

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

INTERNATIONAL. FUNICULAIRE D'ENSHI - CHINE. PONT A HAUBANS DE RANDE - ESPAGNE. ABIDJAN, L'ECHANGEUR DE L'AMITIE IVOIRO-JAPONAISE. TUNNEL DE LORONG KUDA - KUALA LUMPUR. NEW CABLE-STAYED BRIDGE OVER THE ZUARI RIVER - INDIA. GARDINER EXPRESSWAY - TORONTO. RESEAU EXPRESS METROPOLITAIN DE MONTREAL - CANADA. FONDATIONS POUR LIGNES HAUTE TENSION - ALLEMAGNE ET BELGIQUE. AEROPORT DE SIHANOUKVILLE - CAMBODGE. TOUR MOHAMMED VI - RABAT

N° 962 SEPTEMBRE 2020



TUNNEL DE LORONG
KUDA AU CŒUR DE
KUALA LUMPUR
© SOLETANCHE BACHY

LES TRAVAUX
PUBLICS
FÉDÉRATION
NATIONALE

PRO BTP LE MEILLEUR DE LA PROTECTION SOCIALE

SANTÉ
PRÉVOYANCE
ASSURANCES
ÉPARGNE
RETRAITE
VACANCES
ACTION SOCIALE



PRO BTP
GROUPE

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
Erica Calatozzo (Systra), Jean-Bernard
Datry (Setec), Olivier de Vriendt
(Spie Batignolles), Philippe Gotteland
(Fnfp), Florent Imberty (Razel-Bec),
Nicolas Law de Lauriston (Vinci),
Romain Léonard (Demathieu Bard),
Claude Le Quééré (Egis), Véronique
Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau
(Soletanche Bachy), Jacques Robert
(Arcadis), Solène Sapin (Bouygues
Construction), Claude Servant
(Eiffage tp), Nastaran Vivan (Artelia),
Michel Morgenthaler (Fnfp)

Ont collaboré à ce numéro

Rédaction
Monique Trancart (actualités),
Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente

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

France (9 numéros) : 190 € TTC
International (9 numéros) : 240 €
Enseignants (9 numéros) : 75 €
Étudiants (9 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)

Publicité

Rive Média
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

Édition déléguée

Com'1 évidence
2, chemin dit du Pressoir
Le Plessis
28350 Dampierre-sur-Avre
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.com

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

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux).

Ouvrage protégé : photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957, qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).

Éditions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0218 T 80259
ISSN 0041-1906

UNE EXPÉRIENCE AMÉRICAINE



© DR

Le sujet du travail à l'International est vaste et plusieurs articles ont déjà été publiés dans ces colonnes par des auteurs éminents. Afin d'éviter les redites, il est proposé ici de simplement partager les leçons tirées d'une carrière de 40 ans dans le domaine de l'ingénierie des ouvrages d'art, notamment en Amérique du Nord.

Partir en mission en Floride pour travailler sur le chantier d'un ouvrage conçu par Jean Muller est une opportunité qu'un jeune ingénieur ne pouvait laisser passer. C'était à l'époque le premier pas vers le développement de la technique des voussoirs prefabricués aux États Unis. Pour cela Jean Muller avait créé un bureau d'études en association avec un ingénieur américain. Cette association franco-américaine a permis de réaliser des ouvrages en voussoirs prefabricués prestigieux dont le Pont de Sunshine Skyway en Floride avec une travée haubannée de 360 m.

Durant cette période nous avons appris que les américains sont ouverts aux nouvelles technologies dans la mesure où elles leur apportent un avantage compétitif. L'innovation est donc acceptée, cependant il faut prendre en compte les méthodes de travail américaines qui privilégient la simplicité et l'efficacité. Il faut éviter de pécher par excès de sophistication et garder l'ouverture d'esprit nécessaire pour intégrer les habitudes locales. En effet,

les États américains doivent être considérés presque comme des États indépendants lorsque l'on considère les coûts de main d'œuvre, le prix et la disponibilité des matériaux de construction, les conditions climatiques et sismiques ainsi que les méthodes de construction.

De nos jours, les grands projets d'ouvrages d'art sont généralement délivrés avec la méthode conception-construction. Ces projets ont des budgets qui dépassent souvent le milliard de dollars.

Les grands bureaux d'ingénierie généralistes ont augmenté leur taille considérablement ces dernières années, surtout par le biais des acquisitions. Ils ont l'avantage de la puissance financière et du nombre d'employés, ce qui rassure les entreprises. Ils sont également implantés dans tout le territoire américain et maintiennent les contacts avec les administrations locales. Dans ce contexte, quel peut être le rôle des bureaux d'ingénierie de petite ou moyenne taille ? En réalité, le système conception-construction est favorable aux bureaux spécialisés qui sont appréciés par les entreprises car ils peuvent apporter des solutions techniques compétitives. Les bureaux spécialisés, avec des équipes soudées et aguerries, ont aussi l'avantage d'apporter la rapidité d'exécution des études et des coûts d'études attractifs. Bien sûr, il faut être patient pour gagner la confiance des entreprises et des grands bureaux d'études.

En conclusion, la participation aux grands projets d'ouvrages d'art en Amérique du Nord demande ténacité, ouverture d'esprit et ingéniosité.

L'ingénierie est parfois considérée comme une commodité sur le marché international grâce aux améliorations continues des logiciels de calcul et de production de plans. Cependant, plus que jamais, le différenciateur dans les compétitions de type conception-construction reste la capacité à développer des concepts gagnants. Cet art qui demande des qualités d'ingénieur, mais aussi d'architecte et d'entrepreneur ne s'apprend pas à l'école mais grâce à l'expérience acquise.

DANIEL TASSIN
SYSTRA-IBT
SENIOR TECHNICAL OFFICER

LISTE DES ANNONCEURS : PROBTP, 2^e DE COUVERTURE - BTP BANQUE, P.7 - TERRASOL, P.15 - SMABTP, 3^e DE COUVERTURE - MACCAFERRI, 4^e DE COUVERTURE



INTERNATIONAL

LEFUNGJIARE D'ENSHIEN CHINE © POMA





04 ALBUM

06 ACTUALITÉ



16

**ENTRETIEN AVEC
PATRICK NAGLE**
FREYSSINET -
UNE DÉMARCHE VISIONNAIRE,
TOUJOURS D'ACTUALITÉ

**22 AFGC - ASSOCIATIONS INTERNATIONALES
DE GÉNIE CIVIL : UN INVESTISSEMENT
PROFITABLE**



30

**LE FUNICULAIRE
D'ENSHI**
en Chine



38

**ÉLARGISSEMENT
DU PONT À HAUBANS
DE RANDE**
en Espagne



44

**ABIDJAN, L'ÉCHANGEUR
DE L'AMITIÉ
IVOIRO - JAPONAISE**



50

TUNNEL DE LORONG KUDA
Une liaison souterraine
au cœur de Kuala Lumpur



56

**A NEW CABLE-STAYED
BRIDGE OVER THE ZUARI
RIVER IN THE STATE OF GOA**
in India



64

**RECONSTRUCTION
PARTIELLE DU GARDINER
EXPRESSWAY DE TORONTO**
Préfabrication des tabliers



73

**LE RÉSEAU EXPRESS
MÉTROPOLITAIN (REM)
DE MONTRÉAL**
au Canada



84

**FONDATEMENTS POUR LIGNES
HAUTE TENSION**
en Allemagne et en Belgique



92

**EXTENSION DE LA PISTE
DE L'AÉROPORT
DE SIHANOUKVILLE**
au Cambodge



98

**LES DESSOUS DE LA TOUR
MOHAMMED VI**
de Rabat





ÉLARGISSEMENT NOVATEUR D'UN PONT À HAUBANS ESPAGNOL ANCIEN DÉTENTEUR DU RECORD MONDIAL DE PORTÉE IL Y A 25 ANS

Freyssinet a exécuté pour le concessionnaire Audasa le remplacement des haubans de ce pont emblématique de l'autoroute de l'Atlantique en Galice, Dragados et Puentes Infraestructuras se voyant confier les nouvelles chaussées. Ces travaux remarquables et novateurs, selon un projet élaboré par MC2 Estudio de Ingeniería, ont été distingués en recevant le deuxième prix OStrA (Outstanding Structure Award) décerné par l'IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) au motif qu'il s'agit d'une réalisation parmi les plus innovantes et durables dans sa catégorie. Le pont de Rande avait été mis en service en 1981.

(Voir article page 38).

© MC2 INGENIERIE, DRAGADOS, GROUPE PUNTES ET FREYSSINET



ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES : BONS RÉSULTATS EN 2019

En 2019, les énergies marines renouvelables ont relevé la tête et enclenché une dynamique de développement. Les éoliennes offshore qui raflent 81% du chiffre d'affaires, s'installent au large des côtes.



© SIEMENS GAMESA

Eolienne offshore du parc de Dudgeon sur la côte Est de l'Angleterre, au nord de Norwich.

L'avalanche de chiffres et de dates lors de la présentation du 4^e rapport des énergies marines renouvelables (EMR) témoigne que « une dynamique est enclenchée, la France commence à rattraper le retard sur les leaders européens », selon Frédéric Moncany de Saint-Aignan, président du Cluster maritime français à l'initiative de l'observatoire des énergies de la mer.

« La filière s'est remobilisée, des entreprises sont revenues, nous sommes à l'aube d'un décollage, » estime Christophe Clergeau, président de l'observatoire. Les résultats de 2019 contribuent à un certain optimisme. Ils ont été recueillis auprès de 291 développeurs-

exploitants, entreprises et fournisseurs, institutionnels et chercheurs-formateurs.

→ 69% du CA à l'export

L'énergie éolienne posée en mer (ancrée) génère 82% de leur chiffre d'affaires (306 millions d'euros), et l'éolien flottant (projets pilotes), 14%. L'énergie hydrolienne (sur les courants) atteint 2% comme toutes les autres EMR confondues - énergies houlomotrice (vagues, houles), thermique des mers (eau froide/chaude), osmotique (salinité) et photovoltaïque flottante. Le chiffre d'affaires des répondants est réalisé à 69% à l'export. 2019 est d'autant plus réconfortante que 2018 avait été mauvaise, notamment en matière d'emplois. Le secteur a retrouvé

un millier d'emplois pour atteindre 3064. Et 2020 semble suivre le même chemin. General Electric prévoit 1 100 salariés en France à la fin de l'année (700 en juin). L'industriel a commencé dans son usine de Cherbourg (Manche) la production des 80 éoliennes du parc de Saint-Nazaire (480 MW, Loire-Atlantique, à installer en 2022). Les travaux de la sous-station électrique ont débuté cet été et les fondations seront exécutées au printemps 2021.

→ Suite de l'appel d'offres de 2012

Si le chiffre d'affaires n'a pas retrouvé le niveau de 2016, les investissements ont continué d'augmenter, à 452 millions d'euros dont 291 par les développeurs-exploitants qui portent les projets EMR dans le but de les exploiter. Ils agissent souvent dans le cadre d'un appel d'offres et font vivre un site jusqu'à son démantèlement. Les industriels implantent des usines spécifiques. Siemens Gamesa s'implante au Havre (Seine-Maritime). Les ports se modernisent pour accueillir l'assemblage, la logistique, etc.

Ces résultats encourageants sont dus à la concrétisation de l'appel d'offres de 2012 de l'État.

Outre Saint-Nazaire effectif en 2022, citons le lancement des travaux du parc de Fécamp (498 MW, 2023, Seine-Mari-

time), les attributions pour Saint-Brieuc (496 MW, 2023, Côtes-d'Armor) et Courseulles-sur-Mer (448 MW, 2024, Calvados)⁽¹⁾.

Au-delà de 2023-2024, « les industriels ont besoin de visibilité pour investir, nous devons travailler dès maintenant à la planification des EMR dans le cadre de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) 2024-2028, » recommande Jean-Louis Bal, président du Syndicat des énergies renouvelables.

→ Être exemplaire en concertation

La PPE 2019-2023 prévoit 1 GW d'éolien en mer attribué par an. « La filière doit être exemplaire en concertation pour se développer, » a insisté Sophie Murlon, directrice de l'énergie, ministère de la Transition écologique et solidaire. Le Pôle Mer Méditerranée conduit deux observations sur les interactions entre les éoliennes offshore et leur environnement, sur l'avifaune et les écosystèmes marins. Précisons que les éoliennes en mer sont de puissantes machines, couramment de 6 MW, certaines de 8 MW. Des prototypes de 12 MW sont testés par General Electric. Elles produisent plus d'électricité que les modèles terrestres et bénéficient d'un vent plus constant. ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux n°944, septembre 2018, page 8.

FILIÈRE FRANÇAISE D'ÉLECTRIFICATION RURALE

Le Syndicat des énergies renouvelables a proposé un ensemble de mesures en faveur de la relance. Ses propositions reprennent en partie celles destinées à développer les énergies renouvelables. Citons quelques points moins connus.

Les entreprises doivent être davantage accompagnées à l'international par les acteurs institutionnels dans un marché mondial de 300 milliards d'euros. Le président du Ser, Jean-Louis Bal, chargé par le gouvernement de fédérer les énergies renouvelables à l'export, travaille à la création d'une filière française d'électrification rurale. L'Agence de la transition écologique* prépare un livre blanc sur ce thème avec l'Agence française de développement.

En ce qui concerne l'éolien flottant, domaine où les Français sont bien placés, il souligne la nécessité d'adapter les ports pour l'assemblage des machines.

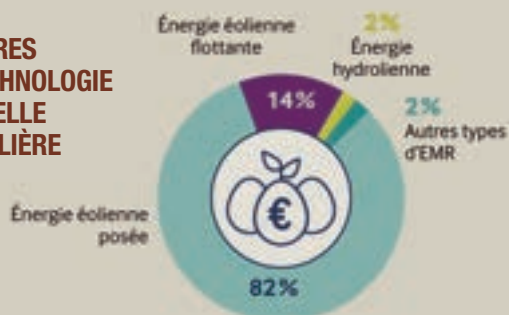
En ce qui concerne les centrales photovoltaïques sur friches, « une réflexion globale doit être engagée, » notamment afin d'utiliser des sites dégradés comme les anciennes décharges sur le littoral, ou des carrières non reconverties.

En savoir plus sur :

www.syndicat-energies-renouvelables.fr/publications/

* Ademe.

CHIFFRE D'AFFAIRES PAR TECHNOLOGIE À L'ÉCHELLE DE LA FILIÈRE



Les éoliennes offshore (posées) dominent largement le marché des énergies marines renouvelables.

© OBSERVATOIRE DES ÉNERGIES DE LA MER



BTP BANQUE

GRUPE CREDIT COOPERATIF

C'est le métier qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

www.btp-banque.fr

SEMAINE DE LA CONSTRUCTION EN 2021

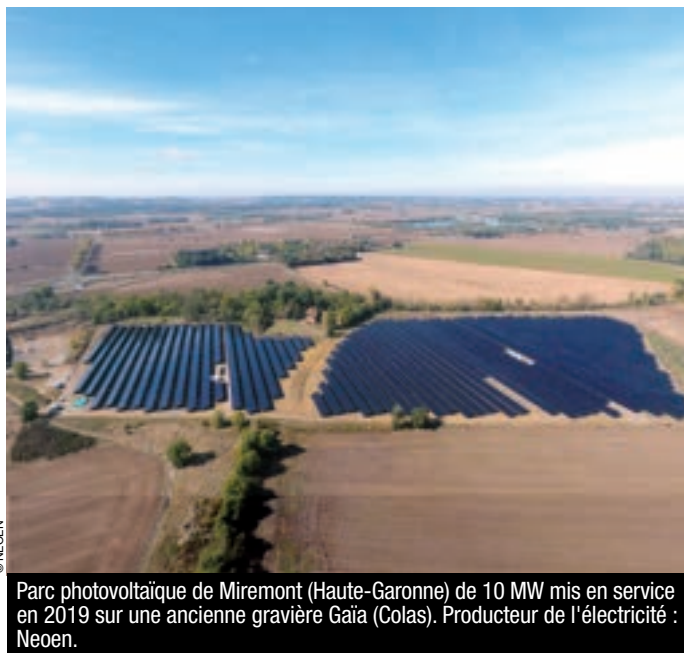
Bim World, qui a été repoussé de juillet au 7-8 octobre 2020, aura aussi lieu en 2021 les 21 et 22 avril, avec Solutions bas carbone, Porte de Versailles, dans la même semaine qu'Intermat et World Concrete, 19 au 24 avril 2021, à Paris Nord-Villepinte.

Les organisateurs de l'ensemble baptisé Paris Construction Week, pensent accueillir 1450 exposants et 175 000 visiteurs sur Intermat/World of Concrete, et 350 exposants et 15 000 visiteurs sur Bim World/Solutions bas carbone. Les lauréats du concours des innovations organisé sous la présidence de la Fédération nationale des travaux publics seront connus le 19 avril. Date limite de dépôt des dossiers : 16 octobre 2020.



Intermat, salon des matériels, équipements, techniques et matériaux, du 19 au 24 avril 2021.

ÉNERGIES RENOUVELABLES : BAISSÉ EN 2020



Parc photovoltaïque de Miremont (Haute-Garonne) de 10 MW mis en service en 2019 sur une ancienne gravière Gaïa (Colas). Producteur de l'électricité : Neoen.

« 2020 devait être une année record en nouvelles installations d'énergies renouvelables électriques dans le monde, » regrette l'Agence internationale de l'énergie (AIE) dans un document du 20 mai. L'AIE prévoit en fin d'année un niveau équivalent à celui de 2016 et éventuellement un rattrapage en 2021 pour retrouver le niveau de 2019, la meilleure depuis 2007, selon ses données. Ce recul est dû à plusieurs facteurs. La crise

sanitaire a perturbé les approvisionnements et ralenti les investissements.

Les projets en éolien terrestre et en photovoltaïque, déjà dotés de financement, devraient être effectifs en 2021. Les autres pourraient sortir moins facilement.

Les productions conçues sur le long terme, comme l'hydroélectricité, l'éolien offshore, la géothermie et l'énergie solaire à concentration, devraient moins souffrir de l'épisode Covid-19. Par exemple, la

Chine a deux grands projets hydrauliques programmés pour 2021.

Par ailleurs, la baisse du prix du pétrole n'encourage pas le report sur les renouvelables, en particulier dans les véhicules et en chaleur industrielle.

→ Plan de relance sur 3 ans

Pour éviter que les énergies renouvelables ne passent à la trappe et que les efforts pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) ne soient réduits à néant, l'AIE a concocté avec le Fonds monétaire international un plan de relance durable. Les 30 pays membres de l'Agence et les huit associés en ont discuté au sommet du 9 juillet. Les gouvernements étaient invités à réfléchir à ce qu'ils allaient faire des fonds très importants débloqués en un temps très court, crise oblige.

Selon le document de l'AIE publié le 18 juin, le plan sur trois ans devrait engendrer une croissance économique de 1,1 % par an, sauver ou créer 9 millions d'emplois et réduire les émissions de GES de 4,5 milliards de tonnes en 2023.

→ Rénover les réseaux électriques

« Les investissements dans la rénovation des réseaux électriques, dans une hydroélectricité plus performante, l'extension de la durée de vie des centrales nucléaires, une plus grande efficacité énergétique, l'intégration d'une plus large part d'éolien et de photovoltaïque, prépareront les pays à mieux résister aux catastrophes futures, » assure-t-elle. ■

INNOVATIONS TP À POLLUTEC

Le salon Pollutec décline une journée des innovations sur le thème "Transition écologique et travaux publics" en trois conférences.

Le 2 décembre à 9h30, est programmé "Objectif décarbonation : comment débloquer les obstacles ?"

Le 3 décembre à 9h30, vous pourrez assister à "Transition écologique : bienvenue à TP Valley".

Pollutec se tient à Lyon (Eurexpo), du 1^{er} au 4 décembre.

www.pollutec.com

L'ADEME DEVIENT AGENCE DE TRANSITION ÉCOLOGIQUE

En avril, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) a été rebaptisée Agence de la transition écologique mais elle reste Ademe en raccourci.

→ De l'énergie à l'environnement

« Depuis de nombreuses années, nos missions ont évolué et sont de plus en plus variées, précise Arnaud Leroy, président de l'Ademe dans Ademe magazine de juin. Nous pouvons prendre en compte des thématiques très différentes mais interdépendantes. (...) Qu'il s'agisse d'accompagnement des collectivités territoriales ou de soutien à la recherche et à l'innovation, notre priorité est d'ampli-

fier le déploiement de la transition écologique. »

L'éventail des sujets relevant de l'établissement public industriel et commercial n'a cessé de s'élargir. Au départ, il s'agit surtout d'énergies nouvelles renouvelables, rarement électriques, et d'économies d'énergie. En 1974, naît l'Agence pour les économies d'énergie (AEE).

En 1982, l'Agence française pour la maîtrise de l'énergie (AFME) chapeaute l'AEE, le Commissariat à l'énergie solaire, le Comité géothermie, la Mission nationale pour la valorisation de la chaleur et le service Économie de matières premières du ministère de l'Industrie.

1^{er} virage vers l'environnement avec l'Ademe qui reprend, en 1991, l'AFME, l'Agence nationale pour la récupération et l'élimination des déchets et l'Agence de la qualité de l'air.

→ Plateforme numérique

En juin 2020, la nouvelle Ademe déploie sa plateforme numérique "Agir pour la transition écologique" pour faciliter l'accès aux conseils et aux informations utiles. Elle emploie un millier de salariés et dispose d'un budget de 700 millions d'euros. ■

<https://agirpourtatransition.ademe.fr> ■

CONCOURS ACIER : L'EAU AU CENTRE DES PROJETS



© CAROLINE DESPLAN

© CAROLINE DESPLAN

Vue intérieure et extérieure de la poutre treillis en acier sur l'ancienne décharge de Montpellier, près de la mer, 1^{er} prix ex-æquo du Concours Acier 2020.

L'ancienne décharge du Thôt à Lattès, à 7 km au sud de Montpellier (Hérault), a inspiré le projet que Caroline Desplan de l'École nationale supérieure d'architecture (Ensa) Paris-Belleville a présenté au Concours Acier 2020 et qui lui a valu un 1^{er} prix ex-æquo.

La décharge pourrait connaître une 3^e vie. Créée en 1965 sur un étang asséché, elle a été fermée en 2004. Sa surface est alors imperméabilisée, les lixiviats drainés et le méthane produit par les déchets, brûlé en torchère. Le sous-sol poreux pollue les rivières du Lez et de la Mosson, l'étang de l'Arnel et la mer. Le projet de l'étudiante en architecture, baptisé Machine à paysage, consiste à installer un système de récupération du méthane et une usine osmotique. Les deux produisent de l'électricité, éventuel-

lement pour Lattès. La seconde qui tire l'énergie de la différence de salinité entre rivières et étang salé, filtre les eaux.

Cet ensemble est logé dans une poutre treillis en acier de 240 m perchée sur les cuves d'eau de l'usine osmotique. Le public peut y entrer et ainsi, découvrir le paysage qui s'apparente à la Camargue, voisine.

→ Observatoire sur la Gironde

L'autre 1^{er} prix ex-æquo du Concours Acier 2020 de Construiracier qui avait pour thème "l'architecture face aux mutations climatiques et aux risques naturels", ressemble, lui aussi, à un belvédère, cette fois à Blaye, dans l'estuaire de la Gironde, à 60 km au nord de Bordeaux. Malo Botani et Valentin Lepley-Schulman de l'Ensa Nantes ont imaginé une structure métallique de 700 m en encorbelle-

ment sur une digue existante en béton. Leur Bio River City sert d'observatoire de la biodiversité dans l'estuaire. Il est accessible depuis les remparts de la Citadelle construite par François Ferry, supervisé par Vauban au XVII^e siècle.

→ Port à Chalon-sur-Saône

Le 3^e prix du Concours Acier 2020 nous conduit sur un quai du Port Nord de Chalon-sur-Saône (Saône-et-Loire), menacé par la montée des eaux. Anaïs Ducret et Alice Barthelemy de l'Ensa Paris-La Vilette y établissent le Centre technique de création, recherches et formations en architecture, design et ingénierie conçu au gabarit du pont roulant existant.

L'édifice s'adapte aux besoins des occupants grâce à des portiques en acier sur lesquels des modules autoportants viennent se greffer. ■

FORMATION DIGITALE RENFORCÉE

La Fédération nationale des travaux publics a signé un partenariat de trois ans avec Educlever pour développer une offre de formation par internet spécifique aux TP. Le spécialiste en e-learning réalise avec TP d'Avenir, association créée par la FNTP pour faciliter l'accès aux formations, une plateforme où seront disponibles des outils et des contenus à l'intention des formateurs ainsi que des informations sur les métiers du secteur. Le portail permet d'adapter le parcours de formation à chaque apprenant. Premiers déploiements sur le terrain attendus en septembre.



Les formations par internet s'adaptent à chaque apprenant.

© FRANCK JUERY/IGN

AGENCES DE L'EAU MIEUX DOTÉES

« Un million d'euros d'aides des Agences de l'eau donne lieu à plus de 3 millions d'investissement, » rappellent la Fédération nationale des travaux publics, l'Union des industries et entreprises de l'eau et Les Canalisateurs, en juin. Il faut donc sauver leur capacité à aider. Or, il manque 2 milliards d'euros par an pour investir dans les infrastructures de l'eau. À cela s'ajoutent les surcoûts dus aux mesures de protection et aux réorganisations liées à la présence de la Covid-19. Sans compter que l'État prélève le surplus de recettes des agences au-delà d'un seuil, appelé "plafond mordant". Les trois organisations demandent la suppression du plafond mordant et que les agences de l'eau soient autorisées à emprunter 5 milliards d'euros pour cofinancer des infrastructures.

GRAND
PARIS
EXPRESSMISSIONS DE
COORDINATION

La Société du Grand Paris a décerné deux lots de missions d'ordonnance-ment, pilotage et coordination générale (OPCG) au groupement Kerios formé d'Egis avec Setec Planittec BTP et Ingérop, début mars.

Le groupement est chargé de « coordonner l'ensemble des parties prenantes intervenant à la réalisation des lignes 16 et 17, et 15 Sud » et de donner une « vision d'ensemble depuis les travaux jusqu'aux premiers essais ». Il s'agit de mieux maîtriser les délais en supervisant les infrastructures, le second-œuvre, les systèmes et équipements et les essais de fonctionnement.

Cet ensemble représente 80 km, 31 gares et six phases de mise en service.

MARCHÉ DE
VENTILATION

Eiffage Energie Systèmes a remporté en groupement avec Engie Solutions le marché du système de ventilation, désenfumage et décompression des tunnels de la ligne 16 du Grand Paris Express et d'une partie de la 17.

Le marché se monte à 58 millions d'euros : 31 pour Eiffage et 27 pour Engie.

Sur la ligne 17, est concerné le tronçon entre les gares Le-Bourget-RER et Triangle-de-Gonesse.

Eiffage Energie Systèmes pilote l'opération de fourniture, installation et mise en service. Le respect du planning " très court " (non connu à mi-juillet) fait partie des exigences du contrat.

PURGE D'UNE FALAISE : INSTRUMENTATION
PROVISOIRE D'UNE GALERIE FERROVIAIRE

© SIXENSE SOLDATA

Le dispositif de surveillance du tunnel de la Brèche (Savoie) a été implanté en quatre jours, en février 2019.

« Nous avons eu de gros blocs, de 10 m³, à trajectoire prévisible, mais le plus embêtant a été les petits blocs avec des trajectoires à très grande vitesse. Certains sont allés jusqu'à l'autoroute mais ont été arrêtés par les conteneurs placés à cet effet, » a informé Joëlle Arnaud, chargée de la maintenance des ouvrages d'art dans les Alpes⁽¹⁾ à SNCF Réseau, à propos de la purge d'un coteau entre Saint-Michel-de-Maurienne et Modane (Savoie), lors d'un webinar Indura⁽²⁾.

L'opération pour faire tomber les parties instables d'un compartiment de 15000 m³ s'est terminée en mai. À 1200 m d'alti-

tude, elles menaçaient la voie ferrée de la ligne actuelle Lyon-Turin, la route départementale 1006 et l'autoroute A43. Le 22 décembre 2018, 160 m³ de roches étaient tombés avec des blocs de plus de 1 m³ sur le toit de la galerie ferroviaire (tunnel de la Brèche, 100 m, 1898).

« Lors de la purge, la galerie n'a pas été endommagée, a précisé Joëlle Arnaud. Le système qui la surveillait a été pointu à mettre au point mais facile à utiliser. » La purge a duré dix mois (2019-2020). La conception de l'instrumentation provisoire n'a pris qu'un mois et son implantation, quatre jours.

Grâce à l'instrumentation de la galerie, les trains ont continué de circuler sauf une heure ou deux pendant les tirs de minage.

→ Caméra pilotable à distance

Le dispositif mis en place par Sixense Soldata et enlevé depuis, a suivi la déformation du tunnel par un impact ou une masse. Les déplacements horizontaux étaient mesurés sur 3 axes grâce à 15 auréoles de convergence à 4 cibles, sur la voûte. Quatre géophones contrôlaient les vibrations émises par l'impact d'une masse rocheuse, 24h/24, et par les tirs.

Enfin, une caméra filmait la voie et la couverture de la galerie, à 360°, pilotable à distance.

Tous les intervenants étaient reliés à une plateforme de visualisation.

En déformation, à 30 mm, les trains devaient ralentir à 15-20 km/h afin de stopper si un obstacle était sur la voie. En vibration, l'instruction IN 1226 s'appliquait avec un ouvrage classé sensible, à pathologie déclarée.

→ Signal GSM à traduire

Les alertes arrivaient aux gares de Saint-Michel-de-Maurienne et Modane. Le signal GSM était traduit en action sur les panneaux optiques des postes de signalisation SNCF grâce à un boîtier spécial. Il y a eu une vingtaine de déclenchements d'alarme pour des vibrations mais aucun sur les déformations.

Avant de purger, des protections ont été installées par les cordistes. Les roches étaient retenues, et peuvent encore l'être, par une fosse au pied d'un merlon de 2 m d'épaisseur construit au-dessus du tunnel à partir de matériaux et traverses récupérés sur place. Un matelas de gabions en pneus broyés amortissait les chocs sur le toit de la galerie. Des filets ont été ancrés sur chaque rive du canal d'éboulis.

→ En tirer une méthode

L'opération de 2 millions d'euros s'est tellement bien déroulée, notamment à cause de relations fluides entre le Conseil départemental (CD) de Savoie et les gestionnaires d'infrastructures, que SNCF Réseau veut en tirer une méthode. Le CD hérite de la surveillance du merlon et des écrans de protection. ■

⁽¹⁾ Savoie, Haute-Savoie, Isère, Ain.

⁽²⁾ Apport de l'instrumentation en gestion de crise, 29 mai : <https://vimeo.com/showcase/7046286>.

PAR NUMÉRO : 15€ AU LIEU DE 25€

TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

946

TRAVAUX SOUTERRAINS

947

OUVRAGES D'ART

948

SPÉCIAL GARES ET STATIONS

949

SOLS ET FONDATIONS

950

ÉNERGIE

951

VILLE ET PATRIMOINE

952

INTERNATIONAL

953

TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

954

OUVRAGES D'ART

955

TRAVAUX SOUTERRAINS

956

SPÉCIAL INNOVATION

957

SOLS ET FONDATIONS

958

ÉNERGIE

959

MAINTENANCE DES INFRASTRUCTURES

960

BON DE COMMANDE ■ REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

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

JE COMMANDE LES NUMÉROS SUIVANTS (cochez les cases de votre choix en indiquant le nombre d'exemplaires) :

- | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 946 x | <input type="checkbox"/> 951 x | <input type="checkbox"/> 956 x |
| <input type="checkbox"/> 947 x | <input type="checkbox"/> 952 x | <input type="checkbox"/> 957 x |
| <input type="checkbox"/> 948 x | <input type="checkbox"/> 953 x | <input type="checkbox"/> 958 x |
| <input type="checkbox"/> 949 x | <input type="checkbox"/> 954 x | <input type="checkbox"/> 959 x |
| <input type="checkbox"/> 950 x | <input type="checkbox"/> 955 x | <input type="checkbox"/> 960 x |

Soit un montant total de :
_____ numéros x 15 € = _____ €

(Pour une commande de plus de 20 numéros le prix passe de 15 € à 13 € l'unité)

*Offre valable jusqu'au 31/12/20 et hors frais postaux (exemple pour un numéro : 5,00 € d'envoi France, 10,00 € d'envoi Europe et 12,50 € d'envoi étranger hors Europe). Conformément à la Loi « Informatique et des libertés » du 06/01/78, le droit d'accès et de rectification des données concernant les abonnés peut s'exercer auprès du service abonnements. Ces données peuvent être communiquées à des organismes extérieurs. Si vous ne le souhaitez pas, veuillez cocher cette case

JE VOUS INDIQUE MES COORDONNÉES :

Nom _____ Prénom _____

Entreprise _____ Fonction _____

Adresse _____

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

Tél. : _____ Fax : _____

Email : _____ Merci de ne pas communiquer mon adresse mail

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

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

- Je réglerai à réception de la facture
 Je souhaite recevoir une facture acquittée

Date, signature et cachet de l'entreprise obligatoire

TRAVERSES SUR BARGES

SNCF Réseau transporte par bateau les traverses en béton de la modernisation de la ligne entre Leval, au sud-est du département du Nord, et Hirson, au nord de l'Aisne, le tout à proximité de la frontière belge. Le renouvellement des voies coûte 56 millions d'euros pour une quarantaine de kilomètres. Les sept péniches affrétées pour transporter les 3 800 traverses depuis une usine en Belgique jusqu'à la base travaux régionale de Pont-à-Vendin (Pas-de-Calais), empruntent la Lys puis la Deûle, à raison de 1 150 tonnes par voyage.

EIFFAGE EN BASSE-SAXE

Les matériaux de la réhabilitation d'un tronçon ferroviaire de 10 km, entre Oldenbourg et Rastede en Basse-Saxe au nord-ouest de l'Allemagne, seront transportés par train afin de faciliter leur acheminement à travers une zone urbaine dense. Les travaux ont lieu sans interruption de la circulation des trains, celle-ci étant déviée vers une voie proche. Ils incluent des murs anti-bruit.

La Deutsche Bahn a confié à Eiffage Infra-Bau (groupement) ce dernier lot de la rénovation de la ligne Oldenbourg-Wilhelmshaven, un marché de 151 millions d'euros dont 117 pour Eiffage qui a déjà remporté 4 contrats sur la ligne.

Le chantier du tronçon de 10 km dure cinquante-sept mois. Mise en service : 2024.

ENGIE AUX ÉTATS-UNIS

Engie a cédé 49% de ses participations dans des projets d'énergies renouvelables aux États-Unis d'un total de 2,3 GW de puissance, à Hammon Armstrong, investisseur dans ce domaine. Engie en garde 51% et conserve la gestion des actifs. Ce portefeuille de 2,3 GW comprend 1,8 GW d'énergie électrique éolienne terrestre (9 projets) et 0,5 GW d'électricité photovoltaïque (4).

TOURS DOUBLES DANS LE CIEL PARISIEN



© L'AUTRE IMAGE

Les tours Duo à Paris 13^e à livrer en 2021.

Des tours doubles se préparent en région parisienne. Bateg, filiale de Vinci, construit les premières à être livrées : les tours Duo, à Paris 13^e, au bord du périphérique, côté sud. Livraison prévue au printemps 2021. Locataire : la banque Natixis BCPE.

Ces tours surprennent par leur assemblage en bouquet. Elles s'élèvent à partir d'une base commune à 180 m de haut (39 niveaux) pour la 1^{re} et à 122 m (29 niveaux) pour la 2^{de}.

Le projet est dessiné par Jean Nouvel pour Ivanhoé Cambridge, maître d'ouvrage. Il offre 96 550 m² de surface utile et sera bardé de labels (Well, Leed platine, HQE, Effinergie+, Wired). Il comporte un grand nombre de cloisons vitrées coupe-feu et pare-flamme (Pyrometal).

À La Défense (Hauts-de-Seine), la construction de The link peut commencer maintenant que Groupama, propriétaire du site, a trouvé un locataire, Total. Le bail en état futur d'achèvement de douze ans renouvelable, a été signé en mars avec le groupe pétrolier, ainsi que le contrat de promotion immobilière avec Vinci Construction France.

L'opération The link est constituée de deux tours reliées par des passerelles sur 30 niveaux. Cette configuration donne de l'horizontalité à des immeubles de respectivement 228 m (50 étages) et 165 m (35 étages), œuvre de l'agence d'architecture PCA-Stream.

→ Bâtiment à démolir

Les deux tours reposent, elles aussi, sur un socle commun de trois niveaux entre le boulevard circulaire et le parvis de La Défense. Elles se situent au sud du

réaménagement du boulevard, opération du gestionnaire Paris-La-Défense.

La parcelle sur laquelle elles vont se dresser est celle de l'ancien immeuble Gan Groupama (1985-1986) libéré en 2016 par la compagnie d'assurances. La démolition du bâtiment doit avoir lieu cette année. Les fondations seront réalisées en 2021.

→ Regroupement d'équipes

The link, à réceptionner en 2025, vise le label Haute qualité environnementale, niveau exceptionnel.

Des capteurs solaires photovoltaïques fourniront un quart des besoins en éclairage. Tous les postes de travail bénéficieront de lumière du jour directe.

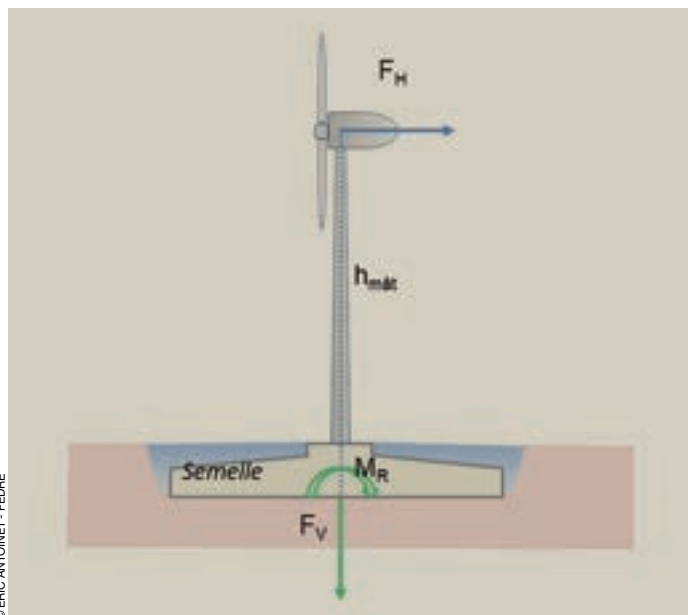
Total regroupe ainsi sur 130 000 m² ses équipes auparavant réparties entre Paris et La Défense. Il va quitter le 24 cours Michelet à La Défense où il occupe deux tours identiques et "collées", pour installer tout le monde au 4-6 de la même voie dans The link. ■



© PCA-STREAM

The link, à réceptionner en 2025 à La Défense (Hauts-de-Seine).

RÉUTILISER LES FONDATIONS DES PREMIÈRES ÉOLIENNES



La semelle empêche que l'éolienne bascule sous la force du vent.

La durée de vie conventionnelle d'une éolienne est d'une vingtaine d'années, selon la norme NF EN 61400. « 76 GW sur les 142 GW éoliens présents en 2015 arriveront en fin de vie entre 2020 et 2030, » a indiqué Éric Antoinet, directeur technique infrastructures France d'Antea Group, lors d'un webinar Indura⁽¹⁾. Les aérogénérateurs terrestres qui peuvent les remplacer aujourd'hui sont plus puissants, à 3 MW/unité ou plus, alors qu'entre 1995 et 2000, ils n'excédaient pas 1 MW⁽²⁾.

Le rééquipement appelé "repowering" peut avoir lieu au même endroit car les emplacements ont été sélectionnés pour la quantité de vent. Toutefois, les fondations d'une "petite" éolienne peuvent-elles résister aux sollicitations d'une machine plus puissante ? C'est la question centrale du projet Fondations d'éoliennes durables avec repowering (Fedre, 2018-2022) qui a pour but, de créer une filière spécifique.

Une éolienne terrestre est empêchée de basculer, façon culbuto, par la masse de sa semelle en béton. Plus elle est grande, plus la base augmente en diamètre et en volume de béton.

L'idée de Fedre est de réutiliser cette semelle en partie et d'en reconstruire une autre par-dessus. La semelle est la fondation la plus courante en éolien terrestre, selon Antea chargé de la géotechnique et de la déconstruction dans le projet.

Optimiser sa taille est un des objectifs du projet dirigé par Laurent Briançon du laboratoire Geomas de l'Insa⁽³⁾ de Lyon, pour la partie scientifique. « Elles sont surdimensionnées en France, nous verrons si les marges de sécurité des recommandations du Comité français de mécanique des sols autorisent de s'en servir telles quelles en repowering, » a précisé Éric Antoinet. Fedre cherche également des fondations qui s'adaptent à deux ou trois générations d'éoliennes.

→ Une éolienne instrumentée

L'observation du transfert de charge du mât à la fondation passe par l'expérience en grandeur réelle. Un aérogénérateur de 3,6 MW (mât de 91 m) tourne depuis juin dans le parc Nordex Acciona à

Ecoust-Saint-Mein (Pas-de-Calais). La semelle en béton ferrillé de 19 m de diamètre repose sur une plateforme de transfert de charge en matériaux granulaires de 80 cm recouverte d'un béton de propreté. L'ensemble est ancré dans la craie à 23 m de profondeur par 64 inclusions rigides de 360 mm de diamètre. Le sol a été instrumentalisé, le long des inclusions et à l'interface avec la plateforme de transfert ainsi que la semelle pour suivre sa déformation.

Un second aérogénérateur devrait être instrumenté en septembre afin d'observer le comportement du béton.

Les maquettes qui répliquent le démonstrateur et préparent la modélisation numérique des relations mât/fondation, seront testées cet automne au laboratoire Geomas.

→ Trouver des solutions

En 2021-2022, les partenaires passeront à l'étape du transfert des résultats sur l'ingénierie pour trouver des solutions de repowering et de construction.

Aux côtés de Geomas et d'Antea⁽⁴⁾, participent Parexlanco (coulis), CTE Wind (conception semelle), Ménard (sol), et trois experts : Philippe Mabilion, Xavier Mach et Bruno Simon.

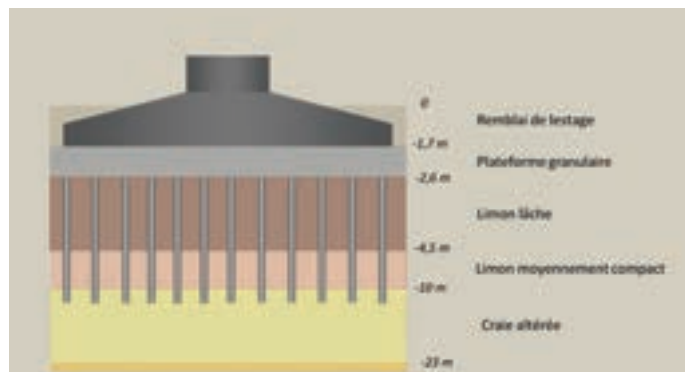
Le projet est labellisé par le pôle de compétitivité Tenerrdis, et soutenu par Indura, la Banque public d'investissement, le Feder et la Communauté d'agglomération Porte de l'Isère (L'Isle-d'Abeau). ■

(1) "Fondations d'éoliennes terrestres, projet FUJ Fedre", 25 juin : <https://vimeo.com/showcase/7046286/video/432529104>.

(2) Les éoliennes en mer sont plus puissantes avec des modèles de 6 à 8 MW voire plus.

(3) Institut national des sciences appliquées de Lyon.

(4) Voir <http://fedre.insa-lyon.eu>.



Fondation du démonstrateur et renforcement du sol par inclusions rigides.

EOLIEN OFFSHORE

FONDATIONS AU LARGE DE FÉCAMP

La ferme éolienne au large de Fécamp (Seine-Maritime) prend forme. Les travaux des fondations des 71 aérogénérateurs devaient commencer en juin et durer jusqu'en 2022. EDF Renouvelables, Enbridge et WPD Offshore ont confié ce marché de 522 millions d'euros à Bouygues Travaux Publics (mandataire) avec Saipem (ingénierie) et Boskalis (assistance aux projets offshore).

Les éoliennes sont implantées à 13-22 km des côtes de Fécamp sur des fonds marins à 25 à 30 m de profondeur. Les fondations gravitaires de 5 000 tonnes/unité sont fabriquées sur un terre-plein du port du Havre (Seine-Maritime) puis transportées par barge à leur destination. Boskalis prend en charge le remblai d'assise, les protections contre l'affouillement et le ballastage des embases. Avec une puissance proche de 500 MW, le parc produira l'équivalent de la consommation électrique de 770 000 personnes.

USINE AU HAVRE

Siemens Gamesa construit une usine d'éoliennes offshore dans le port du Havre (Seine-Maritime).

Les machines sont destinées aux parcs de Fécamp (71 éoliennes, 2023) et de Saint-Brieuc (62 éoliennes, prévision 2023, Côtes-d'Armor).

Le fabricant, installateur et exploitant d'aérogénérateurs y produira des pales de 81 m et y assemblera les nacelles. Il a confié la construction de l'usine de 20 ha au groupement mené par GTM Normandie-Centre avec d'autres filiales de Vinci Construction et Eurovia Haute-Normandie. Ouverture : fin 2021, début 2022.

LE BRGM INVESTIT DANS SOLTRACING

Le BRGM, à travers sa filiale Sageos, a pris 40 % de la société Soltracing à l'occasion de l'augmentation du capital de celle-ci.

Soltracing propose une solution digitale de traçabilité des terres excavées sur toute la chaîne de valeur. Elle permet de vérifier leur acceptabilité lors de leur valorisation et leur conformité à l'échelle d'un chantier.

L'entreprise a été créée en 2015 par Hesus, spécialiste de l'évacuation, de la valorisation et de la fourniture de terres et de déblais, et qui détient 50 % de Soltracing, et par la Confédération flamande de la construction. L'implication du BRGM donne une garantie de gestion indépendante des données de traçabilité.

PLUS DE SOLS ARTIFICIALISÉS ?

L'artificialisation des sols repart-elle à la hausse ?

Après une baisse entre 2011 et 2015, de 32 000 hectares à 22 000 par année, une hausse des surfaces construites est apparue en 2016.

Selon la Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature, la tendance pourrait se confirmer en 2017.

La DGALN publie en 2020 son analyse sur 2009-2016.

La dernière analyse indique que 5 % des communes sont responsables de 39 % de la consommation d'espaces et 20 %, de 82 %. Au total, moins de 7 % de la surface nationale cadastrée est artificialisée à 68 % pour de l'habitat et à 25 %, pour de l'activité.

Chaque année, conformément au plan national biodiversité, un état des lieux des surfaces consommées par la construction est dressé afin d'atteindre à terme le "zéro artificialisation nette". Solutions : accroître le renouvellement de l'existant et densifier.

PLATEFORME D'ÉTUDE DE LA DÉPOLLUTION DE SOLS



Le pilote pluri-métrique de 150 m³ peut reproduire un site existant.

La plateforme Prime de dépollution du BRGM est en cours de tests. Inaugurée en février, elle a dû attendre la sortie de la crise sanitaire pour entrer véritablement en fonctionnement.

Prime sert à identifier et à mesurer les pollutions présentes dans les sols et les eaux souterraines, à prédire leur impact sur l'environnement et à tester des solutions.

Elle regroupe plusieurs dispositifs qui permettent de travailler à différentes échelles et de coupler les expérimentations à de la modélisation numérique. Les phénomènes en jeu sont difficiles à observer dans la réalité.

Des colonnes entre 20 cm et 1 m sont utilisées pour étudier en laboratoire les transformations physiques, biologiques et chimiques des polluants. Des colonnes d'un mètre simulent l'environnement pollué de la surface du sol jusqu'à la nappe souterraine.

→ Les polluants volatiles aussi

Dans le pilote Labbio, sont observées les migrations des polluants du sous-sol jusqu'à une nappe en variant les conditions de surface. Le pilote métrique Tri-nappe analyse les interactions entre les différents niveaux de la nappe.

L'eau peut circuler de haut en bas ou, au contraire, s'élever pour simuler une remontée de nappe.

Le pilote d'essai pluri-métrique reproduit un site ou un sol pollué à une échelle représentative pour mettre au point un outil de diagnostic et un procédé de dépollution. Il sert à valider des modélisations de site. C'est une grande cuve - 4 m par 3,6 m sur plus de 10 m de long, soit 150 m³ - qui peut être couverte d'un capot de façon à contrôler les polluants volatiles.

Des trous sont ménagés dans la hauteur pour y implanter des capteurs ou avoir accès à l'intérieur du volume.

→ Expérimenter différents matériaux

La cuve peut être scindée en plusieurs casiers, jusqu'à quatre, où seront expérimentés différents matériaux.

Prime fait partie du programme Plateformes d'innovation, de valorisation et d'optimisation technologique environnementales (Pivots) de la région Centre-Val-de-Loire, aidé par l'État et le Feder. ■

ENGRANGER LA CONNAISSANCE DU SOUS-SOL D'ÎLE-DE-FRANCE

Le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et la Société du Grand Paris (SGP) ont signé, le 6 mai, une convention de partage de la connaissance du sous-sol sur le tracé du Grand Paris Express.

La SGP a réalisé quelque 6500 sondages de reconnaissance de sol, depuis 2012, de façon à bien choisir les méthodes constructives en souterrain. Ont été renseignés la géologie, les propriétés mécaniques des roches et les niveaux piézométriques des eaux souterraines, autant de données utiles au BRGM pour son référentiel géologique, programme national de meilleure connaissance du sous-sol.

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

Les lecteurs sont invités à vérifier par internet que les événements annoncés dans cette rubrique ont bien lieu et dans quelles conditions (à distance ou en présentiel).

• 16 OCTOBRE

Bim : retours d'expérience

Lieu : Anglet (Pyrénées-Atlantiques)
www.afgc.asso.fr

• 2 ET 3 NOVEMBRE

10^e journées géotechnique et géologie de l'ingénieur

Lieu : Lyon
https://jngg2020.sciencesconf.org

• 5 ET 6 NOVEMBRE

10^e assises Port du futur

Lieu : Paris (FNTP)
www.portdufutur.fr

• 9 ET 11 NOVEMBRE

Analyse du risque en infrastructures

Lieu : Séoul (Corée du Sud)
www.iabse.org

• 10 NOVEMBRE

6^e colloque national photovoltaïque

Lieu : Paris (Unesco)
https://ser-evenements.com

• 19 NOVEMBRE

Nouvelles normes européennes terrassements

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

• 19 ET 20 NOVEMBRE

Stratégies fin de vie des éoliennes

Lieu : Bruxelles
https://windeurope.org/events/

• 24 NOVEMBRE

Ouvrages en béton atteints de réaction sulfatique interne

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

• 24 AU 26 NOVEMBRE

Salon des maires

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

• 1^{er} AU 4 DÉCEMBRE

Windenergy

Lieu : Hambourg (Allemagne)
https://windeurope.org/events/

NOMINATIONS

BTP VOSGES :

Gabriel Ferry a été nommé président de la chambre professionnelle métallerie à la fédération BTP des Vosges. Il succède à Damien Mamet.

CCCA-BTP :

Jean-Christophe Repon cède la présidence du Comité de concertation et de coordination de l'apprentissage du bâtiment et des travaux publics à Éric Routier.

EPAMSA :

Daniela Pennini prend la direction du renouvellement urbain et de la stratégie, nouvelle direction de l'Établissement public d'aménagement du Mantois Seine-Aval.

