la partie maintenance, comme il s'agit de pays à risque dans lesquels nos clients ne souhaitent pas envoyer leurs propres opérateurs, ils font appel à des sociétés comme Geos qui envoient sur place ses techniciens spécialistes du matériel concerné, qui ont déjà travaillé, dans une autre vie, dans ces pays, qui connaissent le background sécuritaire et sont capables de partir par exemple - c'est arrivé tout récemment - en Colombie. »

Si Geos appuie les entreprises dans la prévention des risques et les accompagne au quotidien, elle assure également la gestion de crise dans les pays où ses clients sont présents et ne possèdent pas la logistique nécessaire pour y faire face. Cela peut aller de la gestion d'un simple incident à une crise générale pouvant déstabiliser un pays.

## 9 DOMAINES DE COMPÉTENCES

**MICRO-DÉFENSE** : mobilisation de mécaniciens, remise en condition opérationnelle, pilotage de marché et gestion de flotte.

**SURVEILLANCE ÉLECTRONIQUE** : installation de solutions de détection-alerte, exploitation de solutions de surveillance, expertise de guerre électronique (ELINT, IMINT & COMINT).

**SUPPORT DE PROJETS INTERNATIONAUX** : gestion de projet sur site, gestion logistique et base-vie, gestion financière sur site, gestion de la sécurité, portage à l'international.

**SYSTÈMES D'INFORMATION ET RÉSEAUX PROTÉGÉS** : mobilisation d'experts SI (Système d'Information), déploiement de solution IT (solution informatique) en zone sensible, exploitation et maintenance de réseaux (satellites, Data Center, réseaux classifiés).

**HOTLINE ET GESTION DE CRISE** : service complet d'assistance 24/7, informations risques pays, recommandations opérationnelles.

**GEOS TRAVEL SECURITY** : solution globale de gestion des risques dédiée à la mobilité internationale.

**VEILLE ET ANALYSE RISQUES-PAYS** : suivi et analyse du contexte politique, social, sécuritaire et sanitaire de plus de 185 pays dans le monde.

**CONSEIL/INGÉNIERIE PROJETS** : Système de Management Intégré de la Sûreté (SMIS) basé sur les quatre piliers fonctionnels anticipation, prévention, conduite opérationnelle, réaction.

**FORMATION** : Organisme de formation enregistré depuis 2002, GEOS dispense chaque année des formations et sensibilisations sur des thématiques variées (sûreté à l'étranger, gestion de crise, K&R, ...) liées à la gestion des risques à l'international. Geos met également en place une formation dédiée à la formation des experts Sûreté à l'international (ESI).

En fonction de la gravité de la situation et de l'organisation sur place de l'entreprise, Geos en assure la gestion et déploie "le" collaborateur concerné : un spécialiste de la zone, un négociateur, un psychologue, un avocat, etc. Parmi les donneurs d'ordre auxquels elle répond figurent en premier lieu les grandes entreprises françaises de Travaux Publics et de bâtiment, les entreprises françaises du domaine de l'énergie, de télécommunications, mais aussi des PME dans le domaine agro-alimentaire ou forestier, l'Union Européenne, l'OTAN, l'ONU et, indirectement l'État Français via le ministère des Affaires Étrangères et ses ambassades...

Lors de la crise sanitaire du Covid-19, Geos a affrété plusieurs avions pour rapatrier des ressortissants français et leurs familles de Haïti et d'Algérie, en concertation et conjointement avec les ambassades de France dans ces pays. □

1- La "compliance" peut être définie comme l'ensemble des processus qui permettent d'assurer la conformité des comportements de l'entreprise, de ses dirigeants et de ses salariés aux normes juridiques et éthiques qui leur sont applicables.

2- Le processus de "due diligence" désigne l'ensemble des vérifications des tierces parties quant à la réputation et l'honorabilité de la société cible et de ses principaux dirigeants, la structure capitalistique ainsi que les bénéficiaires ultimes, les réseaux relationnels des personnes concernées, la solidité financière de la cible et l'existence d'éventuels litiges et/ou passifs occultes, les risques éventuels de corruption ou de réputation et enfin la capacité opérationnelle de la société.

3- Kidnapping de 3 ressortissants français sur l'île de Jolo aux Philippines en 1999 par le groupe terroriste Abu Sayyaf.

4- Attentat contre un bus transportant les employés de la Direction des Constructions Navales (DCN) à Karachi le 8 mai 2002, ayant fait 14 morts dont 11 employés.



15

© GEOS



16

© GEOS



17

© GEOS



# LE PONT ESSALAM À RABAT

AUTEURS : CLAUDE LE QUERE, DIRECTRICE DES OUVRAGES D'ART, EGIS - JEAN-BERNARD NAPPI, ARCHITECTE, EGIS - BENOÎT BOLZICCO, INGÉNIEUR CHEF DE PROJET TRAVAUX, EGIS - CONSTANTIN ZACHAROPOULOS, INGÉNIEUR CHEF DE PROJET ÉTUDES, EGIS

L'EXTENSION DU TRAMWAY DE RABAT À SALÉ S'INSCRIT DANS UNE DÉMARCHÉ VOLONTARISTE DE DÉVELOPPEMENT DES MODES DE TRANSPORT DOUX, DÉCARBONISÉ ET SÉCURISÉ POUR LES HABITANTS DE LA CAPITALE. AU POINT CULMINANT DU TRACÉ, UN OUVRAGE EMBLÉMATIQUE A ÉTÉ CONÇU DANS DES DÉLAIS EXTRÊMEMENT CONTRAINTS. FABRIQUÉ INTÉGRALEMENT AU MAROC, CE BOWSTRING À ARC CENTRAL PORTE DEUX VOIES DE TRAMWAY ET DE LARGES TROTTOIRS PIÉTONS. IL S'ADAPTE À UN TRACÉ TRÈS CONTRAINT ET À UN BIAIS IMPORTANT ET S'INSÈRE AVEC ÉLÉGANCE DANS UNE ZONE ARBORÉE DE LA COMMUNE DE SALÉ.



## LE CONTEXTE GÉNÉRAL

Le tramway de Rabat-Salé est un système de transport en commun en site propre qui dessert les villes de Salé et Rabat. Les deux premières lignes du réseau ont été ouvertes au public le 23 mai 2011. Ces lignes font aujourd'hui 27 km, comprennent 43 stations de voyageurs (figure 2) et transportent près de 120 000 personnes par jour de part et d'autre du fleuve Bouregreg. Deux extensions à la Ligne 2 ont été réalisées entre 2018 et 2021, vers le quartier Yacoub El Mansour à Rabat et le quartier Moulay Ismail à Salé. Ces extensions permettent de desservir des quartiers denses en population sur un linéaire de 7 km. Leur conception intégrée dans la ville

permet aussi d'améliorer l'environnement urbain et d'offrir un haut niveau de service à ses usagers. Ces extensions doivent permettre à 40 000 voyageurs supplémentaires

1- Ouvrage finalisé - vue du dessous.  
2- Réseau du tramway de Rabat-Salé.

1- Completed structure - bottom view.  
2- Rabat-Salé tramway network.

par jour de profiter des avantages du tramway de Rabat-Salé et d'économiser ainsi 3600 teq CO<sub>2</sub>/an. Il contribue donc à faire de Rabat et Salé des agglomérations sobres en carbone et compatibles avec l'accord de Paris sur le climat. Il a des impacts économiques importants, en particulier pour les jeunes et les femmes qui en sont les principaux usagers. Il leur permet un meilleur accès à l'emploi et aux services de santé et d'éducation. Enfin le projet permet aussi une amélioration du cadre de vie de Rabat et Salé à travers une réduction des nuisances et de la pollution mais aussi requalification urbaine et augmentation de l'attractivité des quartiers autour du tracé.

## LE FRANCHISSEMENT DE LA ROUTE AIN HOUALLA PAR LE TRAMWAY

La maîtrise d'ouvrage des extensions est la Société du Tramway de Rabat-Salé et le maître d'œuvre général du tramway est le groupement Systra/Cid. La Ligne 2 enjambe la route principale Ain Houalla, boulevard à 2x2 voies reliant Salé à Rabat.

L'ouvrage, dénommé viaduc Essalam, est donc le plus important du projet d'extension du tramway.

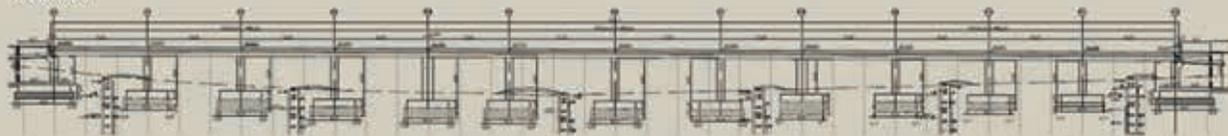
L'entreprise attributaire des travaux du viaduc Essalam a été choisie en juin 2018, il s'agit de la Société Générale des Travaux du Maroc.

La conception d'origine du projet comportait un ensemble de 3 ouvrages à 4 travées continues de 15 m de portée : un premier ouvrage d'accès numéroté de C0 à PC4, un ouvrage principal de franchissement entre PC4 et PC8, et un second ouvrage d'accès de PC8 à C12. L'ensemble étant encadrés par des remblais entre murs de soutènement, de respectivement 109 m et 83 m.

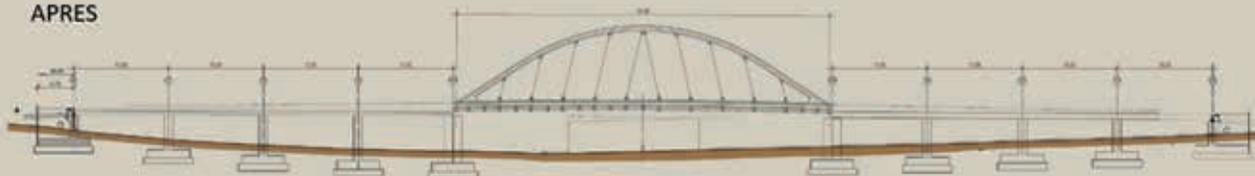
En 2019, la décision a été prise de faire de ce viaduc un symbole visuel plus fort et plus marquant, avec notamment un profil en long nettement plus haut que dans la conception initiale. Il a donc fallu lancer immédiatement l'étude et la construction de cet ouvrage, dans une forme nouvelle, avec la contrainte que l'ouvrage s'est retrouvé sur le chemin critique de l'ensemble du projet.

## ÉVOLUTION DE LA SOLUTION AVANT ET APRÈS LA RÉHAUSSE

AVANT



APRES



3

© GRID



4

© GRID

Les études ont été lancées d'après la logique suivante : étude d'un nouveau profil en long d'abord, compatible avec les contraintes propres au tramway de raccordement aux extrémités et de pente et de rayons de courbure maximaux tout en dégageant le plus de hauteur au-dessus du boulevard, puis étude des ouvrages à proprement parler, avec le réhaussement des piles

des viaducs d'accès d'une part et le choix de l'ouvrage au-dessus du boulevard. Une modification importante de conception a dû être mise en œuvre (figure 3).

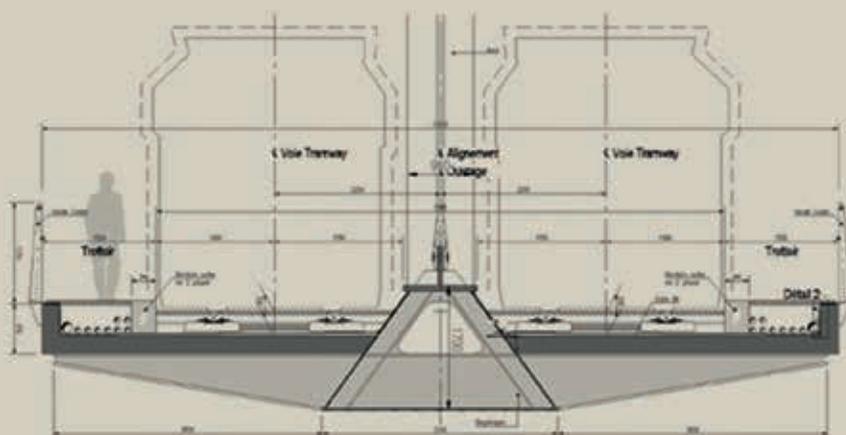
L'ouvrage principal à concevoir et à construire devient un bowstring central reposant sur les deux piles culées d'extrémité PC4 et PC8, les piles P5, P6 et P7 étant supprimées (figure 4).

L'augmentation du gabarit de l'ouvrage, pour le porter à 8 m, implique de surélever les profils en long des rampes d'accès de 0 à 1,60 m. C'est pourquoi, au-dessus des tabliers d'accès déjà réalisés, il a été décidé de concevoir des ouvrages de rattrapage qui reposent sur les tabliers existants.

Le profil en long rehaussé présente une pente maximale de 3,6% et un rayon

entrant de 915 m, et le franchissement est devenu un ouvrage complexe, bow-string unique sur l'axe de l'ouvrage (figure 5), première du genre pour un ouvrage supportant un trafic de tramway avec ses charges dynamiques importantes. De plus les piles ne sont pas perpendiculaires à l'axe de l'ouvrage qui présente donc un biais important.

## PROFIL TRANSVERSAL FONCTIONNEL DU PONT PRINCIPAL TYPE BOWSTRING



5

© GRID

3- Évolution de la solution.

4- Isométrie de la solution.

5- Profil transversal fonctionnel du pont principal type bowstring.

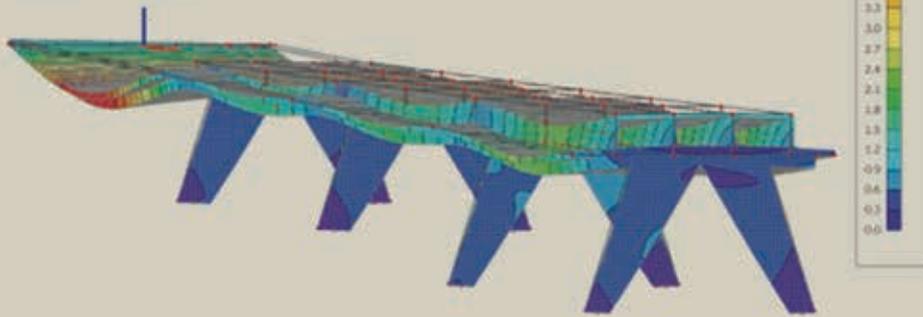
3- Evolution of the solution.

4- Isometry of the solution.

5- Functional cross section of the main bowstring arch type bridge.

## DÉPLACEMENTS VERTICAUX SUR LE MODÈLE DU VIADUC D'ACCÈS C0-P4

**Déplacements 3D**  
 Valeur: Ubase  
 Calcul: Isométrie  
 Cas de charge: Poids propre  
 Sélection: Tout  
 Position: Aux nœuds, moyennée sur  
 macro. Système: 5G, maillage E7



**6- Déplacements verticaux sur le modèle du viaduc d'accès C0-P4.**

**7- Vue isométrique du bowstring et des viaducs d'accès dans le modèle global.**

**8- Contre-calcul - premier mode de flambement.**

**6- Vertical displacements on the model of access viaduct C0-P4.**

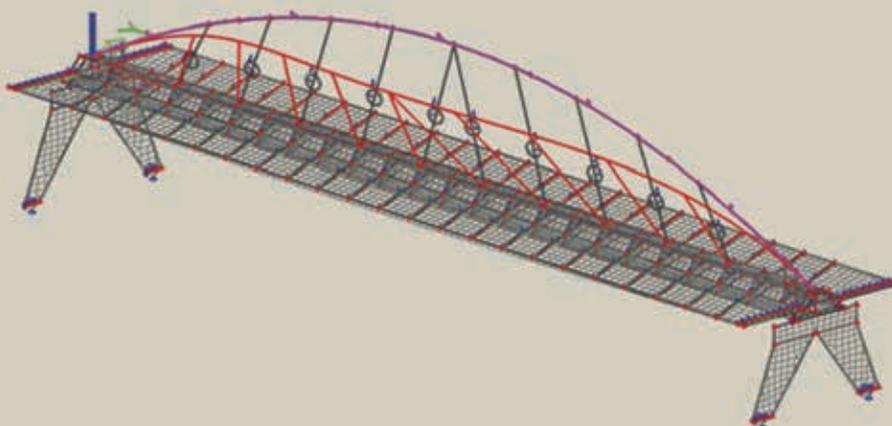
**7- Isometric view of the bowstring arch and access viaducts in the global model.**

**8- Counter-calculation - first buckling mode.**

## VUE ISOMÉTRIQUE DU BOWSTRING ET DES VIADUCS D'ACCÈS DANS LE MODÈLE GLOBAL



## CONTRE-CALCUL - PREMIER MODE DE FLAMBEMENT



### L'ORGANISATION DU CONTRÔLE EXTÉRIEUR DANS LE CADRE DE LA RÉALISATION DU VIADUC

Les choix techniques ont demandé des vérifications importantes de la résistance de l'ouvrage aux charges, sous la contrainte d'un planning de réalisation très tendu. En avril 2019, le maître d'ouvrage a décidé de faire appel à un bureau d'étude indépendant pour mener une mission d'expertise et effectuer le contrôle extérieur des études de re-conception de l'ouvrage présentée par la Société Générale des Travaux du Maroc dans son étude de faisabilité. Cette mission est confiée à Egis Ouvrages d'art. La vérification de la faisabilité technique a été concrétisée par un rapport qui dégageait les premières conclusions partielles :

- Pour les viaducs d'accès, la dalle en béton armé existante se trouvait de fait largement dimensionnée et permettait les charges supplémentaires liées à la modification du profil en long. Les détails de la structure sus-jacente et de son accroche ont été finalisés et affinés ;
- Pour le bowstring, la conception générale proposée par le bureau d'études d'exécution Grid était bonne en termes d'élançement et de géométrie générale. Il était cependant nécessaire de raidir la section transversale à la torsion en fonction des critères ferroviaires et d'optimiser les épaisseurs de béton non structurel liées aux voies tram pour garantir une épaisseur structurelle plus importante.

Une fois la faisabilité validée, Egis Ouvrages d'art a réalisé l'ensemble de la mission VISA des études d'exécution de la Société Générale des Travaux du Maroc réalisées par Grid, qui intégraient les optimisations évoquées ci-avant.

## CONTRAINTES TECHNIQUES DU PROJET

Toutes les hypothèses à prendre en compte pour les calculs (caractéristiques des matériaux, charges, combinaisons, etc.) ont été définies par le maître d'œuvre avec l'accord du maître d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre générale de la ligne. Bien que le Maroc ait sa propre réglementation de la construction, les Eurocodes ont été retenus pour ce projet, car considérés comme étant parmi les réglementations les plus abouties et formant un corpus cohérent pour un ouvrage de tram.

Concernant les charges d'exploitation, l'ouvrage a été calculé sous le convoi réel qui circulera à 50 km/h sur la future ligne, à savoir le tramway Citadis 302 d'Alstom pondéré par le coefficient d'amplification dynamique selon l'Annexe C de l'EN1991.

La charge militaire à chenilles MC120 (110 t) initialement prévue a - quant à elle - été exclue car beaucoup trop pénalisante pour ce type d'ouvrage qui, suspendu par une file centrale, est particulièrement sensible à la torsion. En plus des charges verticales, les surcharges sont susceptibles de développer des efforts longitudinaux qui vont agir au niveau du plan de roulement, c'est-à-dire les rails.

La combinaison d'actions considère la simultanéité d'un freinage d'urgence sur une voie et d'une accélération de démarrage sur l'autre voie, les tramways étant chargés. Ces efforts ont été pris en compte tant pour les tabliers des viaducs et du bowstring que pour leurs appuis.

L'interaction voie-ouvrage ou rail-structure (IRS) correspond au phénomène de frottement entre les rails et le tablier suivant une loi élasto-plastique.

Les effets résultants de la réponse combinée du système voie-ouvrage aux actions variables doivent être pris en compte pour le calcul du tablier, des appareils d'appui fixes, des piles, ainsi que pour vérifier les sollicitations dans les rails. En pratique l'étude de l'interaction voie-ouvrage tend à mieux répartir les efforts entre viaducs d'accès et pont principal, limitant ainsi les déplacements longitudinaux sous freinage-accélération.

Les vérifications à la fatigue de l'ouvrage métallique ont été menées selon l'EN1993 Partie 9 pour une circulation de 150 tramways par jour et par voie (300 passages/jour sur l'ouvrage).

Pour la justification à la fatigue il a été vérifié que l'étendue de contrainte équivalente sous charge de tramway reste inférieure à la limite de référence  $\Delta\sigma_C$  à 2 millions de cycles.

La ligne de Rabat-Salé est en zone de sismicité 3 (modérée), et l'ouvrage de catégorie d'importance II.

**9- Fabrication du caisson central du tablier.**

**10- Fabrication de l'arc.**

**11- Fabrication de l'arc.**

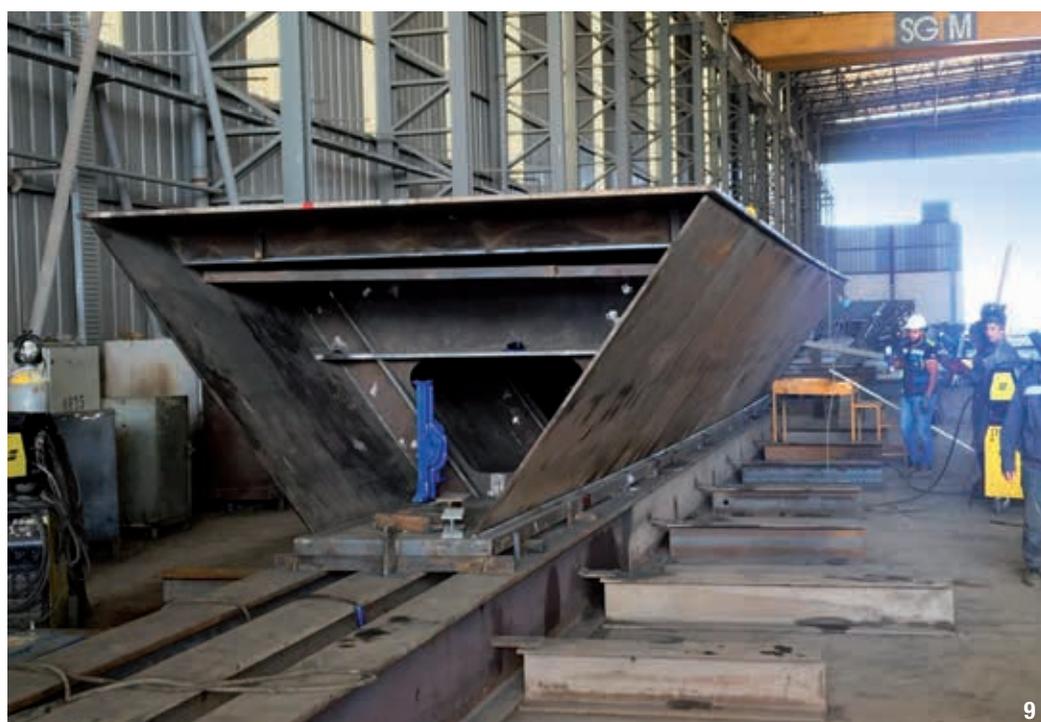
**9- Manufacture of the deck's central caisson.**

**10- Arch manufacturing.**

**11- Arch manufacturing.**

L'irrégularité de l'ouvrage due notamment au biais impose un calcul par la méthode spectrale multimodale. Un coefficient de comportement de  $q=1,0$  a été retenu.

Il est à noter que malgré les importantes modifications des tabliers des viaducs d'accès et du bowstring, pour des raisons architecturales le coffrage des piles ne pouvait pas être modifié. Ceci fut la contrainte principale lors la conception du schéma statique du pont principal, c'est-à-dire de la position des appareils d'appui fixes.



9



10



11

© EGIS BENOÎT BOLZICCO

© EGIS BENOÎT BOLZICCO



© EGIS BENOÎT BOLZICCO

12

## DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES

Les situations de projet prises en compte dans les études d'exécution représentent l'ensemble des situations de projet : à la mise en service et l'infini, ainsi que toutes les phases transitoires de construction, de réparation et de maintenance que verra l'ouvrage, notamment le remplacement d'une suspente sous circulation.

**12- Pose de la partie centrale de l'arc.**

**13- Grutage de la partie centrale de l'arc.**

**12- Placing the central part of the arch.**  
**13- Hoisting the central part of the arch.**

Bien que les charges des tramways soient inférieures à celles des trains classiques, l'ouvrage doit répondre aux critères spécifiques aux ponts ferroviaires dans le but de limiter les contraintes excessives et les vibrations. Les vérifications portent notamment sur la limitation de la déformation verticale du tablier, des rotations sur appuis, du gauche afin d'éviter le déraillement des trains. S'y ajoute la limitation du

déplacement longitudinal du point fixe sous freinage-démarrage, ainsi qu'un critère de flèche pour le confort des passagers.

Dans un premier temps l'ouvrage a été vérifié en résistance par une analyse élastique tenant compte du phasage de construction (palée provisoires, réglage des suspentes, etc.).

La section des âmes inclinées du caisson a été ignorée dans le calcul des contraintes car de classe 4. Ce modèle phasé est le même qui a servi par ailleurs au réglage du profil en long, à la détermination des tensions dans les suspentes et à l'étude de la rupture d'une suspente quelconque de l'ouvrage.

Dans un second temps l'ouvrage a été vérifiée vis-à-vis de la stabilité globale par une analyse élastique au second ordre, puisque le coefficient critique du 1<sup>er</sup> mode de flambement hors imperfections de l'ouvrage est  $\alpha_{cr,1} = 5.37 < 10$  (figure 8). L'imperfection globale de l'arc hors plan a été déterminée selon EN1993-2 §5.3 et l'Annexe D3 à  $L_e/200 = 110$  mm. L'imperfection en plan étant mieux maîtrisée, le bureau d'étude a choisi de simplement majorer le moment fléchissant d'un facteur  $1/(1-1/\alpha_{cr,5}) = 5\%$ .

Enfin, l'action sismique a été étudiée par une analyse spectrale multimodale. La valeur maximale du déplacement est obtenue par l'approche probabiliste de la combinaison quadratique complète (CQC). Le cas sismique est dimensionnant pour les piles PC4 et PC8 du bowstring.



© EGIS BENOÎT BOLZICCO

13

## LE CONTRE-CALCUL DU CONTRÔLE EXTÉRIEUR

Les différentes structures (viaduc d'accès, bowstring) ont d'abord été modélisées séparément puis recombinaison au sein d'un modèle global piles incluses pour l'étude IRS. Pour les viaducs, deux modèles ont été réalisés, celui de la structure initiale et celui de la nouvelle structure avec rampe (figure 6).

La modélisation s'est faite en éléments 1D (barres pour l'arc et les consoles) et 2D (éléments surfaciques coques pour le caisson métal et la dalle béton). Les appareils d'appui du bowstring sont modélisés par des barres, les pieds de piles sont encastrés sur des appuis nodaux (figure 7).

La contre-modélisation du contrôle extérieur a permis le contre-calcul et la validation des résultats obtenus par le bureau d'études d'exécution (résistance, stabilité au flambement (figure 8), sismique, phasage), d'une part, et la prise en compte de l'interaction voie-ouvrage permettant la réduction des déplacements horizontaux, d'autre part.

## LE TRAITEMENT ARCHITECTURAL DE L'OUVRAGE

Le travail de l'architecte tout au long de sa mission a été d'apporter des réponses architecturales aux diverses problématiques techniques rencontrées. Ce travail a fait l'objet de très nombreux échanges entre la maîtrise d'ouvrage, les ingénieurs structure et les entreprises afin de proposer des solutions facilement et rapidement réalisables. Les enjeux étaient multiples mais se concentraient tous sur la perception des rives de l'ouvrage vue frontalement depuis de la route Ain Houalla.

Les points suivants ont été abordés :

- Le raccordement des tabliers entre la rampe existante et le nouvel ouvrage avec une volonté d'adoucir la différence de niveau entre l'existant et le projet ;
- L'abaissement de la hauteur de l'arc pour rendre le franchissement de la voie plus dynamique visuellement ;
- Le traitement des corniches et garde-corps en apportant un maximum de transparence et de simplicité ;
- Le traitement des rives du tablier en affinant les pièces de pont du tablier à leur extrémité.

Pour l'aspect colorimétrique de l'ouvrage, le parti retenu a été la sobriété avec des teintes claires en lien avec les ouvrages déjà en place et pour favoriser l'intégration du franchissement dans le contexte verdoyant du site.



14a



14b

© SGTM

© SGTM

## LES TRAVAUX DE RÉHAUSSE

Les travaux de réhausse des viaducs d'accès se sont déroulés de juillet à septembre 2019, avec :

- La réalisation de scellements dans la dalle déjà réalisée ;
- Le coffrage et le ferrailage des réhausse ;

- La pose de voie sur selles ;
- L'installation des poteaux LAC ;
- Et la mise à terre.



15

© EGIS BENOIT BOLZICO

## LA FABRICATION DU BOWSTRING

La charpente métallique du bowstring a été intégralement fabriquée dans les usines de la Société Générale des Travaux du Maroc, en commençant par le caisson central constituant la partie centrale du tablier (figure 9) et les consoles latérales à assembler sur site, puis en finissant par la fabrication de l'arc.

L'arc a une section relativement modeste 900x800 mm mais avec des tôles de forte épaisseur (50 et 60 mm).

**14- Suspentes avec ridoirs.**

**15- Ferrailage du hourdis béton support des voies tramway, de part et d'autre de l'arc.**

**14- Hangers with tensioners.**

**15- Rebars of the concrete top slab supporting the tramway tracks, on either side of the arch.**



© RABAT RÉGION MOBILITÉ  
16

16- Ouvrage finalisé - vue depuis la route Ain Halla.

16- Completed structure - view from Ain Halla highway.

La principale difficulté réside dans les déformations importantes lors du soudage. Ceci implique d'utiliser un banc de soudage avec butées latérales et d'ajouter des diaphragmes et des profils pour garantir la géométrie correcte. Les figures 10 et 11 illustrent la fabrication de l'arc.

La seconde difficulté réside dans la fabrication des oreilles d'attache des suspentes dans l'arc et dans le tablier. Étant donnée la sensibilité de ce type de

pièces, le coefficient de sécurité pour leur dimensionnement a été augmenté et l'assemblage et les soudures ont fait l'objet de contrôles ultra-soniques à 100% pour garantir l'absence de défaut. Cet arc a été fabriqué dans un délai très court d'un mois.

#### LA MISE EN ŒUVRE DU BOWSTRING

Le tablier et les consoles sont ensuite installées et assemblées en place sur

des palées provisoires en partie sur la chaussée, dont la largeur a été limitée de façon provisoire.

L'opération la plus délicate a ensuite été la pose de l'arc, depuis le contrebas, au moyen d'une grue de forte capacité (figures 12 et 13). Cette opération a nécessité une fermeture de l'avenue pendant une durée de 20 heures, durée pendant laquelle l'entreprise a réalisé une plateforme granulaire pour mise à niveau de l'avenue, la mise en place de

la grue, le grutage de l'arc et sa fixation sur des clames provisoires, et enfin le repli avant réouverture de la circulation. Les travaux ont continué avec la mise en œuvre des suspentes (figure 14), qui sont des barres de précontrainte diamètre 100 mm équipées de ridoirs pour assurer le réglage et la mise à la tension prévue dans la note de calcul. Enfin, les derniers mois du chantier ont consisté à bétonner les deux hourdis supportant les deux voies pour le tramway et les trottoirs latéraux (figure 15), à la pose des équipements et des écrans latéraux finalisant le traitement architectural de l'ouvrage.

Malgré des délais globaux extrêmement serrés et des travaux compliqués par les multiples vagues du Covid, l'ouvrage a été livré à temps pour l'inauguration de la ligne (figures 1 et 16) le 16 février 2022. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Société du Tramway de Rabat-Salé, devenue Rabat Région Mobilité  
**MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉNÉRALE DE LA LIGNE :** groupement Systra/Cid  
**ENTREPRISE ATTRIBUTAIRE DES TRAVAUX DU VIADUC :** Société Générale des Travaux du Maroc  
**CONTRÔLE EXTÉRIEUR DES ÉTUDES DE RE-CONCEPTION ET MISSION DET VIADUC :** Egis  
**ARCHITECTE :** Jean-Bernard Nappi, Egis  
**BUREAU D'ÉTUDES D'EXÉCUTION :** Grid

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**LONGUEUR TOTALE DU FRANCHISSEMENT :** 180 m  
**LONGUEUR DU BOWSTRING :** 60 m  
**PENTE MAXIMALE :** 3,6%  
**NOMBRE DE SUSPENTES :** 10 barres de précontrainte diamètre 100 mm avec ridoirs  
**TONNAGE CHARPENTE :** 247 t (tablier) et 77 t (arc)  
**DURÉE DES TRAVAUX :** 18 mois  
**HAUTEUR DE L'ARC PAR RAPPORT AU TABLIER :** 9,80 m

## ABSTRACT

### THE ESSALAM BRIDGE IN RABAT

CLAUDE LE QUERE, EGIS - JEAN-BERNARD NAPPI, EGIS - BENOÎT BOLZICCO, EGIS - CONSTANTIN ZACHAROPOULOS, EGIS

Extensions to Line 2 of the Rabat-Salé tramway were executed between 2018 and 2021, thus providing an extra 40,000 passengers each day with a secure, low-carbon means of transport. The largest engineering structure for the project is the Essalam viaduct. When the structure was partially completed, it was decided to make it more symbolic. It therefore became a bowstring arch of 60-metre span. Two tramway tracks and two wide footpaths are carried by a single central arch, recessed in the deck. The structural design was established in accordance with Eurocode standards, counter-modelled and verified by Egis, as outside consultant on behalf of the client. The project was carried out in a record time and the structure was delivered on schedule for opening of the line in 2021. □

### EL PUENTE ESSALAM EN RABAT

CLAUDE LE QUERE, EGIS - JEAN-BERNARD NAPPI, EGIS - BENOÎT BOLZICCO, EGIS - CONSTANTIN ZACHAROPOULOS, EGIS

Entre 2018 y 2021, se llevaron a cabo dos ampliaciones de la Línea 2 del tranvía de Rabat-Salé, que permitieron ofrecer un medio de transporte seguro y libre de carbono a 40 000 pasajeros al día adicionales. La obra más importante del proyecto es el viaducto Essalam. Estando parcialmente erigida, se tomó la decisión de potenciar el simbolismo de esta construcción, que se convirtió en un bowstring de 60 m de luz. Un arco central, empotrado en el tablero, soporta dos vías de tranvía y dos amplias aceras. El dimensionamiento de la obra se estableció con arreglo a las normas Eurocodes, contramodelizadas y verificadas por Egis en tanto que controlador externo por cuenta del promotor. Los trabajos se desarrollaron en unos plazos récord y la obra se entregó a tiempo para inaugurar la línea en 2021. □



1

© STÉPHANE BRABANT / AFRIKAFUN

# LA ROUTE DES PÊCHES ENJAMBE LA LAGUNE AU BÉNIN

AUTEURS : JEAN MARC PEJOAN, DIRECTEUR PROJET, SOGEA SATOM BÉNIN / VINCI CONSTRUCTION - RÉMI JOUANDOU, RESPONSABLE DU SERVICE STRUCTURE, BET ISC / VINCI CONSTRUCTION - SÉBASTIEN ROMERO, CHEF DE PROJETS, BET ISC / VINCI CONSTRUCTION

**LE DÉVELOPPEMENT SOCIAL, ÉCONOMIQUE ET TOURISTIQUE D'UN TERRITOIRE PASSE PAR LA CRÉATION D'INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT POUR ACCÉDER À DES ZONES ENCLAVÉES. L'ATTRACTIVITÉ DE LA RÉGION OUEST DE COTONOU S'INSCRIT DANS CETTE DÉMARCHE. LE PROJET DE CRÉATION DE LA "ROUTE DES PÊCHES", QUI LONGE LE LITTORAL ENTRE LA CAPITALE ÉCONOMIQUE ET L'OUEST DU PAYS, VISE À Y RÉPONDRE. LE CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE DE CETTE ZONE AURA NÉCESSITÉ LA RÉALISATION DE PLUSIEURS OUVRAGES DE FRANCHISSEMENT RÉALISÉS DANS DES CONDITIONS ET CONTRAINTES TECHNIQUES DIFFICILES.**

## UN AXE DE DÉVELOPPEMENT MAJEUR

Le projet d'aménagement et de bitumage de la "route des pêches" vise à créer un axe de circulation majeur le long du littoral béninois (Golfe de Guinée) à l'ouest de la capitale économique Cotonou ainsi que des bretelles d'accès à ce tracé. L'objectif affiché est d'améliorer la stabilité et l'attractivité de la zone desservie en permettant le développement du tourisme, des infrastructures hôtelières et sportives, ainsi que des activités socio-économiques. Les travaux comprennent la réalisation de plusieurs tronçons (figure 2) :

- Tronçon A entre la ville d'Adouanko et la ville d'Avlékété (7,4 km) ;
  - Tronçon B entre la ville d'Avlékété et la Porte du Non-retour (13,9 km) ;
  - Tronçon C entre la Porte du Non-retour et la Bouche du Roi (12,1 km) ;
  - Bretelle 1 entre les villes d'Adouanko et Cococodji (4,9 km) ;
  - Bretelle 2 entre la Porte du Non-retour et la ville de Ouidah (3,9 km).
- La région côtière, au droit du futur tracé, est constituée d'une lagune marécageuse, entrant dans les terres sur plusieurs kilomètres. Elle forme un obstacle naturel de premier plan étant

**1- Vue sur la lagune que le tracé enjambe.**

**1- View over the lagoon crossed by the route.**

donné l'alternance et l'enchevêtrement de plaques de terres et de bras d'eau (figure 1).

