

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

SOLS ET FONDATIONS. INSTRUMENTATION DYNAMIQUE DE PIEUX PAR FIBRE OPTIQUE. NOUVEAU PARKING JEAN-JAURES A TOULOUSE. HONG KONG TMCLK - "Y-PANELS". GRAND PARIS EXPRESS : PUIITS DE DEPART LIGNE 15 SUD ET GARE DE SAINT-MAUR-CRETEIL. VILLA ENGELIN A MONACO. DEVIATION DE LA RN 19 A BOISSY-SAINT-LEGER. DEVELOPPEMENT DU POLDER DE BREST. ROTULE DU QUAI DE FOS-SUR-MER. REHABILITATION DU SITE DE CLARIANT (68). BOULEVARD URBAIN SUD DE MARSEILLE

N° 950 AVRIL/MAI 2019



LA ROTULE DU QUAI
DE FOS-SUR-MER -
REPARATION DES
OUTILS DE FORAGE
© CÉDRIC HELSLY



SEFI-INTRAFOR

NOS FONDATIONS AUJOURD'HUI, CE SONT EUX

**NOS FONDATIONS
DE DEMAIN,
C'EST PEUT-ÊTRE
VOUS !**

REJOIGNEZ-NOUS POUR LE GRAND PARIS

FONDATIONS.FAYAT.COM



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 tpi), Philippe Gotteland
(Fnfp), Jean-Christophe Goux-Reverchon
(Fnfp), Florent Imbert (Razel-Bec),
Nicolas Law de Lauriston (Léon Grosse),
Claude Le Quéré (Egis), Véronique
Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau
(Soletanche Bachy), Jacques Robert
(Arcadis), Solène Sapin (Bouygues
Construction) Claude Servant (Eiffage tp),
Philippe Vion (Vinci Construction Grands
Projets), 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. Édouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.fr

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

Publicité
Rive Média
2, rue du Roule - 75001 Paris
Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44
contact@rive-media.fr
www.rive-media.fr

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

Site internet : www.revue-travaux.com

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

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

Tous droits de reproduction, adaptation, totale
ou partielle, France et étranger, sous quelque
forme que ce soit, sont expressément réservés
(copyright by Travaux).
Ouvrage protégé : photocopie interdite, même
partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait
contrefaçon (code pénal, article 425).

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

L'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE : UN ATOUT POUR LES PROJETS DE CONSTRUCTION



© BF

Le 4 octobre dernier, le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS) fêtait ses 70 ans : une belle occasion de faire un bilan de son histoire, de ses actions, et de souligner les perspectives et les enjeux de demain pour notre profession. Près de 300 personnes ont participé à cet événement, et 16 sponsors nous ont soutenus. Plusieurs journalistes étaient également présents et ont relayé cette manifestation dans leurs colonnes ou sur les réseaux sociaux. Ces chiffres témoignent d'une belle vitalité de notre profession !

Il nous faut à présent aller plus loin et encore mieux faire connaître nos métiers auprès de l'ensemble des acteurs de la construction, pour donner à l'ingénierie géotechnique la place qui lui revient. Elle est en effet encore trop souvent considérée comme une "étape obligée", génératrice de coûts, alors que son intervention est d'autant plus efficace et déterminante qu'elle est impliquée dès les phases amont des projets, et qu'elle a l'occasion d'interagir avec les différents acteurs de l'acte de construire, dans une approche intégrée.

Qu'apporte l'ingénierie géotechnique ? Au risque d'énoncer des évidences, elle garantit la stabilité des ouvrages et contribue à la maîtrise des risques projet, en phase travaux comme en phase d'exploitation sur le long terme. Au-delà de cette contribution essentielle et assez largement reconnue aujourd'hui, elle peut être décisive dans la détermination de la faisabilité technique et/ou économique des ouvrages :

des solutions techniques innovantes sont parfois nécessaires pour répondre aux contraintes des projets (emprises réduites, profondeurs exceptionnelles, environnement sensible, délais et budgets...) et les rendre tout simplement viables. Enfin, l'ingénierie géotechnique permet souvent d'optimiser les ouvrages (coûts et délais de construction, impact environnemental, etc.) : elle peut ainsi aider un Maître d'ouvrage à maîtriser son budget, un Maître d'œuvre à concevoir un projet performant, une entreprise à proposer des variantes décisives en phase d'appel d'offres.

L'ingénierie géotechnique a également un rôle important à jouer dans la prise en compte des grands enjeux sociétaux. C'est le cas depuis longtemps dans le domaine de la prévention des risques naturels : stabilité des pentes et versants rocheux, conception parasismique, etc. De nouvelles thématiques sont apparues ces dernières années et les géotechniciens s'y investissent pleinement : maintenance et réhabilitation des infrastructures et bâtiments, qui nécessitent des méthodes de conception et des techniques de construction spécifiques (diagnostic des ouvrages existants, réutilisation des fondations, ...); transition énergétique (structures géothermiques, fondations d'éoliennes, réemploi des matériaux, ...); ou encore prévention des effets du réchauffement climatique (digues de protection par exemple).

Pour répondre à ces enjeux, la filière géotechnique innove et développe sans cesse, dans tous les domaines : reconnaissances et détermination des propriétés des sols, conception des ouvrages avec prise en compte de l'interaction sol-structure, exécution des travaux, instrumentation des ouvrages. En parallèle, la transition numérique fait évoluer rapidement les méthodes de travail : SIG, BIM, Big Data... Ces outils vont impacter durablement nos métiers et élargir encore le champ des possibles. Ils vont aussi nous conduire à échanger davantage avec l'ensemble des acteurs de la construction, dans l'intérêt de tous.

VALÉRIE BERNHARDT

DIRECTRICE GÉNÉRALE DE TERRASOL (GROUPE SETEC)
PRÉSIDENTE DU COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE
MEMBRE ÉLUE DU BUREAU GÉOTECHNIQUE
DE SYNTEC INGÉNIERIE

SOLS & FON DATIONS

GRAND PARIS - LIGNE 15 SUD - OS 1302P - Puits de départ de tunneliers en paroi moulée © SOLETANCHEBACHY



04 ALBUM

06 ACTUALITÉ



16

**ENTRETIEN AVEC
CHRISTOPHE DAUCHY**
SOLETANCHE BACHY
AU PLUS PRÈS DE SES CLIENTS

**22 TRE ALTAMIRA :
LE GRAND PARIS EXPRESS AUSCULTÉ
DEPUIS L'ESPACE**



32

**L'INSTRUMENTATION
DYNAMIQUE DES PIEUX
PAR FIBRE OPTIQUE**
Une spécialité développée en
France



38

**SOULÈVEMENT DE FOND DE
FOUILLE DANS LA MOLASSE**
Cas du nouveau parking
Jean-Jaurès à Toulouse



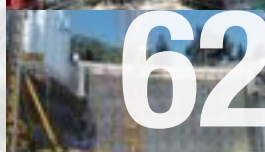
46

HONG KONG TMCLK
"Y-panels" pour tranchée
couverte multicellulaire



54

GRAND PARIS
Ligne 15 Sud : OS 1302 P -
Puits de départ de tunneliers
en paroi moulée



62

VILLA ENGELIN
à Monaco



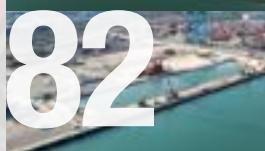
68

**DÉVIATION
DE LA RN 19**
à Boissy-Saint-Léger



76

**PROJET DE
DÉVELOPPEMENT
DU POLDER DE BREST**
Terrassements et stabilisation



82

**LA ROTULE DU QUAÏ
DE FOS-SUR-MER**



90

**RÉHABILITATION
DU SITE DE CLARIANT**
à Huningue (68)



96

**BOULEVARD URBAIN SUD
DE MARSEILLE**
Études et optimisations
géotechniques



102

SAINT-MAUR-CRÉTEIL
La gare la plus profonde
du Grand Paris Express





L'ALBUM

TUEN MUN CHEK LAP KOK **PAROIS Y-PANEL** RECORD MONDIAL DE TRANCÉE MULTICELLULAIRE

Bouygues TP et **Dragages HK** ont réalisé, avec **Intrafor Hong Kong Ltd**, la plus grande tranchée multicellulaire du monde avec des panneaux colossaux en forme de Y de plus de 15 m² de section et de 55 m de profondeur. Une innovation qui ouvre des perspectives pour la construction de ce type d'ouvrage. (Voir article page 46).



© BOUYGUES TP

DIGUES : LES RESPONSABILITÉS SE RECENTRENT ET L'ANALYSE DES OUVRAGES S'ÉLARGIT

Qui est responsable des digues ? Le colloque Digues 2019 a pris à bras le corps cette question, incontournable pour réaliser les travaux de protection aux submersions et inondations. Les spécialistes étudient les digues comme des systèmes en incluant la zone concernée.



Confortement de quais qui supportent les ouvrages de protection proprement dits, à Arles (Bouches-du-Rhône) en 2009.

Le dernier colloque sur les digues remontait à 2013⁽¹⁾. Digues 2019 s'est tenu à Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône), les 20 et 21 mars, et a accueilli

300 personnes. Son comité scientifique est piloté par l'Institut de recherche en sciences et technologiques pour l'environnement et l'agriculture (Irstea).

« Nous avons redécouvert les digues après les brèches lors de crues en Camargue, en 1993-1994, témoigne Rémy Tourment, président du comité scientifique du colloque et chef de mission digues à l'Irstea. Les digues ont lâché parce qu'elles étaient mal entretenues. Elles n'étaient plus capables de tenir face à la crue pour laquelle elles avaient été conçues. Une communauté "digues" se crée. Elle se rapproche du monde des barrages. Je préside le comité technique sur ce thème au Comité international des grands barrages. Les entreprises sont bienvenues au Comité français des barrages et réservoirs. Nous avons besoin d'elles, notamment pour rédiger les guides. »

→ **Les communes en première ligne**
Les travaux sur digues ne peuvent pas avoir lieu si la responsabilité de l'ouvrage est inconnue ou diluée. Les propriétaires de terrains le long d'une digue doivent l'entretenir. « Il peut y avoir 10 ou 100 propriétaires et parfois la digue ne figure pas au cadastre, » observe M. Tourment. Communes, départements et même l'État (digue sur route) peuvent être concernés, ou encore une association de riverains, par exemple sur des terres agricoles.

Dans le delta du Rhône, la gestion des digues a été confiée au Syndicat mixte

interrégional d'aménagement des digues du delta du Rhône et de la mer dont l'origine remonte à 1996.

« Le colloque commence donc par les questions de responsabilité et de gestion », précise M. Tourment. Depuis le 1^{er} janvier 2018⁽²⁾, les communes et leurs établissements ont la compétence Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (Gemapi). Mais c'est loin d'être concrétisé.

→ **Considérer la digue dans un système**

L'aide à la décision fait l'objet de douze interventions. Une première partie porte sur la surveillance et les diagnostics sur les structures en incluant brise-lames, barrages en amont, déversoirs, stations de pompage, etc. La seconde considère une digue dans un système global (analyse de risque et études de dangers). Quel impact un changement sur un élément a-t-il sur l'ensemble, sur l'eau et la zone protégée ?

<https://digues2019.irstea.fr/oral/> ■

⁽¹⁾ Derniers colloques : 12-14 juin 2013, Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence, Irstea, CFBR, MTEs et 25-26 novembre 2004, Sécurité des digues fluviales et de navigation, Orléans, CFBR et MEDD.

⁽²⁾ Conformément aux lois de décentralisation n°2014-58 et 2015-991.

CONFORTEMENT ET TRAVAUX SUR LES DIGUES

Quinze interventions étaient prévues sur les travaux sur digues et ouvrages associés, le 21 mars au colloque Digues 2019 à Aix-en-Provence.

- **Ouvrages de protection contre les crues à Sallèles-d'Aude**, A. Plastre, G. Thouvenin.
- **Renforcements des levées de Loire en "deep soil mixing"**, S. Patouillard, L. Saussaye, E. Durand, N. Manceau, A. Le Kouby, A. Coulet.
- **Recul stratégique des ouvrages de protection contre les inondations au service des milieux aquatiques. Confortement de la digue sud d'Arles**, M. Normand, C. Delaunay, T. Mallet, P. Mercier.
- **Travaux de réalisation d'ouvrages traversants sous digue**, M. Fernandes, M. Gilbert, J. Vanwarreghem, E. Vuillermet.

- **Gestion des matériaux sur le projet "Isère amont", tranche 1 achevée et tranches 2 et 3 en cours**, J.F. Frézet, O. Manin, L. Boutonnier, J.P. Pinchart, A. Le Peillet, F. Dermonville.
- **Sécurisation de la digue du Rhône entre Beaucaire et Fourques : suivi géotechnique d'exécution, supervision et contrôle**, D. Chaussée, C. Delaunay, V. Perset, T. Mallet, P. Mercier.
- **Chantier du remblai ferroviaire Arles-Tarascon : gestion de la sécurité en crue**, M. Sutter, R. Tourment, P. Pelt, B. Beullac, J.M. Bernard.
- **Réhabilitation de la digue Carnot à Boulogne-sur-Mer : particularités du confortement d'une digue en mer**, A. Raillard.

- **Réhabilitation de la protection contre les inondations de Tarascon : digue de la Montagnette, château Royal de Provence aux pieds dans le fleuve et ancien quai**, M. Gilbert, E. Vuillermet, T. Mallet, P. Mercier.
- **Confortement des quais du Rhône en traversée d'Arles**, M.H. Prost, A. Salmi, T. Mallet, P. Mercier, M. Normand.
- **Digues résistantes en sol traité à la chaux : projet Digue Elite et conséquences sur la conception**, N. Nerinx, S. Bonelli, G. Herrier, P. Tachker, D. Puiatti, F. Cornacchioli, S. Nicaise, D. Lesueur.
- **Bio-renforcement des ouvrages hydrauliques en remblais**, A. Esnault Filet, I. Gutjahr, A. Garandet, A. Viglino, R. Beguin, O. Sibourg, J.M. Monnier,

J. Martins, L. Oxarango, L. Spadini, C. Geindreau, F. Emerault, S. Castanier Perthuisot.

- **Solutions de traitement des essences ligneuses générant des risques sur les ouvrages hydrauliques**, C. Zanetti, N. Liency, J. Formento, J. Macia, C. Morris, M. Vennetier, P. Mériaux.
- **Guide technique CFBR méthodes et techniques de confortement des digues**, D. Poulain, M. Sutter, R. Tourment, J. Maurin, N. Auger, C. Chevalier, Y. Deniaud, P. Ledoux, T. Mallet, J.C. Palacios, M. Pinhas.
- **Protections externes de digues : groupe de travail CFBR, méthodes de réparation et confortement**, P. Ledoux, E. Vuillermet, O. Artières, Y. Boussafir, B. Chalus, B. Cortier, T. Monier, A. Brune. ■






SOETAERT.BE

LA SOLIDITE ET LA STABILITE, VOUS POUVEZ VOUS Y CONFIER!

Soetaert-Soiltech est expert en techniques de creusement de tranchées et de fondations et dispose de plusieurs années d'expérience en techniques d'amélioration des sols. Soetaert-Soiltech dispose de l'équipement et de l'expertise nécessaires pour mener à bien votre projet sur une base solide. Pieux MV | Pieux Kelly | Pirois moulées | Ancrages | Vibroflottation | Colannes ballastées | Pieux forés par double rotation | Soilmix | Pirois berlinoises | Pirois combinées | Pirois en palplanches

PHOTO: INSTALLATION DE PIEUX MV DANS LE PORT D'ANVERS



LES ACTEURS DE L'EAU S'ENGAGENT SUR 5 ACTIONS



© SUEZ/THERRY DUVIER/PHILLOGIC

Identification de micropolluants dans l'eau au Centre international de recherche sur l'eau et l'environnement.

Le numérique va aider la filière eau à s'optimiser à travers un site internet dédié à l'eau potable et à l'assainissement. Seront référencées les solutions innovantes sur le territoire avec un accent sur la lutte contre les fuites d'eau en milieu rural. Le site devra faciliter les relations entre acteurs et accroître leur visibilité.

C'est une des 5 actions sur lesquelles se sont engagés le secteur, représenté par la Filière française de l'eau⁽¹⁾, et le ministère de l'Économie et des Finances dans

le contrat stratégique de filière signé le 31 janvier.

Ce contrat permet de mobiliser des financements et des aides. Il mentionne la nécessité de renforcer l'ingénierie en direction du monde rural, et de développer des services et des modèles économiques plus efficaces et sobres en eau.

→ **Former plus de spécialistes**

Deuxième action où le numérique apporte sa puissance de feu : l'exploitation de données existantes pour anticiper les défaillances de réseaux.

Dans la 3^e action, l'accent est mis sur la détection et le traitement des micropolluants dans l'eau. Un cluster de bio-analyse sera créé.

La 4^e action vise à former davantage de spécialistes. Une étude financée par le Plan d'investissements dans les compétences sera lancée, ainsi qu'un plan de formation en alternance.

→ **28 milliards d'euros**

Enfin, BPI France accompagnera la croissance des entreprises dont à l'export et leur accès aux nouvelles technologies. Le secteur de l'eau réalise plus de 8 milliards d'euros de chiffre d'affaires à l'international et 20 milliards en France.

www.entreprises.gouv.fr/conseil-national-industrie/cni : **comités stratégiques, rubrique "eau". ■**

⁽¹⁾ Confédération où figurent notamment Les canaliseurs (FNTP), Syntec Ingénierie, la FNCCR, etc.

GRAND PARIS : RÉFLÉCHIR À L'AMÉNAGEMENT

La chaire "Aménager le Grand Paris" portée par l'École d'urbanisme de Paris développe la réflexion sur les pratiques d'aménagement d'une grande opération avec une ouverture à l'international.

Depuis début 2019, elle accueille huit sociétés : Altarea Cogedim, Eiffage Aménagement, la Française, Kaufman & Broad, Linkcity, la Semapa, SNCF Immobilier et la SPL Air 2017.

Y participent depuis 2017 : Caisse des dépôts, CDC Habitat, Établissement public foncier d'Île-de-France, Grand Paris Aménagement, Société du Grand Paris.



TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

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

Prochains numéros :

- TRAVAUX N° 951 « Énergie »
- TRAVAUX n° 952 « Ville et patrimoine »



Bertrand COSSON

Tél. 01 42 21 89 04

b.cosson@rive-media.fr

RESSOURCES EN GÉNIE ÉCOLOGIQUE

Le centre de ressources Génie écologique est désormais coordonné par plusieurs organismes qui ont signé une convention début novembre : Agence française pour la biodiversité, Fédération nationale des travaux publics, Union nationale des producteurs de granulats et Club infrastructures linéaires et biodiversité. Le centre est doté d'un comité de pilotage et d'un comité scientifique et technique. Il s'adresse à tous : maîtres d'ouvrage, associations, entreprises, chercheurs, etc. Il accompagne le renforcement des compétences en génie écologique*.

* Cf. Travaux n°943, juillet-août 2018, page 8.

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES ÉLECTRIQUES CONTINUENT DE PROGRESSER

En 2018, les énergies renouvelables y compris l'hydraulique ont fourni 22,7% de l'électricité consommée en France. La puissance installée s'élève à 51 171 MW, selon le *Panorama de l'électricité renouvelable* publié par les distributeurs, les opérateurs de réseaux et le Syndicat des énergies renouvelables⁽¹⁾. « Ce sont essentiellement deux filières, l'éolien et le photovoltaïque qui ont assuré 95% des nouvelles capacités renouvelables raccordées, » écrit Observ'ER dans son *Baromètre* publié en partenariat avec la Fédération nationale des collectivités concédantes et régies et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie⁽²⁾.

→ Analyse par région

En liaison avec les territoires, le baromètre de 180 pages publie, par source et par région, l'évolution des énergies renouvelables électriques.

Sources prises en compte : hydraulique, éolien, photovoltaïque, solaire thermique à concentration, biomasse solide, biogaz, déchets urbains, géothermie profonde à très haute température, énergies marines.

Les 18 régions dont 5 d'Outre-mer sont examinées. L'Auvergne/Rhône-Alpes arrive en tête de la production d'électricité renouvelable grâce à l'hydraulique où elle laisse les autres loin derrière, à 26 879 GWh d'octobre 2017 à septembre 2018.

En éolien, les Hauts-de-France dominent avec 6 688 GWh, devant le Grand-Est (6 119) et l'Occitanie (3 238).

→ Observations très détaillées

En photovoltaïque, la Nouvelle-Aquitaine a produit 1 365 GWh, devant Provence-Alpes-Côte-d'Azur (1 003) et l'Île-de-France (845).

Suivent les Hauts-de-France (808). En biomasse solide et déchets, le baromètre place la Nouvelle-Aquitaine en tête avec 2 866 GWh produits, devant l'Occitanie (2 234) et Provence-Alpes-Côte-d'Azur (1 656).

Le document de 180 pages d'Observ'ER, outre ses observations très détaillées, s'intéresse également à la mobilité électrique et à la planification des réseaux. ■

⁽¹⁾ Panorama : www.enr.fr/recherche-publications.ph.

⁽²⁾ Baromètre : www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/energie_renouvelable_france.asp.

TROIS SOURCES RENOUVELABLES DOMINENT

Source d'énergie renouvelable	Puissance totale installée à fin 2018	Puissance raccordée en 2018	Fourniture d'électricité	Progression fourniture 2018/2017
Hydraulique	25510 MW	en recul	63,1 TWh	30%*
Éolienne	15108 MW	1559 MW	27,8 TWh	15,3%
Photovoltaïque	8527 MW	873 MW	10,2 TWh	11,3%

* Progression positive après 2017, année de basses eaux.
Source : *Panorama de l'électricité renouvelable 2018*.

LES VENTES DE MATÉRIEL DE CHANTIER S'INSTALLENT SUR UN PLATEAU



Les grosses pelles sur chenilles rencontrent toujours un certain succès. Ici, modèle Liebherr R 956 de 340 CV.

Les pelles sur chenilles de plus de 12 tonnes rencontrent toujours un certain succès en 2018. Leurs ventes ont augmenté de 7%, à 2377 unités, selon le Syndicat des entreprises internationales de matériels de travaux publics, mines et carrières, bâtiment et levage, manutention (Seimat). Les pelles sur pneus de plus de 11 tonnes dépassent les 1 000 unités (1 024), soit 6% de mieux qu'en 2017.

L'ensemble des engins relevant du Seimat progresse de 12% et se dirige vers un haut de cycle en 2019-2020, comme pressenti. Plus de 56 000 machines ont été écoulées. Ce niveau devrait se maintenir cette année.

La mesure de sur-amortissement accordée par le Président de la République en 2015 puis reconduite⁽¹⁾, continue d'être favorable. L'activité des travaux publics - +7% en volume en 2018 - a stimulé le marché et devrait continuer de le faire en 2019.