NICE ECOVALLÉE :

Sarah Bellier devient directrice générale de l'Établissement public d'aménagement Nice Écovallée à la suite d'Olivier Sassi.

PAREX FRANCE :

Pascal Malafosse, directeur de Sika France, a été nommé au même poste à Parex France (mortiers industriels), société dont l'acquisition a été finalisée en 2019 par Sika. Il remplace Guillaume Latil.

SER :

Cédric Le Bousé a été élu président de la commission éolien en mer du Syndicat des énergies renouvelables, à la place de Béatrice Buffon.

SNBPE :

Xavier Barth succède à Jean-Paul Lucas à la présidence du collège Île-de-France du Syndicat national du béton prêt à l'emploi.

WPO GREENTOKEN :

Geneviève Féron-Creuzet est nommée présidente du comité consultatif d'investissement de Greentoken (blockchain dans les énergies renouvelables).



terrasol

setec

L'ingénierie géotechnique à forte valeur ajoutée
www.terrasol.com



INGÉNIERIE
FORMATIONS
LOGICIELS

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

Terrasol est un leader reconnu dans le domaine de l'ingénierie géotechnique, en France comme à l'étranger.

Parmi nos références récentes en France : Grand Paris Express, Eole, Projet Lyon Part-Dieu, Liaison ferroviaire Lyon-Turin, Quai oblique à Brest, Projet Cigéo à Bure, Tunnel des Cliets, Bassin Austerlitz, Kourou Ariane 6...

Et à l'international : Ligne à Grande Vitesse HS2 (UK), Réservoirs Al-Zour (Koweït), 4^{ème} pont d'Abidjan (Côte d'Ivoire), EPR Hinkley Point et Sizewell (UK), Usine de valorisation des déchets de Sharjah (EAU), Tour Mohamed VI (Maroc), Pénétrante de Tizi Ouzou (Algérie), Projet Moanda (Gabon), TER de Dakar (Sénégal)...

 Paris Tél : +33 (0)1 82 51 52 00 Fax : +33 (0)1 82 51 52 99 Email : terrasol@setec.com	Lyon Tél : +33 (0)4 27 85 49 35 Fax : +33 (0)4 27 85 49 36 Email : terrasol@setec.com	Maroc Tél : +212 (561) 25 53 89 Fax : +212 (520) 03 64 00 Email : tarik.elmalki@setec.com	Tunisie Tél : +278 71 23 63 14 Fax : +256 71 75 32 88 Email : info@terrasol.com.tn
--	--	--	---

FREYSSINET

UNE DÉMARCHE VISIONNAIRE, TOUJOURS D'ACTUALITÉ

Une société dont le succès est basé sur la technologie ne peut survivre sans innover en permanence. Cette innovation ne va pas sans prendre en compte l'optimisation des ressources, imposée par la pénurie de matières premières. Deux principes clés de l'histoire de Freyssinet qui est aussi celle de la précontrainte et de son inventeur : Eugène Freyssinet. Ces valeurs sont toujours présentes au sein de l'entreprise. On peut même dire qu'elles l'inspirent, tant en France qu'à l'international, thème de ce numéro, autour duquel est centré cet entretien. Une rencontre qui met en lumière la démarche visionnaire de Freyssinet, ainsi qu'en témoignent les propos de Patrick Nagle, directeur général de Freyssinet.

Entretien avec Patrick Nagle, directeur général de Freyssinet. PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1

Freyssinet a fêté il y a deux ans ses 75 ans.

Quelles réflexions cet événement vous a-t-il inspirées ?

Lorsque nous avons fêté en 2018 les 75 ans de Freyssinet, j'ai eu l'occasion de revenir un peu plus profondément sur la vie d'Eugène Freyssinet et j'ai été impressionné par le génie de cet homme tant sur le plan technique que sur celui de sa vision de l'avenir.

Après avoir déposé un brevet sur la précontrainte en 1928, un deuxième sur les vérins plats en 1938 et enfin le troisième sur l'ancrage par cône en 1938, il crée avec Edmé Campenon en 1943 la Société Technique pour l'Utilisation de la Précontrainte (STUP) qui a pour mission d'exploiter et de déve-

lopper les procédés Freyssinet. Dès l'origine, elle est pourvue d'un bureau d'études rassemblant des ingénieurs considérés comme des sommités sur le plan technique mais aussi d'un service commercial exigeant et dynamique afin d'engager une action efficace de promotion et de publicité en faveur du béton précontraint, diffusant de nombreux prospectus techniques et prenant part systématiquement aux expositions et congrès organisés par le ministère de la Production industrielle.

Autour d'Eugène Freyssinet puis d'Yves Guyon et de Jean Etève qui l'ont rejoint dès la création de la société, s'est constituée une remarquable équipe d'ingénieurs. Ils entreprennent la construction du pont de Luzancy,

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 & 3 © FREYSSINET



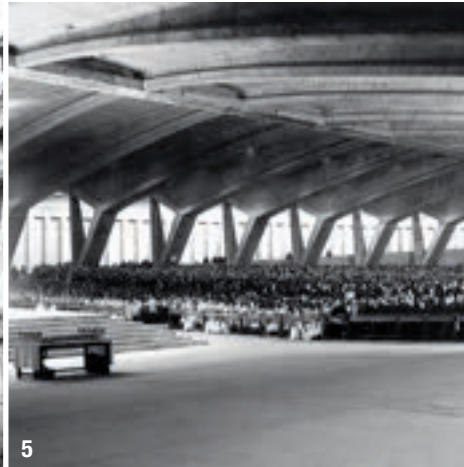
2



3



4 © FREYSSINET



5 © FREYSSINET



6 © FREYSSINET

1- Patrick Nagle, directeur général de Freyssinet.

2- Le pont de Normandie, d'une portée de 856 m (1995).

3- La couverture du Millenium Stadium de Cardiff, au Pays de Galles.

4- Le pont de Luzancy, sur la Marne, d'une portée de 55 m (1946).

5- La basilique souterraine Saint-Pie X à Lourdes (1956).

6- La plateforme Ekofisk en mer du Nord (1972), première plateforme en béton précontraint.

7- Le pont-route d'Hammersmith, axe routier majeur à Londres.

8- La plateforme offshore de Dong Siri, en mer du Nord.

en Seine-et-Marne, d'une portée de 55 m, interrompue par la guerre puis reprise après dès 1946. Ce sera le premier pont en béton précontraint conçu selon le principe de la poutre-portique avec un arc très fin et surbaissé, d'une épaisseur de seulement 1,20 m, cons-

titué uniquement d'éléments préfabriqués. Suivront jusqu'en 1950 cinq autres grands ponts sur la Marne, dont l'un de 75 m de portée.

Jusqu'à cette période, le béton était un matériau un peu brut. Eugène Freyssinet comprend qu'il faut en améliorer

la technologie et en faire un matériau noble, travaillé dans le détail. Il comprend qu'il faut s'assurer que le matériau auquel on ajoute la force de la précontrainte doit être parfait.

Cet homme "de détail", simple, tenace, carré, est aussi un homme de passion. Pour lui, l'architecture ne prend d'intérêt que si elle aboutit à l'élégance de la structure.

Un bon exemple de cette volonté est la basilique Saint-Pie X de Lourdes construite en 1956. Afin de réaliser un ouvrage qui n'entrave pas la perspective sur la basilique historique Notre-Dame-du-Rosaire construite entre 1883 et 1889, Eugène Freyssinet imagine une nef souterraine en béton précontraint de 200 m de long dont les poutres ont une portée de 60 m, capable d'accueillir 25 000 fidèles. Tout le génie de Freyssinet est présent dans l'élégance et la finesse de cette structure qui exprime la force de la précontrainte avec un béton d'une qualité exceptionnelle : le plan de maintenance réalisé en 2007 n'a nécessité quasiment aucune intervention sur le béton. ▷

PATRICK NAGLE : PARCOURS

Patrick Nagle est diplômé de l'Imperial College de Londres (1983).

Après six années passées chez Laing, en Angleterre, il entre chez Freyssinet en 1989. Basé d'abord à Hong Kong, il supervise de nombreux projets et notamment celui du nouvel aéroport.

En 1995, il devient directeur opérationnel du Département des Grands Projets, en charge notamment des ponts à haubans de Ting Kau à Hong Kong et d'Øresund en Suède/Danemark et de la construction du pont de Bubiyan au Koweït.

Directeur général de Freyssinet UK en 2001, Patrick Nagle y développe notamment l'activité réparation.

En 2004, il devient directeur du pôle géographique comprenant le Royaume-Uni, le Benelux, l'Afrique du Sud et le Moyen-Orient.

Patrick Nagle est nommé directeur général adjoint de Freyssinet en 2015 puis directeur général en juin 2016.

© FREYSSINET



7

© FREYSSINET



8

Comment la société a-t-elle évolué après la guerre ?

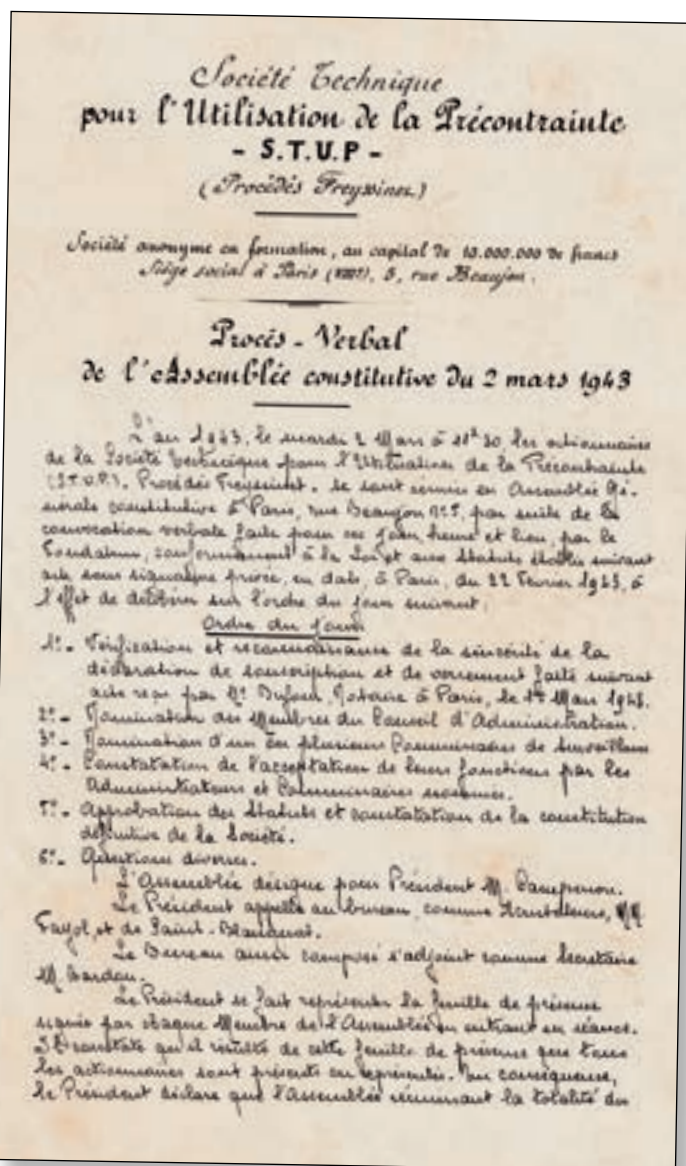
Eugène Freyssinet est également un homme pragmatique. Au lendemain de la guerre, il comprend bien que l'ampleur de la reconstruction n'aura d'autre solution aussi bien technique qu'économique que de recourir aux procédés nouveaux dont la précontrainte fait évidemment partie.

Pour moi, la précontrainte constitue l'une des innovations majeures du siècle dernier dans le monde de la construction.

Après la guerre, la concurrence entre les entreprises s'avive, notamment dans la construction des ponts, et après la disparition du monopole des brevets dans les années 60, la STUP doit innover aussi bien techniquement que financièrement pour survivre.

Elle tire avantage d'un intense effort de recherche et développement marqué par une politique active de dépôts de brevets dont quelques-uns sont fondamentaux : appuis en néoprène mis au point par Eugène Freyssinet en 1957, procédé et dispositif de mise en tension d'ancrage d'armatures en 1967, hauban Freyssinet en 1974. En 1981, le nombre de brevets déposés au nom de la STUP puis de Freyssinet atteint un total de 230⁽¹⁾.

À partir de 1972, la société diversifie beaucoup son activité et sort plus fréquemment de son rôle de conseil et d'assistant technique pour s'engager dans celui de sous-traitant tout en s'adaptant à la multiplication des très grands chantiers, en formant ses propres équipes et en fabriquant son propre matériel de mise en œuvre. La plateforme offshore Ekofisk en mer du Nord en 1972 en est l'illustration : c'est la première plateforme pétrolière réalisée en béton précontraint et



9 © FREYSSINET

la première conçue par Freyssinet en précontrainte.

À partir de 1980, Freyssinet entame une autre phase de son évolution avec l'entrée dans le programme nucléaire - 30 enceintes à construire en France, parmi lesquelles Tricastin, Gravelines, Dampierre auxquelles participe Freyssinet - mais aussi en Angleterre et en Chine.

La technologie de précontrainte y atteint alors des niveaux de qualité et de technicité encore supérieurs.

Les années 80 voient également l'apparition des grands ponts à haubans et des grands ouvrages en béton précontraint faisant appel à une technologie encore nouvelle de mise en œuvre et de fonctionnement des câbles de précontrainte ou des haubans : pont de Brotonne

(1977), vélodrome du stade olympique de Montréal (1976), pont Tancredo Tenes sur le fleuve Iguazu reliant le Brésil et l'Argentine (1985), réservoirs de gaz pétrolier de Das Island à Abou Dhabi (1983), ouvrages pour lesquels Freyssinet assure l'ensemble de la conception, de la fabrication et la mise en place de la précontrainte. Quant à la grande arche de La Défense, à Paris-La Défense, ses 300 000 t reposent sur des appareils d'appui Freyssinet.

La réalisation du pont de Normandie en 1995, d'une longueur de 1 996 m, avec une portée de 856 m, marque une nouvelle étape. Premier des grands ponts à haubans construits dans le monde, il est équipé de haubans Freyssinet. Cet ouvrage consacre la compétence et la volonté continue d'innovation des ingénieurs français, au nombre desquels Michel Virlogeux. Le pont de Normandie présente par ailleurs la particularité d'intégrer la notion de maintenance des haubans et donc de durabilité, avec des câbles d'une toute nouvelle conception développée par le bureau d'études de Freyssinet.

À noter que cette réalisation s'accompagne de celle du pont Vasco de Gama sur le Tage au Portugal et du pont de Ting Kau à Hong Kong (1996) et précède celle du pont du détroit d'Øresund reliant Malmö, en Suède, à Copenhague, au Danemark (2000).

Précisément, comment Freyssinet aborde-t-elle les années 2000 ?

Les années 2000 verront un nouvel élargissement de compétences de l'entreprise dans des domaines extérieurs à celui des ouvrages d'art, du nucléaire et du domaine portuaire : le bâtiment au sens très large du terme, toujours en liaison avec les structures,



© FREYSSINET



© CYRIL DUPONT

dans lequel les haubans trouvent de nouvelles applications.

La couverture du Millenium Stadium construit à Cardiff (Pays-de-Galles), à l'occasion de la coupe du monde de rugby, est ainsi supportée par quatre mâts de 80 m de haut par l'intermédiaire de 18 haubans dont les plus longs atteignent 60 m.

Freyssinet diversifie l'usage de la précontrainte pour les dalles des bâtiments, permettant ainsi de réduire l'épaisseur des dalles et le poids du bâtiment tout en augmentant la surface exploitable. La précontrainte réduit ainsi l'empreinte environnementale du béton. Le développement de l'activité réparation se poursuit avec la création du label Foreva® sous lequel est regroupé l'ensemble de l'offre : renforcement du CNIT à Paris-La Défense, réparation du barrage de Pannecière, réhabilitation

9- Certificat de création de la STUP en 1943.

10- Le procédé Eolift® pour la construction d'éoliennes de grande hauteur (2015).

11- Le pont Lian Tang LT3 à Hong Kong.

12- Ouvrage d'accès au futur "Pont Canakkale 1915" au-dessus du détroit des Dardanelles, qui aura une travée centrale de 2023 m.

13- Le viaduc de Thu Thiêm 2 à Hô Chi Minh Ville, au Vitenam.

du pont de la Recouvrance, en France, réparation de la tour MLC à Sydney, en Australie, rénovation du pont-route d'Hammersmith à Londres.

Remplacer l'ensemble de la précontrainte d'un pont de 630 m sans interruption de circulation : c'est le défi qui a été relevé par les équipes de Freyssinet à Londres, pour le pont-

route d'Hammersmith, un axe routier majeur. Construit en 1961, l'ouvrage souffrait d'une corrosion importante de ses armatures de précontrainte. Deux phases de travaux ont permis de supplanter la précontrainte d'origine. Plusieurs innovations développées par Freyssinet ont contribué à la réussite du projet. Parmi celles-ci, l'utilisation

de bossages en BFUP portant un système de précontrainte sur mesure a été majeure. L'installation des pièces par une machine inventée pour le chantier a permis d'assurer la rapidité des opérations.

L'expansion de la société se poursuit avec l'élargissement du réseau international qui lui permet d'accéder à des marchés différents ou plus lointains : ponts de Golden Horn et de Russky Island en Russie - record du monde de portée haubanée à l'époque avec 1104 m - stade de Volgograd en Russie, ponts de My Thuan au Vietnam, de Charilaos Trikoupis en Grèce, précontrainte de l'EPR d'Olkiluoto en Finlande, toiture câblée du stade nautique de Mukherjee à New Delhi, en Inde, passerelles en BFUP du MuCEM de Marseille, réparation de la plateforme offshore de Dong Siri en mer du Nord, protection au feu du pont d'Anzac en Australie... L'une des références les plus récentes en matière de grands ouvrages est le pont Yavuz Sultân Selim, un nouveau record pour les haubans Freyssinet après le pont de Russky en Russie. Avec une portée de 1408 m, le troisième pont sur le Bosphore détient depuis 2016 le record du monde de la catégorie.

Depuis 2015, Freyssinet s'est lancé dans la construction de tours éoliennes en béton de grande hauteur avec le procédé Eolift® qui permet d'augmenter la hauteur des tours tout en s'affranchissant des contraintes de dimensionnement et de l'utilisation de grues de forte capacité. Eolift® permet de mettre en place par levées successives des éléments préfabriqués en béton précontraint construits au sol. Le procédé est mis en œuvre au Brésil en 2016 sur le chantier de Trairi sur des éoliennes de 120 m de hauteur. ▷

FREYSSINET : DATES ET TECHNIQUES-CLÉS EN BREF

1928 - LA PRÉCONTRAÎTE

Travaillant sur les plans de la halle Freyssinet, gare de fret aujourd'hui réhabilitée, Eugène Freyssinet dépose le brevet intitulé " Procédé de fabrication de pièces en béton ". Il créera le mot " précontrainte " en 1932.

1938 - LE VÉRIN PLAT

Conçu par Eugène Freyssinet lors de la construction du barrage des Beni Bahdel en Algérie.

1938 - L'ANCRAGE PAR CÔNE

1957 - LES APPUIS EN NÉOPRÈNE

1967 - PROCÉDÉ ET DISPOSITIF DE MISE EN TENSION D'ANCRAGE D'ARMATURES

1974 - SYSTÈME DE HAUBANS

1989 - PRINCIPE DE L'ISOTENSION®

Système breveté de mise en tension de haubans permettant d'assurer une force égale entre les brins de torons individuellement protégés.

1995 - LE TISSU DE FIBRES DE CARBONE (TFC)

Pour le renforcement des structures, il remplace la technique des plats métalliques collés.

2005 - COLLIER DE SUSPENSION AVEC COHESTRAND®

Le câble constitué de torons Cohestrand® protège efficacement l'acier contre la corrosion.

2015 - EOLIFT®

Le procédé Eolift® est utilisé pour ériger des tours éoliennes en béton de grande hauteur. Il permet de s'affranchir des contraintes de dimensionnement et de l'utilisation de grues de forte capacité.

© FREYSSINET

12



© FREYSSINET

13





14

© FREYSSINET - FREYSAS

Si Eugène Freyssinet fut un ingénieur de génie, il reste également dans les mémoires comme un chef d'entreprise. Comment lui-même et ses successeurs ont-ils organisé l'évolution et la pérennité de Freyssinet ?

Eugène Freyssinet réussit à combiner l'innovation et une approche entrepreneuriale pragmatique, d'abord dans le monde austère et difficile de l'après-guerre mais aussi bien après.

Freyssinet est implantée aujourd'hui dans 60 pays dans le monde et dispose de 70 filiales.

Elle fonctionne selon le principe de la décentralisation : la société ne se contente pas d'exporter ses techniques mais d'être, partout où elle intervient, une entreprise à part entière au travers de ses équipes et de ses matériels, aussi bien au niveau de la conception des projets que de leur réalisation, voire de leur maintenance. Le package que Freyssinet propose à ses clients est un service de A à Z.

Outre la France, Freyssinet est organisée à l'international en 7 zones géographiques couvrant les 5 continents, auxquelles s'ajoute une entité spécialisée "grands projets".

L'innovation ne vient pas forcément du staff technique du siège à Rueil Mal-

maison, elle est également suscitée par les implantations hors de France, partout dans le monde, ce qui contribue à constituer un réseau d'innovations très riche. Les hommes et les femmes sont la clé du système. Ils ont la liberté, dans le pays où ils se trouvent, de construire leur modèle, dans le respect, évidemment, des règles de base du siège. Une filiale comme celle du Mexique, par exemple, étudie, fabrique et met en place chaque année un très grand nombre de tabliers d'ouvrages en voussoirs préfabriqués précontraints. C'est également le cas en Thaïlande et à Hong Kong.

Les filiales qui en ont la capacité et les moyens humains développent leur propre expertise pour mener à bien les projets qui leur sont confiés, quelle qu'en soit la taille, du plus petit au plus grand avec, si nécessaire, l'appui du département Grands Projets.

Toutes les implantations dans le monde sont de longue date. Notre volonté est de nous intégrer le plus possible aux pays dans lesquels nous travaillons.

Au-delà de la seule précontrainte, les domaines d'activité de Freyssinet se sont progressivement élargis.

Comment cette démarche a-t-elle été entreprise ?

Dans le cadre de l'élargissement de ses compétences, Freyssinet a fait l'acquisition, au fil des années, de plusieurs sociétés complétant son offre. Un bon exemple est l'acquisition en 2016 de Carpi, spécialiste mondial des géomembranes d'étanchéité pour les barrages et les canaux hydrauliques. Grâce au développement organique et à ces acquisitions, Freyssinet a continué à élargir son domaine de compétence et à investir de nouveaux secteurs d'activité : les infrastructures de l'eau, les ports et les quais, les sites industriels et les ouvrages souterrains sont les segments les plus récents.

Parallèlement, Freyssinet a renforcé sa proximité avec ses clients grâce à des approches de partenariat l'impliquant en amont des projets : proposition de variantes en construction neuve, aide au diagnostic et définition conjointe avec le client de la solution en réparation.

Dans le domaine des ponts, spécialité historique de l'entreprise, Freyssinet propose aujourd'hui à ses clients, en partenariat avec Sixense, société sœur du groupe Soletanche Freyssinet, un service complet comprenant l'inspection, la surveillance, la conception, la maintenance, ainsi que les travaux de réparation.

Quels sont les chantiers-phares de Freyssinet en 2020 ?

En Turquie a débuté l'édification du "Pont Canakkale 1915", un ouvrage suspendu au-dessus du détroit des Dardanelles, qui lie la mer Egée à la mer de Marmara, dans le nord-ouest du pays. Une fois achevé, il sera le plus long pont suspendu au monde : sa travée centrale mesurera 2023 mètres. Ce nombre de 2023 correspond au centième anniversaire de la création de l'État turc.

Il comptera six voies de circulation et sera ouvert au public en 2023. Pour cet ouvrage, Freyssinet réalise la précontrainte des massifs d'ancrages des câbles de suspension ainsi que la construction des quatre tabliers des viaducs d'approche.

Un autre chantier remarquable est le projet de Hinkley Point qui consiste à édifier deux réacteurs nucléaires de type EPR dans le sud-ouest de l'Angleterre. Freyssinet intervient à plusieurs niveaux sur les différents ouvrages en construction, notamment les murs d'enceinte et les dômes des réacteurs. À Melbourne, en Australie, Freyssinet participe à la construction et la précontrainte du tablier du nouveau pont de West Gate, d'une longueur de 4 km, en doublement de celui réalisé en 1978. En Afrique, Freyssinet réalise les travaux

© FREYSSINET

15



© FREYSSINET

16



de réparation du barrage hydroélectrique de Kariba, situé dans les gorges de Kariba du bassin du Zambèze, à la frontière entre la Zambie et le Zimbabwe. Il est l'un des plus grands barrages dans le monde avec une hauteur de 128 m et une longueur de 579 m. À noter qu'il a été conçu en 1958 par l'ingénieur français André Coyne.

À Las Vegas, nous avons réalisé la toiture câblée du nouvel "Allegiant Stadium" de Paradise pour l'équipe des "Raiders" de la Ligue nationale de football (NFL) et l'équipe de football universitaire Rebels de l'Université du Nevada.

Au Vietnam, Freyssinet assure la réalisation du pylône unique de 113 m de haut, du tablier de près de 1 500 m de long avec une travée centrale haubanée de 200 m et des haubans du viaduc de Thu Thiêm 2 à Hô Chi Minh-Ville. C'est le type même d'ouvrage où nous sommes très bien placés pour assurer, à l'exception des fondations dans ce cas précis, une prestation globale car un tel chantier nécessite beaucoup de technologie tant au niveau du pylône que du tablier.

Une conclusion ouverte sur l'avenir ?

Freyssinet est une entreprise solide dont les valeurs sont celles incarnées par ses fondateurs. Au fil des années, elle a su se développer et s'adapter aux défis de son époque.

L'innovation reste vitale au maintien de notre leadership. Nos challenges prioritaires : garder une longueur d'avance sur nos métiers historiques, et nous distinguer sur les métiers plus récents mais stratégiques comme la réparation.

Dans le domaine des haubans, un nouveau palier a été atteint l'an-

DE FREYSSINET À SOLETANCHE FREYSSINET

Freyssinet est l'une des entités de Soletanche Freyssinet, une entreprise du groupe VINCI, née de la fusion en 2009 des entreprises Soletanche Bachy, Freyssinet, Ménard, Nuvia, Sixense et Terre Armée spécialisées dans les activités du sol, des structures et du nucléaire.

Freyssinet emploie 7 600 personnes et a réalisé en 2019 un chiffre d'affaires de 732 millions d'euros se répartissant à 20% en France et 80% à l'international, dont de l'ordre de 12 à 13% pour chacun des 7 pôles géographiques.

née dernière avec la qualification à 2 160 MPa de nos torons et systèmes d'ancrage. Ces câbles ultra haute performance sont mis en œuvre pour la première fois sur le pont de Saemangeum en Corée du Sud. Notre gamme d'amortisseurs s'est également étoffée d'un modèle offrant une capacité unique au monde.

14- Le pont Yavuz Sultan Selim, nouveau record pour les haubans Freyssinet, d'une portée de 1 048 m.

15- Le barrage hydro-électrique de Kariba, dans le bassin du Zambèze.

16- Des pièces à l'architecture complexe en impression 3D du béton.

17- L'usine Freyssinet Products Company de Saint-Eubèze en Saône-et-Loire.

18- La toiture câblée du nouvel "Allegiant Stadium" de Paradise, à Las Vegas.

À noter aussi l'élargissement de notre offre avec la mise sur le marché d'une nouvelle gaine de haubans intégrant des options très attendues par nos clients : système d'éclairage par LED, protection contre l'incendie et les explosions, systèmes de dégivrage. Dans les métiers de la réparation, l'innovation majeure est le développement d'une solution de béton projeté ultra haute performance (BFUP-S). Les premiers chantiers réalisés en 2019 visent à renforcer structurellement les buses métalliques, très présentes sur les réseaux routiers et autoroutiers en Europe. Nous gardons également une longueur d'avance sur la technique des tissus en fibre de carbone (TFC) introduite par Freyssinet en 1995 avec le développement l'année dernière d'un TFC à fort grammage (1 100 g/m²).

Dans un contexte où les codes et la réglementation régissant le monde de la construction sont de plus en plus prégnants, Freyssinet a plus que jamais cette approche créative et cette capacité à innover et à anticiper tant dans le domaine de la construction que dans ceux de la réparation, du renforcement et de la maintenance des structures.

Aujourd'hui, innovation rime avec digitalisation.

En appui de nos efforts de diversification, une plateforme digitale collaborative a été développée afin de capitaliser sur nos savoir-faire dans le domaine de la réparation. Elle a été déployée dans 30 pays l'année dernière et s'est imposée rapidement comme une ressource clef pour nos équipes.

Dans le domaine commercial, Freyssinet a inauguré en juin 2019 à Dubaï, via sa nouvelle filiale Concreative, un nouveau service intégré de conception, production et installation d'éléments architecturaux et structurels en béton imprimé 3D. Cette unité industrialise une technologie brevetée qui consiste à extruder le béton couche après couche, chaque couche étant imprimée par une buse à commande numérique.

Outre l'innovation, la digitalisation et la poursuite de la diversification à l'international, c'est au niveau des hommes et des femmes de l'entreprise que trois qualités me paraissent indispensables à notre développement : la curiosité intellectuelle, un esprit positif ouvert sur l'innovation, la volonté de développer les talents dans nos équipes.

Dans l'alphabet mandarin, une situation de "crise" est représentée par deux symboles : l'un signifie "danger", l'autre "opportunité". Actuellement, nous vivons une crise inédite qui a déstabilisé non seulement l'économie mais aussi les mentalités. Il n'en demeure pas moins qu'elle sera vraisemblablement à l'origine d'une prise de conscience ; en tant que bâtisseurs nous aurons un rôle important à jouer dans le monde de demain, c'est certain. □

1- STUP a changé de raison sociale en janvier 1976 et adopté la dénomination Freyssinet.

© FREYSSINET



© FREYSSINET





1
© MARC MONTAGNON

AFGC ASSOCIATIONS INTERNATIONALES DE GÉNIE CIVIL : UN INVESTISSEMENT PROFITABLE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

FIB, IABSE, RILEM, CHAPITRE ACI DE PARIS⁽¹⁾, AUTANT D'ASSOCIATIONS ET D'ORGANISMES INTERNATIONAUX POUR LA CONSTRUCTION EN GÉNÉRAL ET LE BÉTON EN PARTICULIER, DONT LA CRÉATION REMONTE AU DÉBUT DU 20^e SIÈCLE OU AUX ANNÉES 50, LORSQUE CES TECHNIQUES ONT CONNU UN ESSOR INTERNATIONAL. AUTANT D'ASSOCIATIONS ET D'ORGANISMES DANS LESQUELS LA PRÉSENCE DU GÉNIE CIVIL FRANÇAIS FUT LONGTEMPS TRÈS FORTE, À TELLE ENSEIGNE QUE, JUSQUE DANS LES ANNÉES 70, LE FRANÇAIS Y ÉTAIT AVEC L'ANGLAIS LANGUE OFFICIELLE POUR LES COMMUNICATIONS TECHNIQUES, À L'EXCEPTION BIEN SÛR DE L'ACI. CETTE PRÉSENCE A DÉCLINÉ AUJOURD'HUI, COMME LE SOULIGNENT LES RESPONSABLES DE L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL (AFGC), NOTAMMENT MICHEL MOUSSARD, PRÉSIDENT DU COMITÉ DES AFFAIRES INTERNATIONALES ET VICE-PRÉSIDENT DE CETTE ASSOCIATION. IL PROPOSE, AVEC DE BONNES RAISONS, D'Y REMÉDIER.

Comme le montre ce reportage sur l'AFGC et les 4 associations internationales qu'elle représente en France, la situation est loin d'être désespérée, mais le potentiel que représentent ces associations pour la promotion et le développement du Génie Civil français, dans un contexte

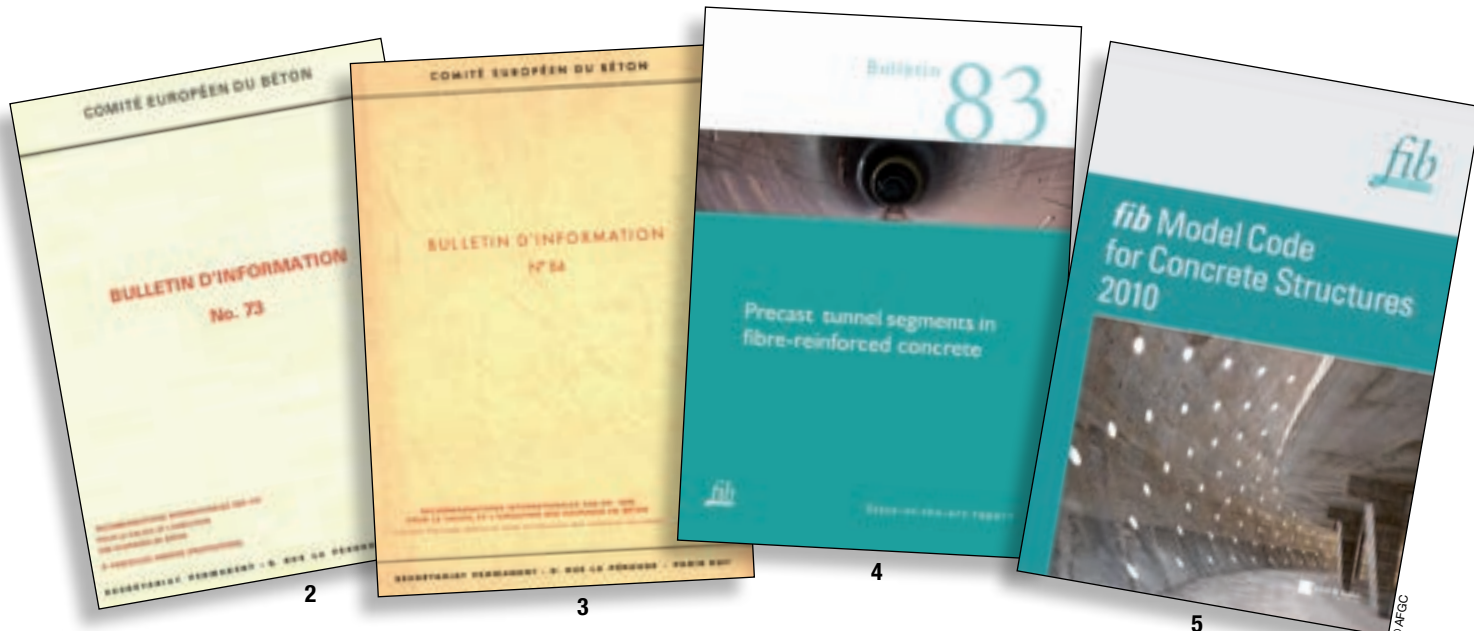
d'internationalisation "intégrale", n'est pas suffisamment exploité.

Avec les dirigeants de l'AFGC, en premier lieu son Président, Bruno Godart, Michel Moussard souhaite attirer l'attention de tous sur cette situation qui appelle une mobilisation de l'ensemble des acteurs du Génie Civil français.

1- La présence du Génie Civil français fut longtemps très forte dans les associations internationales.

AFGC : LE PLUS LARGE FORUM DU GÉNIE CIVIL EN FRANCE

L'Association Française de Génie Civil (AFGC) a été créée en 1998 à la suite de la fusion de l'AFPC (Association Française des Ponts et Charpentes) et de l'AFREM (Association Française pour la Recherche et l'Études des Matériaux).



2 et 3- Bulletins d'information n°73 et n°84 du Comité Européen du Béton : recommandations internationales CEB-FIP pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton.
4- Bulletin 83 de la fib : Precast tunnel segments in fibre-reinforced concrete (State-of-the-art report).

5- fib : Model Code for Concrete Structures 2010.

6- Michel Moussard, président du comité des affaires internationales et vice-président de l'AFGC.

de conférences et de manifestations techniques et scientifiques, et organise des visites de grandes réalisations. Elle met en place des groupes de travail qui accueillent chercheurs, universitaires et ingénieurs pour faire le point de l'état de l'art sur des thèmes importants susceptibles d'intéresser la communauté du Génie Civil et pour explorer des axes d'innovation, en mettant l'accent sur les exigences du développement durable.

Ces groupes contribuent à l'élaboration de documents techniques publiés par l'association, qui bénéficient d'un large consensus au niveau national et sont reconnus au niveau international. Les actions de l'AFGC sont pilotées par des comités, placés eux-mêmes sous l'autorité du Conseil d'Administration et de son bureau : le comité des affaires générales, présidé par Patrick Guiraud, pour la diffusion des connaissances et

l'organisation des congrès et conférences, le comité scientifique et technique, présidé par Emmanuel Ferrier, qui met en place et anime les groupes de travail, le comité des affaires internationales, qui a pour but de coordonner le rôle de l'AFGC auprès des grandes associations internationales. Et ceci s'ajoutent huit délégations régionales qui mènent notamment des visites de chantier significatifs.

L'AFGC regroupe actuellement 1 350 membres à titre individuel et une cinquantaine de sociétés et d'entreprises ainsi que des établissements d'enseignement ou de recherche comme, par exemple, l'Université Gustave Eiffel.

« Elle intègre de plus une commission "jeunes", ce qui est très important car l'un de nos soucis est aussi d'attirer de jeunes membres, en complément des "anciens" expérimentés, afin de faciliter leur intégration à l'AFGC et d'assurer la pérennité de l'association. Nous sommes d'ailleurs en train de créer des prix "jeunes" qui seront décernés chaque année à un jeune chercheur, un jeune praticien de bureau d'études et un jeune étudiant ».

Sa vie est rythmée par une assemblée générale annuelle dont la première partie est consacrée à des conférences et des exposés ainsi qu'à la présentation de l'activité des comités et des délégations régionales, et à l'attribution des prix de l'AFGC et du prix Albert Caquot couronnant en alternance la carrière remarquable d'un ingénieur français et d'un ingénieur étranger.

Ce prix a été attribué cette année à Ian Firth, un ingénieur anglais ayant consacré l'ensemble de sa carrière à la conception de grands ouvrages d'art. Tous les deux ans est organisé en France un congrès - baptisé GC suivi de l'année - qui, en 2023, sera regroupé pour la première fois avec celui de l'AUGC (Association Universitaire de Génie Civil).

Par rapport à d'autres associations ou fédérations, elle présente la particularité de regrouper tous les acteurs du Génie Civil en France. Elle a une ouverture totale à l'ensemble des intervenants du Génie Civil, tant au niveau des études et recherches que des réalisations, deux mondes tournés vers des domaines différents mais complémentaires. L'AFGC est aussi un lien pour les ingénieurs et chercheurs français travaillant à l'étranger, souhaitant suivre les évolutions de la technique française et conserver un contact avec le Génie Civil français.

« Elle a pour objectif de rapprocher le monde des matériaux de celui des structures, indique Michel Moussard, le monde de l'enseignement et de la recherche de celui de la conception et de l'application. Si son intérêt essentiel va vers le Génie Civil, elle ne s'interdit pas non plus d'aller vers le monde du bâtiment sous l'angle des structures, plus que de l'architecture ou du second œuvre ».

L'association offre à ses membres de nombreuses rencontres à l'occasion

© DR



MICHEL MOUSSARD : PARCOURS

Michel Moussard est Ingénieur de l'École Catholique des Arts et Métiers de Lyon (1972), titulaire du certificat de "Professional, Engineer" de l'État de Floride - États-Unis d'Amérique (1982) ainsi que du Centre des Hautes Études de la Construction (CHEC), section Béton Armé et Béton Précontraint (1973).

Il a consacré l'essentiel de sa carrière à la conception et à la réalisation d'ouvrages d'art, successivement au sein de la Société des Autoroutes Rhône-Alpes, d'Europe-Études GECTI, de Jean Muller International et d'Arcadis, occupant successivement des fonctions d'étude, de direction de projet et de direction de département.

Ceci l'a conduit à participer à de nombreux projets internationaux et à passer plusieurs années (1979-1982) en détachement auprès de Figg and Muller Engineers en Floride, dans le cadre de l'introduction aux États-Unis de la technique des voussoirs préfabriqués.



© OSMOS

7



© CREATIVE COMMONS

8



© ICA

9



© MARC MONTAGNON

10

L'AFGC organise aussi des congrès d'associations internationales. En 2018, s'est déroulé avec succès à Nantes, par exemple, le symposium annuel de l'IABSE.

« Autre événement remarquable, précise Michel Moussard : l'organisation par l'AFGC, en collaboration avec l'AUGC du symposium "PhD" bisannuel de la fib qui a été créé pour donner à de jeunes chercheurs l'opportunité de présenter leurs travaux dans un cadre international. À l'opposé de ce qui se passe encore trop souvent en France où le titulaire d'un doctorat, ou PhD (Doctor of Philosophy), est plutôt perçu comme

un intellectuel dont on ne sait pas trop ce que l'on pourra lui confier en entreprise, dans le monde anglo-saxon ce titre est considéré comme le summum de la formation. Dans ces pays, avoir soutenu un PhD est un avantage, y compris dans la vie professionnelle en entreprise. Mais les choses évoluent en France ».

Le "PhD 2020" s'adapte cette année à la situation liée au coronavirus : il se limitera à une conférence en ligne pour les doctorants qui finissent leur thèse cette année. Pour les autres il est reporté à juillet 2021 et se déroulera dans les bâtiments de l'univer-

7- Le Stade de France (prix IABSE en 2002).

8- Le viaduc de Millau (prix IABSE en 2006).

9- Le pont Yavuz Sultan Selim sur le Bosphore (prix IABSE en 2018).

10- Le symposium annuel de l'IABSE s'est tenu en 2019 à New York.

11- " Annual Week " de la RILEM à Nanjing, en Chine, en 2019.

sité Gustave Eiffel à Marne-la-Vallée. L'AFGC s'est ainsi donné pour mission statutaire de coordonner et de promouvoir la présence française dans les grandes associations internationales, qui, comme nous l'avons vu, sont au nombre de quatre ; elle est de ce fait la correspondante en France de l'IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering), de la fib (fédération internationale du béton), de la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux), et de l'ACI (American Concrete Institute) par l'intermédiaire du Chapitre ACI de Paris.



© RILEM

11

Plus que jamais cette dimension internationale est essentielle :

- L'économie du GC et notamment de l'ingénierie associée est internationale ;
- La recherche et les évolutions techniques se font à un niveau international ;
- Les étudiants et ingénieurs pensent et vivent de plus en plus à une échelle internationale ;
- La normalisation, vecteur de leadership technique, est au moins européenne, et on n'y exporte pas le savoir-faire français sans compréhension des savoir-faire des autres.

« Nous avons organisé lors de notre l'assemblée générale de 2019 une table ronde sur le thème de la présence française dans ces associations, qui a été précédée par des présentations de ces quatre grandes associations. L'objectif était de sensibiliser nos membres sur l'intérêt de la présence des ingénieurs génie-civilistes français dans ces associations. »

12- Le Chapitre ACI de Paris : ambassade de la technique " francophone " dans l'univers nord-américain.

13- 3^e Symposium international sur le Béton Fibré Ultra-Haute Performance (UHPFRC 2017) organisé par l'AFGC en partenariat avec l'ACI, la fib et la RILEM : visite du pont de la République à Montpellier.

AU-DELÀ DES FRONTIÈRES DANS LES ASSOCIATIONS : UNE DÉMARCHE PRAGMATIQUE

À l'exception de l'ACI, les grandes associations internationales de Génie Civil sont nées en Europe au siècle dernier, avec à l'origine une présence et une influence très fortes de la France, qui bénéficiait pour cela, entre autres atouts, du statut international de la langue française. Deux de ces associations ont d'ailleurs conservé leurs acronymes français : la fib et la RILEM.

Mais, depuis une cinquantaine d'années, la présence et l'influence de la France dans ces associations ont diminué - à l'exception toutefois de la RILEM - alors que le génie civil français n'a rien perdu de sa créativité et de sa présence sur le marché mondial du génie civil.

« Les associations françaises se trouvent ainsi devant une situation paradoxale et préoccupante, précise Michel Moussard, qui nuit à la visibilité de notre pays dans le domaine scientifique et technique ».

Les responsables de l'AFGC attirent donc l'attention des ingénieurs et des dirigeants des institutions et entreprises sur l'importance des enjeux liés à la présence du Génie Civil français dans les associations internationales.

« Pour l'ensemble de notre profession, indiquent-ils, entreprises, ingénieries, organismes de recherche, du secteur privé ou du secteur public, il est primordial de faire connaître ses travaux et ses réalisations, en les présentant lors de réunions internationales ou en les publiant dans des revues référencées comme " Structural Engineering International " édité par IABSE, " Structural Concrete " édité par la fib, " Materials and Structures " édité par la RILEM, ou les revues de l'ACI, qui sont reconnues au niveau international ».

Les enseignants, chercheurs et ingénieurs engagés dans ces associations ont accès à des réseaux d'experts internationaux et peuvent faire connaître leurs réalisations, confronter leurs idées, participer à des états de l'art qui permettent de défendre la technique et l'excellence françaises, base d'obtention des marchés à l'international ; et pour les ingénieurs juniors, il est particulièrement formateur de participer aux conférences internationales organisées par ces associations et d'établir des liens avec les jeunes ingénieurs d'autres pays, dont certains deviendront un jour des référents dans leurs pays.

Les uns et les autres ne s'en servent pas suffisamment, compte tenu des bénéfices qu'ils peuvent en retirer non seulement à titre personnel, mais aussi pour leurs institutions et entreprises.

« Jusque dans les années 70 le français était largement présent dans ces grandes associations internationales, et cela y facilitait notre présence. Dans les dernières décennies du 20^e siècle ce retrait du français au profit de l'omniprésence de l'anglais a pu constituer un frein à la présence et à l'influence françaises, mais aujourd'hui ce défi linguistique a été relevé et les nouvelles générations d'enseignants, de chercheurs et d'ingénieurs maîtrisent la langue de Shakespeare, comme la plupart de leurs homologues étrangers ».

FIB : BÉTON + PRÉCONTRAÎNTE

La fib (fédération internationale du béton) est née en 1998 de la fusion du CEB (Comité Euro-international du béton) fondé en 1953 et de la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) créée en 1952.

« La fib qui est désormais basée à Lausanne, en Suisse, indique Michel Moussard, a pour vocation de développer et stimuler au niveau international, les études scientifiques et les applications des constructions en béton, de promouvoir leurs performances techniques, économiques, esthétiques et environnementales et de diffuser les résultats des activités de recherche et des expérimentations ».

Elle regroupe environ 1350 membres individuels et membres participants aux commissions et groupes de travail, représentant 60 pays. Elle est composée de groupes nationaux (l'AFGC pour la France), de membres sponsors, de membres associés (ATILH, CERIB, Consolis, CSTB, EDF, Eiffage Construction, Université Gustave Eiffel, Lesage Développement, Systra, Tractebel Engineering pour la France) et de membres individuels. ▽



12

© MARC MONTAGNON



13

© ACI



14a

© LISA RICCIOTTI

Jean-Michel Torrenti est le représentant de la délégation française (qui comprend 4 délégués).

La *fib* comprend 10 commissions techniques qui pilotent plus d'une centaine de groupes de travail chargés de préparer des bulletins qui peuvent être des rapports sur l'état de l'art, des guides, des recommandations et des codes modèles. Elle comprend aussi une commission spécifique chargée de la diffusion de la connaissance.

Lorsque les commissions recouvrent un domaine diversifié, elles sont divisées en sous-groupes spécialisés. Par exemple, la commission 1 (structures) dispose d'un groupe de travail sur les ponts, sur les tunnels, sur les bâtiments, sur les ouvrages maritimes, sur le "sustainable design", sur les dallages béton, sur l'histoire et sur le suivi des travaux, ce qui donne une idée de l'étendue et de la variété des sujets abordés.

« Lorsque la *fib* publie un bulletin, il constitue une référence internationale,

précise Michel Moussard. *Le bulletin n° 83, par exemple, édité en 2017 : "Precast tunnel segments in fibre-reinforced concrete" a été intégré aux spécifications dans le cadre des travaux du Grand Paris Express, dans la mesure où ce type de structure n'est pas encore couvert par les règlements en vigueur* ». La *fib* publie aussi une revue référencée, "Structural Concrete", qui est une des principales tribunes internationales dans son domaine.

Tous les dix ans environ, la *fib* pilote la rédaction d'un nouveau "model code", texte rassemblant les développements internationaux les plus récents sur les règles de conception et de calcul des structures en béton. Les premiers codes-modèles pour les structures en béton publiés sous l'égide, à l'époque, du CEB et de la FIP ont largement contribué à la mise au point des Euro-codes.

Le dernier texte paru est le model code 2010 (téléchargeable depuis le site

14a- Le MuCEM dans la nuit marseillaise (architecte Rudy Ricciotti).

14b- Le MuCEM (Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée), à Marseille, est l'un des premiers ouvrages en béton fibré à ultra-haute performance (BFUP).

15a- Le stade Jean Bouin à Paris (architecte Rudy Ricciotti).

15b- Détail des panneaux préfabriqués en BFUP constituant l'enveloppe du stade Jean Bouin.

de l'AFGC par ses adhérents). Actuellement, la *fib* travaille sur le model code 2020. Les principales nouveautés de ce texte seront l'intégration d'une perspective de cycle de vie et de développement durable, l'importance de la robustesse et de la redondance pour les structures nouvelles et existantes, les nouveaux types de matériaux de construction et de réparation.

Les jeunes ingénieurs ont un groupe spécifique (YMG) qui est représenté pour la France par le groupe de jeunes de l'AFGC.

Michel Virlogeux fut le premier président de la *fib* lors de sa création en 1998. C'est grâce à lui que le nom français a été conservé.

Actuellement deux des commissions sont présidées par des ingénieurs français : Jean-Michel Torrenti de l'Université Gustave Eiffel pour la Commission 4 sur les matériaux et Lionel Linger de Vinci Construction Grands Projets pour la Commission 8 sur la durabilité.

© LAFARGE - LISA RICCIOTTI / RUDY RICCIOTTI ARCHITECTES

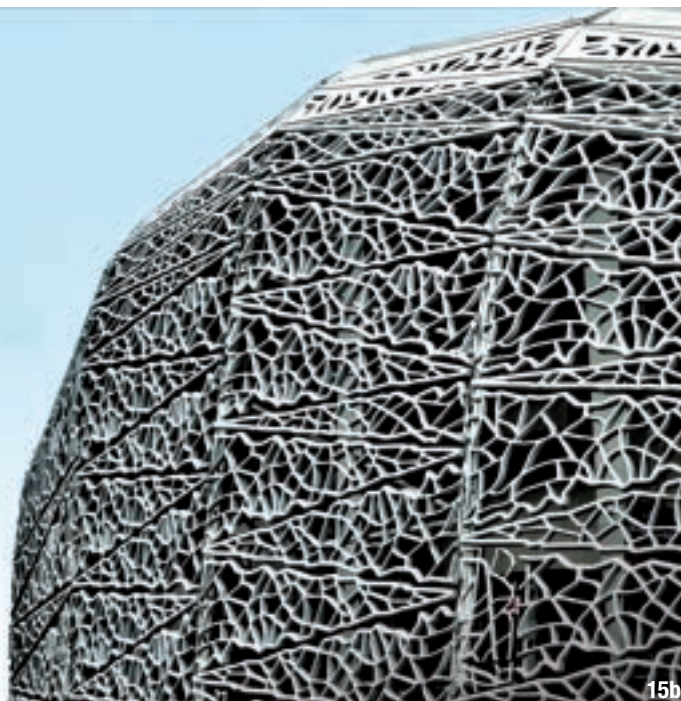


14b

© MARC MONTAGNON



15a



15b

© MARC MONTAGNON



© IDA 16

IABSE : LE GÉNIE DES STRUCTURES À L'INTERNATIONAL

L'IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) est une association scientifique qui regroupe 4000 adhérents dans une centaine de pays et 55 groupes nationaux dans le monde. Les groupes les plus importants sont ceux de Suisse (297), du Royaume Uni (276), d'Allemagne (198) et du Japon (144), le groupe français comportant 43 membres. La mission de cette association basée à Zürich, en Suisse, est de promouvoir dans le monde entier l'échange des connaissances et le développement des techniques du génie des structures, au service de la profession et de la société : tous les aspects de l'ingénierie structurale, tous les types de structures et de matériaux, tous les aspects du processus de construction. L'AFGC y est représentée en particulier par Bruno Godart, représentant du groupe national français, et

16- La gare TGV de Montpellier (architecte Marc Mimram).