Pour enjamber cette zone, il a donc été nécessaire de réaliser des ouvrages d'art de franchissement. Les plus modestes d'entre eux sont des ouvrages

hydrauliques de type "dalot" et, pour les plus grandes longueurs à traverser, des ponts mixtes mono travée ou multi travées sont prévus.

Ces ouvrages d'art, objets du présent article, sont au nombre de cinq (un ouvrage double et trois ouvrages simples). Ils ont des caractéristiques fonctionnelles variées (tableau 1).

Les tabliers des cinq ouvrages mixtes (acier - béton) ont le point commun d'être des bi-poutres à inertie constante dont les PRS (Poutres Reconstituées Soudées) mesurent 2 m de hauteur environ et ont un entraxe de 7 m.

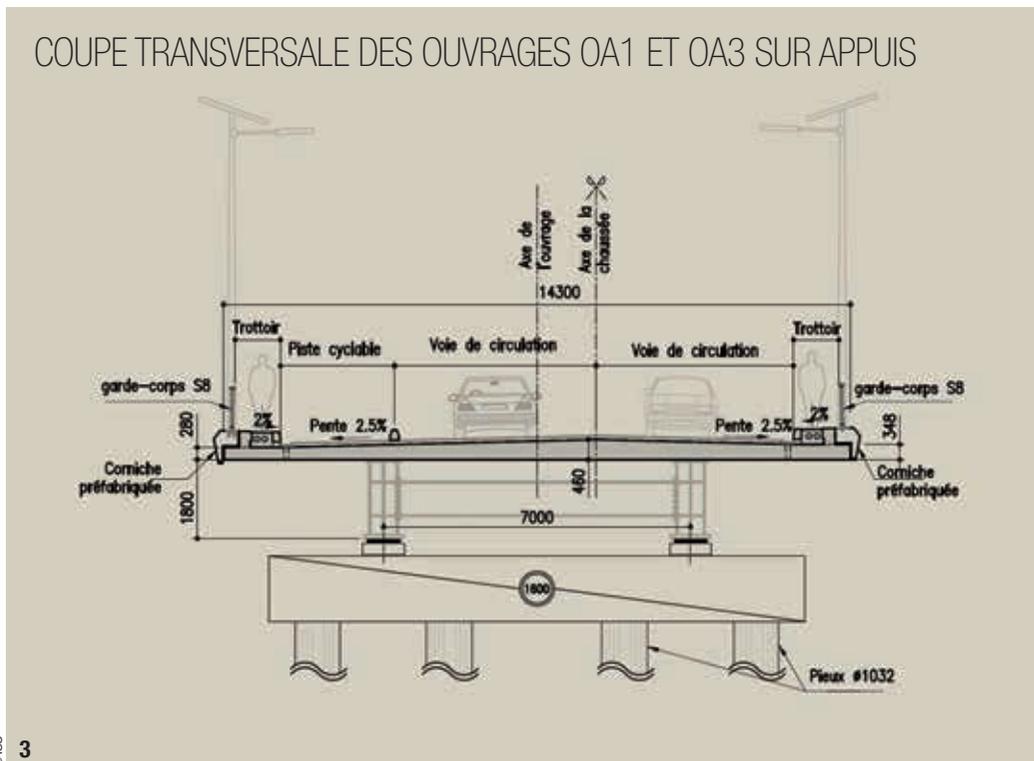


Les ouvrages simples (OA 1, 3 et 6) ont un profil en toit avec une épaisseur de dalle variant entre 28 cm et 46 cm (contre 28 cm à 50 cm pour l'ouvrage double OA5 qui dispose d'un profil en dévers).

Les appuis (piles et culées) de chaque ouvrage sont constitués d'un chevron en béton armé émergé (20 cm au-dessus du niveau PHEC = Plus Hautes Eaux Connues) sur pieux métalliques battus de grosse dimen-

sion (diamètre 1 032 mm et épaisseur 16 mm). La liaison entre les PRS de la charpente métallique du tablier et les chevêtres est assurée par des appuis en élastomères frettés (figure 3).

**2- Tracé du projet et repérage des ouvrages.**  
**3- Coupe transversale des ouvrages OA1 et OA3 sur appuis.**



**2- View over the lagoon crossed by the route.**  
**3- Cross section of structures OA1 and OA3 on supports.**

### PROBLÉMATIQUES DE LA LAGUNE

Construire de tels ouvrages au milieu d'une lagune engendre quelques difficultés de réalisation.

La première est liée à la piètre qualité du sol en surface dans ces zones marécageuses. Ces dernières imposent la réalisation de fondations (très) profondes allant chercher le bon sol en profondeur. Ces pieux ont une longueur totale allant jusqu'à 55 m sur certains appuis dont 5 m de hauteur libre (répartis entre le tirant d'eau jusqu'au fond de la lagune et les premiers mètres de terrain vaseux sans aucune résistance). Ils sont battus au marteau hydraulique (figure 4) par tronçons de 12 m qui sont raboutés par soudure entre battages.

La seconde difficulté consiste en la réalisation des appuis intermédiaires (piles) des ouvrages franchissant des bras d'eau de grande largeur (supérieure à 100 m pour les OA 1 et 5 qui disposent de 3 piles). Pour ces appuis en rivière, les techniques de batardéou ou d'estacade provisoire n'ont pas été retenues compte tenu des difficultés d'accès pour des barges, ▷

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES FONCTIONNELLES DES OUVRAGES

Ouvrage	Routes des pêches	Type ouvrage	Travées (u)	Longueur (m)	Largeur (m)	Voies de circulation	Pistes cyclables	Trottoirs
OA1	Tronçon A	Simple	4	140	14,3	2 x 1 voie	1	2
OA3	Tronçon A	Simple	2	60	14,3	2 x 1 voie	1	2
OA5-1 et OA5-2	Bretelle 1	Double	4	140	12,2	1 x 2 voies	1	1
OA6	Bretelle 2	Simple	1	30	14,5	2 x 1 voie	2	0



© STÉPHANE BRABANT / AFRIKAFUN

du faible tirant d'eau (inférieur à 2 m), du coût de réalisation, du délai ou encore pour des raisons de sécurité pour la phase de réalisation des chevêtres.

C'est finalement un remblai d'accès provisoire sur la lagune qui a été exécuté. Ce remblai est constitué, parallèlement à l'ouvrage, d'une piste d'accès aux différentes files d'appui, et d'une plateforme entourant chaque appui intermédiaire afin d'y réaliser dans un premier temps le battage des pieux puis le ferrailage et bétonnage des chevêtres et bossages d'appui.

En fin de chantier, ce remblai provisoire sera retiré afin de redonner à la lagune sa configuration d'origine. Ce remblaiement pour la réalisation des appuis a nécessité un apport de matériaux de 8 000 m<sup>3</sup> de sable de dragage. Ce matériau a été sélectionné afin de limiter au maximum l'impact environnemental sur les fonds de la lagune lors de sa mise en œuvre et de son retrait, le projet faisant l'objet d'exigences environnementales fortes.

### ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Ce projet fait l'objet d'exigences environnementales précurseurs pour la région avec notamment une étude d'impacts aux standards environnementaux internationaux qui a été diligentée avant le démarrage de l'opération. Elle a permis, au bout d'un an d'examen, d'obtenir le Certificat de Conformité Environnementale. Cela passe, notamment, par un reboisement compensatoire de 10 ha (100 000 plants) et de la plantation de 5 ha de palétuviers (50 000 plants) afin de préserver l'écosystème local.

### LES FONDATIONS DES OUVRAGES, ENJEU TECHNIQUE MAJEUR

Si la géographie et la topographie locale complexifient la réalisation des pieux, leur étude technique n'en demeure pas moins soumise à des effets physiques qu'il convient de traiter par ailleurs afin de limiter leur impact pénalisant sur le dimensionnement. Il s'agit notamment de la corrosion, de l'affouillement et des efforts parasites générés par les blocs techniques à l'arrière des culées.

Les pieux les plus chargés sont sollicités à près de 500 t en compression pour les piles et 300 t pour les culées (efforts non pondérés). À cela il convient d'ajouter un moment de flexion maximal de l'ordre de 150 tm pour les pieux de piles et 200 tm pour les culées.



© SOGEA SATOM

**4- Battage des pieux de l'OA5 au marteau hydraulique depuis la plateforme remblayée.**

**5- Enrochements de protection au niveau des culées des ouvrages (OA5 ici).**

**4- Pile driving for OA5 by hydraulic hammer from the backfill platform.**

**5- Protective rockfill at the level of the bridge abutments (here, OA5).**

Les dimensions élevées des pieux en section (résistance) et en longueur (portance) sont dues à ces sollicitations importantes et à la médiocrité des couches de terrains rencontrées (alternance de couches de sable et d'argile).

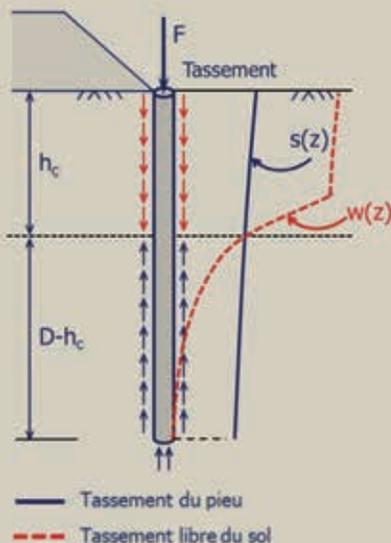
### CORROSION

L'eau constituant la lagune, très proche de l'eau de mer, a nécessité une étude approfondie vis-à-vis de la corrosivité des structures en acier et notamment des pieux métalliques immergés supportant les ouvrages. Des mesures physico-chimiques (pH, température, teneur en chlorure, salinité, résistivité, conductivité) conduites sur des échantillons d'eau en surface (20 cm de la surface) et en profondeur (entre 0,50 m et 2 m de profondeur) ont permis de qualifier l'agressivité de l'eau, décrivant un milieu à corrosivité modérée ou élevée (catégorie C4/C5 au sens de la norme NF EN 12944).

En l'absence de tout dispositif de protection vis-à-vis de la corrosion, il faudrait retenir une perte d'épaisseur des pieux (vitesse moyenne de corrosion) de 0,08 mm/an pour la partie atmosphérique (soumise au marnage et embruns) et 0,04 mm/an pour la partie immergée ce qui représente sur la durée de vie de l'ouvrage (100 ans) une épaisseur sacrificielle de 4 à 8 mm (soit 25 à 50% de la section du tube de pieux).

Pour ne pas surconsommer d'aciers de pieux compte tenu de leur longueur, il a été décidé de traiter et de protéger les structures métalliques pour limiter la vitesse de corrosion. En partie atmosphérique, une peinture marine (résistance C5) est appliquée et renouvelée au plus tous les 15 ans.

## PHÉNOMÈNE DE FROTTEMENT NÉGATIF



6

© TERRASOL

Pour la partie fichée et immergée, une protection cathodique galvanique est retenue avec la mise en place d'anodes sacrificielles dont la durée de vie est également limitée et nécessite un remplacement tous les 30 ans.

Sur le projet, des anodes d'alliage aluminium - indium (Al-In) sont mises en place sur chaque pieu de pile : 6 anodes de 65 kg (soit près de 400 kg par pieu) réparties sur le pourtour en zone immergée.

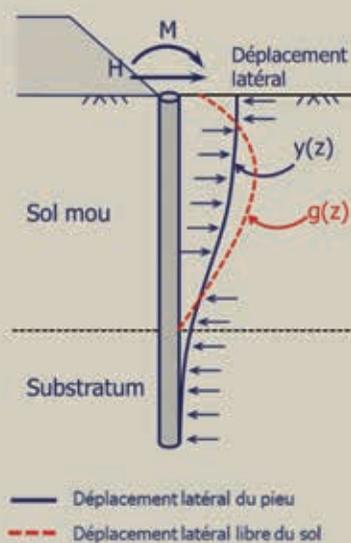
Dans le contexte de corrosivité du milieu et compte tenu de l'entretien et du remplacement des dispositifs de protection (peinture marine et protection cathodique galvanique), l'épaisseur sacrificielle résiduelle à retenir pour le calcul a pu être réduite à 0,6 mm (4 % de la section du pieu) sur la durée de vie de l'ouvrage (contre 4 à 8 mm sans aucun dispositif de protection).

### PRINCIPE DE L'ANODE SACRIFICIELLE

L'anode est constituée d'un métal ou alliage plus réactif que le métal à protéger (cathode - ici, le pieu de fondation).

Les deux métaux sont connectés et une réaction d'oxydation se produit dans le milieu agressif à l'instar de ce qui se passe dans une pile électrique. L'anode est consommée (sous forme ionique) avec un transfert d'électrons vers la cathode (courant de protection) qui viendra compenser la perte qu'elle subit et ainsi permettre à la structure de ne pas se corroder.

## PHÉNOMÈNE DE FLUAGE LATÉRAL



7

© TERRASOL

**6- Phénomène de frottement négatif.**

**7- Phénomène de fluage latéral.**

**8- Préchargement à l'arrière de la culée de l'OA3.**

**6- Negative friction phenomenon.**

**7- Lateral creep phenomenon.**

**8- Soil preloading behind the abutment of OA3.**

### AFFOULEMENT

La présence de fondations immergées est synonyme d'un risque d'affouillement. Ce dernier traduit le phénomène naturel de creusement du fond marin dû aux tourbillons engendrés par le courant butant sur un obstacle (pieux dans notre cas). Un vortex vient approfondir localement le fond marin au droit des pieux, avec une profondeur dépendant du débit et du type de sédiments transportés.

Des calculs permettent d'estimer la hauteur d'affouillement à considérer ce qui revient à augmenter la hauteur



8

© SOGEA SATOM

libre des pieux (et diminuer la profondeur d'encastrement des fondations profondes). Il a ainsi été retenu une hauteur d'affouillement de 1,50 m au niveau des piles des ouvrages.

Concernant les culées, cette hauteur étant dimensionnante du fait de la présence d'efforts horizontaux transmis par le tablier, il a été décidé de mettre en place un enrochement par blocs de 40 à 80 cm (figure 5). Cette technique permet de stabiliser le fond marin et d'empêcher le phénomène d'affouillement.

### DES PRÉCHARGEMENTS INDISPENSABLES POUR CONTRECARRER LES EFFORTS PARASITES

Le dernier effet physique impactant le dimensionnement des pieux concerne les efforts parasites. C'est de loin le plus préjudiciable pour les fondations profondes des culées du fait de la compressibilité des sols rencontrés dans cette zone marécageuse. La difficulté prédomine à l'arrière des culées où un remblai dissymétrique (bloc technique) est mis en place engendrant donc un tassement également dissymétrique. On distingue deux effets majeurs induits : le frottement négatif et le fluage latéral.

Le premier, le frottement négatif (figure 6), est dû à un fort tassement du sol dans les premières couches (couches très compressibles) supérieur au tassement du pieu. En conséquence sur les premiers mètres (5 m en moyenne sur les OA du projet), ce n'est pas le pieu qui frotte sur le sol pour y ancrer la charge qu'il supporte mais l'inverse qui se produit : le sol vient frotter sur le pieu et donc doublement allonger ce dernier car la hauteur de frottement négatif est neutralisée et la charge supportée par le pieu est augmentée de l'effort de frottement apporté par le sol. Dans le cas présent, on parle en moyenne d'un effort supplémentaire de 250 t ce qui représente une augmentation de 100 % par rapport à la descente de charge du tablier.

Le deuxième, le fluage latéral (figure 7), est lié à la dissymétrie de chargement (remblai des blocs techniques à l'arrière des culées) sur un sol mou. Cela entraîne un mouvement latéral du sol qui emporte avec lui la partie supérieure des pieux qui vont donc subir un déplacement latéral imposé et, par conséquent, des efforts internes supplémentaires de flexion. Là encore, la médiocrité des couches compressibles supérieures génère une augmentation des efforts de flexion dans les pieux de 250 tm ▷

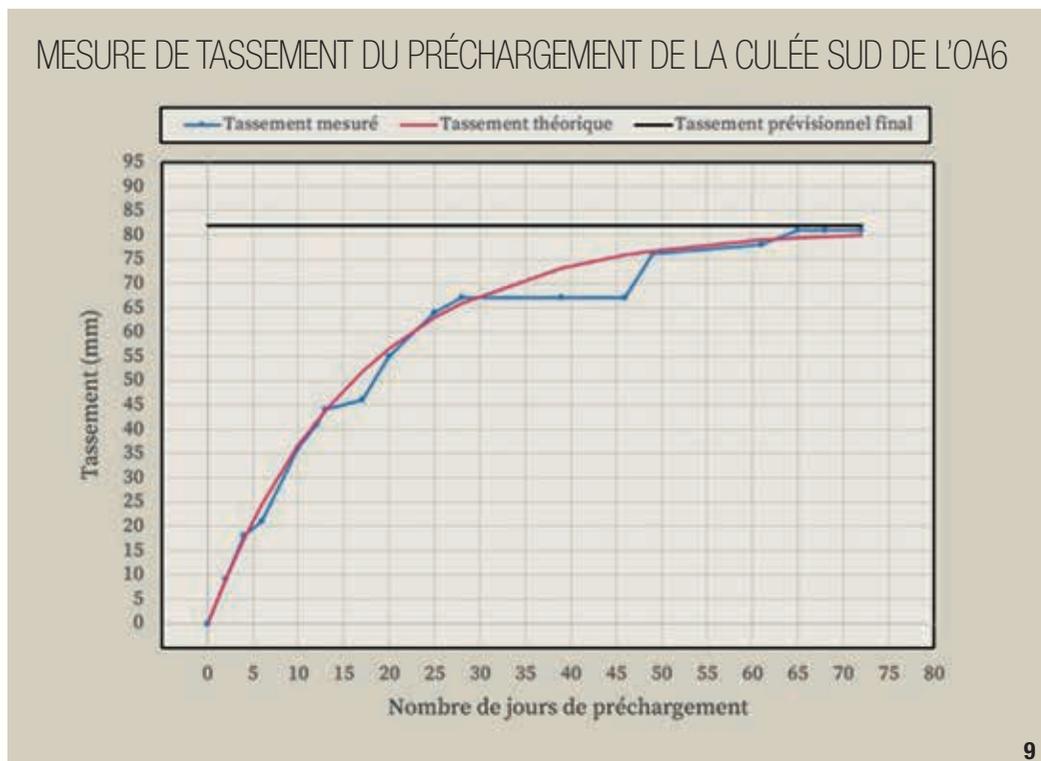
ce qui représente une augmentation de 125% si aucune mesure n'est mise en place pour contrer ce phénomène. Si ce tassement des couches compressibles peut être considéré dans le dimensionnement des fondations, la prise en compte de ces deux effets parasites cumulés reviendrait à avoir un système de fondation démesuré. De plus, cela ne résoudrait pas la problématique de tassement absolu des blocs techniques, générant, avec le temps, "une marche" à l'arrière des culées, qu'il faudrait recharger au fur et à mesure, dès que le confort des usagers n'est plus assuré. Le tassement total attendu serait de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres pour les ouvrages d'art présentés.

Ainsi, pour pallier ces effets parasites et leurs conséquences néfastes sur le dimensionnement des fondations profondes et l'exploitation des ouvrages à long terme, ont été mis en place des préchargements avant la réalisation des pieux (figure 8). Ceux-ci visent à consolider les sols sous les remblais de culées en consommant tout ou partie du tassement attendu en phase définitive à long terme.

Le principe consiste à évacuer l'eau interstitielle entre les grains de sol des couches compressibles en ajoutant du poids qui chasse cette eau. Ce procédé est plus ou moins long (quelques semaines à plusieurs années) et dépend de la perméabilité des sols. Le choix de réaliser des préchargements au détriment d'autres méthodes de limitation des tassements à l'arrière des culées (comme la substitution ou l'amélioration de sol) s'est fait en raison de la grande hauteur des couches compressibles en place.

Les études géotechniques ont donné des tassements prévisionnels compris entre 7 et 24 cm (en fonction des ouvrages et des hauteurs de remblais) et des durées de consolidation inférieures à 2 mois.

Le graphe (figure 9) donne à titre d'exemple le relevé des mesures de tassement du préchargement sur la culée Sud de l'OA6 qui est très proche des valeurs théoriques calculées. Ainsi, sur tous les ouvrages, les préchargements ont permis de consommer, dans un temps relativement court, la totalité des tassements prévisionnels. Cela a donc justifié de pouvoir se dispenser de considérer les efforts parasites et par conséquent ne pas pénaliser le dimensionnement des fondations profondes.



### DES TABLIERS MIXTES LANCÉS ET PRÉFABRIQUÉS

Une fois les fondations réalisées avec les différentes contraintes énumérées précédemment, les chevêtres et les bossages en béton armé des appuis (piles et culées) ont été coulés au sol sur les plateformes en remblais provisoires.

Les tabliers sont constitués de bi-poutres mixtes qui sont assemblés puis lancés d'une rive (figure 10). Un avant-bec permet de limiter les

9- Mesure de tassement du préchargement de la culée Sud de l'OA6.

10- Lancage de la charpente métallique de l'OA5.

9- Measuring subsidence of soil preloading for the South abutment of OA6.

10- Launching the steel structure of OA5.

longueurs de porte-à-faux avant le passage des appuis (piles et culées). De ce fait, les garde-grèves des deux culées ne peuvent être réalisés qu'une fois la charpente entièrement lancée et l'avant-bec retiré. Le lancage s'effectue de manière classique avec un câble tracteur et un câble frein. Le glissement sur les différents appuis s'opère via des chaises à galets.

La dalle béton est ensuite mise en place. Elle est constituée d'une juxtaposition de bandes de dalles préfabriquées de 1,20 m le long de l'ouvrage et ayant la pleine section transversale (12,20 m à 14,50 m de large). Des zones de clavage de 40 cm entre chaque élément préfabriqué ainsi que des fenêtres de connexion de la dalle béton à la charpente métallique sont coulées dans un deuxième temps. La grande longueur des encorbellements de l'ouvrage (3,5 m) engendre des efforts de flexion importants et des ratios très élevés pour ce type d'ouvrage (jusqu'à 550 kg/m<sup>3</sup>). Augmenter l'épaisseur des dalles afin de diminuer le ratio d'armatures aurait alourdi nettement l'ouvrage, ce qui aurait nécessité de surdimensionner la charpente métallique et les fondations. C'est donc le meilleur compromis qui ait été trouvé.

Au total, pas moins de 426 dalles préfabriquées seront nécessaire pour réaliser les 5 tabliers. Chaque pièce (figure 11) pèse un peu plus de 12 t





11

© SOGEA SATOM



12

© SOGEA SATOM

(jusqu'à 19 t pour certaines dalles de rive) et la charge visible au levage grimpe à plus de 15 t en intégrant les appareils de levage.

La mise en place de ces éléments se fait au moyen d'une grue treillis à chenilles de 90 t ou d'une automotrice de 75 t qui avancent sur les dalles qui viennent d'être posées (figure 12). Néanmoins, un phasage précis de réalisation est suivi pour la pose de ces dalles :

→ La circulation de la grue n'étant pas permise sur les dalles non clavées

**11- Transport de dalles préfabriquées de l'OA5.**

**12- Mise en place de dalles préfabriquées à la grue sur l'OA6.**

**11- Transporting precast slabs of OA5.**

**12- Positioning precast slabs by crane on OA6.**

(pour la stabilité au chenillage mais surtout pour la résistance transversale de certaines dalles préfabriquées), la grue pose jusqu'à 8 éléments (distance maximale compte tenu du poids à lever) avant de les claver et d'avancer dessus pour poursuivre la pose ;

→ Pour les ouvrages à 4 travées, il est nécessaire de mettre en place les 2 travées de rive avant de poser les dalles des travées centrales afin de justifier la charpente métallique au calcul et d'éviter des soulèvements

de cette dernière en phase provisoire. Cela nécessite donc une grue de chaque côté.

Au 1<sup>er</sup> trimestre 2023, les 5 ouvrages sont en cours et le premier (OA6) est presque terminé. Les difficultés et contraintes présentées tout au long de cet article semblent donc avoir été affrontées avec succès. La livraison du projet est prévue en fin d'année 2024 et permettra ainsi d'enjamber la magnifique lagune de la côte Ouest béninoise afin de mieux desservir de nouvelles étendues géographiques. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**COÛT TOTAL DE L'OPÉRATION : 148 millions d'Euros**  
**DURÉE TOTALE DU CHANTIER : 48 mois (nov. 2020 - nov. 2024)**  
**LINÉAIRE DE ROUTE CRÉÉE : 42,2 km**  
**OUVRAGES D'ART : 5 ponts mixtes (longueurs entre 30 m et 140 m)**  
**LARGEUR DES OUVRAGES : 12,20 m à 14,50 m**  
**PROFONDEUR MAXIMALE DES PIEUX : 55 m**  
**POIDS CHARPENTE MÉTALLIQUE DES OUVRAGES D'ART : 1 500 t**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :**  
**Ministère des Infrastructures et des Transports du Bénin**  
**MISSION DE CONTRÔLE : Louis Berger International**  
**ENTREPRISE GÉNÉRALE : Sogea Satom Benin**  
**ENTREPRISE CHARPENTE MÉTALLIQUE :**  
**Baudin Chateaneuf (sous-traitant)**  
**BET STRUCTURE : Isc (Vinci Construction)**

## ABSTRACT

### THE "FISHING HIGHWAY" STRADDLES THE LAGOON IN BENIN

JEAN MARC PEJOAN, SOGEA SATOM BÉNIN / VINCI CONSTRUCTION - RÉMI JOUANDOU, BET ISC / VINCI CONSTRUCTION - SÉBASTIEN ROMERO, BET ISC / VINCI CONSTRUCTION

As part of the development of the western Benin coastal area, a new highway and its slip roads are being created, crossing a large lagoon. Several bridges are planned, including five mono- and multi-span composite bridges. The mediocre soil quality, aggressive marine environment, the phenomenon of scouring, high soil compressibility and access difficulties, among other things, required specific treatment measures (galvanic cathodic protection, rockfill, preloading of functional blocks, use of thin, highly reinforced precast slabs for the deck) in order to build these structures without oversizing. □

### LA ROUTE DES PÊCHES FRANQUEA LA LAGUNA EN BENÍN

JEAN MARC PEJOAN, SOGEA SATOM BÉNIN / VINCI CONSTRUCTION - RÉMI JOUANDOU, BET ISC / VINCI CONSTRUCTION - SÉBASTIEN ROMERO, BET ISC / VINCI CONSTRUCTION

En el marco del desarrollo de la zona costera oeste de Benín, se han construido una nueva carretera y sus vías de acceso, que franquean una gran laguna. Está prevista la construcción de varios elementos, entre ellos 5 puentes mixtos de una o varias luces. La mediocridad del terreno, el medio marino agresivo, el fenómeno de socavación, la fuerte compresibilidad de los suelos y las dificultades de acceso, entre otros desafíos, han precisado medidas específicas de tratamiento (protección catódica galvánica, escolleras, precarga de los bloques técnicos, uso de losas prefabricadas finas y con densas armaduras para el tablero) para realizar estas obras sin sobredimensionarlas. □

1- Montage du tunnelier dans l'outfall shaft pour le 1<sup>er</sup> drive.

1- TBM assembly in the outfall shaft for the first drive.

© HATCH



# NOUVEL ÉMISSAIRE DE REJET DE LA STATION D'ÉPURATION D'ANNACIS ISLAND À VANCOUVER, CANADA

AUTEUR : GUILLAUME ROUX, DIRECTEUR DE TRAVAUX, BESSAC

EN OCTOBRE 2019, BESSAC, EN GROUPEMENT AVEC L'ENTREPRISE CANADIENNE POMERLEAU (GROUPEMENT PBGP), REMPORTAIT UN CONTRAT DE CONSTRUCTION DU NOUVEL ÉMISSAIRE DE REJET DE LA STATION D'ÉPURATION D'ANNACIS ISLAND PRÈS DE VANCOUVER. CET OUVRAGE TRÈS COMPLEXE MÊLE TRAVAUX SOUTERRAINS, TRAVAUX SPÉCIAUX, GÉNIE-CIVIL ET TRAVAUX FLUVIAUX DANS UN CONTEXTE GÉOTECHNIQUE DIFFICILE, À L'INTÉRIEUR D'UNE USINE DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES EN SERVICE. L'ACHÈVEMENT DES TRAVAUX EST PRÉVU FIN 2024.

## INTRODUCTION

La plus grande usine de traitement des eaux usées desservant la ville de Vancouver, en Colombie-Britannique, est située sur l'île d'Annacis, sur le fleuve Fraser à environ 20 km en amont de la côte Pacifique.

Le delta fluvial est caractérisé par une topographie plane et des dépôts alluvionnaires épais constitués principalement de sables fluviaux à faible teneur en fines.

**2- Principe du nouvel émissaire de rejet de la station de traitement des eaux usées d'Annacis.**

**2- Schematic of the new discharge channel for the Annacis sewage treatment plant.**

La région étant sismiquement active, la liquéfaction des sols est un facteur majeur pris en compte dans la conception de l'infrastructure afin qu'elle maintienne sa fonction immédiatement après un événement sismique.

L'exutoire existant de la station d'épuration de l'île d'Annacis de MetroVancouver (MV) a été construit au début des années 70 avec une capacité d'environ 14,5 m<sup>3</sup>/s par pose de conduites dans une tranchée draguée au fond du

fleuve. Ne répondant pas aux besoins de la population croissante dans la zone de service, ni aux exigences actuelles de résilience du système lors d'un événement sismique, il a été décidé de le remplacer. Par conséquent, le nouveau système d'émissaire a été conçu comme un exutoire en tunnel foré sous la zone à haut potentiel de liquéfaction du sol induite par des séismes.

Le projet se compose de deux tunnels de transport de 4,20 m de diamètre interne, de deux puits, du collecteur vertical (*riser*) dans le fleuve et de deux sections de diffuseur dans le fleuve. Le puits ES (*Effluent Shaft*) reçoit le flux d'effluents de la station existante via une structure de contrôle de niveau. Le flux est acheminé via le premier tunnel jusqu'au puits de rejet OS (*Outfall Shaft*), puis via le second tunnel vers le collecteur vertical (*riser*) dans le fleuve, qui dirige le flux vers les 2 sections de diffuseur ensouillées dans le fleuve. Une fois la construction terminée, le nouvel émissaire remplacera l'actuel et permettra aux débits de rejet de correspondre à la capacité ultime de l'usine de 25,3 m<sup>3</sup>/s pour les futures étapes d'expansion. La disposition générale du système est illustrée sur la figure 2.

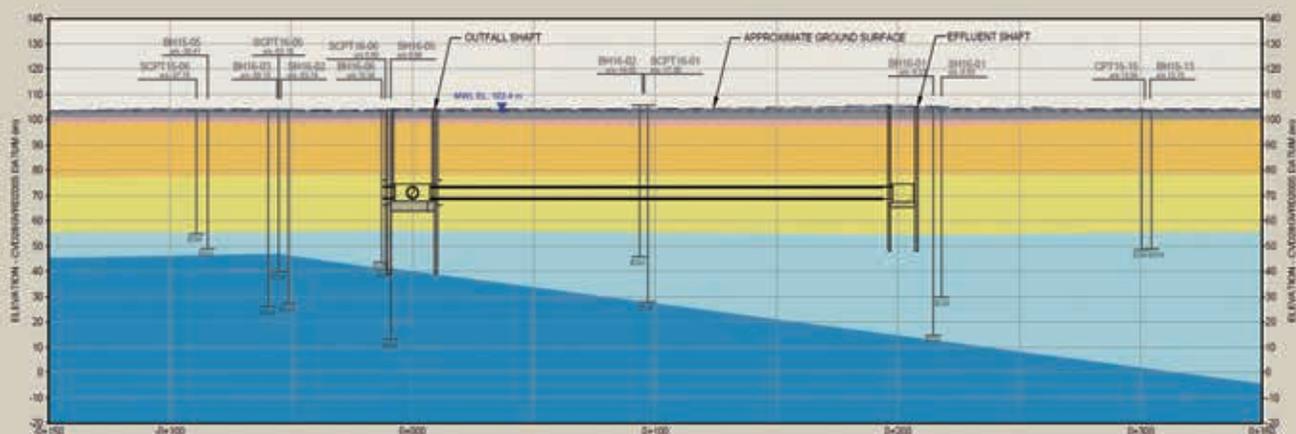
## PRINCIPE DU NOUVEL ÉMISSAIRE DE REJET DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES D'ANNACIS



## SABLES DU FLEUVE FRASER - CARACTÉRISTIQUES ET COMPORTEMENT

La vitesse élevée d'écoulement du fleuve Fraser lors de sa fusion avec le détroit de Géorgie ont créé le delta moderne du fleuve Fraser, après la fin de la dernière période glaciaire, il y a environ 12 000 ans.

## COUPE GÉOLOGIQUE DE L'EFFLUENT TUNNEL, ESSENTIELLEMENT DANS L'UNITÉ 3B



3

© CDW SMITH

Ce processus naturel a entraîné le dépôt d'une épaisse couche de sable fluvial sur les dépôts glacio-marins et marins qui existaient lorsque les glaciers se sont retirés et que le niveau de la mer s'est élevé.

L'investigation géotechnique le long de l'alignement du tunnel a mis en évidence des sables fluviaux d'une épaisseur de 43 m recouverts de quelques mètres de dépôts à grains fins et en partie organiques (dépôts de berge) et de quelques mètres de remblai mis en place au cours du siècle dernier pour rehausser la surface du sol de l'île d'Annacis en vue d'aménagements futurs.

Les sables fluviaux comprennent des couches discontinues à grains fins et, localement, une unité de gravier interprétée comme un dépôt ancien remanié (unité 5).

Les courbes granulométriques déterminées à partir d'échantillons de sable prélevés à la fois dans l'unité supérieure 3A de sables de rivière lâches à moyennement denses et dans l'unité inférieure 3B de sables de rivière moyennement denses à denses, se divisent en bandes plutôt étroites, indiquant une composition assez uniforme.

Alors que l'uniformité des conditions du sol sur le tracé du tunnel équivaut généralement à moins de complexité et de coût, le potentiel de liquéfaction lors d'un événement sismique et le comportement de ce type de terrain pendant l'excavation des tunnels constituent des défis importants qui ont fortement motivés les décisions de conception et les considérations méthodologiques.

### CONCEPTION DES TUNNELS ET DES PUIITS

Les critères de conception parasismique utilisés sur le projet exigent que les nouvelles stations d'épuration des eaux usées soient conçues à un niveau de performance post-catastrophe consistant à rester opérationnelles avec seulement des dommages réparables mineurs à la suite d'un tremblement de

terre, qui est défini avec une période de retour de 2475 ans. Ce niveau de performance post-catastrophe s'applique aux tunnels et à toutes les autres installations essentielles à la continuité de l'exploitation.

Les analyses de liquéfaction pour divers profils de sol et en tenant compte de différents scénarios de mouvement du sol ont indiqué l'étendue de la liquéfac-

**3- Coupe géologique de l'Effluent tunnel, essentiellement dans l'unité 3B.**

**4- Bride parasismique à l'outfall shaft connectant le tunnel au génie civil des puits.**

**3- Geological section of the effluent tunnel, mostly in unit 3B.**

**4- Earthquake-resistant flange in the outfall shaft connecting the tunnel to the shaft civil works.**



4

© BESSAC



© BESSAC 5

tunnel-puits (figure 4), la conception parasismique a conclu à la nécessité d'un revêtement tubulaire en acier d'environ 10 à 25 m de long et l'injection de l'espace annulaire entre le revêtement tubulaire en acier et les voussoirs du tunnel avec du coulis de ciment. Le revêtement en acier répond aux fortes concentrations de contraintes en compression (de l'ordre de 40 MPa) qui sont associées au déplacement différentiel au niveau des connexions lors d'un événement sismique. Les contraintes de compression élevées localisées censées se développer dans le tube en acier devraient rester dans la limite d'élasticité de l'acier, et les déformations maximales estimées développées dans le tube en acier sont bien inférieures à la limite de flambement local.

#### LE TUNNELIER

PBGP a sélectionné un TBM à pression de boue pour le creusement des tunnels. Ce tunnelier, basé sur une machine Herrenknecht AVND 3000 AB, a été conçu et fabriqué par Bessac avec un kit d'extension pour un dia-

**5- Le bouclier du tunnelier (diamètre 5010 mm) lors de la réception en usine.**

**6- Le prémontage en surface du tunnelier (diamètre 5010 mm) avec la "core machine" installée dans le kit d'extension.**

**7- Station de traitement des boues.**

**5- The TBM shield (dia. 5010 mm) during in-plant acceptance testing.**

**6- Surface pre-assembly of the TBM (dia. 5010 mm) with the core machine installed in the extension kit.**

**7- Slurry treatment plant.**

mètre d'excavation de 5010 mm (figure 5). L'idée d'utiliser une AVN ("core machine") glissée à l'intérieur d'un kit d'extension (figure 6) est venue de 2 contraintes fortes du projet :

- Le besoin de démonter le tunnelier par l'arrière à la fin de l'*outfall tunnel*, en abandonnant la roue de coupe et le bouclier dans le plot béton sous-marin du collecteur vertical ;
- Les 2 démarrages et une sortie dans des puits de diamètres réduits, nécessitant par 3 fois des opérations de démontage/remontage que PBGP a souhaité limiter au maximum.