Les mini pelles, une des rares familles à reculer, peuvent se permettre un fléchissement à 11 387 en 2018 après un niveau élevé en 2017, à 11 574.

→ Retour des tombereaux

Dans la catégorie des gros engins de terrassement, 5 156 se sont vendus l'année dernière (+8%). À noter une hausse de 63% des tombereaux articulés, de

172 en 2017 à 280 en 2018. Les tombereaux rigides remontent de 33 à 51, un nombre dans la normale.

Les matériels compacts de terrassement, de plus petite taille, atteignent 17 242 pièces contre 16 932 en 2017 (+2%). Certaines reculent comme les chargeuses pelleuses (440 au lieu de 494). Les autres catégories de machines sont globalement dans le positif : matériel routier et de compactage +9% ; matériels pour le béton +13% ; levage +29%.

→ Équipements d'aide au fonctionnement

Avec l'arrivée du nouveau président Pascal Guillemain en 2018, le Seimat évolue tout en poursuivant le travail de Jean-Marie Osdoit (6 mandats). Les informations économiques à destination des adhérents vont être étoffées. Le site internet se

modernise et se déploie. Les équipements d'aide au fonctionnement, au guidage, à la sécurité, basés sur les nouvelles technologies, prennent une telle importance qu'ils sont maintenant la spécialité de certaines entreprises qui font leur entrée dans l'organisation professionnelle.

→ Opérateurs de maintenance très recherchés

Le besoin d'opérateurs de maintenance est toujours aussi pressant. Le Seimat se démène, à travers son club dédié, pour attirer les jeunes dans ce métier et les accompagner dans leur cursus : concours parmi les élèves en bac professionnel et en BTS, participation aux portes ouvertes dans les lycées, etc. ■

⁽¹⁾ Cf. *Travaux* n°937, novembre 2017, page 8 et n°940, mars 2018, page 6.

MESURES POUR L'ÉOLIEN

Le groupe de travail chargé d'accélérer le développement de l'éolien a rendu ses conclusions, fin janvier, à partir de dix propositions émises fin 2017*.

Après avoir accepté de supprimer un niveau de juridiction pour les recours, le ministère de la Transition écologique s'engage sur d'autres mesures. Les communes percevront au moins 20% de l'imposition forfaitaire sur les entreprises de réseau, liée aux éoliennes implantées sur leur territoire. L'instruction du 11 juillet clarifie la notion de renouvellement de parcs en fin de vie. But : ne pas considérer qu'il s'agit d'une installation neuve. Dans ce cas, le nombre de machines peut diminuer tout en accroissant la puissance.

Le ministère des Armées a réduit ses exigences de protection de zones.

Ainsi, libère-t-il 9 000 km² à potentiel éolien**.

Au 1^{er} février, les règles de balisage des éoliennes (lumière rouge au bout des pales) ont changé afin d'atténuer la gêne aux riverains.

* Cf. *Travaux* n°940, mars 2018, page 6.

** www.defense.gouv.fr/DSAE/DIRCAM/domaineeolien.

PLUS DE 56 000 MACHINES PAR AN

Catégorie matériels	2017	2018	Progression
Terrassement	4754	5156	8%
Compacts	16932	17242	2%
Routiers	13818	14999	9%
Matériels béton	1408	1591	13%
Manutention	13361	17239	29%
Total	50273	56227	12%



Éolienne Floatgen ramorquée vers le site d'essais de l'École centrale de Nantes (2018).

TRANSPORT FLUVIAL STABLE EN 2018

Le BTP reste le principal utilisateur du transport fluvial, en 2018, selon Voies navigables de France. Il représente 43 % des volumes transportés et 34 % des tonnes-kilomètres. Les bateaux acheminent la marchandise au cœur des villes, constituent des stocks flottants et sont moins nocifs pour l'environnement que les camions. Au total, les péniches ont transporté 51,7 millions de tonnes de marchandises l'année dernière. Ce trafic est inégal selon les bassins.

La Seine profite des chantiers du Grand Paris Express. Le bassin Rhône-Saône a bien travaillé pour acheminer du sel de déneigement. En revanche, le Rhin et la Moselle ont souffert de basses eaux pendant plusieurs mois, ce qui a limité les volumes transportables.



Le trafic de marchandises a été inégal selon les bassins.

© FRANCIS GORMON/VNF

RECONVERSION D'UN HÔPITAL

Bouygues UK va construire le centre civique municipal de Tower Hamlets sur une partie du Royal London Hospital, dans le centre de Londres (Angleterre). L'aile ouest de l'hôpital sera détruite et un bâtiment de 4 et 7 étages abritera des services du district. En 2022, 26 700 m² seront mis à disposition. Montant du marché : 121 millions d'euros. L'édifice vise la certification Breeam, niveau excellent.

LE CANAL SEINE-NORD-EUROPE TRACE SA ROUTE



Vue future du rétablissement de la RD15 au-dessus du canal à Thourotte (Oise).

© LAVIGNE-CHÉRON ARCHITECTE 2017

C'est en rouge que sont publiées sur Internet les remarques des entreprises, conviées à une réunion sur les travaux du secteur 1 du canal Seine-Nord-Europe par la Fédération régionale des travaux publics des Hauts-de-France, le 28 janvier. Invitée : la Société du canal Seine Nord Europe (SCSNE).

« Les remarques et échanges avec les professionnels vont permettre à la SCSNE d'alimenter sa réflexion sur l'allotissement des travaux, les clauses et les critères dans les appels d'offres, écrit la société, maître d'ouvrage depuis 2016-2017. Pour assurer l'égal accès de tous les opérateurs privés à l'information, nous rendons

publiques les informations diffusées. »⁽¹⁾ Les entreprises, de leur côté, apprécient de connaître les souhaits du commanditaire et d'avoir un peu de visibilité.

La SCSNE a ainsi consigné les idées de bonnes pratiques dans 5 domaines : accès à la commande publique, sous-traitance, logistique des matériaux, innovation et sécurité.

→ 1^{re} mise en service en 2026

Le maître d'ouvrage a fourni un planning "indicatif" de ce grand chantier. Le canal de 106 km suit un axe de Compiègne jusqu'au secteur entre Marquion (Pas-de-Calais) et Cambrai (Nord) en passant par Noyon (Oise), Nesle et Péronne (Somme).

La mise en service du 1^{er} secteur est prévue pour 2026.

Les travaux des 18 km de Compiègne à Passel (Oise), à l'étude de 2017 jusqu'à 2020, pourraient commencer en 2020 après les premiers appels d'offres européens.

Les études des 3 autres secteurs - 49 km jusqu'à Allaines (Somme), 11 km jusqu'à Etricourt-Manancourt (Somme) et 30 km jusqu'à Aubencheul-au-Bac (Nord) - commencent cette année et leur réalisation, en 2022.

→ Près de 5 milliards d'euros

L'État s'est engagé à financer le projet à part égale avec les collectivités territoriales en 2017 et a réaffirmé que le canal figurait dans ses priorités. L'Union européenne paie 50 % des études et 40 % des travaux (mécanisme d'interconnexion en Europe).

Le canal SNE, estimé à près de 5 milliards d'euros, reliera en grand gabarit (péniches de 4 400 tonnes), la vallée de la Seine à celle de l'Escaut, du Havre aux ports de Belgique⁽²⁾.

www.canal-seine-nord-europe.fr/Actualites (28 janvier) ■

⁽¹⁾ Réunion conforme à l'article 4 du décret n°2016-360.

⁽²⁾ Cf. *Travaux* n°864, septembre 2009, page 13 et n°904, mars 2014, page 9.

1^{er} SECTEUR : 350 MILLIONS D'EUROS

Voici les détails du 1^{er} secteur du canal Seine-Nord-Europe dont la réalisation doit commencer en 2020.

MAÎTRISE D'OUVRAGE : SCSNE assistée par Setec.

MAÎTRISE D'ŒUVRE : groupement Team'O (Artelia mandataire).

LONGUEUR : 18 km, de Compiègne à Passel (Oise).

TRAVAUX : écluse de Montmacq (Oise) ; 11 ouvrages d'art (7 de plus de 70 m), protection des berges, élargissements, rétablissements routiers, déviation de l'Oise, etc.

MONTANT : 350 millions d'euros HT.



ArcelorMittal

Connecting **pioneers**

J'aime les défis. Dans le cadre du projet Stuttgart 21, 1 450 tonnes de palplanches **AZ®-800 et AZ®-750** sont mises en œuvre dans le sol rocheux le long de la voie ferrée existante. Grâce à ces nouveaux profils, nous travaillons de manière plus efficace et rapide. C'est une solution très ingénieuse.

Anna Antipova
Ingénieur de projet technique PFA 1.6a (Lot 2A/3) | GT(2)
Projet DB Stuttgart-Ulm GmbH



Le nœud ferroviaire de Stuttgart est en passe d'être totalement réaménagé. Les palplanches ArcelorMittal sont utilisées pour la paroi de soutènement temporaire au niveau de la connexion entre le tunnel émergent de la nouvelle gare souterraine et les lignes de chemin de fer existantes de la vallée du Neckar. Pouvant atteindre 14 m de long, elles sont transportées par wagon sur le chantier et foncées dans les marnes irisées inférieures (Gipskeuper). Un travail qui requiert la plus grande précision tant sur le plan matériel qu'humain.

PÔLE MULTIMODAL À CHAMBÉRY

La gare de Chambéry (Savoie) se transforme en pôle d'échanges multimodal pour 2020. Sont déjà mis en service une passerelle et le bâtiment rouge de la vélostation surmontée de bureaux.

L'opération implique deux maîtres d'ouvrage : le Grand-Chambéry (38 communes, 136 800 habitants) et SNCF Gares et Connexions.

Le pôle multimodal hors parvis, parking, passerelle, revient à 23,3 millions d'euros HT. Y contribuent le Grand-Chambéry pour moitié, la Région à 21 %, la SNCF, 18 %, l'État et la Ville, chacun 5 %, et 1 %, le département.

Après trois ans de chantier, 3,5 millions de voyageurs y transiteront par an.

→ **Charpente métallique**

La lumière entre à flots dans le hall de 1500 m² de la nouvelle gare, grâce à une charpente métallique et des façades translucides. Le bâtiment qui abrite les dispositifs de circulation des trains a été conservé pendant les travaux mais mis l'abri des vibrations des engins.



© DIDIER GOURBIN/GRAND CHAMBERY

Le bâtiment, ouvert en mars, abrite une vélostation et des bureaux.

GRAND PARIS EXPRESS : LES NOUVELLES GARES PRENNENT FORME



© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS/JEAN-MARIE DUTHILLEUL

La gare de Noisy-Champs, dans l'Est de l'Île-de-France, s'ouvre de tous les côtés, reliant les deux villes.

La Ligne 15 Sud du Grand-Paris-Express est la plus avancée de toutes. Elle est aussi la plus chère selon la Société du Grand Paris, chargée par l'État de piloter ce grand projet : 7,8 milliards d'euros pour 33 km sous terre. Elle comporte 16 gares entre Pont-de-Sèvres (Hauts-de-Seine) et Noisy-Champs (limite Seine-Saint-Denis/Val-de-Marne), dont 13 sont en correspondance avec d'autres modes de transport.

Les gares de la Ligne 15 Sud sortent de terre en même temps que les tunnels sont creusés. Elles sont pour certaines très profondes et les tunneliers démarrent parfois à cet endroit.

→ **Onze ascenseurs, neuf étages**

La gare de Saint-Maur-Créteil (Val-de-Marne) descend à 52 m de profondeur. De forme ovale, elle mesure 38 m par 56. Les parois moulées qui la soutiennent seront terminées en août. Elles vont chercher la roche à 70 m, à travers des argiles plastiques. La gare conçue par Cyril Trétout, associé de l'agence Nicolas Michelin, permettra à une bonne partie des 45000 voyageurs par jour de prendre la correspondance avec le RER A, cet arrêt existant déjà. Onze ascenseurs les mèneront aux quais les plus profonds à travers 9 étages.

→ **150 000 voyageurs par jour**

La Ligne 15 Sud croise aussi le RER A, plus loin à son terminus à cheval sur

Noisy-le-Grand et Champigny-sur-Marne. La nouvelle station Noisy-Champs descend à 13 m. Elle est posée sur la gare du RER. Y transiteront 150000 voyageurs par jour.

En plus du train régional, ce "bout de ligne" est en correspondance avec la Ligne 16, qui passe à 20 m sous terre et met le cap au nord vers Saint-Denis-Pleyel (Seine-Saint-Denis), le prolongement de la Ligne 11 du métro parisien (Mairie des Lilas/Pont de Sèvres) et des bus.

Le chantier de cette gare a débuté en 2019 et se termine en 2022.

Ses "annexes", avant-gare et arrière-gare (remisage de trains), ont débuté en 2016 et sont plus avancées, la seconde logée dans une tranchée couverte de 300 m, devant être livrée en juin.

L'ensemble occupe une bande de 1 km de long sur 100 m de large

→ **1500 tonnes de charpente métallique**

La nouvelle station relie les deux communes qu'elle dessert. Elle s'ouvre de tous les côtés. « Ce sera la place centrale d'un futur quartier, explique Jean-Marie Duthilleul, architecte qui a conçu ce dôme doublé de bois à l'intérieur et de zinc à l'extérieur, avec l'Arep, filiale de SNCF Gares & Connexions. Son emblème, ce sont deux hélices, l'une partant de Champs-sur-Marne, l'autre de Noisy-le-Grand, qui se rejoignent tout en haut. » Les 1500 tonnes de la charpente métallique du dôme reposent sur douze poteaux. Les menuiseries des vitrages entre les hélices contribuent à répartir les charges. ■



© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS/JEAN-MARIE DUTHILLEUL

Un dôme à double hélice chapeaute la gare de Noisy-Champs.

RÉHABILITATION DU BARRAGE DU BRAS DE LA PLAINE À LA RÉUNION

Les travaux de réhabilitation du barrage du Bras de la Plaine dans le Sud-Ouest de l'île de la Réunion commencent en avril. Propriété du département, l'ouvrage comprend une "prise d'eau par en dessous" au débit de 6 m³/s.

Une galerie de 5,7 km conduit l'eau captée vers un réservoir qui sert à l'irrigation de terres, de source d'eau à potabiliser (100 000 personnes) et à une centrale électrique EDF.

La Société d'aménagement de périmètres hydro agricoles de l'île de la Réunion (Saphir) a été mandatée par le département pour revoir le fonctionnement du barrage. L'opération s'inscrit dans la programmation 2017-2021 d'investissement de la Réunion et dans le plan départemental de l'eau et des aménagements hydrauliques. La Société du Canal de Provence (SCP) a remporté le marché de maîtrise d'œuvre.

→ Piste d'accès à créer

Le chantier débute en avril par la création d'une piste de 12 km dans la vallée bordée de falaises de 300-400 m de haut. Logée dans le lit mineur de la rivière, elle la franchit par endroits. Quand les deux ne peuvent pas se côtoyer, elles se superposent grâce à des passages drainants.

Le barrage poids en béton mesure 34 m de long en crête sur 8 m de haut et 20 d'épaisseur.



Barrage et contre-barrage de captage d'eau sur le Bras de la Plaine à la Réunion, en 2014.

© SOCIÉTÉ DU CANAL DE PROVENCE

Construit en 1969, il a été très dégradé par les cyclones. Les blocs de pierre et les sables charriés par les crues ont endommagé le béton. Une fosse s'est creusée en aval du seuil du type Creager

- forme parabolique en lame d'eau -, menaçant sa stabilité. En effet, des blocs heurtaient brutalement le ressaut du seuil. L'eau finissait par tomber directement dans les alluvions.

→ Travaux dévastés par un cyclone

En 1989, un contre-barrage est construit 100 m plus bas pour éviter ce phénomène. Mais c'est à son aval qu'une fosse se creuse.

Des travaux en 2006-2007 ont été dévastés par le cyclone Gamède (février 2007).

En 2012, le département décide de revoir l'ensemble du barrage pour qu'il résiste aux crues cycloniques. La SCP remporte l'appel d'offres. Elle travaille sur un modèle réduit de l'ouvrage au 1/40^e.

→ Forme hydraulique incorrecte

« Nous avons conclu que la forme hydraulique des seuils n'était pas correcte, explique Luc Liogier, directeur de ce projet à la SCP. Nous proposons un plan incliné sur lequel les blocs vont rouler. La vitesse d'écoulement de l'eau sera plus faible, d'où moins d'abrasion par les sables. »

Le chantier a été attribué au groupement Rocs (groupe NGE) avec Eiffage. Il se monte à 14 millions d'euros HT et devrait être terminé fin 2020. ■



Modèle réduit du barrage pour étudier sa réhabilitation en simulant des crues avec des seuils en plans inclinés.

© SOCIÉTÉ DU CANAL DE PROVENCE

S'UNIR POUR L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Contribuer à utiliser davantage de matériaux de récupération dans le BTP est un des objectifs du Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Il s'adjoint les compétences d'Insavalor, filiale recherche et développement de l'Institut national des sciences appliquées (Insa) de Lyon, à travers une convention signée fin décembre.

Insavalor dispose d'une plate-forme d'innovation technologique, Provademse, spécialisée dans la caractérisation et la valorisation de déchets, sédiments et autres matériaux alternatifs comme les sables de fonderie, les cendres de centrales thermiques, les terres excavées, etc.

Les partenaires répondront en commun à des appels d'offres ou à des propositions commerciales. Il est question de créer un club sur certaines thématiques, de développer des matériels, logiciels et bases de données.

Le Cerema publie des guides méthodologiques, promeut ces matériaux et diffuse ses connaissances lors de journées techniques et de stages.



© PROVADEMSE

Planches routières instrumentées pour l'évaluation environnementale de matériaux, avant remplissage.

CARRIÈRES SURVEILLÉES PENDANT TRAVAUX

Une partie des anciennes carrières de Fleury-sur-Orne (Calvados) est conservée. Elles ont servi de refuge pendant la Seconde guerre mondiale. D'autres parties sont comblées, des puits sont renforcés, travaux confiés à Soleffi TS. En surface : un projet d'écoquartier des Hauts-de-l'Orne (Sem Normandie Aménagement) aux environs de Caen. Pendant les travaux dans la galerie sud, le comportement des piliers est surveillé grâce à des capteurs (cordes optiques), supportant une hygrométrie de 100 %. Le suivi a commencé en novembre.

INSTITUT DE FRANCE : NOUVEL AUDITORIUM

L'Institut de France (Paris 7^e) s'est doté d'un auditorium de 350 places. Le bâtiment est construit en partie à l'endroit des ateliers de frappe de médaille de la Monnaie de Paris, mitoyenne, qui a dû restituer la surface. La limite entre les deux se trouvant sur l'enceinte de Philippe Auguste, elle a fait l'objet de fouilles archéologiques. Maîtrise d'ouvrage déléguée : Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (État). Maîtrise d'œuvre : atelier Marc Barani.



Auditorium contemporain.

© SERGE DEMALLY

GÉOTHERMIE SUR PUIITS DE MINE



© VILLE DE GARDANNE

Aménagement au pied du chevalement de 49 m en béton qui donnait accès au puits de mine (2017).

Utiliser un puits de mine comme forage de géothermie, c'est économique. À la mi-mars, Gardanne (Bouches-du-Rhône) a commencé l'équipement du puits Yves Morandat d'où a été extrait du charbon de 1987 à 2003. La mine est reconnaissable par son chevalement en béton de 49 m de haut. Le chevalement abrite la machinerie des ascenseurs au-dessus du puits⁽¹⁾. En mars, une pompe et deux tubes devaient être descendus dans la cage d'ascenseur, à travers la dalle qui ferme l'accès à la mine. Le puits descend à 1100 m dont 800 ennoyés, d'où un volume d'eau de 35 millions de mètres cubes à 28°C environ. « C'est la 1^{re} fois en France qu'un potentiel minier est exploité, » assure Mikael Philippe, responsable développement de l'énergie et des systèmes géothermiques au Bureau de recherches géologiques et minières. Le BRGM, chargé des anciens sites miniers, a étudié la reconversion. → Stabilisée par le couple chaud/froid « Le projet a abouti grâce à la volonté du maire Roger Mei de le soutenir, » souligne Nicolas Fortuit, directeur de la

Société d'économie mixte d'aménagement de Gardanne et sa région (Semag). C'était la meilleure solution pour chauffer et climatiser les 80 000 m² de l'écoquartier d'entreprises situé autour de l'ancien puits. La configuration à un puits commun au paysage et au rejet de l'eau n'est pas courante. Ici, les besoins de chauffage et de climatisation maintiennent le volume d'eau à une température médiane de 28°C, avec des fluctuations selon la saison. La source géothermique échange ses calories avec une boucle d'eau qui des-

sert les bâtiments du quartier. À chaque point de livraison, une pompe à chaleur ajuste la température de l'eau.

Les sources de chaleur et d'électricité du quartier dont des capteurs solaires, sont mises en commun grâce à un réseau intelligent (Flexgrid). La Semag est actionnaire de l'opérateur énergétique, Énergie solidaire.

→ Plein de nouvelles technologies

L'ensemble coûte 6 millions d'euros. L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie apporte 700 000 euros et la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur, 1,4 million, les deux au titre des nouvelles technologies. La mise en route est prévue cet été, le réseau étant déjà réalisé.

Le suivi est assuré par la Compagnie française de géothermie, filiale du BRGM. « Nous attendons les résultats du fonctionnement pour envisager d'autres implantations du même type, informe M. Philippe. Quels sont les échanges thermiques avec les galeries de la mine ? » ■

⁽¹⁾ Les chevalements sont plus souvent des structures métalliques surplombant un bâtiment.



© SEMAG

Introduction des tubes géothermiques à travers la dalle fermant le puits (2019).

LES FORAGES PÉTROLIERS AUSSI

Le BRGM étudie la reconversion des forages pétroliers en puits géothermiques.

C'est un moyen de répondre aux obligations de l'article 4 de la loi sur la fin des hydrocarbures (n°2017-1839). L'exploitant, cinq ans avant la fin de la concession, doit envisager le potentiel de reconversion, notamment l'implantation d'énergies renouvelables telles que la géothermie.