17- Le chantier de rénovation des viaducs de Chillon, en Suisse.

par Christian Cremona, ancien président du Comité Technique de l'IABSE et membre de son Comité Exécutif. Elle a été fondée en octobre 1929 par 49 ingénieurs de structure provenant de 14 pays. Son premier président fut Arthur Rohn.

« L'Association poursuit plusieurs objectifs, précise Bruno Godart : promouvoir la collaboration et la compréhension entre toutes les personnes concernées par le génie des structures et les domaines avoisinants tout en renforçant

la prise de conscience et le sens des responsabilités des ingénieurs civils vis-à-vis des besoins de la société. Elle vise aussi à encourager les actions nécessaires à la réalisation de progrès dans le génie des structures et des matériaux ainsi qu'à améliorer et cultiver la collaboration et l'interaction avec les organisations poursuivant de semblables objectifs ».

Comme ses homologues, l'IABSE organise des conférences et des symposiums annuels (Nantes en 2018⁽²⁾, New York en 2019, Christchurch en 2020 - reporté en 2021), publie des bulletins dont les SED (Structural Engineering Documents) et une revue référencée : "Structural Engineering International" (SEI). Elle décerne des prix concernant aussi bien des publications techniques que des constructions. Par exemple, ont été primés, en 2015, le San Francisco-Oakland Bay bridge à New York, en 2016, la Shanghai Tower en Chine, en 2017, le Phoenix Center en Chine, en

2018, le pont Yavuz Sultan Selim Bridge sur le Bosphore en Turquie (conçu par Michel Virlogeux et Jean-François Klein). Le Stade de France fut récompensé par l'IABSE en 2002 et le viaduc de Millau en 2006.

Parmi les articles techniques récompensés, il faut citer en 2016 : "Diagnosis, Assessment and Repair of the Mathilde Bridge Close to Collapse during a Fire" par Bruno F. Godart, Jacques Berthelémy et Jean Pierre Lucas, France, ainsi qu'en 2017 : "Structures made with Pultruded Glass Fibre Reinforced Polymer Tubes", de Lionel du Peloux, Frédéric Tayeb, Olivier Baverel et Jean-François Caron, France.

L'IABSE cherche également à développer la présence des jeunes ingénieurs au sein de l'Association. Outre la remise d'un prix annuel décerné à un jeune ingénieur talentueux, certains groupes nationaux organisent des colloques dédiés aux jeunes ingénieurs (YEC - Young Engineer Colloquium) ; c'est ainsi que les groupes belges, français et hollandais devaient organiser un colloque YEC à Bruxelles en mars 2020 qui a été reporté à une date ultérieure en raison du coronavirus.



© ACI 17a



© ACI 17b

RILEM : LA PLUS FRANÇAISE

La RILEM, Réunion Internationale des Laboratoires et des Experts en Matériaux (devenue "International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures", toujours sous l'acronyme RILEM) est une association technique internationale non-gouvernementale, sans but lucratif, ▷

dont la vocation est de contribuer au progrès des sciences, techniques et industries de la construction, essentiellement par les échanges qu'elle favorise entre recherche et pratique.

Son siège est à Paris et elle fêtera en 2021 ses 75 ans d'existence.

L'activité de la RILEM vise à développer les connaissances sur les propriétés des matériaux et les performances des ouvrages, à définir les modes d'évaluation en laboratoire et en service et à unifier les méthodes de mesure et d'essai utilisées et à promouvoir une construction durable.

« Avec plus de 220 français sur 2100 membres, sa composition en fait l'une des plus française des associations internationales, précise Judith Hardy, secrétaire générale de cette association. Mais également une association véritablement internationale avec 70 nationalités représentées (145 indiens, 142 chinois, 139 allemands, une centaine de belges, d'italiens, d'anglais, et environ 70 japonais et 70 américains pour ne citer que les groupes les plus importants...).

L'association est organisée en 38 comités techniques regroupés dans 6 clusters dont l'un, "Évaluation de la durée de vie et de l'impact sur l'environnement", est coordonné par Alexandra Bertron, de l'INSA de Toulouse. Les Comités Techniques sont au cœur de l'activité scientifique de l'association : ils constituent le principal forum où les membres de la RILEM se rencontrent et échangent leur expertise ; au travers de leurs publications et de leur participation à la revue phare de la RILEM, *Materials and Structures*, ils jouent un rôle majeur dans l'avancement des connaissances scientifiques ».

Parmi les faits marquants de ce début d'année 2020, la RILEM est fière d'annoncer que la revue RTL (RILEM Technical Letters) en Open Access, fondée en 2016, a été ajoutée à la prestigieuse base de données bibliographique Scopus. Une confirmation de sa qualité scientifique et un encouragement pour son comité de rédaction et sa rédactrice en chef Alexandra Bertron, qui succède à Nicolas Roussel son fondateur.

Par ailleurs, la RILEM fait appel cette année à un prestataire externe pour l'animation du réseau dans le but d'augmenter le nombre de membres, en particulier de jeunes chercheurs, de créer de nouveaux partenariats, d'augmenter la visibilité de l'association sur les réseaux sociaux.

Après avoir organisé son "Spring Meeting" à Rovinj, en Croatie, en avril 2019



18

© ACI



19

© MARC MONTAGNON

18- L'église de l'Anastasis à Saint-Jacques-de-La-Lande, en Ile et Vilaine (architecte Alvaro Silva).

19- Le palais d'Iéna, pièce maîtresse du parcours constructif et théorique d'Auguste Perret et siège du Conseil économique, social et environnemental, a fêté en 2019 les 80 ans de son inauguration.

20- Le pont haubané courbe de Térénez, conçu par l'ingénieur Michel Virlogeux et l'architecte Charles Lavigne a reçu en 2014 le prix de la fib du plus bel ouvrage d'art.

(450 participants de 50 pays) et son "Annual Week" à Nanjing, en Chine en août 2019, la RILEM prévoyait de les organiser cette année, respectivement, en mars 2020 à Guimaraes, au Portugal et en août 2020 à Sheffield, au Royaume Uni.

Pour cause de coronavirus, ils se sont transformés l'un et l'autre en colloque partiellement virtuel avec 500 participants "on line" à Guimaraes et totalement virtuel pour l'événement de Sheffield.

Il n'est pas abusif de dire que la RILEM est la plus française des associations

internationales puisque 7 des 36 comités techniques sont présidés par des français tandis que le vice-président actuel - Nicolas Roussel - en sera le président en 2021.

Parmi les "State of Art reports" édités en 2019, se trouvent le rapport du français Pierre Pimienta sur le sujet "Modelling of Concrete Behaviour at High Temperature", ainsi qu'une recommandation du Comité Technique présidé par Denys Breysse : "Recommandation of RILEM TC 249-ISC on non-destructive in situ strength assessment of concrete".

CHAPITRE ACI DE PARIS : AMBASSADE DE LA TECHNIQUE "FRANCOPHONE" DANS L'UNIVERS NORD-AMÉRICAIN

Le Chapitre ACI de Paris (American Concrete Institute) a été créé en 1994, à l'initiative d'Yves Malier, président de l'AFREM (Association Française de Recherches et d'Essais sur les Matériaux et les constructions) et de Roger Lacroix, président de l'AFPC (Association Française des Ponts et Charpentes) pour constituer une "ambassade" dans l'intérêt partagé d'une meilleure connaissance mutuelle entre la pro-



20

© JEAN MARX



© FRANCIS VIGOUROUX

21

fession des constructeurs français et européens francophones et le monde du béton en Amérique du Nord.

Composé de 35 membres permanents, il est présidé actuellement par François Toutlemonde, Ingénieur Général des Ponts, des Eaux et des Forêts et chercheur dans le domaine du béton à l'université Gustave Eiffel. Les journées techniques du chapitre, souvent organisées dans les locaux du Centre des Hautes Études de la Construction (CHEC)⁽³⁾, accueillent entre 80 et 130 participants.

Le Chapitre ACI de Paris s'efforce de favoriser, en Europe francophone :

- Les échanges internationaux dans le domaine du béton ;
- Les réunions techniques, séminaires et conférences ;
- La participation aux travaux de l'ACI des spécialistes européens francophones ;
- La coopération entre l'American Concrete Institute et les associations européennes.

Les manifestations, comme celle de 2019 sur les "pathologies et réparation des ouvrages en béton", sont généralement organisées en coopération avec d'autres associations ou organismes professionnels représentatifs. Elles don-

21- Le pont haubané de 762 mètres sur l'Ohio du projet East End Crossing reliant l'Indiana au Kentucky (Vinci Construction Grands Projets).

22- Le viaduc de Champlain à Montréal (Systra).

23- Quand le génie civil sait se faire discret tout en respectant l'environnement : le barrage sur le Couesnon en amont du Mont Saint Michel.

nent ainsi l'opportunité aux spécialistes des diverses filières de la construction en béton de se rencontrer et d'échanger ainsi que de rencontrer des jeunes ingénieurs et des étudiants.

Modeste en taille, le chapitre ACI de Paris garde pour ambition :

- De stimuler la formation et l'excellence dans le domaine du béton (science, ingénierie, pratique technique et normes) ;

→ De faciliter la diffusion des documents Français d'intérêt général vers le monde du béton aux USA et à l'international (par exemple, co-financement de la traduction en anglais des 3 nouvelles normes BFUP) et de promouvoir la visibilité internationale des travaux et réalisations en Europe francophone ;

→ De cultiver une réactivité et une ouverture aux avancées scientifiques internationales applicables à notre pratique du béton, pour les relayer dans la communauté francophone européenne.

« À ce titre, le Chapitre ACI de Paris relaie chaque année le prix d'excellence de l'American Concrete Institute pour la construction en béton, précise François Toutlemonde, où les projets français récompensés tiennent une excellente place. Ont ainsi été primés (parmi les 12 lauréats annuels) : en 2015 le MuGEM de Marseille et le stade Jean Bouin, en 2016 le mémorial Notre Dame de Lorette, en 2017, la rénovation des viaducs de Chillon en Suisse, en 2018 la gare TGV de Montpellier et la station de tram de Viroflay, en 2019 l'église de l'Anastasis et la rénovation du Palais d'Iéna ». Obtenir un prix de l'ACI est important

pour les architectes, les ingénieurs et les entreprises francophones car les américains ont une grande influence au niveau mondial, même s'ils disposent de leurs propres associations et s'ils cherchent évidemment à promouvoir leurs standards, comme le fait l'Europe avec les Eurocodes.

La conclusion de Michel Moussard est sans équivoque : « Contribuer à la vie de ces associations est certes un investissement, mais il nous apparaît clairement comme un investissement utile et payé de retour, pour les organismes concernés et pour les ingénieurs engagés dans cette démarche, pour lesquels c'est une opportunité d'ouverture et de développement personnel ».

Pour l'ensemble de la profession du Génie Civil, il s'agit de se tenir informé sur l'état de l'art et de se faire connaître à travers des rencontres, des présentations, des publications dans les revues de ces associations, et des distinctions pour des ouvrages remarquables. □

1- **fib** : fédération internationale du béton ; **IABSE** : International Association for Bridges and Structural Engineering ; **RILEM** : Réunion Internationale des Laboratoires et des Experts en Matériaux ; **ACI** : American Concrete Institute.

2- Le symposium de Nantes de l'IABSE a été organisé par l'AFGC.

3- **CHEC** : voir Travaux n°941, avril/mai 2018.



22

© SYSTRA



23

© THOMAS JOUANNEAU



LE FUNICULAIRE D'ENSHI

AUTEURS : CHARLES CAYATTE, CHEF DE PROJET, SYSTRA - ARNAUD LEMAIRE, INGÉNIEUR STRUCTURES MÉTALLIQUES, SYSTRA - JÉRÔME BOLLINET, CHEF DE PROJET ET INGÉNIEUR SYSTÈME, POMA - FRANCK CHANCEREL, PROJETEUR STRUCTURES MÉTALLIQUES, SYSTRA

LE GRAND CANYON À ENSHI FAIT PARTIE DES SITES REMARQUABLES DE CHINE. UN FUNICULAIRE D'UN KILOMÈTRE DE LONGUEUR PORTÉ PAR DES VIADUCS MÉTALLIQUES SUR LA MOITIÉ DE CE LINÉAIRE ET UNE VOIE SUR DALLE SUR L'AUTRE MOITIÉ, VA PROCHAINEMENT ÊTRE INAUGURÉ POUR TRANSPORTER LES VISITEURS. CES OUVRAGES MÉTALLIQUES ONT DES CONCEPTIONS UNIQUES, DICTÉES PAR LES CONTRAINTES FORTES DU SYSTÈME FUNICULAIRE ET LES CONTRAINTES D'ACCESSIBILITÉ, CONSTRUCTIBILITÉ ET TRANSPORT SUR LE SITE.



© POMA
1

Le funiculaire d'Enshi conduira les visiteurs du Tourism Center, où se trouvent hôtels, parking et billetterie, jusqu'aux pieds de la télécabine permettant de rejoindre facilement les nombreux chemins de randonnée à proximité immédiate des stations. Les visiteurs pourront notamment accéder au sommet des falaises et découvrir les spots incontournables du "bâtonnet d'encens" et du "château", des formations de roches calcaires uniques de 500 m de haut.

Le funiculaire d'Enshi est une technologie qui, non seulement, s'adapte parfaitement à la configuration topographique du Grand Canyon d'Enshi mais qui, également, représente un choix de mobilité douce pertinent, répondant au double enjeu de performance et de respect de l'environnement. Le trajet sera désormais direct, rapide et sans

émission carbone. Ce funiculaire contribuera à préserver ce magnifique site très fréquenté, grâce à une alternative écologique au balai continu de bus qui polluent et congestionnent actuellement les routes de ce site naturel.

LE SYSTÈME FUNICULAIRE

Un funiculaire est une remontée mécanique équipée généralement de deux rames de véhicules (figure 1) circulant sur des rails en pente et dont la traction est assurée par un câble. Le poids du train descendant compensant tout ou partie du poids du train montant, l'énergie à fournir par la traction reste ainsi relativement faible.

1- Le matériel roulant.

1- Rolling stock.

Le moteur actionnant le câble est situé dans la station la plus élevée de la ligne. Il permet de fournir la puissance perdue par le frottement des roues sur les rails et dans le système poulie-câble ainsi que celle nécessaire pour vaincre la différence de poids entre les deux trains (figure 2).

Le funiculaire circule sur une voie ferrée unique qui comporte au milieu du parcours un tronçon doublé pour le croisement des véhicules. Cet évitement central fonctionne sans aiguille mobile grâce à la disposition particulière des essieux des véhicules. Ceux-ci sont équipés de roues à gorge (à deux boudins) qui guident le train sur le rail continu côté extérieur de l'évitement, et de roues planes aptes à franchir le "cœur" de l'aiguillage sur le rail côté intérieur de l'évitement. Cette disposition d'essieux est inversée d'un train à

l'autre, permettant de définir, un côté de franchissement différent pour chaque véhicule.

Un contrepoids relié à la poulie de renvoi de la gare aval permet de maintenir la partie aval de la boucle unique de câble en tension.

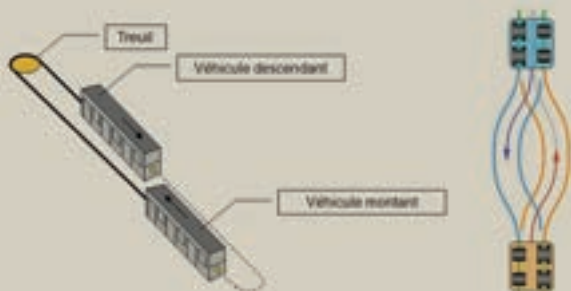
Le câble tracteur est guidé et porté dans une position centrale entre les rails par des galets de ligne disposés à intervalles variables sur la ligne en fonction de sa géométrie. Il est d'usage de limiter les changements de pente au maximum, et d'éviter les profils concaves qui rendent difficile le maintien du câble tracteur.

La motrice fonctionne sur le principe d'un treuil à adhérence du câble tracteur venant de la voie sur le bandage caoutchouc de la poulie motrice. Pour avoir une bonne adhérence, un double enroulement est effectué sur la poulie motrice grâce à un renvoi sur une poulie dite de touage. Une motorisation lente à prise directe permet le mouvement tout en diminuant la maintenance nécessaire et le risque de panne (comparaison à une configuration classique de moteur plus réducteur) (figure 3).

CONTRAINTES DE SITE ET DISTRIBUTION DES OUVRAGES

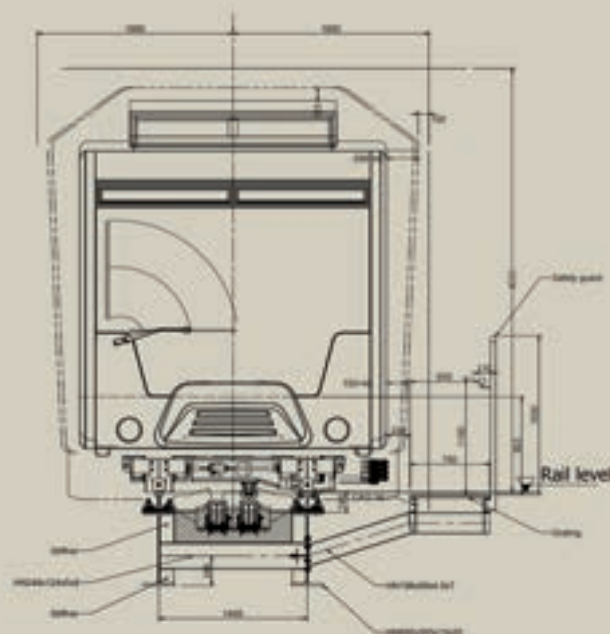
Ainsi, en fonction des contraintes du système citées plus haut et de la topographie du site d'implantation, le tracé du funiculaire a été arrêté sur un profil en long présentant deux zones : une pente constante à 10,5% sur 476 m environ, un rayon de raccordement vertical de 900 m sur 32 m, et une pente constante à 7% sur 496 m environ (figure 5).

LE SYSTÈME FUNICULAIRE



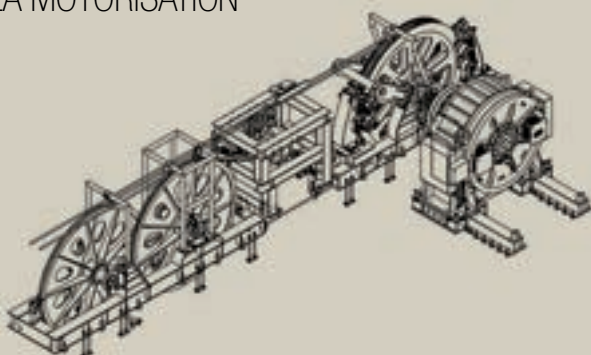
2

COUPE FONCTIONNELLE DU SYSTÈME



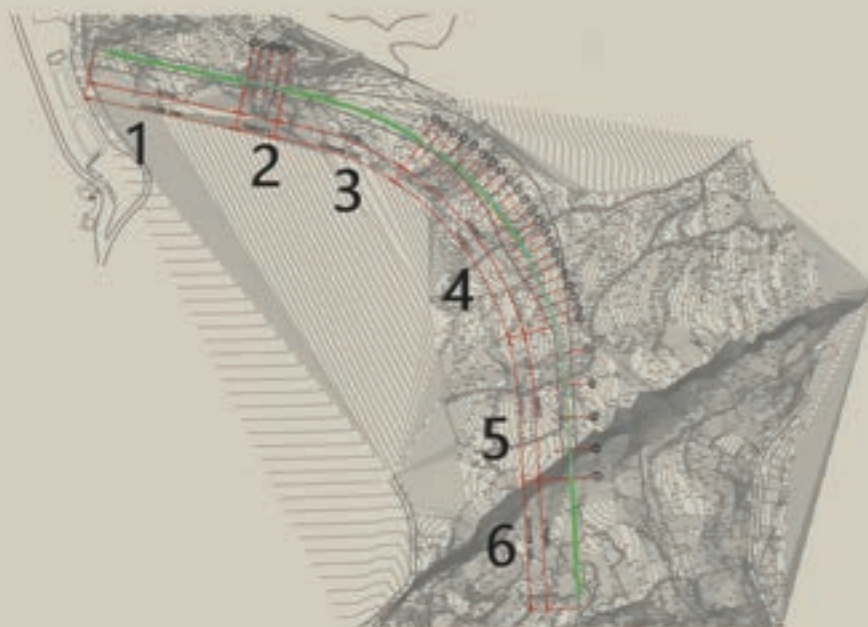
4

LA MOTORISATION



3

VUE EN PLAN DU TRACÉ



5

- 2- Le système funiculaire.
- 3- La motorisation.
- 4- Coupe fonctionnelle du système.
- 5- Vue en plan du tracé.

- 2- The cable railway system.
- 3- The drive system.
- 4- Functional cross section of the system.
- 5- Plan view of alignment.

Se détachent ainsi sur le tracé une succession de 6 zones distinctes :

- 1- Sur les 190 premiers mètres depuis l'extrémité des rails en gare de départ, un profil affleurant le TN ou en faibles déblais nécessitant une voie sur dalle ;
- 2- Sur 48,5 m, une première brèche à franchir nécessitant un ouvrage d'art (viaduc n°1) ;
- 3- Sur 182,3 m, un profil affleurant le TN ou en déblais jusqu'à 11 m de profondeur par rapport au TN nécessitant à nouveau une voie sur dalle ;
- 4- Sur 289 m, une seconde brèche

nécessitant un ouvrage d'art avec des appuis faisant jusqu'à 11,5 m de hauteur pour porter l'évitement (viaduc n°2) ;

- 5- Sur 190 m, la brèche principale du tracé, avec une hauteur du rail par rapport au TN atteignant 28 m de

hauteur pour franchir une falaise (viaduc n°3) ;

- 6- Et enfin sur les 161 derniers mètres, à nouveau un tracé en faibles déblais jusqu'à l'extrémité des rails en gare d'arrivée, nécessitant une dernière zone de voie sur dalle.

CONSTRUCTIBILITÉ, TRANSPORT ET CONTRAINTES DE GALVANISATION

L'accès au site, la maintenance des ouvrages et les moyens techniques du charpentier retenu eurent aussi un impact sur la conception :

- Les ouvrages devaient être galvanisés plutôt que peints (sauf cas exceptionnel sur lequel nous reviendrons), et le bain de galvanisation du charpentier limitait les dimensions des éléments préfabriqués à : largeur 2,5 m x profondeur 3,5 m x longueur 12,5 m.
- Les soudures sur site étaient à proscrire. Il fallait donc pouvoir avoir recours aux assemblages par éclisses et boulons serrés au couple (notamment joints de continuité des membrures du treillis métallique du viaduc n°3, montants des chaises pyramidales, continuité des poutres des viaducs n°1 et 2).
- Les colis à assembler sur site devaient entrer dans le volume 2,5 m x 2 m x 12 m pour être transportables jusqu'à ce site montagneux au cœur de la Chine.
- Le planning de réalisation réduit tendait à limiter au maximum la quantité d'éléments à assembler sur site donc le choix devait se porter autant que possible sur des colis transportables de taille maximale à assembler sur site comme un mécano.
- Bien évidemment, une recherche d'économie de matière était attendue.

Les structures devaient aussi intégrer comme données d'entrées les contraintes d'interface avec le système à câble : encombrement des galets de ligne, gabarit de passage des câbles, fixation des rails, position relative de la passerelle d'évacuation par rapport au



6
© POMA

**6- Viaduct 2 et ses palées de 12 m.
7- Viaducs 2 et 3 en cours de montage.**

**6- Viaduct 2 and its 12-metre bents.
7- Viaducts 2 and 3 undergoing assembly.**

plancher du véhicule et gabarit dynamique des véhicules, tout en gardant une distance de sécurité demandée par le code chinois des funiculaires : GB 19402 (figure 4).

CHOIX DES OUVRAGES

La première brèche à franchir (viaduc n°1) étant relativement courte (49 m),

le choix s'est orienté naturellement vers une solution classique pour les ponts funiculaires : un tablier de type bipoutre métallique. Cette solution présente l'avantage d'être légère, économique (réalisée à partir de profilés du commerce), facile à mettre en place (grue légère) et bien adaptée aux passages des câbles tracteurs du funiculaire.

La seconde brèche, composée des zones 4 et 5 listées ci-dessus, étant beaucoup plus longue à franchir, le choix de concevoir deux ouvrages d'art bien distincts (viaducs n°2 et n°3) a été guidé par la longueur de la zone d'évitement et par la hauteur de la brèche dans sa dernière partie (culminant à environ 28 m au-dessus du sol).

La zone du viaduc n°2 (figure 6 et 7) présentant un profil de TN remontant quasiment jusqu'à niveau du rail à mi-longueur, il a été envisagé un temps de faire une succession de deux ouvrages avec une zone en faibles remblais entre les deux.

Mais les contraintes du système à cet endroit, zone d'évitement (figure 8) où le funiculaire en voie unique se sépare en deux voies pour permettre le croisement des véhicules, a nécessité de faire un viaduc continu de 289 m de longueur en plan. La encore, le choix s'est rapidement orienté vers un ouvrage de type bipoutre, mais des ouvrages spéciaux sont nécessaires en entrée et sortie, comme développé plus loin.

Pour ce qui est du viaduc n°3, de 190 m de longueur le choix a été de faire des travées de relativement grande portée pour un funiculaire pour plusieurs raisons :

- Le besoin de franchir sans appuis intermédiaires la falaise de près de 30 m de hauteur située en bout d'ouvrage. Pour éloigner suffisamment les appuis de cette travée de rive du pied et de la tête de falaise, une travée de 35 m était nécessaire.
- La grande hauteur des appuis (jusqu'à 28 m de hauteur) qui, du fait du risque de flambement, ne permettait pas l'utilisation de palées planes bi-articulées comme sur le reste du tracé et dont il fallait limiter le nombre.
- Et enfin l'insertion au site, cet ouvrage présentant des travées de 40 m de portée s'intégrant indéniablement mieux au site qu'une estacade faite de travées de 12 à 14 m comme il est d'usage de réaliser pour ce type de système.



7
© POMA



8

© POMA

La conception du viaduc n°3 est donc un compromis économique entre hauteur des piles, nombre de fondations, portée et préservation environnementale du site. Pour ce faire, le choix d'un tablier à treillis s'est imposé naturellement (figure 9), cette solution présente les avantages de permettre des portées plus importantes (40 m), d'être léger (900 kg/m environ) et d'offrir une bonne raideur verticale et transversale (conditions de flèche indispensables à la bonne marche du funiculaire).

GÉOTECHNIQUE ET FONDATIONS

La stratigraphie du terrain est constituée comme suit :

→ Une couverture sédimentaire du Quaternaire :

- Sur les 4 premiers mètres de profondeur, une couche d'argile-limoneuse molle ;
- En dessous, sur une épaisseur allant de 1 à 11 m, une couche de gravier moyennement dense, contenant 20% de fines (argile/limon).

→ Enfin en dessous se trouve le substratum rocheux daté du Permien, composé de calcaire sain moyennement altéré et fracturé. Le risque karstique est élevé dans cette formation, mais il n'a pas été identifié lors de la campagne de reconnaissance.

Aucun niveau de nappe n'a été relevé lors des investigations.

Sur la base de cette stratigraphie, des pentes importantes du terrain (longitudinales comme transversales et du

choix des appuis (palées biarticulées élancées présentant des moments importants en pied et des charges verticales limitées), le choix de fondation s'est rapidement orienté vers des semelles sur micropieux inclinés de 250 mm de diamètre de forage sur des profondeurs allant de 6 à 16 m environ selon les ouvrages et la stratigraphie. Sous le viaduc n°1, il a été nécessaire d'imposer un reprofilage du TN le long de l'axe de l'ouvrage pour assurer la stabilité des pentes du terrain autour des appuis de l'ouvrage, et prendre en compte le risque d'un écoulement torrentiel en fond de vallon lors d'épisodes pluvieux exceptionnels pouvant créer des efforts de poussée additionnels sur les appuis.

8- Sortie d'évitement sur le viaduc 2.
9- Viaduc 3 en atelier.

8- Passing-track exit on viaduct 2.
9- Viaduct 3 in workshop.

VOIE SUR DALLE

Pour les trois zones de tracé présentant des remblais limités ou des profils en déblais par rapport au terrain naturel, les conditions de sol imposèrent rapi-

dement le choix d'une voie sur dalle reposant sur une couche de forme d'épaisseur variable se substituant à la couche d'argile limoneuse molle ou à celle de gravier présentes en surface, et devant présenter un module de déformation E_{v2} de 50 MPa minimum. Les ouvrages en terre étant hors de la mission Poma/Systra, cette contrainte de raideur de la couche de forme a été imposée à l'entreprise chinoise Taian réalisant les travaux en terre et les blocs techniques présents derrière les culées. Pour les zones de voie sur dalle situées en déblais suffisamment profonds pour reposer sur le calcaire sain, une simple couche drainante de 20 cm d'épaisseur a été imposée sous la dalle de voie.

Sur la base de cette hypothèse de raideur de la couche de forme portant la dalle, un modèle aux éléments finis de la dalle a été réalisé pour fixer l'épaisseur de dalle sur appuis élastiques nécessaires pour vérifier le critère système de flèche maximale de 1,5 mm entre deux attaches de rail consécutives (figure 10).

Finalement, la géométrie de la voie sur dalle a pris l'apparence d'une dalle de 3,6 m pour 25 cm d'épaisseur, avec deux nervures remontant au droit des rails faisant 30 cm d'épaisseur pour 40 cm de largeur. Un muret filant d'environ 50 cm par 15 cm d'épaisseur permet le remblaiement d'un cheminement d'évacuation filant le long du système au niveau des rails.

Cette dalle est continue sur chaque zone de voie sur dalle. Un joint de



9

© POMA



13 © POMA

À l'instar des voies, la structure doit suivre au plus près la position des rails, c'est pourquoi un caisson mécano-soudé de largeur variable a été conçu afin de s'adapter au mieux à ces contraintes. Il permet de réaliser une parfaite transition structurelle avec le tablier bipoutre. Des ouvertures sont aménagées sur la semelle supérieure du caisson pour permettre le passage des différents galets, la semelle inférieure est ajourée par des trous d'homme circulaires pour faciliter le montage et la maintenance future. Une étude particulière aux éléments finis a permis de montrer le bon comporte-

ment en torsion et en flexion de ces caissons (figures 14 et 15). Ses importantes dimensions d'environ 20 m de long, 2,8 m de large et 0,7 m de haut, avec une masse d'environ 20 t, nécessitent une protection par métallisation et peinture ainsi qu'un transport exceptionnel sur le site.

CALCULS ET DIMENSIONNEMENT

Une étude d'interaction rail-structure a été menée sur l'ensemble du tracé pour limiter le nombre de joints de dilatation de rail. Seuls 2 s'avèrent nécessaires sur l'ensemble du tracé, l'un au niveau de la culée C5 à l'entrée du viaduc n°2

13- Viaduc 3 en treillis spatial.

14- Modèle BIM - Ouvrage Caisson.

15- Ouvrage spécial en caisson du viaduc 2.

13- Viaduct 3 in space lattice.

14- BIM model - Caisson structure.

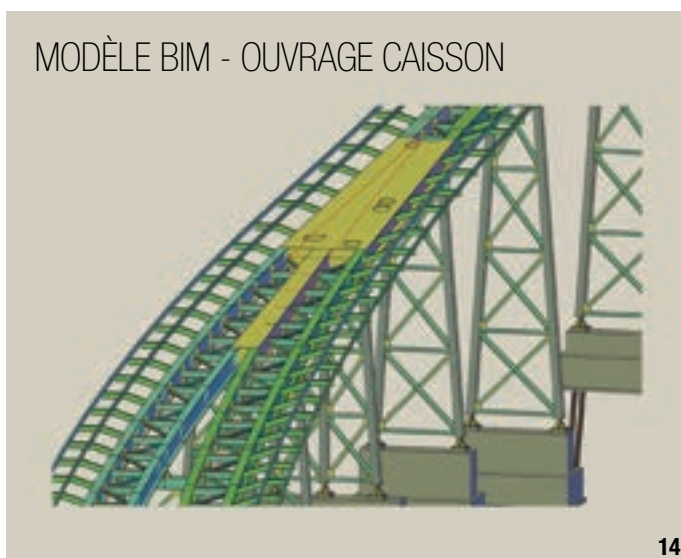
15- Special caisson structure of viaduct 2.

et l'autre au droit de l'appui P26 (palée double), entre les viaduc n°2 et n°3. Aussi, il est à noter qu'un grand nombre d'éléments de charpente du projet est dimensionné par la fatigue, ce qui est courant sur ce genre de système de transport dont les infrastructures sont très légères par rapport aux véhicules circulant dessus.

L'ensemble du projet a été modélisé en 3D/BIM pour éviter tout risque de conflit entre le système et les structures (figures 16 et 17).

Le projet aura été réalisé entièrement en moins de 18 mois. Entre les étapes de génie civil et toutes les phases de

MODÈLE BIM - OUVRAGE CAISSON



14

© POMA/SYSTRA



15

© POMA

MODÈLE BIM - VIADUC 2 ET 3



16

MODÈLE BIM - VIADUC 3



17

CALENDRIER DES TRAVAUX, CARACTÉRISTIQUES DU FUNICULAIRE

DATES CLEFS DU PROJET

- **Date de signature du contrat : août 2018**
- **Début des études : octobre 2018**
- **Début des fabrications matériel : printemps 2019**
- **Fin de la fabrication de véhicules : avril 2020**
- **Fin prévue de réalisation et montage des génies civil béton et structure : juin 2020**
- **Date prévue d'ouverture au public : novembre 2020 (incluant 3 mois d'arrêt du chantier lié au coronavirus)**

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU FUNICULAIRE D'ENSHI

- **Longueur : 1 000 m**
- **Dénivelé : 100 m**
- **Pente maxi : 10,5%**
- **Vitesse : 12 m/s**
- **Débit : 4 100 pphpd (personne par heure et par direction)**
- **Nombre de véhicules : 2**
- **Nombre de passagers /véhicule : 250**
- **Nombre de stations : 2**
- **Motrice en gare amont avec technologie de moteur lent sans réducteur DirectDrive**
- **Tension en gare aval**

16- Modèle BIM - Viaduc 2 et 3.

17- Modèle BIM - Viaduc 3.

16- BIM model - Viaducts 2 and 3.

17- BIM model - Viaduct 3.

conception, fabrication et installation du système. Les équipes projet ont fait face à une importante coactivité dont la bonne gestion a contribué au succès des opérations. Des équipes internationales ont apporté leurs expertises dans un mode de collaboration agile et dans une coordination remarquable, en adéquation avec les enjeux du projet. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

ACIER DE CHARPENTE : 580 t

BÉTON DE FONDATIONS ET VOIES SUR DALLE : 1 190 m³

LINÉAIRE DE MICROPIEUX : 1 910 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

GÉNIE CIVIL BÉTON ET STRUCTURE DE LA LIGNE : études Systra, fabrication locale par Poma et son sous-traitant charpentier Tzme
SYSTÈME DE TRANSPORT FUNICULAIRE : études Poma, fabrication par Poma en partie en France et en partie en Chine
GÉNIE CIVIL DES GARES : Zhihai Architectural Design Co, réalisation Taian
ORGANISMES DE 2nd REGARD : Bureau Véritas et le Strmtg
AUTORITÉ LOCALE CHINE : Safety Center

ABSTRACT

THE ENSHI CABLE RAILWAY

CHARLES CAYATTE, SYSTRA - ARNAUD LEMAIRE, SYSTRA - JÉRÔME BOLLIET, POMA - FRANCK CHANCEREL, SYSTRA

The Enshi cable railway, one kilometre long, is carried by double-girder steel viaducts, caissons and a space lattice over half of its length, and a slab track over the other half. These metallic structures have unique designs, dictated by the major constraints of the cable railway system and the constraints of accessibility, constructibility and transport to the site. For example, most of the supports are bi-articulated steel bents and the structure carrying the passing track consists of double-girder segments with steel-caisson transition structures. The cable railway system and its infrastructure were designed and built in only eighteen months. □

EL FUNICULAR DE ENSHI

CHARLES CAYATTE, SYSTRA - ARNAUD LEMAIRE, SYSTRA - JÉRÔME BOLLIET, POMA - FRANCK CHANCEREL, SYSTRA

El funicular de Enshi, de un kilómetro de longitud, está soportado por viaductos metálicos de doble viga, cajones y celosía especial en la mitad de su recorrido, y por una vía sobre losa en la otra mitad. Estas construcciones metálicas tienen diseños exclusivos, dictados por las fuertes restricciones del sistema funicular y las limitaciones de accesibilidad, constructibilidad y transporte del emplazamiento. Por ejemplo, la mayoría de los apoyos son pilares metálicos biarticulados y la obra que soporta la variante está formada por segmentos de doble viga con construcciones de transición en cajones metálicos. El sistema funicular y su infraestructura se habrán diseñado y construido en tan solo dieciocho meses. □



ÉLARGISSEMENT DU PONT À HAUBANS DE RANDE - ESPAGNE

AUTEURS : THOMAS PALOMARES (INGÉNIEUR), DIRECTEUR GÉNÉRAL DE FREYSSINET ESPAGNE - FÁTIMA OTERO (INGÉNIEUR), DIRECTEUR GÉNÉRAL GRANDS PROJETS ET SERVICES TECHNIQUES DU GROUPE PUENTES - CONCHITA LUCAS (INGÉNIEUR), CHEF DU DÉPARTEMENT OUVRAGES D'ART, GÉOTECHNIQUE ET OUVRAGES MARITIMES DE gGRAVITY ENGINEERING (GROUPE ACS) - ALVARO SERRANO (INGÉNIEUR), DIRECTEUR TECHNIQUE DE MC2 INGÉNIERIE

LE PONT DE RANDE, MIS EN SERVICE EN 1981, EST L'UNE DES INFRASTRUCTURES LES PLUS NOTABLES DE L'AUTO-ROUTE DE L'ATLANTIQUE, AXE STRATÉGIQUE NORD-SUD DE LA GALICE. CET OUVRAGE ÉTAIT AUTREFOIS LE PONT À HAUBANS PRÉSENTANT LA PLUS GRANDE PORTÉE AU MONDE : 400 m. EN 2006, 25 ANS APRÈS SON INAUGURATION, LE NIVEAU DE CONGESTION PROCHE DE LA CAPACITÉ PORTANTE UTILE DU PONT À CONDUIT AUDASA, LA SOCIÉTÉ D'AUTOROUTE, À UN ÉLARGISSEMENT DE DEUX VOIES, UNE DANS CHAQUE SENS DE CIRCULATION, EN AJOUTANT DEUX NOUVELLES CHAUSSÉES.



© MC2 INGÉNIERIE, DRAGADOS, GROUPE PUENTES ET FREYSSINET
2

SITUATION

L'élargissement du pont de Rande a récemment obtenu le deuxième prix OStrA (Outstanding Structure Award). Cette distinction salue cette réalisation, considérant la structure comme l'une des plus innovantes et durables au monde dans sa catégorie. Il est décerné par l'IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering).

Freyssinet a pu participer à ce projet grâce à la confiance que lui ont accordée Puentes Infraestructuras et Dragados et à sa capacité à s'adapter techni-

quement aux défis posés par l'ouvrage. Le pont à haubans de Rande est une structure emblématique et stratégique de l'autoroute de l'Atlantique, construite

1- Entretoises du pont élargi.
2- Vue générale du pont élargi.

1- Braces of the widened bridge.
2- General view of the widened bridge.

entre 1973 et 1977. Il a été mis en service en février 1981. Cette structure était autrefois le pont à haubans présentant la plus grande portée au monde : 400 m. En 2006, à l'occasion du 25^e anniversaire de sa mise en service, le débit journalier moyen (DJM) du pont avait atteint 55 000 véhicules, une valeur proche de la capacité portante utile de la structure. Ce débit a continué à croître avec des pointes de plus de 70 000 véhicules/jour. L'élargissement du pont de Rande (figure 2) était donc une nécessité, mais il devait respecter les conditions suivantes :

- 1- Aucun impact sur la circulation sur le pont et ses accès avec une sécurité maximale pendant toute la durée des travaux ;
- 2- Aucun impact environnemental sur la baie de Vigo ;
- 3- Résilience optimale et utilisation maximale de la capacité de résistance du pont existant.

DESRIPTIF DES TRAVAUX

De nombreux projets d'agrandissement de ponts ont été réalisés dans le monde entier, mais la plupart d'entre eux ont été réalisés sur des ponts à poutres-caissons (acier ou béton) ou des ponts suspendus. Ainsi, il existe peu de cas d'élargissement de ponts à haubans, et aucun à une échelle aussi grande que celle du pont de Rande. Cela représentait donc un défi d'ingénierie. La planification et la mise en œuvre correctes de la construction ont été essentielles pour la réussite du projet.

Le projet d'élargissement consistait à adosser deux tabliers supplémentaires (figure 3), de chaque côté du tablier existant. Ces nouveaux tabliers ont dû être placés sur la face extérieure des pylônes, il n'y a donc pas de continuité entre les voies d'origine et celles de l'élargissement. La liaison entre le tablier d'origine et le nouveau tablier est réalisée au moyen d'articulations sphériques afin d'obtenir un comportement efficace de la structure. Ces éléments ont été soumis à des essais spécifiques en raison de leur utilisation innovante et de leur importance structurelle. ▷



3

© MC2 INGÉNIERIE, DRAGADOS, GROUPE PUENTES ET FREYSSINET

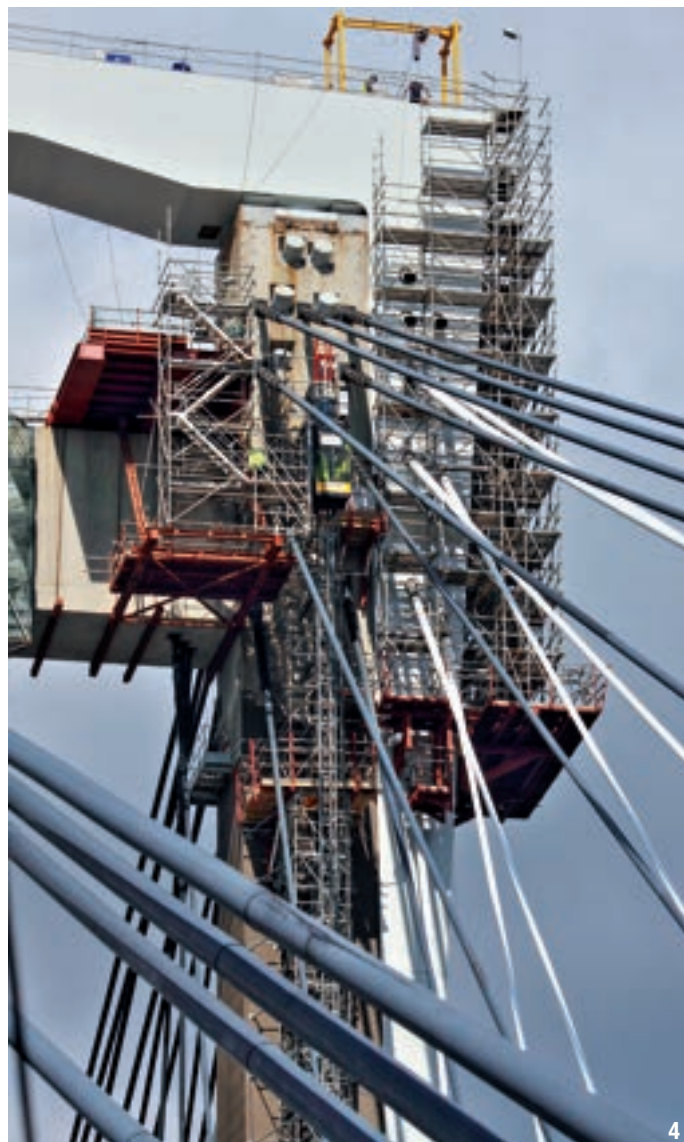
Les tabliers d'élargissement sont suspendus au moyen de haubans HD de Freyssinet à des entretoises métalliques placées sur les pylônes (figure 4). Les travaux d'élargissement ont concerné plusieurs parties du pont d'origine qui sont décrites ci-dessous :

ÉLARGISSEMENT DES PYLÔNES - ENTRETOISES

Il a d'abord fallu élargir les pylônes de haubanage pour réaliser l'élargissement du pont. L'ancrage des nouveaux haubans était un prérequis pour pouvoir lancer la suspension des tabliers d'élargissement. Les entretoises métalliques placées au sommet des pylônes (figure 1) pèsent environ 750 t chacune et mesurent plus de 100 m de haut. Ce poids élevé et ces dimensions ne permettaient pas de les monter d'un seul tenant, c'est pourquoi elles ont été hissées en trois grandes parties : le linteau horizontal, l'épaulement d'ancrage et la bordure inférieure. Pour ce faire, un portique de levage a été conçu au sommet des deux fûts des pylônes avec des chariots coulissants servant de support aux vérins de levage et de rotation. Chaque pièce a été hissée et pivotée de 180° par rapport à son axe vertical, afin que son centre de gravité soit plus proche de la tour et que les conditions de guidage et la stabilité au vent soient garanties.

ÉLARGISSEMENT DU TABLIER

Le pont d'origine a été construit en employant la méthode traditionnelle de



4

© MC2 INGÉNIERIE, DRAGADOS, GROUPE PUENTES ET FREYSSINET

3- Vue générale des deux tabliers d'élargissement.
4- Vue détaillée des entretoises métalliques placées sur les pylônes.

3- General view of the two widening decks.
4- Detailed view of steel braces placed on the towers.

construction par encorbellements successifs, en déplaçant les pièces métalliques le long du tablier construit et en les positionnant au moyen de grues. Une technique similaire a été envisagée pour le processus d'élargissement du tablier, qui devait également permettre de ne pas interrompre le trafic routier. Toutefois, afin de réduire les temps de construction et les travaux en hauteur, chaque voussoir a été assemblé à terre et transporté par chariot de levage. Le tablier a été divisé en 31 voussoirs par côté. Chacun mesure 21,06 m de long, 7,35 m de large, 2,40 m de hauteur et pèse 80 t. Cette méthode est couramment utilisée dans la construction de ponts à haubans, mais avec un seul chariot de levage par encorbellement. Toutefois, afin de tirer parti de la capacité



5

© MC2 INGÉNIERIE, DRAGADOS, GROUPE PUENTES ET FREYSSINET

de résistance du pont existant, deux chariots de levage ont été utilisés : l'un situé sur le voussoir précédent et l'autre suspendu au tablier existant (figure 6). Cette option a permis d'utiliser des équipements plus légers, de répartir le poids des chariots et du voussoir à lever entre les deux tabliers et de mieux contrôler l'opération. Ce système innovant a été mis au point par l'équipe du groupe Puentes et a été construit spécialement pour ce projet. Il a joué un rôle essentiel dans le respect des délais proposés.

Le cycle de travail prévoit le bétonnage de chaque voussoir immédiatement après l'installation du hauban correspondant. Le cycle commence par le positionnement du ponton en

5- Vue du dessous des tabliers d'élargissement.

6- Chariots de levage.

7- Vue rapprochée des deux nappes ordonnées de nouveaux haubans et haubans existants.

5- Bottom view of the widening decks.

6- Lifting trolleys.

7- Close-up view of the two arranged bundles of new and existing stay cables.

projection orthogonale de la position finale du voussoir à hisser. Ensuite, c'est la descente et le raccordement des palonniers de levage. Une fois suspendu, le voussoir est soulevé et les connexions articulées sont soudées sur le tablier existant. Le voussoir est alors placé contre le voussoir précédent, puis soudé (figure 5). Après la réalisation d'un certain pourcentage de cette soudure, le hauban est installé de façon à pouvoir bétonner le voussoir.

Les voussoirs de fermeture de la travée centrale ont été hissés en utilisant uniquement les chariots de levage arrière de chaque côté. Contrairement à ce qui se passe habituellement lors de la construction de ponts par encor-

bellements, la déformation différentielle des deux côtés était réduite. En effet, les voussoirs d'élargissement étaient déjà fixés au pont original, ce qui limitait largement leurs mouvements.

HAUBANS DE L'ÉLARGISSEMENT

Les tabliers latéraux sont suspendus par des haubans HD de Freyssinet ancrés dans les entretoises des pylônes, reproduisant la forme de la nappe des haubans d'origine. Ces haubans sont également ancrés à l'intérieur de la poutre-caisson, de 1,50 m de largeur et de 2,30 m de hauteur. Ils peuvent être inspectés ultérieurement pendant les phases d'entretien. ▷



6



7

© MC2 INGÉNIERIE, DRAGADOS, GROUPE PUENTES ET FREYSSINET

L'intervalle longitudinal des ancrages des nouveaux haubans sur le tablier coïncide également avec celui des haubans existants (figure 7), de sorte que l'ensemble des haubans est perçu visuellement comme des nappes parallèles et ordonnées. Tout le contraire de l'effet de "toile d'araignée" auquel on s'attend avec autant de haubans. Les câbles prévus pour le système de haubanage sont du type Monostrand® de qualité Y1860S7 et de 150 mm² de section. Le nombre de torons par hauban varie de 44 jusqu'à 91 pour les extrémités.

En raison des dimensions des tabliers d'élargissement et de la nécessité de travailler sans interrompre le trafic, l'équipe Freyssinet a dû développer des procédures spécifiques afin de garantir la sécurité des usagers et du personnel du chantier, tout en respectant les délais contractuels. Il a fallu installer plus de 918 t de haubans en moins de 6 mois. La productivité a été la suivante :

- Nombre maximal de haubans installés en une semaine : 11 haubans ;
- Quantité maximale d'acier installée en une semaine : 215 t ;
- Quantité maximale d'acier installée en trois semaines : 411 t.

De plus, les tabliers étant articulés transversalement, des rotations de plus de 50 mrad se sont produites au niveau des ancrages pendant la construction. Grâce au filtre de tensions® incorporé de l'ancrage HD de Freyssinet (figure 8), aucun élément auxiliaire n'a dû être utilisé.

Les amortisseurs visqueux ont été reconçus pour éviter toute interférence avec le garde-corps. Les trois pistons ont été regroupés dans un même sec-



8- Vue des ancrages HD installés par Freyssinet.

teur, une solution ingénieuse qui ne modifie pas l'axe de travail du piston déplacé et, par conséquent, le fonctionnement de l'ensemble. Grâce à cette solution innovante, tout mouvement du faisceau de torons active les trois pistons.

FONCTIONNEMENT STRUCTUREL DU PONT

Le projet réussit la prouesse de réduire au minimum l'incidence des efforts dus à l'élargissement sur les haubans existants et même de pratiquement les éliminer.