Le tunnelier dans son ensemble a été conçu pour être le plus court possible (64 m en configuration définitive), de sorte à faciliter les démarrages et les démontages. Un train suiveur aussi court a pu être possible grâce aux choix suivants :

- Intégralité de la production d'air comprimé (air respirable pour l'hypermare mais aussi air industriel) délocalisée en surface ;

- Utilisation de mortier bi-composant pour réduire les capacités de stockage embarqué ;

- Cabine de pilotage et sas conçus pour servir de refuge incendie (et ainsi éviter un caisson dédié) ;

- Sécurisation des fonctions essentielles sans groupe électrogène embarqué (recours à des accumulateurs hydrauliques ou à des composants sécurisés en surface).

L'ergonomie générale de la machine a ainsi été pensée autour de cette requête de compacité.

La motorisation dispose d'un couple nominal de 1 600 kNm et d'un couple de déblocage de 2 200 kNm, les terrains n'étant pas très exigeants en termes d'excavation.

Ces couples suffisaient également pour forer les parois moulées de 60 MPa ou le bloc béton du collecteur vertical, dont le béton était étudié pour atteindre 35 MPa.

Les risques en phase de réalisation du tunnel étaient beaucoup plus liés à la stabilité du front et au maintien de l'étanchéité des brosses. ▽



© BESSAC 6



© BESSAC 7



8 © BESSAC

À ce titre, le tunnelier disposait de quatre rangées de joints à brosses métalliques et un joint de sécurité gonflable pouvant être déployé en cas de fuite non contrôlable. Pour le confinement, la machine était équipée d'une chambre à bulle pour un confinement fin.

Le tunnelier incorporait un sas permettant d'effectuer des interventions hyperbares, qui pouvaient devenir nécessaires, par exemple en cas de rencontre de bloc (boulders métriques potentiellement présents dans l'unité 5), permettant de plonger jusqu'à 4 bars. La surveillance, l'enregistrement en continu et le partage des données des paramètres opérationnels du tunnelier et des analyses des flux de matériaux auront permis une compréhension fine

des tendances d'excavation et les ajustements requis pour ne pas impacter les points singuliers en surface (entrepôts logistiques automatisés, voies ferrées, quais de chargement de wagons sur barges...).

Le traitement des boues (figure 7) a été assuré par une centrale MS spécialement étudiée pour le projet, dépourvue de trommel, la géologie attendue ne contenant pratiquement pas de galets ou rochers. Cyclones et tamis géraient le débit de 650 m<sup>3</sup>/h de boue envoyé par le tunnelier, permettant une vitesse d'avance nominale de 60 mm/min. Un filtre-pressé de 12 t/h de capacité a complété l'installation et été utilisé ponctuellement sur les sections fortement silteuses du deuxième tunnel.

### CONSTRUCTION DES PUIITS

Tandis que le système TBM était conçu, fabriqué, testé et expédié sur le site, les parois moulées des deux puits ont été réalisées.

Les deux puits ont été construits en parois moulées réalisées à la fraise (figure 8). Les parois, d'une profondeur de 63 m, de 1,22 m d'épaisseur et de 60 MPa de résistance à la compression, étaient non-armées (à l'exception des panneaux encadrant le tympan de sortie du tunnelier) et purement temporaires, les codes de calcul canadiens ne permettant pas de justifier les parois au séisme.

Une fois les essais de pompage achevés, l'excavation des puits a ensuite été réalisée à l'aide de pelles caméléons

8- Réalisation des parois moulées de l'Outfall shaft.

9- Outfall shaft - travaux de jet grouting en parallèle des installations en fond de puits.

10- Levage de la bride parasismique FL-1 dans le puits d'effluent (après réalisation du revêtement définitif à l'aide d'un coffrage glissant).

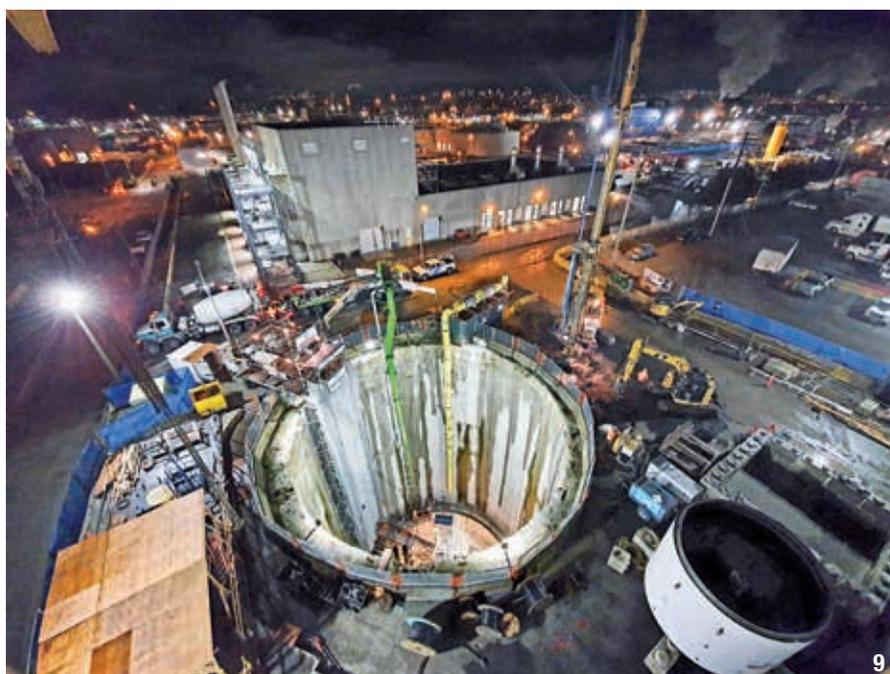
8- Execution of the outfall shaft diaphragm walls.

9- Outfall shaft - jet grouting work in parallel with bottom-of-shaft installation.

10- Lifting the earthquake-resistant flange FL-1 in the effluent shaft (after execution of the final lining using sliding formwork).

jusqu'à 32 m de profondeur, puis à l'aide de bennes de marinage jusqu'à 42 m.

Le jet grouting a été retenu pour l'amélioration du sol au niveau des puits (figure 9), avec une résistance à la compression moyenne minimale sur 28 jours de 2,0 MPa et une perméabi-



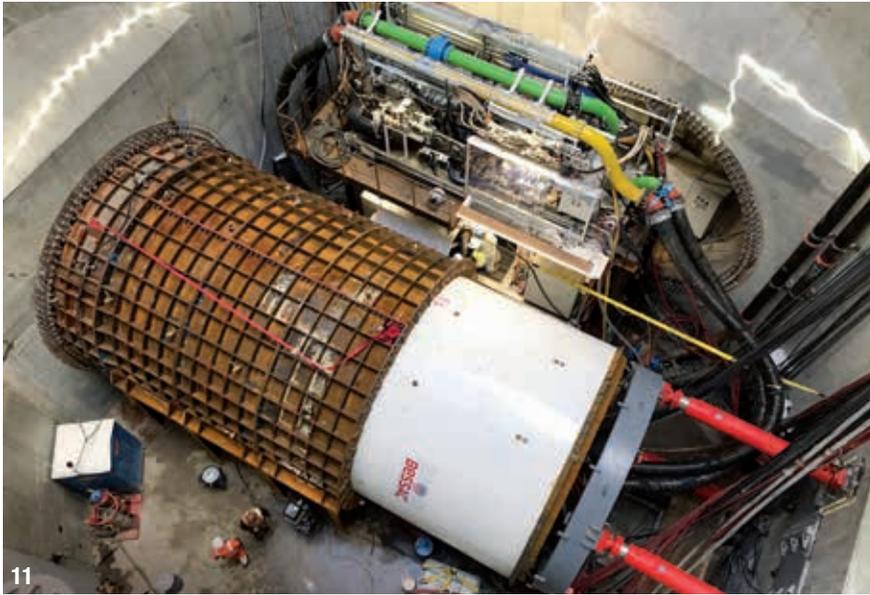
9

© BESSAC

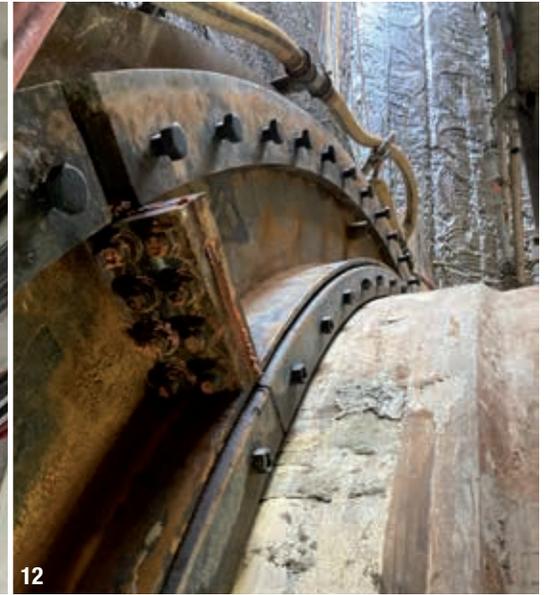


10

© BESSAC



11  
© BESSAC



12  
© BESSAC

lité cible de  $10^{-6}$  m/s. Les plots de jet, de 8 mx8 mx6 m de long, ont été définis en fonction de la méthodologie de démarrage avec cloche courte, comme exposé ci-après.

Le revêtement définitif (figure 10) des puits a été réalisé après les travaux de tunnel à l'aide de coffrages glissants. Au puits ES, un coffrage de 7 m de diamètre a été levé sur environ 30 m. Au puits de rejet OS, un autre coffrage glissant de 16 m de diamètre, incluant un mur central sera utilisé mi-2023. Les revêtements définitifs, au-devant des parois moulées, présentent une épaisseur d'un mètre.

Le génie civil comprenait également la réalisation de la LCS (*Level Control*

*Structure*), permettant la régulation du débit envoyé par la station vers l'émissaire. Le système de vannes de régulation et la partie commande de celles-ci ont également été installés par le groupement PBGP.

#### CONSTRUCTION DES TUNNELS

Le marché comprenait :

→ 2 lancements du tunnelier depuis le puits de rejet OS de 16 m de diamètre (figure 1), à l'aide de bouchons de jet grouting ;

→ 1 sortie du tunnelier au puit d'effluent (diamètre utile intérieur provisoire de 7 m en section basse), avec un bouchon de jet grouting. Étant données la pression de confine-

ment requise de 3,5 bars et la nature des sols (sables propres non cohésifs, au fuseau granulométrique très resserré), les risques de débouillage et d'inondation des puits et du tunnelier étaient extrêmement forts. Les bouchons étant relativement profonds (jusqu'à 40 m de profondeur), PBGP a proposé de démarrer le tunnelier avec un système hybride comprenant un bloc traité réduit à 6 m de longueur et un joint d'entrée en terre couplé à une cloche courte effective avant sortie du tunnelier dudit bloc (figure 11).

L'utilisation d'une cloche classique, système le plus approprié dans un tel contexte, n'était pas envisageable du fait de la taille réduite du puits (dépen-

dant elle-même des contraintes de calcul sismique).

Par cette approche, l'exposition au risque de débouillage a été fortement réduite :

→ Les blocs à traiter étant 65% plus petits que ceux initialement envisagés, l'aléa géotechnique s'en trouve réduit d'autant ;

→ Le système de cloche + joint permet la mise en œuvre de différents niveaux de contingence en cas de fuites (gonflage d'un joint de secours, injection de résine aqua-réactive entre joints ou dans la cloche, pressurisation étagée entre le front du tunnelier et l'arrière de la cloche) ;

**11- Tunnelier en configuration de démarrage avec cloche courte couplée à un joint de démarrage.**

**12- Joint de sortie actif et sur-joint compressible à l'Effluent shaft.**

**13- Effluent tunnel.**

**11- TBM in starting configuration with short air chamber coupled to a starting seal.**

**12- Active exit seal and compressible seal cover in the effluent shaft.**

**13- Effluent tunnel.**



13  
© BESSAC



14

© BESSAC

→ Ce système peut être testé et éprouvé à blanc, sans être soumis à une pression de confinement ne pouvant être abaissée (comme c'est le cas une fois le tunnelier entré en terre). Il est donc possible de corriger des défauts sereinement.

Il est à noter que le premier bloc de jet grouting réalisé n'a pas atteint les critères de perméabilité attendus du fait de la présence de concrétions d'argiles denses ayant créé des effets d'ombre sur les colonnes de jet. Malgré des reprises de traitement, il n'a pas été possible d'atteindre les critères souhaités. La méthode de la cloche courte a permis de garantir la faisabilité du démarrage malgré cet aléa. Sans cette méthode, le démarrage eut été impossible sans reprise du plot de démarrage par substitution intégrale, impactant dès lors massivement le planning et les coûts.

La sortie au puits ES représentait une difficulté majeure : en effet, il fallait sortir le tunnelier dans un puits dont le diamètre utile était pratiquement deux fois plus petit que la longueur du bouclier, le tout sous 3,1 bars de charge hydrostatique, dans les sables décrits précédemment.

Le joint de sortie (figure 12) a été spécialement étudié pour cette application, avec la séquence suivante :

- Puits noyé avant arrivée du tunnelier ;
- Entrée du TBM en puits au travers du joint de sortie ;
- Nettoyage de l'annulaire par des plongeurs ;
- Activation du joint gonflable et injection de l'annulaire dans le bloc de jet ;
- Vidange du puits par paliers, pour déceler d'éventuelles fuites (à ce

stade, l'étanchéité repose sur le joint gonflable mais aussi et surtout sur les injections) ;

- Une fois la vidange achevée, installation d'un surjoint actif sur le bouclier central ;
- Démontage du bouclier frontal ;
- Poussée du bouclier central au travers du surjoint (à ce stade, l'étanchéité repose essentiellement sur le surjoint et sur le bloc de jet) ;
- Démontage du bouclier central ;
- Et enfin traction de la jupe au travers du surjoint, avec injection de mortier bi-composant au fur et à mesure de la sortie.

**14- Retournement du tunnelier après réalisation de l'Effluent tunnel.**

**15- TBM en position finale sous le collecteur vertical, dans le plot béton immergé.**

**14- TBM turn-around after completion of the effluent tunnel.**

**15- TBM in final position under the riser, in the submerged concrete block.**

L'étape de vidange du puits a révélé des débits de fuite vers le puits qui ont nécessité des reprises d'injection par 3 fois. Ces injections (bentonite-ciment, micro-ciment puis résine) ont été réalisées par des lignes préalablement installées dans le massif béton de support de joint principalement et au travers de piquages sur le tunnelier.

Le second tronçon de tunnel (*outfall tunnel* - figure 14), de 580 m, a croisé des horizons plus argilo-silteux que le premier (*effluent tunnel* - figure 13), nécessitant une utilisation continue du filtre-presse.

Le 2<sup>nd</sup> tunnel étant borgne, le tunnelier atteint sa position finale dans le bloc de béton du collecteur vertical (figure 15). Une fois les injections d'étanchéité faites, le train suiveur est retiré vers le puits de départ, et la machine AVND 3000 AB est déconnectée du kit d'extension, afin d'être récupérée en 2 colis de 50 t chacun.

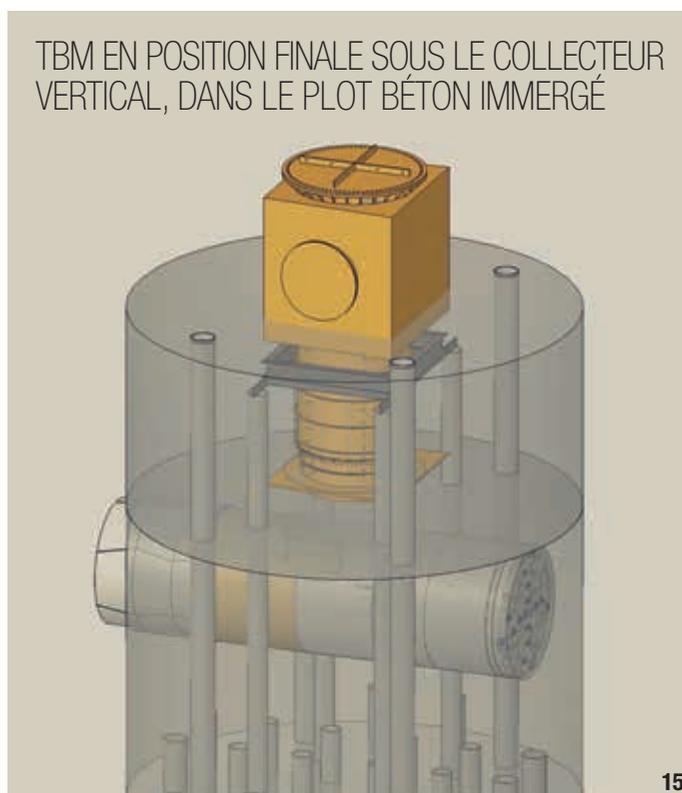
Les travaux de connexion du tunnel au collecteur vertical, prévus à l'été 2023, se feront depuis le tunnel, les collecteurs étant munis de 2 cloisons d'étanchement provisoires qui seront retirées par des plongeurs une fois les tunnels mis en eau.

Le chemisage par tuyaux métallique visant à garantir la tenue de l'ouvrage au séisme concerne également cette zone, qui accueillera un coude métallique soudé en sous-face du collecteur vertical, raccordé à 25 m de tuyaux en tunnel.

#### TRAVAUX FLUVIAUX

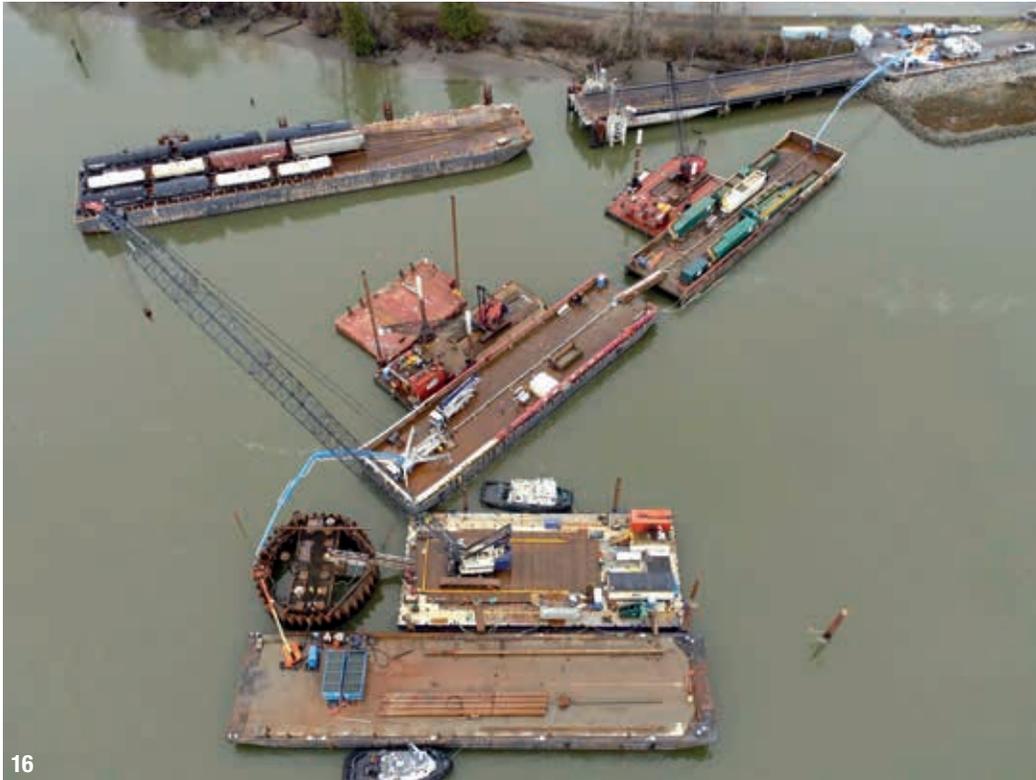
Une partie significative des travaux a été réalisée dans le fleuve Fraser. Les contraintes environnementales ont été fortes, avec notamment une interdiction de travailler entre fin février et

TBM EN POSITION FINALE SOUS LE COLLECTEUR VERTICAL, DANS LE PLOT BÉTON IMMERGÉ



15

© BESSAC



© BESSAC

16

**16- Bétonnage sous eau du plot béton de 3 500 m<sup>3</sup> autour du collecteur vertical (riser) dans le batardeau temporaire.**

**17- Levage du collecteur vertical (riser) dans le batardeau temporaire.**

**16- Underwater concreting of the 3500 m<sup>3</sup> concrete block around the riser in the temporary cofferdam.**

**17- Lifting the riser in the temporary cofferdam.**

mi-juin chaque année (période de fraie des poissons), et une quasi-impossibilité de travailler avant mi-août, le débit du fleuve, de l'ordre de 7 000 m<sup>3</sup>/s, rendant vaine toute tentative.

Les travaux se sont étalés sur 3 saisons, comme suit :

→ **2020-2021** : réalisation du batardeau en palplanches de 17 m de diamètre et de 45 m de profondeur. L'excavation à la benne preneuse



17

© BESSAC

a été exécutée sous eau. 18 pieux métalliques de 1 m de diamètre ont été mis en place afin de fonder le massif béton dans lequel le collecteur vertical sera noyé. Cette saison a été marquée par des vitesses d'écoulement dans le fleuve élevées, générant une érosion hydraulique imprévue autour du batardeau. Le lit du fleuve s'est abaissé de plus de 12 m autour de l'ouvrage, impliquant des changements de design et de méthodes significatifs.

→ **2021-2022** : mise en place dans le batardeau des cages d'armature préfabriquées en surface (15 m de diamètre, 5 m de haut chacune) et bétonnage sous eau (figure 16), en 3 phases (pour un total de 3 700 m<sup>3</sup>). Le collecteur vertical (figure 17), structure hybride métal-béton de 280 t, préparée sur ponton, a été installée dans le batardeau, après la 1<sup>re</sup> phase de bétonnage, à l'aide de la plus grosse grue sur barge existant au Canada. Les 2 phases suivantes ont ennoyé ce collecteur dans un plot monolithique en béton présentant une résistance à la compression de 30 MPa.

→ **2022-2023** : installation des 2 bras de diffuseurs en souille (figure 18), connexion au collecteur vertical, installation de 26 plots préfabriqués protégeant les becs de canard et remblaiement de la souille.

Les bras du diffuseur, représentant pratiquement 600 t d'acier au total, sont composés d'un assemblage de tuyaux classiques de 2,50 m de diamètre intérieur, équipés de piquages pour les becs de canard et pour des trappes d'accès, et de tuyaux parasismiques spécifiques ("SSSP"), uniquement fabriqués au Japon à Yokohama. Chaque bras a été préassemblé à quai sur un ponton flottant de 180 m de long, puis remorqué jusqu'au site, où un portique de levage a permis la descente du sous-ensemble en une fois, limitant ainsi les travaux sous-marins et leurs aléas.

## CONCLUSION

Le chantier du nouvel émissaire de rejet de la station de traitement des eaux usées d'Annacis est désormais à 85 % d'avancement. La dernière année de travaux en 2024 sera essentiellement consacrée à des tests d'intégration des systèmes de régulation de débits de l'émissaire. Plusieurs phases de validation sont en effet nécessaires avec le client final jusqu'à mise en service finale de l'ouvrage. ▷



Les difficultés techniques et contextuelles (Covid, périodes de crues) n'ont pas épargné le projet, qui présentait dès le départ plusieurs activités à niveau de risque non négligeable.

L'approche nord-américaine ("construction only") dissociant fortement la conception (à charge de l'ingénieur, en phase amont), des méthodes (à charge de l'entreprise, en phase de construction) est en soit porteuse de risque. Cependant, l'esprit collaboratif

et ouvert de l'équipe de projet au sens large a permis de faire évoluer certains concepts pour atténuer le niveau de risque. Cela s'est notamment vérifié sur les ouvrages souterrains, où la maîtrise d'œuvre a su comprendre et faire comprendre au client l'intérêt de la méthode de lancement proposée par PBGP.

Quant aux sujets où le design était immuable et où les propositions du groupement n'ont pu être acceptées,

**18- Installation du diffuseur est à l'aide du portique temporaire en novembre 2022.**

**18- Installation of the East diffuser with the temporary gantry crane in November 2022.**

l'équipe projet a appuyé l'entreprise dans les démarches permettant de faciliter la réalisation (par exemple en soutenant fermement PBGP dans les dossiers environnementaux pour les travaux fluviaux).

Si les compétences techniques et organisationnelles pour mener à bien un tel projet sont indispensables, une relation pro-active et respectueuse de la part de tous les acteurs n'en reste pas moins la condition essentielle. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Metro-Vancouver

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :**

- Engineer of Record : Hatch
- Construction manager : CSM Smith

**ENTREPRISE GÉNÉRALE :**

Pomerleau - Bessac General Partnership (PBGP)

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**LONGUEUR DE TUNNEL :** 580 m + 200 m

**PROFONDEUR EXCAVÉE DES PUIITS :** 42 m

**VOLUME DE BÉTON GLOBAL :** 22 000 m<sup>3</sup>

**QUANTITÉ TOTALE D'ACIER :** 990 t

**DÉBLAIS ÉVACUÉS :** 37 000 m<sup>3</sup>

**DRAGAGES EN RIVIÈRE :** 32 000 m<sup>3</sup>

## ABSTRACT

### NEW DISCHARGE CHANNEL FOR THE ANNACIS ISLAND SEWAGE TREATMENT PLANT IN VANCOUVER, CANADA

GUILLAUME ROUX, BESSAC

The contracting authority, MetroVancouver, wants this new discharge channel to replace the existing structure, dating from the 1970s and severely damaged, and to improve its seismic resilience. The \$184m contract comprises, in particular, the construction of two access shafts 40 metres deep, two tunnels driven with a Slurry Shield TBM (lengths of 580 and 200 metres, inside diameter 4.2 m) in non-cohesive soil and with confinement pressures of about 4 bar, a diffuser 300 metres long connected to the tunnel and buried under the Fraser River, and a new effluent control system linked to the existing structures. □

### NUEVO EMISARIO DE AGUAS RESIDUALES DE LA PLANTA DEPURADORA DE ANNACIS ISLAND EN VANCOUVER, CANADÁ

GUILLAUME ROUX, BESSAC

Con este emisario, MetroVancouver, promotor del proyecto, pretende sustituir la construcción existente, que data de los años 70 y que está fuertemente dañada, así como mejorar su resistencia sísmica. El contrato, valorado en 184 millones de dólares, incluye la realización de dos pozos de acceso de 40 m de profundidad, dos túneles perforados con una tuneladora de presión de lodos (longitudes de 580 y 200 m, diámetro interior de 4,2 m) en terrenos no coherentes y con presiones de confinamiento del orden de los 4 bares, un difusor de 300 m de longitud conectado al túnel y enterrado bajo el río Fraser, y un nuevo sistema de control de los efluentes unido a las estructuras existentes. □



1  
© MBEC

# COMPLETION OF THE PADMA BRIDGE, THE LONGEST IN BANGLADESH

AUTEURS : MICHAEL KING, SENIOR CONSULTANT, RENDEL LTD. - KEITH TAYLOR, ASSIGNMENT DIRECTOR, RENDEL LTD.

THE PADMA RIVER, THE CONFLUENCE OF THE GANGES AND THE JAMUNA (BRAHMAPUTRA) RIVERS, IS A MAJOR DIVIDE BETWEEN THE SOUTH-WEST REGION OF BANGLADESH AND ITS CAPITAL CITY AND ECONOMIC CENTRE OF DHAKA. CROSSING THE PADMA WITH A 6.15KM LONG STEEL TRUSS BRIDGE, CARRYING ROAD AND RAIL, PRESENTED MANY TECHNICAL CHALLENGES INCLUDING SIGNIFICANT RIVER TRAINING WORKS AND DEEP FOUNDATIONS IN AN ALLUVIAL FLOOD PLAIN, WHERE THE ROCK FORMATION LIES SEVERAL KM BELOW THE RIVERBED AND IN A SEISMICALLY ACTIVE AREA.

## HISTORICAL BACKGROUND

Rendel's journey for this latest crossing commenced in 1986 when the UNDP funded a study to investigate corridors for a fixed link across the Padma/Jamuna rivers which separated the western regions of the country from the capital and eastern districts. The study, led by Rendel, planned first for a crossing of the Jamuna at Sirajganj, followed closely by a crossing of the Padma at Mawa (figure 2). Gaining confidence from the successful completion of the Jamuna crossing in

1998, the government proceeded with studies and design work for the Padma Bridge and associated river training works. Maunself-AECOM were appointed designers in 2009 and at the end of 2014 contracts for this construction work were let to Chinese contractors

## 1- View of completed bridge.

## 1- Vue du pont achevé.

(MBEC and Sinohydro). In 2015 Korean Expressway Corporation was appointed as Construction Supervision Consultant and in 2016 Rendel (along with its associates from Bangladesh and Japan) was appointed as Management Support Consultant to the Client, the Bangladesh Bridge Authority (BBA).

## DESCRIPTION OF THE PROJECT

The project comprises a 6.15km long main bridge, river training works extending over nearly 14.0km, with approximately 13.6km of approach roads and

bridge end facilities on both banks. The main bridge is a composite steel truss with a railway at lower deck level and highway at upper deck level. The main bridge consists of 41 steel truss spans each 150m long and 12.7m deep, with a 22m wide composite upper concrete deck to support the 4-lane highway. The lower level of the truss supports a standard (i.e., broad) gauge heavy freight railway line. The bridge also carries other major services including a 0.76m high-pressure gas pipeline and telecommunication facilities. ▷

**2- Map of Bangladesh showing locations of both Jamuna and Padma bridges.**  
**3- Project plan layout.**

**2- Carte du Bangladesh indiquant l'emplacement des ponts Jamuna et Padma.**

**3- Plan d'implantation du projet.**

A separate 400kV power transmission crossing on independent foundations is included and is provided 1km downstream. The main bridge is supported by raking steel tubular pile foundations.

Approach viaducts carrying both road and rail at each end of the main bridge are formed of 38m spans utilising pre-cast pre-stressed beams with in-situ reinforced concrete slabs. These provide for separation of the road and rail approaches. The viaducts, including the transition piers to the main bridge, are supported on bored concrete piles of diameter 1.5 and 3 metres.

Approach embankments and highways have been constructed, extending many kilometres from the crossing on both banks to connect to the existing highway network (figure 3).

**FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURE**

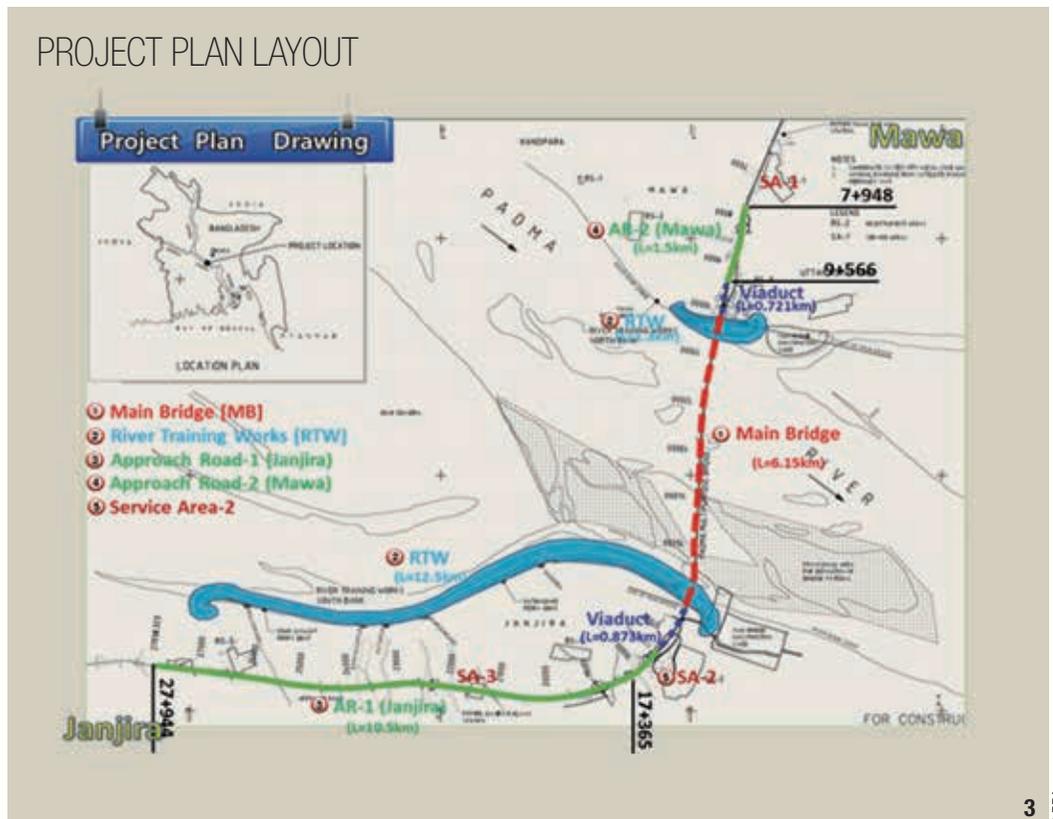
A raking steel tubular pile option was chosen as the most practical and economic solution for the bridge foundations. 3m diameter tubular piles were required to accommodate deep riverbed scour (+/- 50m), earthquake loads and ship impact loads as well as associated construction dead and live loading from the bridge road and rail traffic. The groups of (generally) 6 piles were driven at a 1:6 slope to the riverbed and through the underlying subsoil with pile lengths of up to 114m (figure 4).

Extensive hydrological riverbed modelling was carried out to determine local scour effects around the pile group. Steel tubular piles were used to provide a bending resistance in the pile that could not be generated in purely concrete bored piles. The 1:6 rake of the pile was utilised partly to resist lateral forces identified under earthquake loading.

The piles were fabricated from 60mm flat steel plate and rolled and formed into 3m lengths on site. These 3m



**PROJECT PLAN LAYOUT**





4  
© RENDEL



5  
© MBEC

sections were welded together to reach two lengths of around 75m and 45m. The bottom and top sections were transported to the driving platform and driven to length with the upper section welded on site after installation of the first 75m length. Soil was then removed from inside the pile, leaving a 5m soil plug at the base of the pile. After installing feeder pipes and manchette tubes a 10m reinforced concrete plug was cast at the base of the pile, and then the interface was base-grouted to ensure full end-bearing mobilisation. The tubular piles

**4- Tubular pile driving.**

**5- View of pile starters in pile cap.**

**6- Cross section of truss.**

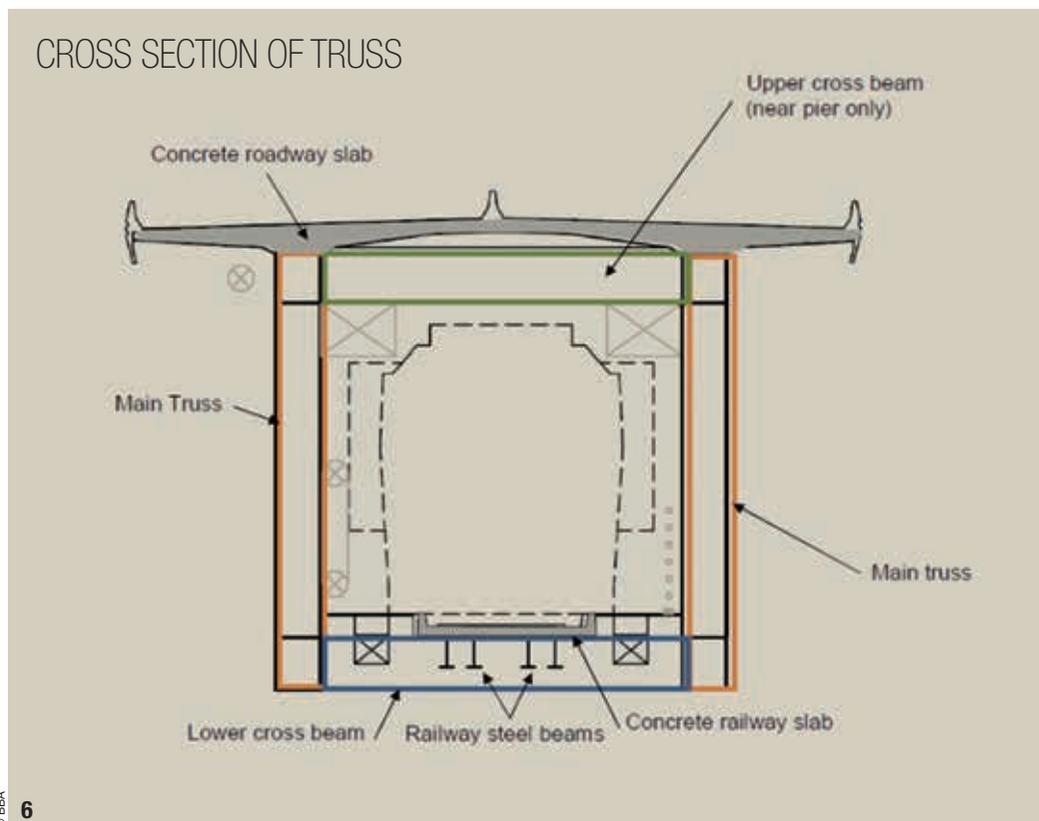
**4- Battage de pieu tubulaire.**

**5- Vue d'attentes en têtes de pieu.**

**6- Coupe de poutre treillis.**

were then backfilled with sand to within 10m of the top of the pile, where a second 10m reinforced concrete plug was placed. After installing a cofferdam, tremie concrete was poured in the bottom for construction of the 5.5m deep pile cap. The upper 10m concrete plug of each steel tubular pile was embedded into the pile cap, which has a maximum soffit level 2m below SWL (Standard Water Level) (figure 5). In practice, several problems were encountered during foundation construction:

- The presence of significant clay layers close to the founding level of many piers, discovered during the ground investigation carried out by the contractor, meant that some pier foundations had to be re-designed. This interrupted the construction programme with a change in the sequence of foundation construction and thus also in subsequent erection of the truss spans.
- The re-designs added a seventh vertical pile to the 6-pile group for 22 of the piers, and the changes in the truss span erection schedule required that additional truss storage provisions be made. Furthermore, several of the piles had to have TAM ducts welded to the perimeter to permit skin grouting.
- The fact that almost all the piles were raked, the contractor's desire to minimise the amount of soil removal during driving, and the addition of TAM ducts all contributed to very high resistance during driving, with excessive hammer wear and tear. A total of five hydraulic hammers were used on the project (IHC2000 and IHC 3000, both of limited utility), and three Menck hammers: 1900, 2400 and 3500. The latter proved essential for successful completion of the driving of almost 300 piles, all of 3m diameter and over 100m long.