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 5 AU 7 JUIN

Infrastructures de transport terrestres, écosystèmes et paysages (Ittecop)
Lieu : Ademe Sophia-Antipolis (Alpes-Maritimes)
www.ittecop.fr

• 17 ET 18 JUIN

Smart Energies
Lieu : La Défense (Arche)
www.smart-energies-expo.com

• 18 JUIN

Défis de la géotechnique offshore
Lieu : Paris (Cnam)
www.cfms-sols.org/manifestations

• 18 ET 19 JUIN

Ville sans tranchée (salon)
Lieu : Chatou (Yvelines)
www.fstt.org

• 20 JUIN

Rencontres ouvrages d'art 2019
Lieu : Champs-sur-Marne (Ifsttar)
<http://joa.ifsttar.fr>

• 26 ET 27 JUIN

Solscope
Lieu : Marseille
www.solscope.fr

• 30 JUIN AU 2 JUILLET

Journées nationales de géotechnique et géologie
Lieu : Lyon
www.cfms-sols.org/manifestations

• 24 AU 26 JUILLET

ICSA, 4^e conférence structures et architecture
Lieu : Lisbonne (Portugal)
www.icsa2019.arquitectura.uminho.pt

FORMATIONS

• 11 AU 13 JUIN

Eurocode 7 : calcul des fondations
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 17 ET 18 JUIN

Intégrer et gérer les contraintes foncières dans un projet d'aménagement
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 18 AU 21 JUIN

Partage de l'espace public, aménagements liés au tramway et au BHNS
Lieu : Nantes
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 19 AU 21 JUIN

Gestion du patrimoine d'infrastructures : enjeux, méthodes, responsabilités
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 20 JUIN AU 13 MAI 2020

Certificat chef de projet Bim
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 24 ET 25 JUIN

Réduction du bruit des transports terrestres : stratégie, moyens
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 2 JUILLET

Aides, financement, garanties à l'export pour les projets énergies renouvelables
Lieu : Paris
www.enr.fr

NOMINATIONS

CNPP :

Karim Hilaly remplace Thibault Gousset à la direction de la formation du groupe.

CSTB :

Julien Hans remplace Jean-Christophe Visier à la direction énergie

et environnement du Centre scientifique et technique du bâtiment.

EPAMSA :

Emmanuel Mercenier a été nommé directeur général de l'Établissement public d'aménagement du Mantois Seine-Aval. Il succède à Damien Behr, directeur par intérim suite au départ en retraite de Xavier Hemeury.

LÉON GROSSE :

Bertrand Grosse passe la main du groupe en tant que président du directoire à Lionel Christolomme et préside désormais le conseil de surveillance.

LINKCITY :

Martial Desruelles, directeur général Île-de-France, devient directeur général de l'entreprise. Marie-Eve Raux-Schmitt est directrice du développement à la direction de l'immobilier d'entreprise. Gérard Lodetti dirige les projets urbains, et Stéphane Slama-Royer, les logements en Île-de-France. Laurent Mourey prend la direction générale adjointe pour l'Est de la France et Pierre-Yves Muller, pour l'Ouest.



Membre du Réseau Congés Intermédiaires BTP

CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

Nos missions :

- assurer le service des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics
- procéder au remboursement des indemnités de chômage-intempéries versées par les employeurs de la Profession.

La CNETP regroupe plus de **7 700 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à près de **260 000 salariés**.

Nos coordonnées :

Par courrier :

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

Par Internet :

www.cnetp.fr

Par mail :

sur www.cnetp.fr, lien [écrire un e-mail](#)

Par téléphone :

- pour les entreprises : 01.70.38.07.70

- pour les salariés : 01.70.38.09.00



SOLETANCHE BACHY AU PLUS PRÈS DE SES CLIENTS

Avec près de 70 filiales réparties dans le monde, Soletanche Bachy agit sur les cinq continents au plus près de ses clients institutionnels ou privés. Grâce à un fort ancrage local et à des équipes performantes, Soletanche Bachy, un des leaders mondiaux dans le domaine des fondations et des technologies du sol, propose, conçoit et met en œuvre des solutions adaptées sur des projets de toute taille, du plus petit au plus grand. C'est ce que nous explique Christophe Dauchy, Directeur général du groupe. **Entretien avec Christophe Dauchy, Directeur général de Soletanche Bachy.**

PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1

En quelques chiffres, quelle est en 2019 la situation de Soletanche Bachy ?

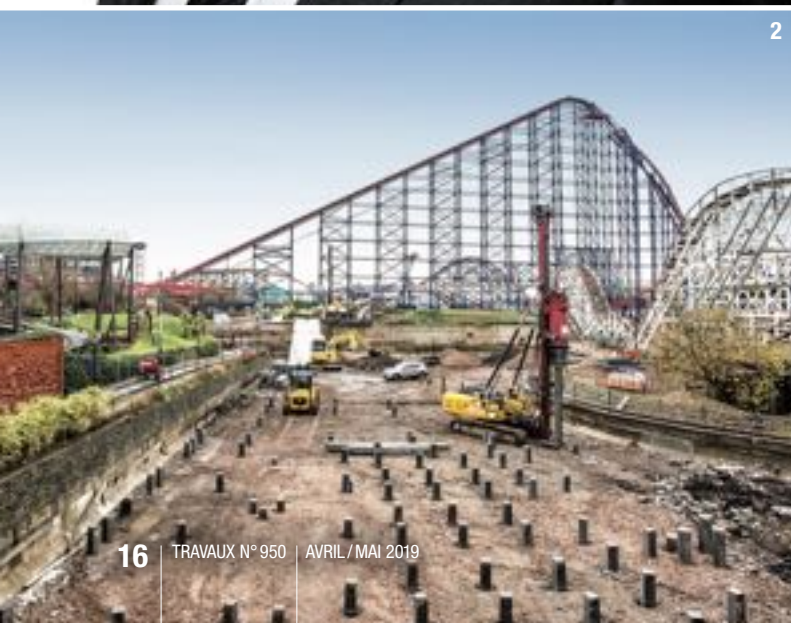
Sur le front de la sécurité d'abord, notre taux de fréquence ainsi que notre taux de gravité ont chuté et ce, pour la sixième année consécutive. Même si dans le domaine de la sécurité rien n'est jamais gagné, ces chiffres confirment le bien-fondé de notre approche basée sur l'engagement personnel, la transparence, la bienveillance et l'exemplarité.

1- Christophe Dauchy, directeur général de Soletanche Bachy.

Concernant l'activité, nous avons terminé l'année 2018 avec un chiffre d'affaires de près de 1,6 milliards d'euros en croissance par rapport à 2017, en dépit d'un effet de change qui ne nous a pas été très favorable.

Nous réalisons environ 20% de notre activité en France, le reste étant réparti sur six zones géographiques.

Cette année, l'activité a été particulièrement soutenue en France, bien sûr sous l'effet des projets du Grand Paris Express, mais aussi en Amérique du Nord, aussi bien aux États-Unis qu'au Canada, ainsi qu'en Asie/Océanie, où nous avons de gros projets en cours. Enfin, et c'est un signe encourageant, notre carnet de commandes s'est renforcé et s'est établi à un niveau record à plus de 1,8 milliards d'euros, ce qui nous donne une visibilité très appréciable.



2



3

FIGURE 1 © AURÉLIE COUDIÈRE - FIGURE 2 © ROBER BULLIVANT - FIGURE 3 © BESSAC

Sur quels types de marchés êtes-vous présents ?

Nous réalisons plus de 4 000 chantiers par an. Nous sommes présents sur des marchés très variés, publics ou privés, qui génèrent des projets très différents en termes de taille et de complexité. Nous travaillons ainsi sur des projets dont le montant varie de 50 000 à plus de 200 millions d'euros.

Cette "granulométrie" est un point-clé de notre stratégie. Nous opérons sur les gros projets au rayonnement international, mais nous sommes aussi capables d'être pertinents sur des projets plus petits ou très locaux.

Soletanche Bachy est un groupe, constitué d'un réseau d'entreprises réunies autour d'une culture commune solide, mais ce ciment qui nous lie ne veut pas dire que nous sommes uniformes. Ainsi, certaines de nos filiales réalisent plusieurs centaines de projets par an, tandis que d'autres n'en font qu'une dizaine. Vous imaginez bien que, dans les deux cas, les préoccupations et les approches managériales sont très différentes.

Cette diversité se reflète dans notre manière de travailler. Nous avons besoin d'une approche globale pour répondre aux grands projets d'infrastructure. Ceux-ci sont souvent techniquement complexes et nécessitent des ressources importantes, ainsi que la mise en commun de toute l'expertise de l'entreprise. Ces projets fédérateurs permettent également à nos jeunes talents de se former et de se développer.

A contrario, il nous faut être agiles et décentralisés pour être pertinents sur nos marchés locaux et gérer de plus petits projets, souvent privés, qui nous permettent de valoriser notre esprit d'autonomie, de leadership et d'entrepreneur.

CHRISTOPHE DAUCHY : PARCOURS

Christophe Dauchy est ingénieur diplômé de l'ESTP Paris (École Spéciale des Travaux Publics, du bâtiment et de l'industrie) et a effectué la totalité de sa carrière dans le groupe Soletanche Bachy, en majeure partie à l'étranger.

Entré chez Bachy en 1991, il débute son activité en France avant de s'expatrier en 1993 pour participer au chantier des tours jumelles Petronas à Kuala Lumpur en Malaisie.

Il revient ensuite en Europe en tant que responsable des travaux "d'injection et de petite perforation" pour le Royaume-Uni, où il restera 4 ans. Il rejoint en 2001 la filiale de Soletanche Bachy à Hong Kong pour diriger la cellule études de prix, poste qu'il occupera jusqu'en 2004.

Après une mission de prospection en Chine, il dirige entre 2005 et 2009 la filiale monégasque du groupe, avant de prendre la direction de Bachy Soletanche Hong Kong.

En 2014, il change de continent pour assurer jusqu'en 2016, la direction de la zone Amérique du Nord.

Rentré en France, il est nommé Directeur général de Soletanche Bachy en janvier 2018.

2- Parc d'attraction Pleasure Beach à Blackpool, Royaume Uni, réalisé par Roger Bullivant.

3- Système d'optimisation de la sécurité en atmosphère hyperbare Hyperb'Assist de Bessac.

4- Chantier de la troisième piste de l'aéroport international de Hong Kong.

5- North South Corridor et Orchard Road de la Thomson Line à Singapour : le tunnel du lot T219.

Quelle politique ou quelle démarche Soletanche Bachy mène pour se développer ?

Nous nous appuyons sur quelques valeurs simples : un ancrage local fort, la recherche de l'excellence technique et opérationnelle, la promotion de l'innovation, ainsi que l'autonomie de nos collaborateurs.

Un ancrage local fort et solide tout d'abord : nous avons, dans chacun des pays où nous sommes présents, une ou des filiales qui opèrent dans l'écosystème local. La gouvernance et les règles du groupe sont claires, mais nous laissons à nos filiales une large autonomie pour déterminer leurs stratégies, sélectionner leurs investissements ou encore établir leurs organisations. Ce maillage local est complété par notre filiale Grands Projets, dont la vocation est de réaliser, conjointement

avec nos filiales locales ou seul, des projets de grande envergure ou complexes nécessitant une expertise spécifique ou des moyens humains et/ou matériels importants.

Nous disposons également de filiales spécialisées, comme Bessac, dans les tunnels mécanisés, qui peuvent s'appuyer sur notre maillage local pour accélérer leur développement.

L'expertise technique ?

L'expertise technique et l'excellence opérationnelle sont naturellement au centre de notre modèle et au cœur de l'ADN de notre groupe depuis ses origines.

Soletanche Bachy est un groupe mondial spécialiste des fondations et des technologies du sol. Cette expertise et ce savoir-faire sont des prérequis sans lesquels rien ne serait possible. C'est d'abord et avant tout pour notre maîtrise technique que nos clients s'adressent à nous et nous sollicitent pour que nous leur proposons des solutions adaptées et performantes. Grâce à ces compétences, nous sommes en capacité d'identifier, de maîtriser et, dans une certaine mesure, de sécuriser les projets. C'est ce que nos clients attendent de nous et c'est donc bien là que réside notre valeur ajoutée.

Pour cette raison, nous attachons beaucoup d'importance à la formation technique de nos jeunes ingénieurs. Nous maintenons en outre des services techniques centraux forts et avons un bureau d'études intégré qui nous permet de concevoir des variantes sur un grand nombre de projets.

L'innovation ?

Nous consacrons beaucoup d'énergie à promouvoir l'innovation au sein du groupe. ▶

© SOLETANCHE BACHY

4



© MICHAEL LIEW

5





6 © MJ CHAPMAN



7a



7b

© SOLETANCHE BACHY

6- Hydrofraise® électrique sur le chantier de Thames Tideway à Londres.

7a & 7b- Simulateur de conduite d'une Hydrofraise®.

8- Hydrofraise® au travail sur le chantier du City Rail Link 1 à Auckland, en Nouvelle Zélande.

9- Gare du Pont de Sèvres sur le lot T3A du Grand Paris Express.

Celle-ci est bien sûr liée à la R&D mais pas seulement ! L'innovation peut se faire dans tous les domaines, qu'il s'agisse de sécurité, d'environnement ou de productivité. L'année 2018 illustre parfaitement cette approche. Concernant la prévention d'abord,

Bessac a reçu, dans le cadre de la FNTP, un trophée pour le procédé "Hyperb' Assist". Il s'agit d'un système permettant d'optimiser la sécurité en atmosphère hyperbare où le strict respect des procédures de sécurité est absolument impératif. L'outil mis au point par

Bessac renforce le contrôle, en particulier à la décompression. Dans le domaine de la protection de l'environnement, nous avons utilisé pour la première fois en 2018 un *power pack* électrique pour alimenter nos Hydrofraises® sur le chantier de

© SOLETANCHE BACHY

8



© SGP, HORIZON, YVES CHANOIT

9





10

© SGP, HORIZON, YVES CHANOIT



11

© SGP, VALODE & PISTRE

"Thames Tideway" à Londres. L'alimentation électrique réduit l'empreinte carbone et comporte des avantages importants en termes d'émissions sonores notamment.

Pour la formation enfin, nous avons développé un simulateur de pilotage d'Hydrofraise®, comparable à ce qui existe dans l'industrie aéronautique. Ce simulateur installé dans un conteneur est facilement transportable et permet d'assurer la formation complète des futurs opérateurs dans les "conditions du chantier". Deux unités sont opérationnelles en France et en Asie et d'autres développements sont d'ores et déjà en cours pour étendre le champ d'utilisation de cet outil aux bennes à câbles ou aux grues de manutention. En parallèle, nous investissons beaucoup dans la digitalisation de nos procédés et dans le *big data*. Le but est bien évidemment d'accroître notre efficacité mais aussi de créer de la valeur pour nos clients.

Pourriez-vous donner quelques exemples de projets importants actuellement en cours, en allant, par exemple d'est en ouest ?

En Nouvelle Zélande, nous travaillons avec un partenaire local sur le projet "City Rail Link" (CRL). Il s'agit d'un tronçon de métro comportant 3 stations dans le centre d'Auckland. Nous avons

10- Gare du Vert-de-Maisons sur le lot T2A du Grand Paris Express.

11- Aspect final de la gare du Vert-de-Maisons sur la Ligne 15 sud du Grand Paris Express.

12- Station Maison-Blanche du prolongement de la Ligne 14 du métro parisien.

13- Projet architectural de la station Maison-Blanche du prolongement de la Ligne 14.

gagné le lot CRL1 où nous réalisons des travaux en sous-cœuvre sous l'ancienne poste principale d'Auckland, qui est un bâtiment historique protégé ! Nous avons pour cela utilisé une Hydrofraise® HCO5, qui a travaillé depuis une plateforme décaissée sous le bâtiment existant et sous hauteur limitée.

En continuant vers l'ouest, il faut bien sûr parler de l'extension de l'aéroport de Hong Kong (Contrat 3905).

Une quinzaine de nos équipements est installée sur des barges pour traiter le sol en place et le stabiliser avant remblaiement du terre-plein, sur lequel prendra place la troisième piste d'atterrissage. La technique du GEOMIX®, mise en œuvre avec nos CSM (Cutter Soil Mixing) a été sélectionnée. Elle permet de traiter in situ, c'est-à-dire sans

évacuation, les sols pollués qu'il aurait été très difficile et coûteux de draguer. Commencée en 2017, notre intervention devrait s'achever fin 2019.

Ce projet est emblématique du savoir-faire de notre groupe. Il a fallu en effet, pour le gagner d'abord et le mener à bien ensuite, combiner des expertises très variées, tant sur le plan de la conception et de l'assemblage de matériels spécifiques que dans leur mise en œuvre dans des conditions marines difficiles. La proximité de l'aéroport implique en effet que les travaux soient exécutés sous hauteur limitée. Il a donc fallu concevoir et construire des machines CSM sans *kelly* mais utilisant un système pendulaire, capable de travailler depuis des barges sous 6 m de hauteur. En outre, le fonctionnement concomitant de ces 15 machines, 24 heures sur 24, a nécessité le développement d'un système de traitement de données spécifique. En fait, ce projet est la parfaite illustration de la puissance du modèle local/global qui est le nôtre. Rendons-nous maintenant à Singapour. Nous avons obtenu très récemment, en association avec un partenaire japonais, le lot 105 du "North-South Corridor", une autoroute urbaine traversant Singapour du nord au sud, construite en tranchée couverte. Il s'agit d'un lot en *design and build*, ce qui est inhabituel à Singapour. ▶

SOLETANCHE BACHY EN QUELQUES CHIFFRES

- 1,6 milliards d'Euros de chiffre d'affaires
- 10 000 collaborateurs de plus de 60 nationalités
- 68 filiales dans le monde
- Présence dans plus de 70 pays
- Le groupe gère un portefeuille de 525 brevets et dépose chaque année 35 brevets en France et à l'international

© CÉDRIC HELSLY

12



© GROUPE 6

13



Le tracé de cet axe croise une ligne de métro existante mais, compte tenu de contraintes spécifiques, la nouvelle route se dédouble pour passer à la fois en-dessous et au-dessus de la ligne de métro existante en service. C'est une vraie prouesse technique. La "Land Transport Authority" a décidé de nous attribuer ce marché grâce à notre capacité à relever ce défi technique, mais aussi en raison de nos solides références dans la région. Toujours à Singapour, nous terminons ainsi plusieurs lots de la Thomson Line, notamment le lot 219 où nous réalisons une "caverne" sous la station d'Orchard Road, qui est une des plus fréquentées à Singapour. En Inde, notre filiale Grands Projets intervient sur le barrage de Subansiri, le plus important projet hydroélectrique jamais entrepris dans le pays. Nous réalisons un écran étanche de 18 000 m², à des profondeurs pouvant atteindre 50 mètres, sans affecter la construction du barrage. C'est un véritable exploit technique ! D'abord, parce que le chantier est situé dans une région montagneuse, très difficile d'accès. Ensuite, nous effectuons la majorité des travaux depuis des galeries de taille extrêmement réduite. Pour relever ce défi, nous utilisons une Hydrofraise® HC05, spécialement conçue pour intervenir dans des espaces confinés. Grâce à son format compact, cette machine est conteneurisable, ce qui a permis de l'acheminer facilement sur le chantier par la route depuis Kolkata, à plus de 1 000 km !

En Europe et en France, évidemment, avec les grands travaux à Paris ?

L'Europe, c'est bien sûr cette année le Grand Paris Express où nous sommes rentrés dans le vif du sujet sur nos deux

PRIX DE L'INNOVATION

À ce jour, 20 prix de l'innovation ont été attribués aux procédés Soletanche Bachy par la Fédération Nationale des Travaux Publics.

Les derniers dossiers récompensés :

- 2018 - Hyperb'Assist**
Système d'optimisation de la sécurité en atmosphère hyperbare (catégorie Prévention).
- 2016- Hydrofraise® à grippeurs**
Trophée processus matériels.
- 2015- Biocalcis®**
Consolidation des sols par Biocalcification.
- 2013- Tunnel Dismantling Machine**
Un tunnelier pour déconstruire les tunnels.
- 2013- CIT'EASY®**
Procédé innovant pour parois moulées en milieu urbain.
- 2011- SPRINGSOL®**
Soil mixing à impact réduit sur existants.
- 2009- PROCCOPE®**
PROcédé de Curage Continu et Optimisé des Emissaires.
- 2007- GEOMIX®**
Procédé de paroi et de fondation généralisant la technologie Hydrofraise® au soil mixing profond.
- 2005- T.Pile®**
Augmentation des performances des pieux par rainurage.
- 2003- JETPLUS**
Triplement du rendement énergétique du jet grouting avec système de contrôle géophysique associé.
- 2003- ROLL & ROCK**
Train de marinage pendulaire sans rail.
- 2001- PIBOP**
Puits Intégré pour Bassin d'Orage Profond.

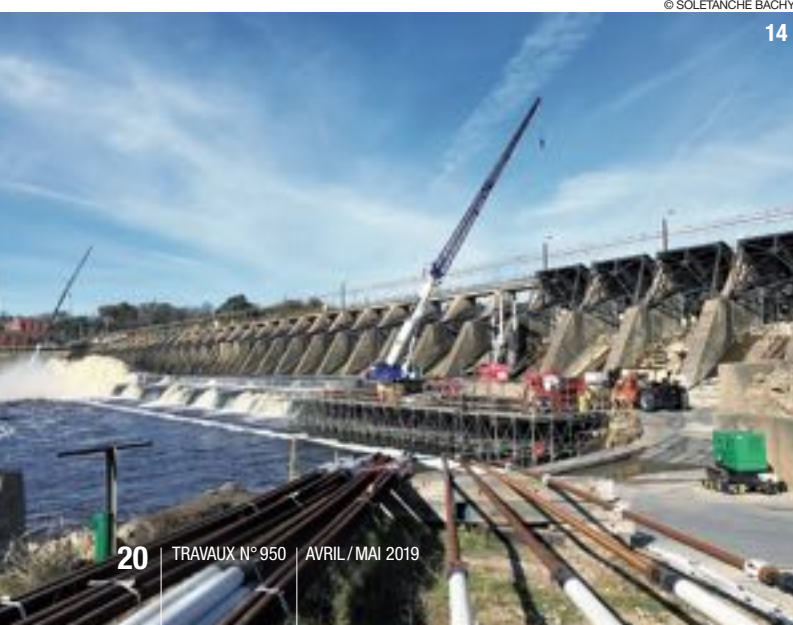
gros lots de la Ligne 15 - les lots T2A et T3A - c'est-à-dire "Villejuif-Louis Aragon - Créteil-L'Échat" ⁽¹⁾ et "Île-Monsieur (Pont de Sèvres) - Fort d'Issy-Varves-Clamart" ⁽¹⁾.