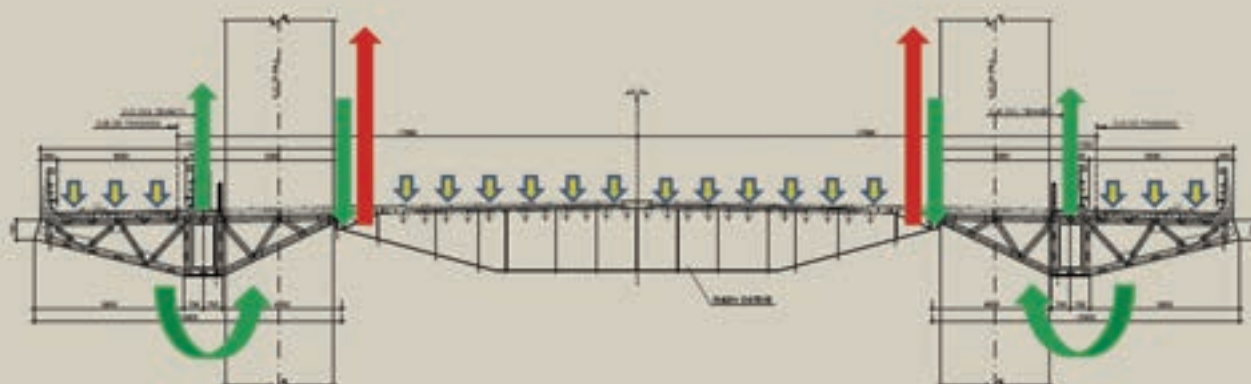
Les haubans des tabliers d'élargissement sont ancrés dans la poutre-caisson des voussoirs, le nouveau trafic se faisant à l'extérieur de ceux-ci. Cette disposition en encorbellement (figure 9) permet de décharger les haubans du tablier existant, même pour les efforts permanents, lorsque des charges vers le haut apparaissent aux points d'articulation avec le tablier central. D'autre part, le changement d'amplitude des tensions que subissent les câbles sous l'effet des surcharges sur le tablier améliore considérablement leur com-

8- Vue des ancrages HD installés par Freyssinet.

9- Schéma structurel de l'élargissement.

8- View of the HD anchorages installed by Freyssinet.
9- Structural diagram of widening.

SCHÉMA STRUCTUREL DE L'ÉLARGISSEMENT



9



10

portement en fatigue. Des amortisseurs externes ont également été installés afin de réduire les vibrations des câbles. D'autre part, avec les tabliers d'élargissement, le comportement au vent de la structure a également été amélioré en présentant un profil élancé et aérodynamique au vent transversal, ainsi qu'une plus faible prise au vent.

10- Vue générale du pont en travaux, ouvert à la circulation.

10- General view of the bridge during the works, open to traffic.

TRAVAUX DE RÉNOVATION SUPPLÉMENTAIRES

L'élargissement du pont entraîne une prolongation de la durée de vie utile de l'ensemble de la structure. C'est pourquoi, afin de garantir la durée de vie utile de la structure existante, un plan d'inspection et d'entretien a été établi et budgétisé lors de la mise en service.

De plus, les premiers travaux de réfection ont déjà été effectués pour prolonger la durée de vie utile du pont existant. Ces opérations ont été effectuées sur les pylônes principaux, les piles-culées, le tablier, les joints et les haubans. Elles ont été effectuées en respectant toujours au maximum la circulation routière et l'environnement (figure 10). □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- PROPRIÉTAIRE :** Ministère de l'Équipement espagnol
- CONCESSIONNAIRE ET MAÎTRE D'OUVRAGE :** Autopistas del Atlántico, C.E.S.A.
- BUREAU D'ÉTUDES :** MC2 Estudio de Ingeniería et Manuel Juliá Vilardell
- MAÎTRE D'ŒUVRE :** JV Dragados et Puentes Infraestructuras (Groupe Puentes)
- ASSISTANT TECHNIQUE DU MAÎTRE D'ŒUVRE :** Fhecor et Pondio JV
- ASSISTANT TECHNIQUE DU MAÎTRE D'OUVRAGE :** MC2 Estudio de Ingeniería et WSP Spain-API XXI
- ENTREPRISE MANDATÉE POUR LES HAUBANS :** Freyssinet

PRINCIPALES QUANTITÉS

- ANCIENS HAUBANS CONSTITUÉS DE :** 80 unités PSS injectées de coulis de ciment
- NOUVEAUX HAUBANS CONSTITUÉS DE :** 80 unités PSS HD de Freyssinet
- LONGUEUR TOTALE DES HAUBANS (ANCIENS ET NOUVEAUX) :** 20256,74 m
- POIDS TOTAL DES HAUBANS NEUFS :** 918 t
- QUANTITÉ MAXIMALE D'ACIER POUR LES HAUBANS INSTALLÉE EN 3 SEMAINES :** 411 t
- DURÉE TOTALE DE L'INSTALLATION DES HAUBANS :** 6 mois
- DÉLAI D'EXÉCUTION DE L'ÉLARGISSEMENT DU PONT PRINCIPAL :** 12 mois

ABSTRACT

WIDENING OF THE RANDE CABLE-STAYED BRIDGE - SPAIN

THOMAS PALOMARES, FREYSSINET - FÁTIMA OTERO, GROUPE PUENTES - CONCHITA LUCAS, gGRAVITY ENGINEERING (GROUPE ACS) - ALVARO SERRANO, MC2 INGÉNIERIE

The Atlantic motorway is a strategic highway forming the North-South backbone of Galicia. Its construction began in the 1970s. One of its most significant infrastructure features is the Rande Bridge, commissioned in 1981. This structure was formerly the cable-stayed bridge having the largest span in the world, 400 metres. In 2006, 25 years after its inauguration, its congestion level was close to its useful load-bearing capacity. An initial analysis was therefore requested with a view to widening by two lanes, one in each direction of traffic, by adding two new carriageways. After this initial analysis, the motorway operating company, Audasa, tasked MC2 Estudio de Ingeniería with the design of this innovative bridge widening project. In 2015, the work contract was awarded to Dragados et Puentes Infraestructuras (Puentes group) and Freyssinet for execution of the stay cables. □

ENSANCHE DEL PUENTE ATIRANTADO DE RANDE - ESPAÑA

THOMAS PALOMARES, FREYSSINET - FÁTIMA OTERO, GROUPE PUENTES - CONCHITA LUCAS, gGRAVITY ENGINEERING (GROUPE ACS) - ALVARO SERRANO, MC2 INGÉNIERIE

La autopista del Atlántico es una vía estratégica que vertebra el eje norte-sur de Galicia. Su construcción comenzó en los años setenta. Entre sus infraestructuras, una de las más destacadas es el Puente de Rande, que entró en servicio en 1981, y que en su día fue el puente atirantado de mayor longitud del mundo: 400 m. En 2006, 25 años después de su inauguración y debido a su nivel de congestión, cercano a su capacidad portante útil, las autoridades solicitaron un primer análisis para un posible ensanche de dos vías, una en cada sentido de circulación, añadiendo dos nuevas calzadas. Tras ese primer análisis, Audasa, la empresa de autopistas, encargó a MC2 Estudio de Ingeniería este innovador proyecto de ensanche. En 2015, el contrato de ejecución se concedió a las sociedades Dragados y Puentes Infraestructuras (grupo Puentes) y a Freyssinet para la instalación de los tirantes. □



1
© RAZEL-BEC

ABIDJAN, L'ÉCHANGEUR DE L'AMITIÉ IVOIRO-JAPONAISE

AUTEUR : ÉRIC SOYEZ, INGÉNIEUR PROJET, RAZEL-BEC

LA CONSTRUCTION DE CET ÉCHANGEUR EN BÉTON ARMÉ ET PRÉCONTRAIT A DURÉ PRÈS DE 3 ANS. FRUIT D'UNE SYNERGIE ENTRE LES DÉPARTEMENTS INTERNATIONAL ET OUVRAGES D'ART DE RAZEL-BEC, IL A ÉTÉ CONSTRUIT DANS UN ENVIRONNEMENT MULTICULTUREL, AVEC TROIS ACTEURS MAJEURS ORIGINAIRES DE TROIS CONTINENTS DIFFÉRENTS. LES MÉTHODES, LA CONCEPTION, LES RÉFÉRENCES NORMATIVES ONT ÉTÉ LES MANIFESTATIONS DE CES DIFFÉRENCES CULTURELLES ET LE SUJET D'ÉCHANGES CONSTRUCTIFS. LE RÉSULTAT EST UN OUVRAGE ÉLÉGANT QUI AMÉLIORE SENSIBLEMENT LA VIE DES AUTOMOBILISTES ABIDJANAIS.

INTRODUCTION

Le 16 décembre 2019, sous les acclamations de milliers de personnes rassemblées pour l'occasion, Son Excellence Monsieur Alassane Ouattara, président de la Côte d'Ivoire, a inauguré l'échangeur de l'amitié Ivoir-Japonaise (EAIJ). Ce projet, commencé 3 ans plus tôt (figure 2), est né de la volonté ivoirienne de réorganiser les transports urbains de la ville d'Abidjan, la capitale économique du pays. Mais c'est également la réussite de la coopération entre le Japon et la Côte d'Ivoire.

Le projet de l'échangeur de l'Amitié ivoiro-japonaise (EAIJ) a été financé à hauteur de 43 millions d'euros par un don de l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (JICA) et 6,5 millions d'euros par l'État ivoirien. Ainsi les études d'exécution et la mission de contrôle ont été attribuées à l'entreprise Oriental Construction Global (OCG), que l'on appellera dans la suite "le consultant". Le marché de travaux a, lui, été octroyé à l'entreprise Daiho corporation. Daiho a choisi à son tour de sous-traiter 100% de ces travaux à l'entreprise française Razel-Bec.

1- Décintrement séquentiel des étaielements.

1- Sequenced removal of supporting centring.

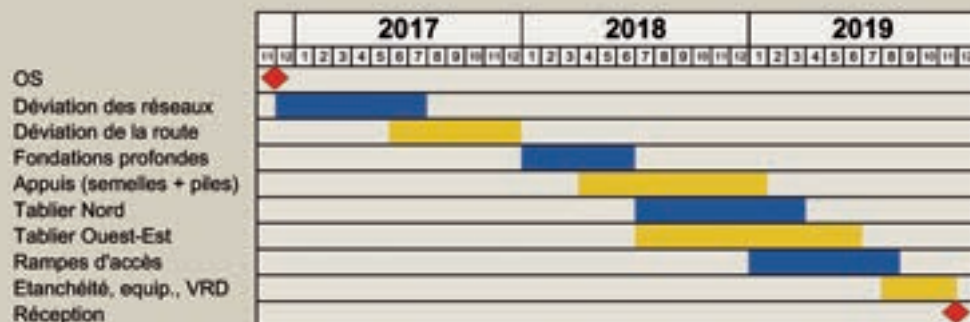
de 312 m pour sa branche principale et 210 m pour la seconde, la travée maximum mesure 65 m. Le tablier est appuyé sur 22 piles allant de 4 à 11 m de haut et trois culées. L'ensemble est fondé sur 121 pieux forés à la boue de 28,5 à 43 m de profondeur.

Le tablier en béton précontraint est constitué de 2 structures différentes : 137 m en caisson à 3 âmes et inertie variable construit en encorbellement successif et le reste en dalle élégiée à inertie variable de 1 à 2 m d'épaisseur. Afin de limiter la maintenance, le concepteur n'a prévu aucun joint de

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

L'échangeur se situe dans l'un des carrefours les plus empruntés d'Abidjan, environ 130 000 véhicules par jour. C'est un pont routier en forme de Y, long

PLANNING DE RÉALISATION DU CHANTIER



2

dilatation, hormis aux culées. L'ouvrage est donc continu d'un bout à l'autre. Ainsi, la partie en caisson fusionne à chacune de ses extrémités avec les dalles élégies, le tout avec un câblage de précontrainte continu.

Le point fixe est assuré par deux encastremets sur pile, il s'agit des deux appuis servant à la construction des fléaux. Ces deux appuis se situent sur l'une des petites branches du Y (figure 3). Le reste du tablier est appuyé sur des appareils d'appui en élastomères frettés de grandes dimensions répondant aux standards japonais.

2- Planning de réalisation du chantier.
3- Schéma statique et phasage de construction.

2- Project work schedule.
3- Static diagram and construction sequencing.

PHASAGE/MÉTHODES IMPOSÉS

La conception et les études d'exécution étant réalisées par le consultant, Razel-Bec a suivi ses choix de méthodes constructives.

Le consultant a retenu deux hypothèses pour ses calculs. La première étant que les tabliers en dalles élégies seraient tous coulés sur cintre avec un arrêt de bétonnage défini à chaque travée. La seconde, que la partie en caisson serait construite en encorbellements successifs, à l'aide d'un équipement mobile (figure 4) pour la travée centrale et sur cintre pour les deux rives. Ces choix

étant directement liés aux calculs structurels, aucune modification n'était admissible.

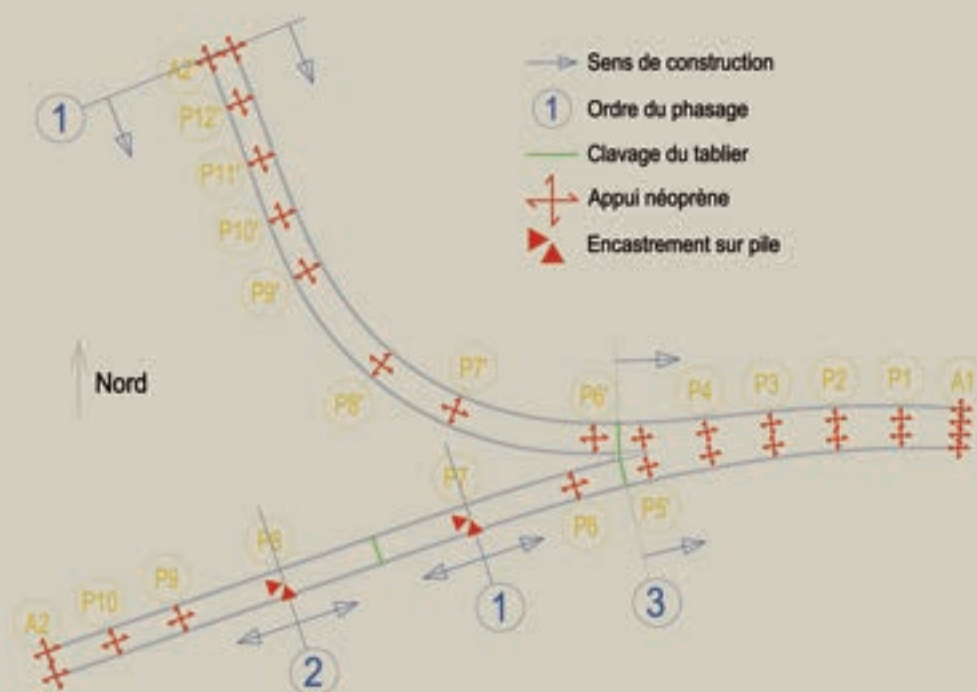
Le consultant a également choisi le phasage de construction avec notamment le sens de construction des travées (imposé par le positionnement des coupleurs de précontrainte) et l'ordre des clavages du tablier.

Le chantier a pris près de 6 mois de retard en début de projet, en raison de la découverte de très nombreux réseaux non déviés. Razel-Bec a donc dû chercher des solutions pour réussir à accélérer la réalisation des travaux de manière à livrer à la date initialement prévue. Le séquençage de construction du tablier a été étudié de près, malheureusement les impératifs imposés par la conception n'offraient aucune piste d'amélioration. La direction de chantier a donc décidé de multiplier les moyens humains et de travailler jour et nuit. Cette capacité de production supplémentaire a permis d'accélérer les travaux sans interférer avec les choix du consultant. Le projet est devenu une véritable course contre la montre où les choix de méthodes étaient tous motivés par la rapidité et la simplicité d'exécution.

Par exemple, pour les travées coulées sur cintre, les étaitements ont été choisis pour permettre un réglage précis des tours, pour la possibilité de ripper des blocs entiers d'une travée à l'autre et surtout la capacité à suivre la géométrie de l'intrados du tablier. En effet l'enjeu était de pouvoir s'affranchir de la construction d'un fond de coffrage (martyr), qui est long et fastidieux à réaliser. On a donc opté pour une plateforme faite de plateaux orientés suivant la sous-face du tablier au lieu du classique jeu de poutrelles. Les têtes de fourche des étaitements étaient ainsi réglées de façon à épouser parfaitement les pentes longitudinales, les dévers et les courbures dues à l'épaisseur variable des travées. Les plateaux étaient ensuite plaqués permettant la mise en œuvre des armatures.

Sur la construction des dalles, un travail en escalier a été mis en place. La première équipe montait et démontait les étaitements puis coffrait. La seconde équipe assemblait les ferraillasses, posait les gaines de précontrainte et les tubes élégies (figure 5). La dernière équipe enfilait les torons longitudinaux avant bétonnage, puis les transversaux après bétonnage et enfin procédait à la mise en tension puis à l'injection. La cadence était de 3 à 4 semaines par travée.

SCHÉMA STATIQUE ET PHASAGE DE CONSTRUCTION



3



4

© RAZEL-BEC

La méthode de construction en encorbellements successifs a nécessité l'utilisation d'un équipage mobile. L'ouvrage étant à environ 6 m d'un sol bitumé et de bonne qualité, Razel-Bec aurait pu aussi utiliser une méthode sur cintre avec passe charretière, mais la conception ne le permettait pas. La forme d'équipage mobile retenue est celle de l'équipage mobile "par en-dessous" (figure 6). Un système de coffrage tiroir permettait de coffrer les cellules intérieures. La cinématique de l'équipage était la suivante (figure 7) :

- Décintrage du dernier voussoir réalisé ;
- Transfert de la charge de l'équipage depuis les tiges suspentes vers les suspentes latérales ;

- Avancement hydraulique du rail puis de l'équipage ;
- Transfert de la charge de l'équipage vers les tiges puis réglage du coffrage ;
- Ferrailage et coffrage des cellules intérieures ;
- Coulage du nouveau voussoir.

Les travées de rive ayant une section de béton plus faible, elles ont dû être lestées pour garantir la stabilité des fléaux.

Ainsi certaines cellules du caisson ont été remplies de gros béton et des contrepoids ont été posés sur les voussoirs déjà réalisés. Ils étaient déplacés au fur et à mesure de l'avancement de la construction pour assurer la stabilité de l'ensemble.

- 4- Équipage mobile sur le second fléau.**
- 5- Travaux de dalle organisés en escalier.**
- 6- Équipage mobile à un voussoir du clavage.**

- 4- Mobile rig on the second deck section.**
- 5- Slab works organised stepwise.**
- 6- Mobile rig with a keying segment.**

UNE CONCEPTION JAPONAISE

L'ouvrage a été conçu avec les codes et standards japonais, même si les normes européennes sont en vigueur en Côte d'Ivoire. Ces différences culturelles de conception ont donc été de véritables points d'attention, de surveillance et de discussions durant la réalisation des travaux. En voici quelques exemples.

Les coffrages latéraux du tablier ont la particularité de ne pas suivre les variations de dévers. Autrement dit, l'angle formé entre la joue du tablier et l'intrados varie tout le long de l'ouvrage suivant les évolutions du dévers (figure 8). Comme expliqué au paragraphe précédent, on a choisi de travailler directement sur une plateforme



5



6

© RAZEL-BEC

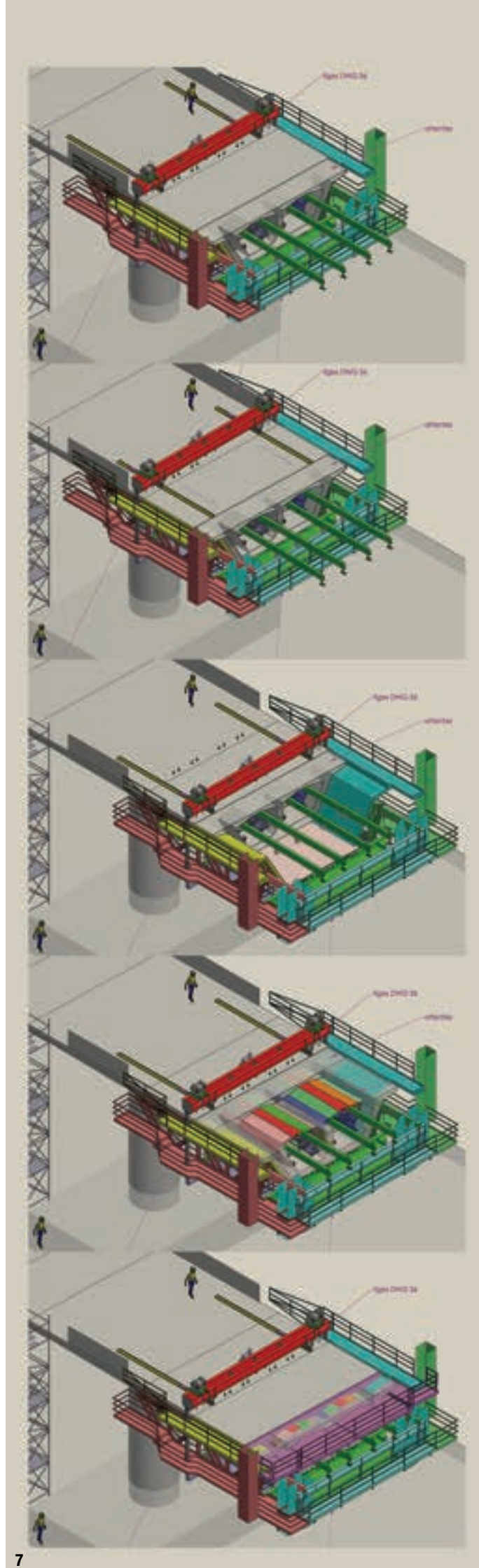
7- Séquençage d'avancement de l'équipage mobile.

7- Sequencing of mobile-rig progress.

réglée suivant les pentes longitudinales et transversales de l'ouvrage. Ainsi les éléments coffrant les faces latérales du tablier formaient un angle variable avec la plateforme. Un modèle informatique en 3D a été réalisé pour permettre une conception précise de ces éléments. Certaines pièces étaient uniques, notamment dans les zones à inertie variable et d'autres étaient réutilisables. Une logistique d'identification et de stockage de ces vaux a été mise en œuvre.

Une autre particularité d'une conception japonaise est l'utilisation de câbles de précontrainte différents des standards européens. Par exemple, la précontrainte transversale était prévue en mono toron de 28,6 mm et les unités longitudinales étaient des 12S12.7. Le consultant a cependant accepté de remplacer les 1S28.6 par des 4T15S et les 12S12.7 par des 8T15S. Ces variantes étant des unités de plus grande section, on a diminué légèrement la contrainte de mise en tension pour obtenir la même force appliquée à la structure. Cette modification a été acceptée, car il n'y avait pas d'impact négatif sur l'ouvrage, voire même un gain sur les pertes de précontrainte (perte par relaxation notamment). En revanche, il a été impossible de faire accepter l'utilisation de câbles gainés-graissés pour les transversaux.

Ce projet a été conçu avec l'utilisation massive de coupleurs de précontrainte, une bonne partie des câbles est continue d'un bout à l'autre de l'ouvrage. Les codes de calcul japonais autorisent même le couplage de la totalité des câbles dans une même section. Pour cette raison et parce que les petites unités de câbles ont été préférées, la densité des ancrages et des coupleurs au niveau des arrêts de bétonnage de dalle était particulièrement élevée (figure 9).



7
© RAZEL-BEC

LE BÉTON, UN ÉLÉMENT CLÉ DU CHANTIER

La qualité des bétons est essentielle à la bonne réalisation des ouvrages précontraints.

Une attention toute particulière a été portée à la formulation du béton pour les coulages des dalles élégies, extrêmement sensibles à l'ouvrabilité du béton.

Sur ce projet, les élégies (tubes circulaires évitant la dalle) étaient coffrées à l'aide de cylindres en tôle d'acier fermés à leur extrémité. Elles étaient tenues au fond de coffrage par de grands colliers à brides empêchant leur flottaison dans le béton.

Pour comprendre la problématique du béton, il faut savoir que l'espace entre deux élégies était de seulement 35 cm pour les dalles de 1 m et 40 cm pour celles supérieures à 1 m. Dans cet espace devaient prendre place un cadre d'armature avec ses barres filantes et deux gaines de précontrainte côte à côte dans le sens horizontal (figure 10). Cette configuration laissait très peu de place pour couler le béton et s'assurer de sa bonne répartition sous les élégies. Le coulage se faisait donc dans des conditions complexes dues à l'absence de visibilité.

De plus, la descente des vibreurs dans la partie inférieure du coffrage devait être faite avec une grande minutie, pour ne pas endommager les gaines de précontrainte. Évidemment pour ces bétonnages il était impératif d'utiliser un béton très fluide.

En revanche, lorsqu'on arrivait à la surface du tablier, un béton fluide n'était pas approprié. La pente longitudinale de l'ouvrage souvent égale à 6 % et les dévers variant de -2,5 % à 5 % nécessitaient un béton ferme.

Un béton trop fluide se serait déplacé aux points bas sans permettre de vibrer et sans pouvoir régler correctement le niveau.

On ne pouvait bien sûr utiliser qu'une seule et unique formulation de béton pour un même bétonnage. C'est pourquoi, une des clés du succès a été la maîtrise de la vitesse de bétonnage. Le but étant de laisser le temps aux premières couches de commencer leur

PRINCIPE DE COFFRAGE DES JOUES DU TABLIER

Variation des joues de coffrage de 2,5 à -2,5% de dévers

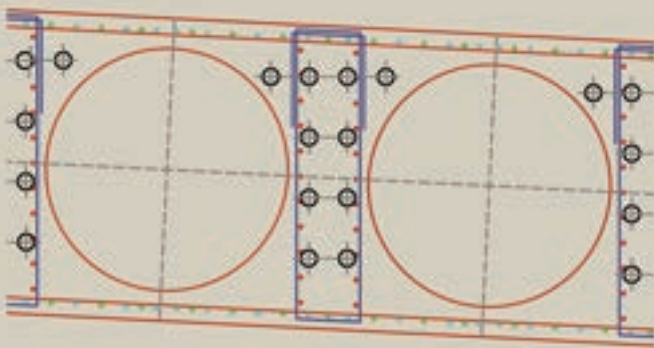


8



9

COUPE TYPE SUR DALLE



10



11

prise tout en allant suffisamment vite pour assurer le mariage des couches. L'autre élément de réussite a été la dextérité du chef de centrale à béton et des équipes du laboratoire, qui par leur expérience, parvenaient à jouer sur la fluidité du béton en restant dans les tolérances de la classe d'affaissement.

STABILITÉ EN CONSTRUCTION

En raison du phasage imposé, la branche Nord de l'ouvrage n'a été reliée aux appuis fixes qu'après le clavage de la jonction du Y (figure 11). Elle a été le centre de beaucoup d'attention et de surveillance pour s'assurer de sa stabilité et de ses déformées. La construction du tablier a commencé simultanément par l'encorbellement et par la première dalle au nord, celle démarant de la culée en fin de courbe. Cette partie du tablier est appuyée sur les piles par une file d'appuis unique axée au centre du tablier (figure 12),



12

8- Principe de coffrage des joues du tablier.

9- Concentration des coupleurs de précontrainte.

10- Coupe type sur dalle.

11- Jonction du Y.

12- File d'appuis unique.

8- Schematic of deck side formwork.

9- Concentration of prestressing couplers.

10- Typical cross section on slab.

11- Y-joint.

12- Single row of supports.



13

© RAZEL-BEC

hormis sur la culée où il a deux appuis. Cette configuration imposait de maintenir étayées les travées déjà construites pour stabiliser le tablier et ce particulièrement lors de l'amorce de la courbe (figure 1).

Lors de la mise en tension des câbles de précontrainte, le tablier se déformait. Il prenait le plus souvent une contre-flèche le décollant du coffrage, mais parfois certaines travées prenaient une flèche (déplacement vers le bas) trop importante. Ce déplacement aurait apporté une charge supplémentaire à l'étalement. Celui-ci n'étant pas dimensionné pour reprendre cet effort, il a fallu réaliser des mises en précontrainte partielles et décinturer le fond de coffrage zone par zone, en damier et phase par phase pour garantir la stabilité et le non-dépassement de la charge admissible des étalements.

13- Ouvrage mis en circulation.

13- Trafficked structure.

CONCLUSION

Le projet de l'échangeur de l'Amitié ivoiro-japonaise a participé à la restructuration du trafic routier de la ville d'Abidjan. Il a permis de réduire les temps de trajet de milliers d'usagers chaque jour (figure 13), mais il est avant tout le résultat d'un engagement humain fort et la réussite d'une coopération entre équipes de cultures différentes. Le développement d'Abidjan ne s'arrête pas là, la phase 2 du projet est en cours de démarrage. Il s'agit d'un ouvrage supplémentaire passant par-dessus l'ouvrage déjà construit. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

DURÉE DU CHANTIER : novembre 2016 - décembre 2019 : 37 mois
TABLIER : 5 763 m²
BÉTON DE STRUCTURE : 7 160 m³
ARMATURES PASSIVES : 938 t
PRÉCONTRAİNTE : 200 t, 23 500 m de gaines et 2 088 ancrages et coupleurs

PRINCIPAUX INTERVENANTS

FINANCEMENT : Agence Japonaise de Coopération Internationale (Jica) et Trésor ivoirien
MAÎTRISE D'OUVRAGE : Ministère des Infrastructures Économiques (Mie)
MAÎTRISE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉ : Agence de Gestion des Routes (Ageroute)
MAÎTRE D'ŒUVRE : consortium de consultants Oriental Consultant Global Co. Ltd (Ocg), Central Consultant inc.
ENTREPRISE : Daiho corporation
ENTREPRISE SOUS-TRAITANTE : Razel-Bec

ABSTRACT

ABIDJAN, THE IVORY COAST/JAPANESE FRIENDSHIP INTERCHANGE

ÉRIC SOYEZ, RAZEL-BEC

The Ivory Coast/Japanese Friendship interchange project is a road bridge of total length 522 metres, in Abidjan (Ivory Coast). Constructed of prestressed concrete, it is the result of Ivory Coast/Japanese/French collaboration. The harmony of this multicultural organisation was one of the major challenges facing the project. This article outlines the methods employed and the construction sequencing, and how they were impacted by the structure's design. Expertise regarding concrete for construction of the decks was an important factor, as well as the issue of stability during construction. □

ABIYÁN, EL INTERCAMBIADOR DE LA AMISTAD MARFILEÑO-JAPONESA

ÉRIC SOYEZ, RAZEL-BEC

El proyecto del intercambiador de la Amistad marfileño-japonesa es un puente vial de una longitud total de 522 m, situado en Abiyán, en Costa de Marfil. Construido en hormigón pretensado, representa la culminación de una colaboración entre Costa de Marfil, Japón y Francia. La armonía de esta organización multicultural ha sido uno de los principales retos del proyecto. Este artículo presenta los métodos aplicados, las fases de construcción y el impacto del diseño sobre estas últimas. El dominio de los hormigones para la construcción de los tableros ha sido un factor importante, así como el problema de la estabilidad durante la construcción. □



TUNNEL DE LORONG KUDA - UNE LIAISON SOUTERRAINE AU CŒUR DE KUALA LUMPUR

AUTEUR : MARC LAGOUARDETTE, DIRECTEUR DE PROJET, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

COMPOSÉ D'UN TUNNEL EN TRANCÉE COUVERTE ET D'UN PASSAGE SOUTERRAIN DESSERVANT LE CENTRE COMMERCIAL SITUÉ SOUS LES TOURS PÉTRONAS ET UN ENSEMBLE IMMOBILIER TERTIAIRE, LE TUNNEL DE LORONG KUDA, EN CONSTRUCTION À KUALA LUMPUR, REPRÉSENTE UN CHANTIER URBAIN TRÈS PARTICULIER. POUR DES RAISONS DE FAISABILITÉ, DE GESTION DES INTERFACES AVEC LES AVOISINANTS ET DE MAINTIEN EN SERVICE DES INFRASTRUCTURES EXISTANTES, LA FLEXIBILITÉ ET L'ADAPTABILITÉ DE L'ORGANISATION DU PROJET GUIDENT QUOTIDIENNEMENT LA RÉALISATION DES TRAVAUX.



© SOLETANCHE BACHY
2

INTRODUCTION

Il s'agit d'un des chantiers d'infrastructures majeurs en cours dans le centre-ville de Kuala Lumpur en Malaisie. Prévu pour être mis en service en 2021, le tunnel de Lorong Kuda, permettra un accès direct au centre commercial situé sous les tours Pétronas (figure 4) et facilitera la circulation dans cette zone extrêmement urbanisée. Il se connectera par ailleurs avec le tunnel existant qui relie l'avenue Tun Razak et desservira également les sous-sols d'un complexe immobilier en cours de réalisation (figure 3).

1- Situation générale du chantier - Vue depuis les tours Petronas.
2- Le chantier avec les tours Petronas en arrière-plan.

1- General location of the project - View from the Petronas towers.
2- The construction site with the Petronas towers in the background.

La liaison sera principalement composée de deux tunnels parallèles de trois voies, réalisés en tranchée couverte, d'une longueur totale de 360 m (figure 5) et d'un passage souterrain construit sur trois niveaux (figure 6). Ces ouvrages sont construits à l'intérieur d'une paroi moulée périphérique ceinturant le chantier.

Le groupement adjudicataire des travaux réunit la filiale locale de Soletanche Bachy, Bachy Soletanche Group Construction Malaysia (BSGCM) et sa division grands projets, Soletanche Bachy International (SBI). Employant

environ 300 personnes au plus fort du chantier, il a en charge la construction tous corps d'états en entreprise générale de la globalité des travaux :

- Fondations spéciales (paroi moulée, pieux forés, micropieux) ;
- Terrassements généraux ;
- Démolition du tunnel existant ;
- Ouvrages provisoires (butons, palplanches, platelages routier métalliques) ;
- Dévoiements temporaires et permanents des réseaux de distribution ;
- Gros œuvre et étanchéité ;
- Charpente métallique ;
- Lots techniques ;
- Lots architecturaux.

La conception du projet et la réalisation des plans d'exécution sont à la charge du maître d'ouvrage et de ses consultants.

L'ENVIRONNEMENT ET LES CONDITIONS DE RÉALISATION

Bien que situé au cœur du centre-ville et dans le quartier des affaires et des ambassades (figure 1), le chantier a reçu l'autorisation d'opérer 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 sous réserve du strict respect des contraintes imposées par les autorités :

- Maintien permanent de la circulation routière en 2x2 voies ;
- Interdiction de circulation des engins de chantier pendant les heures de pointe ;
- Niveau sonore maximal de 72 dBA en journée et de 64 dBA la nuit ; ▷



3 © SOLETANCHE BACHY

- Maintien permanent des accès et des sorties pour les riverains et les clients du centre commercial ;
- Maintien en service des réseaux de distribution ;
- Coordination avec les services des différentes ambassades pour s'assurer de la compatibilité des modes de réalisation des travaux avec le respect des procédures de sécu-

3- Vue d'ensemble de l'emprise du projet et des projets avoisinants pendant la réalisation des travaux.

4- Tours Petronas vues depuis le niveau P1 du passage souterrain.

5- Le tunnel en tranchée couverte pendant la phase de réalisation du gros œuvre.

3- General view of the area covered by the project and neighbouring projects during work performance.

4- View of Petronas towers from underpass level P1.

5- The cut-and-cover tunnel during the structural work execution phase.

rité propres à chaque ambassade (évacuation d'urgence, accueil des délégations).

L'obtention de l'accord des riverains, lors de concertations publiques, était par ailleurs obligatoire, préalablement à la mise en place de toute disposition pouvant impacter l'environnement proche de l'emprise du chantier (dévoisement de routes, modification des sens de circulation, ...).

Dans ces conditions, une bonne connaissance de la Malaisie et de sa culture, ainsi que la mise en place d'une structure dédiée en charge des relations avec toutes les parties prenantes s'avèrent être des éléments primordiaux et indispensables au bon déroulement du chantier.

UN CHANTIER CONTRAINT RÉALISÉ PAR PHASES SUCCESSIVES

L'emprise de la majorité du chantier se situe au droit du domaine public et ses deux extrémités se connectent sur des tunnels en exploitation. La construction des ouvrages doit donc se réaliser par phases, chacune des phases intégrant notamment les contraintes de continuité du trafic routier, ainsi que le maintien en service des réseaux de distribution enterrés. Par conséquent, la réalisation de nombreux ouvrages provisoires et de travaux temporaires (y compris leur démontage/démolition) s'est imposée comme l'un des enjeux critiques du projet, tant au niveau du respect du programme général, que de la

sécurité des compagnons et des tiers. Comme exemples d'ouvrages provisoires, on peut citer :

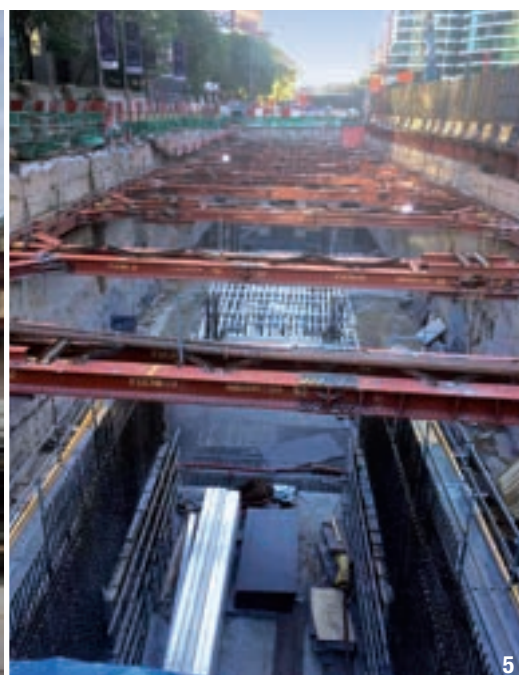
→ Les ouvrages métalliques (poutrelles métalliques et platelage) posés en tête de paroi moulée, permettant de détourner et de maintenir la circulation en surface tout en travaillant simultanément "en taupe" (figure 7) ;

→ Les supportages de réseaux permanents à l'aide d'une structure métallique fixée sur des pieux provisoires pré-fondés (figure 8).

Par ailleurs, la partie Nord-Est du chantier est contiguë, au droit du passage souterrain, à deux autres projets en cours de réalisation (station de métro et développement immobilier tertiaire),



4



5

© SOLETANCHE BACHY



© SOLETANCHE BACHY
6

- 6- Passage souterrain.
- 7- Pose des réseaux et travaux de remblaiement sous route provisoire.
- 8- Structure métallique provisoire de supportage des réseaux en service pendant les travaux de terrassements.
- 9- Pose des réseaux gravitaires par fonçage.

- 6- Underpass.
- 7- Network laying and back-filling works under temporary road.
- 8- Temporary steel structure supporting the networks in service during earthworks.
- 9- Placing gravity-flow networks by ramming.

la séparation étant faite par une paroi moulée commune. Les méthodes de réalisation des travaux de terrassements et de pose des réseaux permanents dans cette zone ont, par conséquent, dû intégrer les avancements respectifs des chantiers voisins. Ainsi, par exemple, le dimensionnement et le positionnement des lits de butons ont été adaptés alors qu'une solution de pose des réseaux gravitaires par fonçage sous la voirie existante a été adoptée (figure 9).
 Contrainte supplémentaire relative à la situation centrale et urbaine du chantier : l'interface avec la future ligne 2 du métro en cours de construction, dont le tracé vient couper transversalement le tracé des tunnels en tranchée cou-

verte. Contractuellement engagé par le respect d'une date jalon, le groupement a réalisé les travaux de fondations et de gros œuvre au droit de la zone d'interface avant l'arrivée des deux tunneliers en optant pour une réalisation de la structure de la tranchée couverte en top & down, de manière à pouvoir simultanément poser et raccorder les réseaux définitifs sous chaussée. Les travaux de connexion au tunnel d'accès menant au centre commercial situé à l'est du chantier ont, quant à eux, dû être réalisés de nuit (de 23h à 5h) en aménageant au quotidien les voies de circulation de manière à assurer dans la journée un accès aux clients et, la nuit, un passage permanent pour les véhicules de livraison. La conception

initiale de l'ouvrage de connexion en béton armé et de son système de fondations s'étant révélée, lors des études préparatoires, peu compatible avec les contraintes imposées par l'exploitant du centre commercial, le groupement a proposé de la modifier en adoptant une solution en charpente métallique et plancher collaborant, finalement plus flexible en termes de phasage et d'emprise sur les voies de circulation (figure 10).
 Enfin, la découverte fréquente de réseaux en service et d'ouvrages enterrés existants non répertoriés par les concessionnaires a contraint le groupement à adapter en permanence les méthodes de construction et le phasage de réalisation des travaux.

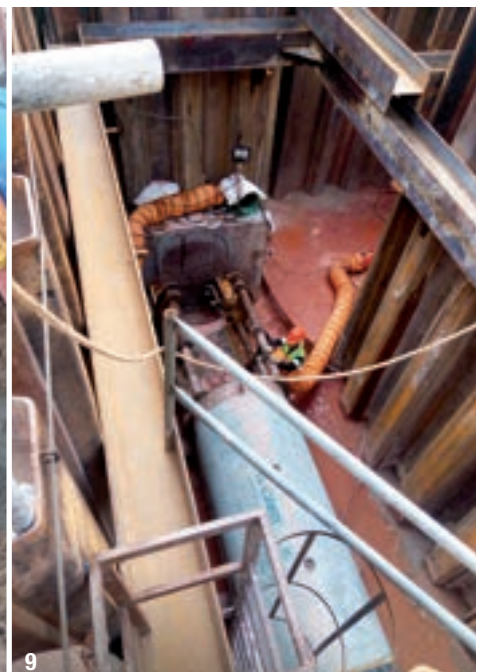
Ainsi, la découverte d'un poste de commande du tunnel existant enterré interférant avec l'emprise du tunnel en tranchée couverte a nécessité la découpe de la structure en béton armée existante, la réalisation de murettes guides en voile béton armé de 4 m de hauteur, ▷



© SOLETANCHE BACHY
7



8



9

et le remplissage en mortier de la globalité des locaux avant de pouvoir démarrer les travaux d'excavation de la paroi moulée.

LA CONCEPTION DES TUNNELS EN TRANCÉE COUVERTE

Très rapidement après la signature du contrat, il s'est avéré que l'emprise de la tranchée couverte était inconciliable avec une réalisation des travaux conforme au respect des contraintes imposées au contrat, notamment avec le maintien permanent de la circulation routière en deux fois deux voies et celui des accès aux zones d'habitation. Le groupement a alors proposé une solution alternative permettant de s'affranchir de ces contraintes (modification des emprises et des rampes d'accès et de sortie) tout en réduisant le volume des travaux à réaliser. Le groupement est ainsi devenu concepteur sur la moitié du projet, changeant de ce fait le cadre contractuel de la réalisation des travaux en cours d'opération.

Les panneaux d'épaisseur 800 mm à 1 000 mm de la paroi moulée constituent les parois verticales du tunnel. Réalisés à la benne à câbles, leur profondeur varie de 20 à 40 m et ils sont ancrés dans une couche de sable limoneux comportant des inclusions d'argile (figure 11). Maintenues par un ou deux lits de butons lors des phases de terrassement et de démolition, leurs cages d'armatures sont équipées de coupleurs qui viennent reprendre par la suite les aciers transversaux des radiers et des dalles supérieures de la tranchée couverte. L'emploi d'un polymère longue chaîne comme fluide d'excavation a permis d'obtenir une qualité de parement et une verticalité des panneaux qui n'ont nécessité que très peu de travaux de reprise après la fin des terrassements généraux, ce qui a permis d'optimiser la durée du planning général.

LA CONSTRUCTION DU PASSAGE SOUTERRAIN

Le passage souterrain est situé au droit des voies existantes d'accès et de sortie du centre commercial, constituées de la voirie de surface et d'un tunnel existant à démolir.

Il est réalisé à l'intérieur d'une enceinte constituée d'une paroi moulée composée de panneaux d'épaisseur variant de 1 000 mm à 1 200 mm réalisés à la benne à câbles. D'une profondeur moyenne de 35 m, ces panneaux sont ancrés dans une couche de sable limoneux et sont maintenus temporairement



10- Travaux de connexion au tunnel existant : charpente métallique et plancher collaborant.

11- Réalisation de la paroi moulée.

10- Work for connection to the existing tunnel: structural steelwork and compositely acting floor.

11- Execution of the diaphragm wall.

par un lit de butons pendant les travaux de terrassement et de gros œuvre. Concomitamment à la construction de la paroi moulée, la première phase de réalisation des pieux forés (53 pieux de diamètre 2 000 mm, d'une profondeur de 45 m) s'est effectuée de manière séquencée depuis le niveau de la voirie existante en assurant le maintien de la circulation des véhicules en surface (figure 12).

Les 9 pieux de diamètre 2 000 mm qui restent à forer étant localisés sous le tunnel existant à démolir, leur réalisation n'a pu se faire qu'après une première phase de terrassement en stationnant la foreuse sur le toit du tunnel préalablement étayé pour pouvoir reprendre les surcharges temporaires complémentaires. Les travaux de carottage à travers le tunnel existant (toit et radier en béton armé d'un mètre d'épaisseur) ont alors été réalisés en utili-

sant un carottier à béton de diamètre 1 000 mm pour aménager une ouverture de 2 000 mm de diamètre permettant la mise en place d'une virole dans la hauteur du tunnel et ainsi pouvoir forer les pieux.

La présence de réseaux existants et apparents à l'intérieur de la fouille a demandé, outre leur maintien temporaire, de remplacer les pieux forés situés à leur aplomb par des micropieux de diamètre 300 mm réalisés depuis le fond de fouille avec un équipement permettant de travailler sous une hauteur libre limitée pour éviter toute interface préjudiciable aux réseaux de fluides en service.

LES LOTS TECHNIQUES

Relié à ses deux extrémités à des infrastructures existantes en service, le projet doit intégrer, dans sa conception et dans sa réalisation, le fonc-

tionnement propre des ouvrages sur lesquels il se connecte, notamment en termes de ventilation mécanique, sécurité incendie et groupes électrogènes de secours. De ce fait, en complément des installations faites sur les travaux neufs, une remise aux normes et un redimensionnement d'une partie des installations techniques existantes sont réalisés de manière à assurer la conformité globale de l'ensemble.

COVID-19 – PRÉVENTION ET DISPOSITIONS PARTICULIÈRES

(figure 13)

Comme tous les pays du monde, la Malaisie n'a pas été épargnée par la pandémie. En complément des mesures de confinement prises dès mi-mars 2020, l'expérience du virus du SRAS au début des années 2000, les coutumes et les habitudes de vie locales (limitant les contacts physiques



11



© SOLETANCHE BACHY

12

et encourageant le port du masque), ainsi qu'une fermeture rapide des frontières, ont permis de limiter jusqu'à présent la propagation massive du virus.

Malgré tout, les conditions de logement et le transport de l'importante communauté des travailleurs étrangers opérant notamment dans le domaine de la construction, ont créé un risque particulier qui a incité les autorités locales à imposer des règles spécifiques préala-

12- Réalisation des pieux forés.
13- Covid-19 Prévention et dispositions particulières.

12- Execution of bored piles.
13- Covid-19 prevention and special measures.

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROI MOULÉE (épaisseur de 800 mm à 1 200 mm / profondeur moyenne 32 m) : 96 panneaux

PIEUX FORÉS DE DIAMÈTRE 2 000 mm / PROFONDEUR 45 m : 62 u

MICROPIEUX DE DIAMÈTRE 300 mm / PROFONDEUR 16 m : 83 u

TERRASSEMENTS EN DÉBLAI ET DÉMOLITION : 95 000 m³

TRAVAUX DE GROS ŒUVRE :

- Béton : 18 500 m³

- Aciers : 4 500 t

CHARPENTE MÉTALLIQUE : 380 t

© SOLETANCHE BACHY



13

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Klcc (Holdings) Sdn. Bhd.

MAÎTRE D'ŒUVRE : Arup Jururunding Sdn. Bhd

ENTREPRISE : Bachy Soletanche Group Construction Malaysia et sa division grands projets - Soletanche Bachy International

ABSTRACT

LORONG KUDA TUNNEL - AN UNDERGROUND LINK IN THE CENTRE OF KUALA LUMPUR

MARC LAGOUARDETTE, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

The project, consisting of a cut-and-cover tunnel 360 metres long and an underpass constructed on three levels, is carried out inside a diaphragm wall enclosure of average depth 32 metres, held in position by layers of struts in the earthworks and structural work phases. Located in the centre of Kuala Lumpur city in Malaysia, it is connected at both ends to structures in service. For its construction, numerous temporary structures have to be placed in position and the work methods and sequencing must be adapted constantly (pipe ramming, top-and-down work), so as to ensure the continuity of road traffic and keep the underground service networks operational. □

TÚNEL DE LORONG KUDA - UN ENLACE SUBTERRÁNEO EN EL CORAZÓN DE KUALA LUMPUR

MARC LAGOUARDETTE, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

Formado por un túnel en zanja cubierta de 360 m y un paso subterráneo construido en tres niveles, la obra se llevó a cabo en un recinto de pantalla de hormigón de una profundidad media de 32 m, soportado por lechos de anclajes en fases de movimientos de tierras y de obras estructurales. Está situado en pleno centro urbano de Kuala Lumpur, en Malasia, y conectado en sus extremos a vías en servicio. Su construcción requirió la realización de numerosas construcciones provisionales y una adaptación permanente de los métodos y las fases de realización (perforación de conductos, obras en top and down) para garantizar la continuidad del tráfico vial y mantener en servicio las redes de distribución subterráneas. □



A NEW CABLE-STAYED BRIDGE OVER THE ZUARI RIVER IN THE STATE OF GOA, INDIA

AUTHOR: ERWAN VICAT, DESIGNER, INGEROP

THE SOUTHWESTERN COAST OF INDIA IN ITS SMALLEST STATE WILL SOON UNVEIL A MODERN ROAD INFRASTRUCTURE REPLACING THE EXISTING, DECAYING TWO-LANE CONCRETE BRIDGE SPANNING THE ZUARI RIVER ESTUARY. THE STATE OF GOA, A FORMER PORTUGUESE COLONY AND POPULAR TOURIST DESTINATION WITH A RICH CULTURAL HERITAGE, WAS INCORPORATED IN THE REPUBLIC OF INDIA FOURTEEN YEARS AFTER ITS INDEPENDENCE FROM BRITISH RULE. TOURISM AND THE PHARMACEUTICAL INDUSTRIES ARE THE MAIN SOURCES OF REVENUE FOR THE STATE, WHICH HAS THE HIGHEST PER CAPITA GDP IN INDIA AND SCORES WELL ON ALL DEVELOPMENT INDICATORS, YET LACKED A MODERN SOUTH-NORTH ROAD LINK.



© INGEROP
2

CONTEXTUAL DESCRIPTION OF THE PROJECT

The existing concrete bridge above the River Zuari estuary, repeatedly retrofitted and repaired, is a balanced cantilever bridge with quarter-span hinges (figure 2). Given the bridge's sorry state, the local road authority has had no

1- Tower elevation.
2- Existing concrete bridge.

1- Vue en élévation du pylône.
2- Pont en béton existant.

other choice but to restrict traffic. Heavy vehicles travelling from the commercial centre of Margão to the capital, Panaji, have to take a 45-minute detour 20km long, contributing to higher pollution and traffic levels.