6  
© BBA

**BRIDGE SUPERSTRUCTURE**  
The 150m long main-bridge truss spans comprise 1.6m x 1.5m box chord sections with box diagonal members of 1.5m x 1.1m. Plate thicknesses are up to 70mm, except on the seismic isolation bearings, where they are 110mm thick.



7a

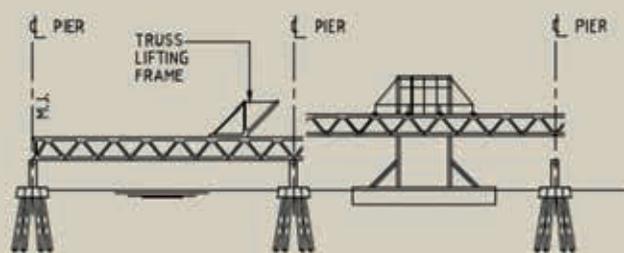
© RENDEL

These 41 spans were assembled into seven complete continuous modules. Six of these modules (modules 1 to 6) each comprise 6 spans (i.e., they become modules 900 metres long). One, module 7, is 750 metres long and comprises just five spans.

The truss supports a 4-lane highway with hard shoulders at top level, a single-track railway line at low level, a 760mm dia. gas pipeline and various ancillaries. The steel dead weight of each 150m long truss unit is over 3,000 tonnes. With upper (roadway) and lower (railway) concrete decks, the total weight of each span exceeds 8,000 tonnes. It was therefore considered impractical to design the bridge assuming each span could be erected after completion of the concrete support decks. So the concrete decks were designed as pre-cast components to be added after the truss spans in each module had been erected (figure 6). The upper-level 4-lane dual carriage-way roadway was constructed from matching pre-cast concrete units 20m wide and 2m and 2.15m long. These pre-cast deck panels were subsequently post-tensioned together and then made composite with the truss upper chords for live loading. This is full HA (normal) loading together with 45 units of HB (exceptional) loading to BS 5400 (the maximum standard UK loading for major highways).

At lower level, the truss carries sets of four stringer beams supported on brackets at each lower cross beam. To these stringer beams are attached pre-cast railway deck panels which support the ballastless track bed that is cast in situ. This railway is designed for Indian Code DFC loading equivalent to 120kN/m.

### SEQUENCE OF TRUSS ERECTION FROM CONTRACT DRAWING



7b

© RENDEL

**7a- Erection of subsequent spans along module.**

**7b- Sequence of truss erection from contract drawing.**

**7c- Erection of first span on module.**

7a- Montage des travées suivantes le long d'un module.

7b- Déroulement du montage d'une poutre treillis selon dispositions contractuelles.

7c- Montage de la première travée sur module.



7c

© RENDEL



© RENDEL  
8

Based on the contract drawings and in the construction procedure, only the first span was initially supported by two piers; thereafter, the subsequent spans to be erected for each module were lifted into position with one end supported by the pier, the other by a lifting frame positioned on the previously erected span (figure 7).

The decision on the direction of erection of each module was made at the start of project construction to allow timely completion of the fabrication drawings, i.e. before the final detailed Ground Investigation (GI), which formed part of the contract works, was carried out.

This had some repercussions, when the detailed GI through the deep channel areas revealed significant clay layers close to the pile founding levels. This required a piling re-design which interrupted the planned erection sequence and caused some disruption.

**8- 3D assembly of trusses at Mawa.**

**9- View of Mawa PC and storage yard.**

**8- Montage 3D de poutres treillis à Mawa.**

**9- Vue du parc Mawa de béton préfabriqué et de stockage.**

**TRUSS FABRICATION, ASSEMBLY AND ERECTION**

The truss members were initially prefabricated into units of between 50 and 80 tonnes by CRSBG (MBEC's subcontractor) in Shanhaiguan, China.

The members were then primed, coated internally and shipped to Bangladesh (generally Mongla Port) before transshipment to site by a smaller vessel. At Mawa Construction Yard, the units were unloaded at a jetty adjacent to

the truss assembly yard. Here, the truss components were assembled into the complete 150m long units each weighing more than 3000 tonnes in a series of prepared covered and open yard areas.

Initially, the units were welded into pairs of prefabricated sub-units, before the complete 2D assembly of 40m lengths of each truss on a series of prefabricated steel supports. After 2D assembly the pieces were lifted with tandem gantry cranes, rotated 90° vertically and then placed in the 3D assembly area (figure 8).

As part of the 3D assembly, the cross beams and railway beam support brackets, ancillary brackets for maintenance gantry, gas pipeline installation etc., were added. The complete truss was then moved into the painting shop along special heavy-duty multi-wheeled rail bogies.

On leaving the paint shop, the completed spans were stored in the yard

until their removal for erection using a special shear-leg floating crane.

The assembly and painting of a total of 41 spans of this size had to match the proposed erection sequence, since the storage of such massive components posed a huge logistical and engineering problem.

The change in erection sequence required by the need to re-design some pier foundations therefore caused some disruption.

Erection of the first truss span took place in September 2017 and continued from January of the following year. In 2018, 4 spans were erected, 14 spans in 2019 and 22 spans in 2020, the last on December 10th.

**PRECASTING OF ROADWAY AND RAILWAY DECK PANELS**

Two precast concrete (PC) yards were established for match-casting of the precast roadway panels on either side of the river. ▷



© MBEC  
9

The yard at Mawa, on the northern side, included 4 beds each holding 10 panels. Here 1710 panels were precast for the roadway slab along modules 1 to 4: a total length of 3,600m. The yard at Janjira, to the south, included 3 beds of the same size. Here 1210 panels were precast for the roadway slab along modules 5 to 7: a total length of 2,650m.

All the railway deck panels (2960) were precast at the Mawa PC yard (figure 9). They were attached compositely to large-section rolled steel (stringer) beams supported by cross beams between the lower truss chords. The railway deck panels together with their supporting steel beams were assembled on barges and then lifted into position before installing roadway deck panels above.

During the detailing of the pre-cast deck panels, the contractor decided to adopt two different panel lengths, 2.00m and 2.15m, to facilitate matching of the various types of shear connectors on the 18.75m unit length along the trusses. The 18.75m unit length comprises an 8m panel point region over the truss nodes (which used hoop shear connectors) and a 10.75m length between nodes which used stud shear connectors.

#### ERECTION OF ROADWAY DECK PANELS

Following trial assemblies of sets of 4 and 6 panels at ground level in the Janjira PC Yard, erection of the deck panels started at the Janjira end of the main bridge in April 2019. First, the deck panels were lifted up to deck level



10

© MBEC

and placed using the overhead gantry crane from approach road construction and with the gantry track extended past the end span of the main bridge. After initial temporary stressing during erection, the deck panels were then gradually post-tensioned longitudinally to provide a continuous steel/concrete composite support structure for live loading, along each 900m long module. During this initial deck panel placing, the first launching gantry (LG1) was assembled at ground level before being

**10- Assembly of first deck panel launching gantry.**  
**11- View of approach viaducts from Janjira side.**

**10- Montage du premier portique de lancement des dalles de tablier.**

**11- Vue des viaducs d'accès du côté Janjira.**

lifted onto the rails along the first deck panels (figure 10).

After a period of improving labour skills, the deck panel placing rate increased very significantly and, working three full shifts per day, a complete span of more than 70 panels was typically placed and fully stressed and grouted within one month.

Subsequently, a further three launching gantries were deployed to expedite deck panel erection, which was finally completed in August 2021.



11

© MBEC



© MBEC  
12

### 12- View of completed approaches at Mawa side.

### 12- Vue des accès achevés sur le côté Mawa.

Following complete stressing of each deck module, erection of the parapets commenced. The parapets are 1.8m high, extending 0.8m above road level and 1m below, comprising a 1.5m long precast outer section, with the traffic face subsequently cast in-situ after erection.

During 2021, application of the sprayed waterproofing system to the deck panels commenced, followed closely by a two-layer asphalt pavement. Lastly, aluminium handrailing was added along the top of the parapets.

### PROVISION FOR DEHUMIDIFICATION

The design and construction contract provided for full corrosion protection on both the inside and outside of all truss members. However, with very limited internal access, the client's panel of experts urged the BBA to consider the provision of dehumidification, as this would be the most cost-effective way of ensuring long-term internal corrosion protection.

## PRINCIPAL QUANTITIES FOR THE MAIN BRIDGE

### FOUNDATIONS

#### 3m DIA. DRIVEN TUBULAR PILES:

- 300 No. - 30,000m total length
- 135,000 tonnes weight fabricated from 60 thick plate (grade 355)

#### PIERS AND PILE CAPS:

- 51,000 m<sup>3</sup> (123,000 tonnes) concrete
- 7,700 tonnes of steel reinforcement (grade 500)

### MAIN BRIDGE STEEL TRUSS SPANS

#### 41 SPANS EACH 150m LONG:

- 115,000 tonnes structural steel (grade S420)

#### RAILWAY DECKS:

- 2,600 precast units
- 5,200 m<sup>3</sup> (12,500 tonnes) concrete
- 1,400 tonnes steel reinforcement
- 8,150 tonnes of rolled I-girders

#### ROADWAY DECK:

- 3,000 match-cast precast units
- 60,000 m<sup>3</sup> (145,000 tonnes) concrete
- 10,000 tonnes steel reinforcement
- 3,750 tonnes pre-stressing strand

Accordingly, as part of its MSC contract, Rendel carried out system design using 3D modelling and CFD simulation (by Ingerop), which allowed the required holes to be added through solid webs and diaphragms before the first span was erected.

The dehumidification design consists of two closed circuits in each 6-span module, with all the required plant to be installed in chambers in the truss lower chord. The whole installation may now be completed without any significant steelwork changes.

### APPROACH VIADUCTS

Throughout the period of construction works on the main bridge, the approach viaducts were built on both banks. The foundation construction, almost exclusively of 1.5m dia. bored piles, commenced at the southern Janjira side before moving across to the north side at Mawa. Pier construction followed the same sequence.

The highway approach viaducts extend up to 875m beyond the ends of the main bridge and include a total of 83 spans generally of unit length 38m, each carrying two traffic lanes and formed by a series of pre-cast 'super Tee' girders with an in-situ concrete deck. The railway viaducts extend just seven spans beyond the ends of the main bridge and are formed of pre-cast I-girders with an in-situ concrete slab (figures 1, 11 and 12). □

## MAIN CONTRIBUTORS

**CLIENT:** Bangladesh Bridge Authority (BBA)

**CONTRACTOR:**

China Railway Major Bridge Engineering Group (MBEC)

**DESIGNER:** Maunsell-AECOM

**CONSTRUCTION SUPERVISION CONSULTANT:**

Korea Expressway Corporation and Associates (KEC)

**MANAGEMENT SUPPORT CONSULTANT:**

Rendel and Associates (Rendel)

### ABSTRACT

## RÉALISATION DU PONT DE PADMA, LE PONT LE PLUS LONG DU BANGLADESH

MICHAEL KING, RENDEL LTD. - KEITH TAYLOR, RENDEL LTD.

**Le pont de Padma**, permettant au rail et à la route de franchir le Gange et la rivière Jamuna est le pont le plus long du Bangladesh avec ses 6,15 km, en zone sismique. Outre ce record, il comporte des pieux de longueur exceptionnelle allant jusqu'à 100 m, réalisés en site aquatique. Les travaux se sont poursuivis pendant la pire pandémie du siècle avec des impacts sur la disponibilité du personnel ainsi que sur les matériaux clés importés de l'étranger. Le recours à des assemblages de tronçons de poutres du tablier entièrement produits en usine assure la qualité d'exécution. □

## FINALIZACIÓN DEL PUENTE DE PADMA, EL MÁS LARGO DE BANGLADESH

MICHAEL KING, RENDEL LTD. - KEITH TAYLOR, RENDEL LTD.

**El puente de Padma**, que permite franquear por ferrocarril y carretera los ríos Ganges y Jamuna, es el puente más largo de Bangladesh, con 6,15 km de longitud y situado en zona sísmica. Además de este récord, cuenta con pilotes de longitud excepcional, de hasta 100 m, erigidos en medio acuático. Las obras prosiguieron durante la peor pandemia del siglo, lo que afectó a la disponibilidad de personal y materiales claves importados del extranjero. Para garantizar la calidad de ejecución, se recurrió al ensamblaje de tramos de vigas del tablero totalmente producidos en fábrica. □



© SOLETANCHE BACHY

# EXTENSION (PHASE 1) DU PORT DE PUERTO BOLIVAR

AUTEURS : GUSTAVO PEREIRA, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SOLETANCHE BACHY - FLORENT ANDRÉ, DIRECTEUR DE PROJET ADJOINT, SOLETANCHE BACHY - ALEXIS BEHAGHEL, DIRECTEUR DES OPÉRATIONS GRANDS PROJETS, SOLETANCHE BACHY

**EN ÉQUATEUR, DÉMARRÉ EN PLEINE CRISE DU COVID, LE CHANTIER D'EXTENSION DU PORT DE PUERTO BOLIVAR A ÉTÉ CONFRONTÉ À DE MULTIPLES DÉFIS GÉOTECHNIQUES ET HUMAINS. LE PROJET EST AUJOURD'HUI ENTRÉ DANS LA PHASE DE CONSTRUCTION INDUSTRIELLE. LES 450 M DE QUAI, ET LES 12 HA DE PLATEFORME LOGISTIQUE PERMETTANT LE STOCKAGE DE CONTAINERS RÉFRIGÉRÉS, DOUBLERONT LES CAPACITÉS D'EXPORTATION DE L'OPÉRATEUR PORTUAIRE YILPORT ECU. IL SERA LIVRÉ FIN DÉCEMBRE 2023.**

Le projet d'extension du port de Puerto Bolivar Phase 1 est situé en Équateur, dans la province d'El Oro, à 150 km au sud de Guayaquil. Cette région est riche de 3 activités économiques principales : l'extraction d'or, la culture de bananes et l'élevage de crevettes. Ces deux dernières ressources nécessitent une infrastructure logistique importante pour permettre leur exportation vers le reste du monde. En 2016, Yilport, l'un des principaux opérateurs de terminaux portuaires dans le monde, acquiert la concession d'une durée de 50 ans pour l'exploitation et l'extension du terminal de Puerto Bolivar. Le port possède déjà

5 quais, dont le dernier, de 300 m de long, réalisé en 2012, permet d'accueillir des navires jusqu'à 12 m de tirant d'eau. Mais, compte tenu de la forte croissance des exportations de bananes et de crevettes, un important projet d'extension de ce port a vu le jour. Constitué de plusieurs phases, il devra à terme permettre l'exploitation de 900 m de quais additionnels (avec 15,2 m de tirant d'eau) et de 42 ha de plateforme logistique supplémentaire. Le Consortium PBO, constitué par l'union temporaire d'entreprises du groupe Soletanche Bachy (la filiale colombienne et la filiale Grands Projets) et de Cipte (l'une des plus importantes

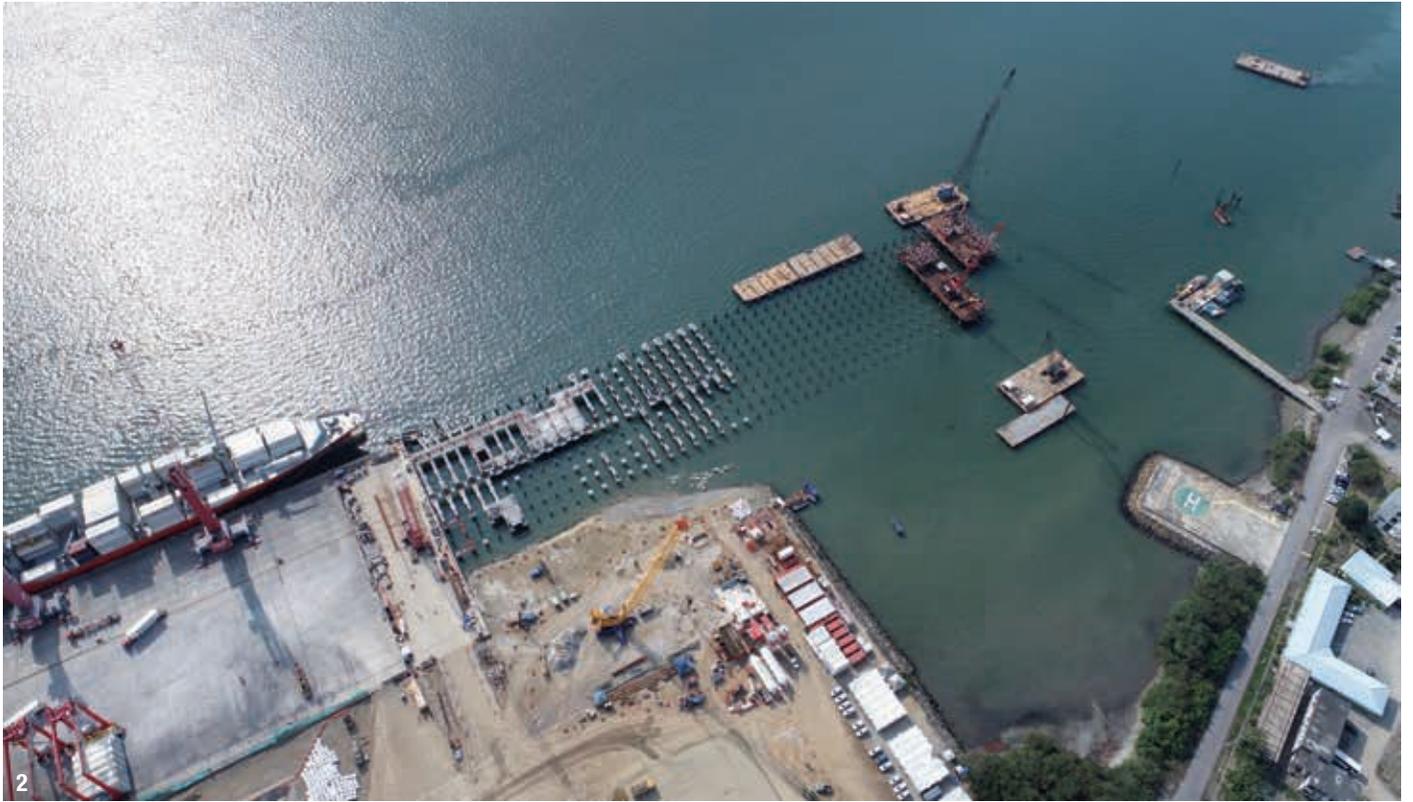
**1- Travaux de battage pour le nouveau quai.**

**1- Pile driving works for the new quay.**

entreprises de construction maritime d'Équateur), a été sélectionnée par Yilport en juin 2020 pour réaliser la phase 1 de l'extension du port. Il s'agit d'un contrat clé en main de conception et construction des ouvrages maritimes et terrestres, bâtiments, systèmes mécaniques et électriques, ainsi que la

mise en service de ces ouvrages. D'un montant de 176 M\$, cette première phase se compose d'un nouveau quai, le quai 6, d'une longueur de 450 m, dans le prolongement du quai 5 existant (figures 1 et 2). Ce quai permettra l'accostage des navires atteignant 400 m de long, ainsi que d'une première extension de l'aire de stockage de conteneurs de 12,2 ha.

L'aire de stockage des conteneurs sera constituée d'une dalle en grave-ciment, surmontée de pavés autobloquants, pouvant recevoir jusqu'à 5 niveaux de conteneurs, les grues de type RTG et les structures qui reçoivent les conteneurs réfrigérés.



© SOLETANCHE BACHY  
2

**LES ENJEUX DU DESIGN**

Le design a été confié à l'entreprise espagnole Sener qui a une grande expérience de ce type d'ouvrage. La vérification indépendante est faite par Egis, puis par le conseil de notre client Royal Haskoning. Le bureau d'études interne de Soletanche Bachy assure la coordination du design, ainsi que le développement des solutions d'amélioration de sols. L'un des principaux défis techniques de ce projet est la nature complexe de son sous-sol. En premier lieu, la côte équatorienne est fortement sismique et l'ensemble de l'ouvrage peut être soumis à des tremblements de terre particulièrement puissants : les études

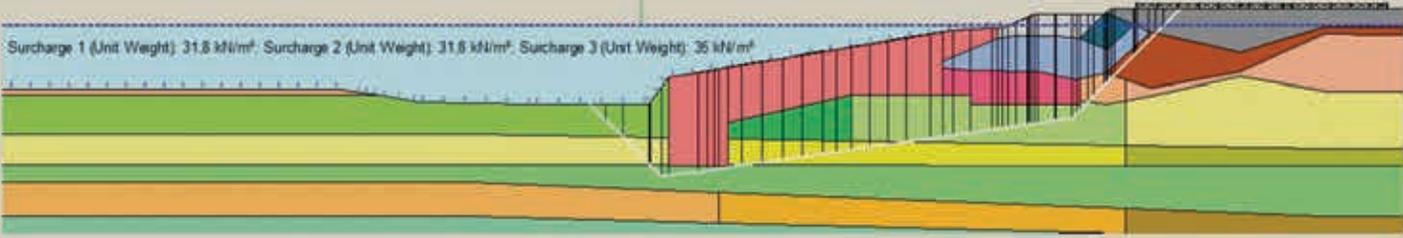
**2- Vue du quai 5 (chargement de conteneurs) et des travaux du quai 6.**  
**3- Surface de rupture critique pour la vérification de la stabilité en condition post-sismique (post DE).**

**2- View of quay 5 (container loading) and works on quay 6.**  
**3- Critical failure surface for the verification of stability in post-seismic condition (post DE).**

d'aléa sismique définissent des événements dont les accélérations au rocher peuvent atteindre 0,60 g, associés à des magnitudes élevées (supérieures à Mw=8), ainsi qu'à des durées très significatives, aspects qui caractérisent les séismes de subduction sud-américains. De plus, la géologie de Puerto Bolivar, situé à l'embouchure du delta de Guayaquil, est constituée d'intercalations d'argiles compressibles et de couches de sables potentiellement liquéfiables, sans substratum compétent apparent sur une épaisseur de 140 m. Le tout sous une couche superficielle de limons et de remblais anthropiques hétérogènes. Du fait de cet aléa sismique, ainsi que des besoins

d'opérationnalité définis par le client, le contrat a imposé un design sismique selon le principe du *Performance Based Design*, en l'occurrence, selon le code Nord-américain ASCE 61/14 " *Seismic Design of Piers and Wharves* ". Ce code définit notamment les vérifications à implémenter pour trois événements sismiques différents. Pour un premier niveau de séisme, dit "OLE", correspondant à une période de retour de 72 ans, les infrastructures doivent garder leur opérationnalité presque intacte. Pour un deuxième niveau de séisme, dit "CLE", associé lui à une période de retour de 475 ans, les dommages subis par les structures doivent être limités et réparables. ▶

**SURFACE DE RUPTURE CRITIQUE POUR LA VÉRIFICATION DE LA STABILITÉ EN CONDITION POST-SISMIQUE (POST DE)**



3  
© SENER



© SOLETANCHE BACHY

Finalement, on vérifie la tenue des structures sous l'évènement "DE", de très faible probabilité (période de retour de 2475 ans), en veillant à qu'il n'y ait pas d'effondrement des éléments structurels.

Pas moins de six techniques différentes d'amélioration de sol ont ainsi été déployées sur l'ensemble du projet pour répondre au mieux à chacune des spécificités de celui-ci. En effet, selon les zones (conditions de sol) et la nature des ouvrages (quai, plateforme), les besoins ne sont pas les mêmes.

Ainsi, sous le quai 6 (qui sera fondé sur des pieux battus métalliques), le risque principal est le glissement du talus en cas de séisme, accompagné de liquéfaction des sables. S'il est important de garantir un coefficient de sécurité suffisant pendant le séisme opérationnel OLE, il est aussi nécessaire de garantir que les séismes CLE et DE n'imposent pas des déplacements excessifs sur le talus, ce qui induirait des efforts élevés sur la structure du quai. Finalement,

il est fondamental de s'assurer que, à la suite des événements sismiques, les sols liquéfiés ou fragilisés par le séisme gardent une résistance résiduelle suffisante pour garantir un minimum de stabilité du talus (figure 3). Ces différents scénarios étant associés à des surfaces de rupture de très large extension et profondeurs (jusqu'à 200 m et 35 m, respectivement), une solution de traitement nécessitait d'agir sur deux axes principaux : augmenter la résistance au cisaillement du terrain en profondeur, en y incorporant du sol-ciment, d'une part, confiner et cloisonner le sol dans l'immédiate proximité de la structure du quai, pour limiter les excès de pression interstitielle et donc empêcher la liquéfaction autour des pieux d'autre part.

Pour atteindre ces objectifs, la solution proposée a été de réaliser en sol mixing des casiers de 20 à 35 m de profondeur. Cette technique qui avait été mise en œuvre avec succès par Soletanche Bachy sur le chantier d'extension de

**4- Engin de Cutter Soil Mixing (CSM) baptisé Magic Rig sur ponton.**

**5- Méthode push-over - vérification de l'état des rotules plastiques en condition sismique CLE.**

**4- Cutter Soil Mixing (CSM) machine called Magic Rig on pontoon.**

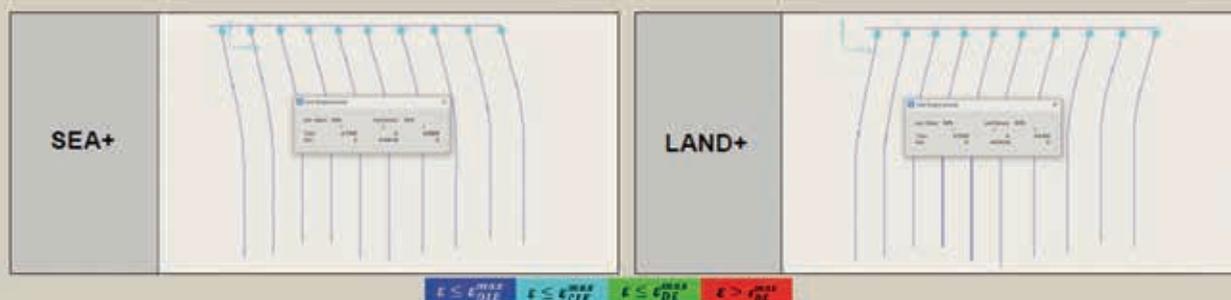
**5- Push-over method - verification of the state of the plastic hinges in seismic condition CLE.**

sur les barges du partenaire équatorien Cipte et traiter ainsi 45000 m<sup>3</sup> de sol en 5 mois. Les barges sont positionnées par un système de 4 treuils avec suivi GPS permettant une mise en place de l'outil très rapide et une précision de moins de 2 cm. Les *Magics Rigs* sont eux-mêmes équipés d'un ensemble de capteurs permettant le suivi de la verticalité, de la vitesse de rotation des outils de coupe, ainsi que du couple déployé et du débit d'injection du coulis de ciment afin d'assurer totalement la qualité des panneaux de CSM réalisés. Malheureusement, toute la zone initialement prévue n'a pu être traitée par le CSM du fait de la présence importante de blocs dans les couches superficielles du terrain. Le CSM y a donc été remplacé par des colonnes de *Jet Grouting* sécantes sur la partie terrestre de la zone à traiter.

Sous la plateforme logistique, la problématique n'est plus la stabilité, mais le contrôle des tassements globaux ainsi que différentiels. Ainsi, suivant les

l'aéroport de Hong Kong a été adaptée à Puerto Bolivar. Deux engins de *Cutter Soil Mixing* (CSM) baptisés *Magic Rigs* à Hong Kong (figure 4) ont été importés directement d'Asie pour être installés

## MÉTHODE PUSH-OVER - VÉRIFICATION DE L'ÉTAT DES ROTULES PLASTIQUES EN CONDITION SISMIQUE CLE





© SOLETANCHE BACHY

6

zones ayant ou non été déjà exploitées (et donc pré-chargées), suivant les épaisseurs d'argiles compressibles en présence et suivant le risque de tassements post-liquéfaction des couches de sable, les techniques mises en œuvre ont varié du remplacement dynamique (compactage dynamique avec mise en œuvre de blocs sous la masse, réalisé par Menard) au pré-chargement, en passant par les inclusions rigides. Enfin, au contact avec le quai existant numéro 5, un ensemble de colonnes ballastées a été installé afin de limiter fortement la liquéfaction des sables et ainsi éviter la déstabilisation de ce quai existant sous l'effet conjugué des

**6- Plateformes maritimes pour le battage des pieux du quai et équipements maritimes auxiliaires.**

**7- Essai de chargement statique sur pieu.**

**6- Maritime platforms for pile driving for the quay and auxiliary maritime equipment.**

**7- Static loading test on pile.**

nouvelles charges d'exploitation de la plateforme et d'un séisme.

La conception de la structure du quai a elle aussi été guidée par les principes de *Performance Based Design*, et la solution consiste en une plateforme en béton armé fondée sur des pieux métalliques verticaux. Des calculs du type *push-over* ont été développées de façon à évaluer en détail le comportement de la structure pour chacun des trois niveaux de séisme. Si pour le séisme OLE un comportement quasi-élastique était nécessaire à cause des limitations d'opérationnalité très strictes, pour les séismes CLE et DE, une évaluation de la plastification des

rotules plastiques a été nécessaire, de façon à respecter les limites de déformation imposées par le code (figure 5). En parallèle, la structure du tablier doit résister quasi-élastiquement aux sollicitations sismiques, la dissipation d'énergie étant exclusivement effectuée par les éléments verticaux.

Les fondations du quai sont constituées de 820 pieux métalliques battus, d'un diamètre allant jusqu'à 1,25 m et une longueur maximale de 55 m. Les pieux sont mis en place par battage depuis 2 grues de 200 t positionnées sur 2 plateformes métalliques (figure 6). Les plateformes métalliques avancent sur les pieux précédemment battus au fur et à mesure de leur installation. Les pieux sont alimentés par barges depuis le quai existant. La capacité portante des pieux est contrôlée, pour chacun d'entre eux, par la corrélation entre l'énergie de battage déployée et les résultats d'essais statiques et dynamiques réalisés sur environ 10% des pieux. Deux essais statiques destructifs (à 2 fois la capacité portante finale du pieu), ainsi que 3 essais statiques sur pieux définitifs (à 1,5 fois la capacité portante) seront ainsi réalisés sur l'ensemble des pieux (figure 7).

La superstructure du quai 6 est, quant à elle, constituée d'éléments préfabriqués en béton (chapiteaux, poutres, prédalles), recouverts d'une dalle qui sera bétonnée in situ, reliant les éléments préfabriqués et formant la couche de roulement finale.



© SOLETANCHE BACHY

7



8  
© SOLETANCHE BACHY

Les éléments sont préfabriqués sur place depuis une usine montée sur le site (figure 8) et permettant la préfabrication de 20 éléments par jour. L'ensemble de l'immense "Lego" du quai sera constitué de plus de 2 000 pièces mises en place depuis 2 fronts de travail : l'un partant du quai numéro 5 existant et qui avancera au fur et à mesure de la construction de la dalle. L'autre depuis une plateforme métallique (la même que celle ayant permis le battage des pieux) partant environ au deuxième tiers du quai et alimentée par voie maritime en pièces préfabriquées (figure 9).

La dalle du quai sera équipée de rails pour grues portuaires STS (4 grues "Post-Panamax" sont ainsi prévues), ainsi que des équipements nécessaires à l'accostage des navires (défenses et bollards).

Côté plateforme logistique, les travaux d'amélioration de sol ont été suivis par l'installation des réseaux divers (électriques, pluviaux, protection incendie, eau potable, etc.), puis par la construction des fondations des équipements de la plateforme (principalement pour les grues RTG permettant le mouvement des containers, les *Reefer Racks* assurant leur branchement électrique pour ceux qui seront réfrigérés et pour les mâts d'éclairage de 35 m de hauteur). La plateforme en elle-même est composée d'une superposition de couches de CBGM (*Cement Based Granular Material*) (figure 10)

pour laquelle Eurovia a apporté son expertise technique, et de pavés autobloquants.

### UN CHANTIER DÉMARRÉ EN PLEINE CRISE DU COVID

Comme bien des opérations démarrées pendant cette période, le chantier a dû faire face aux nombreuses contraintes dérivées de la crise du Covid-19 dans une région où l'accès aux soins peut être plus compliqué qu'ailleurs.

La mise en place de mesures sanitaires importantes, puis dès qu'ils ont été

**8- Usine de préfabrication.**  
**9- Plateforme pour l'installation des éléments préfabriqués du quai.**

**8- Prefabrication plant.**  
**9- Platform for installation of prefabricated quay elements.**

disponibles, l'application des vaccins à tous les collaborateurs du chantier, ont permis d'éviter les cas d'infection grave sur le chantier.

Cependant, le projet a largement souffert de la limitation de circulation des marchandises. Ainsi, les *Magic Rigs* (outillages permettant la réalisation du CSM) venant de Hong Kong sont arrivés avec plusieurs mois de retard. Un certain nombre de transports de matériaux ont eux aussi été largement retardés, ce qui a eu un impact important sur le déroulement du chantier, de même



9  
© SOLETANCHE BACHY

## STRUCTURE CEMENT BASED GRANULAR MATERIAL



© SENER

10

que l'explosion du coût des matières premières et de leur transport.

Par ailleurs, l'équipe du chantier, très internationale (plus de 10 nationalités composent l'équipe entre encadrement, experts techniques, opérateurs, etc.), a dû s'adapter aux fermetures et ouvertures aléatoires des frontières.

### UNE PRÉOCCUPATION ENVIRONNEMENTALE FORTE

L'une des préoccupations majeures du projet est la limitation de l'impact de la construction sur l'environnement. Ainsi, un certain nombre de mesures ont été prises de façon à rendre le projet le moins traumatisant possible.

La première d'entre elles a été d'interdire toute activité de dragage pendant toute la saison de migration des baleines qui remontent le long du continent américain. En effet, lors de leur migration, les baleines qui passent au large de Machala entre juin et octobre auraient pu être gênées dans leur voyage par le mouvement des barges de dragage. Ainsi, bien que très impactant sur le programme général du chantier, le dragage a dû être réalisé en 2 étapes séparées,

**10- Structure Cement Based Granular Material.**

**10- Structure Cement Based Granular Material.**

la première de janvier à avril 2021, la deuxième de février à avril 2022. Un autre élément important de la réduction de l'impact du projet sur l'environnement a été le travail important réalisé sur la composition des coulis de CSM et des boues mères de forage pour cette activité. D'une part, l'utilisation des cendres de hauts fourneaux (laitiers, ou "slag")

en remplacement du ciment dans le coulis a permis une réduction très significative des émissions de CO<sub>2</sub> pour le projet. En effet, ce laitier, qui est un produit dérivé de la sidérurgie, a un bilan carbone bien moindre que celui du ciment. D'autre part, la boue mère de forage a été réalisée en utilisant de l'eau de mer, là où elle est classiquement réalisée à base d'eau douce. Ainsi, l'économie en termes d'utilisation de ressources naturelles et de transport (l'alimentation en eau du chantier se fait par camion-citerne en attendant l'installation du réseau) a été très importante.

Enfin, les équipes de designers qui ont dimensionné ce projet se sont appliquées à optimiser le plus possible les quantités nécessaires à la construction de cet ouvrage dans le respect, bien entendu, des normes et prescriptions en vigueur.

Ce sont ainsi environ 5 000 t d'acier dans la structure des pieux du quai (sur 20 000 t au total mises en place) et plus de 1 000 t sur la quantité de ferrailage de la superstructure du quai qui ont pu être économisées, réduisant d'autant l'impact CO<sub>2</sub> lié à la fabrication de la matière première, du transport, et de la mise en œuvre.

Parmi toutes les actions mises en œuvre par le projet pour contribuer à la préservation de l'environnement, on peut aussi citer la participation des équipes du projet au challenge "Ocean Rescue" consistant au ramassage des déchets sur les zones mitoyennes au projet. Ce sont ainsi environ 300 Kg de déchets qui sont collectés chaque mois sur les rives marines bordant le futur terminal.