Ces chantiers que nous réalisons en partenariat avec Bouygues TP comportent des ouvrages exceptionnels. Ainsi, sur la gare du Vert-de-Maisons, sur le lot T2A, nous avons réalisé des

parois moulées de grande profondeur sur lesquelles des joints d'étanchéité CWS, entre panneaux, ont été mis en œuvre avec succès jusqu'à 74 m de profondeur ! C'est une première mondiale qui a demandé une grande rigueur opérationnelle et un suivi très strict de nos procédures. La gare elle-même, qui sera excavée à 37 mètres de profondeur, sera prolongée par deux cavernes, creusées en traditionnel de part et d'autre du futur tunnel dans le calcaire grossier, avec du sable en calotte. Du fait de la nature des terrains rencontrés, un traitement préalable par injection a dû être réalisé et ce dans un contexte difficile, puisque nous sommes à proximité de bâtiments d'habitation classés et occupés. Ce dispositif sera complété ultérieurement par de la congélation dans les sables, afin de prévenir tout risque d'éboulement durant le creusement de la caverne. C'est également sur le T2A, et plus spécifiquement sur la gare de Vitry-Centre, qu'une nouvelle Hydrofraise® compacte de type HC05 équipée d'un module de grippage (également prix de l'innovation de la FNTP) a fait avec succès ses premiers tours de tambours. Dans le cadre du prolongement de la Ligne 14 vers l'aéroport d'Orly, nous intervenons, en association avec Léon Grosse, sur le lot GCO1. Ce lot comprend deux ouvrages principaux : la nouvelle station Maison-Blanche et le tunnel de liaison entre cette station et l'arrière-gare de la station existante Olympiades. Ce lot est situé au sud de Paris, dans le XIII^e arrondissement, sur l'avenue d'Italie. En raison de la présence des Argiles Plastiques (défaut de butée des parois moulées), les parois moulées sont stabilisées par des refends transversaux (sollicités sous le niveau du fond de fouille). Leur réalisation constitue,

14- Barrage de Prairie du Sac dans le Wisconsin, aux États-Unis.

15- Barrage de Ituango en Colombie.



14



15

à elle seule, un chantier, puisque ce ne sont pas moins de 760 mètres de murs de refend qui sont forés à 32 mètres de profondeur. Ce chantier est un challenge unique, en raison de multiples et importantes contraintes : un environnement urbain extrêmement dense, une tour de 36 étages située à environ 1 mètre des parois moulées, ainsi que la ligne de métro n°7 et des mitoyens d'habitation en R+15. Quant aux emprises de chantier, elles sont très restreintes et libérées au fur et à mesure, selon un phasage complexe. À telle enseigne que la centrale à boue est située à 1 km du chantier et que le béton est acheminé, par pompage, depuis une centrale installée pour le chantier et située à 600 mètres. Par ailleurs, nous sommes présents sur de nombreux autres chantiers en France qui constituent également de véritables défis techniques.

Quelques mots de la présence et du développement de Soletanche Bachy en Amérique du Nord et en Amérique Latine ?

En Amérique du Nord, nous avons connu un surcroît d'activité avec une belle progression de notre chiffre d'affaires notamment avec la remise en état du barrage de Prairie du Sac, dans le Wisconsin. Il s'agit d'un *Early Contractor Involvement (ECI)*, c'est-à-dire un processus de dévolution associant l'entreprise à la phase de conception et d'études du projet, à l'issue de laquelle le coût prévisionnel des travaux (*Target Cost*) est arrêté conjointement par le client et l'entreprise.

Une fois encore, c'est bien notre présence locale forte qui a rendu possible notre intervention sur le projet !

La deuxième intervention concerne le démarrage des travaux de réhabilitation



17
© SOLETANCHE BACHY

16- Barrage du Bas Subansiri en Inde.

17 & 18- Activités de sondages au Chili.

sur le barrage de Boone Dam, dans le Tennessee, sous maîtrise d'ouvrage de la Tennessee Valley Authority (TVA). En effet, suite à la découverte d'infiltrations à la base aval du barrage, des études complémentaires ont révélé qu'il était urgent d'empêcher le développement d'un processus d'érosion interne que pourrait causer les infiltrations. Les travaux confiés à Soletanche Bachy

consistent à réaliser depuis la crête du barrage un écran étanche en pieux sécants de gros diamètre.

En Amérique du Sud ?

Notre activité sur le continent sud-américain est très variée : nous y sommes implantés dans une dizaine de pays ! En Colombie, nous venons d'achever les travaux de réparation du barrage d'Ituango. L'ouvrage est situé dans une région isolée, dans un contexte géographique difficile. Il a fallu réaliser en urgence une coupure étanche depuis la crête de l'ouvrage. Nous continuons d'être très actifs à Mexico City, où nous réalisons des fouilles clés en main sur des projets immobiliers privés. Au Chili enfin, nous intervenons régulièrement, et depuis plusieurs années, pour des reconnaissances ou des forages de production dans les mines de cuivre, ressource principale du pays.

Pour conclure ?

Soletanche Bachy est l'un des leaders mondiaux des fondations et des technologies du sol. Nous accompagnons nos clients sur 5 continents à travers nos implantations locales fortes et notre expertise technique et opérationnelle reconnue. Nos bases sont solides et notre carnet de commandes atteste de la vitalité de notre développement. Celui-ci est avant tout le fruit de l'engagement et de la passion de nos équipes dans nos filiales et au sein des services support. Je constate combien les jeunes qui nous rejoignent sont souvent surpris de la passion qui nous anime. Cette passion est contagieuse, elle est aussi notre moteur ! □

1- Groupement Horizon Grand Paris (Bouygues TP/ Soletanche Bachy France/ Soletanche Bachy Tunnels/ Bessac/ Sade).

© YANNICK CORMIER



16

© SOLETANCHE BACHY



18



1 © SGP

TRE ALTAMIRA LE GRAND PARIS EXPRESS AUSCULTÉ DEPUIS L'ESPACE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

L'IMAGERIE SATELLITAIRE EST EMPLOYÉE À TRÈS GRANDE ÉCHELLE DANS LE CADRE DES CHANTIERS DU GRAND PARIS EXPRESS. PAR INTERFÉROMÉTRIE SATELLITE RADAR - INSAR -, LES SPÉCIALISTES DE TRE ALTAMIRA, SONT CAPABLES DE SUIVRE LES DÉFORMATIONS DU SOL AU MILLIMÈTRE PRÈS ET DE MESURER L'IMPACT EN SURFACE DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL. FIFAMÈ KOUDOGBO, CHEF DE PROJET ET ANNE URDIROZ, RESPONSABLE DU DÉVELOPPEMENT DE L'OFFRE INTERFÉROMÉTRIQUE DE TRE ALTAMIRA SUR LE MARCHÉ FRANÇAIS, NOUS EN DISENT PLUS SUR CETTE TECHNIQUE EN PLEIN ESSOR QUI CONNAÎT DÉJÀ UN BEAU PRÉSENT.

D'UNE START-UP À UN GROUPE MONDIAL

La technique d'interférométrie satellite radar a vu le jour après le lancement en 1991 de la première mission satellite radar ERS opérée par l'ESA (Agence

Spatiale Européenne). Un article paru dans Nature présente la première carte de mouvements montrant l'impact dû au tremblement de terre qui a frappé la Californie en juin 1992. C'est ainsi que l'aventure est lancée par l'équipe du

1- Perspective Est de la future gare " Pont de Sèvres " du Grand Paris Express.

CNES (Centre National d'Études Spatiales) dirigée par Didier Massonnet et qui compte parmi ses membres le futur créateur d'Altamira Information. Cette start-up issue du CNES est créée en 1999 à Barcelone. Côté italien, les

2- Couverture de la revue Nature présentant le premier interférogramme d'un tremblement de terre (n°364 - 1993).

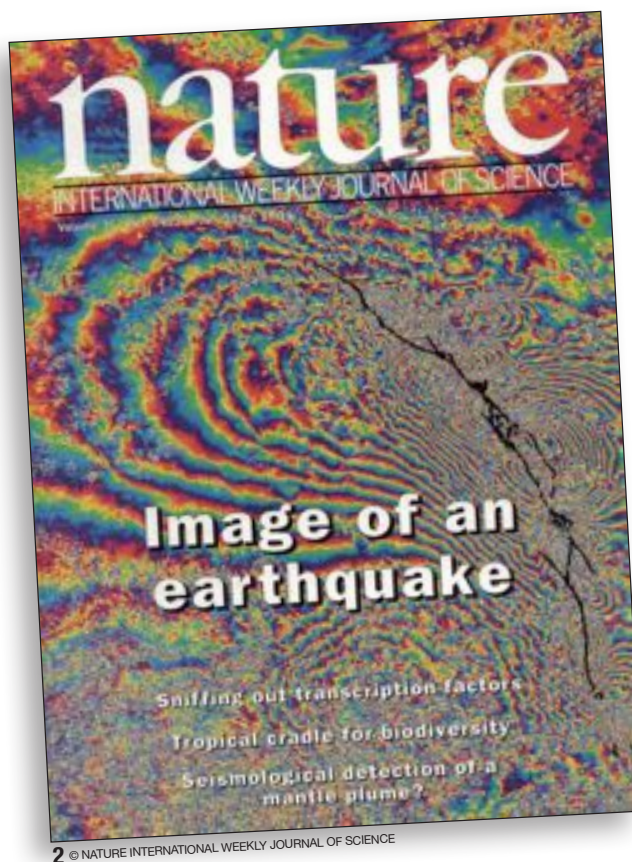
3- De gauche à droite, Fifamè Koudogbo, chef de projet et Anne Urdiruz, chargée d'affaires France de Tre Altamira.

études sur l'interférométrie radar sont aussi très avancées ; une spin-off du Politecnico di Milano voit le jour sous le nom de Tre (Tele-Rilevamento Europa.) En 2001, l'ESA lance le satellite Envisat qui assure la relève de ERS jusqu'en 2010. En utilisant les données acquises par ces missions européennes Altamira Information et Tre vont développer des services à valeur ajoutée et lancer des projets de R&D avec des grands comptes dans le domaine des infrastructures et de l'énergie, curieux du potentiel de cette technologie innovante. Les algorithmes de traitement interférométrique ont vite évolué du fait du nombre croissant d'images satellite disponibles depuis 1992. TRE dépose un brevet qui va devenir le standard du domaine : l'interférométrie par Points Stables, PSInSAR® pour Permanent Scatterer Interferometry.

En 2010, l'algorithme SqueeSAR® permet d'augmenter de manière drastique le nombre de Points Stables en exploitant d'une manière plus poussée les caractéristiques du signal radar dans des environnements moins favorables à la technologie (présence de végétation), permettant ainsi une meilleure compréhension des mouvements à plus large échelle.

Les deux sociétés pionnières et néanmoins concurrentes vont s'agrandir au fil des contrats remportés au niveau national et international jusqu'à atteindre plus de trente salariés chacune et intéresser d'autres acteurs qui souhaitent élargir leur champ de compétence.

C'est le cas du groupe CLS (Collecte Localisation Satellite), filiale du CNES qui fait l'acquisition d'Altamira Information en 2010 pour élargir son offre qui couvre jusque là essentiellement le domaine maritime. Cette intégration ouvre de nouvelles perspectives grâce au réseau international de CLS.



© TRE ALTAMIRA



FIFAMÈ KODOGBO ET ANNE URDIROZ : PORTRAITS

Anne Urdiruz rejoint en 2005 une start-up, Altamira Information qui mesure des mouvements du sol par interférométrie satellite radar.

Les débuts sont difficiles car la technique est inconnue des clients potentiels et les performances limitées.

En 2008 l'offre s'enrichit grâce à la Haute Résolution et la persévérance finit par payer, le Grand Paris est remporté !

Anne Urdiruz est aujourd'hui responsable du développement de l'offre interférométrique sur le marché français de Tre Altamira, l'un des plus dynamiques.

Depuis 2008, elle fait équipe avec Fifamè Koudogbo, chef de projet. Diplômée en électronique Hyperfréquences, Fifamè Koudogbo est une chef de projet bien occupée : Grand Paris Express, réseaux RATP et SNCF Réseau, barrages EDF, stockage de Gaz pour Terega, études géologiques pour TOTAL... de quoi assouvir sa curiosité et son goût d'un travail au millimètre près !

En 2015 la décision est prise de consolider la position de leader du groupe dans le domaine de l'interférométrie satellite en acquérant la société Tre. C'est ainsi que les deux équipes, déjà expertes et reconnues au niveau international dans le domaine de l'interférométrie satellitaire, fusionnent pour créer Tre Altamira, filiale à 100% du groupe CLS.

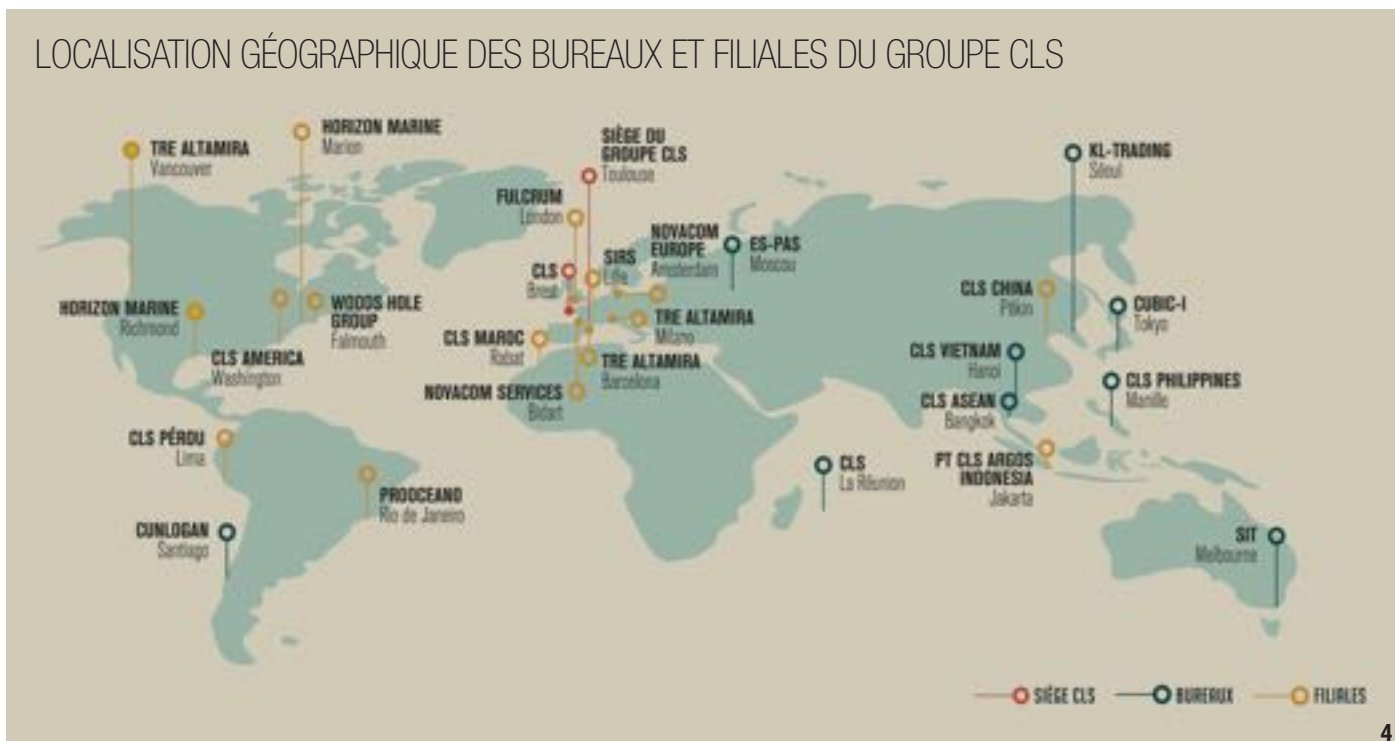
Tre Altamira, c'est aujourd'hui une équipe de 70 personnes réparties sur les trois sites historiques de Barcelone, Milan et Toulouse (à proximité du CNES), ainsi qu'à Vancouver, pour le marché spécifique des huiles lourdes au Canada.

DES MESURES AU MILLIMÈTRE PRÈS

Fifamè Koudogbo précise en quoi consiste cette technique. « Les satellites radar enregistrent avec une très grande précision la distance parcourue par le signal radar entre l'émission et la réception de l'onde. Ainsi, en comparant l'évolution de cette distance au cours du temps, la technologie InSAR fournit des informations très précises sur les déformations du sol, permettant ainsi de détecter des mouvements avec une précision millimétrique. L'algorithme SqueeSAR®, développé et breveté par Tre Altamira, identifie les cibles aux sols pour lesquels il sera possible d'évaluer le déplacement ».

La présence des réflecteurs permanents (ou persistants) est généralement limitée à des environnements urbains, des terrains rocheux ou des sols nus. Les meilleures résolutions spatiale et temporelle des missions d'observation de la Terre ont permis d'exploiter les données satellite sur d'autres types de terrain. La technique de traitement avancée SqueeSAR® permet ainsi, en l'absence de réflecteurs dominants, dans des zones à faible végétation par exemple, d'obtenir une information spatiale du mouvement en regroupant des pixels homogènes pour obtenir une réflexion suffisamment forte et stable dans le temps. Cette approche, qui permet de densifier le réseau de points de mesure, s'avère particulièrement efficace pour suivre les glissements de terrain en zone rurale ou de montagne. Dans le cas enfin des zones moins propices, où peu de points de mesure sont détectés par l'algorithme du fait, par exemple, du type de couverture du sol (végétation, neige) ou en raison de changements surfaciques nombreux, Tre Altamira pourra installer des coins réflecteurs.

LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DES BUREAUX ET FILIALES DU GROUPE CLS



4 © CLS

Ces réflecteurs artificiels sont des structures en aluminium en forme de trièdre qui ne requièrent aucun type de maintenance ni source d'énergie une fois installés. Orientés vers le satellite, ils fournissent un signal de qualité maximale qui permet d'identifier précisément le point sur l'image radar et de mesurer la déformation du terrain. Ces mesures viennent compléter les informations obtenues à partir de la seule réflexion de la surface pour une analyse aussi exhaustive que possible de la zone d'intérêt.

Les résultats du traitement interférométrique sont restitués sous forme d'une base de données SIG (Système d'Information Géographique) qui fournit des informations précises sur la localisation et le déplacement de chacun des points de mesure détectés sur la zone d'étude considérée. Comme dans tout réseau géodésique, la mesure de déplacement SqueeSAR[®] est référencée spatialement à un point donné détecté durant le traitement du fait de ses bonnes caractéristiques (signal radar fort et non bruité...).

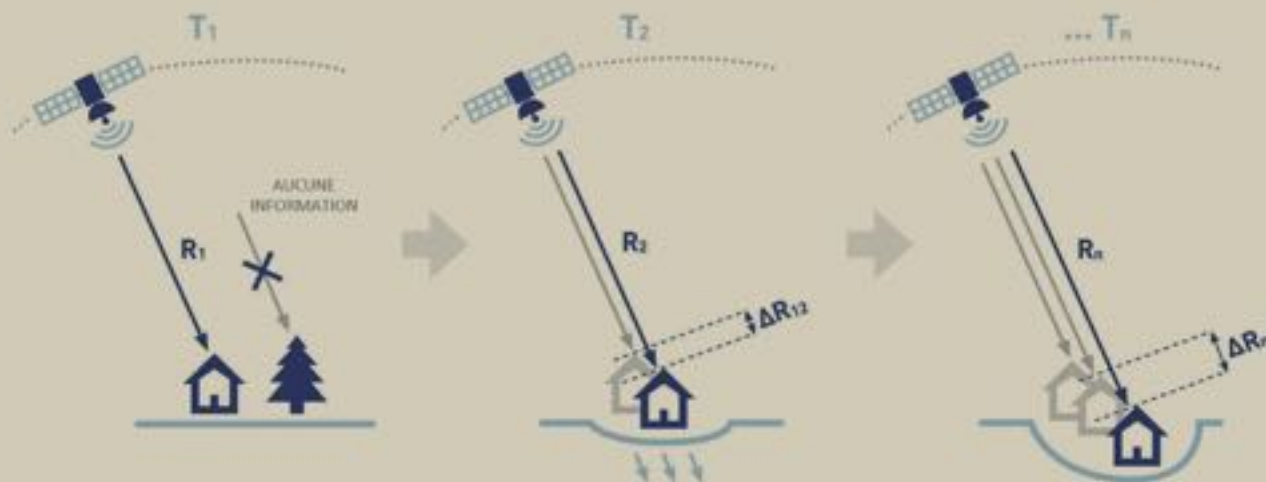
4- Localisation géographique des bureaux et filiales du groupe CLS.
5a- Mesure du mouvement de surface à partir des méthodes d'interférométrie avancée (source Ferretti et al., 2000).

IL Y A UN AVANT ET UN APRÈS 2008

Le virage décisif se produit en 2008 avec la mise à disposition d'images acquises par des satellites dits de " Haute Résolution " : la mission TerraSAR-X opérée par l'Agence Spatiale Allemande (DLR) et la constellation COSMO-SkyMed de l'Agence Spatiale Italienne (ASI). Ces missions de nouvelle génération offrent une résolution de 3 m, qui, à la différence des 20 m pour les missions antérieures, vont permettre des mesures de mouvement du sol à

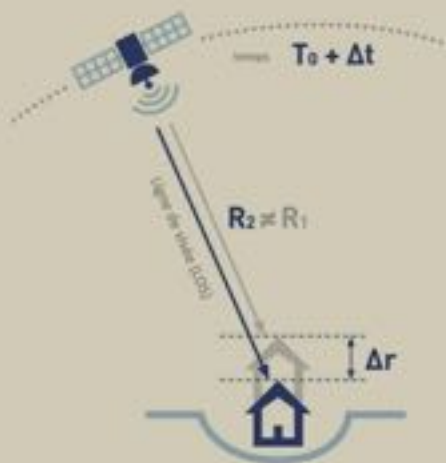
MESURE DU MOUVEMENT DE SURFACE À PARTIR DES MÉTHODES D'INTERFÉROMÉTRIE AVANCÉE

(source Ferretti et al., 2000)



5a © TRE ALTAMIRA

RELATION ENTRE LE MOUVEMENT DE SURFACE ET LE DÉCALAGE DE PHASES pouvant être mesuré grâce à l'interférométrie (source Ferretti et al., 2000)

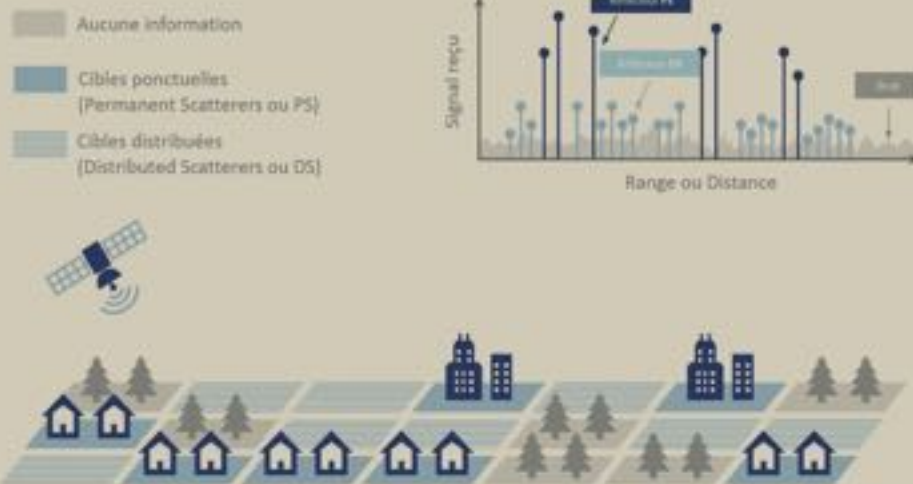


5b

© TRE ALTAMIRA

TYPE DE POINTS DE MESURE CONSIDÉRÉS LORS D'UNE ANALYSE SqueeSAR®

(source Ferretti et al., 2011)



6

© TRE ALTAMIRA

5b- Relation entre le mouvement de surface et le décalage de phases pouvant être mesuré grâce à l'interférométrie (source Ferretti et al., 2000).