The new project section starts at km 522/615 of NH-17 near Goa Medi-

cal College (GMC) and ends at km 536/900, its junction with NH-17B near Verna Industrial Area. This section is the shortest link between north and south Goa.

The planned roads between km 522/615 and km 536/250 (Design Chainage) include the following proposals (figure 3).

→ Widening of the existing 2-lane road to a 4-lane road from km 522/615 to km 525/250, km 527/425 to km 529/695, and km 535/350 to km 535/630.

→ Construction of an elevated 6-lane by-pass at Sridao.

→ Widening of the existing 2-lane road to a 4-lane road from km 527/425 to km 529/695.

→ Construction of 6/8-lane elevated road from Agassaim Junction to proposed new cable-stayed Zuari Bridge from km 529/695 to km 531/294.

→ Construction of new 8-lane cable-stayed Zuari Bridge from km 531/294 to km 531/934.

→ Construction of a 6-lane elevated corridor (from Zuari cable-stayed bridge) from km 531/934 to km 536/350, including construction of a second-level ROB above existing Konkan Railway Bridge from km 532/186 to 532/411.

→ Widening of existing 4-lane road from km 535/630 to km 536/250. ▷

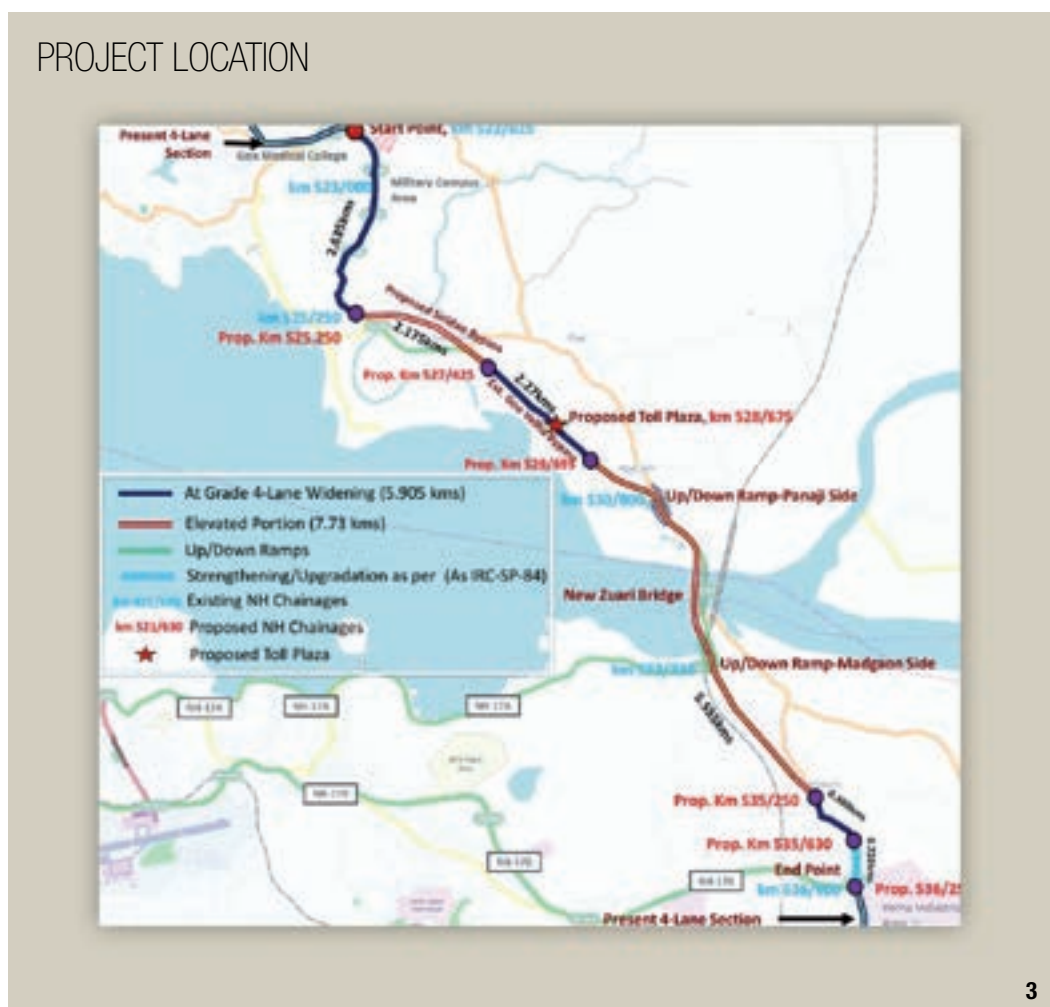
- Construction of up & down ramps at Agassiam junction (old NH-17) and Cortalim junction (NH-17A).
- Construction of 8+8-lane toll plaza at km 528/675.
- The project proposal also includes construction of 4-lane divided slip roads.
- From km 532/220 to km 535/350, construction of a footpath and RCC storm water drain is proposed for slip roads in built-up areas.

The planned structure across the Zuari estuary consists of two parallel cable-stayed bridges, separate yet on a single foundation, with a main span between towers of three hundred and sixty metres (360m) spanning a 55m-wide, 13.70m-high navigation clearance above a high tide level of 2.80m above datum and a low tide level of 0.30m below datum.

End spans one hundred and forty metres long on either side of the main span, including their counterweight, provide structural balancing (figure 4). The length of the main span and end spans were specific binding contract requirements. Also, no additional anchor pier was to be added on the end spans. Each deck is 27m wide, while the clear spacing distance between the decks is 17m, corresponding to 40m centre-to-centre.

The tower locations might seem counterintuitive at first sight as they do not correspond to the position of the piers on the existing concrete bridge. This oddity is explained by real concern about the effect that pile drilling could have on the decaying existing well foundations.

The possibility of a single deck carrying both four-lane carriageways was explored extensively, but structural



3 © DILIP BUILDCON

redundancy and traffic management concerns, i.e. the ability to divert traffic, as well as structural simplicity, finally tilted the decision in favour of separate decks.

Why not go all the way then and design separate pile caps? In fact, to allow for ship impacts separate foundations would have been designed, and

3- Project location.

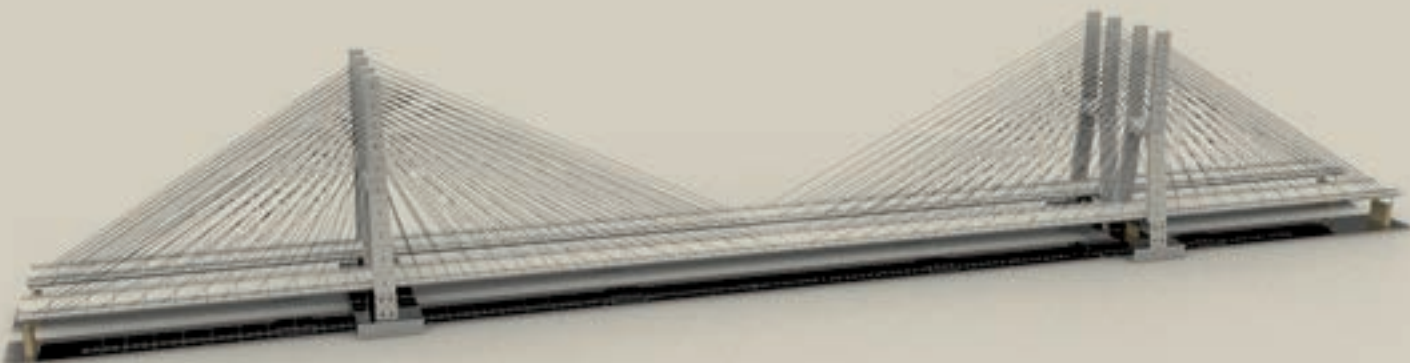
4- Bridge elevation view.

3- Implantation du projet.

4- Vue en élévation du pont.

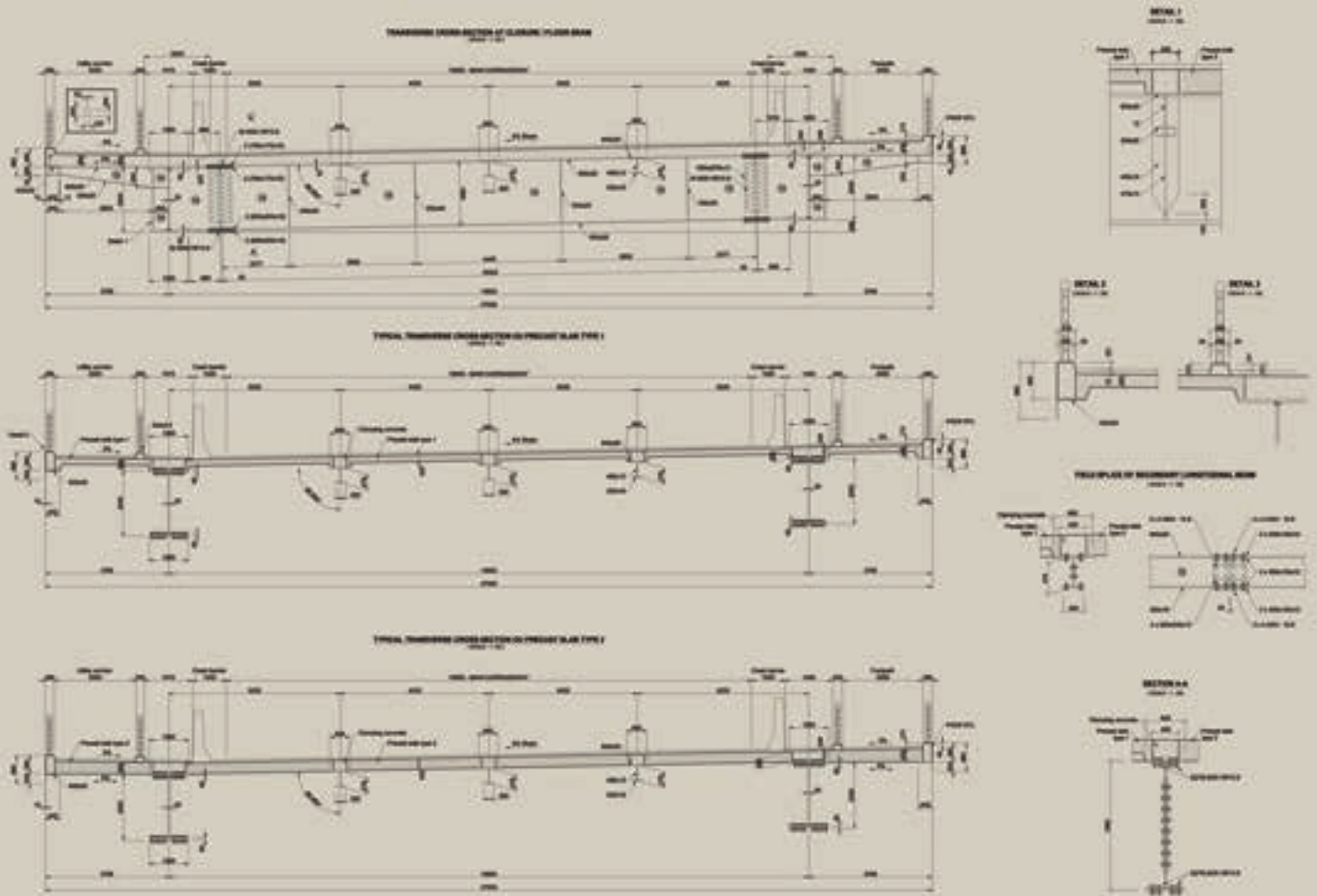
each separate pile cap would have to withstand this impact, whereas a single foundation design is governed by other loads, namely wind and earthquake. Another reason was the plan to construct a tower carrying an observatory and a restaurant in between the towers, now abandoned due to fire safety concerns.

BRIDGE ELEVATION VIEW



4 © DILIP BUILDCON

DECK TRANSVERSE CROSS SECTION



5
© DILIP BUILDCON

5- Deck transverse cross section.

6- Tower perspective view.

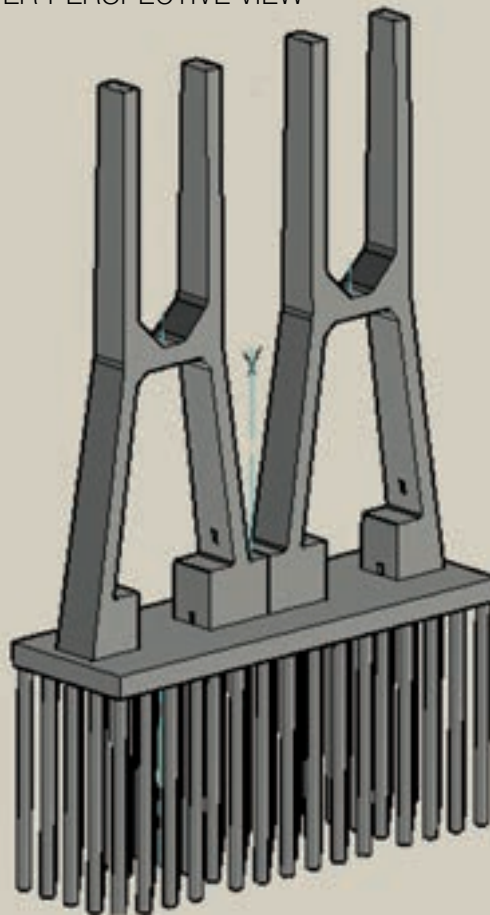
5- Section transversale du pont.

6- Vue en perspective du pylône.

AN EPC (ENGINEERING, PROCUREMENT AND CONSTRUCTION) CONTRACT

The high demand for modern infrastructure in India has driven strong growth in this form of contract, thus avoiding extra bureaucratic hurdles and speeding up the procurement process and delivery of the project, at least in theory. In practice, land acquisition proceedings remain a major hurdle regardless of the procurement process. The selected bidder, Dilip Buildcon Ltd (CEO Devendra Jain), the No.2 Indian construction company, and No.1 for road projects, is responsible for designing, engineering, procuring and building the Project as well as maintaining it during the 8-year Defect Liability Period.

TOWER PERSPECTIVE VIEW



6
© DILIP BUILDCON

Ingerop Conseil et Ingenierie, based in Rueil Malmaison, France, has teamed up with Infinity Civil Solution based in Ahmedabad, State of Gujarat, Republic of India, to provide the detailed design of the cable-stayed bridge.

A CONCEPT GUIDED BY SIMPLICITY AND EASE OF CONSTRUCTION

The design of long-span bridges is governed first and foremost by wind effects. Deck streamlining and aerodynamic stability have led the concept towards single- or multiple-cell box girders with high torsional stiffness. However, ease of construction based on local know-how and material availability should not be overlooked, and the contractor's preference was therefore for a simple concept and shape, i.e. a twin I girder (figure 5) connected by regularly spaced cross beams four metres apart. This choice of simplicity over streamlining is not without consequences for the bridge's aerodynamic design.

The composite concrete slab connected to the main girder and cross beam is a no-brainer, as respective materials properties are utilised efficiently, raising the neutral axis of the composite section.

The counterweight provision has been designed to perfectly balance the tower base moment under dead load and maintain compression under all service combinations, while a tie-down provides additional anti-uplift capacity under ultimate load combinations.

The counterweight is located on the outermost segment of the end span simply by completely filling the space between the lateral I girders. The same principle of simplicity was applied for the tower shape. Common types include single-shaft tower, A-shape, diamond-shape and H-shape. It is common knowledge that the A-shape increases torsional mode frequency by up to 30% by restraining relative displacement of the stay anchorage at the top of the tower. However, a simple H-shape tower (figure 6) with stays located in a vertical plane joining the tower leg and the deck's I girder was preferred for reasons of simplicity, cost and ease of construction without temporary struts. This simple concept has some drawbacks, specifically coupling of the deck's main flexural and torsional modes. Therefore, to provide some decoupling, with a target ratio of 1.5 between the two main frequencies, the legs are braced by an intermediate cross beam with high torsional stiffness, thus producing equal rotation in the legs at this level.

PILING

Soil investigations were carried out at the tower locations, revealing hard rock 10 to 25m below the seabed.

On the Agassaim side a 200m long temporary steel walkway has been constructed for logistic access to the pile cap, while on the Cortalim side the walkway is even longer.

A self-launching piling gantry and piling rigs will be adopted for piling the 70 permanent piles of diameter 2m supporting each foundation. The permanent steel casing extends to roughly 5m below the seabed. The steel casing does not have a structural function, but serves as an earthing electrode for lightning protection.

PILE CAP

The sheer size of the pile cap, 87.3x26.3x4m, presented a major challenge. A bespoke low-heat concrete mix with high GGBS content was developed specifically. Pile casting was performed in three separate pours connected by a 2m closure pour. The tensile load introduced by the tower leg inclination is catered for by prestressing perpendicular to the deck axis with a protection



7 © DILIP BULDCCO

level 3 as per FIB bulletin 33 (electrically insulated tendon in plastic duct). The pile cap is offset from the tower centre by around 1.5m towards the main span. The top pile-cap level is 2m above high-water level.

TOWER

As previously stated, the simple H-shape solution is not without challenges regarding the aerodynamic design (figures 1 and 6).

7- Tower steel frame inner core.

7- Noyau interne du cadre en acier du pylône.

The lower legs are gently inclined at 8.5 degrees from the vertical and converge towards the intermediate cross beam. The tower cross section is

a simple hollow rectangle of constant breadth (3.5m) and tapered in depth from 9m at the base to 6m at the top (figure 5).

No intermediate strut is required during construction, although the moment due to eccentricity is compensated for by jacking at cross-beam level using the beam supporting the formwork.

The upper legs, towering 100m above datum, are built using a standard self-climbing form around a steel

inner frame anchoring the stay cable (figure 7). This system allows accurate geometric adjustment of the cable along its catenary in the workshop, and balances the opposing horizontal components of the stay force. However, the relative stiffness of the concrete walls and steel ties is such that a fraction of the splitting force is transferred through the walls, in which case additional transverse prestressing becomes necessary. Wide massive pedestals (figure 6) sup-

8- Deck assembly.
9- Detail of stay anchorage connection.

8- Assemblage du tablier.
9- Détail du raccordement des haubans d'ancrage.

port the deck at the pylon centreline, because the fully suspended solution was discarded for reasons of construction safety. During deck erection, these pedestals will receive temporary bearings spaced 8m apart for stability, which is a more reliable system than a temporary steel tower. Moreover, during erection, major horizontal forces will be generated due to unbalanced stay forces, so a steel bracket will be welded underneath the deck lateral

girder to cater for this unbalanced load and transfer it to the pedestal. Finally, despite their massive appearance, an open view through the tower legs is planned.

STAY CABLES

Stay cables are made of a parallel strand system (PSS) manufactured in China. The main tensile elements of PSS stays are coated strands to PTI requirements, with the following fatigue strength: 2 million cycles with maximum stress of $0.45 F_{me}$ and stress variation of 300 MPa.

After fatigue loading, the strand shall develop at least 95% of the minimum specified tensile strength and a deflected tensile strength coefficient of no more than 20%, or a "One Pin Test" with a minimum tensile force of 80% of the actual ultimate tensile strength. Cable units, numbering 14 per side and per half main span, vary in size from 25 to 57 strands and are anchored according to a semi-harp system at 12m spacing at deck level and 2.5m spacing at the tower level.

According to the "Reference system for corrosion protection" in FIB bulletin 30, there are four protection layers for the strand in the free length, and individual HDPE-sheathed, hot-dipped galvanized and waxed strands are protected by three layers. The whole strand bundle of the stay cable is protected by the outer HDPE stay pipe.

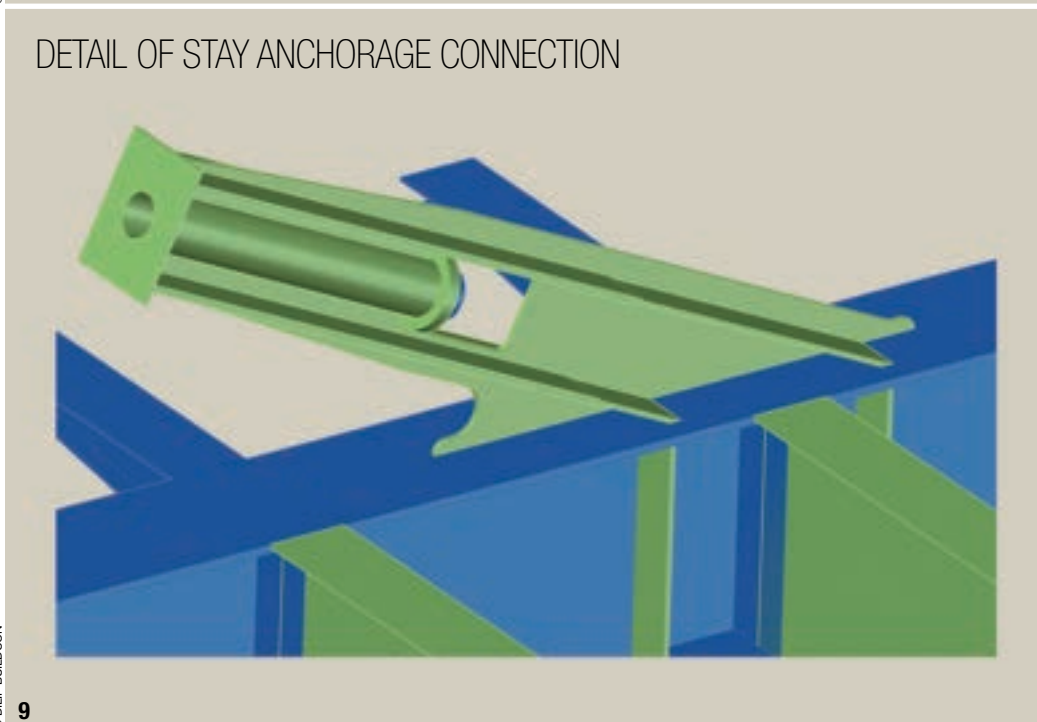
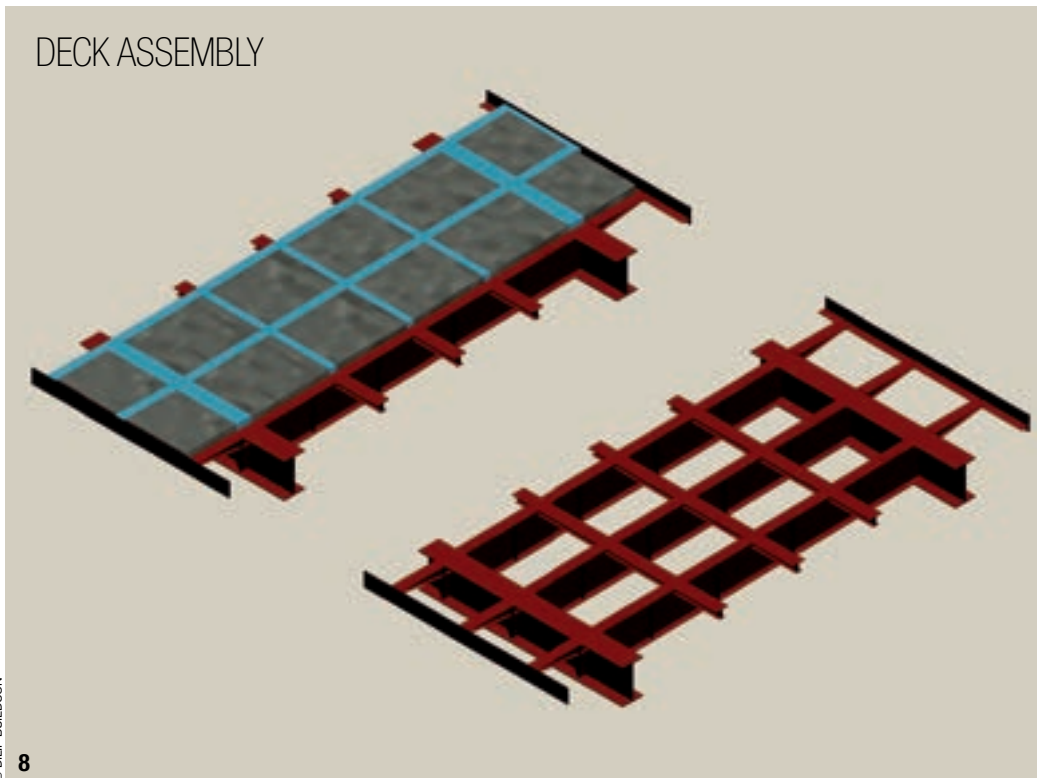
The outer HDPE pipes are extruded from high-density polyethylene with double helical ribs on the surface, as initially developed for the Normandy Bridge to mitigate the effects of vibration induced by wind and rain.

Cables are systematically fitted with elastomeric dampers to reach a target of 4% logarithmic decrement.

DECK

The deck carries a carriageway 16m wide, a footpath 2.5m wide and a utility corridor for a water pipe of diameter 1m. The deck form is a beam grillage of composite beams, with two main longitudinal girders at 19.5m centre and transverse composite beams at 4m centre of the same constant depth 2m connecting the longitudinal girders. Secondary elements, longitudinal stringers and cantilever cross beams complete this structure.

Longitudinal stringers have limited functions, reducing the size and weight of precast slabs and preventing lateral torsional buckling of the cross beam under lifting-frame loads.





10

© FORCE TECHNOLOGY

Mild constant temperatures above 20°C and below 35°C allow the use of a relatively standard steel grade, S355-J2. All steel panels are defined as class 2 or below according to Eurocode 3, except the web of the main girder.

The steel grade was increased to 460 on the most highly-stressed steel members, rather than change the thickness. The precast slabs were at least 9 months old prior to installation on the deck, thus greatly mitigating shrinkage effect (figure 8).

The stay-cable anchor frame (figure 9) is designed for the cable failure capacity and for multiple eccentricities due to rotations and horizontal loads such as wind.

DESIGN CHALLENGES AND NOVELTIES

WIND BUFFETING

For the first time, wind buffeting was approached through a direct-integration time-history analysis instead of a traditional modal analysis.

Based on site wind characteristics (rugosity, wind speed and turbulence), random-generated wind turbulence fields are produced and direct time-integration is performed using the Newmark method in a similar manner to earthquake engineering. These time-dependent wind fields, equivalent to EQ accelerograms, can, after integration, be used to extract the time-dependent movements of the cable-stay anchorages. A simple post-processor then computes the individual cable response to ensure neither parametric excitation nor excessive cable vibration can occur.

WIND-TUNNEL TESTING

Wind-tunnel testing, both sectional and full-scale, was carried out in the Force Technology facility in Denmark for both service and temporary configurations (figures 10 and 11).

Span-to-width ratio ($360/27=13$). For all tested cases, it was confirmed that the deck section model was aerodynamically stable above the design wind speed.

10- Wind tunnel testing in service stage.

11- Wind tunnel testing during construction stage.

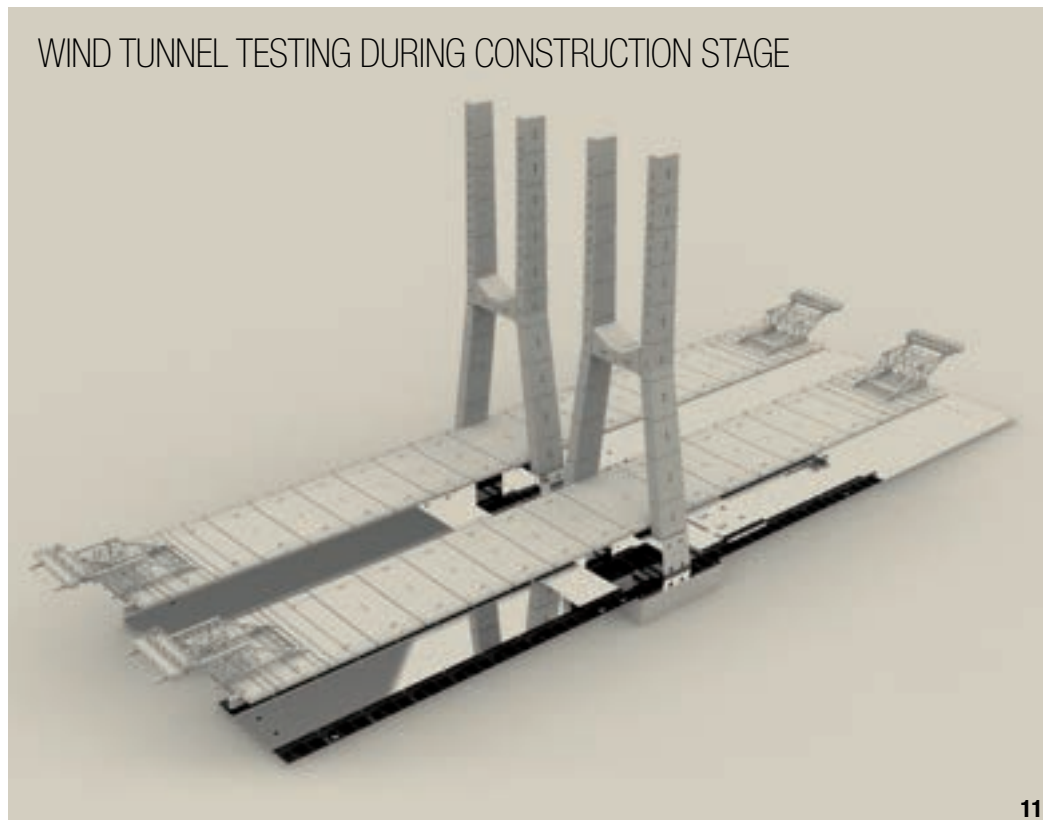
10- Essais en soufflerie en phase d'exploitation.

11- Essais en soufflerie en phase de construction.

The tests were performed up to wind speeds corresponding to at least 65 m/s (at deck level) in full-scale configuration.

Initially, barriers separating the sidewalk and stay anchor from the 4-lane carriageway were high concrete containment barriers, and significant vortex-induced vibrations were observed for the deck configuration with solid concrete barriers and the dummy model located downwind.

WIND TUNNEL TESTING DURING CONSTRUCTION STAGE



11

© FORCE TECHNOLOGY



12

© DILIP BUILDCON

The susceptibility of the deck section to vortex-induced vibrations was investigated in smooth and turbulent flow at 0° wind incidence angle. The vortex shedding tests were conducted with model inherent damping and increased damping at 0.7% of critical, and the maximum response amplitudes were reduced to approximately 1/3.

For the configuration where the solid concrete barrier was removed, no vortex-induced vibrations were observed. An open steel barrier was installed instead of the solid concrete barrier, which resulted in reduced vortex-induced vibrations compared to the configuration with the solid concrete barrier. The vibrations were then fully suppressed in turbulent flow.

CONCLUSION

Deliberately discarding highly streamlined deck solutions in favour of relatively

basic but proven solutions was neither without consequences nor without risk in the early stages.

It required some wind-tunnel test iterations to settle on a barrier model suitable for all applications, vehicle impacts and aerodynamic properties. However, in case any insurmountable problems were faced with regard to aerodynamic stability, a back-up solution was developed, by connecting the two separate decks at midspan to alter the frequency of the torsional mode. □

12- Construction site in February 2020.

12- Chantier au mois de février 2020.

MAIN QUANTITIES (2 DECKS)

BORED PILE DIA. 2.0m: 140 u
PILE-CAP CONCRETE: 18,500 m³
PRE-STRESSING FOR PILE CAP: 30 t
TOWER CONCRETE: 13,500 m³
TOWER REINFORCEMENT: 2,750 t
TOWER STRUCTURAL STEEL: 350 t
DECK STRUCTURAL STEEL: 12,000 t
DECK CONCRETE: 10,600 m³
DECK REINFORCEMENT: 1200 t
STAY CABLE: 1300 t

STAKEHOLDERS

CONTRACTOR: Dilip Buildcon
CEO: Mr. Devendra Jain
PROJECT DIRECTOR: Mr. Atul Joshi
DESIGNER: Ingerop
CIVIL INFINITY SOLUTION: Mr. Pankaj Goyal

ABSTRACT

UN NOUVEAU PONT À HAUBANS SUR LE FLEUVE ZUARI DANS L'ÉTAT DE GOA EN INDE

ERWAN VICAT, INGEROP

Ce tablier double, ayant une travée principale de 360 m de long et dont chaque tablier porte une chaussée à quatre voies, est en cours de réalisation au-dessus de l'estuaire du fleuve Zuari. Son concept assez élémentaire, certains diraient même désuet, est néanmoins adapté aux contraintes et aux compétences locales. Une bipoutre mixte en I est portée par 2x28 câbles haubanés sur un pylône en H s'élevant 100 m au-dessus du niveau de la tête de pieu. Des conditions climatiques et sismiques clémentes permettent le recours à un concept de pont flottant, mais avec de forts dispositifs amortisseurs reliant le tablier au socle du pylône. La réalisation se poursuit, et malgré certains problèmes d'acquisition de foncier et des retards imputables à l'épidémie du Covid 19 qui limite la disponibilité de main-d'œuvre, l'ouverture de l'ouvrage prévue en 2021 demeure un objectif atteignable. □

UN NUEVO PUENTE ATIRANTADO SOBRE EL RÍO ZUARI, EN EL ESTADO DE GOA, INDIA

ERWAN VICAT, INGEROP

Se está construyendo una nueva autovía de doble tablero, de cuatro carriles cada uno, con una luz de 360 m, que cruzará el estuario del río Zuari River. Su diseño es relativamente básico, algunos pensarán que anticuado, pero se ajusta a las exigencias y a las competencias locales: una doble viga en I de material compuesto, soportada por 2x28 cables anclados en un pilón en forma de H que sobresa 100 m del nivel de la cabeza del pilote. Las benignas condiciones climáticas y sísmicas permiten utilizar un concepto de puente flotante, reforzado con unos dispositivos de alta amortiguación que conectan el tablero al pedestal de la torre. La construcción está en curso, y pese a algunos problemas en la adquisición de terrenos y a las demoras inducidas por la limitada disponibilidad de mano de obra a causa de la Covid-19, la inauguración de la obra en 2021 sigue siendo un objetivo asequible. □



1

© [HTTPS://WWW.AECON.COM/OUR-PROJECTS/CURRENT/FG-GARDINER-EXPRESSWAY-REHABILITATION](https://www.aecon.com/our-projects/current/fg-gardiner-expressway-rehabilitation)

RECONSTRUCTION PARTIELLE DU GARDINER EXPRESSWAY DE TORONTO - PRÉFABRICATION DES TABLIERS

AUTEURS : CARLO CATTELAN, DIRECTEUR DE PROJETS, TECHNOPREF CANADA - CLÉMENT HONTAAS, DIRECTEUR DE TRAVAUX, CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC. - BENJAMIN FALALA, INGÉNIEUR MÉTHODES, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION - ROMAIN LEONARD, DIRECTEUR TECHNIQUE, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION

LE PONT-AUTOROUTIER FREDERICK G. GARDINER EXPRESSWAY A ÉTÉ CONSTRUIT ENTRE 1955 ET 1966. L'AUTOROUTE PERMET LES DÉPLACEMENTS ENTRE LES BANLIEUES DE L'EST ET DE L'OUEST DE TORONTO EN PASSANT PAR LE CENTRE-VILLE. IL EST D'UNE LONGUEUR DE 18 km ET PERMET LA CIRCULATION SUR HUIT VOIES. LA RÉHABILITATION COMPLÈTE DU PONT SE FERA PAR SECTION SUR UNE DURÉE DE DIX ANS.

DESCRIPTION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE - PHASAGE

Le projet de réhabilitation du pont autoroutier "Gardiner Expressway" au centre-ville de Toronto est divisé en sept phases. La première phase est une section de 1,1 km du pont de la rue Cherry à la rue Jarvis, incluant les deux rampes. Cette phase a démarré en 2018 et prendra fin début 2021. Le projet consiste à retirer des anciennes poutres du pont et installer des nouvelles poutres préfabriquées sur un site désigné à cet effet.



© [HTTPS://WWW.THESTAR.COM/YOUTHORONTO/2019/04/04/CITY-ARCHIVES/2016/07/07/GARDINER-EXPRESSWAY-BIG-DADDY-S-GIFT-TO-TORONTO.HTML](https://www.thesstar.com/youthoronto/2019/04/04/city-archives/2016/07/07/gardiner-expressway-big-daddy-s-gift-to-toronto.html)

2

1- Tente de préfabrication.
2- Le "Gardiner Expressway" il y a plus de 50 ans.

1- Precasting tent.
2- The Gardiner Expressway more than 50 years ago.

SCHÉMA GÉNÉRAL DE L'OUVRAGE COMPLET



3

Le site de préfabrication est installé à moins d'un kilomètre du site d'installation. Le budget pour ce projet est de 248 M\$CAN (figure 3).

Construction Demathieu & Bard travaille en collaboration avec Aecon sur la préfabrication des panneaux. L'installation de ces panneaux sur le pont est effectuée par Aecon. Il y a 386 panneaux préfabriqués et 26 panneaux qui seront coulés en place. En premier lieu, les voies Nord du pont sont remplacées et ensuite les voies du sud. Cela permet

3- Schéma général de l'ouvrage complet.

4- Enlèvement d'une poutre.

3- General diagram of the complete structure.

4- Removing a girder.

de toujours avoir deux voies ouvertes dans chaque sens.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE L'OUVRAGE (PILE, TABLIER...)

La fondation et les piliers ont été inspectés et la décision a été prise de garder ces derniers intacts. Ils sont en bon état, seulement quelques réparations seront nécessaires là où l'acier est apparent.

Ce mandat sera effectué par la ville de Toronto.

Les anciennes poutres sont découpées et enlevées à l'aide de deux grues. Elles sont déposées sur des camions et emportées vers un autre site pour être démolies. Les chevêtres sont maintenus ou réparés si nécessaire. Ensuite, de nouveaux bossages sont préparés (figure 4).

Les nouveaux panneaux sont préfabriqués sur le site de préfabrication installé à proximité. Sur ce site il y a quatre grandes tentes, dont deux sont pour le coffrage et deux pour la cure des panneaux. Il y a six types de panneaux. Ceux-ci varient en longueur de 16 m à 42 m et en largeur de 1,5 m à 2,5 m. Le poids des panneaux varie de 30 t à 135 t. Les panneaux possèdent entre 2 et 10 t d'armatures en acier inoxydable. Environ 8000 m³ de béton sont coulés pour la fabrication des panneaux, soit entre 10 m³ et 40 m³ par panneau selon les dimensions.

Les poutres sont quasiment toutes uniques en dimensions. Les caractéristiques de chacune demeurent les mêmes. Les poutres sont constituées de deux faisceaux, d'un diaphragme, d'anneaux de levage, de goujons de cisaillement, d'une plaque d'appui et de plaques d'appui temporaire (figure 1). Les nouveaux panneaux sont apportés sur le pont par les camions et installés avec les mêmes grues. Les joints sont formés et coulés en place avec un matériel de haute performance "UHPC". Les murs barrières sont formés et coulé sur place. Enfin, une couche d'imperméabilisation est appliquée avant l'asphalte, suivie de la peinture et de l'installation des luminaires (figure 5).

ENJEUX

Ce projet de réhabilitation a pour objectif d'être complété dans un temps restreint. L'envergure d'un projet de ce type nécessiterait plusieurs années avec les méthodes traditionnelles de coffrage, tel que les C-49. À cet effet, la technologie des coffrages hydrauliques a été mise de l'avant avec l'installation d'un site de préfabrication de panneaux. De plus, une méthode de cure accélérée est utilisée avec la vapeur à température contrôlée.

Ces méthodes réduisent drastiquement le temps de fabrication et permettent d'effectuer une installation des nouveaux panneaux plus rapidement en les déplaçant du site de préfabrication au pont. Ainsi, les fermetures de route sont minimisées et planifiées en dehors de l'heure de pointe. Ces ateliers sont installés sous tentes.



4



© HTTPS://WWW.AECOM.COM/OUR-PROJECTS/FG-GARDINER-EXPRESSWAY-REHABILITATION-(SECTION-1)

CONTRAINTES DE RÉALISATION

Le cycle de fabrication implique un temps restreint pour chaque opération : le béton doit atteindre la résistance de 25,4 Mpa en 16 à 20 heures. Le projet continue durant toutes saisons. L'hiver est critique vis-à-vis du temps de cure des panneaux.

SOLUTIONS TECHNIQUES RETENUES POUR LA PRÉFABRICATION DES TABLIERS

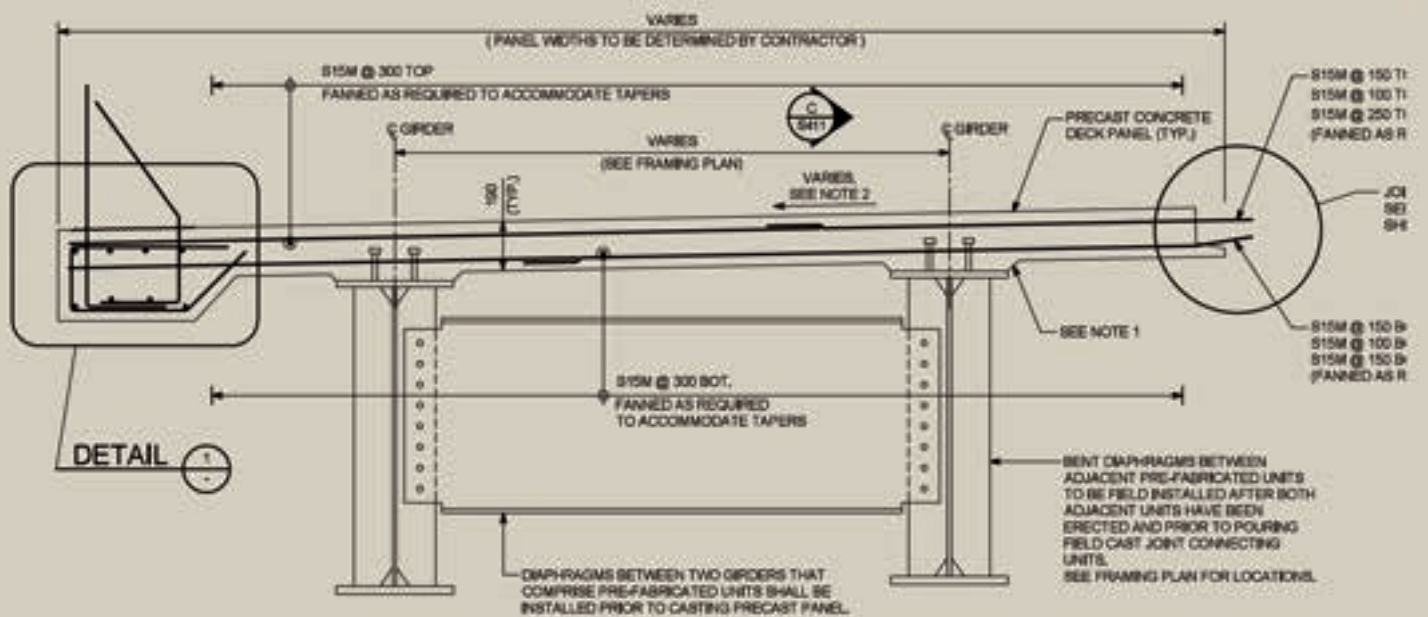
Le Gardiner étant l'une des artères principales de Toronto, si ce n'est la plus importante, toute fermeture de voies, même temporaire a des impacts majeurs. Par conséquent, l'entrepreneur est responsable du respect des

- 5- Pose d'une poutre.
- 6- Coupe transversale type.

- 5- Placing a girder.
- 6- Typical cross section.

délais et des contraintes de fabrication très sévères, sous peine de pénalité extrêmes (à hauteur de 400 000 \$CAD par jour de retard). Il a donc été nécessaire de considérer d'autres options que les méthodes de fabrication de pont traditionnelles. La concentration des activités de préfabrication sur une zone à l'écart permet

COUPE TRANSVERSALE TYPE



de restreindre au minimum les activités ayant place directement sur site, réduisant ainsi les périodes de fermeture de l'ouvrage existant. Toutefois, certaines contraintes sont à respecter pour mettre en place ce concept de préfabrication des tabliers. Parmi lesquelles, la nécessité de constamment garder les éléments préfabriqués en conditions d'appuis réels (dans le même cas de répartition qu'à leur position définitive), le respect des contraintes dimensionnelles très serrées sur le produit fini (+/- 5 mm sur toutes les dimensions), le respect des délais de fabrication très courts (l'ouvrage à préfabriquer en un an), et travailler au centre-ville de la

7- Vue isométrique de l'outil pour le coffrage des encorbellements.

8- Coupe transversale de l'outil pour le coffrage des encorbellements.

7- Isometric view of the cantilevering sectional formwork.

8- Cross section of the cantilevering sectional formwork.

plus grande agglomération du Canada. À ceci s'ajoute un hiver dur et long qui paralyse les activités extérieures, et le manque d'expérience sur les méthodes de construction accélérées (type équipement mobile) dans la profession, au Canada.

Demathieu Bard a donc proposé à son partenaire Aecon de développer un outil coffrant à système hydraulique répondant spécifiquement aux contraintes de projet. L'outil coffrant, ou coffrage hydraulique, est composé de 14 modules d'une longueur fixe de 8,5 m, tous identiques, pouvant être alignés les uns après les autres sans ordre d'importance afin de s'adapter à toutes les longueurs de poutre et de

rentrer dans l'espace disponible des bâtiments.

La décision a été prise d'assembler l'outil en 4 lignes de fabrication, composées de 4 modules pour 2 d'entre elles et de 3 modules pour les 2 autres. Les lignes courtes peuvent accueillir des poutres de types de 6 à 4. Et les lignes longues des poutres de types 6 à 2. Les poutres de type 1 nécessiteraient une ligne de 5 modules, mais les bâtiments de fabrication ne permettent pas un tel assemblage.

DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL COFFRANT

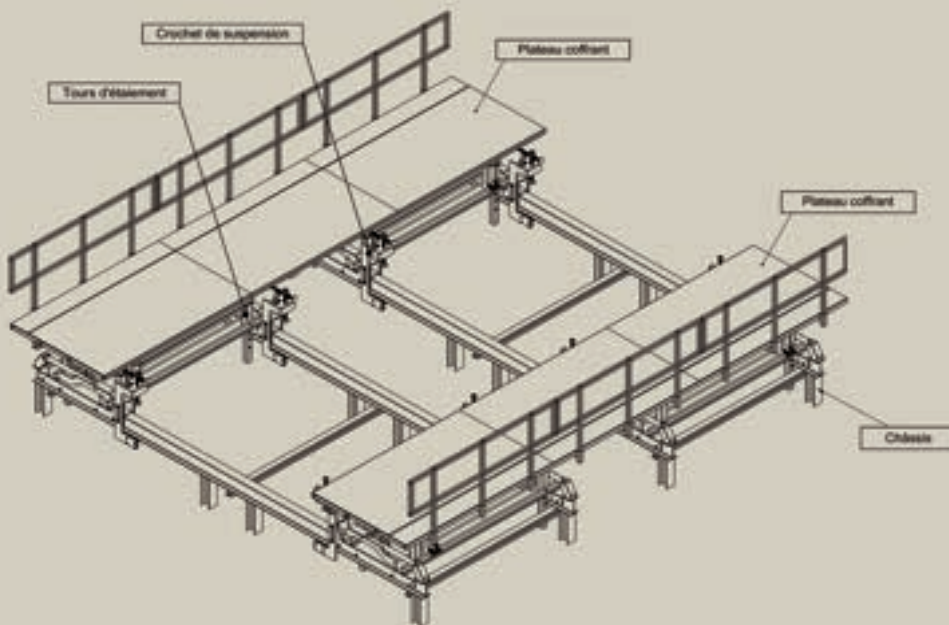
La grande variation de géométrie entre les tabliers, le délai de fabrication court et l'usage intensif des coffrages ont conduit à la conception d'un coffrage universel robuste et simple d'utilisation. Les charpentes bipoutres, assemblées dans un atelier à quelques kilomètres de la zone de coffrage, sont amenées une à une et stockées sur l'aire de préfabrication. Elles sont composées de 2 poutres (girders) espacées par des entretoises. Les 410 charpentes sont quasiment toutes différentes. Les variations se font essentiellement au niveau des poutres. Leur hauteur varie entre 0,9 et 1,7 m d'une charpente à l'autre. Les poutres sont rarement parallèles, leur entraxe peut varier de 50 cm entre ses deux extrémités. L'entraxe maximum d'une charpente est de 2,6 m et le minimum est de 1 m. La pente transversale est variable de 2 à 6%.

Les contreflèches peuvent être différentes d'une poutre à l'autre sur une même charpente du fait des différentes longueurs d'encorbellement reprises. Les dimensions des charpentes sont relevées sur la zone de préfabrication afin de rester dans les tolérances malgré le cumul des erreurs de fabrication. Le hourdis, quant à lui, a moins de variation. Son épaisseur de 19 cm est constante sur les tabliers courants. Les tabliers de rive comportent une surépaisseur de 16 cm sur un de leurs côtés pour reprendre les surcharges dues au trottoir en porte-à-faux (figure 6).

Pour compenser les contreflèches, limiter les fissurations et éviter les sur-contraintes dans la structure, la charpente doit être replacée, lors du bétonnage, dans ses conditions d'appuis définitives. Pour que la surcharge de béton soit appliquée à la charpente, le coffrage doit y être suspendu.

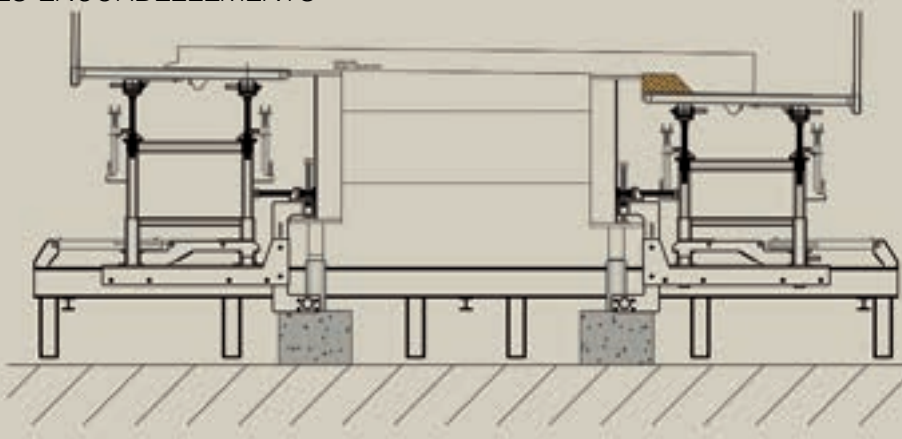
L'ensemble de ces contraintes a amené à réaliser deux types différents de coffrage.

VUE ISOMÉTRIQUE DE L'OUTIL POUR LE COFFRAGE DES ENCORBELLEMENTS



© DR 7

COUPE TRANSVERSALE DE L'OUTIL POUR LE COFFRAGE DES ENCORBELLEMENTS



© DR 8

D'une part, un coffrage entre poutres traditionnel en bois fixé sur la charpente, qui permet de travailler en cotes bloquées et d'être adapté à chaque charpente. D'autre part, un coffrage d'encorbellement universel qui doit s'adapter rapidement à toutes les géométries et être en appui sur la charpente, tel un équipage mobile d'un ouvrage mixte. Pour ce dernier, afin d'éviter la manutention répétitive d'un équipage mobile, on a opté pour un plateau coffrant sur tours d'étalement, suspendu aux bipoutres (figure 7).