Il est prévu que la phase 1 de l'agrandissement du terminal portuaire de Puerto Bolivar sera livrée en fin 2023. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**DIMENSIONS DU QUAI : 450 m x 65 m**

**VOLUME DE DRAGAGE : 800 000 m<sup>3</sup>**

**ACIER (TUBES ET ARMATURES) : 26 000 t**

**SURFACE DE LA PLATEFORME LOGISTIQUE : 12,2 ha**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**CLIENT : Yilport Ecu - filiale équatorienne de Yilport**

**ASSISTANT MAÎTRISE D'OUVRAGE : Royal Haskoning**

**CONSTRUCTEUR : joint venture Soletanche Bachy Colombia, Soletanche Bachy International - Cipte**

**DESIGNER : Sener - vérificateur : Egis**

## ABSTRACT

### PUERTO BOLIVAR EXTENSION (PHASE 1)

GUSTAVO PEREIRA, SOLETANCHE BACHY - FLORENT ANDRÉ, SOLETANCHE BACHY - ALEXIS BEHAGHEL, SOLETANCHE BACHY

**Teams from Soletanche Bachy** (via its subsidiaries Soletanche Bachy Colombia and Soletanche Bachy International), in partnership with an Ecuadorian construction firm, Cipte, have been working since January 2021 on phase 1 of the construction project for the extension of Puerto Bolivar, at Machala in Ecuador. The project is being performed for the Turkish international port operator Yilport, which has already been present on this port terminal since 2016. The new quay, 450 metres long, will be able to receive the biggest container ships to keep pace with the growth in exports of shrimps and bananas produced in Ecuador. This structure, supplemented by an additional 12-hectare logistics platform, represents the first phase of an overall project for extension of Puerto Bolivar. □

### AMPLIACIÓN (FASE 1) DEL PUERTO BOLIVAR

GUSTAVO PEREIRA, SOLETANCHE BACHY - FLORENT ANDRÉ, SOLETANCHE BACHY - ALEXIS BEHAGHEL, SOLETANCHE BACHY

**Los equipos de Soletanche Bachy** (a través de sus filiales Soletanche Bachy Colombia y Soletanche Bachy International), en asociación con la constructora ecuatoriana Cipte, construyen desde enero de 2021 la fase 1 del proyecto de ampliación de Puerto Bolivar en Machala, Ecuador. El proyecto se realiza por cuenta del operador portuario internacional turco Yilport, ya presente en esta terminal portuaria desde 2016. De 450 m de longitud, el nuevo muelle permitirá acoger los más grandes portacontenedores para acompañar el crecimiento de las exportaciones de camarones y bananas producidos en Ecuador. La obra, completada con una plataforma adicional de 12 hectáreas, constituye la primera fase de un proyecto global de ampliación del Puerto Bolivar. □



© JOËL MONIN - RAZEL-BEC

# RÉHABILITATION DU BASSIN DE DISSIPATION DU BARRAGE DE KARIBA

AUTEURS : LAURENT BROUET, DIRECTEUR DE ZONE AFRIQUE DE L'EST ET AUSTRALE, OCÉAN INDIEN, RAZEL-BEC - JOËL MONIN, DIRECTEUR DE PROJET, RAZEL-BEC

CONSTRUIT À LA FIN DES ANNÉES CINQUANTE SUR LE FLEUVE ZAMBÈZE, À LA FRONTIÈRE ENTRE LA ZAMBIE ET LE ZIMBABWE, LE BARRAGE HYDROÉLECTRIQUE DE KARIBA FAIT L'OBJET D'UN VASTE PROGRAMME DE RÉHABILITATION, APRÈS PLUS DE 60 ANS D'OPÉRATION. PARMIS LES TRAVAUX NÉCESSAIRES, LA REMISE EN FORME DE LA FOSSE DE 80 M DE PROFONDEUR FORMÉE AU PIED DE L'OUVRAGE, AVEC POUR OBJECTIF DE STOPPER LE PHÉNOMÈNE D'ÉROSION ET D'ASSURER, À TERME, LA STABILITÉ DU BARRAGE. LES TRAVAUX DÉMARRÉS EN 2017 SE POURSUIVENT ACTUELLEMENT.

L'aménagement hydroélectrique de Kariba (figures 1 et 2), est constitué d'un barrage voûte de 128 m de hauteur et de deux centrales électriques souterraines sur chaque rive du fleuve Zambèze, développant une puissance totale de 2080 MW. L'ouvrage a formé, à sa mise en service, un des plus grands lacs artificiels du monde avec un volume de retenue

avoisinant les 181 milliards de m<sup>3</sup>. Le corps du barrage comporte six vannes de décharge ayant chacune une capacité de débit de 1500 m<sup>3</sup>/s. Ces six passes ont pour rôle d'évacuer les crues lorsque le plan d'eau ne peut plus les absorber. La mise en service tardive de l'usine en rive gauche et des épisodes de crues intenses du Zambèze ont généré des

déversements fréquents, à des débits considérables, pendant les vingt premières années après la mise en eau du barrage (figure 3).

L'énergie des chutes d'eau formées par l'ouverture des vannes s'est concentrée sur une zone d'impact restreinte, à quelques dizaines de mètres du pied aval du barrage. Elle est à l'origine de la formation d'une fosse d'érosion de

**1- Barrage de Kariba - Zambie.**

**1- Kariba dam - Zambia.**

## LOCALISATION DU BARRAGE DE KARIBA



© RAZEL-BEC

2

80 m de profondeur sous le niveau d'eau aval (figure 4).

À terme, si ce phénomène d'érosion n'était pas stoppé, il menacerait la stabilité du barrage.

Cette configuration de l'aménagement, après plus de 60 ans d'opération, est unique, et aucune situation similaire dans le monde n'est, à ce jour, connue.

En 2017, dans le cadre d'un vaste programme de réhabilitation de l'ouvrage lancé par l'exploitant du barrage (Zambezi River Authority), le maître d'ou-

### 2- Localisation du barrage de Kariba.

### 3- Ouverture des vannes du barrage (2000).

### 2- Location of Kariba dam.

### 3- Opening the dam outlets (2000).

vrage a désigné Razel-Bec comme attributaire d'un appel d'offres international et a signé avec l'entreprise un contrat financé par le Fonds Européen de Développement.

Le projet, toujours en cours, est crucial pour la sécurité des trois millions de personnes vivant en aval du barrage, mais aussi capital pour assurer le développement des régions situées de part et d'autre de la frontière et fournir la majeure partie (jusqu'à 70 %) de l'énergie nécessaire aux deux pays limitrophes.

## NATURE DES TRAVAUX

Afin d'évaluer les développements futurs si rien n'était entrepris et définir un nouveau profil garantissant la stabilité des ouvrages à long terme, des études techniques ont été menées au préalable par Tractebel France - Coyne et Bellier, conjointement avec le Laboratoire de Constructions hydrauliques de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, et Aquavision Engineering.

Un modèle hydraulique hybride numérique/physique a ainsi été élaboré et exploité pour définir une solution technique validée par un panel d'experts internationaux afin de permettre la stabilisation de la fosse.

La solution retenue consiste principalement à élargir la fosse vers l'aval, et dans une moindre mesure vers les rives, de sorte à créer un bassin de dissipation suffisamment grand pour éviter un surcreusement par les déversements futurs et une érosion régressive orientée vers le pied du barrage. Le principe de base est donc de diminuer l'énergie de la chute d'eau par quatre.

L'objectif des travaux est de créer un élargissement de la fosse par excavation (figures 5 et 6). La méthodologie retenue implique de miner à l'explosif la roche en place dans la fosse d'érosion et d'évacuer 300 000 m<sup>3</sup> de déblais rocheux.



© FAO AQUACULTURE PHOTO LIBRARY

3

Afin de garantir la sécurité des travaux, tous les talus créés sont stabilisés par une combinaison d'ancrages métalliques et de béton projeté, avant d'être recouvert d'un filet métallique (30 000 m<sup>2</sup> de parois à traiter).

Une faille située dans la roche au pied du barrage ayant par ailleurs été détectée, un coffrage/sarcophage en béton armé permettant d'améliorer les caractéristiques mécaniques dans la zone faillée est également prévu.

Avant de pouvoir réaliser ces travaux dans la zone d'érosion, une route d'accès permettant d'y accéder a dû être construite sur la rive zambienne et la fosse mise hors d'eau. Pour cela, la construction d'un batardeau provisoire et amovible, constitué de piles en béton immergées entre lesquelles viennent s'insérer des vannes d'arrêt métalliques, a été nécessaire entre le chantier et la restitution des usines. Cet ouvrage temporaire constitue à lui seul une part substantielle des travaux.

Une fois le batardeau construit, la zone a été progressivement vidangée (630 000 m<sup>3</sup> d'eau au total) au moyen de pompes, et les travaux de minage et d'excavation ont pu commencer.

Étant donné la nature des travaux, et la proximité du barrage, un important programme de surveillance des travaux est mis en place, incluant notamment un contrôle accru des vibrations sur le barrage et les ouvrages à proximité durant les travaux d'excavation à l'explosif. De même, un ensemble de dispositifs de mesures est mis en place pour contrôler les niveaux d'eau dans la roche et les mouvements du barrage durant les travaux et la vidange de la fosse.

Étant donné la complexité du phasage et la durée prévisible des travaux (36 mois initialement), la zone d'intervention doit pouvoir être rapidement immergée en cas de crue et de déchargement du barrage. C'est pourquoi le batardeau est démontable.

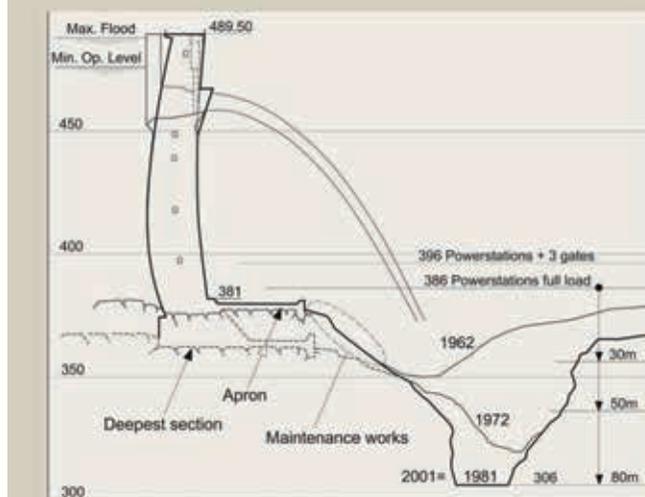
À l'achèvement des travaux, les vannes d'arrêt seront enlevées et le bassin de dissipation ainsi créé naturellement remis en eau.

## LES PRINCIPAUX ENJEUX TECHNIQUES DU PROJET

### LA ROUTE D'ACCÈS (figure 7)

La découverte de conditions géologiques imprévues sur le tracé de cette route a nécessité la modification du tracé initial, qui prévoyait de tailler un talus vertical dans la colline afin d'éviter de passer sur la dalle en béton de la centrale hydroélectrique zambienne

## FOSSE D'ÉROSION À L'AVAL DU BARRAGE



4

© FAZEL-BEC

4- Fosse d'érosion à l'aval du barrage.

5- Vue 3D de la fosse après excavation.

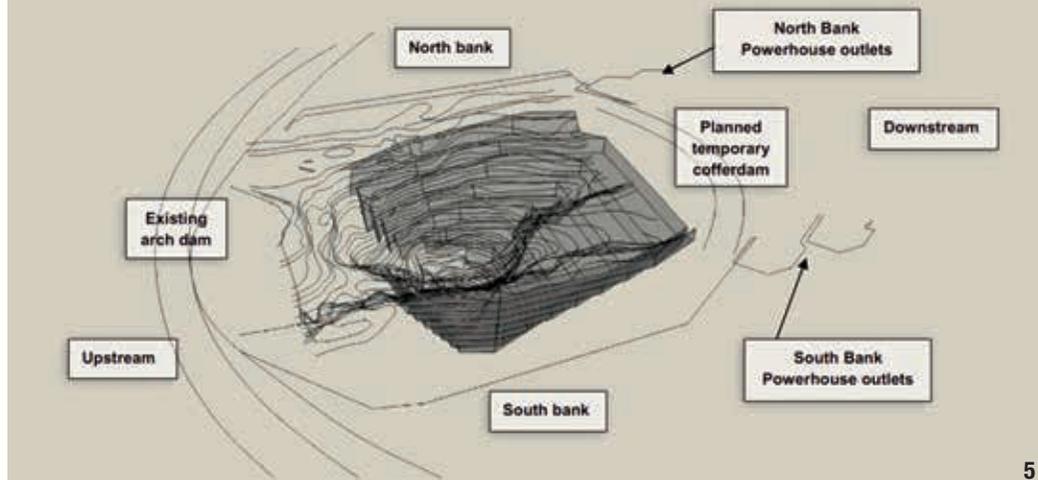
6- Vue projet 3D des travaux terminés avant remise en eau du bassin de dissipation.

4- Erosion pit downstream of the dam.

5- 3D view of the pit after excavation.

6- 3D project view of the completed works before filling the stilling basin with water again.

## VUE 3D DE LA FOSSE APRÈS EXCAVATION



5

© FAZEL-BEC



6

© FAZEL-BEC



© JOËL MONIN - RAZEL-BEC  
7

dont la structure était mal connue. La solution alternative proposée a donc consisté à renforcer la dalle en béton, pour permettre le passage des engins de chantier, et en particulier celui de la grue à treillis de 130 t, indispensables pour le démarrage des travaux de génie civil.

De plus, l'absence des déblais venant de la colline, comme le prévoyait la

**7- Pistes d'accès au chantier.**

**8- Début des travaux de génie civil.**

**7- Site access tracks.**

**8- Start of civil engineering work.**

solution initiale, a nécessité de trouver une autre source de matériaux de remblais (30 000 m<sup>3</sup>) pour la construction de la rampe d'accès à la berge du bassin de dissipation.

Une fois cette première phase achevée avec plus de 22 mois de retard compte-tenu des aléas rencontrés les travaux de génie civil ont pu commencer (figure 8).

### LE BATARDEAU PROVISOIRE

Constitué de piles en béton immergées entre lesquelles viennent s'insérer des vannes d'arrêt métalliques, l'ouvrage provisoire est construit en aval de la zone d'érosion, et juste à l'amont de la sortie des turbines, afin de permettre l'assèchement par pompage de la fosse d'érosion, sans jamais impacter la production d'électricité, cruciale pour les 2 pays avoisinants.

Les piles en béton armé sont préfabriquées sur la rive gauche du fleuve (côté Zambie), sur un ascenseur hydraulique semi-immersé (figure 9), qui permet la construction de la partie inférieure des piles, avant leur transport par flottaison (figure 10) jusqu'à leurs emplacements définitifs où elles sont immergées. Cette méthode d'exécution était une variante proposée par l'entreprise lors de la soumission. Le tirant d'eau disponible ne permettant pas de flotter les piles complètes, elles sont ensuite terminées en place, avant d'être ancrées dans le substrat rocheux du lit du fleuve par 8 tirants de 50 m de long, post-contraints à 200 t.

Au préalable, des travaux subaquatiques d'excavation doivent être réalisés afin de niveler les zones d'ancrage des piles. ▶



8  
© JOËL MONIN - RAZEL-BEC



© JOËL MONIN - RAZEL-BEC

9

Le niveau du substrat rocheux du lit du fleuve conditionne la hauteur des piles ainsi que le volume de roches à excaver pour être en mesure de réaliser un seuil horizontal permettant d'assurer l'étanchéité du batardeau provisoire.

Par conséquent, la bathymétrie de la zone d'érosion est une donnée essentielle de la conception du batardeau provisoire. L'absence de données fiables préalablement au démarrage des travaux a ainsi conduit à l'augmentation significative des quantités d'excavations subaquatiques (à l'explosif). À cela s'est ajoutée la nécessité absolue de réaliser une campagne d'investigation complète permettant d'identifier la qualité du substratum rocheux. En effet, la dureté et l'homogénéité de la roche sont des paramètres dimensionnants importants pour assurer la stabilité et l'étanchéité de l'ouvrage construit.

Compte tenu de la configuration du site, peu d'investigations géotechniques ont été faites avant les travaux et les découvertes, en cours de réalisation, d'écarts importants entre la bathymétrie initialement fournie et la réalité du terrain rencontré ont nécessité plusieurs adaptations.



10

© JOËL MONIN - RAZEL-BEC

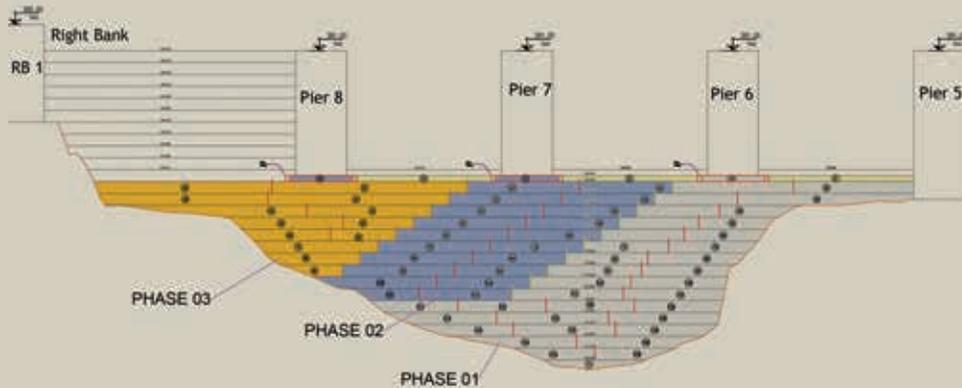
**9- Piles sur ascenseur en attente de flottaison (gauche) / piles terminées (droite).**  
**10- Flottaison d'une pile en position.**

**9- Piers on lift pending floating (left) / completed piers (right).**  
**10- Floating a pier into position.**

Ainsi, la découverte de l'ancien lit du fleuve comblé par des roches et des sédiments a imposé d'importants travaux supplémentaires (excavation sous eau des matériaux et comblement du lit en béton).

Ces travaux sous eau ont nécessité 16 mois de plus par rapport au délai initial afin d'excaver 18 000 m<sup>3</sup> de matériaux de l'ancien lit de la rivière et leur substitution par 12 000 m<sup>3</sup> de béton jusqu'à 25 m de profondeur (figure 11), afin de former une assise stable pour le batardeau (figure 12).

## BÉTONS SUBAQUATIQUES À RÉALISER SOUS LE BATARDEAU



**11- Bétons subaquatiques à réaliser sous le batardeau.**  
**12- Bétons coulés sous eau (vue après vidange de la fosse).**  
**13- Rideau d'étanchéité - réalisé (60 m) et projet d'approfondissement potentiel (80 m).**

**11- Underwater concreting to be performed under the cofferdam.**  
**12- Concretes poured under water (view after draining the pit).**  
**13- Curtain wall - completed (60 m) and potential deepening project (80 m).**

© FAZEL-BEC

11

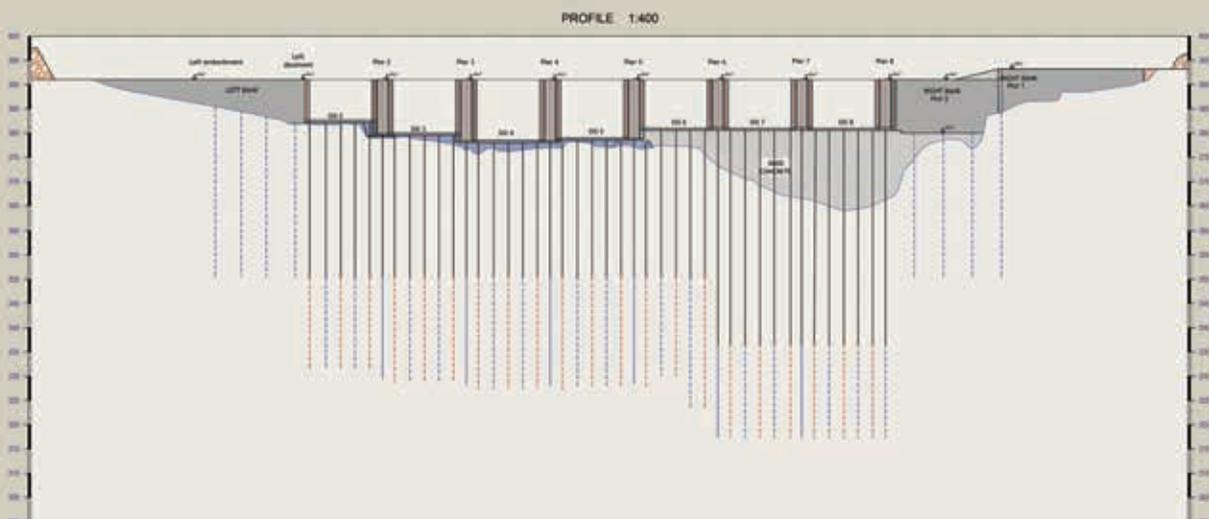


© JOEL MONIN - FAZEL-BEC

12

Le tout devant être réalisé par des plongeurs à quelques mètres de la sortie des turbines de l'usine hydro-électrique zimbabwéenne. Outre les sujets liés à la sécurité de ces travaux, il a fallu trouver une manière de les organiser en impactant au minimum la production électrique, en ne travaillant que durant les heures creuses (la journée de 10h à 16h, et la nuit de 22h à 4h du matin), lorsque le Zimbabwe acceptait, pendant ces heures, de renoncer à quasiment 25% de sa production nationale. ▷

## RIDEAU D'ÉTANCHÉITÉ - RÉALISÉ (60 m) ET PROJET D'APPROFONDISSEMENT POTENTIEL (80 m)



© FAZEL-BEC

13



14

© JOEL MONIN - RAZEL-BEC

### LE RIDEAU D'ÉTANCHÉITÉ

Les investigations complémentaires réalisées pendant les travaux ont permis également de déceler la présence de fracturation dans la roche sous l'axe du batardeau, phénomène nécessitant aussi des travaux et du délai complémentaires pour assurer l'étanchéité sous le batardeau.

Le batardeau étant terminé, il a donc fallu réaliser un rideau d'étanchéité non prévu initialement (figure 13), jusqu'à 30 m de profondeur dans la roche. Pour ce faire, le matériel déjà présent sur site a été utilisé (foreuses et centrale d'injection utilisée pour la pose des tirants métalliques), afin de forer puis injecter du coulis de ciment à 15 bars

de pression, sur toute la largeur de l'ouvrage. L'objectif était d'empêcher les circulations d'eau qui pourraient mettre en péril la suite des travaux (trop de venues d'eau, impossibilité de mettre la zone à sec) ou même la stabilité de l'ouvrage en cas de déboufrage.

### LA MISE À SEC DE LA ZONE DE TRAVAUX

Une fois le rideau d'étanchéité terminé, il était enfin possible de mettre la zone de travaux à sec (figure 14), afin de pouvoir commencer les travaux d'excavation. Pour cela, une installation de pompage a été mise en place, capable de pomper jusqu'à 2 000 litres par seconde (au début) ou de relever l'eau sur une

**14- Le batardeau est à sec, il reste encore 80 m d'eau à pomper pour voir le fond de la fosse.**

**15- Début des travaux d'excavation, il reste 50 m d'eau à pomper.**

**14- The cofferdam is dry, 80 metres of water still remain to be pumped to see the bottom of the pit.**

**15- Start of excavation work, 50 metres of water are still to be pumped.**

hauteur de 90 m (à la fin). Les pompes ont été installées sur des radeaux, et un système de tuyauterie permet de rejeter l'eau à l'aval du batardeau.

### L'ÉLARGISSEMENT DE LA FOSSE PAR MINAGE ET EXCAVATION

Le batardeau provisoire terminé, il reste maintenant à s'attaquer à l'objet principal du marché, à savoir l'agrandissement du bassin de dissipation.

Pour cela, les 8 foreuses mobilisées sur le site entrent en action afin de miner à l'explosif un volume de 1 200 m<sup>3</sup>/jour, et stabiliser les parois rocheuses au fur et à mesure de l'avancement.

La stabilisation des parois est réalisée par :



15

© JOEL MONIN - RAZEL-BEC



16- Zone de la faille géologique.

16- Geological fault zone.

- Des ancrages métalliques (de 3 m à 12 m) ;
- Du béton projeté (10 cm d'épaisseur avec treillis métallique) ;
- Des filets de sécurité.

Au total il faudra 12 mois pour :

- Excaver 300 000 m<sup>3</sup> de roche, jusqu'à 80 m de profondeur ;
- Réaliser 120 km de forages ;
- Supporter 28 000 m<sup>2</sup> de parois.

Les matériaux tassés sont évacués à 3 km du site, dans l'ancienne carrière exploitée dans les années cinquante, lors de la construction du barrage. Jusqu'à 9 tombereaux de 30 t sont mobilisés pour permettre le transport des matériaux.

Étant donné la topographie très tourmentée du site, une partie des travaux ne peut être réalisée que par des équipes de cordistes, tant pour le minage à l'explosif que pour la stabilisation des parois.

Le niveau d'eau dans le bassin est maintenu en permanence constant, 16 m plus bas que le niveau en cours d'excavation, et est abaissé au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

## LE TRAITEMENT DE LA FAILLE

Comme l'avaient indiqué les études techniques d'avant-projet, la présence d'une faille distensive majeure en dessous du pied aval du barrage principal nécessite un traitement particulier de cette zone (figure 6).

Pour réaliser ce confortement, une campagne d'injection au coulis de ciment est prévue avant de recouvrir la paroi d'une carapace en béton haute performance de 2,5 m d'épaisseur, sur toute la hauteur de la fosse (80 m), soit au total près de 8 000 m<sup>3</sup> de béton. Ce sarcophage en béton armé sera ancré dans la roche par des barres métalliques de 12 m de long en diamètre 40 mm.

Tous les travaux de consolidation par injection et de pose des ancrages sont réalisés par des équipes de cordistes.

## CONCLUSION

Malgré les nombreux aléas géologiques rencontrés depuis le début des travaux, les équipes de l'entreprise et de ses sous-traitants ont su faire preuve de résilience et de proactivité pour faire face aux défis techniques rencontrés. Prévu initialement pour une durée de 3 ans, il faudra pratiquement 7 ans pour parvenir à boucler ce projet emblématique. □

## CHIFFRES CLÉS DU PROJET

- MONTANT DES TRAVAUX : 115 M€ (estimation finale)**
- DURÉE DES TRAVAUX INITIALE : 36 mois + 12 mois de spillage**
- DURÉE DES TRAVAUX FINALE : 84 mois**
- EFFECTIF MOYEN : 180/250 personnes (hors encadrement) + 15 expatriés**
- MATÉRIELS SIGNIFICATIFS : 1 grue à treillis 130 t, 2 grues à tour, 1 centrale à béton 60 m<sup>3</sup>/H, 5 pelles mécaniques de 25 à 50 t, 5 à 9 dumpers 30T, bulls, compacteurs, grues mobiles de 60 t, 8 foreuses**
- ATELIER MÉCANIQUE : 1**
- ATELIER COFFRAGE-FERRAILLAGE : 1**
- BASE-VIE BUREAUX : 1**

### QUANTITÉS SIGNIFICATIVES DE MATÉRIAUX

- BÉTON : 8 000 m<sup>3</sup> pour les piles ; 8 000 m<sup>3</sup> pour le coffrage de la faille ; 12 000 m<sup>3</sup> pour les bétons sous eau**
- ACIER : 700 t pour les vannes du batardeau ; 600 t pour les bétons armés**
- POMPAGE : 630 000 m<sup>3</sup>**
- DÉBLAIS ROCHEUX : 300 000 m<sup>3</sup>**
- FORAGES : 120 km**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

- FINANCEMENT : Fonds Européen de Développement**
- MAÎTRE D'OUVRAGE : The National Authorising Officer of the European Development Fund, Ministry of Finance**
- MAÎTRE D'OEUVRE : Zambezi River Authority (ZRA)**
- REPRÉSENTANT DU MAÎTRE D'ŒUVRE : Stucky**
- ENTREPRISES : Razel-Bec**
- SOUS-TRAITANTS : Epc (minage), Hydrokarst (travaux spéciaux)**

## ABSTRACT

### RENOVATION OF THE STILLING BASIN OF KARIBA DAM

LAURENT BROUET, RAZEL-BEC - JOËL MONIN, RAZEL-BEC

On the border between Zambia and Zimbabwe, Kariba dam is undergoing a vast renovation programme. This is required because the structure's stability could be jeopardised by a novel erosion phenomenon: the energy of the waterfalls has hollowed out a pit 80 metres deep at the base of the dam. The works involve creating a more suitable discharge basin, by broadening the pit by excavation and mining with explosives, after emptying the site of water by means of a temporary cofferdam. It is an impressive renovation project, crucial for the security of the 3 million people living downstream of the dam, which provides up to 70% of the energy needed by the two neighbouring countries. □

### REHABILITACIÓN DEL CUENCO DE DISIPACIÓN DE LA PRESA DE KARIBA

LAURENT BROUET, RAZEL-BEC - JOËL MONIN, RAZEL-BEC

En la frontera entre Zambia y Zimbabwe, la presa de Kariba está siendo objeto de un amplio programa de rehabilitación. En efecto, la estabilidad de la construcción podría verse comprometida por un fenómeno de erosión inédito: la energía de los saltos de agua ha perforado una fosa de 80 m de profundidad al pie de la presa. Las obras consisten en crear un cuenco de descarga mejor adaptado, ensanchando la fosa por excavación y voladura con explosivos, previamente cerrada al agua mediante una ataguía provisional. Se trata de un impresionante proyecto de rehabilitación, crucial para la seguridad de los 3 millones de personas que viven río abajo de la presa, que suministra el 70% de la energía que necesitan los dos países vecinos. □

# HOLISTIC PROOF ENGINEERING ON THE SYDNEY GATEWAY PROJECT

AUTEUR : DERIK HANEKOM, ASSISTANT TECHNICAL DIRECTOR, RENDEL INGEROP PTY LTD.

GIVEN THAT CONSTRUCTION METHODOLOGIES, SEQUENCES, TEMPORARY WORKS AND AVAILABLE EQUIPMENT ARE USUALLY CONSIDERED BY INDEPENDENT DESIGNERS ON A COMPLEX BRIDGE PROJECT, THERE IS A RISK OF INCONSISTENT DESIGN ASSUMPTIONS AT THE INTERFACES. HOLISTIC PROOF ENGINEERING COULD ENSURE A CORRELATION BETWEEN DESIGN ASSUMPTIONS AND HIGHLIGHT INCONSISTENCIES AT THE INTERFACES, AS DEMONSTRATED DURING THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE TWIN SKEWED NETWORK ARCH BRIDGES AS PART OF THE SYDNEY GATEWAY PROJECT.



## THE NEED FOR PROOF ENGINEERING

The structural and geotechnical design scope of complex structures on Design and Construct projects is usually divided into numerous interrelated permanent works and temporary work design packages. To ensure expert design coverage of the full scope, it could be efficient for the contractor to appoint independent designers for the permanent works and temporary works respectively.

The interfaces between the various packages remain a key risk factor on any project, since the behaviour of the interface will be dependent on the interaction between various permanent and temporary work items. The interface will only be adequate if there is a correla-

tion between the assumptions made by the designers of each package. Design development is a dynamic process and there is a risk that something gets lost in translation, resulting in inconsistencies between the assumptions of the various designers. These inconsistencies could lead to significant project delays and at worst catastrophic failure.

On some projects, proof engineering is the method used to mitigate this risk. The purpose of proof engineering is to undertake a full and independent assessment, without exchange of calculations or similar information, of all factors influencing the final integrity of the structural and geotechnical design. This includes undertaking design calculations and modelling, reviewing the

## 1- Artistic Impression of Bridge SB51.

## 1- Vue d'artiste du pont SB51.

safety and functional requirements of the identified elements, the design documentation and the construction methodology, and performing an independent dimensional check (figure 2). If different companies are appointed as proof engineer for the various packages, there is always a risk that the interfaces are not fully assessed or understood due to the division of the proof engineering scope between various parties.

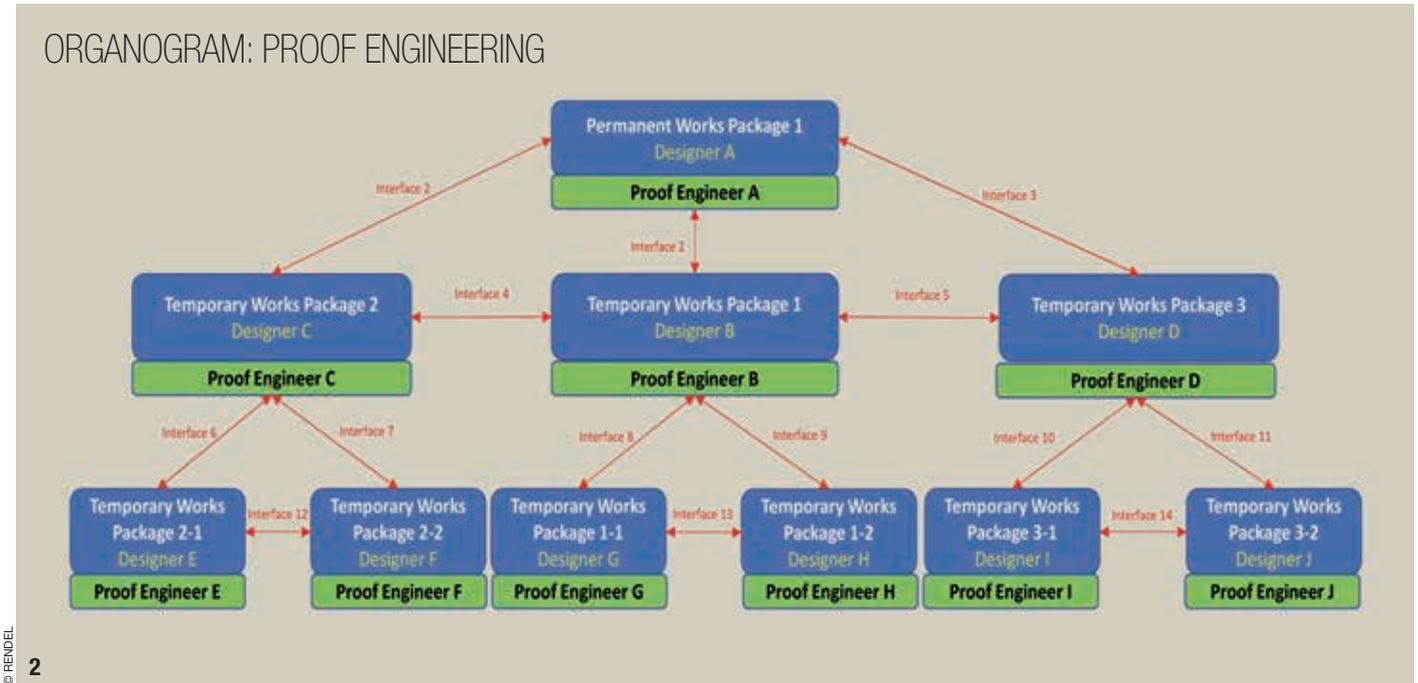
## HOLISTIC PROOF ENGINEERING DEFINED

A better alternative for risk mitigation would be holistic proof engineering, where a single proof engineer is appointed to review the packages of all the designers (temporary works and permanent works) as well as the interfaces (figure 3).

The holistic approach enables the proof engineer to consider the following:

- 1- Construction stage analysis:** Understanding the build-up of stresses that are locked into the structure as the various elements are fabricated and erected on site.
- 2- Temporary works:** Assessment of the capacity of the temporary works, to establish whether they are capable

## ORGANOGRAM: PROOF ENGINEERING



© RENDEL  
2

of withstanding all the temporary loads during all of the construction stages. In most instances the structural elements are bespoke and, to fully understand their behaviour, a detailed geometric and material non-linear analysis is required to determine the behaviour and interaction of each temporary works element.

**3- Interfaces:** It is important that the theoretical boundary conditions assumed for both the temporary works and permanent works during analysis must correlate with reality. The impact of the temporary works

**2- Organogram: Proof Engineering.**

**3- Organogram: Holistic Proof Engineering.**

**2- Organigramme : Ingénierie de preuve.**

**3- Organigramme : Ingénierie de preuve holistique.**

on the permanent works must be assessed during each construction stage. Only by assessing both the temporary works and the permanent works will the reviewer have a full understanding of the behaviour.

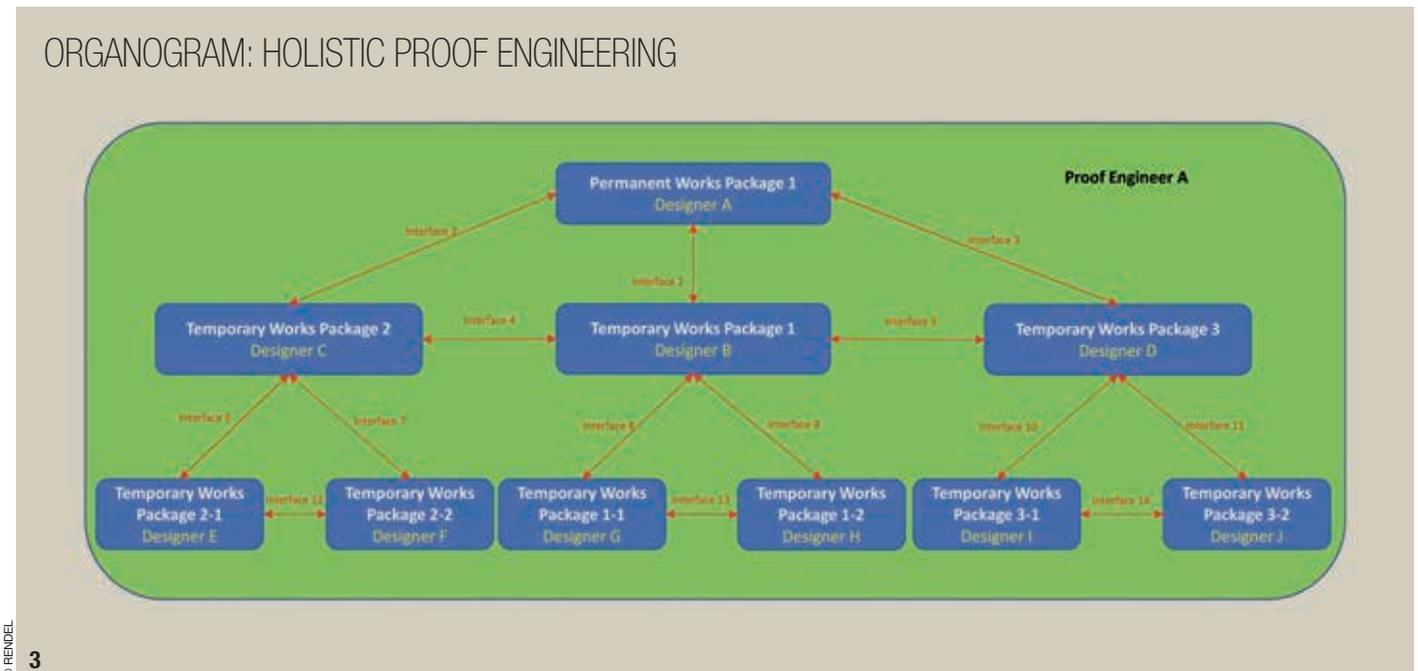
**4- Geotechnics:** The founding conditions/requirements of the permanent works and temporary works must be thoroughly assessed to ascertain that the structure will be stable throughout each construction stage and in its permanent state. Holistic proof engineering requires that the proof engineering team have

extensive experience both in permanent works design, temporary works design and erection engineering. Successful implementation requires clear and continuous communication between all parties as well as mutual respect for each other's role on the project.