6- Type de points de mesure considérés lors d'une analyse SqueeSAR® (source Ferretti et al., 2011).

7- Coins réflecteurs installés dans un champ d'huiles lourdes.



© TRE ALTAMIRA

l'échelle du bâti et des infrastructures. Le cycle de revisite des satellites est également amélioré, il n'est plus nécessaire d'attendre un mois pour obtenir une nouvelle image radar, les nouvelles missions assurent une fréquence de passage quasi hebdomadaire.

« Il y a réellement un avant et un après 2008, indique Anne Urdiroz. Sans les missions de Haute Résolution et leur capacité de revisite, la Société du Grand Paris n'aurait pas eu recours à l'interférométrie satellite radar pour surveiller l'impact en surface des travaux souterrains ».

Les performances accrues de ces missions satellite permettent d'atteindre, en environnement urbain, plus de 10 000 points de mesure au kilomètre carré sans aucune instrumentation au sol, faisant de l'InSAR un outil unique.

Au fil des années, de très bonnes archives d'images satellites ont été constituées sur différentes régions du globe.

Quelle que soit la localisation géographique d'un site d'intérêt, et sans connaître les détails du contexte de l'étude, il est possible de générer en moins de deux mois une carte de

mouvement à partir des catalogues d'images satellite disponibles.

Des études historiques permettent de "remonter dans le temps" afin de fournir des mesures de déplacement qui constituent une source d'information précieuse pour analyser des événements ou phénomènes particuliers, tenter d'en comprendre l'origine et proposer des solutions.

En cas de dommages ou litige, ces études rétrospectives peuvent s'avérer un élément clef. Mais la moyenne résolution de 20 mètres connaît aussi ses nouveautés.

Le lancement par l'ESA de la mission Sentinel-1 en 2014 marque une nouvelle étape, car elle offre une fourniture continue et gratuite d'images moyenne résolution (20 m) après la fin des missions ERS et Envisat.

La mission consiste en deux satellites qui opèrent suivant un mode de fonctionnement préprogrammé pour produire une archive de données cohérentes et de long terme propices aux applications InSAR.

Sur l'Europe, une image est acquise tous les 6 jours !

« Si la résolution de 20 mètres est une limite pour tous les projets qui requièrent une grande densité de points de mesure à l'échelle du bâti, Sentinel-1 sera particulièrement efficace dans l'étude de mouvements large échelle, tels que les mouvements tectoniques ou encore dans l'analyse des instabilités des pentes. En zone urbaine, l'usage de Sentinel-1 est par exemple utilisé pour la délimitation des périmètres affectés par la surexploitation d'aquifères ».

Sentinel-1 de par la couverture de ses images (250x200 km) fournit une information spatiale très utile à la connaissance de grands territoires. Au fil des années et grâce aux nouvelles missions satellites disponibles, la technique d'interférométrie a ainsi évolué, passant d'une phase de démonstration de service montrant son potentiel à une phase de solution opérationnelle à proprement parler.



© ESA/ATG MEDIALAB

8

Elle fait la preuve de son efficacité et obtient une notoriété qui lui permet rapidement d'élargir son champ d'activité à des acteurs privés et publics tels que la Société du Grand Paris, EDF, Total, la RATP, la SNCF...

**LE GRAND PARIS EXPRESS :
UNE SURVEILLANCE InSAR
INTÉGRALE**

Tout comme l'arrivée des missions haute résolution ont fait basculer l'InSAR du démonstrateur de service aux projets opérationnels, il y a un avant et un après le Grand Paris Express dans le domaine des infrastructures et du Génie Civil.

Anne Urdiruz précise « *En remportant le Grand Paris Express, Tre Altamira intervient pour le compte du maître d'ouvrage à toutes les phases de ce projet exceptionnel. Jamais l'InSAR n'a été déployé à une telle échelle sur un projet de référence au niveau international. Aucun doute, la solution satellite est particulièrement adaptée pour surveiller l'impact en surface d'un tel chantier* ».

« *Avec 200 km, c'est le plus gros chantier où l'interférométrie est appliquée en opérationnel. La SGP a bien eu conscience que cette technique permettrait d'avoir une information sur la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG), où l'InSAR viendrait compléter l'instrumentation sol mais permettrait également de considérer à moindre coût les avoisinants. En effet la couverture étendue de l'image satellite permet de considérer un faisceau de 1 km sur lequel la densité, sans équivalent, de 10 000 points de mesure par km² est obtenue dans cet environnement urbain dense.* »



© DLR

9

LE GROUPE CLS : 6 DOMAINES D'ACTIVITÉ

Tre Altamira fait partie du groupe CLS, société mondiale et fournisseur pionnier de solutions spatiales. CLS emploie 750 personnes réparties entre son siège à Toulouse (France) et 26 autres sites dans le monde. La société exerce ses activités dans six domaines d'activités stratégiques allant de la gestion durable de la pêche à la surveillance maritime en passant par la gestion de la flotte, la surveillance de l'environnement, l'énergie et les mines et les systèmes spatiaux et terrestres. CLS, filiale du CNES, d'Ardian, et d'Ifremer, est une société internationale, pionnière dans la fourniture de solutions d'observation et de surveillance de la Terre depuis 1986.

L'entreprise œuvre dans 6 secteurs d'activités stratégiques :

- Gestion durable des pêches,
- Surveillance environnementale,
- Surveillance maritime,
- Énergies et Mines,
- Gestion de flottes,
- Espace et système sols.

L'entreprise fournit notamment des services satellitaires basés sur la localisation et la collecte de données environnementales, l'observation des océans et des eaux continentales, et la surveillance des activités terrestres et maritimes.

80 000 balises traitées chaque mois, bouées dérivantes, animaux, flottes de pêche et de commerce.

Plus de 20 instruments, embarqués à bord de satellites, livrent quotidiennement des informations à CLS sur les mers et les océans du globe.

Près de 130 satellites livrent quotidiennement des informations à CLS sur l'état de la planète et ses activités.

Près de 10 000 images radar sont traitées chaque année par CLS.

8- Satellite Sentinel-1a.
9- Satellite TerraSAR-X en orbite.

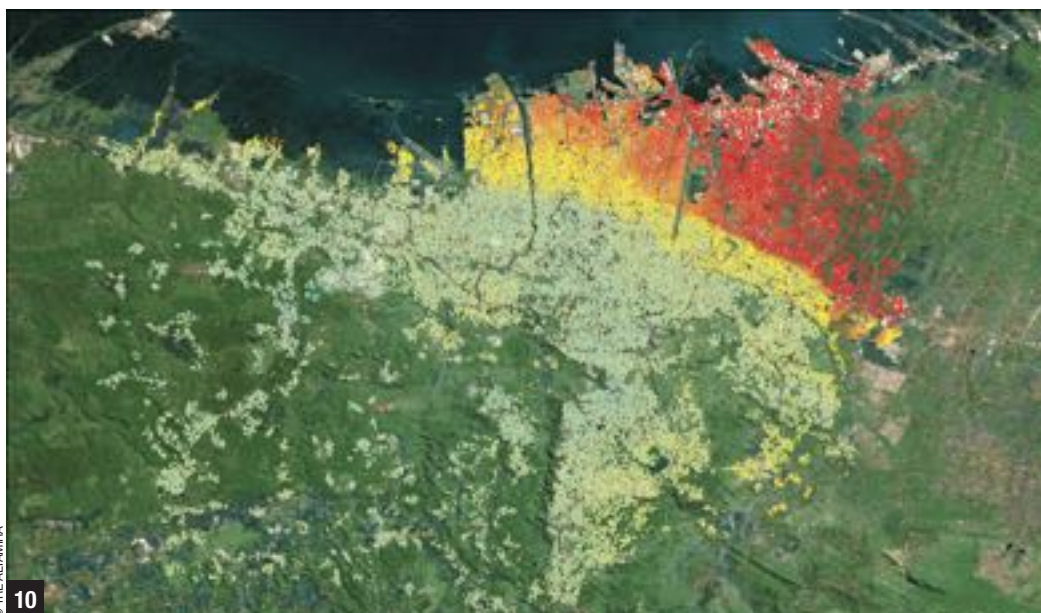
L'InSAR est ainsi déployé à toutes les phases du projet :

→ **État des lieux avant travaux**

Grâce à l'archive d'images satellite constituée depuis 1992, Tre Altamira a fourni un état des lieux avant travaux sur la totalité des 200 km du tracé GPE sur un faisceau de 1 km. La densité maximale de points de mesure a été obtenue grâce à l'archive satellite de haute résolution disponible depuis juillet 2011 sur la région parisienne. En cas de mouvement détecté sur des zones particulières, des campagnes de reconnaissance complémentaire auront pu être lancées si jugées nécessaires pour compléter les informations géologiques et géotechniques disponibles.

→ **Phase travaux**

Durant la phase travaux, Tre Altamira fournit une mise à jour mensuelle des mesures de mouvements de surface à tous les acteurs impliqués (MOA, MOE, entreprises). La mission TerraSAR-X est programmée pour acquérir une image tous les 11 jours. La couverture de cette image permettra de suivre l'avancée de plusieurs tunneliers à la fois et de contrôler, comme cela a été dit, l'impact en surface sur la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG) en incluant les avoisinants. Le point de référence de la mesure interférométrique est localisé à l'extérieur de la ZIG permettant ainsi de vérifier la stabilité des références utilisées en auscultation.



10- Mouvements de surface issus de l'analyse SqueeSAR® sur la ville de Semarang (Indonésie).

11- Carte de mouvement de surface sur un tronçon du Grand Paris Express issue de l'analyse SqueeSAR® des données Haute Résolution de la mission TerraSAR-X.

12- Outil de visualisation des résultats TREmaps®.

© TRE ALTAMIRA

10

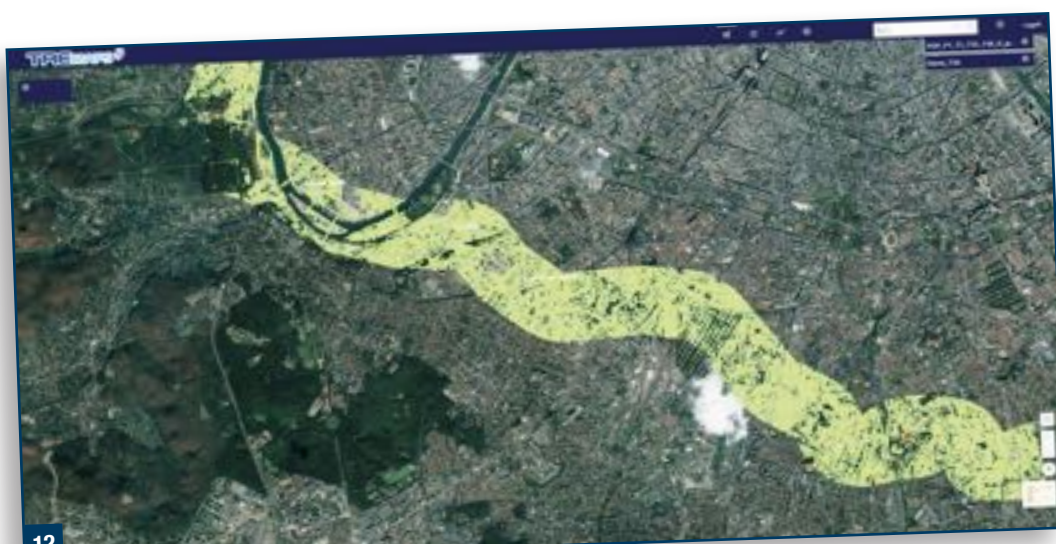
CARTE DE MOUVEMENT DE SURFACE SUR UN TRONÇON DU GRAND PARIS EXPRESS ISSUE DE L'ANALYSE SqueeSAR® DES DONNÉES HAUTE RÉOLUTION DE LA MISSION TerraSAR-X



Plus de 10.000 points de mesure/km² sans aucune instrumentation au sol

© TRE ALTAMIRA

11



12

© TRE ALTAMIRA

Parallèlement, Tre Altamira poursuit la surveillance des sections qui ne sont pas encore en travaux afin de détecter les mouvements qui pourraient se produire entre le moment où ont été réalisées les études d'état des lieux et celui où vont être déclenchés les travaux. En effet, la SGP a la volonté d'être informée de tout mouvement qui pourrait être détecté avant le démarrage des travaux.

→ Phase post-construction

Une fois les tronçons finalisés, l'étude InSAR permettra de contrôler la stabilité du terrain. Il est à noter que la même image satellite servira pour les études phase travaux et post-construction compte tenu de l'enchaînement des travaux sur des tronçons et lots différents. ▷

Chaque mois, les résultats des études interférométriques sont mis à disposition sur une plateforme en ligne. Un accès sécurisé est fourni, dans le cadre du projet, à tous les intervenants qui peuvent prendre connaissance des résultats des études qui les concernent. « Aujourd'hui nous comptons plus de 100 destinataires des mesures InSAR, souligne Anne Urdiruz, ce n'est qu'un début ! »

La complémentarité entre résultats interférométriques et mesures topographiques a pu être illustrée dans le cadre du projet du Grand Paris Express. En effet, des comparaisons ont été réalisées durant les phases préparatoires aux constructions des gares, l'interférométrie a montré, comme les méthodes d'auscultation classique, l'impact en surface de ces opérations de consolidation. Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'une publication à l'occasion du World Tunneling Congress qui s'est tenu à Dubai en 2018⁽¹⁾.

« Grâce au financement des images satellite par la Société du Grand Paris (SGP) et de la RATP qui contrôle les réseaux existants, Paris est l'une des villes dans le monde, précise Anne Urdiruz, qui bénéficie d'une couverture InSAR exceptionnelle ».

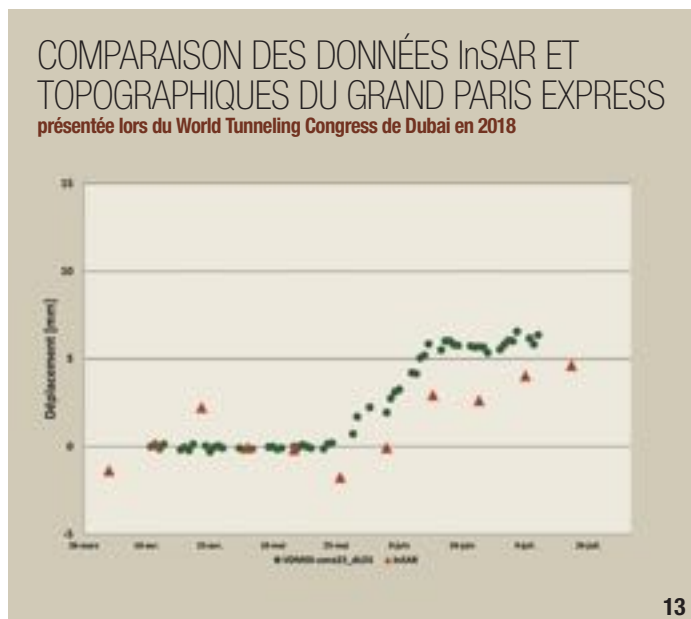
À titre indicatif, Tre Altamira dispose aujourd'hui d'une archive de plus de 150 images satellites radar haute résolution qui permet de conduire des études interférométriques d'une très grande qualité sur une période de temps significative puisque les premières images remontent à juillet 2011.

Les opportunités d'exploration pour de nouveaux usages sont là.

DES SERVICES RÉELLEMENT OPÉRATIONNELS

« Nous avons une relation directe avec nos clients qui s'adressent à nous lorsqu'un problème surgit. Cela peut être la conséquence du fait qu'aucune instrumentation n'a jamais été réalisée précédemment jusqu'à ce qu'un incident se produise. Dans ce cas, le maître d'ouvrage nous confie la réalisation d'une étude rétrospective pour connaître l'évolution d'un glissement de terrain ou de tassements sur une infrastructure par exemple. Nous traitons alors la donnée satellite qui nous paraît la plus pertinente pour le phénomène à observer ».

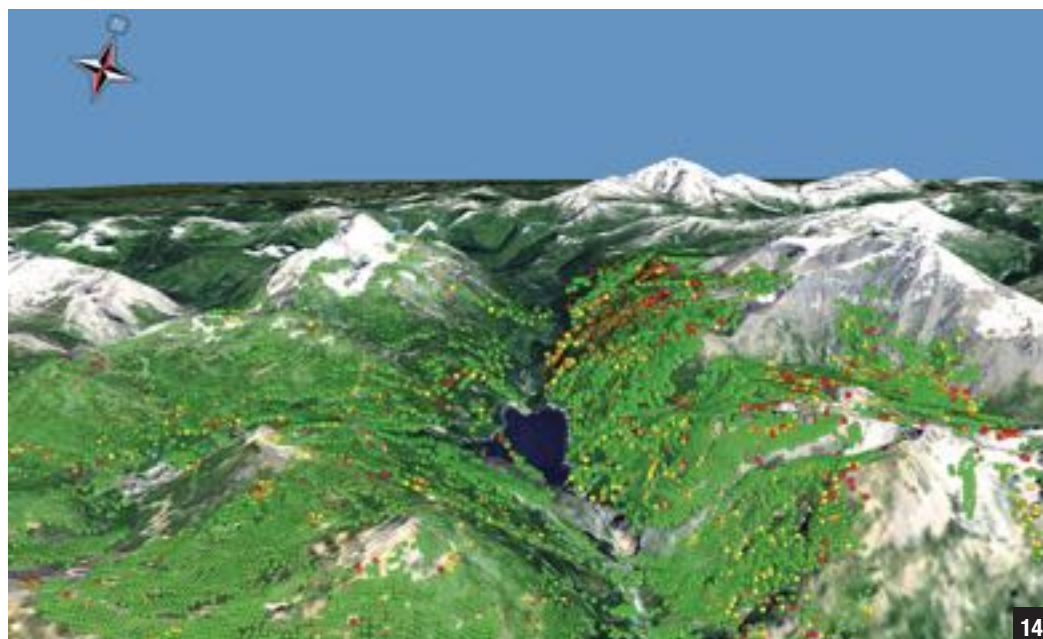
La responsabilité de Tre Altamira est de garantir la meilleure qualité possible sur la mesure. Elle n'explique pas le



13- Comparaison des données InSAR et topographiques du Grand Paris Express présentée lors du World Tunneling Congress de Dubai en 2018.

14- Définition du périmètre du glissement de terrain autour d'un barrage près de Tignes.

15- Étude SqueeSAR® réalisée sur la France Métropolitaine à partir de l'archive Sentinel-1.



phénomène lui-même mais la manière dont elle est arrivée à cette mesure mettant en évidence ses caractéristiques.

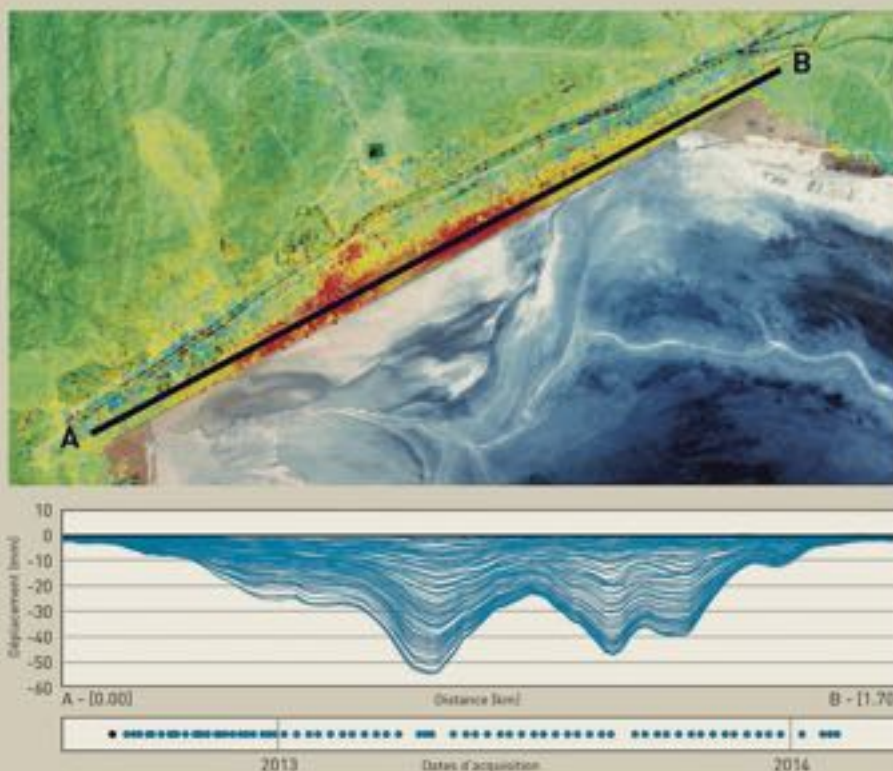
Les informations géologiques et géotechniques dont disposent les clients sur la zone d'étude sont primordiales pour émettre un diagnostic afin de résorber un problème. La société apporte à travers l'InSAR une connaissance additionnelle.

Grâce à l'expérience acquise et la notoriété de Tre Altamira, les projets de surveillance à plus long terme sont plus fréquents. Fifamè Koudogbo mène à bien plusieurs contrats pluri-annuels dont la surveillance de sections du réseau RATP.