La longueur des plateaux est de 8,5 m pour s'adapter à toutes les longueurs de charpente. Ceux-ci sont composés d'une structure portante fixe et d'une peau de coffrage coulissante qui permet de s'ajuster à la différence d'entraxe des poutres. Les plateaux sont en appui sur des tours surmontées de fourches rotulées et réglables en hauteur qui permettent des réglages fins liés aux contre-flèches et aux devers. Les tours possèdent des pas de réglage pour compenser chaque hauteur de poutre (7 au total). Elles sont en appui sur un châssis permettant le réglage transversal des tours. Enfin, le châssis est muni de pattes afin de se suspendre à la semelle inférieure des poutres de la charpente.

L'ensemble des réglages est effectué à l'aide de nombreux vérins hydrauliques pilotés par une centrale et une console de répartition. Une fois le réglage finalisé, l'ensemble est bloqué mécaniquement par des axes ou des écrous. La charpente est quant à elle placée sur 4 vérins hydrauliques d'une course de 300 mm. Ainsi, en une seule opération, une fois les réglages terminés, l'ensemble de la charpente est vériné et entraîne avec elle les coffrages (figure 8).



9

© DR



10

© DR

CYCLE DE PRODUCTION - CYCLE DE VIE D'UN PANNEAU

Une à deux semaines avant la date de fabrication, les poutres sont livrées à l'aire de préfabrication. À leur arrivée sur chantier, les bipoutres sont inspectés visuellement pour détecter tout dommage aux soudures ou à la charpente métallique. Certains bipoutres sont partiellement ou complètement peints d'une peinture époxy pour assurer l'esthétique de l'ouvrage. La peinture époxy doit être protégée et au besoin réparée à la fin du cycle de production. Après inspection visuelle, les bipoutres sont mesurés par des topographes. Les dimensions réelles sont retransmises à la firme d'ingénierie pour une mise à jour des plans de fabrication. Les poutres sont scannées pour obtenir une

9- Outil en attente d'un bipoutre.

10- Bipoutre positionné dans l'outil d'encorbellement.

11- Opération de bétonnage.

9- Tool awaiting a double girder.

10- Double girder positioned in the cantilevering sectional formwork.

11- Concreting operation.

image virtuelle réelle de la pièce. Les bipoutres sont stockés jusqu'à la date de démarrage du cycle de préfabrication. La première partie du coffrage construite est la zone entre les deux poutres, appelé coffrage interne. La partie coffrante en contreplaqué repose sur des madriers eux-mêmes déposés sur des vérins à vis. Ainsi le réglage des vis permet de contrôler l'élévation et l'inclinaison du coffrage au complet. Une fois le coffrage terminé, le bipoutre est transporté à l'aide d'un pont roulant dans les bâtiments de préfabrication sur l'une des 4 lignes de coffrages hydraulique (figure 9).

Le bipoutre est déposé sur les 4 vérins d'appui, qui sont déplacés et positionnés au préalable de chaque poutre. Une fois la poutre en place, l'outil coffrant est



11

©



© DR 12

actionné par les opérateurs (figure 10). Au terme des étapes de réglage (qui sont détaillées à la partie suivante) le bipoutre est simplement supporté sur ses 4 points d'appui temporaire et les deux coffrages, interne et hydraulique, sont ajustés à leurs élévations finales tout en étant eux-mêmes supportés par le bipoutre.

Des coffrages en plastique sont utilisés pour coffrer le hourdis sur les longs côtés. Les coffrages sont en plastique extrudé qui a ensuite été entaillé pour accueillir les barres d'armatures qui débordent de part et d'autre du hourdis (là où les joints entre panneaux seront coulés). Les coffrages se décomposent en 3 parties :

- La pièce du bas, de 50 mm de haut, entaillée pour s'adapter au premier tapis d'armature ;
- La clé au centre, de 120 mm de haut, entaillée pour s'adapter au second tapis d'armature ;
- La pièce supérieure, de 20 mm de haut, qui est installée une fois toute l'armature installée.

Au total, le coffrage mesure 190 mm de haut (hauteur du hourdis), le pas entre les entailles dépend du type de panneau (de 100 mm à 250 mm) et la longueur des pièces coffrantes extrudées varie de 1 125 mm à 1 500 mm, dépendant du pas des entailles. Le coffrage plastique est tenu à l'outil coffrant par des aimants qui sécurisent sa position dans le plan horizontal. La partie inférieure et la clé du coffrage sont installées, puis l'armature est déposée dans le coffrage.

12- Manipulation d'un bipoutre d'environ 20 t avant bétonnage par un des portiques.

13- Levage tandem pour stockage d'un panneau de tablier une fois la dalle réalisée.

12- Handling a double girder weighing about 20 tonnes before concreting by one of the gantry cranes.

13- Tandem lifting of a deck panel for storage once the slab has been completed.

L'armature est exclusivement composée de barres de 15 mm en acier inoxydable. Elle est installée par le sous-traitant Mansteel. Une fois celle-ci en place, la dernière partie du coffrage est positionnée.

À ce stade, le panneau est prêt pour être inspecté par un représentant du bureau d'ingénierie, de l'entrepreneur et du client. Après validation par toutes les parties, le bétonnage commence. Le béton est mis en place par camion-pompe. Le camion entre dans la tente et les camions-toupies s'engagent dans le bâtiment de fabrication pour se décharger dans la trémie du camion-pompe.

Les panneaux sont coulés à un rythme de 30 m³/h. Le béton placé est nivelé par une règle vibrante qui glisse sur la

surface supérieure des coffrages en plastiques. L'épaisseur de 190 mm est ainsi uniformément maintenue sur l'ensemble du panneau. Une fois le béton placé, le hourdis est recouvert de tissu trempé depuis la veille. Puis une couverture de plastique imperméable et isotherme est descendue sur l'ensemble de l'élément poutre et coffrage afin de l'isoler.

Les conduites de vapeur qui sont installées au sol sous l'outil coffrant amènent la vapeur pour démarrer le cycle de cure qui dure de 16 à 20 heures. À terme, le panneau préfabriqué aura atteint 70% de sa résistance finale, à savoir 24,5 MPa. Une fois la résistance en compression de 24,5 MPa atteinte, le panneau est décoffré.

Le panneau est ensuite lavé à jet haute pression pour nettoyer les fines tout au long des 4 côtés du hourdis (ceci assure que les joints entre panneaux qui seront coulés après installation auront une adhérence optimale aux éléments préfabriqués).

Le panneau est toujours supporté sur les 4 vérins d'appui et l'outil coffrant est toujours posé sur la poutre. Ce n'est qu'une fois le levage terminé que le panneau est redescendu afin de reposer l'outil coffrant sur le plancher. Toutefois le panneau lui-même reste en tout temps simplement supporté sur les 4 vérins d'appui.

Le panneau est ensuite levé par 2 points roulants mobiles pour être amené de la ligne de coffrage à une des 4 lignes de cure où il sera de nouveau recouvert d'une bâche de plastique, ▷



13
© DR



pour une cure secondaire à la vapeur qui dure jusqu'à ce que le béton ait atteint une maturité de 4 jours. Au terme de la seconde cure, le panneau est prêt pour une inspection qualité. Le fini du béton, la qualité du lavage, le respect des dimensions du hourdis et la déflexion du bipoutre après bétonnage sont inspectés. Après validation le panneau préfabriqué est transporté dans l'aire de stockage.

En règle générale les panneaux sont stockés de 3 à 4 semaines avant d'être livrés. Toutefois des changements de planning inattendus peuvent induire des périodes de stockage plus longues.

Pour la livraison, le panneau est levé par 2 ponts roulants qui le déposent sur un fardier qui le transporte jusqu'au pont. En général un panneau est installé à sa position définitive 3 heures après avoir quitté sa zone de préfabrication.

Toutes ces étapes ne se réalisent pas les unes après les autres mais en simultané. Chaque jour, 2 panneaux sont apportés dans un bâtiment de fabrication, 2 panneaux sont bétonnés, 2 panneaux sont inspectés après la cure et 2 panneaux sont stockés prêts à être livrés. Les panneaux sont ainsi fabriqués deux par deux alternativement dans le premier bâtiment de fabrication puis dans le deuxième le jour suivant.

CYCLE DE 48H ET CHEMIN CRITIQUE

Quatre lignes de productions sont disponibles entre le bâtiment numéro 1 et 3 (bâtiments 2 et 4 sont dédiés à la cure secondaire) (figure 11). Toute opération qui a lieu sur l'une des lignes de production est sur le chemin critique puisque tout imprévu peut potentiellement retarder le bétonnage du panneau. Les 2 panneaux présents dans la même tente sont bétonnés en même temps. Voir le tableau A pour la décomposition des étapes critiques.

Un cycle complet dure 48h par panneau par ligne. Avec 4 lignes sur une semaine de 5 jours, la capacité de production est donc de 10 panneaux par semaine.

PHASAGE DE RÉGLAGE DE L'OUTIL COFFRANT

L'outil coffrant est mis en place et utilisé lors des phases de réglage et de

14- Chargement d'un panneau sur remorques indépendantes.

14- Loading a panel on independent trailers.

coffrage puis au décoffrage. Lors du bétonnage, tout le système hydraulique est verrouillé en place par un blocage mécanique (écrou, goupille, vis magot). Ainsi aucun déplacement de l'outil qui serait dû à un relâchement de pression n'est possible lors du bétonnage.

LIVRAISON DES BIPOUTRES ACIERS

Le chantier étant situé en plein centre-ville, la cadence des livraisons par convois exceptionnel est rythmée par

les autorisations de circulation. L'entrée dans la ville est interdite aux heures de pointe.

Les poutres jumelées arrivent par la route depuis les ateliers de fabrication situés au Québec, déjà assemblées et prêtes à recevoir leur dalle de béton. On utilise des remorques-plateaux extensibles, très courantes en Amérique du Nord. Leur masse varie de 11 à 40 t pour 1,70 m de hauteur (figure 12).

MANIPULATION DES PANNEAUX SUR LE SITE DE PRÉFABRICATION

Toutes les opérations de levage, de déchargement des camions, et de manipulations des panneaux de tablier coulés sont réalisées à l'aide de portique sur pneus. Grâce à deux treuils indépendants, les levages sont très précis. La capacité de levage est de 90 t par machine, soit une capacité à déplacer une charge de 180 t en levage tandem. Les portiques roulants sont montés sur des roues équipées de pneumatiques, de 2 m de diamètre, capables d'absorber les imperfections de la plateforme de roulage. L'autre avantage de ces grandes roues est leur remarquable motricité en tout temps. Que ce soit sur neige, sur glace ou dans 10 cm de boue, la manipulation des portiques est toujours aussi aisée grâce aux 4 roues motrices et directrices. La conduite de ces engins se fait par des opérateurs aux sols, qui ont la liberté de

TABLEAU A : LES ÉTAPES CRITIQUES SE DÉCOMPOSENT COMME SUIV

Réglage des équipements hydrauliques	4 heures
Coffrage	10 heures
Pose de l'armature	8 heures
Bétonnage	4 heures
Cure	17 heures
Décoffrage	5 heures



© AECOM CONSTRUCTION

15- Aperçu de l'ensemble de la zone de préfabrication. Au fond le chapiteau blanc abrite les tables coffrantes, le bétonnage, et la cure humide.
16- Schéma de la problématique de stockage en empilement.

15- General view of the entire precasting area. The white tent in the background houses the casting tables and concreting and moist curing facilities.
16- Diagram of storage on stacks.

marcher tout autour de la machine. Les manœuvres délicates telle que le passage des portiques à travers les tentes ou la remontée des rangées de piles de panneaux, sont guidées par des *spotters*. Tous les opérateurs sont en contact radio permanent. Il n'existe aucun angle mort.

Le déchargement des bipoutres ainsi que l'amenée sur les tables hydrauliques ne nécessitent qu'un seul portique. Le portique se positionne au milieu de la poutre, des élingues en acier entourent simplement les PRS. La charpente est apportée directement à l'intérieur des installations.

Les portiques enjambent les tables de coffrage hydraulique. La translation sur les roues et le chariotage latéral permet un travail au centimètre près. Cette précision est particulièrement requise pour ne pas heurter l'outil de coffrage, et c'est avec douceur qu'il faut déposer la charpente sur des vérins hydrauliques (figure 13).

La complexité revient au moment du levage des panneaux bétonnés. Pour ne surtout pas induire de flexion inversée et provoquer un risque de fissures pour le béton, le levage est réalisé par deux portiques simultanément. Les anneaux de levage sont soudés sur la charpente aux quatre coins des panneaux mixtes. Les panneaux mixtes se retrouvent donc soumis à des contraintes similaires à celles qu'ils auront lorsqu'ils

seront installés. De plus, le léger balan des câbles efface tout effort horizontal ou vertical ainsi que les mouvements parasites des déplacements. Enfin, il faut pouvoir être capable de lever les panneaux en prenant en compte la dissymétrie propre à chacune des poutres. Pour cela, l'emploi d'un palonnier ajustable sur mesure a été prévu. Une longue vis sans fin permet de faire coulisser les oreilles de

levage. Avec l'utilisation de ce palonnier, les panneaux sont toujours levés suivant leur exact centre de gravité (donc à l'horizontale).

TRANSPORT DES PANNEAUX BÉTONNÉS VERS LE LIEU D'INSTALLATION

Une fois leur cure terminée, les panneaux de tablier mixtes sont acheminés par voie terrestre vers le pont en réno-

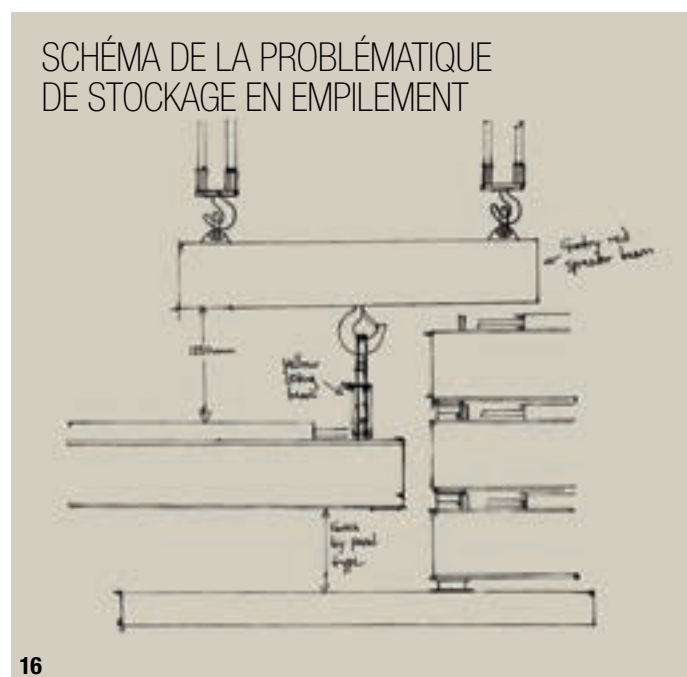
vation pour y être installés. Un transporteur spécialisé en convoi hors norme a su répondre aux exigences en mettant à disposition des remorques modulaires tirées par un tracteur routier.

Pour commencer, la longueur des remorques a dû être adaptée afin de pouvoir supporter correctement les panneaux. Les remorques-plateaux multi-essieux, assises sur des essieux pendulaires à ajustement hydraulique, ont été employées afin d'assurer un transport optimal au centre-ville de Toronto. Leur plus gros atout est le nivellement en temps réel dans les deux directions des remorques plateaux, et ce à vitesse de circulation ordinaire. De cette manière, indépendamment de l'excentrement du centre de gravité des panneaux, les essieux épousent les inégalités de la route.

Les remorques modulaires dont tous les essieux sont directeurs permettent des rayons de braquage inhérents à la circulation urbaine bien que leur longueur dépasse les 30 m. Pour les panneaux de dimensions maximum (plus de 40 m), des remorques indépendantes sont utilisées (figure 14).

ORGANISATION DE LA COUR DE STOCKAGE

Les panneaux devant être curés pendant un certain temps avant d'être mis en place sur le pont, un stockage tampon est nécessaire.



16
 © CDB TECHNO

Des dispositions sont prises pour avoir une marge de manœuvre en cas d'arrêt soudain de la production. La zone d'entreposage représente les deux tiers du site de préfabrication en termes de surface (figure 15).

Néanmoins, la capacité de stockage est de 125 panneaux, ce qui équivaut à 12 semaines de production. La cour est uniquement constituée de granulats et de béton concassé pour une épaisseur totale de 1,35 m environ.

Dans le but de reprendre les charges ponctuelles des points d'appui des panneaux sans tassements, des dalles de bétons de 5,40 m de côté et de 38 cm d'épaisseur, simplement posées sur la plateforme, permettent d'avoir une surface plane pour travailler et caler les panneaux avec précision (à noter que les dénivellations des bipoutres exigent une mise à niveau systématique réalisée par des géomètres).

Dans ces dalles sont insérés des anneaux de levage, ce qui permet de les déplacer facilement pour ajuster la dimension des emplacements de stockage.

De façon logique, le planning de production se base sur celui de pose et, comme la longueur des panneaux varie, la zone de stockage qui ne peut pas contenir toute la production se doit d'être modulable.

Cette zone de stockage est disposée en rangées, faisant directement face aux tentes de préfabrication pour rendre les manœuvres de déplacement plus faciles et rapides. La largeur de 9,50 m des portiques leur permet de s'engager dans les allées et de survoler les panneaux.

Pour optimiser davantage la capacité d'accueil, les panneaux mixtes sont empilés jusqu'à trois niveaux, hauteur limitée par le dégagement nécessaire aux portiques.



17
© DR

17- Désalignement des panneaux pour optimiser le stockage.

17- Panel misalignment for optimised storage.

Un problème est apparu par la suite au moment de déstocker les panneaux. Au moment de récupérer un panneau au niveau 0 juste à côté d'une pile de 3 panneaux de hauteur, le palonnier des portiques butait sur la pile juxtaposée, empêchant de reprendre ou même de

déposer un panneau à cet endroit et condamnant un précieux emplacement (figure 16).

La solution trouvée pour remédier à ce problème est de positionner les panneaux en biais sur les dalles de béton. De cette manière le palonnier des portiques est décalé par rapport aux panneaux adjacents, et peut donc descendre sans restriction (figure 17). La gestion de la zone de stockage est un point clé dans la productivité de la préfabrication. Des panneaux rangés en désordre demanderaient les déplacements additionnels, coûteux en temps d'occupation des portiques sur pneus. Il s'agit de produire à court terme dans l'ordre inverse de la pose, de façon à stocker les panneaux dans l'ordre d'installation.

AVANCEMENT ET ALÉA DE CHANTIER

À la date de rédaction de cet article, 335 tabliers ont été réalisés et 224 ont été posés. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

CHARPENTE MÉTALLIQUE : 7 160 t
ARMATURES POUR HOURDIS : 1 440 t
BÉTON POUR HOURDIS : 8 430 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : City of Toronto
DESIGNER : WSP Consultants

ENTREPRISES

PRÉFABRICATION : Construction Demathieu & Bard et Aecon
ARMATURIER : Mansteel Rebar Ltd
FOURNISSEUR DE BÉTON : Innocon Inc.
RÉALISATION DES COFFRAGES HYDRAULIQUES : MSP Structures Inc.
FOURNISSEUR DES PORTIQUES DE MANUTENTION : Shuttlerift

ABSTRACT

PARTIAL RECONSTRUCTION OF THE GARDINER EXPRESSWAY IN TORONTO - DECK PRECASTING

CARLO CATTELAN, TECHNOPREF CANADA - CLÉMENT HONTAAS, CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC. - BENJAMIN FALALA, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION - ROMAIN LEONARD, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION

The Frederick G. Gardiner Expressway bridge was built between 1955 and 1966. The expressway passes through the Toronto city centre, linking its eastern and western suburbs. It is 18 km long and carries traffic on eight lanes. The complete renovation of the bridge will be performed section by section over a period of ten years. These works use precast replacement slabs, employing very sophisticated procedures. □

RECONSTRUCCIÓN PARCIAL DEL GARDINER EXPRESSWAY DE TORONTO - PREFABRICACIÓN DE LOS TABLEROS

CARLO CATTELAN, TECHNOPREF CANADA - CLÉMENT HONTAAS, CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC. - BENJAMIN FALALA, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION - ROMAIN LEONARD, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION

El puente de la autopista Frederick G. Gardiner Expressway fue construido entre 1955 y 1966. La autopista enlaza los suburbios este y oeste de Toronto pasando por el centro de la ciudad. Tiene una longitud de 18 km y ocho carriles de circulación. La rehabilitación completa del puente se realizará por secciones a lo largo de diez años. Para las obras, se utilizarán losas de sustitución prefabricadas siguiendo unos procedimientos muy elaborados. □



© DR

LE RÉSEAU EXPRESS MÉTROPOLITAIN (REM) DE MONTRÉAL AU CANADA

AUTEURS : DANIEL TASSIN, TECHNICAL DIRECTOR, SYSTRA IBT - ZACHARY MCGAIN, GENERAL MANAGER (CANADA), SYSTRA IBT - ERWAN ALLANIC, PRINCIPAL ENGINEER, SYSTRA IBT - DAMIEN GOULMOT, SENIOR BRIDGE ENGINEER, SYSTRA IBT - STEFAN BALAN, SEGMENT DIRECTOR SAB-AIRPORT, NOUCLR

LE RÉSEAU EXPRESS MÉTROPOLITAIN (REM) EST LE PROJET D'INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT COLLECTIF LE PLUS IMPORTANT DEPUIS LA CRÉATION DU MÉTRO DE MONTRÉAL DANS LES ANNÉES 1960. LE PROJET DIRIGÉ PAR LE CDPQ INFRA, UNE FILIALE DE LA CAISSE DE DÉPÔT ET PLACEMENT DU QUÉBEC, PRÉVOIT 67 km DE RÉSEAU DE MÉTRO LÉGER AUTOMATISÉ SANS CONDUCTEUR, CE QUI EN FERA L'UN DES RÉSEAUX AUTOMATISÉS LES PLUS LONG AU MONDE. LE REM AVEC SES 37,5 km DE VOIES AU SOL, SES 21,5 km DE STRUCTURE AÉRIENNE ET SES 8,0 km DE VOIES SOUTERRAINES, PERMETTRA, AU TERME DE SA CONSTRUCTION EN 2023, DE RELIER LES BANLIEUES NORD, SUD ET OUEST AU CENTRE-VILLE DE MONTRÉAL.

INTRODUCTION

En avril 2018, le consortium NouvLR a officiellement débuté les travaux pour la construction du Réseau express métropolitain (REM).

Le REM, un projet en partenariat public-privé mené par Cdpq Infra, devrait d'ici 2023, date de mise en service complète prévue de réseau, doubler la taille du réseau de métro de Montréal (69,2 km). Ce nouveau métro léger automatisé sera connecté aux princi-

pales lignes actuelles du métro souterrain : la ligne bleue, la ligne verte et la ligne orange.

Cet article fournit une présentation du projet en termes d'ouvrages d'art. En première partie, une description succincte du réseau est présentée avec l'emplacement des principales structures et ouvrages d'arts. La seconde partie propose une revue détaillée de la structure aérienne de l'antenne Sainte-Anne-de-Bellevue.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

DESCRIPTION GÉOGRAPHIQUE DU RÉSEAU







Le réseau du REM comprend 67 km de voies réparties entre 4 antennes qui seront connectées au centre-ville de Montréal :

→ L'antenne Sainte-Anne-de-Bellevue, d'une longueur d'environ 16 km, connecte l'arrondissement au centre-ville en longeant une bonne

partie de l'autoroute 40. Cette antenne est pourvue de 3 stations aériennes et d'une station au sol.

→ L'antenne Deux-Montagnes et l'antenne Centre-ville sont d'environ 31 km et desservent la Rive-Nord de Montréal en reliant la ville de Deux-Montagnes au centre-ville de Montréal avec 3 stations aériennes, 4 stations au sol, 3 stations sur talus, 2 stations en tranchée et 3 stations souterraines. ▷

TABLEAU 1 : PRÉSENTATION DES PRINCIPAUX OUVRAGES D'ARTS DU REM AVEC LEUR LOCALISATION

Antenne	Photo du site	Localisation sur la carte (figure 2)	Type de structures	Nombre de voies	Longueur de l'ouvrage (m)	Type de fixation	Remarque
Sainte-Anne-De-Bellevue		S1	341 travées à voussoirs préfabriqués assemblées et précontraintes sur site. 3 822 voussoirs	2	13 600	Voie à fixation directe	Majeur partie de l'antenne SADB. Inclus les stations Des Sources, Pointe Claire et Kirkland
Aéroport		S2	25 travées à voussoirs préfabriqués assemblées et précontraintes sur site. 282 voussoirs	2	1 000	Voie à fixation directe	Début de l'antenne aéroport juste après la jonction avec l'antenne SADB
Deux-Montagnes		S3	44 travées à voussoirs préfabriqués assemblées et précontraintes sur site. 453 voussoirs	2	1 600	Voie à fixation directe	Petite portion de l'antenne Deux-Montagnes autour de la station Roxboro
Deux-Montagnes		S4	Pont continu à 3 travées à caisson double en acier + 2 travées à poutre NEBT simplement appuyées	2	201,5	Voie ballastée	Franchissement de la rivière des Prairies entre Montréal et l'île Bigras
			5 travées simplement appuyées de poutres en acier à âme pleine et à tablier inférieur	1	125	Voie ballastée	
			5 travées simplement appuyées de poutre caisson en béton multicellulaire de longueur moyenne 24,5 m	1	125	Voie ballastée	
Rive Sud		S5	59 travées à poutre NEBT simplement appuyées 7 travées à caisson double en acier 2 structures continues NEBT de 2 et 3 travées respectivement 1 pont continu de 4 travées NEBT de hauteur variable	2	2 850	Voie à fixation directe - Bi Bloc	Lien entre le Centre-Ville et la rivière Saint Laurent avant l'île des Sœurs
Rive Sud		S6	22 travées NEBT simplement appuyées 2 structures continues à caisson double en acier de 3 travées 1 travée simplement appuyée à caisson double en acier	2	1 200	Voie à fixation directe - Bi Bloc	Lien entre Montréal et l'île des Sœurs
Rive Sud		S7	Couloir réservé au train léger : Approches du pont constituées de 6 structures continues de travée moyenne de 80,4 m à monocaïsson en acier composite et dalle préfabriquée de béton + un pont haubané de 528,83 m et de travée centrale de 364 m à monocaïsson en acier composite et dalle préfabriquée en béton	2	3 300	Voie à fixation directe	Traversée du fleuve Saint Laurent par le Nouveau Pont Champlain sur le couloir réservé aux trains du REM. Conception du Pont Samuel de Champlain par d'autre
Rive Sud		S8	11 travées NEBT simplement appuyées 1 structure continue de 3 travées à caisson double en acier	2	500	Voie à fixation directe - Bi Bloc	Franchissement de l'autoroute 10



© REM 1

→ L'antenne Aéroport est d'environ 5 km et dessert l'aéroport international Pierre-Elliott Trudeau au centre-ville et compte 2 stations souterraines.

→ L'antenne Rive-Sud d'environ 15 km relie la Rive-Sud de Montréal à la gare Centrale et 3 stations aériennes, 1 station au sol et 1 station sur talus

La carte de la figure 1 présente les différentes antennes du REM avec les dates officielles d'ouverture.

Sur cette carte on voit qu'il est prévu que le REM se connecte en différents points au réseau existant : notamment

1-Antennes du REM avec leurs dates officielles d'ouverture et interconnexions aux réseaux existants.

2- Localisation des ouvrages d'art.

1- REM branches with their official opening dates and interconnections with existing networks.

2- Location of engineering structures.

au métro de Montréal à partir des stations souterraines Édouard-Montpetit, McGill et Gare-Centrale et au réseau de train de banlieue de l'Est via la station Côte-de-Liesse.

EMPLACEMENT DES PRINCIPALES STRUCTURES D'OUVRAGE D'ART

Le réseau du REM inclut environ 20,3 km de structures aériennes, 1,2 km de ponts, 3 km de tunnel à construire et 5 km de tunnels existants à moderniser. Parmi les structures aériennes, différents types de structures et méthodes de construction

ont été préconisées sur le réseau en fonction des contraintes d'aménagements urbains, de l'échéancier et des obstacles naturels à franchir.

Le tableau 1 et la figure 2 présentent les principales structures d'ouvrages d'art du REM ainsi que leur emplacement.

Le rôle de Systra Ibt dans le projet du REM :

Systra Ibt a été engagé comme sous-traitant par les firmes d'ingénierie principales de NouvLR afin de réaliser les études d'avant-projet et la conception finale des structures aériennes des antennes Saint-Anne-de-Bellevue, Aéroport et Deux-Montagnes.



© REM 2

Le mandat de Systra Ibt inclut les études d'avant-projet, la conception de l'ensemble des structures aériennes à voussoirs préfabriqués du REM en phase d'exécution et la conception de 4 stations aériennes ainsi que les quais de station interfaçant avec les bâtiments de station sur les antennes Sainte-Anne-de-Bellevue et Deux-Montagnes. Systra Ibt a également fourni un support à la construction avec la revue des dessins d'atelier des fournisseurs, l'accompagnement dans le processus de contrôle de qualité et l'allocation de personnel sur site et aux usines de préfabrication. Au total, une équipe internationale impliquant des ingénieurs et techniciens provenant de quatre pays a été mobilisée afin de répondre aux défis techniques et à l'ampleur du projet du REM : Systra Ibt Montréal, Systra Ibt San Diego, Systra Ibt Dubaï et Systra Paris.

STRUCTURE AÉRIENNE TYPIQUE

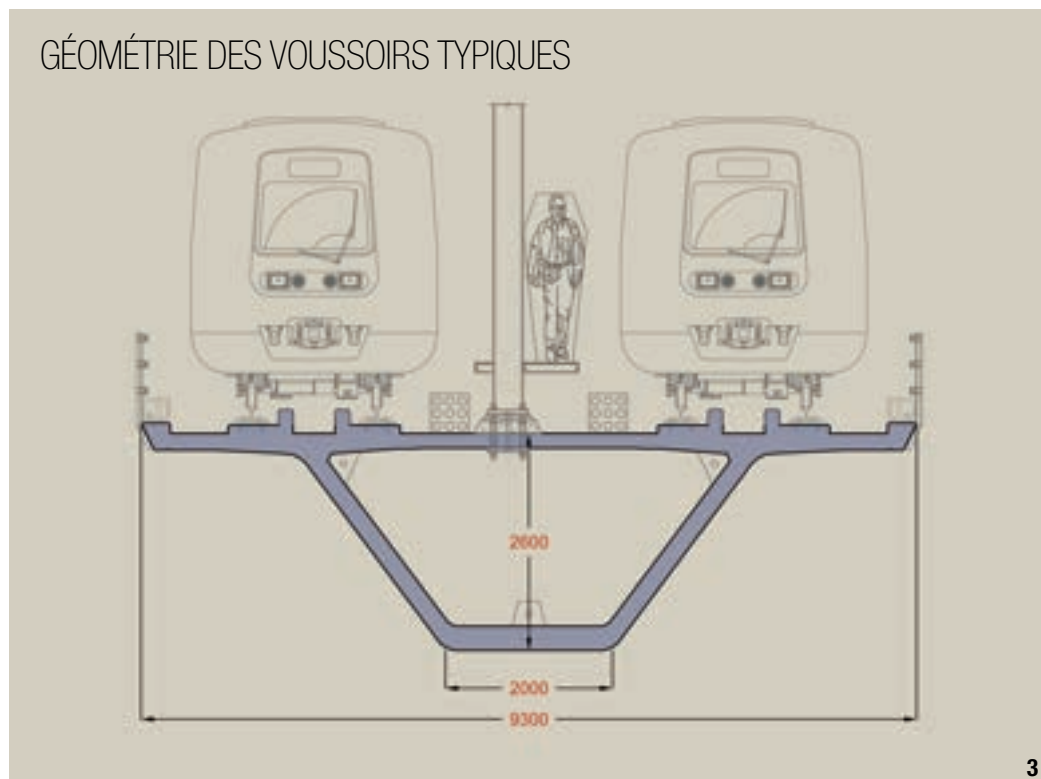
Les antennes Sainte-Anne-de-Bellevue, Aéroport et Deux-Montagnes se composent à 95 % de travées isostatiques à voussoirs préfabriqués. Les voussoirs préfabriqués sont acheminés depuis une usine de préfabrication jusqu'aux sites de montage des travées.

La totalité des voussoirs composant une travée sont alors suspendus à une poutre auto-lanceuse. Après encollage des voussoirs et mise en précontrainte, la travée assemblée est déposée sur les piles de pont. Les deux poutres auto-lanceuses, "Anne" et "Marie", se déplacent successivement le long de l'alignement, érigeant travée après travée.

PRÉSENTATION DES TRAVÉES TYPIQUES ET DE LEUR PARTICULARITÉ

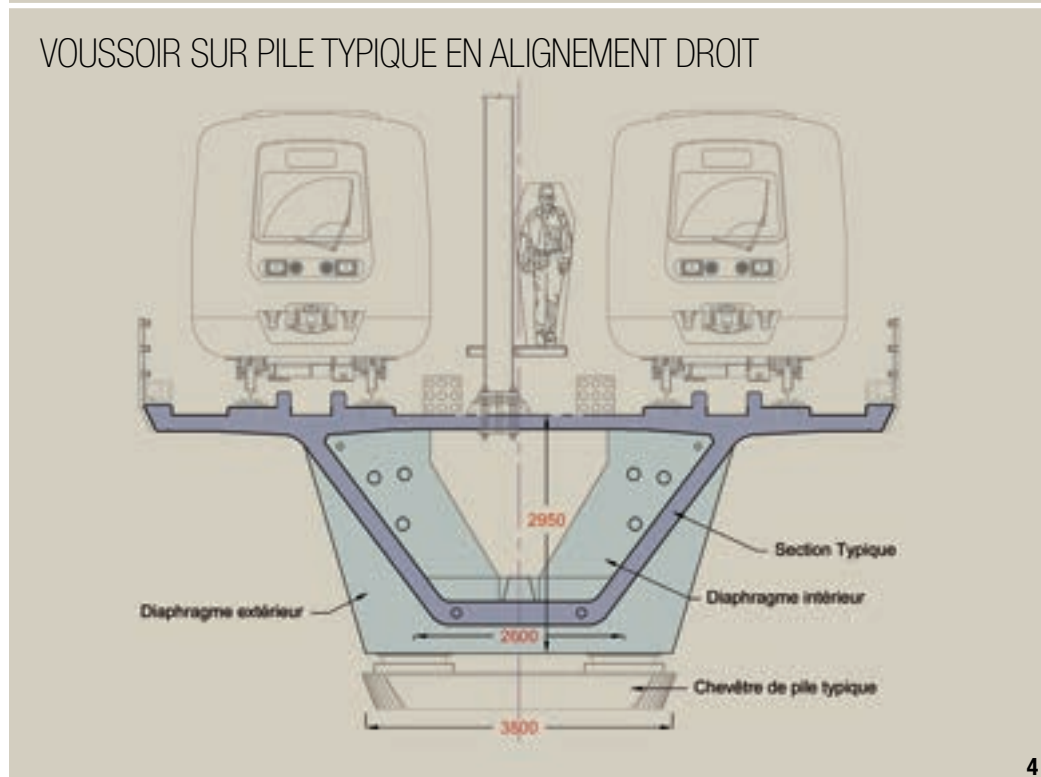
Les travées les plus courantes mesurent entre 39 m et 42,7 m ; chaque travée se compose de deux voussoirs sur pile ayant chacun une longueur de 2,8 m et d'un ensemble de voussoirs typiques de longueur comprise entre 3,7 m et 2,6 m. Chaque travée est distante de la précédente par un joint de 100 mm.

La section des voussoirs typiques est présentée à la figure 3. La superstructure consiste en un caisson en béton d'une hauteur de 2,6 m avec des âmes inclinées, d'une largeur de 9,3 m avec un hourdis inférieur d'une largeur de 2 m. Le tablier a été conçu pour supporter deux voies, une dans chaque direction. Les poteaux catenaires sont directement fixés sur le tablier et les



3

© SYSTRA IBT AND NOUVEL



4

© SYSTRA IBT AND NOUVEL

longrines de rail sont préfabriquées avec le voussoir, ce qui facilite l'installation des rails en chantier en réduisant les opérations sur site.

La géométrie du voussoir sur pile est présentée à la figure 4. L'extrémité du voussoir du côté intérieur de la travée possède une section conjuguée avec les voussoirs typiques. La partie avant des voussoirs sur pile comporte un

3- Géométrie des voussoirs typiques.

4- Voussoir sur pile typique en alignement droit.

3- Shape of typical segments.

4- Typical segment on pier in straight alignment.

diaphragme intérieur sur lequel sont ancrés les câbles de précontrainte et un diaphragme extérieur élargi permettant un écartement des appuis assez grand pour assurer la stabilité des travées. Au niveau des appuis, le voussoir a une largeur d'environ 3,8 m permettant un espacement des appuis de 2,6 m. Les figures 5 et 6 présentent des voussoirs sur pile vue de devant avec



5

© NouvLR



6

© NouvLR

les blocs d'ancrage et vue de derrière respectivement avec la face conjuguée. La figure 5 illustre l'utilisation des voussoirs voisins qui permet d'assurer une parfaite compatibilité avant l'installation. Le tracé aérien comprend des courbes horizontales, verticales et des dévers. Le plus petit rayon de courbure de 285 m ainsi que le plus grand dévers de 10 % sont obtenus sur l'antenne

aéroport à la jonction avec l'antenne Sainte-Anne-de-Bellevue. La pente longitudinale maximale sur l'ensemble des structures élevées à voussoirs a été limitée à 4%. Dans les courbes horizontales, les travées entières suivent la pente du dévers. Ceci a été rendu possible grâce à l'intégration du dévers dans la géométrie du voussoir sur pile. Un voussoir dans une zone de dévers

à 10 % est présenté à la figure 7. Plusieurs méthodes de construction permettent de réaliser le dévers requis au niveau des voies :

- 1- Dévers des voies obtenu grâce à l'inclinaison transversale des longrines - longrines coulées en place, voussoir sur pile à géométrie constante et travée non inclinée selon le dévers.
- 2- Dévers des voies obtenu grâce à des

assises d'appui de hauteur variable - longrines préfabriquées, voussoir sur pile de géométrie constante, travée au complet inclinée selon le dévers.

- 3- Dévers des voies obtenu grâce à une géométrie variable du voussoir sur pile - longrines préfabriquées, voussoir sur pile de géométrie paramétrique, travée au complet inclinée selon le dévers.

5- Voussoir sur pile typique en alignement droit à l'usine de préfabrication.

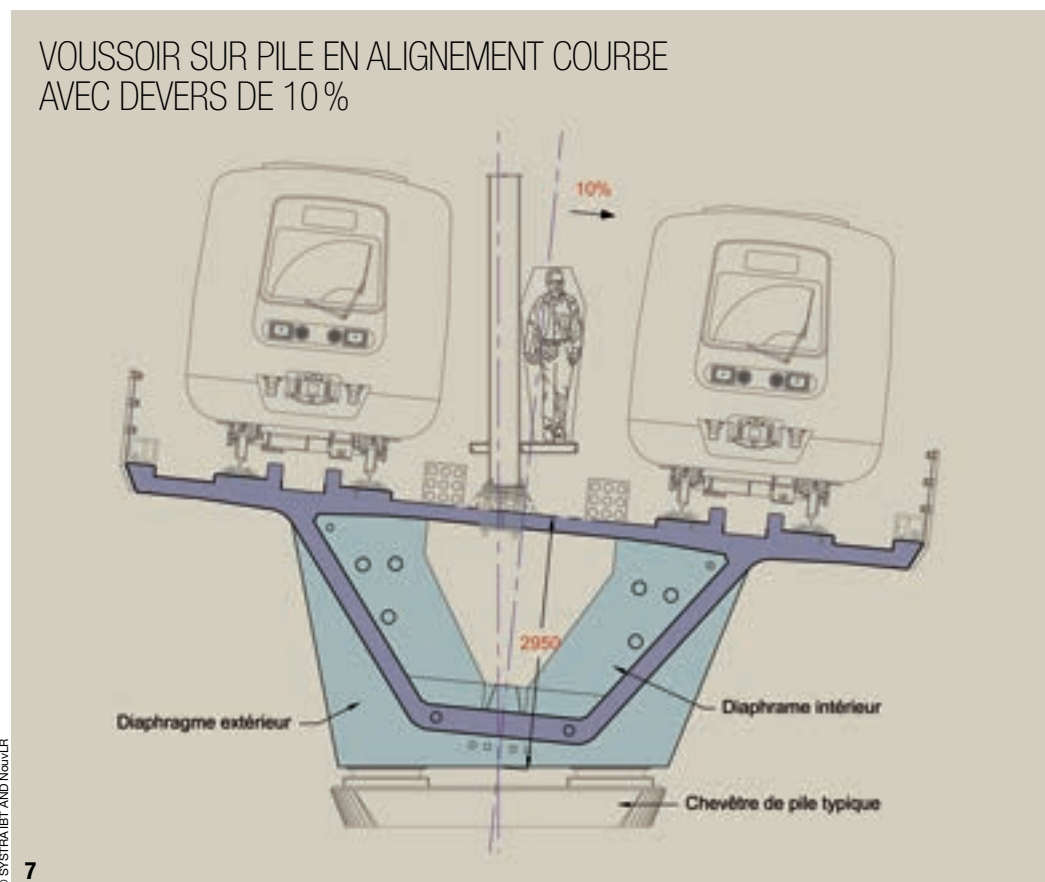
6- Voussoir sur pile typique en alignement droit près à être érigé par la poutre lanceuse.

7- Voussoir sur pile en alignement courbe avec dévers de 10%.

5- Typical segment on pier in straight alignment in the precasting plant.

6- Typical segment on pier in straight alignment ready to be erected by the launching girder.

7- Segment on pier in curved alignment with 10% slant.



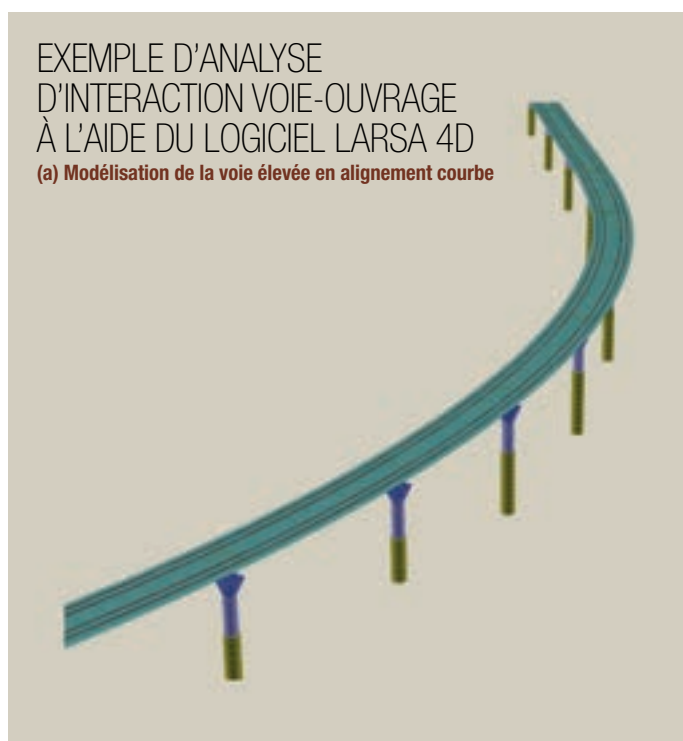
© SYSTRA|IET AND NouvLR

7

Pour le projet du REM, la méthode 3 a été retenue afin de prendre en considération les dévers. Cette méthode présente des avantages architecturaux et logistiques permettant de minimiser les opérations sur site tout en procurant une solution élégante pour passer les courbes. Par ailleurs, le choix d'incliner toute la travée selon le dévers permet, au niveau structurel, de réduire dans une certaine mesure l'excentricité en plan du centre de gravité des travées courbes, réduisant ainsi les forces de torsion et les demandes sur les appuis. Du point de vue de la constructibilité, la méthode 3 nécessite une très grande précision lors de la fabrication des voussoirs sur pile en raison des tolérances réduites d'ajustement des travées qui découlent de la méthode, la seule possibilité d'ajustement étant dans les hauteurs des coulis cimentaires liant le dessus des appuis aux soffites des voussoirs sur pile.

En raison d'une section béton très optimisée des âmes de voussoir, une combinaison de précontrainte interne et hybride a été choisie. Les câbles de précontrainte dit hybrides sont internes au niveau des voussoirs sur pile, externe entre la sortie du diaphragme et l'entrée dans les déviateurs et interne dans le milieu de la travée. Au total, les travées typiques comportent 4 câbles hybrides et 2 câbles internes. L'utilisation d'un mélange de câbles internes et hybrides a permis de réduire de 10% à 15% le nombre de torons requis en augmentant la capacité en flexion à l'état ultime des sections en milieu de travée comparé à une solution avec un mixte de câbles purement internes et externes. En raison des conditions d'exposition et du climat, une protection de Type PT2 selon les spécifications PTI/ASBI M50.3-12 a été choisie pour les câbles de précontrainte. Par ailleurs, la norme canadienne de conception des ponts CAN/CSA S6-14 requiert l'utilisation d'une colle époxy pour les joints conjugués entre les voussoirs, ce qui vient ajouter un niveau supplémentaire de protection.

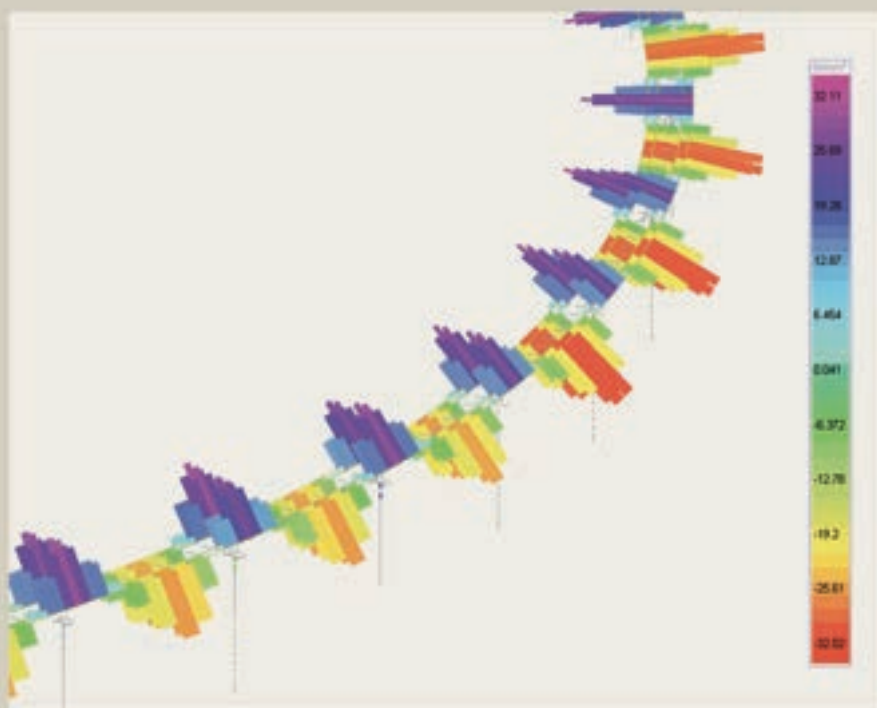
La superstructure a été conçue en suivant les recommandations d'un mélange de normes nord-américaines et européennes. La conception structurale a été faite principalement en suivant les règles du Code Canadien de Conception des Pont Routier CAN/CSA S6-14 avec pour complément le code américain de conception des ponts AASHTO LFRD pour les points non traités de manière explicite tel que la précontrainte mixte interne/externe.



EXEMPLE D'ANALYSE D'INTERACTION VOIE-OUVRAGE À L'AIDE DU LOGICIEL LARSA 4D

(a) Modélisation de la voie élevée en alignement courbe

(b) Vérification des contraintes dans les rails



8- Exemple d'analyse d'interaction voie-ouvrage à l'aide du logiciel Larsa 4D.
(a) Modélisation de la voie élevée en alignement courbe.
(b) Vérification des contraintes dans les rails.

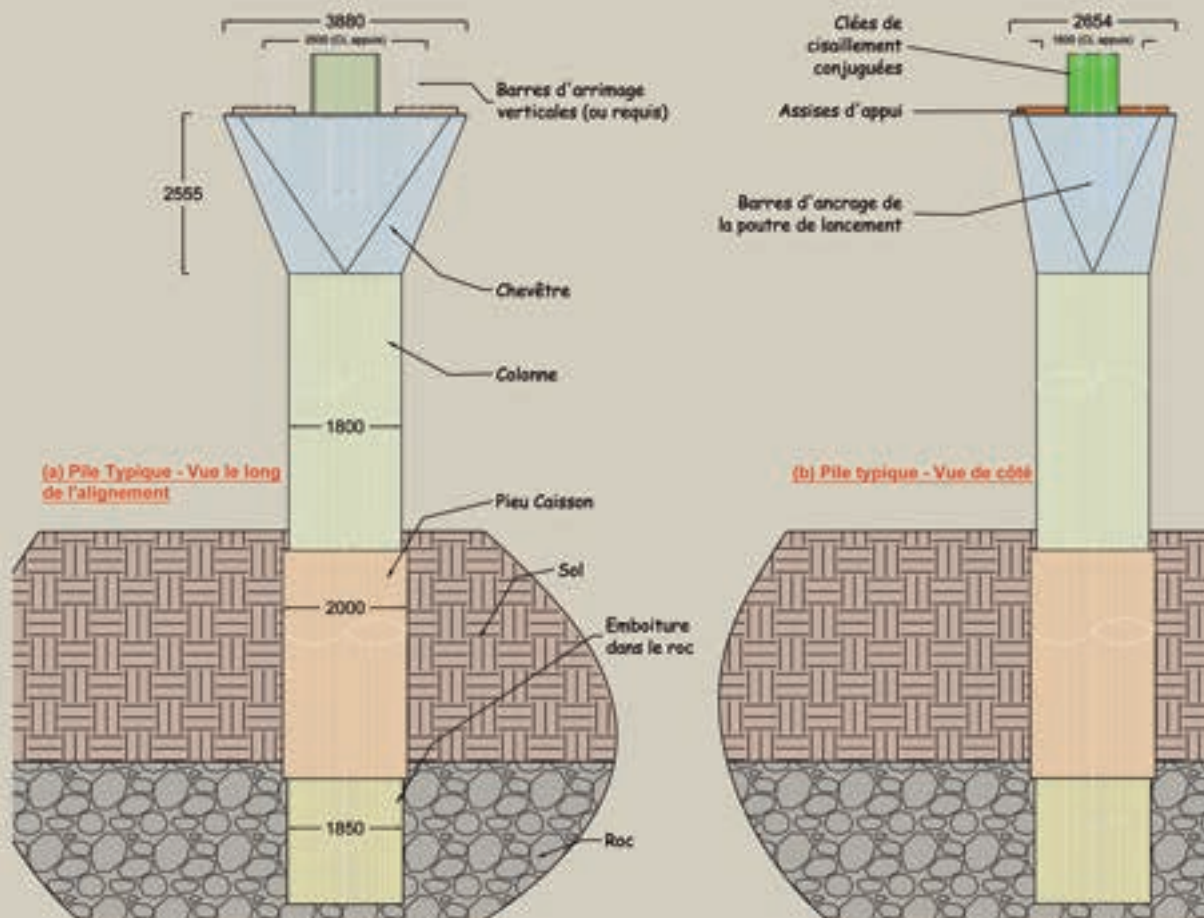
8- Example of analysis of track-structure interaction using the Larsa 4D software.
(a) Modelling of elevated track in curved alignment.
(b) Verification of stresses in the rails.