### ADVANTAGES OF HOLISTIC PROOF ENGINEERING PROJECT-SPECIFIC KNOWLEDGE

The focus during the detailed design phase of a Design and Construct Project is predominantly on design of the permanent works. ▷

## ORGANOGRAM: HOLISTIC PROOF ENGINEERING



© RENDEL  
3



4

© CM+

To certify the permanent works, the proof engineer must acquire an in-depth understanding of the project-specific technical criteria in order to develop its analysis models and check calculations.

Should the proof engineering scope be extended to include the temporary works, the review team can complete the temporary works engineering at a lower cost and within a shorter time frame, since the team would be working from existing models rather than creating new analysis models and holding discussions to align assumptions with the designer.

#### TECHNICAL FOCUS AND COLLABORATION

Since proof engineering is focused on reproducing a technical analysis and assessment of the structure, the proof engineering team has the time and opportunity to focus their efforts on key areas and carefully check every assumption with refined analysis. Focusing on these key issues and addressing them at an early stage in the design process will reduce any costly programme delays involved in redesign or retrospective fixing of the problem during construction.

#### THE SYDNEY GATEWAY PROJECT

The Sydney Gateway Project, which is currently being constructed, is a road and rail project to cater for forecast growth in passengers and freight through Sydney Airport and Port Botany. The project comprises road elements (Stages 1 & 3) and rail elements (Botany Rail Duplication Stage 2, delivered separately by ARTC). Located in a highly developed brownfield environment, with adjacent road, rail,

pedestrian, air transport, water and miscellaneous utility infrastructure, the site constraints dictated that various complex bespoke bridge solutions are required for successful project implementation.

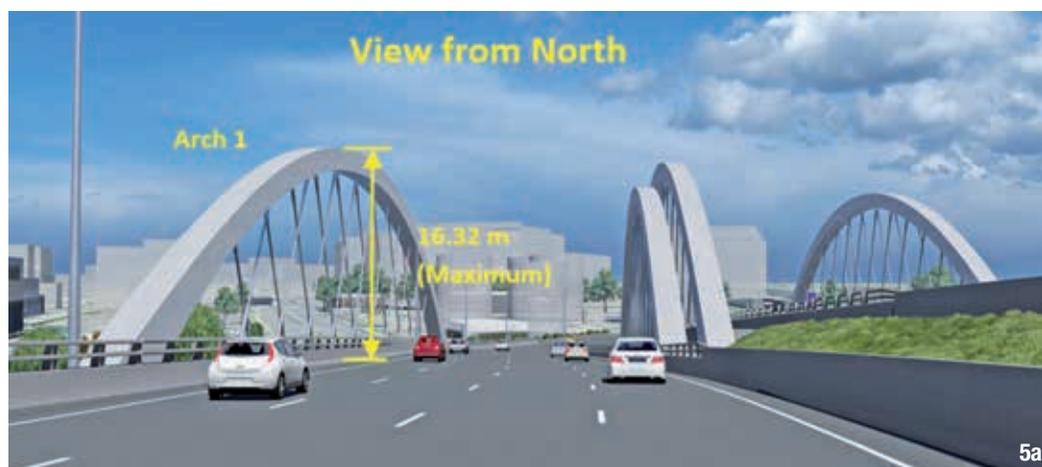
Although Rendel was responsible for proof engineering of all the permanent works and bespoke temporary works associated with the numerous

#### 4- Elevation View of Bridge SB51. 5- Northern and Southern View of Bridge SB51.

4- Vue en élévation du pont SB51.

5- Vues Nord et Sud du pont SB51.

complex structures on the project, this article focuses on the project's landmark structure, Bridge SB51, which consists of twin network arch bridges spanning the Alexandra Canal. Each bridge has a different skew angle at each end of the superstructure, resulting in four unique network arches, with span lengths ranging between 95m and 107m (figure 1).



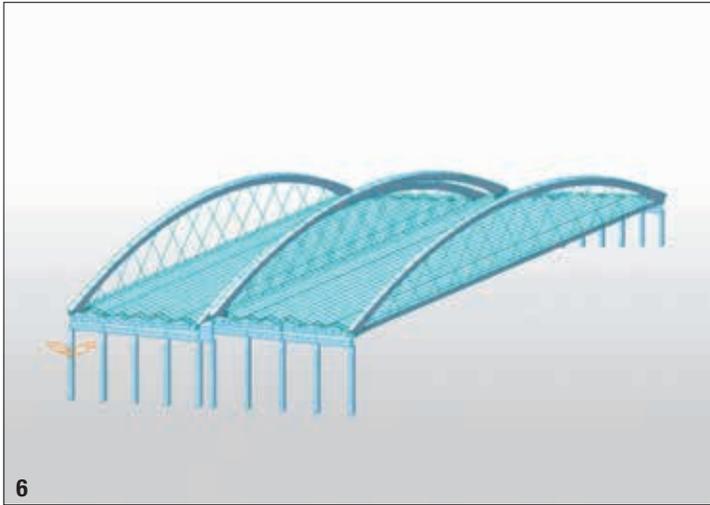
5a

© CM+



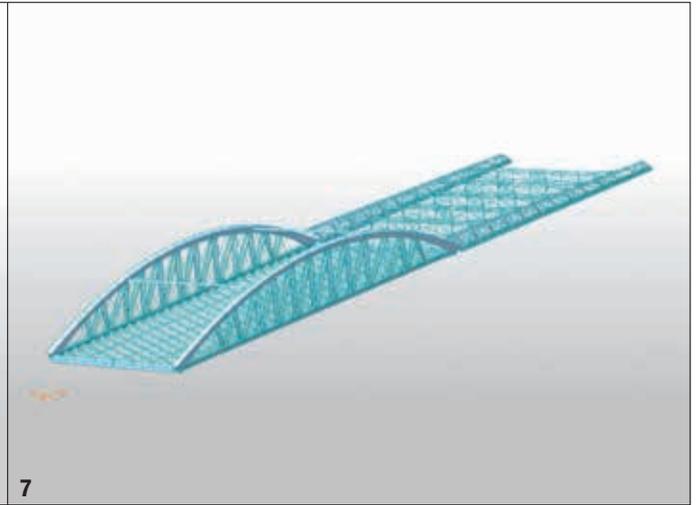
5b

© CM+



6

© RENDEL



7

© RENDEL

## PROOF ENGINEERING OF PERMANENT WORKS

The proof engineering associated with the permanent works was discussed extensively by Khan et al. in their paper titled "Iconic Twin Network Arch Bridges for the Sydney Gateway Project, Australia" (figures 4 and 5).

Bridge SB51 comprises steel arches, chords, floor beams and high-strength steel cable stays, with a cast-in-situ reinforced concrete deck slab, supported on a reinforced concrete substructure, and piled foundations. The global as well as local behaviours of skewed network arches due to various combinations of vertical and horizontal loading can be quite complex. Key considerations during proof engineering of the permanent works included (Khan et al., 2022):

→ **Global analysis model:** A three-dimensional space frame, representing the superstructure as well

**6- Isometric View of Global Analysis Model in Midas Civil.**

**7- Isometric View of Launch Analysis Model in Midas Civil.**

**8- Isometric Views of Rotating Bracket and Arch Rotation Models in Midas.**

**6- Vue isométrique du modèle d'analyse global dans Midas Civil.**

**7- Vue isométrique du modèle d'analyse de lancement dans Midas Civil.**

**8- Vues isométriques des modèles Support Rotatif et Rotation d'Arc dans Midas.**

as the substructure, was required to establish the global behaviour of the structure. This model was ideal for the assessment of permanent effects, traffic and thermal effects as well as linear and non-linear effects during seismic activity.

→ **Local analysis models:** Where required, the global model was supplemented with local plate element models to refine element stiffness, assess localised stress concentrations, and derive fatigue effects.

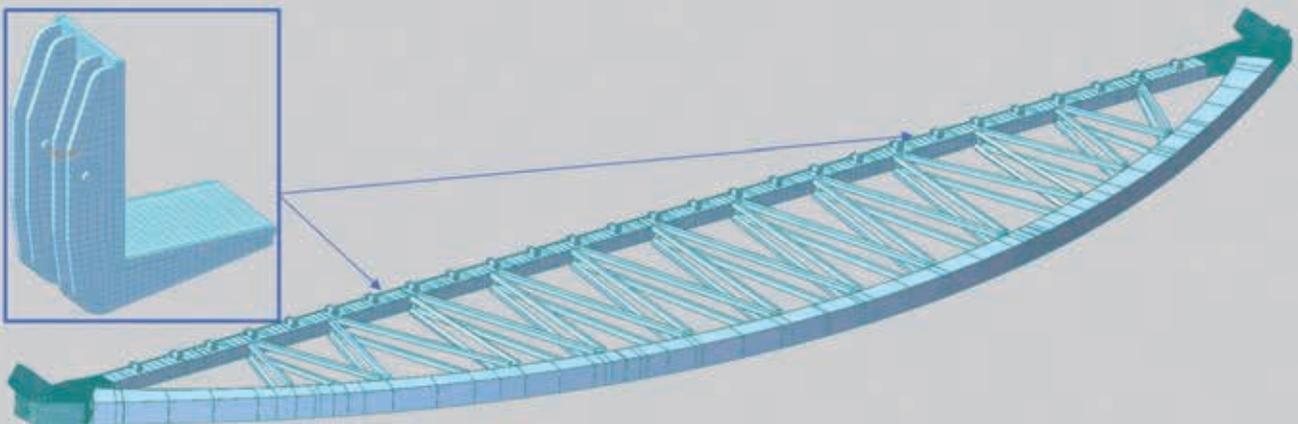
→ **Buckling analysis:** Due to the high compressive forces associated with network arch bridges, it was critical to evaluate the structural system for in-plane and out-of-plane buckling. A key consideration during the buckling analysis was the effect of bending moment amplification resulting from initial imperfections which increasingly deflect as the applied load increases, thereby

requiring a non-linear second-order analysis of the structural system.

→ **Seismic analysis:** The seismic analysis consisted of a modal (Eigen-value) analysis and a dynamic response spectrum analysis to determine the induced forces and associated displacements on the structural system during a seismic event. The displacements derived by the force-based method were factored and used as input parameters in the pushover analysis to evaluate the adequacy of the pile capacities against the target movement.

→ **Thermal analysis:** In addition to the global thermal analysis of the structure, a key consideration during network arch design is the differential temperature between the steel elements comprising the superstructure and the hangers, as per the requirements of the PTI Recommendations (PTI 2008). ▷

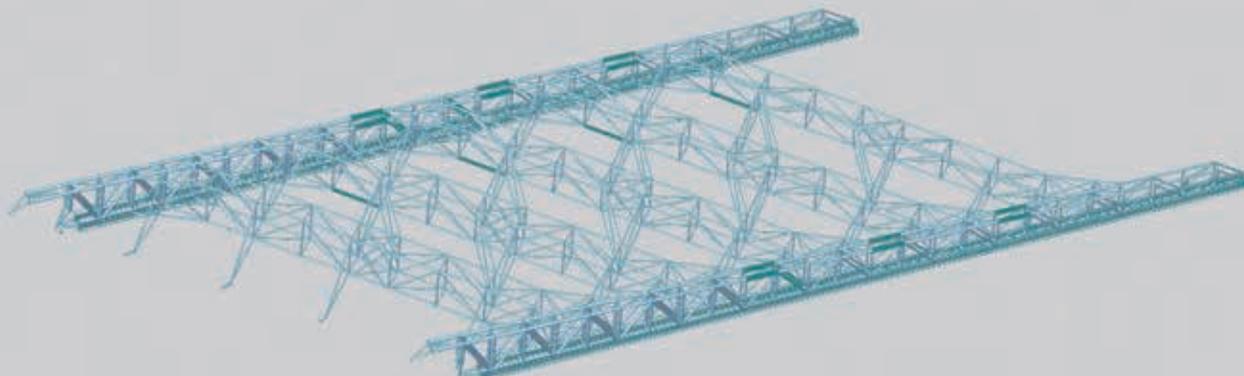
## ISOMETRIC VIEWS OF ROTATING BRACKET AND ARCH ROTATION MODELS IN MIDAS



8

© RENDEL

## ISOMETRIC VIEW OF LAUNCH NOSE CONSTRUCTION STAGING MODEL IN MIDAS



9

© RENDEL

→ **Hanger loss checks:** Several scenarios of hanger loss were considered to cover maintenance as well as accidental occurrences as stipulated in the PTI Recommendations (PTI 2008).

→ **Cable vibrations:** Using a combination of empirical and finite element analysis methods, vortex-induced vibrations, rain and wind vibrations and dry inclined galloping were evaluated.

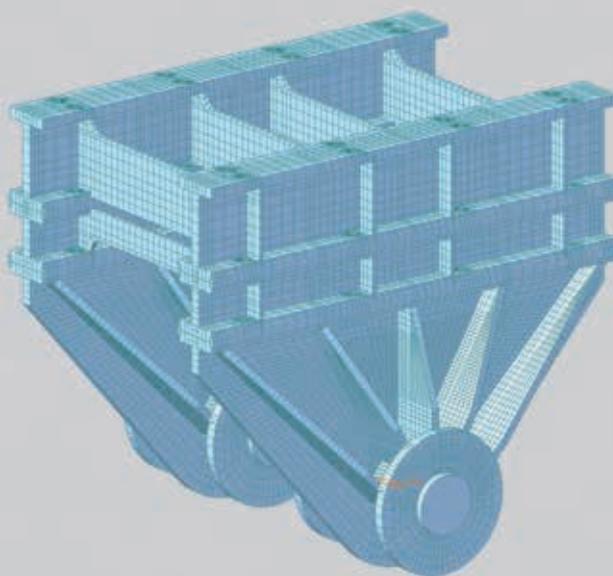
→ **Fatigue:** Fatigue checks were performed in accordance with AS 5100 using global and local models by means of the equivalent damage method. Elements with complex geometry were assessed using the hot-spot stress approach (figure 6).

### CONSTRUCTION SEQUENCE

To facilitate erection and launching, numerous temporary work packages were required, each of which interacted with the permanent work system at some point during the construction staging. The construction staging can be divided into the arch erection phase followed by the launch phase.

Due to the size of the completed superstructure, each structural element was divided into smaller components for manufacturing and transport. The design intent was for each arch to be assembled in the horizontal position on temporary trestles. As soon as all the components have been installed and all the site welding has been completed, each arch would be rotated from the horizontal orientation to the vertical orientation, about an axis parallel to the arch's tie beam. Once the arches have been secured in the vertical orientation, the deck crossbeams and permanent forms could be installed, followed by the cast-in-situ reinforced concrete deck.

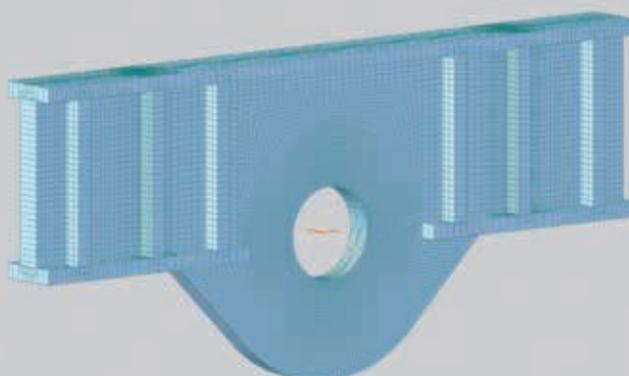
## ISOMETRIC VIEW OF ROCKER BEARING TOP ASSEMBLY MODEL IN MIDAS CIVIL



10

© RENDEL

## ISOMETRIC VIEW OF ROCKER BEARING SUPPORT ASSEMBLY MODEL IN MIDAS CIVIL



11

© RENDEL

**9- Isometric View of Launch Nose Construction Staging Model in Midas.**

**10- Isometric View of Rocker Bearing Top Assembly Model in Midas Civil.**

**11- Isometric View of Rocker Bearing Support Assembly Model in Midas Civil.**

9- Vue isométrique du modèle du chantier de construction de l'avant-bec dans Midas.

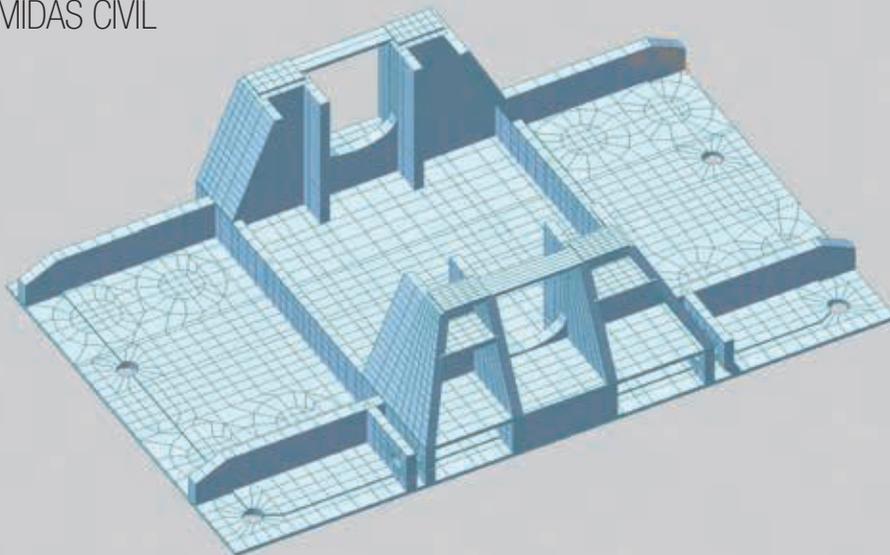
10- Vue isométrique du modèle d'assemblage de la partie haute de l'appareil d'appui à rotule dans Midas Civil.

11- Vue isométrique du modèle d'assemblage du support de l'appareil d'appui à rotule dans Midas Civil.

Arch assembly takes place in the launch position of the structure on top of the temporary launch supports. The final step in the assembly includes installation of the launch nose, which is attached to the front of the superstructure. The penultimate step in the construction sequence includes launching of the superstructure from the temporary position to the permanent position using post-tensioning strands, hydraulic jacks and pulling frames.

The construction sequence is concluded with dismantling of the launch nose, lowering of the bridge deck to the correct level, and load transfer from the temporary support system to the permanent support system.

## ISOMETRIC VIEW OF ROCKER BEARING BASE ASSEMBLY MODEL IN MIDAS CIVIL



© RENDEL

12

### BESPOKE TEMPORARY WORKS AND ASSOCIATED INTERFACES

Successful implementation of the complex construction stages required the following temporary works packages and the associated interfaces to be assessed:

→ **Launch analysis:** The launch analysis is a simulation of the longitudinal displacement of the superstructure by considering the support reactions and load effects on the structure in incremental steps as the launch progresses. The results of the launch analysis are used to check the effects imposed on the permanent works and the reactions that must be resisted by the temporary works. The skew deck geometry played a critical role in the combined behaviour of the deck and the launch nose (figure 7).

#### 12- Isometric View of Rocker Bearing Base Assembly Model in Midas Civil.

12- Vue isométrique du modèle d'assemblage du socle de l'appareil d'appui à rotule dans Midas Civil.

→ **Temporary restraints:** Several independent components of the arches are brought together in various stages during assembly. Temporary restraints were required to ensure the stability of each element during each stage of arch assembly while not constraining movement following connection of the elements.

→ **Rotating brackets:** The arches were assembled with the tie beams

being located on and fixed to rotating brackets which, in addition to temporary vertical and lateral support, provided a fixed axis for the arch during rotation. The various angles of support during arch rotation were a key consideration during the interface assessment (figure 8).

→ **Launch nose:** The launch nose is a temporary steel assembly that is attached to the leading edge of the superstructure during launching. The main purpose of the nose is to limit the extent that the leading edge of the permanent works must cantilever during launching, by providing a lightweight extension which reduces the induction of bending moments, shear forces and axial loads in the superstructure. The deck-to-launch-nose connection is a critical interface that requires a careful analysis review to ensure that the connections are not over-utilised. Other checks included the assembly trestles, lift studies and sequencing during assembly (figure 9).

→ **Launching equipment:** The launching equipment consists of several bespoke items that have been specifically designed for the arches of SB51, which has a very complicated deck soffit with two vertical steps. The launching equipment comprises adjustable rocker bearings, adjustable side guides and storm guides, pulling frames, breaking frames, tail assemblies, and stacked frames for height adjustment (figures 10, 11, 12).

Other secondary temporary works and interfaces that were considered included assembly trestles, lifting arrangements, lifting beams and transportation lashing designs, all of which included an interface with the permanent works in one or more construction stages. □

### MAIN CONTRIBUTORS

**CLIENT:** Transport for New South Wales (TfNSW)

**CONTRACTOR:** John Holland Seymour Whyte Joint Venture (JHSW)

**DESIGNER:** BG&E

**URBAN DESIGNER:** CM+

**PROOF ENGINEER:** Rendel Ingerop Pty Ltd

### ABSTRACT

#### INGÉNIERIE DE PREUVE HOLISTIQUE SUR LE PROJET SYDNEY GATEWAY

DERIK HANEKOM, RENDEL INGEROP PTY LTD.

Les interactions entre ouvrages définitifs et ouvrages provisoires pourraient engendrer des interfaces critiques qui augmenteraient fortement la complexité des phases de conception et construction d'un projet. Puisque la conception des différents composants est réalisée habituellement par des dessinateurs indépendants, l'ingénierie de preuve holistique pourrait permettre d'assurer la corrélation entre les hypothèses d'étude et d'examiner les interfaces entre les différentes solutions conceptuelles. Le pont bow-string à suspentes croisées du projet Sydney Gateway sert d'exemple de l'utilisation d'ingénierie de preuve holistique, et a démontré l'efficacité de l'emploi d'un seul ingénieur de preuve pour examiner les ouvrages définitifs, les ouvrages provisoires ad hoc connexes, ainsi que les interfaces complexes. □

#### AUDITORÍA HOLÍSTICA EN EL PROYECTO SYDNEY GATEWAY

DERIK HANEKOM, RENDEL INGEROP PTY LTD.

La interacción entre las obras permanentes y temporales puede generar interfaces críticas que incrementan fuertemente la complejidad de las fases de diseño y construcción de un proyecto. Dado que habitualmente la concepción de los distintos componentes corre a cargo de diseñadores independientes, la auditoría holística puede utilizarse para garantizar la correlación entre las hipótesis del diseño y para revisar las interfaces entre los paquetes de diseño. El puente en arco enmallado del proyecto Sydney Gateway se utiliza como ejemplo de uso del diseño con auditoría holística, que demuestra la eficacia de contratar un único ingeniero auditor para examinar las obras permanentes, las obras temporales a medida asociadas y las interfaces complejas. □



1

© SYSTRA

# CONSTRUCTION D'UNE NOUVELLE LIGNE FERROVIAIRE AUX ÉMIRATS ARABES UNIS

AUTEURS : ERICA CALATOZZO, TECHNICAL DIRECTOR, SYSTRA ITALIA - ABDELKARIM EL ARCHI, LEAD HYDRAULIC ENGINEER, SYSTRA DUBAI - LÉNAÏC GALTIER, INGÉNIEUR OUVRAGES D'ART, SYSTRA FRANCE - HOCINE HAREB, LEAD GEOTECHNICAL & EARTHWORKS, SYSTRA DUBAI - MATHILDE LECOMTE, INGÉNIEUR OUVRAGES D'ART, SYSTRA FRANCE

DANS LE CADRE DU DÉVELOPPEMENT DES INFRASTRUCTURES FERROVIAIRES AUX ÉMIRATS ARABES UNIS, LE PROJET ETIHAD RAIL COMPREND, DANS SA 2<sup>e</sup> PHASE, LA RÉALISATION D'ENVIRON 650 KM DE LIGNE NOUVELLE À TRAFIC MIXTE RELIANT LES PRINCIPALES VILLES DES EMIRATS. LE LOT 2A DU PROJET, SITUÉ À L'EST DE LA LIGNE, REPRÉSENTE UN TRONÇON DE 139 KM DE PLATEFORME FERROVIAIRE DONT LA CONCEPTION A ÉTÉ RÉALISÉE PAR SYSTRA DANS LE CADRE D'UN CONTRAT DE CONCEPTION-RÉALISATION.

## INTRODUCTION

Les Émirats Arabes Unis réalisent depuis 2019 une ligne nouvelle à trafic mixte (voyageurs à 200 km/h et fret à 120 km/h) reliant les principales villes du pays dans le cadre de contrats de conception & réalisation lancés par le maître d'ouvrage Etihad Rail Stage 2. Systra a réalisé les études de génie civil & voie pour le groupement constructeur CSSK JV\* sur le lot 2A d'une longueur de 139 km (figure 2).

Le lot 2A traverse une zone rurale et aride avec de faibles contraintes topographiques mais marquée par le risque d'ensablement et la présence de *sabkhas* avec une nappe à faible profondeur sur un grand linéaire.

Le tracé ferroviaire est ainsi relativement rectiligne. La ligne comprend la réalisation de 30 ouvrages d'art courants pour les rétablissements routiers

existants ou des routes futures et 70 ouvrages hydrauliques de traversée. Malgré plusieurs modifications de programme et l'impact du Covid sur la productivité, les études ont été livrées au fur et à mesure de l'avancement des travaux et le groupement constructeur a été en mesure de livrer l'ensemble des travaux comme prévu initialement en novembre 2021 soit 32 mois après la signature du contrat. Cet exploit a été possible grâce à une collaboration étroite entre le concepteur Systra et le groupement constructeur ainsi qu'à la motivation des équipes de production, tant du côté études que du côté travaux, pour atteindre cet objectif.

## TERRASSEMENT & GÉOTECHNIQUE

Le projet Etihad 2A présente un volet géotechnique et terrassements consé-

## 1- Ouvrage d'art courant.

### 1- Standard engineering structure.

quent. Les points clés sont les suivants :

- 115,5 km de remblais, soit environ 10,2 millions m<sup>3</sup> de matériaux à mettre en œuvre, dont 1,5 million m<sup>3</sup> en couche de forme et sous-couche ferroviaire. La hauteur maximale des remblais est de 20 m ;
- 23,5 km de déblais, soit 9 millions m<sup>3</sup> de matériaux à excaver. La profondeur maximale des déblais atteint 22 m ;
- Systèmes de fondations des ouvrages d'art sur pieux et radiers ;
- Des murs de soutènement en sol renforcé.

Comme mentionné plus haut, le défi majeur est de finaliser les études en moins d'un an. En termes de géotechnique, il fallait commencer le design au fur et mesure que les investigations géotechniques avançaient. Malgré le planning serré, le design a été fait en anticipant les risques géotechniques et en adaptant les hypothèses de dimensionnement à chaque phase d'avancement.

Le contexte régional du moyen orient est particulier et présente des problématiques spécifiques à cette région. En effet, le projet traverse des zones de *sabkha* où les conditions géotechniques ne sont pas favorables aux systèmes de fondation des ouvrages en terre et ouvrages d'Art. Les zones de *sabkha* sont identifiées comme étant des zones de dépression où la nappe est très affleurante avec une forte

## TRACÉ DE LA LIGNE ETIHAD - PHASE 2



© SYSTRA

2

fluctuation saisonnière et une forte présence de sels laissant une croûte de sel en surface après le processus d'évaporation. Les sols sont globalement des Sables Limoneux ou Argileux, Argiles ou Limons. La résistance mécanique de ces sols est très faible d'où la nécessité de dispositions constructives particulières nécessitant l'amélioration de sol afin de satisfaire les critères du projet en termes de capacité portante, stabilité, tassement et liquéfaction. Aussi, afin de tenir compte des fortes variations des caractéristiques géotechniques de ces formations, les paramètres de dimensionnement considérés sont légèrement conservatifs. L'amélioration de sol pour supporter les structures et ouvrages en terre a été réalisée principalement par la technique de Compactage/Remplacement Dynamique (figure 3), et par une substitution du sol support dans certaines zones. Au total, un linéaire de 20 km a fait objet d'amélioration de sol, soit environ 15% du linéaire total du projet.

Étant donné l'agressivité chimique du milieu vis-à-vis des structures, une couche d'imperméabilisation a été appliquée sur toutes les structures en béton en contact avec le sol. Une analyse de durabilité a été réalisée afin de proposer les mesures adéquates en termes d'enrobage, imperméabilisation, classe du béton, etc.

Les remblais du projet sont construits principalement en sable dunaire présent en quantités suffisantes dans la région.

### 2- Tracé de la ligne Etihad - Phase 2.

### 3- Amélioration de sol par compactage dynamique.

### 2- Alignement of the Etihad line - Phase 2.

### 3- Soil improvement by dynamic compaction.

Afin de confirmer la méthode de construction, un remblai d'essai a été réalisé pour confirmer la procédure de construction, les matériaux utilisés, l'énergie de compactage, les critères du projet, etc.

Le dimensionnement des structures d'assise : couche de forme et sous-couche (figure 4) est basé sur les recommandations internationales (UIC) ainsi que la grande expérience de Systra en projets ferroviaires. Ce dimensionnement est adapté aux caractéristiques du projet (vitesse, charge à l'essieu, matériaux utilisés, ...).



3

© SYSTRA

Le dimensionnement de la plateforme a été validé par des essais sur le remblai d'essai. Tous les critères du projet en termes de résistance et compactage ont été validés.

L'autre problématique du contexte local consiste en la protection des talus contre l'érosion. En effet, le Sable Dunaire a été principalement utilisé en corps de remblai sachant qu'il est susceptible à l'érosion en raison de sa granulométrie uniforme et de la taille des grains (Sable fin). L'effet des eaux de ruissellement sur l'entraînement des particules de sol a été minimisé en utilisant des masques de protection de talus en matériaux adaptés et résistant à l'érosion. Cette disposition a été testée et validée via des essais d'érosion in-situ sur le remblai d'essai en complément des essais de laboratoire.

L'expérience de projets dans les milieux désertiques a aussi révélé la susceptibilité au phénomène d'ensablement qui affecte principalement l'efficacité et la durabilité de la voie notamment le ballast. L'ampleur du phénomène dépend de plusieurs paramètres comme la vitesse du vent, les conditions topographiques, la géométrie des ouvrages envisagés, etc.

Cette problématique a été étudiée en se basant sur une expertise des solutions ayant déjà été proposées sur les tronçons en opération. La première étape consiste à déterminer les zones susceptibles au risque d'ensablement. Les dispositions constructives mises en œuvre sont de deux types : fossé, ou fossé et berme (figure 5).

Pour des raisons de maintenance des ouvrages en terre, les talus ont été réalisés avec une pente de 1V/2,5H et une berme de 4 m de large pour les talus excédant 15 m de hauteur.

Comme mentionné ci-avant, la nappe est affleurante sur une grande partie du linéaire. Afin d'éviter les remontées capillaires dans le corps de remblai et les structures d'assise, il a été proposé une couche de séparation en matériau granulaire à la base des remblais en respectant la pratique locale. La hauteur des remontées capillaires a été estimée sur la base de la granulométrie des sols en place et des expérimentations lors des études faites sur les lignes existantes.

Les transitions entre ouvrages en terre et les ouvrages d'art ont été conçues de façon à diminuer les tassements différentiels entre les deux types d'ouvrages et assurer une transition graduelle de raideur.

Pour les ouvrages ferroviaires, le corps de remblais est réalisé en matériaux granulaires sélectionnés bien gradués tandis que les structures d'assise sont en matériaux traités avec 5% de ciment. Pour les ouvrages routiers, la transition se fait via un remblai d'approche en matériaux sélectionnés et une dalle de transition en béton armé. Les murs en retour des ouvrages d'art ont été réalisés en sol renforcé par armatures géo-synthétiques. Cette technique est largement utilisée dans la pratique locale dans le domaine routier principalement. Afin d'adapter ces ouvrages au domaine ferroviaire, la conception tient compte de l'adaptation des coefficients de sécurité et de durabilité des matériaux pour une durée de conception de 100 ans tout en respectant les critères du projet (tassement, stabilité...).

#### LES OUVRAGES D'ART

Sur l'ensemble du parcours de la ligne Etihad 2A on dénombre 1 ouvrage d'art non-courant, 30 ouvrages d'art courants (figure 1) pour les rétablissements routiers existants ou futurs ainsi que 70 ouvrages hydrauliques de traversée.

L'ouvrage d'art non-courant est un viaduc ferroviaire de 162 m (figure 6) franchissant une importante autoroute locale. Les ouvrages d'art courants (PRO et PRA) sont des cadres coulés en place de portées variables de 7 m à 15 m et enfin les ouvrages hydrauliques sont des dalots en béton armé coulé en place mono cellule et multi cellules. Les points particuliers de la conception de ces ouvrages sont essentiellement : l'insertion architecturale des structures dans le paysage existant, les conditions d'exploitation de la ligne (passagers et fret) ainsi que les conditions sismiques particulièrement défavorables et enfin, le contexte environnemental très agressif. L'ouvrage principal de la ligne est constitué de 6 travées de portées variables entre 22 et 36,50 m à cause des fortes contraintes d'implantation des appuis. Le tablier est composé de travées isostatiques de type caissons précontraints par post-tension de 2,10 m ou 3,00 m de hauteur. Le choix d'une succession de tabliers isostatiques permet de se dispenser d'un appareil de dilatation de voie afin de limiter les coûts d'entretien.

La précontrainte est interne au caisson conformément aux prescriptions du client et se compose de câbles d'unités 19T15 à 31T15.

Le tablier présente une largeur de 13,88 m (figure 7), et il supporte 2 voies ballastées à l'entraxe standard de 1,435 m espacées de 4,5 m. Le drainage est réalisé à l'axe de l'ouvrage via une pente transversale de 2%. La coupe fonctionnelle est suffisamment large pour permettre une future installation de poteaux caténaire pour l'électrification de la voie. La ligne ferroviaire sera en effet mise en service dans un premier temps avec

des motrices à traction thermique. Le pont est situé dans une zone désertique caractérisée par la présence de sable faiblement dense sur de fortes épaisseurs. Ceci a conduit à faire le choix d'un système de fondations profondes de type pieux de diamètre 1,5 m d'une longueur de 20 à 24 m de profondeur.

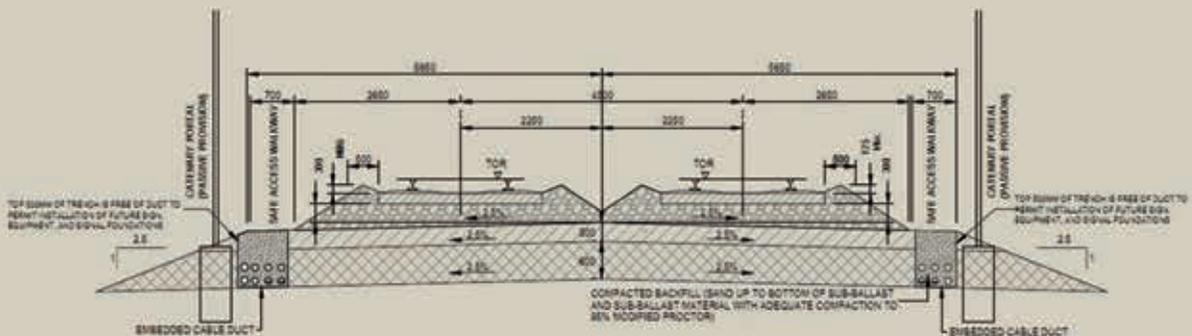
L'ouvrage est construit coulé en place sur un cintre d'étalement. Les travées sont réalisées et mises en tension de manière successive les unes après les autres depuis la culée B en direction de la culée A. La mise en précontrainte est effectuée depuis l'une des deux extrémités du caisson après 14 jours de prise du béton.