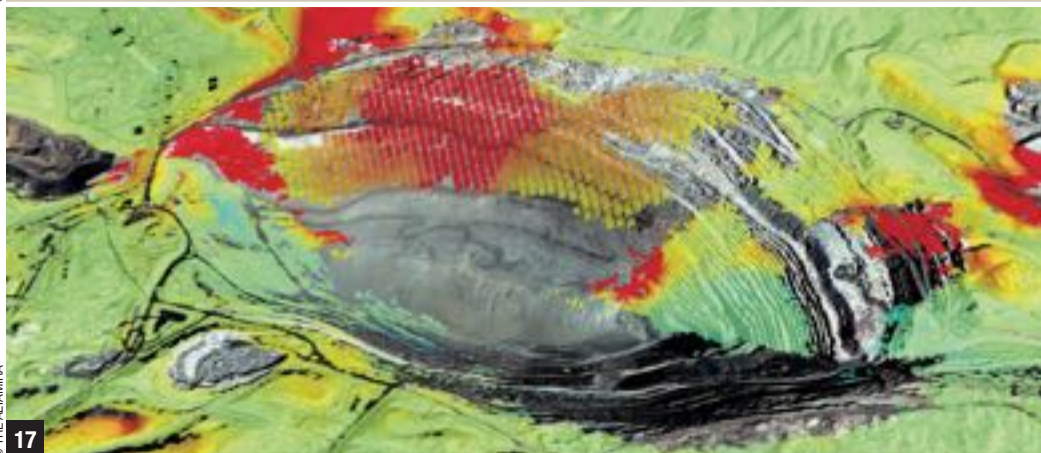
MESURE DU TASSEMENT AFFECTANT LA DIGUE D'UN BASSIN DE STOCKAGE DE RÉSIDUS MINIER

réalisée à partir de l'analyse SqueeSAR®



© TRE ALTAMIRA

16



© TRE ALTAMIRA

17

16- Mesure du tassement affectant la digue d'un bassin de stockage de résidus miniers réalisée à partir de l'analyse SqueeSAR®.

17- Instabilités des talus d'une mine à ciel ouvert mesurées par l'algorithme SqueeSAR®.

PRÉSENCE DANS LES MINES

Les géotechniciens en charge d'assurer la sécurité permanente des sites miniers, la stabilité des infrastructures, des parois de la mine et des bassins de rétention de résidus miniers ont également recours à la technologie InSAR.

Dans ce secteur, la solution spatiale s'est rapidement imposée pour la surveillance des sites où l'accès est potentiellement dangereux et constitue un outil d'aide à la décision pour le contrôle optimal et la sécurité des exploitations.

Les résultats des analyses InSAR peuvent également être incorporés dans des modèles géo-mécaniques en vue d'une amélioration des capacités de production.

En effet, dans le cadre de la surveillance réglementaire de son patrimoine, le département gestion de l'infrastructure de la RATP réalise une auscultation (mensuelle à quinquennale) des ouvrages aériens sensibles du réseau existant.

Cette auscultation vise à détecter les éventuels mouvements d'affaissement ou de soulèvement, de nature à causer des désordres structurels sur ces ouvrages.

Aujourd'hui, la plupart des méthodes de surveillance nécessitent que la main-d'œuvre soit déployée sur site, principalement la nuit, lorsque la circulation du train est arrêtée.

Après avoir conduit différentes études de faisabilité, la RATP utilise l'InSAR en complément des méthodes traditionnelles actuelles pour le suivi des déformations.

SNCF Réseau a également confié diverses études à Tre Altamira.

Les images haute résolution ont été essentielles pour d'obtenir la meilleure densité possible sur le réseau ferré et son environnement immédiat mais des études de glissement de terrain ont également été réalisées à partir de l'archive satellite Sentinel-1 de moyenne résolution pour une meilleure compréhension des mouvements de terrain à proximité des ouvrages.

D'autres exemples d'usages de l'InSAR dans le domaine du Génie Civil et des infrastructures concernent les études conduites pour le compte d'EDF sur divers sites de barrage où l'InSAR est utilisé pour déterminer les périmètres des glissements de terrain et mesurer les vitesses de déplacement.

Il est intéressant de rappeler que l'InSAR, du fait de la couverture de l'image satellite peut permettre de s'assurer que le point de référence utilisé pour les mesures in-situ est bien hors de la zone de mouvement. Une donnée qui n'est pas si simple à vérifier.

Si les projets ne manquent pas à Paris et en France dans le domaine des infrastructures, on en compte également à l'étranger.

Tre Altamira est présente sur de nombreuses opérations de tramways, de métros et ferroviaires en Australie, au Canada, en Équateur, au Japon et au Pérou.

À l'instar du génie civil, l'interférométrie a prouvé être une technologie très prometteuse y compris dans les domaines des mines et des énergies (voir encadrés).

L'inSAR DANS LE PÉTROLE ET LE GAZ

Dans le secteur du pétrole et du gaz, la technologie InSAR n'est pas en reste.

Au Canada, dans le bassin de l'Alberta où se trouve l'un des plus grands réservoirs d'huiles lourdes au monde, L'Alberta Energy Regulator (AER), organisme gouvernementale de réglementation de l'énergie, veille au respect des normes en termes de sécurité publique et de gestion de l'environnement.

L'AER a inscrit la technologie InSAR parmi les techniques de surveillance opérationnelle pour mesurer l'impact en surface des activités d'extraction et réduire le risque pour l'environnement.

La plupart des opérateurs pétroliers du bassin privilégie désormais cette méthode de surveillance en raison de l'éloignement et de la difficulté d'accès de ces gisements d'huiles lourdes. Afin de garantir la présence de points de mesure en dépit du fort enneigement durant les mois d'hiver, des réseaux de coins réflecteurs sont déployés.

UNE COUVERTURE InSAR DE LA FRANCE

Parmi les défis relevés en 2017 par Tre Altamira il y a la première carte de mouvements du sol générée sur la France métropolitaine à partir des images de la mission Sentinel-1 de l'ESA.

Cette carte a été réalisée à l'initiative du CNES pour préparer l'intégration d'un service mouvement du sol (Ground Motion Service) dans le programme européen Copernicus. Ce programme qui vise au développement des usages du spatial dans plusieurs domaines envisage la mise à disposition d'une carte de mouvement du sol à l'échelle européenne.

Ce sont plus de 10 000 images Sentinel-1 qui ont ainsi été traitées dans le Cloud. Chaque image a une emprise au sol de 200 km x 250 km, ce qui a permis d'envisager des études régionales tout d'abord, puis nationales, et bientôt européennes.

L'aventure se poursuit donc pour l'entreprise et pour tous ceux qui auront la curiosité de creuser le sujet !

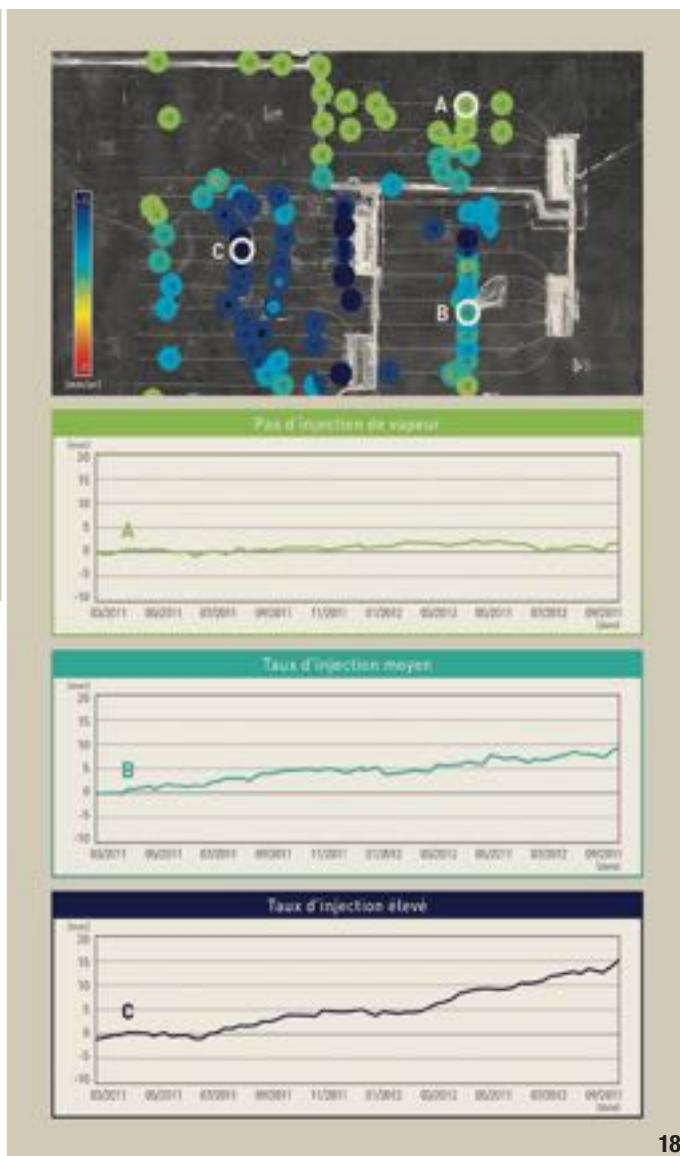
Si la technique, désormais reconnue, ne constitue plus un frein au développement de l'interférométrie, les limites de son utilisation sont plutôt le fait d'une volonté ou non d'innover par rapport aux méthodes existantes.

D'autres opérations sont d'ailleurs en cours de concrétisation puisque Tre Altamira attend les résultats d'un appel d'offre lancé pour assurer la surveillance, par interférométrie, des rabattements de nappe réalisés dans le cadre de la poursuite d'Éole vers l'Ouest, entre la porte Maillot et la Défense. □

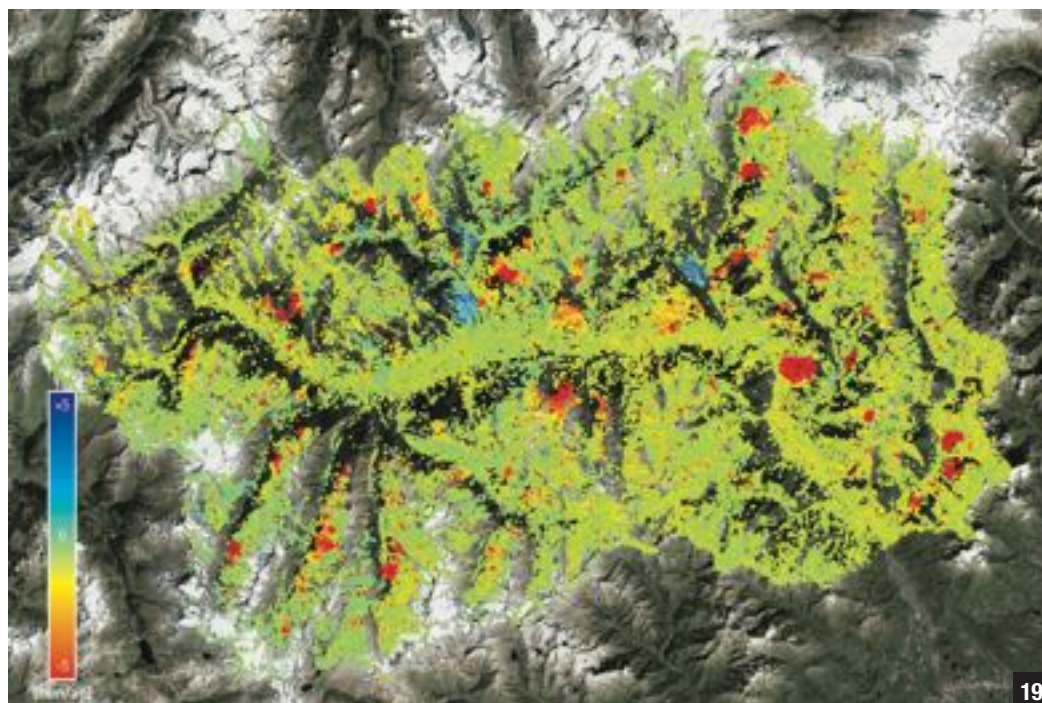
18- Mesures sur coins réflecteurs de l'impact en surface des différents cycles d'injection de vapeur sur un champ d'huiles lourdes.

19- Image d'un glissement de terrain.

1- F. Koudogbo, A. Urdiroz, J. G. Robles, G. Chapron, G. Lebon, V. Fluteaux and G. Priol, "Radar interferometry as an innovative solution for monitoring the construction of the Grand Paris Express metro network - First results".



18



19



Créateur de **Solutions**



Depuis 30 ans, les femmes et les hommes de Botte Fondations mobilisent leurs savoir-faire, leurs expériences et leur passion pour répondre aux challenges les plus ambitieux. Des centaines de projets sont réalisés chaque année par nos équipes sur l'ensemble du territoire français. Notre organisation, notre bureau d'études et méthodes ainsi que notre parc matériel dédié nous permettent de proposer des réponses adaptées à toutes les problématiques de fondations.

- Parois moulées & Soutènements
- Pieux de fondations & Micropieux
- Sondage de reconnaissance
- Clous & Tirants d'ancrage
- reprise en sous-œuvre
- Comblements de carrières
- Traitement de terrains
- Jet grouting
- Congélation de sol
- Fondations de pylônes & éoliennes

Pour en savoir plus, suivez-nous sur [LinkedIn](#) ou rendez-vous sur notre site <http://www.botte-fondations.fr>

NOUS CONTACTER

Siège Social	Agence Sud	Agence Ouest	Agence Nord
01.49.61.48.00	04.42.13.30.50	02.51.88.44.30	03.20.00.11.11



© G-OCTOPUS

L'INSTRUMENTATION DYNAMIQUE DES PIEUX PAR FIBRE OPTIQUE, UNE SPÉCIALITÉ DÉVELOPPÉE EN FRANCE

AUTEUR : EMILIO NICOLINI, DIRECTEUR G-OCTOPUS SARL - NANTERRE

G-OCTOPUS, À LA POINTE EN MATIÈRE D'ESSAIS DE PIEUX, EST LA SEULE ENTREPRISE FRANÇAISE DU SECTEUR AYANT APPLIQUÉ À DES CAS RÉELS ET OPÉRATIONNELS DE BATTAGE DE PIEUX EN MER LA TECHNOLOGIE DE LA FIBRE OPTIQUE POUR LES ESSAIS DE CHARGEMENT DYNAMIQUES. L'APPLICATION DE CETTE TECHNOLOGIE INNOVANTE AUX CONDITIONS DE TRAVAIL EN MER A NÉCESSITÉ TOUTE L'EXPÉRIENCE ET L'EXPERTISE TECHNOLOGIQUE DE G-OCTOPUS. AVEC DES RÉSULTATS JUSQU'ICI POSITIFS, LES PERSPECTIVES D'UTILISATION FUTURES INCITENT À POURSUIVRE DANS CETTE VOIE.

Le secteur de la construction a toujours incité les ingénieurs à innover. C'est en particulier le cas dans le domaine de l'éolien offshore. La complexité de la conception et de la construction des ouvrages, les investissements requis et la nécessité de garantir la fiabilité des travaux se

traduisent par des exigences toujours plus élevées en termes de performance et de fiabilité.

Ces dernières années, l'attention portée à la fonctionnalité et à la sécurité des structures, quel que soit le secteur, s'est considérablement accrue et la société civile est de plus en plus attentive aux

**1- Pieux
acier pour
un jacket.**

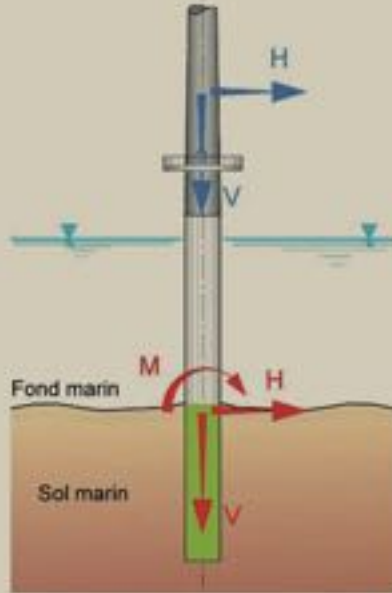
**1- Steel
piles for
a jacket.**

conséquences liées à leurs défaillances structurelles et à leur détérioration. Dans le même ordre d'idée, l'attention des opérateurs quant au retour sur investissement est de plus en plus orientée vers le maintien des installations à un niveau de productivité maximal pendant leur durée d'usage,

EXEMPLES DE FONDATION D'ÉOLIENNE OFFSHORE POSÉE



Jacket support d'éolienne – Principe



Représentation schématique d'une structure sur monopile

mais aussi axée sur la réduction de l'investissement initial (CAPEX) et des coûts de fonctionnement. En conséquence l'amélioration de la fiabilité des ouvrages ne peut plus reposer sur le surdimensionnement des éléments structurels. Tous les facteurs brièvement énumérés ci-dessus convergent vers un concept unique : celui du suivi. Autrefois, réaliser des mesures régulières au fil du temps était une action coûteuse ; suivre une installation tout au long de sa vie utile et productive se révélait un exercice décourageant. Souvent peu fiable en raison des limites de la technologie et de la durabilité effective des installations, pesant lourdement sur les ressources techniques et humaines, la surveillance était réservée à quelques cas et travaux présentant un intérêt stratégique particulier ou un niveau de risque potentiel particulièrement important (par exemple les centrales nucléaires). L'installation du système de suivi nécessitait souvent autant d'entretien que de mesures. Au cours des dernières décennies, l'instrumentation a connu des progrès considérables, avec l'essor de l'électronique dans les années 1980 et 1990 et des communications à distance à partir des années 2000 ; la diffusion du réseau internet et des extraordinaires possibilités de contrôle à distance qu'il procure ont accéléré le développement des technologies de suivi du comportement des structures. La fibre optique est l'un des éléments constitutifs de ce processus extrêmement novateur et permet de réaliser des mesures avec un impact minimal sur la structure et sur les fondations, et notamment les pieux. ▷

2

2- Exemples de fondation d'éolienne offshore posée.
3- Monopileu.
4- Monopileu battu avec marteau.

2- Examples of foundations laid for offshore wind turbines.
3- Monopile.
4- Monopile driven by hammer.



3

© G-OCTOPUS



4

© G-OCTOPUS

Dans cet article est présentée son application aux pieux et plus particulièrement aux pieux tubulaires en acier utilisés comme fondations des turbines éoliennes dites "posées offshore". Il s'agit d'une réalisation dans un secteur où l'ingénierie française excelle en Europe en raison de la qualité de ses innovations.

Les structures éoliennes offshore sont schématiquement constituées de trois éléments : le groupe nacelle-rotor-pales, la tour et enfin la fondation (voir une description plus détaillée dans l'article du n°943 de *Travaux* : "Les éoliennes offshore - développements et thématiques des fondations"). Dans cette triade, il faut tenir compte du fait que les fondations représentent 25 à 30% minimum du coût total, y compris l'installation.

Dans les applications actuelles, les fondations sur pieux sont privilégiées par rapport aux autres et sont divisées en deux types, les pieux forés et les pieux acier battus. Nous nous consacrons ici à ce second dispositif, sachant, qu'en mer, les pieux forés-bétonnés utilisent, en guise d'armature, un tube d'acier en tous points identique aux tubes utilisés pour les pieux battus. Par conséquent, l'application (future) de la fibre le long du fût pour le suivi pour exemple du comportement du pieux pendant la vie utile sera similaire dans les deux cas (sauf particularités techniques liées à l'installation).

Dans le domaine offshore, la popularité des pieux acier battus est due à leur relative facilité d'installation. Dans le cas des éoliennes, ils sont utilisés soit comme fondations de la structure en treillis (type "jacket") sur laquelle la tour est montée, soit comme prolongement de la tour dans le sol pour les fondations dites "monopieux" (figure 2). En règle générale, les pieux de fondation des jackets sont caractérisés par des diamètres ne dépassant pas 3-4 m et des fiches de 50 à 60 m (figure 1), tandis que les monopieux présentent des diamètres pouvant atteindre 8 à 10 m mais des longueurs d'enfoncement dans le sol plus courtes, soit 20 à 40 m (figure 3).

Comme pour tous les pieux de fondation, leur construction nécessite que la capacité portante soit démontrée par des tests de charge. C'est notamment le cas des pieux battus des jackets, pour lesquels la contrainte axiale est particulièrement importante.

Pour en revenir à la surveillance, on peut considérer le test de chargement comme une première étape consis-



5
© G-OCTOPUS

tant à rassembler des données sur le comportement de la structure lors de l'installation.

Traditionnellement, avec les méthodologies et l'instrumentation dont on disposait dans le passé, l'essai de chargement et le contrôle du comportement des pieux étaient considérés comme des étapes distinctes, l'instrumentation et les équipements utilisés étant différents.

Aujourd'hui, cette distinction est moins marquée du fait du développement technologique, et notamment de celui des applications de la fibre optique. Contrairement aux autres types de technologies, la fibre optique permet de concevoir des instruments durables, robustes, extrêmement réduits en taille et capables de résister aux fortes contraintes et accélérations (de l'ordre de 1 000 g et plus !) induites par le bat-

5- Pieu instrumenté avec fibre le long du fût.

5- Pile instrumented with fibre along the shaft.

tage. Cette instrumentation peut donc être intégrée aux pieux dès le début et peut être utilisée à la fois pendant les tests de charge (par exemple "dynamiques", comme détaillé ci-dessous) mais aussi pendant la durée de vie utile.

Pour rappel, les tests de charge appelés "statiques" consistent à appliquer une charge axiale croissante en tête de pieu et à mesurer le tassement

résultant. L'exécution suppose de construire, littéralement "autour" du pieu, un système de réaction ou contre-poids servant d'ancrage au système de chargement (généralement un vérin). Le système de réaction doit cependant pouvoir soutenir, sans incertitude ni danger pour les opérateurs, la même force que celle appliquée sur le pieu objet du test et il est donc généralement surdimensionné.

La mise en œuvre de ce type d'essai est souvent lourde et nécessite des structures *ad hoc* habituellement en acier pour le système de contraste et devant être retirées à la fin de l'essai. Si l'organisation d'un test de charge est déjà lourde, il est facile d'imaginer qu'elle l'est encore davantage lorsque le pieu test se trouve dans l'eau, en zone portuaire ou en pleine mer, comme dans le cas des fondations des tours supportant les éoliennes. Dans ce cas, le système de contraste est lui-même une structure offshore. Pour cette raison, les essais de charge axiale en mer sont rares et coûteux. Heureusement, la technologie permet d'effectuer des tests de charge axiale en utilisant une méthode techniquement plus complexe mais beaucoup moins lourde : le test "dynamique", qui bénéficie notamment des innovations apportées par le recours à la fibre optique.

Les pieux en mer sont enfoncés dans le sol par battage à l'aide d'un marteau positionné en tête de pieu (figure 4). L'impact de la masse frappante génère une onde de compression qui se propage dans le pieu et qui, surmontant la résistance axiale le long du fût, permet le fonçage, coup après coup. Pendant la propagation, l'onde incidente rencontre la résistance locale du sol le long du pieu, ce qui génère des ondes réfléchies vers la tête.