Les Eurocodes BSEN.1990.2002_Basis of structural design et BSEN.1991.2.2003_Actions on structures_Traffic loads on bridges ont été utilisés pour la vérification des déformations de tablier ainsi que les vérifications de l'interaction voie-ouvrages d'arts. La superstructure

a été conçue de manière à limiter les rotations relatives selon l'axe longitudinal entre deux tabliers adjacents à 0,0050 rad et les déflexions à L/800 sous les charges vives. L'Eurocode BSEN.1992.1.1.2004_Design of concrete structures_General

rules and rules for building a été utilisé pour le calcul des ouvertures de fissures qui ont été comparées aux limites définies dans le CAN/CSA S6-14. L'un des défis majeurs rencontré lors de la conception de l'ouvrage a été l'analyse d'interaction voie-ouvrage

DÉFINITION D'UNITÉ TYPIQUE DE FONDATION



© SYSTRA IBT AND NouvLR

9

9- Définition d'unité typique de fondation.

10- Exemple de pile typique.

9- Definition of typical foundation unit.

10- Example of typical pier.

en raison des plages de variation de température importantes dans le rail +60/-60°Celsius et dans la superstructure +18/-44°Celsius, ainsi que l'utilisation d'un rail soudé continu à fixation directe sur le tablier des ouvrages. La limite d'ouverture du rail à 70 mm en cas de bris du rail a été particulièrement difficile à vérifier à certains endroits et a nécessité l'introduction de joints d'expansion pour le rail. Les fondations directement adjacentes



10

© NouvLR

au joint d'expansion de rail ont dû être dimensionnées afin d'ancrer les forces de température provenant du rail. Les limites de contraintes admissibles pour les contraintes supplémentaires dues à l'interaction voie-ouvrage ont été plus faciles à vérifier grâce à l'utilisation de rail 115RE à haute résistance permettant des contraintes supplémentaires admissibles jusqu'à ± 135 MPa pour les effets dus à l'interaction avec la structure. La figure 8 présente un exemple d'analyse voie-ouvrage réalisée pour l'une des parties en courbe de l'antenne Sainte-Anne-de-Bellevue.

PRÉSENTATION DES UNITÉS DE PILES ET DU CONCEPT ATYPIQUE DE TTOG POUR LES FONDATIONS

Les piles typiques comprennent un chevêtre en forme de tulipe et une colonne unique se prolongeant par un monopieu caisson encastré dans le roc avec au moins un diamètre d'emboîture (figure 9).

La figure 10 présente un exemple de pile typique avec chevêtre en forme de tulipe.

Les monopieux ont été construits à l'aide de Tuyaux de Tôle Ondulée et Galvanisée (TTOG) en guise de chemise pour la stabilité des parois du sol lors de l'excavation du roc. La tôle ondulée d'une épaisseur de 3 mm n'a pas été prise en compte lors du dimensionnement des fondations. La technique de construction est décrite dans le paragraphe suivant. Les piles et les fondations ont été conçues pour reprendre les efforts durant la construction et durant la mise en service du réseau. Les piles ont été conçues pour un événement sismique d'une période de retour de 2475 ans. Cependant, dû à la faible sismicité de Montréal, ce sont plutôt les charges de construction et particulièrement l'effet du vent sur la poutre de lancement qui ont gouverné la conception des piles dans les zones en alignement droit. Les charges vives avec l'effet centrifuge et les forces thermiques provenant des rails ont gouverné la conception des

piles dans les zones en alignement courbe.

Pour la poutre de lancement en service, des vents de vitesse maximale de 72 km/h ont été considérés. En cas de vents supérieurs à 72 km/h, les opérations doivent être interrompues pour des raisons de sécurité. Les piles et fondations ont été dimensionnées aux états ultimes pour le cas hors service de la poutre de lancement en considérant une travée suspendue prête à être érigée et des vents pouvant atteindre 132 km/h. Un exemple de configuration de la poutre de lancement Hors Service avec les voussoirs suspendus est montré à la figure 11.

DÉFIS ET PARTICULARITÉS DE LA CONSTRUCTION ET DE LA CONCEPTION

Afin de maximiser la vitesse de construction des fondations, une méthode de construction utilisant du Tuyau de Tôle Ondulée Galvanisée (TTOG) et un forage sous suspension de polymère a été utilisée.

Comparé à une méthode de forage conventionnelle avec tubage en acier rigide lisse, l'utilisation des TTOG a permis d'optimiser les coûts de matériel en utilisant des tôles ondulées d'une épaisseur de moins de 3 mm, tout en assurant une grande flexibilité dans l'approvisionnement et l'installation sur chantier. Les TTOG de faible épaisseur, sont facilement découpables et soudables sur chantier.

Le principe de la méthode de construction des fondations est présenté à la figure 12.

L'adoption de cette méthode de construction a permis l'installation des fondations à une vitesse de croisière de 3 jours par monopieu et par foreuse. Trois foreuses en parallèle ont été utilisées lors des travaux sur les antennes Sainte-Anne-de-Bellevue et Aéroport. L'utilisation d'un tubage flexible comme les TTOG présente quelques défis à relever pour la construction tel que le contrôle des déformations de la tôle, l'alignement, la verticalité et la précision de l'opérateur de la foreuse lors du forage dans le roc à travers le TTOG pour ne pas déchirer ou endommager ce dernier.

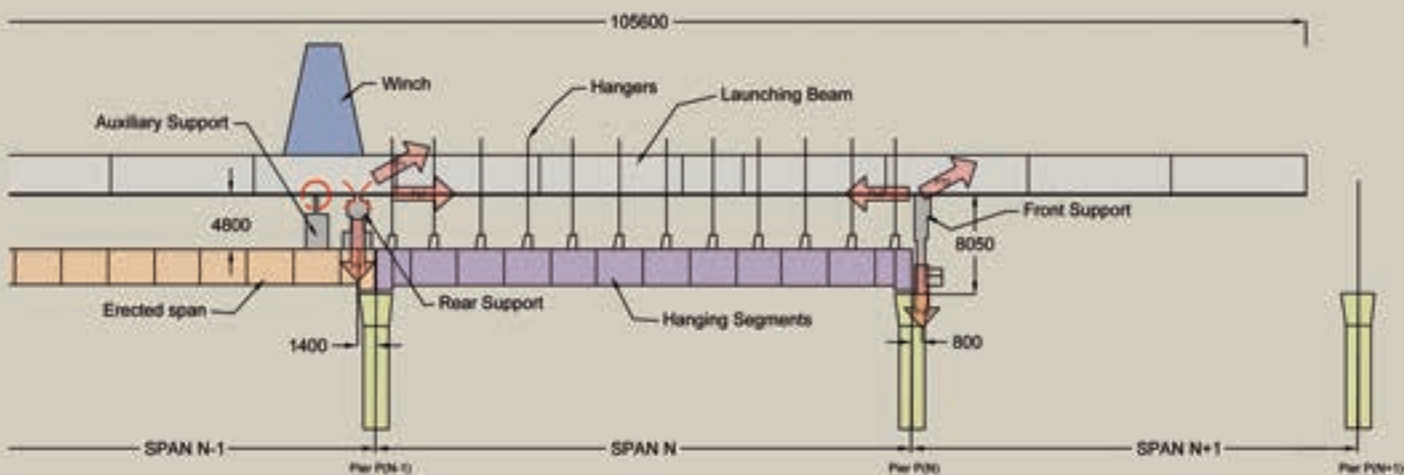
Du point de vue de la conception, le TTOG n'a pas été considéré comme un élément structural, mais comme un coffrage perdu qui disparaît par corrosion après environ 45 ans.

Le béton avec les enrobages spécifiés permet à la fondation de durer 100 ans. Quelques étapes importantes de la

11- Poutre de lancement en condition Hors Service avec vent de 132 km/h et voussoirs suspendus.

11- Launching girder inoperative with 132 km/h wind and suspended segments.

POUTRE DE LANCEMENT EN CONDITION HORS SERVICE AVEC VENT DE 132 km/h ET VOUSSOIRS SUSPENDUS



Loads for a 42.7m Hanging Span

	REAR SUPPORT		
	CONSTRUCTION LOADS	WIND 45	WIND 90
Pv2 (kN)	575 (max)	N/A	N/A
FL1 (kN)	208 (max)	439 (max)	N/A
FT1 (kN)	N/A	233 (max)	383 (max)

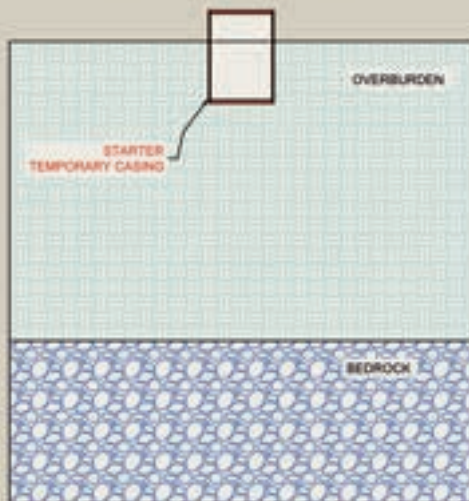
	FRONT SUPPORT		
	CONSTRUCTION LOADS	WIND 45	WIND 90
Pv2 (kN)	438 (max)	N/A	N/A
FL2 (kN)	208 (max)	0	N/A
FT2 (kN)	N/A	208 (max)	319 (max)

Out of Service Configuration OS2 With Hanging Segments and 132km/h wind speed

PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE FORAGE AVEC TTOG ET SUSPENSION DE POLYMÈRE

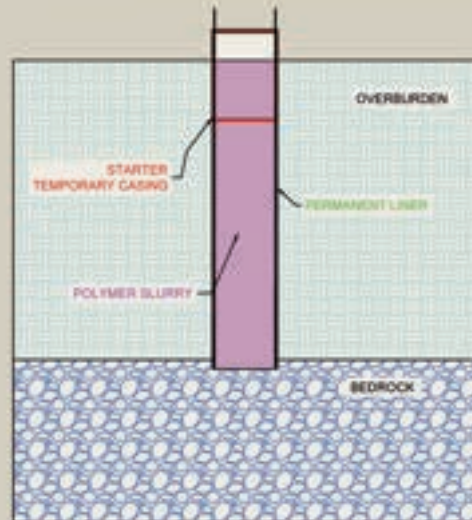
Stage 1:

- 1) INSTALL STARTER TEMPORARY CASING



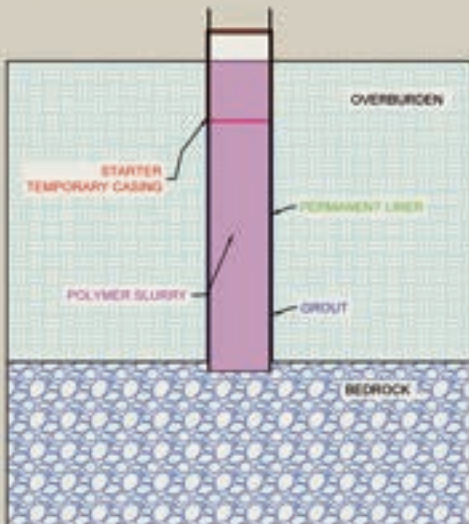
Stage 2:

- 1) DRILL OVERBURDEN UNDER POLYMERE SLURRY



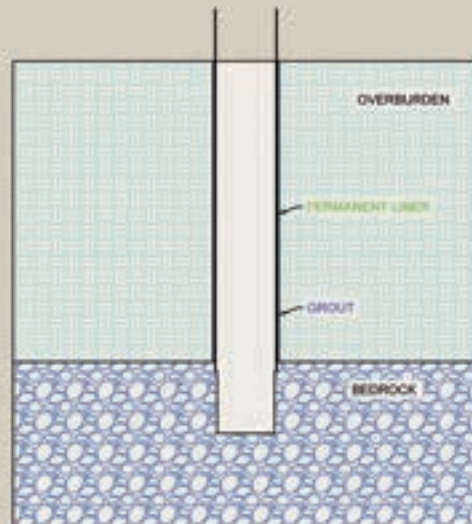
Stage 3:

- 1) POUR CONCRETE PLUG
- 2) INSTALL PERMANENT CSP LINER INTO WET CONCRET PLUG
- 3) POUR GROUT BETWEEN OVERBURDEN AND PERMANENT CSP



Stage 4:

- 1) REMOVE TEMPORARY STARTER CASING
- 2) PUMP POLYMER SLURRY
- 3) DRILL THE ROC SOCKET



construction d'un monopieu caisson sont présentées à la figure 13.

Une méthode de préfabrication de type *short line Match Casting* a été choisie pour la fabrication des voussoirs.

Les voussoirs ont été produits dans une usine de préfabrication à Saint-Eugene de Grantham, à 80 km au nord-est de Montréal (figure 14).

12- Principe de la méthode de forage avec TTOG et suspension de polymère.

12- Schematic of drilling technique with corrugated galvanised metal pipes and polymer suspension.

Les voussoirs ont été fabriqués sur un site de préfabrication existant, totalement réaménagé à cet effet. 10 coffrages spécifiques fabriquent journalièrement une moyenne de 8 voussoirs. Après une période de cure et d'entreposage à l'usine de préfabrication, les voussoirs constituant une travée sont acheminés par camion, voussoir par

voussoir, jusqu'aux poutres de lancement qui assemblent jour après jour les 410 travées du projet. Après une courte période d'apprentissage, les poutres de lancement ont été capables de poser en moyenne une travée toutes les 40 heures, soit 3 travées par poutre et par semaine en relayant les équipes de jour et de nuit.

13- Différentes phases de la construction des fondations sur le chantier du REM
 (a) Réception du TTOG -
 (b) Installation du TTOG dans le trou de forage -
 (c) Préparation en vue du forage du bouchon de béton et du roc -
 (d) Installation de la cage d'armature du pieu caisson.

14- Emplacement du site de préfabrication des voussoirs.

13- Various phases of foundation construction on the REM site:
 (a) Receipt of corrugated galvanized metal pipe -
 (b) Installation of corrugated galvanized metal pipe in drill hole -
 (c) Preparation for drilling of the concrete plug and rock -
 (d) Installation of the caisson concrete reinforcing cage.

14- Segment pre-casting location.



13a



13b



13c



13d

© NouvelR

Les avantages de ce genre de technique à progression linéaire résident dans sa furtivité qui garantit aux riverains une circulation fluide, un impact sonore contrôlé, un impact visuel maîtrisé et une emprise de chantier au sol limitée. Cette technique permet également un meilleur respect du planning, une limitation des travaux en hauteur en favorisant la construction du tablier au sol et une maîtrise accrue de la qualité de l'ouvrage rendue possible par la préfabrication.

Un des défis particuliers rencontré sur le REM est lié à l'utilisation de colle époxy : la colle époxy servant à l'encollage des voussoirs est limitée à une température d'application de moins -7°Celsius ; par conséquent, il a été choisi dans le cadre de ce projet de suspendre les activités de montage des travées en période hivernale pendant les mois les plus froids, de fin décembre à fin mars. Un autre défi réside dans la pose des travées au-dessus des routes majeures dont

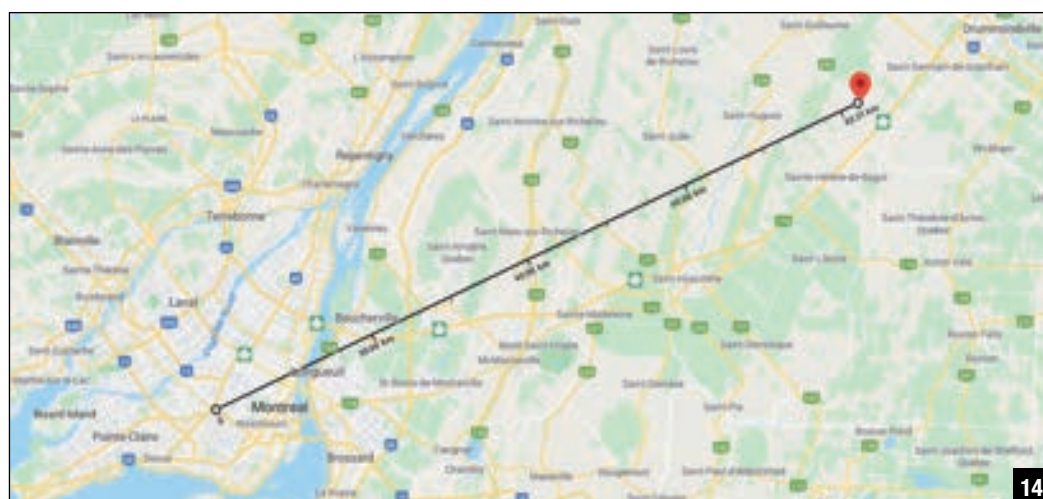
la fermeture totale n'est pas possible (figure 15).

Les antennes Sainte-Anne-de-Bellevue et Aéroport passent par trois fois au-dessus de l'autoroute 40 qui est une artère majeure de transport à Montréal. La technique employée est, dans

ce type de cas, parfaitement adaptée : l'approvisionnement en voussoirs a dû se faire durant la nuit, ne nécessitant qu'une fermeture partielle de l'autoroute durant quelques heures et limitant ainsi l'impact sur les usagers de la route.

CONCLUSION

Le type d'ouvrage à travées simples en voussoirs préfabriqués assemblés à l'aide d'une poutre de lancement par-dessus a su démontrer son efficacité sur le chantier du REM. Cependant, la réussite de ce type de construction a



14

© GOOGLE MAP



© NouvLR

15

nécessité un échancier serré pour la construction et la livraison des différents éléments affectant la progression de la pose des travées avec des poutres de lancement. La faible tolérance pour l'installation des rails a demandé une grande précision pour la construction des voussoirs préfabriqués. Une étroite collaboration des équipes de conception, de surveillance et de construction a été nécessaire pour assurer le succès du projet. □

15- Pose des travées SA-19, SA-20 et SA-21 au-dessus de l'autoroute A40.

15- Placing spans SA-19, SA-20 and SA-21 above the A40 motorway.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Caisse de dépôt et placement du Québec (CDPQ)

AMO : NouvLR

BUREAUX D'ÉTUDES PRINCIPAUX : Aecom consultants, Snc-Lavalin

BUREAU D'ÉTUDE POUR LES STRUCTURES EN VOUSOIR PRÉFABRIQUÉS : Systra Ibt

ENTREPRISES : NouvLR (Snc-Lavalin Grands projets, Pomerleau, Dragados Canada, Aecon Québec, Ebc inc.)

ENTREPRISE SOUS-TRAITANTE SPÉCIALISÉE : Rizzani De Eccher

EXPLOITANT ET MATÉRIEL ROULANT : Groupe Pmm (consortium Alstom, Snc-Lavalin O&M)

PRINCIPALES QUANTITÉS

CARACTÉRISTIQUES DU PROJET

- Longueur totale du réseau 67 km
- 26 stations (8 stations aériennes, 13 en surface, 5 souterraines)
- 20,3 km de structure aérienne
- 5 ponts d'une longueur totale de 1,2 km
- 3 km de tunnel à construire
- 5 km de tunnel à moderniser
- Réseau 100 % électrique et automatisé
- Service offert 20 h par jour, 7 jours sur 7
- 3 connections aux lignes de métro existantes
- 6,5 milliards de dollars canadiens
- Fin des travaux prévue pour 2023

SUPERSTRUCTURE EN VOUSOIRS PRÉFABRIQUÉS

- Longueur totale des structures en voussoir préfabriqués : 16,2 km
- 4560 voussoirs
- 410 travées
- Volume de béton de la superstructure : 77 000 m³
- Tonnage de précontrainte : 2 400 t

PONTS À POUTRE EN BÉTON

- Longueur totale de pont à poutres préfabriquées en béton : 3 635 m
- 270 poutres NEBT

PONTS EN ACIER

- Longueur totale de pont à caisson en acier : 925 m

TUNNELS

- 70 m d'excavation à la station Édouard-Montpetit

ABSTRACT

THE RESEAU EXPRESS METROPOLITAIN (REM) OF MONTREAL, CANADA

DANIEL TASSIN, SYSTRA IBT - ZACHARY MCGAIN, SYSTRA IBT - ERWAN ALLANIC, SYSTRA IBT - DAMIEN GOULMOT, SYSTRA IBT - STEFAN BALAN, NOUCLR

The Réseau express métropolitain (REM), with its 67 km of network currently under construction, will, when fully opened in 2023, be one of the four largest driverless light rail systems in the world. The REM will double the current size of the Montreal metro system by linking the northern, western and southern suburbs to the city centre via a combination of at-grade, elevated and underground tracks. This new light rail system includes about 21.5 km of elevated structures, with 16.2 km of prestressed segmental guideway on the Sainte-Anne-De-Bellevue, Airport and Deux-Montagnes branches. □

LA RED EXPRES METROPOLITANA (REM) DE MONTREAL, CANADÁ

DANIEL TASSIN, SYSTRA IBT - ZACHARY MCGAIN, SYSTRA IBT - ERWAN ALLANIC, SYSTRA IBT - DAMIEN GOULMOT, SYSTRA IBT - STEFAN BALAN, NOUCLR

Con sus 67 km actualmente en construcción, la Red Expres Metropolitana (REM, Réseau Express Métropolitain) constituirá en el momento de su inauguración completa, en 2023, uno de los cuatro sistemas de metro ligero autónomo sin conductor más importantes del mundo. La REM duplicará el tamaño actual del metro de Montréal, enlazando los suburbios norte, oeste y sur con el centro de la ciudad mediante una combinación de vías terrestres, elevadas o subterráneas. Este nuevo sistema ligero sobre raíl consta de unos 21,5 km de estructuras elevadas, de los cuales 16,2 km de estructura de dovelas pretensadas en las estaciones de Sainte-Anne-De-Bellevue, Aéroport y Deux-Montagnes. □



1
© MAST GRUNDBAU

FONDATEMENTS POUR LIGNES HAUTE TENSION EN ALLEMAGNE ET EN BELGIQUE

AUTEURS : ANTOINE CAROULLE, DIRECTEUR OPÉRATIONNEL LIGNES, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - EMMANUEL SIMON, DIRECTEUR OPÉRATIONNEL EXPORT, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

DANS UN CONTEXTE INTERNATIONAL OÙ LES POLITIQUES ÉNERGÉTIQUES DES ÉTATS, L'ALLEMAGNE ET LA BELGIQUE EN PARTICULIER, ÉVOLUENT POUR AUGMENTER LA PART DE PRODUCTION ÉOLIENNE, DE NOUVELLES LIGNES À HAUTE TENSION DOIVENT ÊTRE CONSTRUITES. LES FONDATIONS DE CES NOUVEAUX PYLÔNES METTENT EN ŒUVRE DIFFÉRENTES TECHNIQUES DONT CELLES DES PIEUX FORÉS TUBÉS ET DES MICROPIEUX.

La transition du système énergétique européen représente sans aucun doute l'un des plus grands défis du siècle pour la communauté. Le passage à une société à faibles émissions de carbone va s'accélérer, au vu de la trajectoire ambitieuse établie par le Green Deal européen qui vise à

faire de l'Europe le premier continent au monde neutre en carbone d'ici 2050. Ainsi, dans la continuité de l'Accord de Paris entré en vigueur le 4 novembre 2016, l'Allemagne et la Belgique se sont engagées dans une réforme de leur politique énergétique et de la production d'électricité.

1- Ligne Ganderkesee-Wehrendorf - Forage BG20.

1- Ganderkesee-Wehrendorf line - Boring with BG20.

L'Allemagne, elle, s'est fixé un objectif supplémentaire, celui d'une sortie accélérée et complète de l'énergie nucléaire à court terme.

Pour être opérationnelle, cette transition énergétique engagée s'accompagne ainsi d'un développement important des énergies renouvelables et, en par-



ticulier, de l'énergie éolienne. L'éolien en Allemagne fournit d'ores et déjà 17,5% de la production électrique nationale (figure 2).

La Belgique, elle, développe un réseau qui permet l'intégration de 13% d'énergies renouvelables alternatives dans le mix énergétique à aujourd'hui. Dans le cadre du développement de l'énergie éolienne, les installations offshore en mer du Nord et en mer Baltique jouent un rôle prépondérant.

Le développement des capacités de production en énergie renouvelable doit toutefois pour être mis en œuvre s'accompagner de la création de nouvelles

2- État d'aménagement de l'offshore éolien en Allemagne.

3- Ligne Weissen-thurm-Sechtem - Forage sous gabarit avec louvoyeuse.

2- Review of off-shore wind-power development in Germany.

3- Weissen-thurm-Sechtem line - Boring under jig with casing oscillator.

lignes à haute tension pour transporter l'énergie.

En Allemagne, ce transport d'énergie s'effectue du nord du pays - où elle est produite soit à terre soit offshore- vers le sud et l'ouest, plus peuplés et dont les besoins industriels sont plus importants.

LE MARCHÉ DES LIGNES HAUTE TENSION

En Belgique, Elia est le gestionnaire unique du réseau de transport d'électricité à haute tension (de 30 kV à 380 kV). Le réseau Elia compte plus de 8300 km dont 5600 km de lignes aériennes

et 2700 km de câbles souterrains. En Allemagne, le transport d'électricité sous très haute tension (220 kV à 380 kV), est scindée en 4 régions gérées chacune par un opérateur différent :

- Amprion pour la partie Ouest ;
 - Transnet BW pour le land de Bade-Württemberg ;
 - TenneT TSO (réseau anciennement E.ON racheté par l'opérateur hollandais Tennet) pour les régions centrales ;
 - 50 Hertz (dépendant de l'opérateur belge Elia) pour la partie orientale.
- Actuellement 37000 km de lignes sont gérés par ces quatre opérateurs. On considère que 7700 km de lignes seraient nécessaires pour gérer le flux de production du nord vers le sud et l'ouest du pays. Or, à ce jour, seul un millier de kilomètres a été construit et mis en service. Des lignes sont donc actuellement en cours de construction pour répondre à ce besoin et accompagner l'évolution de la production énergétique.

LES FONDATIONS POUR LES LIGNES AÉRIENNES

Le type de fondations choisi pour un pylône répond à différentes contraintes :

- Le type de pylône (alignement ou angle) et donc des efforts transmis en pied ;
- Le terrain (sous-sol) dont les reconnaissances géotechniques préalables permettent la caractérisation ;
- Le site des travaux et les contraintes environnementales et réglementaires (riverains, nappe phréatique, etc.).

À l'issue de l'établissement du premier tracé d'une ligne, une campagne de reconnaissance géotechnique est exécutée de manière à caractériser le sous-sol. Les sondages exécutés sont de différents types :

- Sondages carottés ;
- Essais au pénétromètre statique ;
- Essais au pénétromètre dynamique lourd.

Une fois le sous-sol caractérisé, une étude technico-économique permet de choisir entre fondations superficielles et fondations profondes. Parmi ces dernières, les principaux types portent sur :

- Les pieux battus. Ceux-ci, de mise en œuvre aisée, présentent des contraintes d'environnement liées au bruit et sont difficiles à appliquer dans des conditions de gabarit réduit en hauteur ;
- Les micropieux ;
- Les pieux forés.



4- Ligne Ganderkesee-Wehrendorf - Plan de fondations.

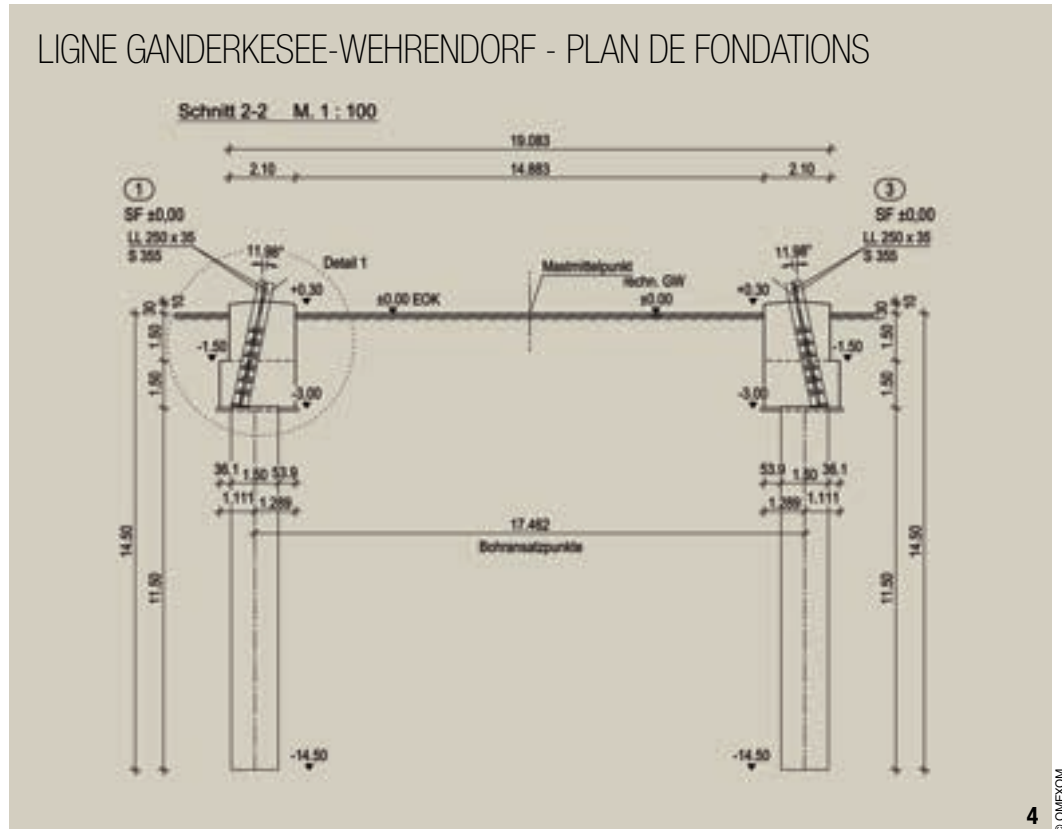
5- Projet Audorf-Flensburg - Mise en place de la cage d'armature.

6- Projet Audorf-Flensburg - Extraction du tubage après bétonnage.

4- Ganderkesee-Wehrendorf line - Foundation drawing.

5- Audorf-Flensburg project - Placing the concrete reinforcing cage.

6- Audorf-Flensburg project - Casing extraction after concreting.



Dans le cadre des pieux forés, ce sont les pieux exécutés avec tubage provisoire qui sont les mieux adaptés :

→ Le procédé se distingue par l'absence de nuisances vibratoires ou sonores que les pieux de tubes battus peuvent engendrer, nuisances qui sont sources de rejet de la part des populations riveraines.

→ Dans le cas de forage sous nappe, la protection du forage par tubage permet de s'affranchir de l'emploi d'un fluide type boue bentonitique. La mise en œuvre de forage sous boue nécessiterait le montage à chaque pylône d'une centrale de fabrication et de recyclage, incompatible avec les emprises au sol des travaux et le planning des

opérations. Le forage sous nappe nécessite toutefois de maintenir l'équilibre hydrostatique à l'intérieur du tube de forage : ne pas maintenir une charge d'eau suffisante créerait les conditions favorables à l'apparition d'un phénomène de renard et provoquerait des remontées de terrain, en particulier dans les terrains granulaires.

Selon les efforts et le terrain sous-jacent, 1 à 2 pieux forés peuvent être nécessaires par pied de pylône avec un diamètre compris entre 900 et 1800 mm et d'une longueur pouvant atteindre jusqu'à 25 m. En fonction des considérations de design, le pieu peut être incliné ou droit.

Après aménagement des accès et de la plate-forme de travail au droit du



© MAST GRUNDBAU



© MAST GRUNDBAU



7- Carte des projets Brabo II et Horta en Belgique.

8- Brabo II : coupe de la solution technique.

9- Brabo II : mise en place de l'armature.

7- Map of the Brabo II and Horta projects in Belgium.

8- Brabo II: cross section of the technical solution.

9- Brabo II: reinforcement placing.

© ELIA 7

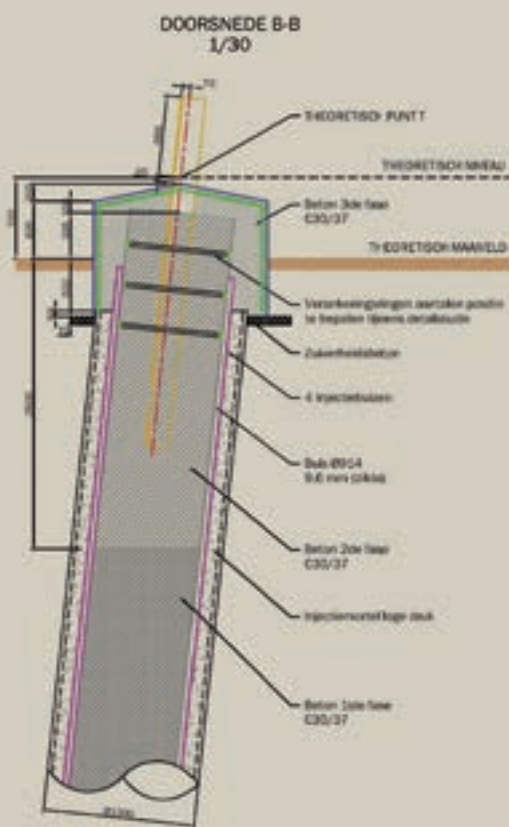
pylône, les travaux de forage sont entrepris à l'abri d'un tubage double paroi. Ce process est mené soit au moyen de foreuses hydrauliques soit, dans des cas particuliers (gabarit en hauteur limité par exemple), avec une grue sur chenilles équipée d'une louvoyeuse,

matériel hydraulique permettant de descendre et extraire le tube avec un couple de rotation pouvant atteindre 2700 kNm et une force de levage de 2300 kN. Dans ce cas, le forage à l'abri du tube est réalisé avec une benne preneuse ou "hammergrab" actionnée par

la grue hydraulique (figure 3). Les tubes de travail sont rabotés par boulonnage et sont d'une longueur prédéterminée. Une fois la cote de forage atteinte, dans le cas d'un forage sous nappe, on doit d'abord attendre la décantation des matières en suspension et procéder

à un curage de fond. Une cage d'armature est ensuite descendue dans le forage et le processus de bétonnage peut être initié. Au cours de celui-ci, le tubage provisoire est extrait au fur et à mesure en fonction de la montée du niveau de béton au sein du pieu. ▷

BRABO II : COUPE DE LA SOLUTION TECHNIQUE



8

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS



9

© IMAGE IN



10

© IMAGE IN

Le pieu est ensuite coiffé d'un massif en béton dans lequel est scellée l'embase permettant la connexion avec la charpente métallique du pylône.

Spie Batignolles fondations, leader sur le marché de lignes aériennes en fondations spéciales du Réseau de Transport Électrique (Rte) en France et sa filiale allemande Mast Grundbau (depuis 2001) ont réalisé et réalisent plusieurs opérations pour les différents gestionnaires de réseau de transport électrique haute tension en Belgique et en Allemagne.

PROJET 380 kV GANDERKESEE-WEHRENDORF (ALLEMAGNE)

Ce projet de 94 km relie les régions de Brême et d'Osnabrück et doit être mis en service fin 2023. Il est découpé en différents tronçons dont celui situé entre Lemförde et Wehrendorf, pour lequel l'exploitant est Amprion. Sur cette partie, la ligne actuelle exploitée en 110 kV sera remplacée par une nouvelle ligne de 380 kV nécessitant la réalisation de nouveaux supports. Une première partie comporte 37 pylônes dont les fondations ont été réalisées de fin 2017 à 2019.

10- Horta :
plateforme de
travail des pieux
forés tubés.

11- Horta :
forage d'un pieu
foré tubé sous une
ligne en tension.

10- Horta:
work platform
for cased bored
piles.

11- Horta:
drilling for a cased
bored pile under
a live power line.

En fonction des zones considérées, la géologie rencontrée est la suivante :

- Tourbe en partie supérieure ;
- Sables fins de compacité lâche à moyenne, pouvant présenter un caractère argileux ;
- Couches argileuses légèrement sableuses.

Compte tenu de la faible résistance des couches supérieures le choix de fondations s'est porté sur des pieux forés tubés provisoirement :

- 28 supports fondés sur des pieux de diamètre 1200 mm de profondeur 7 à 12 m par rapport au terrain naturel.



11

© IMAGE IN



© IMAGE IN

12

→ 9 supports fondés sur des pieux de diamètre 1500 mm de profondeur comprise entre 10 et 25 m. Les pylônes d'about du tronçon, compte tenu des efforts à reprendre, sont fondés en réalisant deux pieux par pied, soit 8 pieux par support (figure 4).

12- Horta :
forage de micro-
pieux de dia-
mètre 220 mm.

12- Horta:
drilling for micro-
piles of diameter
220 mm.

Les pieux sont armés toute hauteur d'une cage de ferrailage avec un ratio de l'ordre de 150 kg/m³, les cages les plus lourdes pesant 6,25 t. Au total, 1 600 m³ de béton et 235 t d'acier ont été mis en œuvre. Le chantier a mobilisé au total trois foreuses hydrauliques, une Foreuse type BG 20 de Bauer

ainsi qu'une RH24 et une RH28 de fabrication Delmag appartenant à Mast Grundbau, filiale allemande de Spie Batignolles fondations depuis 2001 et dont la création remonte à 1905.

**PROJET 380 kV
AUDORF-FLENSBURG
(ALLEMAGNE)**

Le Land de Schleswig-Holstein doit voir l'implantation à court terme de trois lignes de 380 kV permettant le transit de l'électricité éolienne :

- La Westküstenleitung longeant la Mer du Nord ;
- La Ostküstenleitung reliée à la mer Baltique ;
- La Mittellachse reliant la frontière danoise à Audorf puis Hambourg plus au sud.

C'est sur cette dernière ligne d'une longueur totale de 195 km que les fondations du tronçon Owschlag ont été réalisées en 2019 pour le compte de l'opérateur Tennet TSO. La nouvelle ligne vient en remplacement d'une ligne existante de 220 kV et permettra d'augmenter la capacité de transmission électrique du Danemark et du Schleswig-Holstein à destination du Land de Basse-Saxe.

Contrairement au projet précédent, le choix a été fait de réaliser des pieux inclinés dans l'axe de la membrure de chaque pied de pylône. L'inclinaison ainsi mise en œuvre est de 12° (figure 5).

11 supports sont fondés sur des pieux de diamètre 1 000 mm et de longueur variant de 11 à 23 mètres. L'un des supports, situé en angle, a nécessité pour la reprise des efforts importants la réalisation de trois pieux par pied. Le forage des pieux a été réalisé au moyen d'une foreuse RH28 de Delmag (figure 6).

La mise en service de la ligne est prévue pour 2021.

**PROJET 380 kV
BRABO II (BELGIQUE)**

Au niveau local, le projet Brabo (figure 7) permet à Elia de renforcer la capacité du réseau afin de garantir l'approvisionnement en électricité dans le port d'Anvers, où la consommation électrique est en hausse. Au niveau national et international, le projet renforce l'axe Nord-Sud de la Belgique ainsi que le réseau européen interconnecté. Spie Batignolles fondations a réalisé les fondations profondes de 21 nouveaux pylônes dont 13 en "lieu et place", de juin à septembre 2018, puis d'avril à novembre 2019.



13

© IMAGE IN

La spécificité technique de ce projet réside dans la solution technique imposée par le client Elia : la réalisation d'un pieu foré tubé par pied de pylône en diamètre 1300 mm incliné (8°) et équipé d'une armature tubulaire en diamètre 914 mm (figures 8 et 9). Les sollicitations de compression (1 900 kN) et de traction (1 700 kN) permettent en effet de passer avec un seul pieu par pied (portance), mais l'effort horizontal (300 kN en moyenne) ne pouvait être repris par le tube d'armature qu'en l'inclinant de 8°, cet angle correspondant au fruit de la superstructure (pylône). La diffusion des efforts est alors optimale étant donné que l'embase est scellée directement dans le pieu.

L'environnement (proximité des habitations) n'a pas permis de réaliser des pieux battus injectés sur ce projet, solution technico-économique pourtant plus intéressante que les pieux forés tubés. L'annulaire est injecté au mortier. L'embase (cornière) du pylône est alors scellée directement dans le pieu par un béton de type C30/37.

PROJET 2x380 KV HORTA - AVELIN - AVELGEM (BELGIQUE)

De novembre 2018 à janvier 2020 (13 mois en continu), Spie Batignolles fondations a réalisé le renforcement des fondations de 104 pylônes par micropieux et de 4 pylônes neufs d'ancrage sur pieux forés tubés 1 000 mm sur l'ouvrage aérien Horta-Avelin-Avelgem (figure 7) pour le compte d'Elia (figure 10).

Le projet a pour finalité le remplacement des conducteurs, pour 3 raisons :
→ Une plus grande capacité d'im-

portation et une meilleure sécurité d'approvisionnement ;

→ Un échange d'énergie à l'échelle européenne ;

→ Une intégration des énergies renouvelables. L'augmentation de la capacité permettra de mieux raccorder au réseau l'énergie renouvelable produite par les unités de production notamment les parcs éoliens offshore.

La ligne 2x380 kV Horta-Avelin-Avelgem est une liaison aérienne à haute tension installée dans les années

13- Horta :
mise en place
armature guide.

14- Horta :
phase de béton-
nage.

13- Horta:
placing pile
leader reinfor-
cement.

14- Horta:
concreting
phase.

1970. Pour la partie belge, elle s'étend de Zomergem (poste haute tension Horta à proximité de Gand) à Tournai (interconnexion avec le réseau français) via le poste haute tension d'Avelgem sur une distance de 60 km. Cette ligne se situe dans les provinces de Flandre orientale, de Flandre occidentale et du Hainaut.

Les nouveaux pylônes sont fondés sur 4 massifs de chacun 4 pieux forés tubés verticaux, réalisés en diamètre 1 000 mm à une profondeur moyenne de 25 m.



14

© IMAGE IN

Les pylônes neufs sont réalisés à proximité immédiate de la ligne existante sous tension. En particulier, au pylône n°111N, les conducteurs sous tension étaient situés à 26,7 m de hauteur ce qui, compte tenu de la distance de sécurité de 5 m, ne laissait que 21,7 m de gabarit pour travailler. Une adaptation de la configuration de la foreuse Bauer BG-39 a été nécessaire afin de

réduire sa hauteur à 21,3 m (figure 11). Les renforcements des fondations existantes s'effectuent en réalisant 2, 3, 4 ou 6 micropieux par pied de pylône en forage type autoforé de diamètre 220 mm avec une armature de 127 x 12,5 mm. Les profondeurs sont comprises entre 16 et 35 m (25 m moyen). Les micropieux passent à travers les fondations existantes de type semelle

des pylônes. La méthodologie adoptée a été de préforer ces fondations à l'aide d'un atelier dédié équipé en marteau fond de trou diamètre 285 mm (figure 12).

Les terrains rencontrés sont majoritairement des argiles des Flandres plus ou moins sableuses, avec une zone d'argiles surconsolidées qui a mené à adapter les taillants tri-lames (nombre et positionnement des événements, profil des lames). Le matériel a aussi été adapté (moteur de roto-percuteur, dessableur, presses hydrauliques) afin de disposer du couple nécessaire à l'entraînement du train de tige et de pouvoir recycler le coulis d'injection.

Le poids des tiges de forage (110 kg en longueur de 3 m, manchonnables) et la proximité avec la superstructure du pylône (25 cm entre l'axe du micropieu et les profils) a montré les limites du mode opératoire utilisant le treuil de service des foreuses pour la manipulation des armatures. Un système de

guidage des barres de forage (type pince) à l'aide d'une mini-pelle de 2,5 t a été développé et mis en place afin de réduire la pénibilité et diminuer le risque de blessure mais aussi de dommage sur la superstructure du pylône en place (figure 13).

Les massifs de liaison sont réalisés en béton armé.

Le volume, la récurrence des travaux à réaliser, 104 fondations de pylônes de type treillis à renforcer, ont dicté le traitement de ce projet comme un chantier de logistique pour la partie génie civil. L'organisation des travaux a été "à la chaîne" avec des équipes dédiées chacune à une tâche particulière : terrassement, réglage, ferrailage, coffrage, bétonnage, finitions (figure 14).

La gestion et la coordination du chantier se sont déroulées en néerlandais (y compris les contacts avec les tiers). L'ensemble des documents d'étude et de coordination ont été établis en 2 langues, le français et le néerlandais. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PROJET 380 KV GANDERKESEE-WEHRENDORF (ALLEMAGNE)

- 156 pieux forés tubés en diamètre 1 200 et 1 500 mm de longueur forée comprise entre 7 et 25 m, soit 1 600 m au total
- 2 300 m³ de béton
- 235 t d'acier en cages d'armatures

PROJET 380 KV AUDORF-FLENSBURG (ALLEMAGNE)

- 52 pieux forés tubés en diamètre 1 000 mm inclinés à 12° de longueur comprise entre 11 et 23 m, soit 790 m au total
- 620 m³ de béton

PROJET 380 KV BRABO II (BELGIQUE)

- 104 pieux forés tubés en diamètre 1 300 mm réalisés à des profondeurs comprises entre 10 et 19,5 m, soient 1 400 m au total
- 1 000 m³ de mortier
- 1 200 m³ de béton
- 65 000 m² d'accès et de plateformes de travail, en tôles acier et plateaux bois exclusivement

PROJET 2x380 KV HORTA - AVELIN - AVELGEM (BELGIQUE)

104 FONDATIONS DE PYLÔNES À RENFORCER :

- 1 312 micropieux en diamètre 220 mm, soit plus de 31 km de forage
- 1 132 t d'armatures autoforées
- 165 t d'aciers CF pour les massifs renforcés
- 1 400 m³ de béton C30/37

4 PYLÔNES NEUFS :

- 48 pieux forés tubés en diamètre 1 000 mm, soit 1 600 m de forage
- 152 t d'armatures CFA (cages de pieux)
- 1 400 m³ de béton C30/37 (pieux)
- 62 t d'aciers CF
- 570 m³ de béton C30/37 (massif)

PRINCIPAUX INTERVENANTS

PROJET 380 KV GANDERKESEE-WEHRENDORF (ALLEMAGNE)

MAÎTRE D'OUVRAGE : Amprion

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Bilfinger FRB (Eqos)

FONDATIONS : Mast Grundbau (Spie Batignolles fondations)

PROJET 380 KV AUDORF-FLENSBURG (ALLEMAGNE)

MAÎTRE D'OUVRAGE : Tennet

ENTREPRISE GÉNÉRALE : C-Team

FONDATIONS : Mast Grundbau (Spie Batignolles fondations)

PROJETS BRABO ET HORTA (BELGIQUE)

MAÎTRE D'OUVRAGE : Elia Asset

CONCEPTION ET PLANS : Spie Batignolles fondations

FONDATIONS : Spie Batignolles fondations

ABSTRACT

FOUNDATIONS FOR HIGH-VOLTAGE LINES IN GERMANY AND BELGIUM

ANTOINE CAROULLE, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS -
EMMANUEL SIMON, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

Energy transition is a booming sector in Europe, aimed at reducing the carbon balance and increasing the share of renewable energy. This is materialised in particular by numerous new offshore wind-power farms in the North Sea and the Baltic Sea. This energy then has to be transported, which involves creating new high-voltage lines or increasing the capacity of the existing lines. This article examines the work on these overhead lines in two European countries, Germany and Belgium. It discusses tower foundations, for which various techniques can be used: micropiles with cased bored piles, inclined or not, with various types of reinforcement. □

CIMENTOS PARA LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN EN ALEMANIA Y BÉLGICA

ANTOINE CAROULLE, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS -
EMMANUEL SIMON, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

La transición energética vive un momento álgido en Europa, con la voluntad de reducir la huella de carbono y aumentar la cuota de las energías renovables. Ello queda especialmente patente en los numerosos parques eólicos que recientemente se han construido en el mar del Norte y el mar Báltico. A continuación, esa energía debe ser transportada, lo que ha exigido la construcción de nuevas líneas de alta tensión o el refuerzo de las líneas existentes. Este artículo se interesa por las obras en esas líneas eléctricas aéreas en dos países europeos: Alemania y Bélgica. Se analizan los cimientos de los postes eléctricos, para los que pueden utilizarse distintas técnicas, de los micropilotes a los pilotes perforados entubados, inclinados o no, con diferentes tipos de armaduras. □



© CAMBODIA AIRPORTS 1

EXTENSION DE LA PISTE DE L'AÉROPORT DE SIHANOUKVILLE AU CAMBODGE

AUTEURS : HAMZA MENACEUR, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, MENARD GROUP - FLORIAN SALVETTI, DIRECTEUR DE PROJET, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

EN 2019, SIHANOUKVILLE EST UNE VILLE CÔTIÈRE DU CAMBODGE EN PLEINE TRANSFORMATION SOUS L'IMPULSION D'UN DÉVELOPPEMENT TOURISTIQUE EXCEPTIONNEL. SON AÉROPORT INTERNATIONAL DOIT FAIRE FACE À UNE DEMANDE CROISSANTE, ET C'EST DANS CE CADRE QUE LES ÉQUIPES DE VINCI ET MUHIBBAH ONT RÉALISÉ LES TRAVAUX D'EXTENSION DE 860 m DE PISTE. LES DÉFIS TECHNIQUES ONT ÉTÉ NOMBREUX, AVEC NON SEULEMENT UNE CONSTRUCTION DE PLATEFORME AMÉLIORÉE SUR UN TERRAIN ARGILEUX MOU DE TYPE MANGROVE, MAIS ÉGALEMENT UN DÉLAI D'EXÉCUTION FORTEMENT CONTRAINT PAR UN CLIMAT TROPICAL AVEC MOUSSON.

INTRODUCTION

L'aéroport de Sihanoukville, 3^e aéroport international du pays, a connu une croissance exceptionnelle, voyant son trafic multiplié par 5 entre 2017 et 2019, pour atteindre plus de 1,6 mil-

lion de passagers en 2019. Cette augmentation est la conséquence d'un développement immobilier et touristique soutenu, portée en particulier par les visiteurs venant de Chine. Ainsi, pour accompagner cette

1- Zone du projet.

1- Project area.

croissance, un vaste programme d'investissement et de développement des infrastructures a été lancé, dont le projet d'extension de la piste. En avril 2019, Cambodia Airports, filiale à 70 % de Vinci Airports, a confié à Vinci



Construction Terrassement et à son partenaire local Muhibbah Engineering Cambodia les travaux de terrassement de cette extension. C'est dans le cadre de ce contrat que Menard se voit attribuer les travaux d'amélioration des sols pour l'extension de la piste. Déjà prolongée par deux fois entre 2006 et 2012 (900 m et 300 m), la piste atteint 3,3 km de long grâce à cette nouvelle extension de 860 m. Elle pourra désormais accueillir de plus gros porteurs tels que les B747-400 ou B777-300 ER permettant de soutenir l'accroissement du trafic et l'afflux majeur de touristes.

Pour leur premier chantier au Cambodge, les équipes Vinci Construction Terrassement et Menard ont dû faire face à plusieurs défis, au nombre desquels :

- Construire dans un horizon de surface constitué d'une mangrove côtière surmontant un sol très compressible (figure 1) ;
- L'optimisation du phasage chantier en fonction des aléas climatiques : récurrence de la saison des pluies (3 m d'eau par an concentré sur six mois) ;

2- Vue sur l'ensemble de la zone à traiter.

3- Vue sur l'ensemble des essais in-situ réalisés.

2- View of the whole area to be covered.

3- View of all the in-situ tests performed.