Le viaduc ferroviaire a été dimensionné selon la réglementation américaine AREMA pour les lignes ferroviaires, qui spécifie des valeurs de charges d'essieu pour le fret ferroviaire importantes, de 36 t. L'ouvrage destiné au convoi de marchandises comme de voyageurs a également fait l'objet d'analyse d'interaction rail/structure ainsi que d'analyses dynamiques sous charges roulantes. L'une des difficultés principales

**4- Structures d'assise.**  
**5- Protection contre le risque d'ensablement.**

**4- Foundation structures.**  
**5- Protection against the risk of silting.**

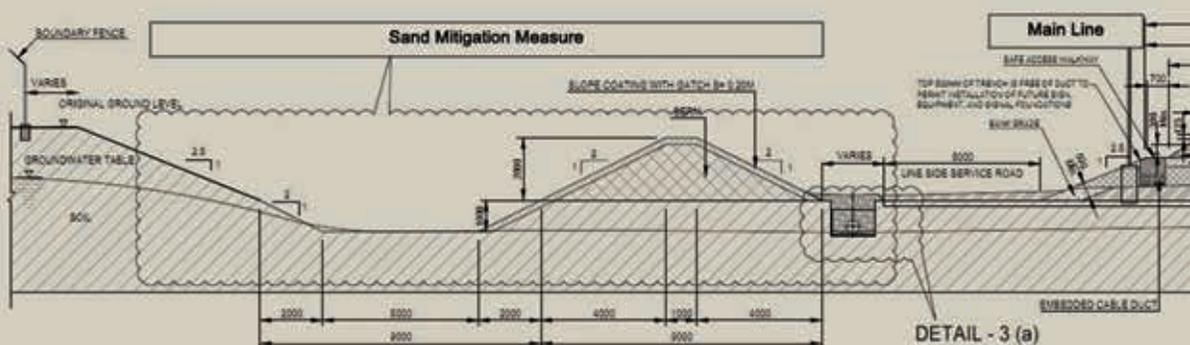
## STRUCTURES D'ASSISE



4

© SYSTRA

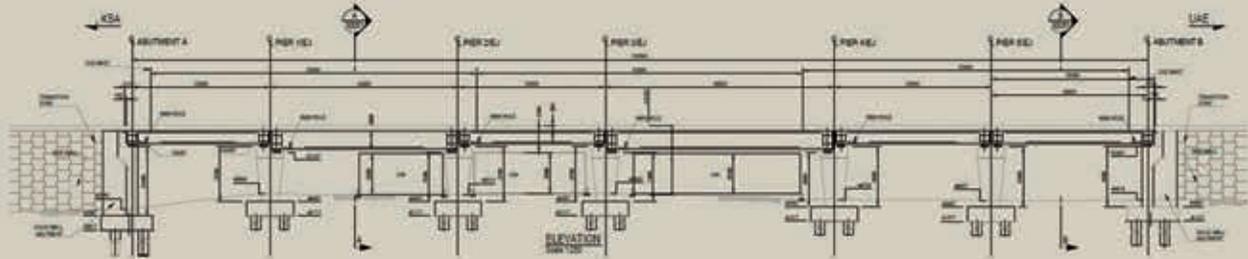
## PROTECTION CONTRE LE RISQUE D'ENSABLEMENT



5

© SYSTRA

## VUE EN ÉLÉVATION DU VIADUC



© SYSTRA  
6

6- Vue en élévation du viaduc.  
7- Coupe fonctionnelle.  
8- Spectres sismiques.

6- Elevation view of the viaduct.  
7- Functional cross section.  
8- Seismic spectra.

consistait à concilier les différents codes de calculs (AREMA, UIC) ainsi que les contraintes d'exploitations (charges d'essieux importantes) et environnementales locales (fortes variations thermiques) de manière cohérente dans les analyses. De plus, le pont est situé dans un environnement défavorable avec des conditions de sols médiocres et une zone de forte activité sismique. En accord avec les pratiques locales et la réglementation sismique, nous avons défini 3 niveaux de séisme avec des critères à respecter propres à chacun de ces spectres (figure 8) :

- Séisme de Service : Période de Retour associée de 85 ans.
  - Les dommages de la structure et de la voie ne sont pas autorisés. La structure doit rester dans un domaine de comportement élastique.
- Séisme Ultime : Période de Retour associée de 356 ans.
  - La sécurité de la structure ne doit

- pas être impactée. L'endommagement de la structure doit être limité et celle-ci doit être réparable après le séisme.
- Séisme de Survie : Période de Retour associée de 2254 ans.
  - L'effondrement de la structure doit être prévenu. Des dommages nécessitant la reconstruction de l'ouvrage sont acceptés.

Une approche de calcul en ductilité limitée selon l'Eurocode 8 a été décidée. En contrepartie, ont été appliquées un certain nombre de mesures et de provisions visant à assurer le comportement escompté :

- Armatures de confinement en base de piles ;
- Armatures de confinement en tête de pieux ;
- Absence de recouvrement dans les zones de rotules plastiques potentielles ;
- Majoration de 25 % des efforts tranchants pour prévenir la rupture fragile.

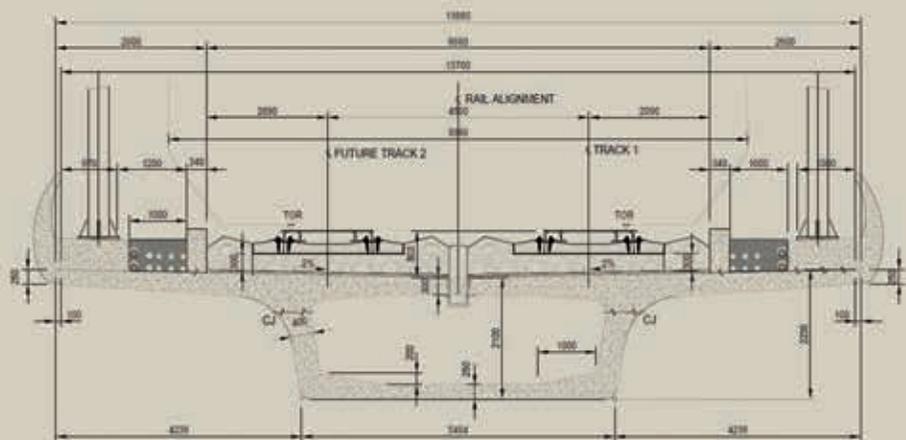
Enfin les conditions d'exposition environnementale sévères de l'ouvrage ont imposé de prêter une attention toute particulière aux aspects liés à la durabilité de la structure.

À cet effet, une étude spécifique relative à la durabilité de l'ouvrage a été conduite afin de respecter la durée de vie de conception de 100 ans.

Cette étude a permis de spécifier les points suivants :

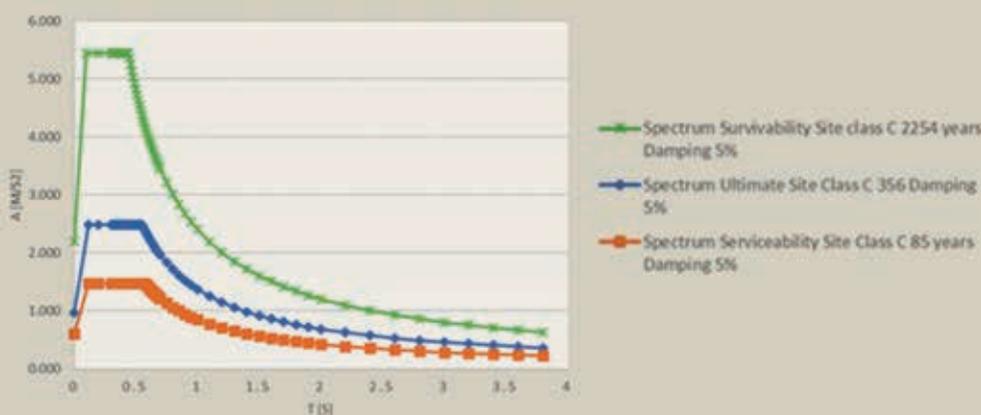
- Les classes d'expositions ;
- Les risques auxquels est exposé l'ouvrage : chlorures et carbonatation ; ▷

## COUPE FONCTIONNELLE



7  
© SYSTRA

## SPECTRES SISMQUES



© SYSTRA  
8

- Les limites d'ouverture de fissures : 0,2 mm à l'ELS ;
- Les enrobages : 100 mm pour les fondations, 80 mm pour les appuis et 60 mm pour le tablier.

Une attention toute particulière a également été apportée au phénomène de retrait au jeune âge mais aussi de retrait différentiel ainsi qu'aux températures atteintes dans la structure lors de l'hydratation et de la prise du béton. En effet, les épaisseurs importantes des éléments structuraux et les fortes températures extérieures lors du coulage du béton sont des facteurs de risque dont nous devons tenir compte afin de prévenir toute forme de pathologie ou fissuration excessive de la structure. Grâce à des dispositions et des ferrailages adaptés, ont pu être garanties la durabilité de l'ouvrage ainsi que la qualité visuelle et architecturale (figure 9) des ouvrages et des parements auxquels le client est très attaché. Les fortes épaisseurs d'enrobage se sont révélées particulièrement défavorables du point de vue du retrait au jeune âge et du contrôle de la fissuration.

#### DRAINAGE

Le tracé du Package 2A est parallèle à la côte du Golfe Arabe. La topographie et la géomorphologie de la zone varient principalement d'une zone plate à une zone relativement plate. Le projet traverse un désert de sable, la zone est caractérisée par un désert plat de faible altitude et des dunes de sable basses, avec quelques *sabkhas* côtières et intérieures.

Les *sabkhas* sont des plaines désertiques salines et hyper salines, qui ont une croûte de sel en surface formée par l'évaporation des eaux de pluie et des eaux souterraines. Les zones côtières de la *sabkha* sont pour la plupart au-

dessus du niveau normal de la marée, mais peuvent être inondées par une combinaison d'ondes de tempête et de marées de printemps, ou par de fortes pluies. Il y a peu ou pas de végétation naturelle, bien que le long des routes et dans la zone urbaine, l'eau d'irrigation soutienne plusieurs plantes et arbres. La délimitation des bassins versants et de la définition des lignes d'écoulements vers le projet ferroviaire était une tâche difficile à cause du contexte géomorphologique plat qui caractérise les zones traversées par le projet. Pour définir les emplacements des ouvrages hydrauliques, un levé topographique précis de 500 m de largeur le long du tracé a été utilisé. Pour vérifier et confirmer le bon positionnement de ces ouvrages hydrauliques, un étendu de 4 km de largeur de topographie supplémentaire a été exceptionnellement commandé et utilisé pour définir la trajectoire d'écoulement le long du projet ferroviaire. 70 emplacements d'ouvrages hydrauliques ont été identifiés, puis des multi-dalots standardisés ont été proposés et conçus pour assurer

la transparence le long du projet ferroviaire.

Le drainage longitudinal des voies ferrées était un défi pour assurer à la fois une pente minimale dans les fossés pour le bon auto-curage et pouvoir en même temps connecter l'eau à l'exutoire au niveau du terrain naturel.

Plusieurs configurations topographiques en forme de nids-de-poule relativement larges sont traversés par le projet. Pour éviter l'effet négatif de stagnation d'eau le long des remblais ferroviaires, des mesures de protection multidisciplinaires, hydrauliques et géotechniques, ont été déployées. Des matériaux granulaires ont été sélectionnés et adoptés pour la construction de la base de remblai jusqu'au niveau de hautes eaux



9

© SYSTRA

9- Vue d'ensemble du viaduc.

9- General view of the viaduct.

NPHE +0,5 m et avec une pente douce de talus.

Des retours d'expérience de l'exploitation de la seule ligne ferroviaire existante nommée Stage 1, ont été pris en compte. Pour éviter l'érosion du merlon anti-sable (*sand mitigation berm*) un fossé triangulaire revêtu de béton a été adopté le long des voies ferroviaires, en pied du merlon anti-sable. Pour assurer une évacuation rapide d'eau vers l'extérieur, des buses de diamètre de 600 mm ont été positionnées sous le merlon anti-sable et avec une distance régulière de 100 m. □

#### PRINCIPALES QUANTITÉS

##### VIADUC - OANC :

- Béton : 4 700 m<sup>3</sup>
- Aciers passifs : 1 400 t

##### PONTS RAILS :

- Béton : 20 500 m<sup>3</sup>
- Aciers passifs : 3 500 t

##### OUVRAGES HYDRAULIQUES :

- Béton : 27 500 m<sup>3</sup>
- Aciers passifs : 3 400 t

##### PONTS ROUTES :

- Béton : 9 100 m<sup>3</sup>
- Aciers passifs : 1 700 t

##### TERRASSEMENTS :

- Remblais : 8,7 M m<sup>3</sup>
- Déblais : 9 M m<sup>3</sup>
- Couches de forme et sous-couches : 1,5 M m<sup>3</sup>

#### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Etihad Rail

**AMO :** Jacobs

**BUREAU D'ÉTUDES :** Systra

**ENTREPRISE :** Groupement CSCEC - SK E&C

**SOUS-TRAITANTS :** Tcg, Arcos

#### ABSTRACT

### CONSTRUCTION OF A NEW RAILWAY LINE IN THE UNITED ARAB EMIRATES

ERICA CALATOZZO, SYSTRA ITALIA - ABDELKARIM EL ARCHI, SYSTRA DUBAI - LÉNAÏC GALTIER, SYSTRA FRANCE - HOCINE HAREB, SYSTRA DUBAI - MATHILDE LECOMTE, SYSTRA FRANCE

**Work section 2A of the Etihad Rail project** comprises the construction of a new mixed traffic line about 139 km long linking the main cities of the Emirates. Railway track formation design was performed by Systra under a Design and Build contract. The Etihad 2A project drew on all the firm's expertise in alignment, geotechnics, earthworks, drainage and engineering structures. The condensed detailed design schedule proved to be a real challenge. The experience acquired by the project teams was able to be used again swiftly on the Etihad 2D work section, the most technical part of the project, for which Systra is also the designer. □

### CONSTRUCCIÓN DE UNA NUEVA LÍNEA DE FERROCARRIL EN EMIRATOS ÁRABES UNIDOS

ERICA CALATOZZO, SYSTRA ITALIA - ABDELKARIM EL ARCHI, SYSTRA DUBAI - LÉNAÏC GALTIER, SYSTRA FRANCE - HOCINE HAREB, SYSTRA DUBAI - MATHILDE LECOMTE, SYSTRA FRANCE

**El lote 2A del proyecto Etihad Rail** incluye la realización de unos 139 km de línea nueva con tráfico mixto que unirá las principales ciudades de los Emiratos. Systra se ha encargado del diseño de la plataforma ferroviaria, en el marco de un contrato de diseño-realización. El proyecto Etihad 2A ha movilizado todas las competencias de la empresa en términos de trazado, geotécnica, movimiento de tierras, saneamiento y obras de fábrica. La densa planificación de los estudios de ejecución ha supuesto un verdadero desafío. Los equipos del proyecto han podido poner rápidamente en práctica la experiencia adquirida en el lote Etihad 2D, el más técnico del proyecto, también diseñado por Systra. □

# TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : LE MÉTROPOLITAIN DE MOSCOU

A. RÉTHY INGÉNIEUR CIVIL (MOSCOU)

TRAVAUX N°41 - MAI 1936

RECHERCHE D'ARCHIVES PAR MICHEL MORGENTHALER



Le métro de Moscou présente aujourd'hui un réseau de 14 lignes totalisant 410 km et comprenant 236 stations. Il transporte quotidiennement plus de 6 millions de passagers. Il est remarquable par la magnificence d'une cinquantaine de ses stations qui sont autant de monuments architecturaux, parmi lesquelles les plus emblématiques, mais qui ne sont pas les plus anciennes, seraient Komsomolskaïa, Ploščad Revolioutsii, Maïakovskaïa, Novoslobodskaïa et Kievskaïa. C'est le tsar Alexandre II qui avait manifesté, dès 1870, l'intention de construire un métro. La décision définitive intervint bien longtemps après sa mort et les travaux ne commencèrent qu'en 1931. La première ligne fut inaugurée le 15 mai 1935 et l'article reproduit ici, décrivant ce projet, fut publié dans la revue Travaux en mai 1936.

La construction de cette première ligne longue de 11,4 km fit appel à un effectif de 65 000 ouvriers, ouvrières, ingénieurs et techniciens, ces deux dernières catégories comptant 4 300 employés. On ne manquera pas de relever que l'importance de l'effectif mobilisé et la forte présence de personnel féminin, ouvrières et

cadres, sont typiques de la société soviétique et sans équivalent sur des projets similaires dans d'autres pays à cette époque. L'écrivain Maxime Gorki, fondateur de la littérature réaliste socialiste, décida de faire de ce chantier géant un laboratoire de la littérature prolétarienne. Il conçut un immense atelier d'écriture collective qui fournira la matière première de deux volumes de témoignages parus en 1935 : "Comment nous avons construit le métro" et "Récits des constructeurs". La société allemande Siemens Bauunion GMBH, déjà implantée dans les industries électriques et dans les tramways en Russie, a été l'une des entreprises qui ont participé à la construction, ainsi que d'autres entreprises étrangères renommées. Les tunnels traversent des terrains granulaires aquifères, posant de sérieuses difficultés d'exécution. Ce sont des techniques combinées qui sont appliquées selon les cas : méthodes berlinoise, parisienne, belge, américaine. Des procédés avancés sont mis en œuvre, notamment dans les sables bouillants, telles que congélation, silicatisation, palplanches, bouclier à air comprimé. L'usage de la congélation à grande échelle est à signaler particulièrement. □

## ABSTRACT

### TREASURES FROM OUR ARCHIVES: THE MOSCOW METROPOLITAN

TRAVAUX No. 41 - MAY 1936

A. RÉTHY (MOSCOW)

The Moscow metro today represents a network of 14 lines over a total length of 410 km and with 236 stations. It transports more than 6 million passengers every day. It is remarkable for the magnificence of about fifty of its stations which are all architectural monuments, including the most emblematic, albeit not the oldest ones, namely Komsomolskaya, Ploščad Revolioutsii, Mayakovskaya, Novoslobodskaya and Kiyevskaya. It was Tsar Alexander II who, as early as 1870, had expressed the intention of building a metro. The final decision was made a very long time after his death, and work began only in 1931. The first line was inaugurated on 15 May 1935 and the article reproduced here, describing this project, was published in Travaux magazine in May 1936. For construction of this first line 11.4 km long, a workforce of 65,000 blue-collar workers, engineers and technicians was employed, with 4,300 employees in the latter two categories. It is worth noting that the large workforce mobilised and the strong presence of female personnel, both blue-collar workers and managers, were typical of Soviet society and unparalleled on similar projects in other countries at that time. The writer Maxim Gorky, founder of socialist realist literature, would decide to make this huge project a laboratory for proletarian literature. He conceived a vast collective writing workshop which would provide the raw material for two volumes of first-hand accounts published in 1935: "How we built the metro" and "History of Construction". The German company Siemens Bauunion GmbH, already established in electrical industries and tramways in Russia, was one of the firms which took part in construction, together with other renowned foreign firms. The tunnels pass through water-bearing granular soils, posing serious problems for the works. Combined techniques were applied as appropriate: Berlin-type, Parisian, Belgian and American methods. Advanced processes were employed, especially in liquefiable sands, such as ground freezing, silicatisation, sheet piling, and compressed air shields. The large-scale use of ground freezing is especially noteworthy. □

### TESOROS DE NUESTROS ARCHIVOS: EL METROPOLITANO DE MOSCÚ

TRAVAUX N°41 - MAYO DE 1936

A. RÉTHY (MOSCÚ)

El metro de Moscú presenta actualmente una red de 14 líneas que totalizan 410 km de vía y 236 estaciones, y que transportan a diario más de 6 millones de pasajeros. Destaca por la magnificencia de una cincuentena de sus estaciones, auténticos monumentos arquitectónicos, las más emblemáticas de las cuales, aunque no las más antiguas, son las de Komsomolskaïa, Ploščad Revolioutsii, Maïakovskaïa, Novoslobodskaïa y Kievskaïa. Es el zar Alejandro II quien manifiesta, a partir de 1870, la intención de construir un metro. La decisión definitiva interviene mucho después de su muerte y las obras no comienzan hasta 1931. La primera línea se inaugura el 15 de mayo de 1935 y el artículo aquí reproducido, que describe el proyecto, aparece publicado en la revista Travaux en mayo de 1936. La construcción de esta primera línea de 11,4 km de longitud precisó la intervención de 65 000 trabajadores y trabajadoras, ingenieros y técnicos (estas dos últimas categorías sumaban 4 300 empleados). Cabe señalar que la importancia de los efectivos movilizados y la fuerte presencia de personal femenino, obreras y capataces, típica de la sociedad soviética, no tienen equivalente en proyectos similares en otros países en aquella época. El escritor Máximo Gorki, fundador de la literatura realista socialista, decidirá convertir aquella obra gigante en un laboratorio de la literatura proletaria. Diseña un inmenso taller de escritura colectiva, que suministrará la materia prima de dos volúmenes de testimonios publicados en 1935: "Cómo construimos el metro" y "Relatos de los constructores". La sociedad alemana Siemens Bauunion GMBH, ya implantada en las industrias eléctricas y en los tranvías de Rusia, fue una de las empresas que participaron en la construcción, junto con otras firmas extranjeras de renombre. Los túneles atraviesan terrenos granulares acuíferos que plantean graves dificultades de ejecución, resueltas mediante distintas técnicas combinadas según los casos: métodos berlinés, parisino, belga o americano. Se ponen en práctica procedimientos avanzados, sobre todo en las arenas movedizas, como la congelación, la silicización, las tablestacas o el escudo de aire comprimido. Cabe destacar en particular el uso de la congelación a gran escala. □

**CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS**

# Le Métropolitain de Moscou

Par M. A. RÉTHY,  
Ingénieur civil (Moscou).

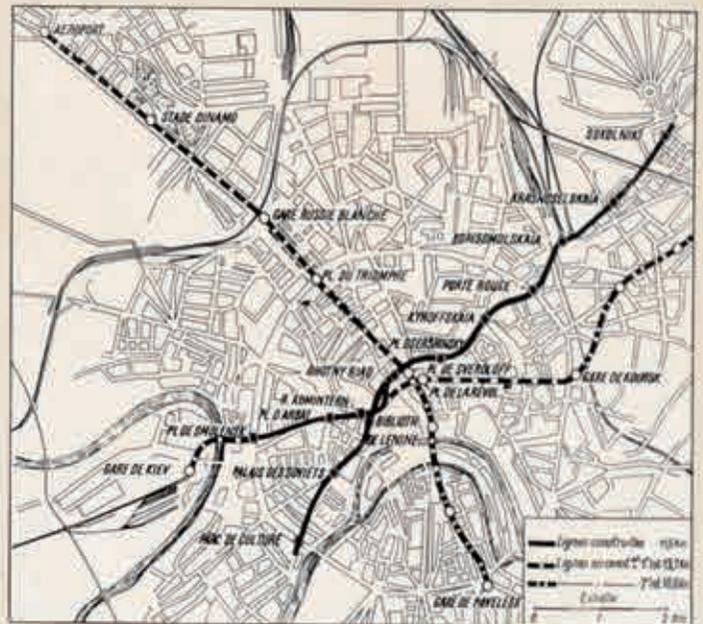


Fig. 1. — Le réseau du chemin de fer souterrain de Moscou (les lignes exécutées et les lignes en construction).

Le développement considérable de la capitale de l'U. R. S. S. demandait, une solution rapide du problème du trafic urbain intérieur, car il n'était plus possible d'y suffire à travers les grandes artères, étroites et sinueuses de cette ancienne ville à moitié asiatique et qui au cours d'une décade avait été hissée au rang de très grande ville. Le nombre des habitants a triplé dans le même temps, la ville s'est transformée en centre du gouvernement et de l'industrie d'un Etat de 160 millions d'hommes ; de sorte que, pour résoudre complètement le problème, il fut décidé pendant l'été de 1931 d'entreprendre sans délai la construction d'un large réseau de voies ferrées souterraines.

Un coup d'œil au plan de la ville (fig. 1) donnera une idée claire du réseau urbain installé suivant le principe central-radial. A la place des anciennes fortifications intérieures et extérieures, s'étendent deux larges boulevards. Le centre de la ville est constitué par le Kremlin, sous les murs duquel s'étale le centre même du trafic (place Swerloff, Okhotny Riad, place de la Révolution).

Le réseau des lignes du chemin de fer souterrain dut se conformer à l'image de la ville. C'est ainsi qu'il se compose de six lignes diamétrales qui se croisent au centre.

On exécuta, comme première étape des travaux, les lignes les plus importantes, destinées à soulager les artères de circulation les plus surchargées. Ce sont la rue Kiroff et l'Arbate. On y adjoignit la prolongation dans une direction jusqu'aux grandes agglomérations ouvrières de Sokolniki et dans l'autre direction jusqu'au très important lieu de repos et de récréation, le parc de la culture.

Les travaux préparatoires furent commencés dans les derniers mois de l'année 1931. On entreprit l'étude géologique du tracé, on étudia à fond les questions de principe les plus importantes pour lesquelles on avait établi une ligne d'essai de 100 mètres. Le projet des détails ainsi que les importants travaux d'organisation ont entièrement occupé l'année 1932, pendant laquelle on a exécuté un nombre important de puits et une partie de l'excavation du tunnel. Pendant l'année 1933, on développa le front de l'ouvrage et après avoir mis au point d'importants services accessoires (carrières de pierre, ateliers de mécanique, fabrique de pièces en béton, moyens de transport et logements d'ouvriers), on put seulement penser au déploiement des forces correspondant à cet ouvrage immense. En 1933, on n'exécuta que 13 p. 100 des travaux de terrassement et 7 p. 100 des travaux de béton. Par contre, au cours d'une seule

année, en 1934, on exécuta 84,5 p. 100 des travaux de terrassement et 88 p. 100 des travaux de béton, de sorte que l'année 1935, jusqu'à l'inauguration au mois de mai, ne comprend qu'une partie du revêtement des murs, les travaux de décoration artistique des stations, l'équipement électrique et les essais de fonctionnement.

## 1. Données générales sur les travaux.

Sur la ligne mise en service de 11,400 km, on a exécuté :

- 8 585 mètres de tunnel à voie unique ;
- 4 729 mètres de tunnel à double voie ;
- 3 171 mètres de stations ;
- 13 stations avec 17 vestibules souterrains ou extérieurs, dont cinq sont reliés par des escaliers mécaniques ;
- 56 puits d'aération ;
- 36 installations de drainage et de pompage ;
- 11 sous-stations électriques ;
- 1 garage pour 11 voitures.

Les travaux nécessaires comprennent :

Terrassement.....	2 311 000 mètres cubes.
Béton et béton armé.....	851 000 —
Voie ferrée.....	25 148 mètres.
Câbles et conduites.....	577 000 —
Transport de matériaux.....	14 180 000 tonnes.
Main-d'œuvre.....	16 720 000 journées de travail.

Les matériaux et outillage comprennent :

Ciment.....	295 000 tonnes.
Bois de construction.....	581 000 mètres cubes.
Fers et aciers.....	83 000 tonnes.
Pierre, gravillon et sable.....	959 000 mètres cubes.
Marbre.....	21 000 mètres carrés.
Dalles artificielles.....	45 000 —
Matériaux d'étanchéité (Carton bitumé, ruberoïd, pergamin).....	305 000 rouleaux.
Air comprimé.....	265 000 000 mètres cubes.
Froid.....	850 000 000 frigories.
Energie électrique.....	20 000 kW.
Bétonnières.....	236
Moteurs électriques.....	3 185
Pompes.....	1 600
Treuil.....	1 255

Au cours de l'année 1934 le chiffre moyen de la main-d'œuvre atteignit 64 685 ouvriers et ouvrières dont 4 300 ingénieurs et techniciens.

La ligne exécutée comprend les sections suivantes :

1. Sokolniki-Okhotny Riad ..... 5,8 km.
2. Okhotny Riad-Place de Crimée..... 2,9 km.
3. Okhotny Riad-Place de Smolensk..... 2,4 km.

## 2. Le profil hydrogéologique du tracé.

Tout le long de la ligne les conditions du terrain sont très variables. Après une couche supérieure de 2 mètres environ d'épaisseur, appelée couche de culture, on trouve du sable et de l'argile de l'époque glaciaire. Cette couche est généralement imbibée d'eau et revêt souvent les caractéristiques d'un vrai sable bouillant. Sous cette couche quaternaire on rencontre une solide couche sèche d'argile, puis un calcaire de l'ère carbonifère et des couches de glaise.

Le tracé est coupé par cinq affluents importants de la Moskova, qui s'écoulent par des canaux souterrains. Ces rivières ont complètement délavé l'argile jurassique sur leur parcours, de sorte que leur lit primitif a été rempli par du sable imbibé d'eau (sable bouillant). Ces conditions montrent combien la nature du sous-sol de Moscou se présente d'une manière bien plus défavorable que celui des autres capitales d'Europe en ce qui concerne la construction du métro.

## 3. Le mode de construction du tunnel.

Ce n'est qu'en mars 1933 que fut prise la décision définitive sur le mode de construction de la ligne. A l'encontre du point de vue de plusieurs commissions techniques étrangères qui préconisaient l'application uniforme de l'un des modes connus de construction (parisien, berlinois ou londonien), on se décida pour un mode de construction combiné, comprenant l'établissement par galeries des tronçons profonds et la construction à ciel ouvert des tronçons plus élevés. Pour le choix du mode de construction pour l'exécution de chaque tronçon on observa le principe d'avoir à réduire au minimum les obstacles créés au trafic dans les quartiers à forte densité d'habitations.

Fidèle à ce principe, on exécuta donc comme suit les divers tronçons :

1° Le tronçon Sokolniki-Place Komsomol, à niveau élevé, par la méthode de Berlin ;

2° Le tronçon place Komsomol-Bibliothèque de Lénine, à niveau inférieur, par la méthode de Paris ;

3° Les tronçons Bibliothèque de Lénine-place de Crimée et Bibliothèque de Lénine-Place de Smolensk, à niveau élevé, par la méthode de Berlin.

Ce n'est pas seulement dans le choix du mode de construction, mais aussi dans l'exécution technique des travaux, que les divers tronçons accusent une grande variété. On décida en effet, sans idée préconçue, l'application de tels moyens qui répondaient le mieux aux conditions locales.

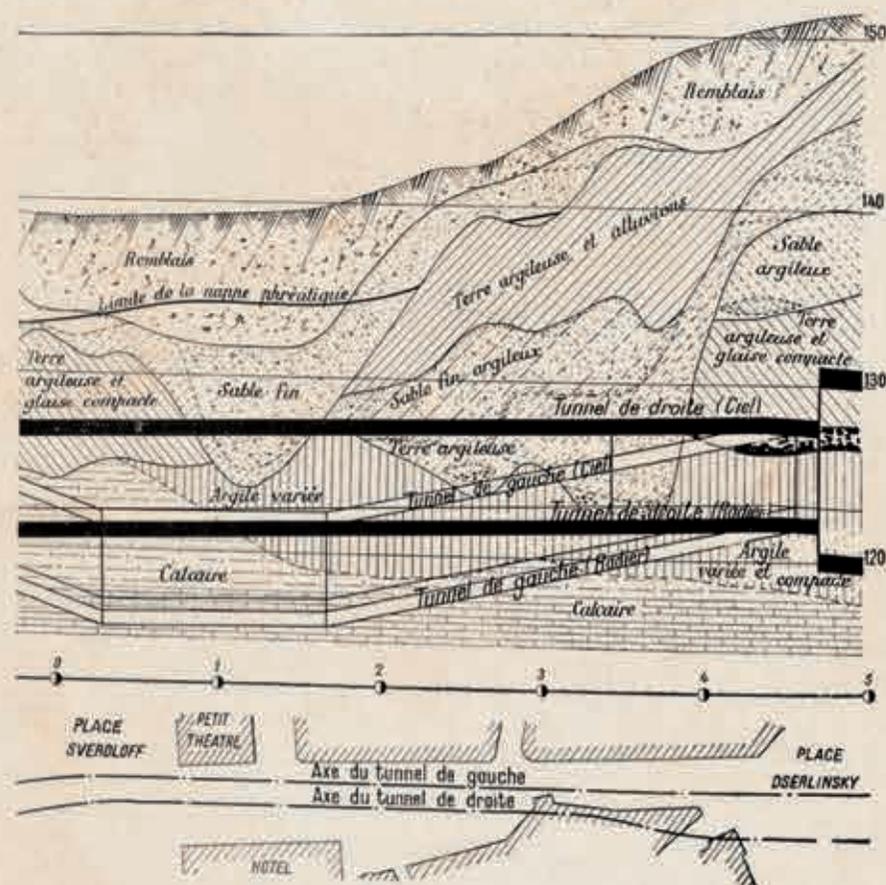
La méthode berlinoise de terrassement s'est transformée en certains endroits difficiles en méthode dite de tranchée, et en particulier là où, à cause de la proximité immédiate d'anciennes constructions mal reprises en sous-œuvre, il ne fut pas possible d'autoriser l'ouverture de tronçons de quelque importance. La méthode de Paris fut en général exécutée suivant le système belge avec galeries de tête et de base. Aux endroits où le radier pouvait s'appuyer sur la couche solide de calcaire, on réa-

lisa la méthode américaine, appelé méthode de l'arc volant. Le tronçon d'environ 400 mètres, compris entre la Place Komsomol et la Porte Rouge, fut exécuté sur 75 mètres de longueur en tubes de tunnel, bétonnés d'avance et foncés, et sur le reste du tronçon au moyen de caissons pneumatiques horizontaux. A cet effet, sur une longueur de 70 mètres, on congela artificiellement la couche de terre du dessus de 18 mètres d'épaisseur. Le tronçon compris entre la Place Swerdlow et la Place Dzerjinsky fut percé à l'aide du bouclier à air comprimé et revêtu de segments annulaires moulés d'avance en béton armé. Trois vestibules profonds et les tunnels inclinés qui y conduisent, destinés aux escaliers mécaniques, furent foncés dans un sol congelé artificiellement. Par endroit, on a employé le procédé de silicatation du sol, ou celui de l'abaissement de la nappe phréatique dans les fouilles à ciel ouvert, ou enfin le fonçage de murs en palplanches métalliques (Place Komsomol).

Malgré l'intérêt que peut présenter l'étude approfondie des détails de ces divers modes de construction, la place dont nous disposons ne nous permet qu'une description rapide des modes de construction les plus importants ou les plus intéressants. Nous allons chercher à en faire ressortir les particularités dans chaque cas.

**Le procédé du bouclier à air comprimé.** — Le tracé entre la Place de Swerdlow et la Place Dzerjinsky passe en grande partie sur du calcaire à venues d'eau et sur du sable imprégné d'eau (fig. 2). La longueur totale du tracé est de 445,60 m dans la galerie de gauche et de 417 mètres dans la galerie de droite, dont respectivement 30 p. 100 et 17 p. 100 se trouvent dans le sable bouillant. Sur toute la longueur, les galeries de tunnel passent sous des travaux d'art souterrains importants : conduites d'eau, canaux, câbles de lumière, de téléphone et de télégraphe, conduites de gaz, etc. Entre le Petit Théâtre et l'Hôtel Métropole, la ligne rencontre l'ancien collecteur en bri-

Fig. 2. — Le profil géologique du tronçon foncé au moyen du bouclier pneumatique entre la place Swerdlow et la place Dzerjinsky.



ques de la rivière Neglinka. Celui-ci est fondé sur des pieux flottants dans le terrain plein d'eau et dont l'extrémité se trouve à environ 2 mètres au-dessus du sommet de la voûte du tunnel. Avant le croisement, la rivière court sur environ 25 mètres parallèlement et presque au-dessus de la galerie de gauche dans un collecteur rectangulaire en bois.

Le tronçon du tunnel est ici à une profondeur de 25 à 35 mètres et il a été foncé au moyen de boucliers métalliques. Ces boucliers comprenaient trois parties :

1<sup>o</sup> La chambre d'éclusage qui comprenait neuf cellules pour les déblais et l'air comprimé ;

2<sup>o</sup> L'appareil de mise en place des éléments d'arc métalliques (tubulaires) ou des segments annulaires en béton armé (blocs) ; il fonctionnait immédiatement derrière la chambre d'éclusage et à l'abri du revêtement de l'anneau d'acier ;

3<sup>o</sup> La couverture annulaire en acier qui a 6,50 m de diamètre et qui sert au maintien provisoire du déblai du tunnel. A sa partie antérieure, l'anneau est muni d'un couteau qui pénètre dans le front d'avancement dans le mouvement d'avancée du bouclier. La poussée en avant du bouclier s'effectue à l'aide de 24 vérins pneumatiques capables chacun d'une poussée maximum de 56,6t. Le déblai s'effectuait à l'air comprimé sous 2 à 2,3 atm. Les blocs en béton armé ont 1,70 m de longueur moyenne, 0,75 m de largeur et 0,50 m d'épaisseur, de sorte qu'un anneau de 0,50 m d'épaisseur et de 0,75 m de largeur dans le sens de l'axe du tunnel comprenait 12 blocs (fig. 3). On employa d'abord du béton d'une résistance de 170 kg : cm<sup>2</sup>, qui présenta cependant assez de défauts pour obliger à porter la résistance à la rupture à 250 kg : cm<sup>2</sup> (au bout de 20 jours). Pendant la poussée en avant du bouclier, dans les derniers anneaux, entre lesquels il ne s'est pas encore établi de surfaces d'appuis précises, il ne se produit pas seulement des efforts simples de compression (pression d'appui des vérins pneumatiques), mais aussi des moments de flexion considérables qui produisent des éclats.

Le système d'étanchéité de la maçonnerie du tunnel fut placé à l'extérieur des blocs. Au moment de l'avancement de la couverture d'acier (du blindage), à l'intérieur de laquelle on a placé les trois derniers anneaux de béton, cette couche isolante s'abîmait et même était enlevée par frottement. On installa donc un système d'étanchéité intérieur composé de deux couches de ruberoïd et de deux couches de pergamin, que l'on protégea au moyen d'un anneau en béton armé de 0,20 m d'épaisseur. Ce dernier est destiné à supporter toute la pression hydrostatique.