Ce phénomène se répète à chaque coup, lors des centaines ou des milliers de coups nécessaires pour enfoncer le pieu à la profondeur souhaitée. La mesure des ondes réfléchies et leur comparaison par rapport aux ondes incidentes constitue ce que l'on appelle un "test de charge dynamique".

En mettant en place une instrumentation appropriée (accéléromètres et jauges de contrainte) en tête de pieu, il est possible d'enregistrer l'onde de choc induite dans le pieu par l'impact de la masse frappante, mais surtout le train d'ondes réfléchies, vers la tête du pieu. La procédure numérique dite "d'inversion" permet de reconstruire la répartition des forces le long du pieu, dans

le but de calculer la meilleure reproduction du signal enregistré.

Cependant, cette opération comporte une limitation fondamentale, liée, d'une part, au fait que la représentation mathématique du comportement du sol est imparfaite et, d'autre part, au fait que le nombre d'éléments à calculer dans la procédure d'inversion est supérieur au nombre de données disponibles.

Pour résoudre ce problème et fournir des données supplémentaires, des recherches sont en cours pour améliorer le calcul de la répartition des forces en utilisant des capteurs positionnés le long du fût du pieu (figure 5). En la matière, les instruments à base de fibre optique présentent d'intéressantes perspectives de développement.

La résistance au battage et la résilience de la fibre pour les pieux battus (en lien

6- Exemple de câble avec jauges fibre.

7- Fibre optique avec réseaux de Bragg (FBG).

8- Jauge de déformation FBG collée sur un support.

6- Example of cable with fibre gauges.

7- Optical fibre with Bragg gratings (FBGs).

8- FBG strain gauge bonded onto a mounting.

avec l'essor récent de la filière industrielle applicative) permettent en outre d'envisager de recourir aux mêmes capteurs pour le suivi et le contrôle du comportement des pieux pendant leur vie utile.

Jamais encore mise en œuvre pour des installations en mer, cette possibilité deviendra, selon G-Octopus, de plus en plus viable et fiable.

La technique a déjà été expérimentée pour des tests cycliques après battage, mais seulement pour des installations expérimentales à terre.

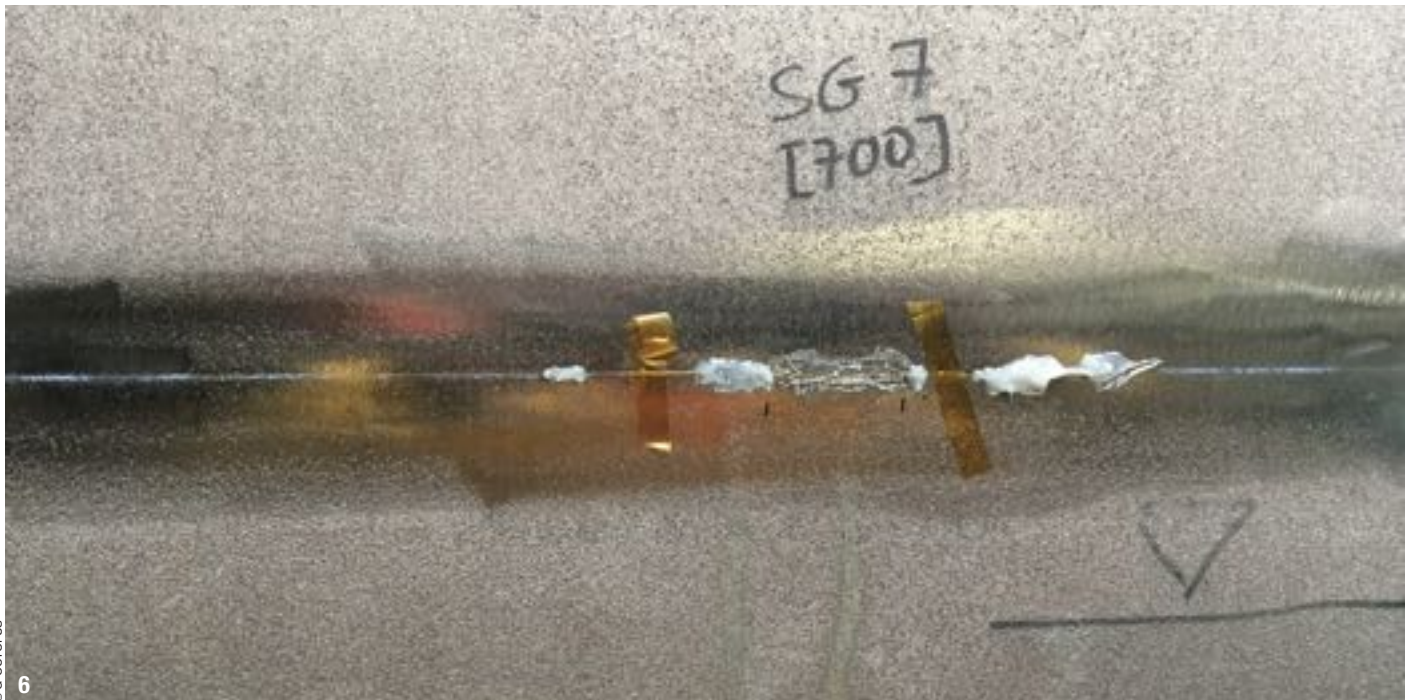
La fibre optique a permis des progrès substantiels lors de la phase de test dynamique pendant le battage de pieux. En effet, la taille très modeste des capteurs en fibre optique (réalisés selon la technologie de Bragg (voir encadré et figures 6, 7 et 8) permet d'installer toute une série de capteurs

de déformation d'une longueur totale d'une dizaine de millimètres chacun, avec un espacement très réduit.

Les capteurs sont placés le long du même câble, qui présente un diamètre très réduit, gaines de protection comprises (figure 5).

L'utilisation de la fibre a également permis de réduire les protections et précautions nécessaires à l'isolation dans l'eau, puisqu'aucune alimentation électrique n'est requise, ni pour les capteurs ni pour les moyens de connexion. Seule une protection mécanique est nécessaire.

G-Octopus figure aujourd'hui parmi les sociétés les plus avancées en Europe dans ce secteur et en particulier dans celui des tests dynamiques ; un important investissement intellectuel et matériel est en cours pour les applications en fibre optique. ▶



© G-OCTOPUS
6



7
© SYLEX



8
© SYLEX

L'enjeu consiste à progresser dans le développement de la technique d'inversion, qui prend en compte la *benchmark* des données mesurées par la fibre.

À cette fin, des compétences en calcul numérique, en dynamique des structures et en géotechnique sont nécessaires.

Jusqu'à aujourd'hui, l'installation d'outils de mesure traditionnels le long des fûts des pieux a été largement contrariée par plusieurs facteurs, et notamment par :

- Le coût des instruments, qui limite leur nombre et par conséquent l'espacement le long du fût du pieu ;
- Les dimensions, par exemple des instruments à cordes vibrantes, qui nécessitent l'installation de tuyaux ou de guides le long du fût ;
- La fragilité aux chocs et la faible durabilité des instruments, qui engendrent des taux de survie très faibles en cas d'installation avant le battage et compliquent, voire renchérissent, notablement la pose de capteurs de suivi après installation ;
- La faible résistance à la corrosion, en particulier sous terre ou en mer, où les pertes de signal électrique sont rédhitoires pour les mesures traditionnelles ;



→ Les performances des instruments, en termes de fréquence d'acquisition de données dynamiques lors du battage et pour la surveillance des vibrations ou de la réponse aux charges cycliques pendant la durée de vie utile des fondations.

Aujourd'hui, les outils en fibre optique, et en particulier les jauges de déformation, ont permis de résoudre presque toutes ces difficultés :

- Le coût non négligeable devrait baisser rapidement avec le développement industriel de la filière, qui est encore très jeune ;
- Les dimensions très réduites (quelques millimètres) des capteurs de déformation en fibre optique (figure 6) et des câbles de connexion permettent d'installer le système de mesure sans travaux

9- Jauge de déformation fibre.

10- Grille de Bragg.

9- Fibre strain gauge.

10- Fibre Bragg Grating.

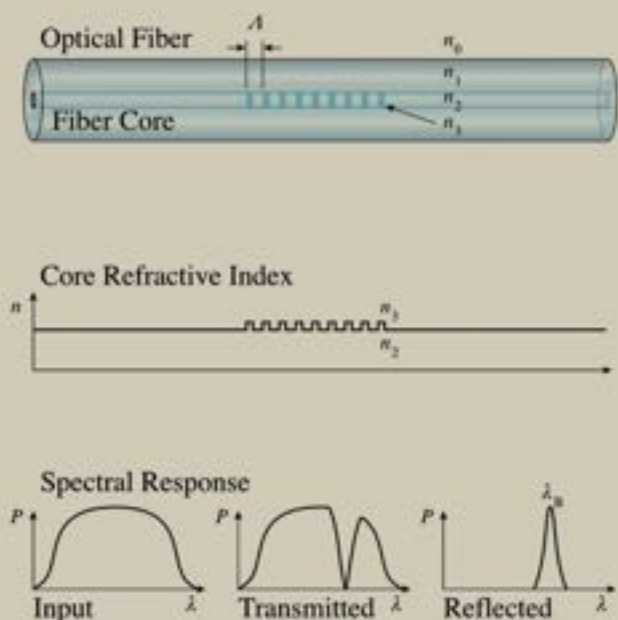
LA FIBRE OPTIQUE EN BREF*

En synthèse, les principales propriétés des instruments en fibre optique sont les suivantes :

- La fibre " guide la lumière " grâce à l'angle de réfraction entre la matière dont elle est constituée et celle qui l'entoure ; la lumière introduite à une extrémité ne peut s'échapper en raison du phénomène de réflexion totale qui permet la transmission à distance avec une dispersion négligeable.
- Dimensions de la jauge : élément FBG, 5 à 12 mm ; longueur de collage active : 30 mm (figure 9).
- Grille réseau de Bragg (FBG= Fiber Bragg Grating).
Le principe consiste à graver, au cœur de la fibre optique et pour une longueur courte (la longueur d'un FBG standard varie de 1 à 10 mm) une modulation périodique de son indice de réfraction. Celle-ci se comportera comme un ensemble de miroirs de réflexion partielle faibles, qui, par un phénomène accumulatif appelé " diffraction ", réfléchiront la longueur d'onde optique exactement proportionnelle à leur espacement (figure 10).
- Mesure de déformation avec FBG.
Lorsqu'une lumière à large bande traverse la fibre, le réseau favorise la réflexion d'une bande de longueurs d'onde très étroite. Si le réseau est soumis à une contrainte axiale uniforme ou si un incrément thermique uniforme est appliqué, la longueur d'onde centrale du spectre réfléchi par le réseau se décale en raison de modifications du pas et de l'indice de réfraction.

(*) Source : " Fiber Optics Strain Sensors " de Alfredo Güemes, Dpt. Aeronautics, Univ. Politécnica de Madrid - STO-EN-AVT-220.

GRILLE DE BRAGG





© G-OCTOPUS
11

accessoires invasifs (voir encadré et figure 5) ;

→ La résistance aux chocs de la fibre optique et sa durabilité sont élevées, du fait :

- de la très petite taille des capteurs (figure 9),
- de la résistance mécanique du matériau utilisé,
- de la résistance à la corrosion et du risque limité de dispersion même en cas d'avarie partielle de la protection,
- de l'absence de courant électrique.

→ Dernier avantage, et non des moindres : les performances des capteurs en fibre optique sont

11- Unité d'acquisition et connexions.

11- Acquisition and connection unit.

exceptionnelles. En les couplant à des unités de contrôle et des connexions appropriées (figure 11), il est possible de collecter des données numériques selon une fréquence d'acquisition de 8 kHz et plus. Cette propriété est d'une importance fondamentale tant pour l'obtention de données pré-

cises lors du passage de l'onde de choc pendant le battage que pour la surveillance des vibrations des pieux pendant l'exercice utile de la fondation.

Le seul inconvénient à inscrire au passif des capteurs en fibre optique concerne la dépendance partielle de la réponse en température, qui peut toutefois être résolue par l'installation en parallèle de capteurs de température (également par le biais de fibres optiques).

À l'avenir, le développement de l'installation de capteurs en fibre optique le long du fût des pieux permettra de contrôler leur comportement dans le temps mais aussi, d'une part, de vérifier le respect des hypothèses du projet

et, d'autre part, d'identifier d'éventuels changements dans le temps de l'interaction avec le sol ("interaction sol-structure"), en tant que symptôme de l'endommagement tant du sol autour du pieux que du pieux lui-même (par exemple à la fatigue).

Ce thème revêt une importance particulière si l'on considère que la surveillance de la dégradation du comportement des structures est un sujet majeur de sécurité et l'un des axes les plus actifs du développement de la gestion des installations. En témoignent les importants investissements privés et institutionnels en faveur de l'innovation dans ce domaine, lancés au niveau national comme au niveau européen. □

ABSTRACT

DYNAMIC PILE INSTRUMENTATION BY OPTICAL FIBRE, A SPECIALTY DEVELOPED IN FRANCE

EMILIO NICOLINI, G-OCTOPUS

Structure monitoring is considered a way of improving structure reliability and service life. *The recent development of a technology based on optical fibre makes it possible to reduce the size of sensors and the impact of monitoring systems. The sensors are integrated into the fibre, which is used as a data carrier and is of very small diameter. This technology is now spreading to the instrumentation of offshore piles to improve the interpretation of their behaviour during pile driving. The instruments' very high survival rate and their resistance to external agents make this a promising technology for long-term monitoring of piles under cyclic loading.* □

LA INSTRUMENTACIÓN DINÁMICA DE LOS PILOTES POR FIBRA ÓPTICA, UNA ESPECIALIDAD DESARROLLADA EN FRANCIA

EMILIO NICOLINI, G-OCTOPUS

El seguimiento de las obras se considera un medio para mejorar su fiabilidad y su vida útil. *El reciente desarrollo de la tecnología basada en la fibra óptica permite reducir el tamaño de los sensores y el impacto de los sistemas de seguimiento. Los sensores se integran en la fibra, de diámetro muy reducido, que actúa como transmisor de datos. Esta tecnología se extiende ahora a la instrumentación de los pilotes offshore para mejorar la interpretación de su comportamiento durante la hincada. Esta tecnología presenta una tasa de supervivencia muy elevada de los instrumentos y es resistente a los agentes externos, lo que la hace muy prometedora para el seguimiento a largo plazo de los pilotes sujetos a cargas cíclicas.* □



© GTM/BOURDARIOS

SOULÈVEMENT DE FOND DE FOUILLE DANS LA MOLASSE - CAS DU NOUVEAU PARKING JEAN-JAURÈS À TOULOUSE

AUTEUR : OLIVIER GIVET, DIRECTEUR TECHNIQUE, ARCADIS

LA RÉALISATION DU NOUVEAU PARKING ENTERRÉ SOUS LES ALLÉES JEAN-JAURÈS À TOULOUSE A NÉCESSITÉ L'ENLÈVEMENT D'UN IMPORTANT VOLUME DE TERRES AU-DESSUS DU TUNNEL DE LA LIGNE A DU MÉTRO. L'ARTICLE DÉCRIT LES RECONNAISSANCES ET ÉTUDES GÉOTECHNIQUES CONDUITES POUR ÉVALUER L'IMPACT DE CE DÉCHARGEMENT SUR LE COMPORTEMENT DU TUNNEL, LES MOYENS MIS EN PLACE POUR AUSCULTER LE TUNNEL PENDANT LES TRAVAUX ET COMPARE LES MESURES AUX PRÉVISIONS.

DESCRIPTION DU PROJET

Le parking souterrain est situé dans la partie haute des allées Jean-Jaurès, côté Canal du Midi. Il comprend 400 places réparties sur 2 niveaux dans un espace de 175 m de longueur, 30 m de largeur et 8 m de profondeur environ (figure 2). Le soutènement des

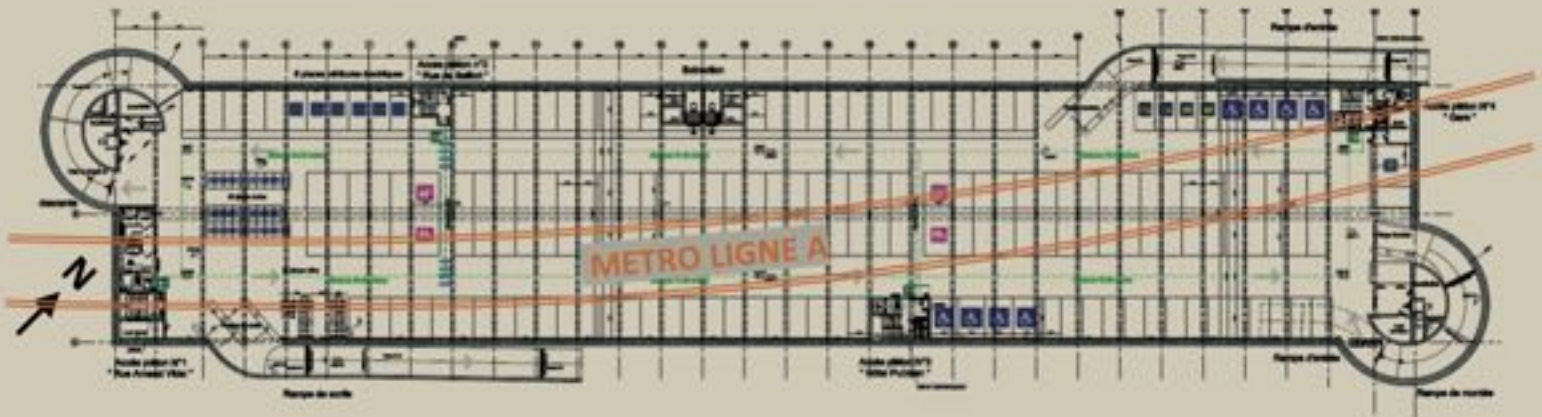
terres et l'étanchéité sont assurés par des parois de pieux sécants fichées de 3,50 m dans la molasse et butonnées par la dalle de couverture, le plancher intermédiaire et le dallage. Dalle de couverture et plancher intermédiaire reposent sur une ligne d'appuis à l'axe du parking. Le tracé du tunnel du

1- Fin du génie civil de la partie Nord-Ouest.

1- End of civil works on the North-West part.

métro sous le parking, à une profondeur variant de 6 à 8 m sous le niveau du fond de fouille, suit une diagonale courbe. Afin de limiter l'impact des appuis centraux du parking sur le tunnel, le choix a été fait de fonder une partie de ces appuis sur une structure de pontage constituée par une dalle

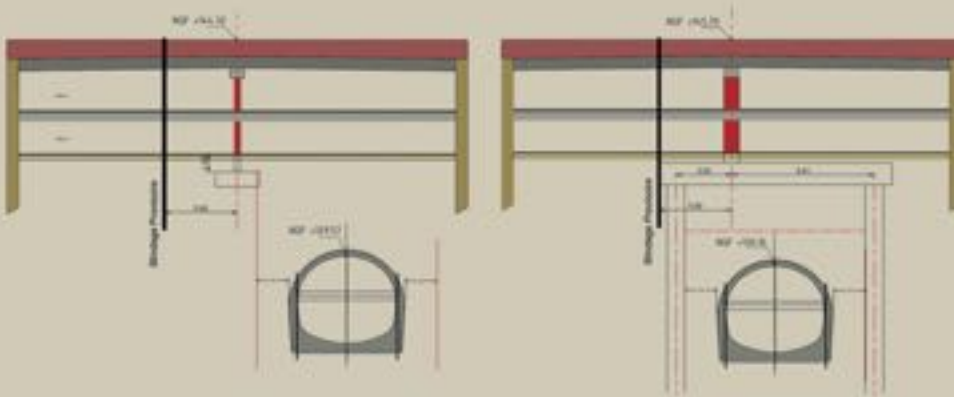
VUE EN PLAN DU NOUVEAU PARKING JEAN-JAURÈS ET DU TUNNEL DU MÉTRO LIGNE A



2

© GTM/BOURDARIOS & ARCADIS

COUPES TRANSVERSALES - APPUIS CENTRAUX SUR SEMELLES CÔTÉ SO DU PARKING ET SUR PONTAGE CÔTÉ NE



2- Vue en plan du nouveau parking Jean-Jaurès et du tunnel du métro ligne A.

3- Coupes transversales - Appuis centraux sur semelles côté SO du parking et sur pontage côté NE.

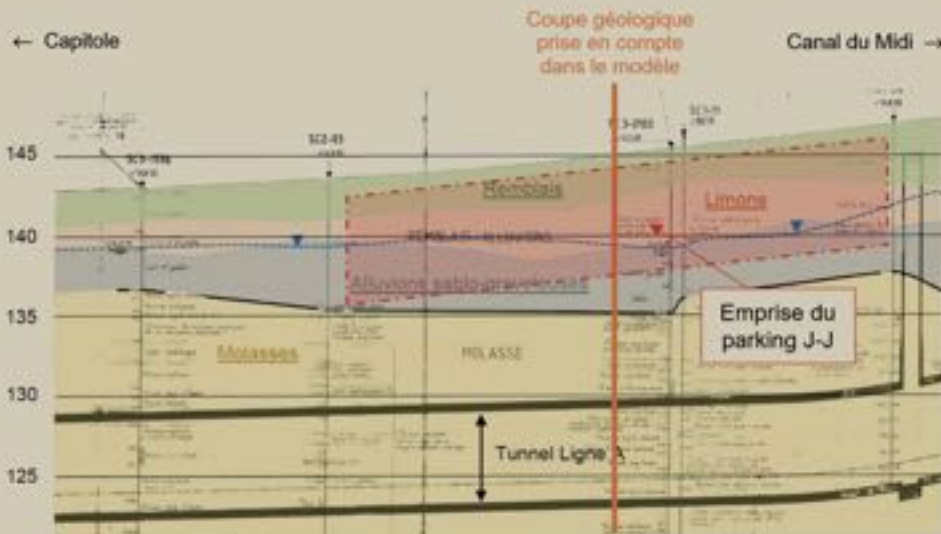
4- Profil géologique.

2- Plan view of the new Jean-Jaurès car park and the tunnel of metro line A.

3- Cross sections - Central supports on foundation slabs on the SW side of the car park and on bridging on the NE side.

4- Geological profile.

PROFIL GÉOLOGIQUE



reposant sur des pieux ancrés sous le tunnel (figure 3).

Le sous-sol est constitué (figure 4) :

- De remblais sur 0,5 à 4,8 m d'épaisseur ;
- Des alluvions fines de la Garonne, limons et argiles plus ou moins sableux, présentes sur une épaisseur de 4 à 8 m ;
- Des alluvions grossières de la Garonne, graves grossières sableuses, très denses, propres et perméables, régnant sur 2 à 4 m d'épaisseur ; elles abritent la nappe retenue par le substratum molassique ;

3

4

© GTM/BOURDARIOS

© TISSEO & ARCADIS

→ Le substratum molassique, essentiellement représenté par son faciès fin composé de limons, sables fins limoneux et d'argiles ; le faciès grossier composé de sables moyens à grossiers faiblement limoneux et le faciès rocheux sont présents très localement en passages peu épais.