→ Manque de main d'œuvre qualifiée, déjà mobilisée sur d'autres chantiers de construction menés par des acteurs chinois dans la région de Sihanoukville ;

→ Les difficultés liées à l'approvisionnement, en grande quantité, des besoins journaliers du chantier, à savoir, les matériaux utilisés pour les terrassements (250 000 m³) et le béton pour la réalisation des inclusions rigides (16 954 m³) ;

→ Les exigences de respect des servitudes aéronautiques et la

prise en compte des hauteurs des machines (cône d'envol). La réalisation des travaux au sein d'un aéroport en exploitation nécessite des mesures particulières pour limiter l'impact sur le trafic aérien. Ainsi, 43 % de la zone totale des travaux d'amélioration de sol n'était accessible que durant les heures de fermeture de l'aéroport (entre 23h et 06h30).

Les travaux de la prolongation de la piste se sont développés sur 70 000 m² de surface totale dont 49 185 m² ont nécessité des travaux d'amélioration et de renforcement de sol. La figure 2 montre une vue sur l'ensemble de la zone à traiter, divisée en 2 parties principales :

→ Zone 1 : la zone à l'intérieur de l'aéroport avant les travaux d'extension. Elle comprend l'ancienne RESA (Zone 1A, premiers 300 m depuis la fin de la piste existante) et la zone entre la RESA et la clôture de l'aéroport (zone 1B, 140 m de long).

→ Zone 2 : la zone à l'extérieur de l'aéroport (420 m de long) qui correspond à une zone de mangrove côtière.

ÉTUDE DE SOL

Menard et Jeb Surveys & Engineering ont procédé à une campagne d'analyse de sol très poussée afin de bien maîtriser les conditions de sol dans la zone consacrée à l'extension de la piste. Riche en enseignements, cette campagne a inclus la réalisation de 17 sondages carottés, de 60 essais de pénétration statique (CPT), de 14 essais scissométriques, 14 essais triaxiaux, 20 essais œdométriques et de plusieurs essais d'identification de sol sur chaque sondage carotté (figure 3) :

→ Les sondages carottés ont mis en évidence la nature des sols en place avec la présence d'une argile très molle sur des épaisseurs allant de 5 m à 14 m et un substratum constitué d'une argile raide fortement surconsolidée.

→ L'exploitation des nombreux essais CPT à partir du diagramme de Robertson (SBT_n index I_c) a permis de définir la position du toit du substratum argileux et au passage d'identifier tous les sols traversés. La figure 4 présente le profil de sol établi au droit de l'axe de l'extension de la piste mettant clairement en évidence une différence au niveau du profil de sol entre les Zones 1 et 2.

→ Dans la Zone 1, le substratum est surmonté par une argile très molle d'environ 5 m d'épaisseur suivie par une argile surconsolidée moyennement compressible et une couche de sable dense. En revanche, la Zone 2 est caractérisée par la présence de l'argile molle sur des profondeurs plus importantes (environ 14 m) avec quelques lentilles sableuses ponctuelles détectées au sein de l'argile molle.

→ Les données des essais CPT (q_c) ont également permis de déterminer les paramètres de sol nécessaires au dimensionnement des inclusions rigides et à la modélisation de l'interface entre les inclusions et le sol. ▽

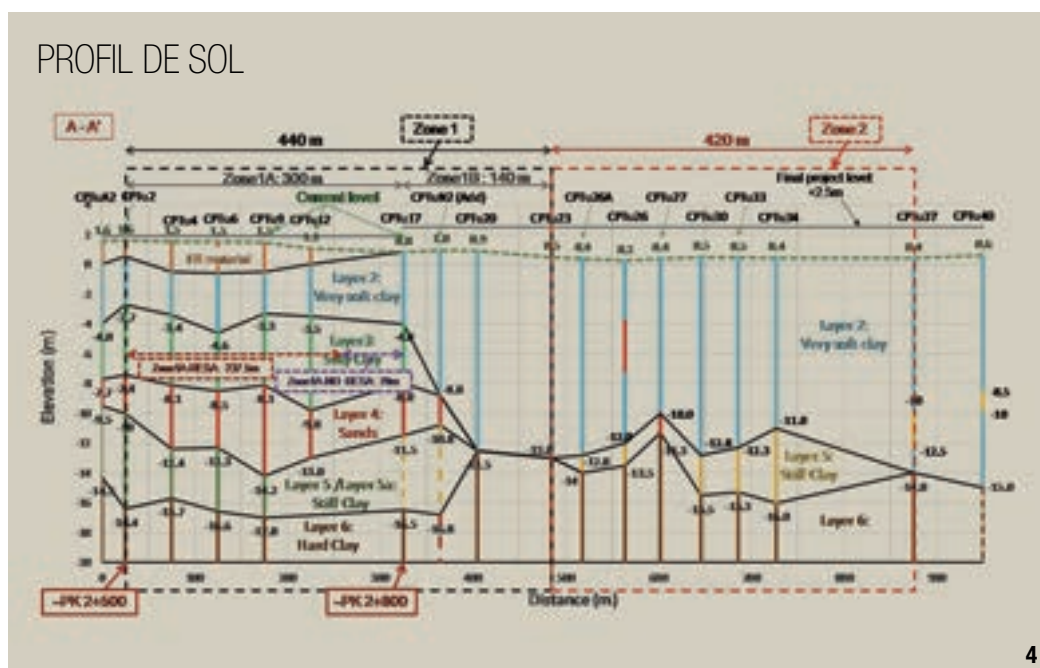


- Les corrélations usuelles à partir des essais CPT ont conduit à un rapport de surconsolidation OCR égal à 1 dans la couche d'argile molle (argile normalement consolidée). Les rapports OCR obtenus dans le substratum sont de l'ordre de 4 à 6.
- Les essais réalisés à partir de scissomètres ont donné des valeurs de résistance au cisaillement à court terme (cohésion non drainée) comprises entre 9 kPa et 20 kPa dans l'argile molle.
- Les essais œdométriques ont permis de déterminer les paramètres de compressibilité (indice de compression C_c , indice de recompression C_s et contrainte de pré-consolidation σ'_p) et de consolidation (C_v , C_r).
- Les essais triaxiaux ont permis de mesurer les paramètres de résistance intrinsèques (angle de frottement et cohésion drainée).
- Les différents essais d'identification classiques menés au laboratoire ont mis en évidence le caractère extrêmement plastique et les propriétés géotechniques très médiocres de l'argile molle. Les teneurs en eau et les indices des vides mesurés sont respectivement de l'ordre de 80 % et de 1,6 (figure 5).

SOLUTION PRÉCONISÉE DE RENFORCEMENT DE SOL

Pour des raisons conjuguées de technique, d'une part, et de contraintes de délai d'autre part, la solution retenue pour renforcer le sol constitué d'argile molle, saturé en eau sur des épaisseurs allant de 5 à 14 m, associe une combinaison des drains verticaux (PVD) et des Colonnes à Module Contrôlé (CMC), qui sont des inclusions rigides en mortier ou béton réalisées par une tarière à refoulement.

Les contraintes liées au niveau le plus haut de la marée (+1,20 m MASL) et au drainage de la plateforme de travail (pente de 2%) ont conduit à la mise en place d'une plateforme de travail épaisse de 1,1 m de hauteur (entre +0,2 m MASL et +1,3 m MASL). Cela correspond à une charge d'environ 23 kPa qui n'est pas portée par les inclusions rigides. L'objectif des drains verticaux est donc d'accélérer la consolidation du sol et de consommer la majeure partie des tassements liés au poids de la plateforme de travail (environ 0,9 m de sable d'emprunt du partenaire Muhibbah aux caractéristiques suivantes $\varphi' = 32^\circ$,



4

© MENARD

PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES DES SOLS IDENTIFIÉS

Layer		q_c [MPa]	T [kN/m ²]	e_c [-]	C_c [-]	C_s [-]	C_v [m ² /A]	$C_r(1+e_c)$ [-]	σ'_p [kN/m ²]	Valeurs de référence pour une argile compressible		
										e_c	C_c	$C_r(1+e_c)$
Layer 2	Soft Clay	0,2	16,4	1,600	0,56	0,10	$1,0 \times 10^{-6}$	0,22	53,0	1,2 to 2	0,3 to 1	0,15 to 0,3
Layer 3	Sandy Clay	1,0	19,6	0,735	0,161	0,026	-	0,09	152,5	-	-	-
Layer 4	Sands	8,0	20,0	0,638	0,135	0,021	-	0,08	175,0	-	-	-
Layer 5 Zone 1	Stiff Clay	1,5	20,1	0,670	0,131	0,019	-	0,08	194,0	-	-	-
Layer 5 Zone 2	Soft Clay	1,5	19,6	0,731	0,173	0,033	-	0,10	187,0	-	-	-
Layer 6	Hard Clay	>2,0	20,7	0,578	<0,166	<0,025	-	<0,05	266	-	-	-

5

© MENARD

$c' = 2$ kPa, $E = 30$ MPa et 20 cm de Graves Non Traitées (GNT 0/37) de carrière massives $\varphi' = 35^\circ$, $c' = 5$ kPa et $E = 50$ MPa) pendant les travaux de renforcement de sol. De plus, les drains permettront également de faciliter l'exécution des CMC à refoulement en évacuant les pressions interstitielles générées.

Les CMC traversent ensuite toute la couche d'argile compressible et s'ancrent d'au moins 1 m dans la couche porteuse. Elles permettent de supporter les charges liées à l'installation du remblai (entre +1,3 m MASL et +2,1 m MASL), de la structure de chaussée (entre +2,1 m MASL et 2,6 m MASL) et éventuellement une partie du poids de la plateforme de travail (par frottement négatif) si le tassement lié à ce poids n'est pas intégralement consommé avant la réalisation des CMC (figure 6).

4- Profil de sol.
5- Paramètres géotechniques des sols identifiés.

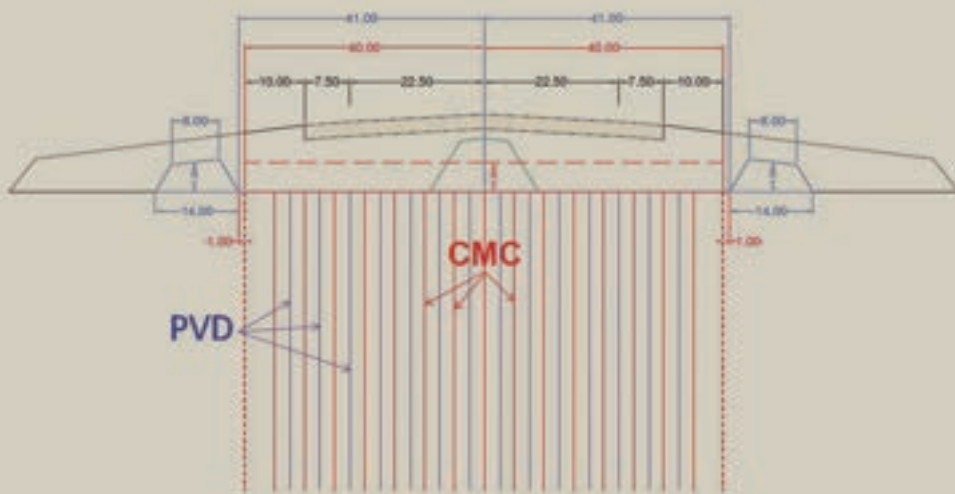
4- Soil profile.
5- Identified soil geotechnical properties.

CHANTIER PLATEFORME DE TRAVAIL

Outre l'aspect très technique du mode de consolidation des sols retenu et surtout le délai très court de réalisation, environ 3 mois, il fallait que le terrassier mette son sous-traitant en conditions de travail optimales, à savoir une plateforme de travail qui ne

devrait souffrir d'aucune déformabilité liée aux cadences soutenues des PVD et CMC : 4 machines de production, environ 20 engins de terrassement et 100 personnes en support travaillant jour et nuit et 6 jours sur 7 pendant un peu moins de 4 mois. Il a donc été décidé après calcul de prévenir tout risque d'endommagement de la plate-forme par les sollicitations des machines PVD et CMC en renforçant la plate-forme dans son ensemble par une, voire deux nappes de géogrilles (figure 7) selon la capacité portante de la mangrove de type Géogrid 60*60 KN NAUE sous sa forme Sécugrid 60*60 Q1 faisant face aux contraintes de poinçonnement des machines en complément de la nappe anticontaminante. Cette technique de renforcement a permis de garantir une plate-forme pérenne avec $EV2 > 50$ MPa.

COUPE TRANSVERSALE TYPE DU PROJET



6

DIMENSIONNEMENT DES DRAINS VERTICAUX

Les drains verticaux ont été dimensionnés pour consommer la quasi-totalité des tassements générés par l'installation de l'épaisse plateforme de travail. Ces tassements doivent être produits rapidement car le temps de consolidation prévu dans le délai global du projet n'est pas significatif. Cette contrainte a nécessité l'utilisation d'une maille carrée de 0,9 m x 0,9 m pour accélérer la consolidation. Les calculs de consolidation fondés sur les théories de Carrillo et de Barron ont montré

6- Coupe transversale type du projet.

7- Vue aérienne de la plateforme de travail en cours de réalisation.

6- Typical cross section of the project.

7- Aerial view of the work platform during construction.

que cette maille serrée permet d'obtenir un degré de consolidation global de l'ordre de 93 % après deux mois de consolidation.

Des mesures de tassement ont débuté avec la mise en place de la plateforme de travail à l'aide d'un maillage dense de plaques de tassement installées selon un calepinage d'implantation topographique précis. Ces mesures ont confirmé les prédictions : une stabilisation des tassements autour de 15 à 20 cm avant la réalisation du remblai. Il convient également de noter qu'aucun tassement ne s'est produit

avant la mise en place des drains verticaux. Sans les drains, les 15 à 20 cm de tassement ne se seraient donc pas produits pendant les travaux, risquant de générer à moyen ou long terme des tassements entre les CMC potentiellement à l'origine de tassements différentiels en surface.

DIMENSIONNEMENT DES CMC

Les CMC travaillent à la fois en frottement et en pointe. Les paramètres mécaniques associés au comportement en frottement et en pointe ont été calculés à partir des données des essais de pénétration statique. Le logiciel de calcul aux éléments finis Plaxis 2D a été utilisé pour dimensionner les CMC. Les sols ont été représentés par une loi de comportement Soft Soil qui requiert l'introduction des paramètres de compressibilité (C_c , C_s et OCR) et des paramètres de résistance au cisaillement (c' et φ'). Une fois introduits, les calculs aux éléments finis 2D ont permis de dimensionner la maille de CMC (1,8 m x 1,8 m) et de prédire des tassements de l'ordre de 12 cm (figure 8) sous les charges dues à la mise en place du remblai, du complexe de chaussée et d'une partie du poids de la plateforme de travail, considérée comme partiellement consolidée (situation sécuritaire). L'effort normal de compression dans les CMC est de l'ordre de 139 kN à l'ELS, inférieure à la charge de fluage mise en évidence lors des essais de chargement et à l'effort de compression mobilisable par le mortier utilisé (C16/20).



7

Les CMC ont été arasées de 80 cm dans la plateforme de travail. Cette arase est essentielle car elle doit présenter les deux propriétés suivantes : protéger les CMC de la circulation des engins pendant les travaux de renforcement de sol, une disposition classique préconisée dans les recommandations ASIRI, et surtout limiter l'effet "point dur" sur le complexe de chaussée (structure souple). En effet, il faut avoir une hauteur de couverture ($H = \text{Niveau fini} - \text{Niveau d'Arase CMC}$) suffisante pour assurer un effet de voûte entre les CMC. Cela conduit à écarter l'effet point dur et limiter le risque de tassement différentiel en surface. Le rapport $H/(s - a)$ permet d'évaluer ce risque, avec "s" étant l'espacement (1,8 m) et "a" étant égal à $\sqrt{\pi/2} \varnothing_{\text{CMC}}$ (0,28 m). Il vaut 1,4 et est nettement supérieur aux recommandations du BS8006 (0,7) qui sont, par expérience, insuffisantes lorsque le sol est fortement compressible.

MATELAS DE RÉPARTITION (REMBLAI) ET CORPS DE CHAUSSEE

Le matelas de répartition d'épaisseur variable de 0,7 m à 1,0 m est constitué du remblai totalement constitué de GNT 0/37 ($\varphi' = 35^\circ$, $c' = 5$ kPa, $E = 50$ MPa et CBR 50) provenant de massifs granitiques de la province de Kampong Speu située à environ 150 km de Sihanoukville. Ces matériaux ont permis d'obtenir une qualité d'arase terrassement avec un EV2 moyen supérieur en tout point de 105 MPa après une mise en œuvre rigoureuse couche par couche densifiée à 95% OPM (figure 9).

Le corps de chaussée est composé de 24 cm de CTB (Cement Treated Base P304), 9 cm de couche de base (P403) et 6 cm de couche de roulement (P401).

CONTRÔLE DES TRAVAUX

De nombreux contrôles ont été réalisés pour vérifier la qualité et la conformité des travaux d'amélioration de sol. L'implantation et l'altimétrie ont été vérifiées systématiquement.

La profondeur a été enregistrée en continu pour chaque drain et chaque CMC. Le diamètre des CMC a été contrôlé ponctuellement par dégarnissage. Les paramètres d'exécution des CMC ont été également enregistrés en continu pour chaque colonne : il s'agit de la vitesse d'avance, de l'effort d'appui, du couple de rotation et de la vitesse de remontée, du volume et

de la pression de bétonnage lors de la remontée. Enfin, en complément, une dizaine d'essais de chargement ont été réalisés afin de valider les paramètres associés aux comportements en frottement et en pointe pris en compte dans le dimensionnement.

Il convient de noter qu'il n'existe pas au Cambodge de référentiel technique consacré à la conception, au dimensionnement, à l'exécution et au contrôle des inclusions rigides. Le chantier de CMC a été réalisé en conformité avec le guide français ASIRI "Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides".

QUELQUES CHIFFRES CLÉS

La plate-forme de travail (70 000 m² CMC + RESA) et tous les assainissements associés ont été réalisés durant la saison des pluies précédant l'intervention de Menard par la réalisation d'un *cofferdam* consistant en deux pistes majeures d'accès depuis la RD45 existante, et deux pistes secondaires de ceinture intégrées au remblai futur sur le périmètre global de l'ouvrage en terre. Un apport de sable d'emprunt d'environ 130 000 m³

et 105 000 m³ de GNT 0/37 et 200 000 m² de géotextile jouant à la fois le rôle d'anticondaminant et de géo-grid de renforcement.

Pour l'amélioration et le renforcement de sol, un total de 59 707 drains verticaux et de 14 560 CMC de diamètre 320 mm ont été réalisés en 3 mois par deux ateliers en double poste, de début décembre 2019 à début mars 2020. Les linéaires totaux sont respectivement 811 920 m de drains et 198 950 m de CMC. Si la longueur moyenne des CMC est de 13,6 m, elle

varie en fonction du profil de sol d'une zone à une autre (7 m dans la zone 1A, 12 m dans la zone 1B et environ 15 m dans la zone 2).

CONCLUSIONS

La réalisation de l'extension de la piste sur un sol renforcé par des CMC a permis de satisfaire au critère technique de tassement résiduel (< 15 cm) ainsi que de s'affranchir du risque lié à la stabilité de l'ouvrage à cause de la faible résistance au cisaillement initiale de l'argile molle.

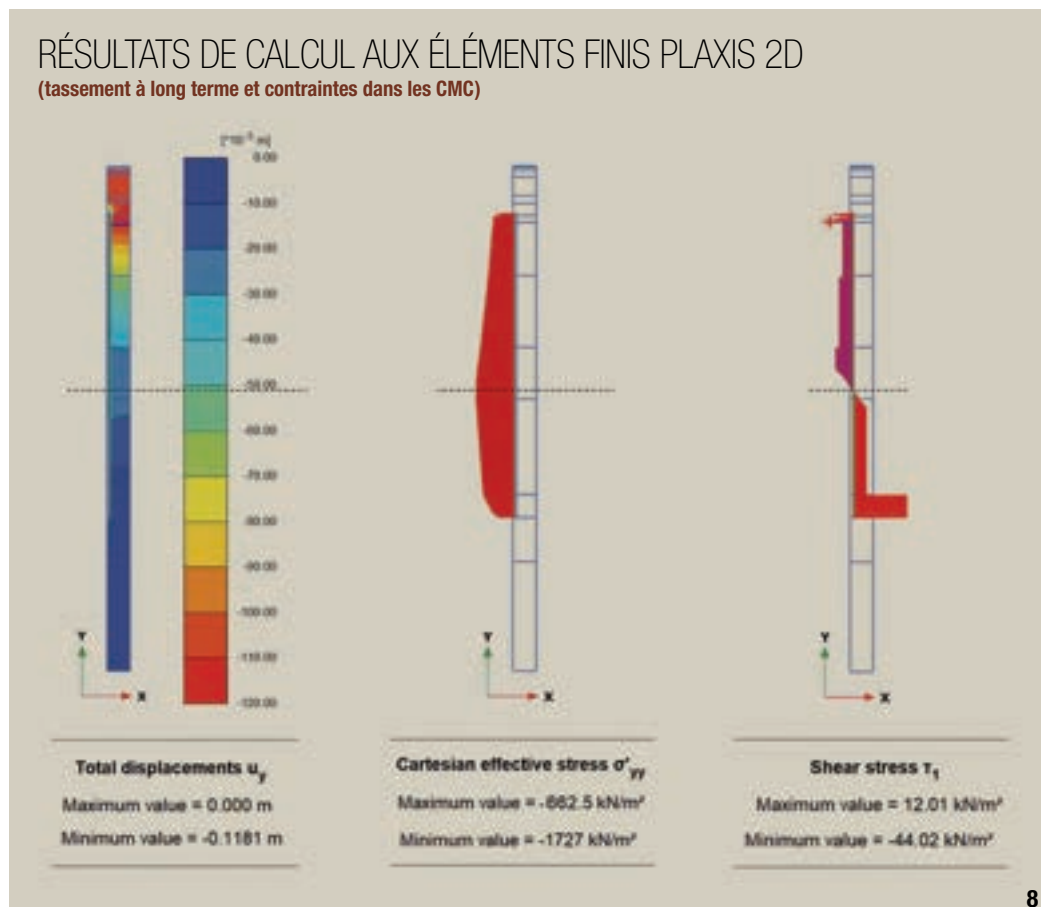
La solution technique préconisée par Menard et retenue par Cambodia Airports a donc été la mieux adaptée car répondant précisément aux deux contraintes majeures du projet :

- Délai de réalisation : 1 seule saison sèche, de novembre 2019 à mai 2020 ;
- Épaisse couche d'argile molle (10 à 12 m) et faible résistance au cisaillement.

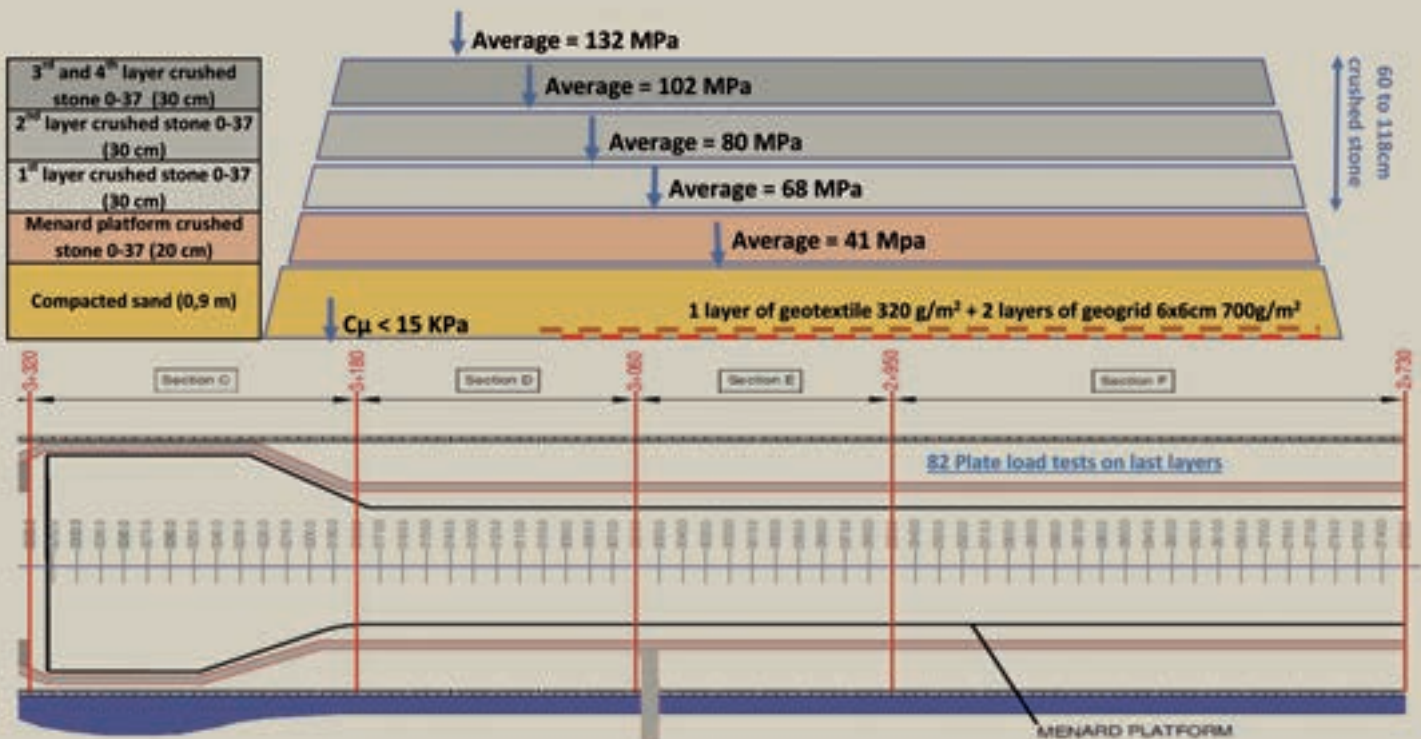
L'apport de Vinci Construction Terrassement aura été notamment de planifier et de séquencer les travaux en incorporant aussi bien les contraintes associées au domaine de l'aviation civile que celles résultant du cycle des moussons :

8- Résultats de calcul aux éléments finis Plaxis 2D (tassement à long terme et contraintes dans les CMC).

8- Plaxis 2D finite-element calculation results (long-term subsidence and stresses in Controlled Modulus Columns).



RÉALISATION DU MATELAS DE RÉPARTITION PAR COUCHE - LES MOYENNES DES VALEURS EV2 OBTENUES PAR COUCHE



9

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

- Réaliser une plate-forme de travail tout temps (50 MPa) en saison des pluies (mai 2019 à fin octobre 2019 sous 2880 mm d'eau) ;
- Réaliser les travaux de confortement PVD et CMC en moins de quatre mois (2 décembre 2019 au 4 mars 2020) ;
- Réaliser la deuxième phase de remblai en GNT 0/37 pour garantir une arase d'au moins 105 MPa en tout point trois semaines (21 jours) après la réalisation à l'avancement des CMC ;
- La réussite de ces travaux par Vinci Construction Terrassement, Menard et Muhibbah Engineering Cambodia a permis à Cambodia Airports de pouvoir engager dans la foulée les travaux de chaussée (39 cm

9- Réalisation du matelas de répartition par couche - les moyennes des valeurs EV2 obtenues par couche.

9- Execution of the layered load distribution matress - average EV2 values obtained per layer.

d'épaisseur) entre mars et fin juin 2020 ainsi que l'installation des équipements de balisage et autres marquages. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Cambodia Airports
ENTREPRISE GÉNÉRALE : Vinci Construction Terrassement et Muhibbah Engineering Cambodia
ENTREPRISE D'AMÉLIORATION DE SOL : Menard

PRINCIPALES QUANTITÉS

COÛT TOTAL DE L'OPÉRATION : 30 millions USD
DURÉE TOTALE DU CHANTIER : 15 mois
SURFACE TOTALE DU CHANTIER : 70 000 m²
DURÉE DES TRAVAUX D'AMÉLIORATION DES SOLS : 3 mois
SURFACE DE TRAITEMENT D'AMÉLIORATION DE SOLS : 49 185 m²
DRAINS VERTICAUX : 59 707 unités / 811 920 m
COLONNES À MODULE CONTRÔLÉ Ø 320 mm : 14 560 unités / 198 950 m

ABSTRACT

EXTENSION OF THE RUNWAY OF SIHANOUKVILLE AIRPORT IN CAMBODIA

HAMZA MENACEUR, MENARD GROUP -
 FLORIAN SALVETTI, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

A significant extension programme for Sihanoukville Airport has been initiated by Cambodia Airports in response to the significant increase in daily traffic, due mainly to the tourist appeal of Sihanoukville city and its surroundings. The runway extension project was awarded to Vinci Construction Terrassement and their local partner Muhibbah Engineering in April 2019. From December 2019 to March 2020, Menard performed soil improvement and reinforcement works with vertical drains and rigid inclusions under the runway extension. Following this new 860-metre extension, the runway is now 3.3 km long and can receive long-haul aircraft and also handle the increase in air traffic. □

AMPLIACIÓN DE LA PISTA DEL AEROPUERTO DE SIHANOUKVILLE EN CAMBOYA

HAMZA MENACEUR, MENARD GROUP -
 FLORIAN SALVETTI, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

Cambodia Airports ha iniciado un ambicioso programa de ampliación del aeropuerto de Sihanoukville para responder al importante incremento del tráfico diario, principalmente debido al atractivo turístico de la ciudad de Sihanoukville y sus alrededores. El proyecto de ampliación de la pista de aterrizaje se concedió a Vinci Construction Terrassement y a su socio local Muhibbah Engineering en abril de 2019. La empresa Menard intervino entre diciembre de 2019 y marzo de 2020 para realizar mejoras del suelo y trabajos de refuerzo, con desagües verticales e inclusiones rígidas bajo la ampliación de la pista. Con esta nueva ampliación de 860 m, la pista de aterrizaje tiene ahora 3,3 km de longitud, lo que le permite a la vez recibir aviones de larga distancia y asumir el aumento del tráfico aéreo. □



LES DESSOUS DE LA TOUR MOHAMMED VI DE RABAT

AUTEURS : MATHIEU CATONNE, DIRECTEUR DE PROJET, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL - HAMZA EL ARFAOUI, INGÉNIEUR TRAVAUX DU PROJET, SOLSIF MAROC

DESTINÉE À ÊTRE LA PLUS HAUTE TOUR DU CONTINENT AFRICAÏN, LA TOUR MOHAMMED VI SERA CONSTRUITE DANS LE CŒUR DE LA VALLÉE DU BOUREGREG, ZONE PARTAGÉE ENTRE LA VILLE DE RABAT, CAPITALE DU ROYAUME DU MAROC, ET LA VILLE DE SALÉ. S'ÉLEVANT SUR PLUS DE CINQUANTE ÉTAGES, L'ÉDIFICE "TOUR", AVEC UN DIAMÈTRE DE BASE DE 35 m, SERA HAUTE D'ENVIRON 250 m ET SERA GARNI PAR UN BÂTIMENT "SOCLE" DE DEUX ÉTAGES. UNE TELLE CONFIGURATION SUPPOSE UN SYSTÈME DE FONDATIONS SPÉCIALES APTE À SUPPORTER L'OUVRAGE.



© AGENCE MAP
2

LE CONTEXTE DU PROJET

La Tour Mohammed VI constitue l'une des pièces maîtresses du plan d'aménagement de la Vallée du Bouregreg qui permettra à la capitale royale de promouvoir les rives du fleuve Bouregreg et d'offrir un lieu de vie agréable aux habitants de Rabat tout en renforçant le rayonnement culturel de la ville.

Le projet s'appuie sur la situation géographique du site avec un élément de socle renforçant l'élanement de la tour, ouvrant des visuels sur la mer et la ville. Il offrira des hôtels, des bureaux, des résidences, des commerces, des par-

1- Représentation architecturale du projet.

2- Programme "Rabat Ville Lumière, capitale marocaine de la culture".

1- Architect's illustration of the project.

2- Programme entitled "Rabat City of Light, Moroccan capital of culture".

kings et abritera le futur siège officiel de la banque BMCE - Bank Of Africa (figure 3).

LE CHOIX DE L'ENTREPRISE DE TRAVAUX SPÉCIAUX

Soletanche Bachy a été intégré, dès les débuts du projet, au développement et à la réalisation des fondations de la Tour de Rabat. Le groupe a été choisi pour réaliser les fondations de l'ensemble du programme, en y apportant sa connaissance du tissu économique local et son expertise technique et logistique internationale, afin d'offrir la réactivité et

la rigueur nécessaires à l'obtention de la certification LEED Gold et HQE.

LES CONTRAINTES GÉOLOGIQUES

Le projet est situé géologiquement dans la meseta côtière du domaine meseto-atlasique du Maroc, caractérisée par des formations récentes par rapport à d'autres régions du royaume, telles que le Moyen ou le Haut Atlas. Les sols sont majoritairement composés de sables lâches à compacts, parfois vaseux, puis d'une alternance de couches de vases et de sables vaseux pouvant atteindre une profondeur d'environ 70 m. ▷

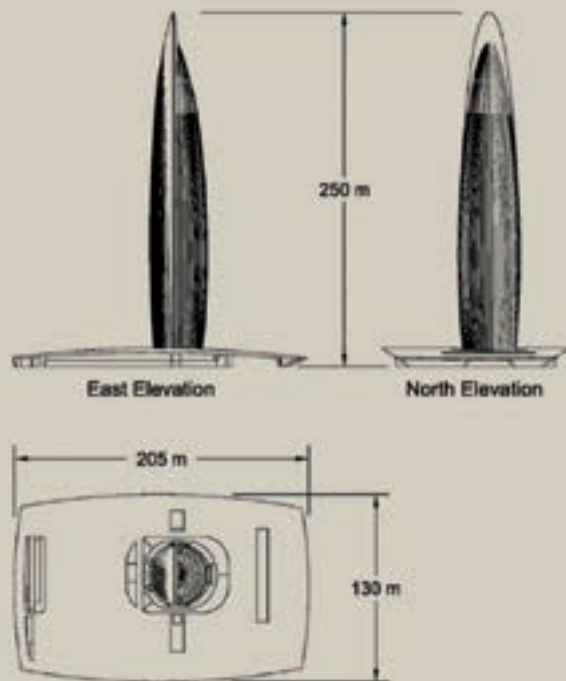
VUE EN PLAN ET EN ÉLÉVATION DU PROJET

Au-delà de cette profondeur, on rencontre une couche alluvionnaire d'une dizaine de mètres d'épaisseur. Dans la zone du projet, le niveau de la nappe est à environ 1 m sous le niveau de la mer (figure 4).

LES FONDATIONS DES OUVRAGES DE LA TOUR

Les fondations de la tour sont constituées d'une série de 1700 pieux CFA, réalisés à la tarière creuse continue, d'environ 12 m de profondeur et formant les fondations de l'ouvrage "socle" de deux étages (figure 5). Le choix technique s'est porté sur ce type d'assise en raison de sa rapidité et de sa simplicité d'exécution, tout en étant bien adapté aux contraintes liées aux sols vaseux.

Le centre de l'ouvrage est le départ de l'édifice "Tour" de 250 m de haut. Un système de fondations composé d'un groupe de 104 barrettes (panneaux unitaires de paroi moulée) a été préconisé pour permettre de supporter la totalité des descentes de charge de la tour. Ces éléments de fondations atypiques, d'une profondeur moyenne de 65 m, sont fermement ancrés dans les sables durs et fins, permettant de maximiser les effets du frottement latéral. Ces fondations profondes s'arrêtent en limite alluvionnaire afin de favoriser l'effet de pointe tout en s'affranchissant des effets indésirables de ce type de couche ouverte. Pour confirmer ce type de fondations, des essais sur cellules Osterberg ont été réalisés en 2017 en les insérant dans les cages



3

© BESIX-TGCC

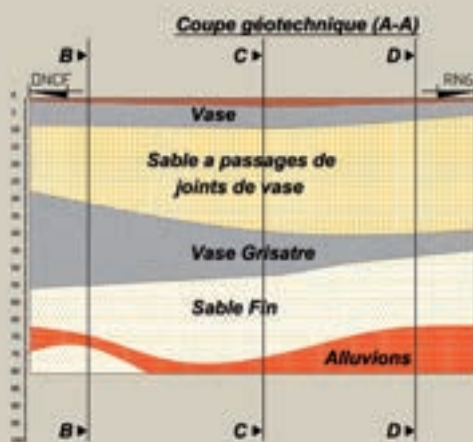
3- Vue en plan et en élévation du projet.

4- Coupe géologique typique du projet.

5- Vue d'ensemble des travaux de fondations.

6- Vue en plan des fondations profondes. Au centre, les 104 barrettes, nécessaires aux fondations de la tour.

COUPE GÉOLOGIQUE TYPIQUE DU PROJET



4

© BESIX-TGCC

3- Plan and elevation views of the project.

4- Typical geological cross section of the project.

5- General view of foundation works.

6- Plan view of deep foundations. In the centre, the 104 barrettes needed for the tower foundations.

d'armatures de deux barrettes d'essais. Cela a d'ailleurs constitué la première application de ce type d'essai sur le sol marocain, dont les résultats ont permis d'affiner les modèles géologiques, d'optimiser la sous-structure et de confirmer le type de fondations choisi (figure 6).



5

© SOLETANCHE-BACHY

VUE EN PLAN DES FONDATIONS PROFONDES

Au centre, les 104 barrettes, nécessaires aux fondations de la tour



6

© SOLETANCHE-BACHY



7
© SOLETANCHE-BACHY

UN DÉMARRAGE SUR LES CHAPEAUX DE ROUE

Le démarrage du chantier fin 2018 s'est fait dans un laps de temps très court puisqu'il a fallu, en l'espace d'un mois, mobiliser une équipe de près de 100 personnes. La coopération interne entre Solsif Maroc, filiale marocaine historique du groupe Soletanche Bachy, et la division internationale des Grands Projets, a permis d'apporter l'expertise nécessaire.

Soletanche Bachy a mobilisé un atelier de benne hydraulique pouvant réaliser

7- Vue d'ensemble des travaux de barrettes.

8- L'équipe de chantier au complet.

7- General view of deep foundation works.

8- The complete worksite team.

des éléments de barrette à 70 m de profondeur, ainsi qu'une foreuse équipée d'un kit CFA permettant de forer des pieux de diamètre 600 mm jusqu'à 20 m de profondeur (figure 7).

UN PERSONNEL À L'IMAGE DES BESOINS DU CHANTIER

Afin de respecter les délais d'exécution ainsi que les exigences techniques et qualitatives du projet, le groupe Soletanche Bachy a su déployer le personnel qualifié adéquat. L'encadrement de l'équipe sur site a été assuré par un

directeur de projet, un adjoint au directeur de projet responsable des travaux de fondations, ainsi qu'un duo d'ingénieur et de conducteur de travaux pour chacune des spécialités (pieux CFA et barrettes). Lors de l'exécution des travaux, des chefs d'équipes et des chefs de postes ont assuré l'encadrement des collaborateurs sur chantier. L'équipe du projet a bénéficié du support des différentes entités du groupe Soletanche Bachy telles que le bureau d'études, les experts méthodes et le laboratoire des matériaux (figures 8). ▶



8
© SOLETANCHE-BACHY



9

© SOLETANCHE-BACHY

RESSOURCES EN MATÉRIEL

Les parcs matériel de Solsif Maroc et de Soletanche Bachy ont été sollicités afin de doter le chantier des équipements les plus appropriés pour exécuter les travaux, avec notamment deux foreuses CFA pour la technique des pieux CFA, ainsi que deux grues d'excavation hydraulique et mécanique et cinq grues de manutention pour la technique des barrettes. Tout cela accompagné d'un jeu diversifié d'outils de forage, de pompes, de dessableurs et de malaxeurs (figures 9 et 10).

FOURNITURES SENSIBLES ET CONTRÔLE DE QUALITÉ

Les travaux ont nécessité plus de 27 000 m³ de béton et 2 000 t d'acier (figure 11). D'autres fournitures, comme la bentonite et les tubes d'auscultation sonique, ont été utilisées et ont subi un processus de contrôle qualité rigoureux, sans oublier les essais sur béton frais, menés tout au long des travaux pour s'assurer de leur conformité.

DES SINGULARITÉS GÉOLOGIQUES

Il a fallu savoir capitaliser sur les résultats des essais de chargement lors des barrettes d'essais. Néanmoins, plusieurs faits inattendus se sont produits au démarrage de la réalisation des barrettes en 2019, donnant du fil à retordre à l'équipe en place.

Très vite, il est apparu qu'une quantité non négligeable de particules fines se trouvait dans les couches de sables vaseux, rendant les opérations de des-

sablage chronophages et inefficaces, compte tenu des moyens mobilisés. Par ailleurs, lors de la réalisation de plusieurs des barrettes, des éboulements significatifs et non prévisibles ont été observés, nécessitant des opérations délicates de déséquipement des cages d'armatures. Des mesures piézométriques complémentaires ont mis en évidence la présence d'une nappe captive en profondeur, confirmée par des écarts systématiques de température entre la nappe libre et la nappe profonde. La présence de la nappe captive, conjuguée aux mouvements de descente de la benne dans la tranchée, a provoqué un effet de pistonage qui s'est tra-

9- Les travaux de fondation en pleine activité.

10- Travaux de terrassement suite à la réalisation des pieux CFA.

9- Foundation works at peak activity.

10- Earthworks following the execution of CFA piles.

duit par un éboulement de la tranchée ouverte à proximité (figure 12).

UNE PHASE D'ACCÉLÉRATION

Bien qu'exceptionnelles, ces particularités géologiques ont été maîtrisées grâce au support des experts qui constituent la force du groupe Soletanche Bachy. D'importants moyens supplémentaires ont été dépêchés en quelques semaines, se traduisant par la mobilisation d'une benne mécanique lourde additionnelle et d'un dessableur d'une capacité de 450 m³, habituellement utilisé pour des opérations réalisées avec des ateliers de type Hydrofraise.



10

© SOLETANCHE-BACHY

Le savoir-faire du groupe a permis d'apporter son lot d'adaptations des méthodes de chantier en introduisant la substitution totale et systématique, afin d'amener les moyens nécessaires à la réalité du site et de permettre de doubler les cadences de production (figures 13 et 14).

CERTIFICATION LEED GOLD ET HQE

Dans le cadre de la démarche LEED/HQE, le chantier a été appelé à respecter des exigences liées à l'environnement, le tri des déchets se faisant à la source et selon leurs types (déchets domestiques, aciers, bois, déchets dangereux). Ces déchets ont été évacués tout au long des travaux par le biais de filières de recyclage spécifique vers des



© SOLETANCHE-BACHY 11

11- Installation des cages d'armature des barrettes.
12- Schéma de principe de l'effet "piston".

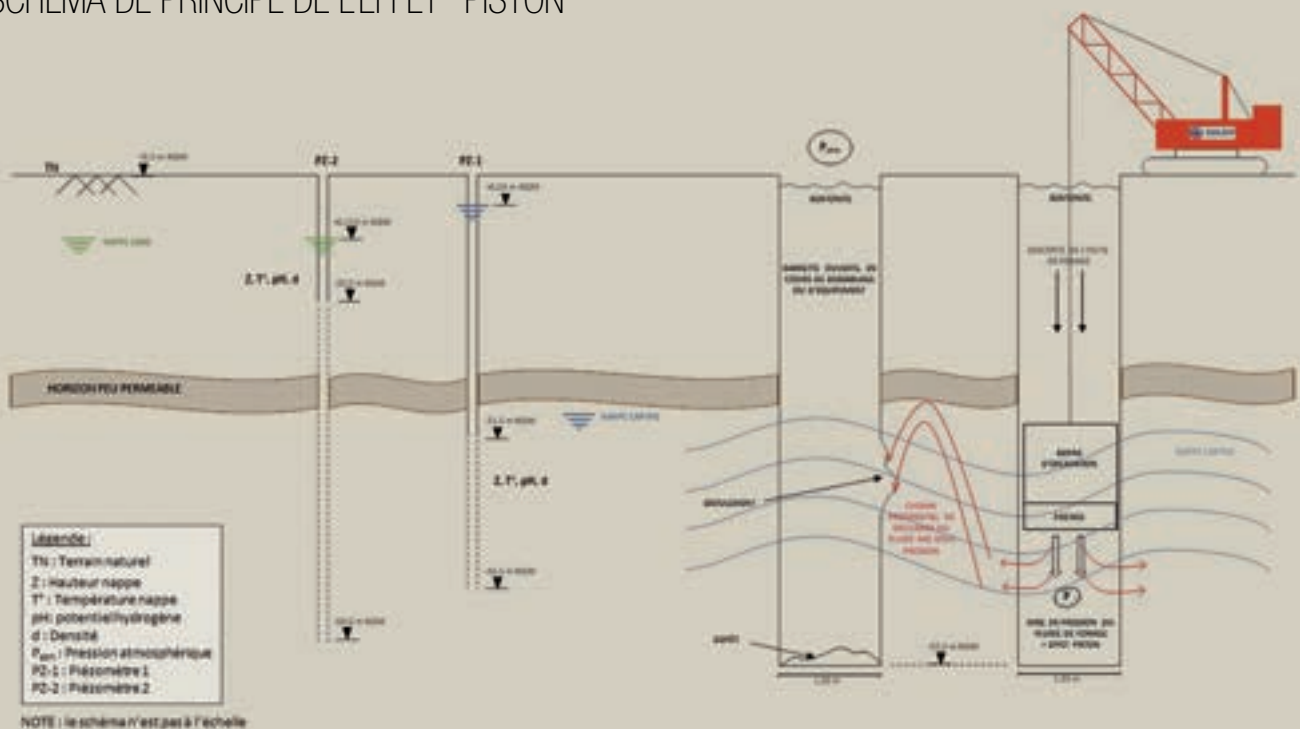
11- Installation of barrette reinforcing cages.
12- Schematic diagram of the "piston" effect.

destinations adaptées pour les accueillir. Une partie de ces déchets a été éliminée, mais une grande partie a été recyclée pour être réutilisée sous une autre forme. Le chantier a, par ailleurs, considérablement limité sa consommation en termes de ressources en eau et en énergie, en supprimant par exemple l'utilisation de groupes électrogènes au profit d'une connexion au réseau de la ville, ce point étant essentiel pour l'obtention du certificat LEED Gold.

RELATION SOUS-TRAITANT/ CLIENTS

Pour ce projet, Soletanche Bachy a été sous-traitant du groupement d'entreprises Besix-Tgcc, les deux entités étant mandatées par le maître d'ouvrage. Le projet était alors soumis à un plan d'assurance qualité niveau 3 caractérisé par la présence de trois niveaux de contrôle. Un premier contrôle interne effectué par le sous-traitant Solsif Maroc/Soletanche Bachy, un deuxième contrôle externe effectué par le groupement d'entreprises Besix-Tgcc, et un dernier contrôle extérieur effectué par les équipes mandatées par le maître d'ouvrage. Cette coprésence des intervenants a nécessité un haut niveau de collaboration dans l'objectif d'exécuter les travaux en répondant au mieux aux exigences du marché. ▷

SCHÉMA DE PRINCIPE DE L'EFFET " PISTON "



12- Schéma de principe de l'effet "piston".

© SOLETANCHE-BACHY 12



13

© SOLETANCHE-BACHY



14

© SOLETANCHE-BACHY

La relation entre les différents intervenants du projet s'est traduite également au niveau du secteur HSE du projet. Comme pour la qualité, chaque organisme avait sa structure de supervision pour encadrer les travaux du point de vue de la sécurité. La collaboration et la communication fructueuse entre les représentants des différents organismes ont permis de mener le chantier à bien.

DES RÉSULTATS À LA HAUTEUR DE L'AMBITION DU PROJET

L'achèvement des travaux des fondations de la Tour Mohammed VI est avant tout exemplaire sur le plan de la sécurité, puisqu'aucun accident avec arrêt n'a été enregistré pendant les 6 mois du chantier. L'excellence opérationnelle, la conduite du changement, et l'implication altruiste de Besix-Tgcc dans la résolution des problèmes rencontrés, ont permis de livrer un ouvrage conforme aux spécifications du marché et de conserver une proximité privilégiée avec le client et ses représentants. L'ancrage local fort et l'expertise globale du groupe Soletanche Bachy ont été un vecteur important de formation et une

13- Les capacités de dessablage dimensionnées aux besoins du projet.

14- Une benne hydraulique type KS et une benne mécanique lourde type M8 ont été mobilisées pour réaliser l'excavation des barrettes.

13- Desanding capacity designed for the needs of the project.

14- A KS type hydraulic grab and an M8 type heavy mechanical grab were deployed to perform barrette excavation.

opportunité de transfert de connaissances permettant de pérenniser encore davantage l'offre géotechnique de Soletanche Bachy au Maroc. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

BUDGET DU PROJET : 4 Milliards MAD (environ 400 millions d'euros)

DURÉE DE RÉALISATION : octobre 2018 - mai 2022

BARRETTES DE LA TOUR :

- Nombre : 104 u
- Profondeur : 65 m
- Excavation : 18 000 m²
- Béton : 21 000 m³

PIEUX CFA DU SOCLE :

- Nombre : 1 740 u
- Profondeur : 12 m
- Diamètre : 620 mm
- Béton : 6 000 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

CLIENT : Otower Groupe FinanceCom

ASSISTANT MAÎTRISE D'OUVRAGE : Colliers International

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Ginger, Qualiconsult, Omtec

ARCHITECTES : Raphael De la Hoz, Hakim Benjelloun

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Besix-Tgcc

SOUS-TRAITANT FONDATIONS SPÉCIALES :

Solsif Maroc - Soletanche Bachy

ABSTRACT

UNDER THE MOHAMMED VI TOWER IN RABAT

MATHIEU CATONNE, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL -
HAMZA EL ARFAOUI, SOLSIF MAROC

The Mohammed VI Tower is an emblematic building with deep foundations that were executed by Soletanche Bachy. The project, which got under way at end-2018, required the swift deployment of significant human and equipment resources to execute about 20,000 metres of continuous auger piles and 18,000 m² of barrettes. The numerous technical constraints faces during the six months of site works enabled Soletanche Bachy to confirm the strength of its model based on a combination of strong local ties and proactive global expertise. This also explains the good results achieved from a safety viewpoint. □

LOS CIMIENTOS DE LA TORRE MOHAMMED VI DE RABAT

MATHIEU CATONNE, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL -
HAMZA EL ARFAOUI, SOLSIF MAROC

La Torre Mohammed VI es una construcción emblemática cuyos profundos cimientos fueron ejecutados por Soletanche Bachy. La obra, iniciada a finales de 2018, precisó la rápida movilización de medios humanos y materiales importantes para instalar con éxito sus cerca de 20.000 m de pilotes con barrena continua y 18.000 m² de pilotes flotantes. Los numerosos obstáculos técnicos hallados durante los seis meses de trabajo permitieron a Soletanche Bachy confirmar la potencia de su modelo basado en la asociación de un sólido anclaje local y una capacidad global reactiva, lo que se tradujo en unos buenos resultados en términos de seguridad. □

SMA



L'ASSUREUR DEPUIS 160 ANS AU SERVICE DU BTP

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




SMABTP
BTP ENRÉS AVIS ASSURANCE

SMA **VIE**

Engineering a Better Solution

Depuis 140 ans, le Groupe Maccaferri apporte à ses partenaires sa capacité d'innovation dans la réalisation d'ouvrages de haute technicité et d'une exceptionnelle longévité, sous la devise «Engineering a Better Solution».

Ses solutions sont pensées autour d'une double préoccupation : répondre à la dimension écologique et financière de chacun de vos projets, grâce à son expérience et son expertise acquises au fil des années.

MACCAFERRI

www.maccaferri.com/fr



Aménagements paysagers
& hydrauliques du parc de
la Mogère, Montpellier (34)

En haut : murs poids en gabions
En bas : déversoir en Matelas Reno®