Au fur et à mesure de l'avancement du bouclier, il y eut quelque difficulté à maintenir la direction. Le diamètre de la maçonnerie de tunnel, constitué par les claveaux en béton, est de dimensions inférieures dans le sens horizontal et de chaque côté de 58,5 mm ; dans le sens vertical, en haut de 85 millimètres et de 32 millimètres en bas, à l'anneau de terre qui subsiste derrière le blindage. Il fallut donc boucher à temps ce vide en le remplissant de mortier de ciment, avant que l'anneau en béton en question ne sortît entièrement du blindage. Cependant le mortier de ciment injecté à haute pression, étant donnée l'allure accélérée de l'avancement, ne put qu'rarement atteindre la résistance nécessaire. Il en résulta une ovalisation insignifiante de l'anneau du tunnel, ce qui n'aurait d'ailleurs pas eu de conséquence si le boisage n'avait été si énergiquement coincé, ce qui entraîna des efforts exagérés au déboisement.

On a réservé dans les blocs de béton deux trous pour donner prise aux griffes de la machine de mise en place (fig. 4). La surface d'appui du vérin pneumatique est prévue dans un enfoncement de 4 centimètres de profondeur. De plus, chaque bloc contient quatre canaux longitudinaux destinés à assurer au moyen de longs boulons une liaison dans le sens de la longueur. Toutefois ces boulons ne furent pas mis en place et la liaison longitudinale de la maçonnerie fut assurée par de courts fers ronds.

La vitesse du travail accuse de grandes variations avec tendance nette à l'augmentation. C'est ainsi qu'après un rendement journalier



Fig. 3. — La fabrication des claveaux en béton. Fabrication et séchage des blocs (segments annulaires du tunnel).



Fig. 4. — Les griffes de l'appareil de mise en place saisissent un claveau en béton.

moyen de 0,75 m au cours du premier mois de travail, celui-ci fut porté à 3 mètres après deux mois, et atteignit même certains jours 4, 3 mètres d'avancement.

L'air comprimé fut fourni par deux installations de compresseurs d'une capacité totale de 600 m<sup>3</sup> : min, pouvant alimenter la haute et la basse pression. Une des caractéristiques de la qualité du sol fut que, si l'on supprimait l'air comprimé dans l'une des galeries, l'air comprimé en provenance de la galerie parallèle créait une surpression d'une atmosphère, ce qui facilitait beaucoup le travail.

Une brigade de travail comprenait de 40 à 49 ouvriers, dont 10 hommes s'occupaient des déblais, 4 hommes de la mise en place des blocs, 6 hommes de l'injection sous pression du mortier de ciment derrière les anneaux du tunnel, 12 hommes aux travaux de transport. Chaque bouclier occupait 3 brigades d'ouvriers et un personnel technique de 37 à 42 ingénieurs, techniciens et surveillants. Pour un mètre linéaire de tunnel, on compte, au cours des trois mois consécutifs les plus importants 302, 194 et 173 journées d'ouvriers. Les débours de construction s'élevèrent sur le chantier (sans l'administration centrale) à 11 000 roubles par mètre linéaire, dont 1 000 roubles environ pour l'air comprimé et 1 500 roubles pour l'amortissement du bouclier.

**Fonçage des tubes caissons.** — Au voisinage du croisement du chemin de fer, à côté de la place Komsomol, la section établie à double voie passe à une profondeur de 16 à 21 mètres dans l'ancien



de la galerie de tête au fur et à mesure de l'avancement, de sorte qu'elle atteignit  $3,60 \times 2,50$  m et à la fin  $5,20 \times 3,40$  m. Bien que ce fût difficile de maintenir la surpression avec une aussi grande excavation et un terrain médiocre, on s'en tint au principe adopté jusqu'au bout et on utilisa le support naturel solide.

Le profil de la galerie de base fut partout de  $2,50 \times 2,20$  m. Son excavation dans le calcaire dut être faite à la main, car il ne pouvait pas être question d'explosifs dans l'air comprimé, ce qui fit que le rendement journalier atteignit à peine 1 mètre. L'excavation du calcaire pour les pieds-droits fut encore plus difficile. Les calcottes mesuraient 4 mètres de long.

A 70 mètres environ du tronçon de 120 mètres que nous venons de décrire, la ligne passe tout près d'une haute maison d'habitation. On craignait que les travaux à l'air comprimé ne causassent de dangereux tassements. Pour obvier à ce danger, on fit congeler le sol artificiellement sur une longueur de 70 mètres au-dessus du tunnel. Les tuyaux de l'installation de congélation pénétraient souvent dans le gabarit du tunnel, ce qui occasionna parfois des difficultés pour leur enlèvement. C'est ainsi que, dans ces cas, l'air comprimé s'échappait par le tuyau brisé à l'extérieur : le sable entraîné était projeté de 10 à 15 mètres au-dessus de la surface du sol. Ce qui entraînait une chute de la pression d'air dans la chambre de travail et un brouillard épais par suite de la condensation de l'humidité. Mais cela n'eut pas d'effet spécial sur la marche du travail.

Dans la section congelée, on avait prévu pour le bétonnage un chauffage électrique ; mais, en fait, on put exécuter les travaux de bétonnage sans régime spécial, car la température ambiante ne descendit jamais au-dessous de  $+ 10^{\circ}$  C au front d'avancement. Ce fait est dû au bon isolement du blindage en planches de 7 centimètres d'épaisseur et à la température élevée de l'air comprimé. Le terrain, perméable à l'air et à l'eau, était difficile à congeler, parce que l'air comprimé qui s'échappait entraînait un courant contraire chaud. C'est ainsi qu'on fut forcé d'arrêter pendant 15 jours environ les travaux de terrassement à l'air comprimé pour permettre d'accélérer les travaux de congélation.

L'excavation du radier se fit par des explosions à l'ammoniac, ce qui put être exécuté sans difficulté dans l'air comprimé. On se contenta de retirer l'équipe dans le sas d'éclusage pendant l'explosion. L'aération se fit automatiquement par voie naturelle, sous pression, et se fit beaucoup plus vite que dans des conditions normales.

**Le procédé de congélation.** — Parmi les diverses méthodes de travail employées à la construction du métro, la congélation est la plus intéressante, non seulement à cause de ses larges champs d'application, mais à cause des importants progrès que ce mode de travail a dévoilés sous la contrainte des circonstances particulières.

Pendant les cinq mois qu'a duré le travail, on a produit 9 milliards de frigories, ce qui entraîna une dépense de 10 millions de kWh. Au total, on congela 72 000 mètres cubes de terres.

La congélation artificielle du terrain, à part un travail d'essai exécuté sur une cheminée d'aération (n° 20 b), fut appliquée en cinq points des travaux : pour l'installation des vestibules profonds et des tubes de tunnel d'accès des stations : 1° Porte Rouge ; 2° Kirovskaya ; 3° Place Dzerjinsky ; 4° sur le tronçon cité ci-dessus, de 70 mètres de long entre la Place Komsomol, et la Porte Rouge entre les puits 22b et 23 ; et enfin 5° entre les stations Bibliothèque de Lénine et Okhotny Riad, entre les puits 9 et 9b.

Le tableau ci-après donne une idée générale de l'importance de ces travaux :

La congélation du terrain pour les couloirs inclinés fut une opération particulièrement difficile. Il fallut en effet exécuter ces travaux sans pouvoir arrêter le trafic, de sorte que la solution qui aurait consisté à obtenir la congélation par tuyaux foncés verticalement était exclue dès l'abord. On fut donc amené à créer un cylindre de

N°	Chantier	Volume du terrain congelé (m³)	Compresseurs		Trous de sondage			
			Genre	Puissance, Feuille-heure	Verticaux		Obliques	
					Nomb.	M. lin.	Nomb.	M. lin.
1	Porte Rouge	20 600	Acide carboné	1 312 000	98	2 281,60	50	2 841,70
2	Kirovskaya	20 300	Ammoniac	1 170 000	44	1 306	56	5 301,30
3	Place Dzerjinsky	12 000	—	1 700 000	48	1 621,90	52	2 028,60
4	Puits 22-23	14 000	—	1 840 000	300	4 500	59	1 630
5	Puits 9-9k	3 500	—	130 000	82	570	45	580
6	Puits 20k	1 600	—	—	—	—	—	—
Total		72 000		2 622 000				

glace congelée tout autour du couloir d'accès incliné à installer. La hardiesse de l'entreprise provient du fait qu'il n'existe pas d'exemple de fonçage de longs trous de sondages, sous une inclinaison de  $30^{\circ}$  et dans le sable bouillant. Au surplus, les circonstances exigeaient un maintien absolu des directions de sondage prescrites.

Voici comment s'exécuta le travail. Sur un cercle de 12 mètres de diamètre, situé dans un plan perpendiculaire à l'axe du tunnel, on installa 45 trous de sonde de 52 à 55 mètres de long, espacés de 0,80 m. Les tubes atteignaient d'abord une profondeur de 20 à 25 mètres et un diamètre de 0,20 m, puis, de là, 0,15 m jusqu'à la profondeur définitive. Pour faciliter la mise en direction, on avait bétonné des tuyaux de direction sur des piliers séparés. Ces tuyaux, de 2,50 m à 3 mètres de long et de 0,25 m de diamètre intérieur, avaient été mis en place très exactement dans l'azimut du trou de sonde et avec une inclinaison de  $30^{\circ}$  sur l'horizon. Le fonçage se fit à la main, car les perforatrices rotatives donnaient déjà, à 8 mètres de profondeur, une déviation de 1,20 m hors de la direction prescrite. Pour augmenter le rendement qui était tombé à 1,50 m à peine par jour, on employa des treuils et des tarières, ce qui permit d'accélérer le travail de 50 p. 100. De cette façon les déviations demeurèrent minimes. Le rayon de propagation du froid atteignit dans les tuyaux inclinés une profondeur de 2,5 m environ, de sorte qu'il se forma un mur de glace de 5 mètres d'épaisseur et une grande résistance autour du noyau de terre des tunnels d'accès inclinés. Cela permit d'excaver le profil total du tunnel de 9 mètres de diamètre sans boisage, en anneaux qui atteignirent 8 mètres de long.

Pour le terrassement des vestibules souterrains, on fonça 50 à 60 trous de sonde verticaux, d'une longueur moyenne de 24 mètres ; bon nombre d'entre eux furent remplacés par des trous obliques pour éviter d'arrêter le trafic des tramways ou des voitures. On essaya en augmentant la distance de deux trous de sondage jusqu'à 1,50 m de diminuer les travaux de percement. Le rayon d'action du froid autour des tuyaux verticaux atteignit 1,50 m et 1,75 m. L'excavation des vestibules se fit par secteurs séparés : on creusa d'abord une tranchée de 2 mètres de large pour les murs de côté, puis on enleva le noyau central. On put enfin établir le boisage du plafond.

La technique des trous de sondage inclinés fut développée jusqu'au forage de canaux horizontaux. Pour établir une conduite d'eau jusqu'aux installations de réfrigération, on construisit ainsi des canaux de 22,50 m et même de 42 mètres de long sous les rues et les lignes de tramway par percement horizontal. Les déviations de la direction prévue restèrent inférieures à 1 p. 100.

Au total, on fonça plus de 800 trous de sondage d'une longueur totale supérieure à 20 kilomètres.

**La maçonnerie du tunnel.** — La maçonnerie du tunnel a été réalisée au moyen de moellons, de béton de cailloux, et surtout au moyen de béton armé ou non. Les tunnels inclinés des accès reçurent un revêtement en segments de fonte.

La grande quantité de béton à préparer et les conditions spéciales auxquelles il avait à répondre incitèrent la Direction à prescrire quelques règlements dont nous allons examiner quelques points particuliers.

Toutes les parties situées au-dessous du niveau de la nappe phréatique sont obligatoirement exécutées en ciment portland à la pouzzolane ; les parties moins importantes peuvent être faites en ciment portland de haut-fourneau. On n'emploiera le ciment portland ordinaire que pour les parties de la construction situées au-dessus du niveau de la nappe. Pour permettre l'utilisation du sable fin existant, il est spécifié que l'agrégat doit posséder une répartition aussi régulière que possible en éléments de 2,5 à 80 millimètres de grosseur. On autorisa la brique cassée et la pierre tendre comme agrégat grossier, à condition que leur résistance atteigne 100 p. 100 celle du béton projeté si celle-ci atteint 90 kg : cm<sup>2</sup> et 120 p. 100 celle des bétons compris entre 110 et 170 kg : cm<sup>2</sup>. L'âge du béton auquel se rapporte la résistance du projet fut fixé à 20 jours pendant la première période des travaux (contre 28 jours dans les règlements généralement appliqués en U. R. S. S.). Plus tard cette prescription fut modifiée en ce sens que l'on autorisa la direction de chaque lot de construction à fixer cet âge auquel le béton devrait présenter la résistance totale du projet en concordance avec le caractère de la partie de la construction et avec les circonstances particulières. On ne fit à cela que les restrictions suivantes :

1° Que cet âge ne devait pas dépasser 90 jours ;  
 2° Que l'on pouvait procéder au décoffrage des parois de béton et de béton de cailloux, sitôt après avoir atteint les résistances suivantes :

- a) 45 kg : cm<sup>2</sup>, dans le cas où l'on ne décoffrerait pas en même temps le plafond qu'elles supportent ;
- b) 75 p. 100 de la résistance prévue au projet, si l'on décoffrait le plafond en même temps.

3° Les plafonds en béton armé des sections à l'air libre peuvent être décoffrés :

- a) Si leur résistance comporte 50 p. 100 de la résistance prescrite, à condition de ne pas être chargés avant d'avoir atteint l'âge complet ;
- b) Si leur résistance comporte 75 p. 100 de la résistance prescrite, au cas où ils seraient immédiatement chargés à la moitié du remblai.

4° Les parois en béton des sections profondes et les stations construites par galeries ne peuvent être décoffrées qu'avec une résistance atteignant 100 p. 100 ;

5° L'anneau intérieur en béton armé (protection d'étanchéité) doit au décoffrage présenter une résistance de 50 p. 100.

Ces prescriptions élastiques ont permis de réaliser des économies très importantes de ciment.

La quantité normale de ciment par mètre cube est de :

- a) Constructions faites en tranchées ouvertes : 250 kilogrammes.
- b) Sections construites en galerie et autres constructions : 280 kilogrammes.

Le maximum permis atteint 350 kg : m<sup>3</sup>. La résistance du béton varie suivant les circonstances locales : pour les constructions en béton, elle doit être :

- a) Voûtes ..... 100 à 170 kg : cm<sup>2</sup>
- b) Parois ..... 90 à 130 —
- c) Radier en voûte..... 65 à 100 —

pour les constructions en béton armé :

- a) Couvertures ..... 130 à 170 kg : cm<sup>2</sup>
- b) Parois ..... 130 à 170 —
- c) Radier en voûte..... 110 à 130 —

Les épaisseurs et autres dimensions des profils de tunnel sont portées sur les figures. Les couvertures en béton armé des tronçons exécutés en tranchées à ciel ouvert ont été exécutées en dalles nervurées ou en dalles sans nervures. Dans les terrains à forte pression, les couvertures, les parois et le radier ont été calculés en cadres fermés. Le radier a été calculé pour résister à la pression hydrostatique de bas en haut. Il ne pouvait pas être pris en compte pour la

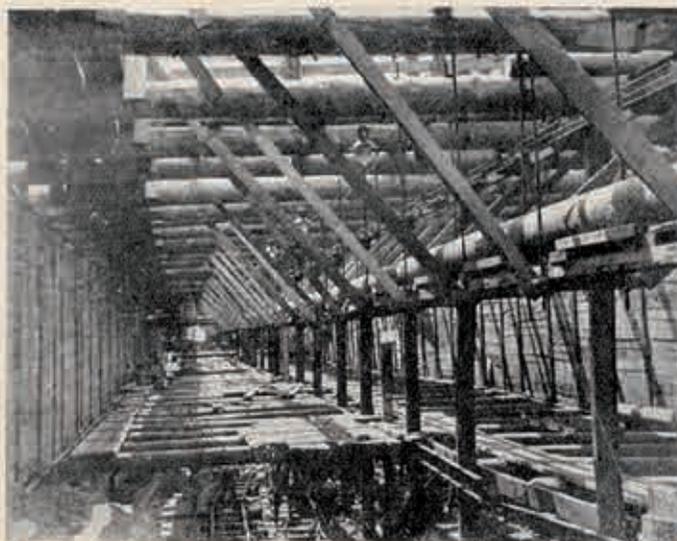


Fig. 9. — Excavation de tunnel en tranchée ouverte. Déviation des canalisations d'eau et de gaz.

répartition générale de la question, car, sauf exception, il ne fut bétonné qu'après terminaison et décoffrage de la voûte. Pour le bétonnage en hiver, la règle prescrite dit que le béton doit atteindre la résistance de 35 kg : cm<sup>2</sup> avant d'être refroidi à 0°C. Au cas où l'eau de gâchage serait chauffée à plus de 80° C (il est permis de la chauffer jusqu'à 100° C), l'agrégat devra d'abord être mélangé à l'eau de gâchage, et ce n'est qu'après qu'on ajoutera le ciment.

Pour le calcul statique du tunnel profond à voie unique, on a tenu compte de l'action d'arc de décharge de la terre placée au-dessus. Pour le calcul des sections de tunnel à voie double et des stations, il fallut tenir compte de la surcharge entière jusqu'au niveau du sol, car l'ellipse de charge atteignait le niveau du sol ou tombait dans la région du sable boulant. On put négliger les surcharges mobiles, étant donnée l'importance de la surcharge fixe. Les parois latérales furent calculées en poutres sur appuis élastiques (fig. 9-10).

Fig. 10. — Le tunnel brut de décoffrage.





Fig. 11. — Section de tunnel à double voie.

**L'étanchéité.** — Comme presque toute la ligne construite se trouve dans un terrain aquifère, et même noyé, on a prévu pour toute la construction une chemise imperméable (membrane), protégée par une couche de ciment ou de brique. Cette chemise comprend en général quatre couches de carton, imbibées de bitume et agglomérées au moyen d'une masse collante bitumineuse. Pour les stations profondes on employa une toile imbibée et recouverte de bitume. La masse collante fut cuite en chaudière. On ne l'employa qu'à chaud.

Sur les tronçons construits en tranchées ouvertes, on colla cette membrane sur la surface extérieure de la maçonnerie du tunnel dûment séchée et lissée au ciment, puis on plaça sur les couvertures une couche de protection de 10 centimètres environ en béton ou en brique. Les quatre couches de carton se recouvrent les unes les autres de 10 centimètres. Là où la couverture du tunnel atteint la limite glacée du sol, on a encore placé une couche de protection thermique.

Sur les tronçons construits en galerie, on a appliqué le même genre d'isolation sur le parement intérieur de la maçonnerie. A cet effet, on a commencé par lisser celle-ci au ciment et à la sécher artificiellement. Une couche intérieure en béton armé, de 0,20 m d'épaisseur sert de protection contre les dégradations mécaniques et contre la poussée hydrostatique.

**Les diverses sections.** — Comme le représentent les figures 11 et 12 le tunnel à double voie présente une section de 7,60 x 4,60 m en alignement droit, et les élargissements correspondants en courbe. Le profil a été observé presque partout où l'on a établi le tunnel à ciel ouvert. Les tronçons en profondeur ont en grande partie été exécutés à voie unique, en section circulaire de 5,50 m de diamètre, ce qui, après avoir retiré l'anneau de protection en béton armé, laissait une largeur libre de 5,10 m. Le profil extérieur de la maçonnerie a été établi la plupart du temps en anse de panier, et quelquefois avec des verticales.

Les tronçons de tunnel à double voie, construits en galerie, présentent un profil intérieur en forme d'anse de panier dont le diamètre horizontal est 9,10 m et le diamètre vertical 8,30 m. Le profil extérieur de la maçonnerie présente des surfaces verticales.

Les stations construites en tranchée ouverte ont une couverture en béton armé, en forme de dalle nervurée et également en dalle sans nervure. Elles ont été en partie sans poteau intermédiaire, en partie avec 1, 2 et même 3 rangées de poteaux intermédiaires dont les distances varient de 5 à 7 mètres (fig. 13).

Les stations exécutées en galerie se divisent en stations à une, deux et trois voûtes. Les stations à voûte unique présentent un quai installé en ilot. La maçonnerie de cette voûte portée fut construite

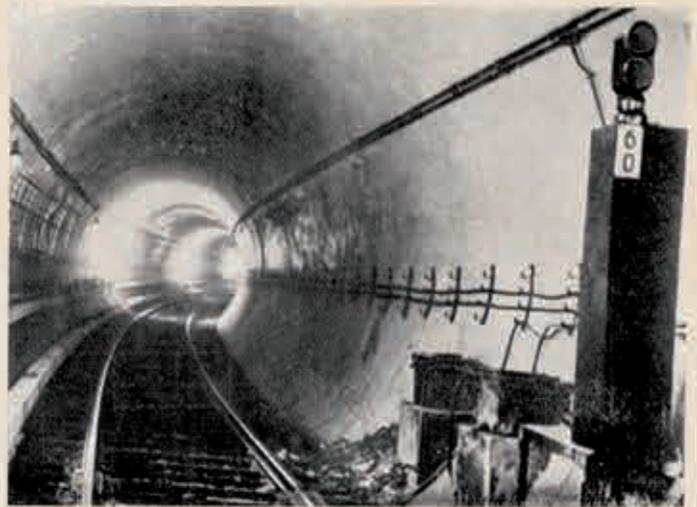


Fig. 12. — Section de tunnel à voie unique.

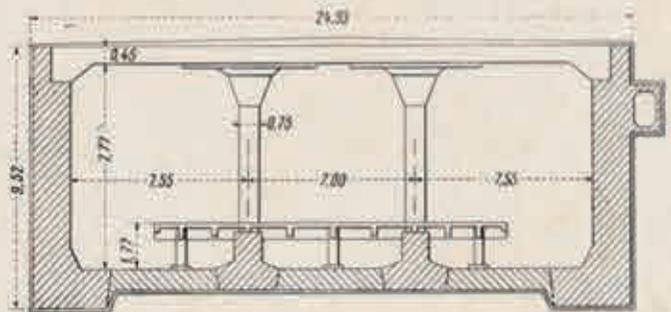


Fig. 13. — Section d'une station élevée.

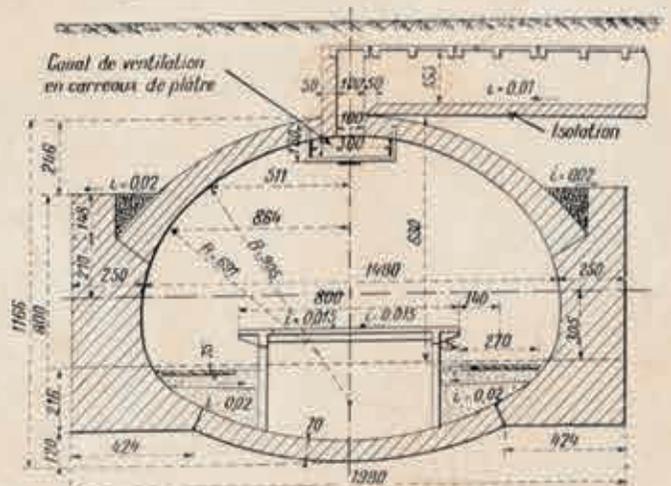
en moellons hourdés au mortier de ciment, pour éliminer l'effet de variations de température et de retrait du béton. Les voûtes du radier sont ici aussi en béton armé (fig. 14).

Les stations à voûte double se composent de deux sections de tunnel dont chacune comprend une voie ferrée et le quai correspondant. Ceux-ci sont reliés par plusieurs couloirs transversaux.

Les stations à trafic intense sont à voûte triple. La voûte médiane sert de corridor et de local de répartition. Les murs intermédiaires sont remplacés par des pilastres de 2 x 2 mètres (fig. 15).

**Les stations. Les escaliers mécaniques.** — La longueur des stations est de 155 mètres, ce qui permet une circulation de rames de 8 voitures. La distance moyenne des 13 stations est de 910 mètres ; la

Fig. 14. — Section d'une station profonde à voûte unique.



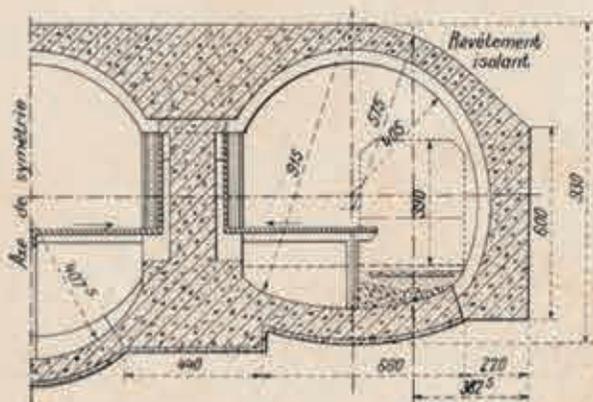


Fig. 15. — Section d'une station profonde à voûte triple.

distance minimum est de 511 mètres; la distance maximum, de 1281 mètres. Quatre stations sont à un niveau compris entre 16 et 35 mètres de profondeur, comptés du niveau du sol au niveau du quai; les autres sont à 7 à 9 mètres de profondeur. Les quais des stations peu profondes ont 10 mètres de large (quais-îlots), et vont jusqu'à 15 mètres à la station du Palais des Soviets. Les stations profondes

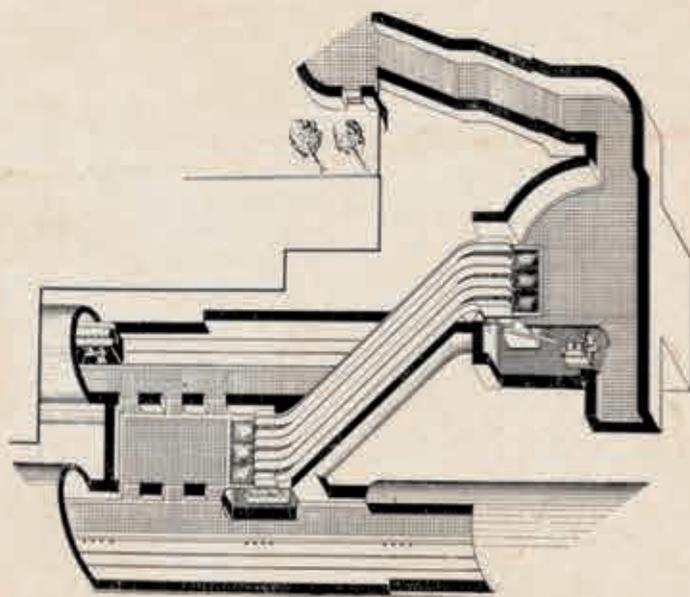


Fig. 16. — Vue axonométrique d'une station profonde.

ont deux quais de 4 mètres de large qui atteignent, dans les stations à trois voûtes, 21 mètres à cause de l'allée centrale. Les vestibules souterrains mesurent 11 × 15 mètres de surface et comprennent deux étages: l'étage inférieur sert de salle des machines pour les escaliers mécaniques; l'étage supérieur sert aux voyageurs. Ils sont fondés sur des piliers en béton qui vont jusqu'au sol solide.

Les escaliers mécaniques font un angle de 30° avec l'horizon et réunissent le vestibule souterrain au quai central des stations. Leur section est circulaire et d'un diamètre de 8 mètres. La moitié supérieure du tube est garnie d'un revêtement métallique pour assurer l'étanchéité à l'eau. Les escaliers mécaniques comportent chacun trois escaliers indépendants de 100 à 150 marches. Leur dénivellation verticale est de :

Okhotny Riad .....	10,41 m,
Place Dzerjinsky .....	19,11 —
Kirovskaya .....	28,75 —
Porte Rouge .....	26,28 —

La hauteur des marches est de 0,20 m, leur profondeur 0,41 m. Ils sont calculés pour deux personnes de front. Ils se déplacent à la vitesse de 0,65 m : s et peuvent transporter 13 200 voyageurs à l'heure (fig. 16).

**Aération et chauffage.** — Les sections élevées de la ligne ont un système de ventilation qui comprend des puits de 4 m × 1 m de section, situés à 100-150 mètres de distance. Les stations élevées furent munies d'une ventilation artificielle, car les longs corridors et vestibules ne donnent aucune garantie d'une ventilation naturelle, et de simples puits ascendants auraient gêné le trafic de la rue. Les puits ont donc été installés latéralement et ont été munis de ventilateurs qui en été aspirent l'air, en hiver, le refoulent. Le contre-courant correspondant se produit par l'un des puits voisins, situé sur la ligne.

Dans les sections profondes également, l'aération se fait par ventilateur. Pour cela, on a installé entre toutes les stations deux puits d'aération qui expirent l'air en été et l'aspirent en hiver, de sorte que le contre-courant traverse les stations. La vitesse de l'air atteint de 8 à 10 m : s. Les ventilateurs sont du type silencieux, à vitesse périphérique de 42 m : s, à 8 ou 12 plees massives en aluminium coulé et 2,50 à 1,60 m de diamètre.

Il existe 36 puits d'aération au total. Aux stations, la température ne doit pas être inférieure à + 10° C en hiver, ni dépasser + 25° C en été. Les stations profondes reçoivent en été 300 000 à 340 000 m<sup>3</sup> : h, et les sections de tunnel, de 300 à 350 m<sup>3</sup> : m linéaire, ce qui correspond à un changement d'air complet toutes les 7 minutes. Les vestibules souterrains sont munis d'un chauffage à eau chaude, et les entrées, d'un chauffage à air chaud à 35° C.

**Le parti architectural.** — En opposition à tous les métros connus à ce jour, on apporta un soin particulier au côté architectural des stations et le projet des différents pavillons, des vestibules de surface ainsi que celui des vestibules souterrains et des perrons fut confié aux architectes les plus capables du pays. Ceux-ci, étant donnée la spécialité du problème proposé, en ont tiré un heureux parti.

Chaque station présente son caractère particulier.

L'architecture des entrées au-dessus de terre tend à s'adapter à celle des environs, — qu'elles comprennent des pavillons isolés ou qu'elles soient installées dans des bâtiments existants — et à exprimer clairement leur but et parti. La forme en voûte, même la forme brute des portails principaux, les entrées larges et richement travaillées indiquent le trafic des masses. L'emploi étendu de riches matériaux de construction forme la décoration la plus importante de toutes les parties de l'ouvrage. Les parois des stations sont revêtues de carreaux de porcelaine vitrifiée ou de mosaïque. Toutes les colonnes et les sols des stations sont revêtus de marbre naturel; chaque station reçut une autre sorte de marbre, ce qui créa une intéressante variété du caractère des stations (fig. 17-18). On fit un large emploi, non seulement des sortes de marbres de l'Oural et de Crimée qu'on avait jusqu'alors employé à Moscou, mais aussi des sortes de marbre jauno-rougeâtre, rouge foncé et gris clair du Caucase qui furent amenées en grandes masses et furent sciées et polies dans des usines édifiées à cet effet. Les parois des tunnels d'accès et des vestibules sont revêtues de Marblit (verre à miroir poli blanc laiteux et noir). Les marches d'escalier sont en granit rose et gris et en Labrador noir. Les sols des tunnels d'accès et des vestibules sont couverts de plaques multicolores de Mettlach. Le sol des perrons est asphalté et entouré de bordures de granit.

Les escaliers mécaniques ont des balustrades en bois dur (noyer ou chêne), la rampe des escaliers est pour la plupart en marbre, parfois en fonte avec incrustation de bronze.

Tous les travaux de menuiserie ont été exécutés sur la base du projet de l'architecte, et l'on a absolument évité tout travail en série.

L'éclairage des stations est destiné d'abord à libérer de l'impression du séjour dans un local souterrain. Pour cette raison, l'éclairage est

particulièrement élevé par rapport à d'autres métros : il atteint 50 lux, et à la station du Palais des Soviets, 100 lux. Grâce à une heureuse installation des lampes (éclairage diffus, souvent indirect) ce problème a reçu une bonne solution.

**Superstructure. Parc à voiture.** — Le ballast a 0,30 m d'épaisseur sous les traverses et sa hauteur totale est de 0,44 m. Les traverses ont 2,70 m de long, avec une section de 250 × 160 mm. ; elles sont injectées de créosote. En alignement droit, on compte 1 600 traverses au kilomètre. En courbe, ce chiffre est porté à 1 760 traverses. Dans les stations et dans les 25 mètres adjacents aux deux côtés les traverses sont bétonnées jusqu'à mi-hauteur.

Les rails sont du profil le plus lourd fabriqué en U. R. S. S. et pèsent 45,4 kg par mètre. Leur contrainte, pour une charge axiale de 17,5 t atteint 1 805 kg : cm<sup>2</sup>, soit 10 p. 100 de moins que la Norme prescrite par le commissaire du peuple aux transports (2 000 kg : cm<sup>2</sup>). La voie est de 1 524 millimètres. Dans les courbes de rayon inférieur à 200 mètres, elle a été élargie en conséquence. Les rails sont en grande partie soudés, dans les alignements droits jusqu'à la pente de 15 p. 1000 et dans les courbes jusqu'au rayon de 500 mètres. La longueur des tronçons soudés est de 75 mètres. La pente maximum est de 33 p. 1000. Le troisième rail conducteur de courant est en acier doux Martin et les rails de 12,50 m de long sont fixés sur isolateurs de porcelaine espacés de 5 mètres. Le système block comprend 106 signaux sémaphores et autostop. La fourniture de courant se fait par quatre sous-stations qui, à l'aide de 11 redresseurs à mercure assurent une fourniture d'énergie de 14 800 kW. Il est prévu un agrandissement de 11 redresseurs d'une puissance de 90 000 kW. Ces appareils transforment du courant alternatif de 6 600 volts en continu à 825 volts.

Les voitures ont 18,90 m de long, 2,70 m de large, et une hauteur utile de 2,60 m. De chaque côté sont installées 4 portes de 1,20 m de large, commandées automatiquement à l'ouverture et à la fermeture par le conducteur. Il est prévu 52 places assises situées contre les parois et une capacité totale de 170 voyageurs. Les sièges sont couverts en cuir et toutes les parties métalliques sont nickelées.

L'automotrice possède quatre moteurs de 150 kW. Les freins sont électro-pneumatiques. En hiver, le chauffage des voitures se fait par corps chauffants électriques. L'automotrice pèse 45 tonnes, les remorques, 31,5 t.

La capacité de transport de la première ligne construite pendant la première période de trafic s'est élevée en moyenne à 45 000 voyageurs à l'heure, en comptant 34 trains de 8 wagons à l'heure. Dans l'avenir, on pourra élever le trafic à 40 trains à l'heure (54 000 voyageurs à l'heure), ce qui est bien supérieur à n'importe quel autre métropolitain européen.

**Les prix de revient.** — Les dépenses totales se sont élevées à 626 millions de roubles qui se répartissent comme suit sur les divers chapitres :

Gros œuvre : Tunnel, Stations, Vestibules.....	506,2 millions de roubles.
Aménagement des stations.....	28,0 —
Escaliers mécaniques.....	15,0 —
Superstructure.....	14,4 —
Signaux et Block-système.....	1,5 —
Réseau de câbles.....	7,2 —
Canalisations, Conduites d'eau, Aération.....	4,8 —
Sous-stations électriques.....	13,0 —
Dépôts et ateliers.....	12,8 —
Voitures.....	20,0 —
Total.....	625,9 —

En plus de ces frais, on a dépensé encore 130 millions de roubles pour la construction d'usines auxiliaires, l'achat de machines de construction, l'installation des logements et des besoins de culture des ouvriers.



Fig. 17. — Entrée de la station « Palais des Soviets ».



Fig. 18. — Entrée de la station « Kirovskaya ».

Presque toute l'installation fut fournie par la jeune industrie de l'U. R. S. S. et la partie principale du travail par les travailleurs et techniciens locaux, avec l'appui le plus complet de la population. L'endurance et l'enthousiasme ont permis de surmonter de nombreuses et importantes difficultés qui provenaient tant des obstacles naturels que du manque sensible de spécialistes expérimentés.

La réussite importante de l'exécution est due à la haute activité des personnalités dirigeantes, à la tête desquelles se trouvait L. Kaganovitch (qui depuis a été nommé commissaire du peuple aux Transports). A la demande générale des travailleurs, on a donné au chemin de fer souterrain de Moscou, le nom de L. Kaganovitch. C'est à lui qu'est incombée la plus grande part du travail d'organisation.

Paul Rotter, directeur de l'entreprise, qui fut également directeur des travaux de l'installation hydraulique du Dniéper, ses lieutenants E. Abakumoff et K. Starostine et d'autres ont fourni un travail magnifique qui a été reconnu par le Gouvernement par l'octroi des plus grandes distinctions.

La construction des tronçons de la deuxième ligne fut entreprise aussitôt après la mise en service de la première, et doit être terminée pour août 1937. On a creusé 40 puits et l'excavation du tunnel se poursuit au moyen de 40 boucliers à air comprimé. Le revêtement du tunnel doit se faire au moyen de claveaux en fonte. A cet effet, les plus grandes usines de l'U. R. S. S. livrent 180 000 tonnes de claveaux. On a prévu, pour l'année 1935, 250 millions de travaux et d'investissement de capitaux.

# DEPUIS 70 ANS AUX CÔTÉS DU BTP

Acteur de référence du BTP, nous sommes aux côtés des entreprises, artisans, salariés et retraités de ce secteur pour les protéger, les assurer et les soutenir en cas de besoin. Nous nous engageons chaque jour à proposer des services qui vous aident à avancer avec sérénité.



**PRO BTP**  
GROUPE

ASSURÉ POUR DEMAIN

[www.probtp.com](http://www.probtp.com)

# Même pas mal.

**Prenez soin de vos articulations, elles vous remercieront.**

Les métiers du BTP sont physiquement exigeants. Efforts soutenus, postures contraintes, gestes répétés mettent le corps à l'épreuve. Des solutions existent pour améliorer le travail des compagnons du BTP et renforcer la performance des chantiers.



Découvrez les solutions et outils pratiques

**MemePasMalBTP.fr**

© Gettyimages - agence/valérievallette