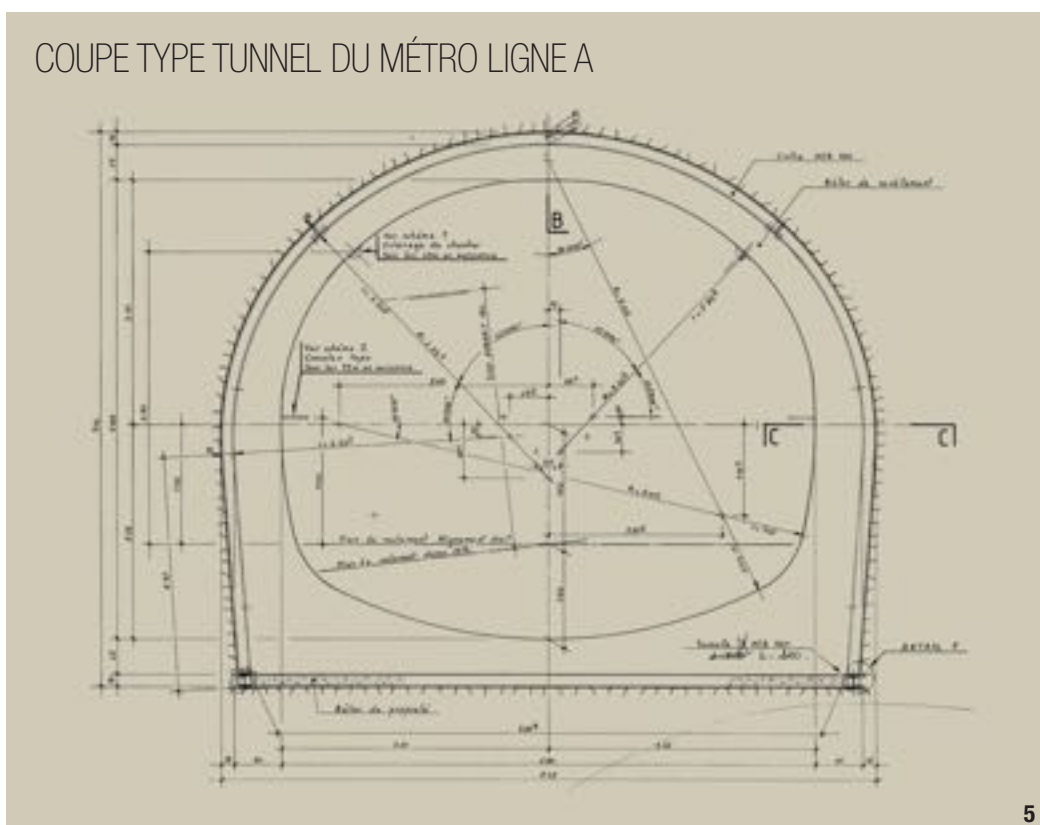
LE TUNNEL DE LA LIGNE A

Le tunnel, au droit du projet, a été réalisé en méthode conventionnelle dans les années 1990-1991. Il s'inscrit entièrement dans la molasse. Sa largeur est de 6,80 m et sa hauteur est de 5,80 m, mesurées à l'intrados (figure 5).

La voûte se situe à environ 16 m de profondeur sous la surface. Le soutènement provisoire est constitué de cintres HEB160 et de béton projeté armé de treillis soudé.

Le revêtement en béton non armé (radier excepté) est d'épaisseur variable, 0,45 m en voûte et en radier et 0,60 m en piédroits. Le tunnel ne comprend pas de système d'étanchéité. Le revêtement est en bon état, bien qu'affecté de fissures espacées de longueurs variables en voûte et en piédroits (retrait et/ou rétraction gênés du béton après coulage en l'absence de dispositif d'étanchéité-drainage ?). Ces fissures sont remplies par des dépôts de calcite révélant des infiltrations d'eau.

Ces infiltrations sont de niveau 1 (classification AFTES), caractérisées par une humidité sans écoulement. Le radier est en très bon état (aucune fissure n'y est repérée).



PHASAGE DE CONSTRUCTION

Le maintien de la circulation sur les allées Jean-Jaurès impliquait la réalisation du parking en deux parties Sud-Est puis Nord-Ouest, séparées par un soutènement provisoire de type paroi berlinoise butonnée.

Des micropieux seront réalisés dans la zone où le phasage alterné ne permet pas de créer le pontage lors de

5- Coupe type tunnel du métro ligne A.

5- Typical section of the tunnel of metro line A.

la réalisation de la première partie du parking.

Les principales phases de travaux étaient les suivantes :

- Déviation des réseaux de la zone des travaux ;
- Réalisation de la paroi berlinoise médiane en pieux BA Ø600/e800 et d'une berlinoise périphérique de tête en pieux BA Ø500/e700 (pieux à tarière creuse) ;





© ARCADIS
6

- Terrassement jusqu'à -3m/TN ;
- Réalisation de la paroi de soutènement périphérique étanche (pieux sécants Ø600/e500 et Ø700/e600) et des pieux Ø1200 du pontage ;
- Remblaiement jusqu'au TN ;
- Basculement de la circulation sur le côté Nord-Ouest ;
- Excavation de la partie Sud-Est avec butonnage provisoire contre la berlinoise centrale ;

6- Réalisation des pieux des parois berlinoises.

7- Fin d'excavation de la partie Sud-Est.

6- Execution of piles of Berlin-type retaining walls.

7- End of excavation of the South-East part.

- Réalisation du radier drainant, des semelles superficielles et de la dalle de pontage avec micropieux si besoin, des poteaux centraux, des poutres/dalle intermédiaires et des poutres/dalle de couverture avec dépose des butons ;
- Mise en place du remblai sur la dalle de couverture côté Sud-Est ;
- Basculement de la circulation sur le côté Sud-Est ;

- Excavation partie Nord-Est avec butonnage provisoire contre la structure Sud-Est ;
 - Réalisation du radier drainant, des poutres/dalle intermédiaires et des poutres/dalle de couverture avec dépose des butons ;
 - Mise en place du remblai sur la dalle de couverture côté Nord ;
 - Rétablissement de la circulation.
- On se reportera aux figures 1, 6, 7 et 8.

ÉTUDES GÉOTECHNIQUES

La localisation du parking immédiatement au-dessus de la ligne A du métro implique que des vérifications particulières soient conduites afin de s'assurer que le comportement du tunnel reste dans des limites étroites (i.e. millimétriques) prescrites par le gestionnaire Tisseo pendant toutes les phases de construction.

Ces limites portent sur le déplacement d'ensemble, la variation diamétrale, la distorsion et la variation des contraintes dans le revêtement.

La campagne de reconnaissances géotechnique s'est attachée à repérer précisément la stratigraphie des couches et l'identification des faciès au moyen d'une dizaine de sondages carottés soigneusement décrits et d'essais d'identification en laboratoire.

Afin de fiabiliser les modules de déformation du terrain à prendre en compte dans les études, une sélection sévère des essais pressiométriques a été opérée. ▷



7
© GTM/BOURDARIOS

Les modules mesurés par le dilatomètre (qui sont de vrais modules in-situ comme ceux mesurés par le pressiomètre autoforeur, instrument malheureusement tombé en désuétude) ont grandement aidé à sélectionner des modules ayant permis des prévisions très satisfaisantes (voir tableau 1).

La prévision du comportement du tunnel s'est appuyée sur un modèle aux éléments finis 3D de l'ensemble de la fouille et du tunnel (logiciel Plaxis). Précisons les principales caractéristiques de ce modèle (figure 9) : les limites latérales verticales se situent à 50 m au-delà des parois du parking et la limite inférieure horizontale à 2 diamètres de tunnel sous le radier de celui-ci soit 15 m ; les couches géologiques et le tunnel sont horizontaux, représentant la configuration pour laquelle le recouvrement molassique au-dessus du tunnel est minimal ; les parois de soutènement du parking sont modélisées par imposition des déplacements normaux nuls ; la structure de pontage (pieux et traverses) est modélisée par les éléments de poutres et les sols, le soutènement provisoire et le revêtement du tunnel par des éléments de volume.

La loi HSM de Plaxis a été choisie pour simuler le comportement des sols. Pour la molasse, suivant sans trop s'en écarter les résultats les essais pressiométriques et dilatométriques, nous avons retenu un module "de premier chargement" $E_{oed} = E_{50} = 125$ MPa et un module de "déchargement-rechargement" $E_{ur} = 375$ MPa. Le revêtement du tunnel a été modélisé par un matériau élastique sans résistance en traction.

TABLEAU 1 : MESURES PAR PRESSIOMÈTRE ET DILATOMÈTRE

MODULES PRESSIOMÉTRIQUES DES MOLASSES	
Nombre d'essais sélectionnés	25 essais jusqu'à 25 m sous le fond de fouille
Plage de variation du module E_M	$E_M = 35$ MPa à 265 MPa
Coefficient rhéologique	$\alpha = 2/3$ à $1/2$
Moyenne harmonique	$E_{M, \text{harm}} = 75$ MPa
Moyenne arithmétique	$E_{M, \text{arith}} = 100$ MPa
Module de chargement	$E = E_M / \alpha = 115$ à 200 MPa
Module de déchargement	$E_d = 3 \cdot E = 345$ à 600 MPa
MODULES DILATOMÉTRIQUES DES MOLASSES	
Nombre d'essais	3 essais à 12, 14 et 16 m de profondeur dans un sondage
Modules de 1 ^{er} chargement	$E = 160/185/75$ MPa
Moyenne harmonique / arithmétique	$E_{\text{harm}} = 120$ MPa / $E_{\text{arith}} = 140$ MPa
Modules déchargement-rechargement	$E_d = 325/365/180$ MPa
Moyenne harmonique / arithmétique	$E_{d, \text{harm}} = 265$ MPa / $E_{d, \text{arith}} = 290$ MPa

Le phasage de calcul est le suivant :

- 1- Initialisation des contraintes dans le terrain ($K_0 = 0,5$) ;
- 2- Excavation (taux de déconfinement $\lambda = 0,7$) puis soutènement du tunnel ($\lambda = 1$) ;
- 3- Réalisation du revêtement définitif du tunnel (on suppose un état initial de contraintes nulles dans le revêtement fissuré) ;
- 4- Activation des pieux du pontage ;
- 5- Excavation partie Sud-Est (soutènement de la fouille modélisé par blocage des déplacements normaux aux parois) ;

- 6- Excavation partie Nord-Ouest (avec blocage des déplacements normaux aux parois excavées) ;
- 7- Activation des semelles, du pontage et des charges sur appuis centraux (3,5 MN/appui).

- 8- Ferrailage de la dalle de pontage.
- 9- Modèle EF Plaxis 3D.

- 8- Reinforcement of the bridging slab.
- 9- Plaxis 3D FE model.

Les résultats de la modélisation (qui apparaissent plus loin dans le texte) ont montré que les déplacements et déformations du tunnel restaient millimétriques et sensiblement inférieurs aux seuils admis par le gestionnaire Tisseo. Les déformations du revêtement devaient se manifester par une ouverture (ou une fermeture) des fissures et par conséquent par la possibilité d'une augmentation des infiltrations d'eau dans le tunnel. Ces éléments permettaient d'envisager la construction du parking selon le phasage et les dispositions précédemment décrites et moyennant un suivi rigoureux du comportement du tunnel par auscultations et inspections visuelles, définitions de seuils de comportement et des actions associées à l'atteinte de ces seuils.

SUIVI DES DÉPLACEMENTS DU TUNNEL

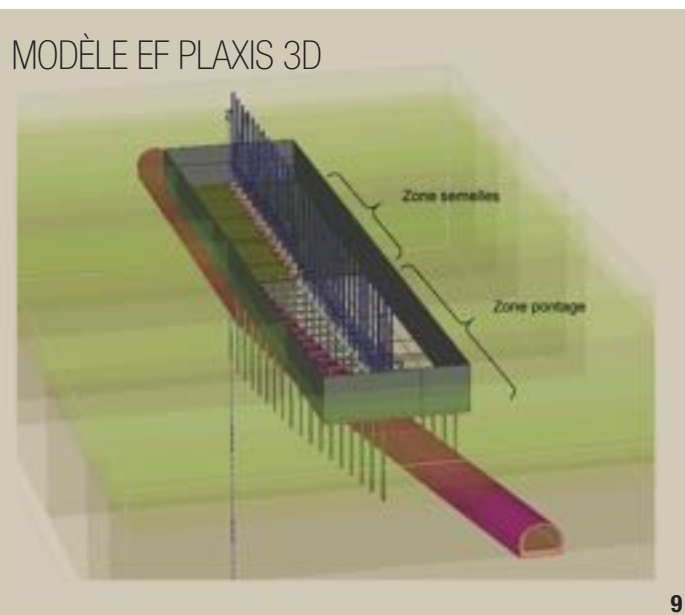
Le dispositif mis en place pour l'auscultation du tunnel pendant toute la durée des travaux comprenait 5 accéléromètres en voûte (qui n'ont pas enregistré de vibrations nocives) et 10 profils de mesures topographiques en tunnel comportant chacun 4 cibles (8 profils répartis sur la longueur du parking et 2 profils à 30 m des extrémités ; voir figure 10).

Pendant deux ans les cibles ont été relevées en X, Y et Z toutes les 30 min par deux stations automatiques, un recalage sur des cibles de référence disposées au-delà des profils extrêmes P1 et P10 étant réalisé avant chaque cycle de mesures. Chaque station mesurait 20 cibles distantes d'une dizaine de mètres à environ 80 m au maximum.



8

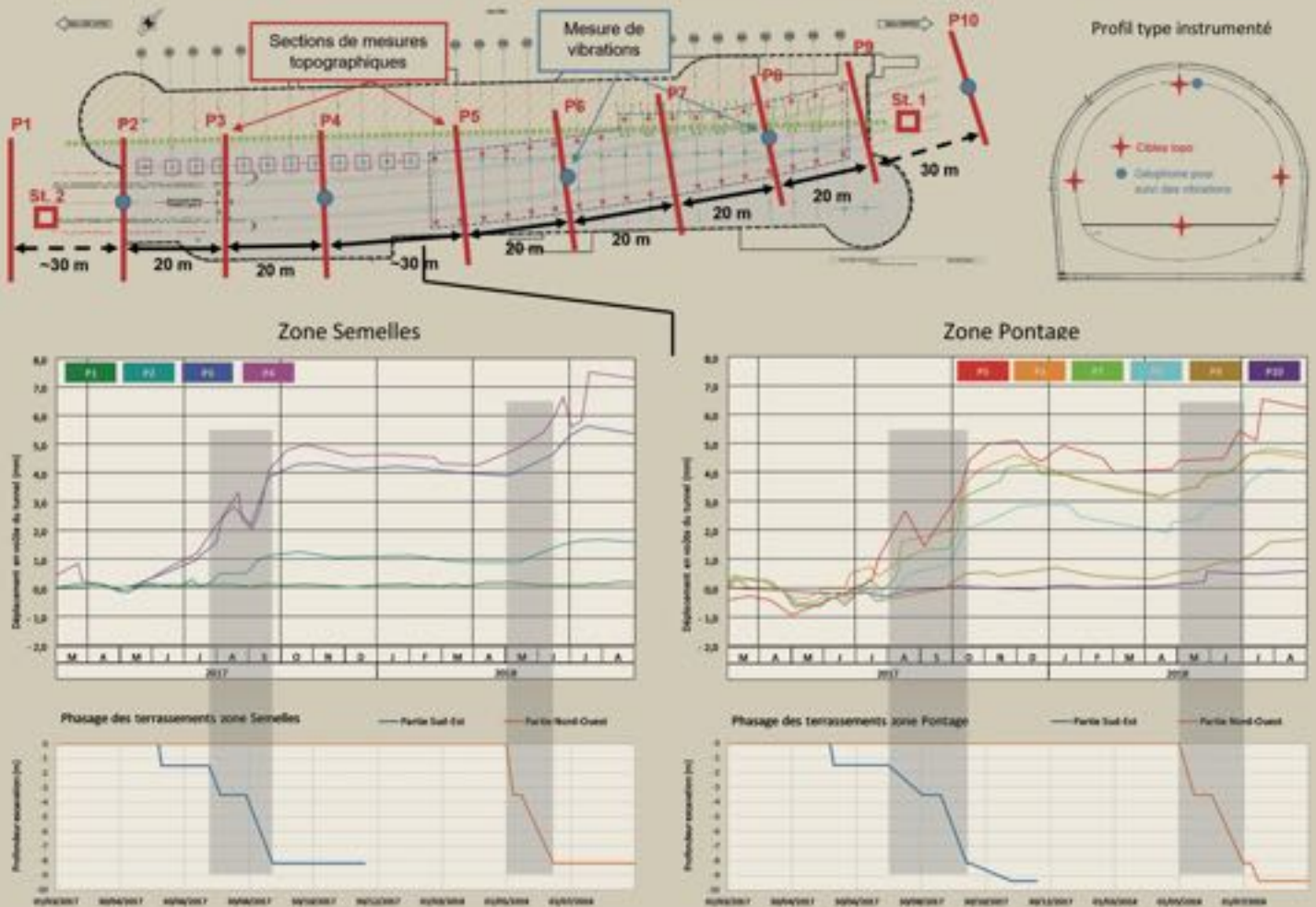
© GTM-BOURDARIOS



9

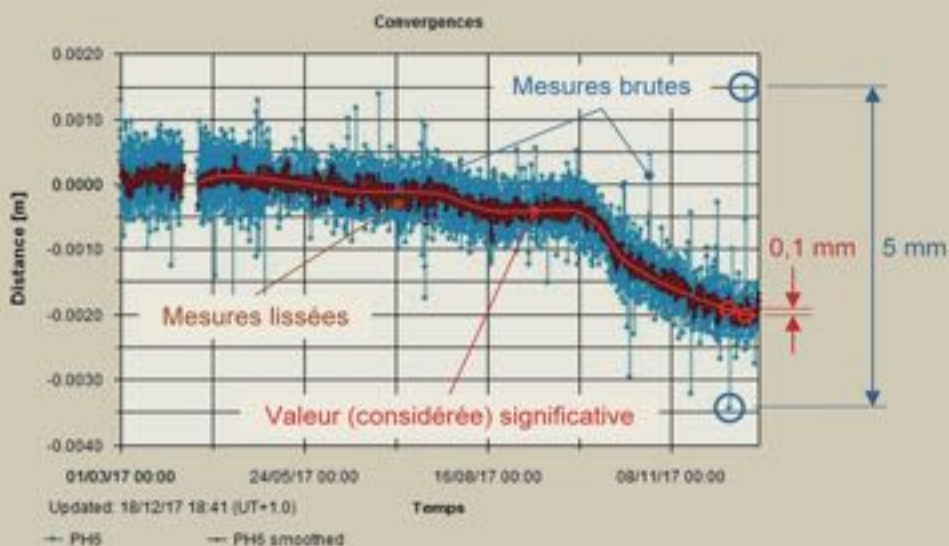
© ARCADIS

INSTRUMENTATION DU TUNNEL ET ÉVOLUTION DES SOULÈVEMENTS MESURÉS DE LA VOÛTE



10
© ARCADIS

MESURES OPTIQUES - VALEURS BRUTES ET VALEURS SIGNIFICATIVES



11
© BERTHEAU SAINT-CRIG & ARCADIS

10- Instrumentation du tunnel et évolution des soulèvements mesurés de la voûte.

11- Mesures optiques - Valeurs brutes et valeurs significatives.

10- Instrumentation of the tunnel and evolution of measured roof uplift.

11- Optical measurements - Raw values and significant values.

Une mesure optique est entachée d'un bruit de plusieurs ordres de grandeur supérieur à l'unité du dernier chiffre de valeur renvoyé par l'appareil (ici 1/100 mm).

À ce bruit aléatoire se superposent des phénomènes cycliques liés à l'ambiance dans le tunnel (périodes de 1 jour et de 1 semaine facilement mises en évidence par une analyse de Fourier) et des phénomènes parasites plus ponctuels parfois difficiles à identifier : poussières, luminaire trop proche d'une cible, coupure de l'alimentation électrique des stations de mesures, passage d'un train de travaux, etc. Il en résulte qu'une valeur isolée X, Y ou Z renvoyée par une station ne peut en aucune façon être déclarée représentative d'un mouvement de la cible. Seules les mesures considérées sur une longue durée - lissage par moyenne glissante sur plusieurs heures voire plusieurs jours - sont significatives (figure 11).

PRÉVISIONS ET OBSERVATIONS

SOULÈVEMENT D'ENSEMBLE

Les graphes de la figure 10 montrent l'évolution des déplacements verticaux en voûte selon les profils P1 à P10. On a placé en regard les graphes de phasage des terrassements. Les soulèvements hors zone de parking et en limite d'ouvrage (profils P1, P2, P9 et P10) sont faibles ou nuls. Les soulèvements dans l'emprise du parking (profils P3 à P8) sont bien corrélés avec les deux phases de déchargement Sud-Est puis Nord-Ouest.

La première phase de terrassement (2/3 en volume de terrain extrait) conduit au plus grand soulèvement : 4 à 5 mm contre 2 à 3 mm lors de la deuxième phase. Il semble que les déplacements se soient produits avec un léger effet différé lors de cette deuxième phase, la stabilisation étant rapide (un mois). Le rechargement des terrains accompagnant la réalisation du gros œuvre du parking (entre les deux phases de terrassement) est perceptible : léger tassement de 0,5 mm à 1,5 mm. L'amplitude des déplacements en radier est deux fois plus faible mais leur évolution présente la même allure. Dans l'ensemble ces observations s'accordent de façon très satisfaisante aux prévisions du modèle 3D (figure 12). Les écarts relevés sur les profils P4 et P5 (1 à 2 mm) sont liés à la deuxième phase de terrassement qui n'aurait pas dû impacter le tunnel ; il n'a pas été trouvé d'explication à ce comportement singulier.

CONVERGENCES

Les figures 13 et 14 représentent les convergences diamétrales prévues et

mesurées (les valeurs négatives traduisent un écartement des points). On observe que les convergences n'ont pas évolué après la première phase de terrassement (à l'exception des convergences verticales P4 et P5). Comme attendu, les convergences verticales et horizontales sont dans le rapport inverse des ouvertures correspondantes du tunnel.

12- Soulèvements de la voûte et du radier du tunnel.

13- Convergences diamétrales.

12- Uplift of the tunnel roof and invert.

13- Diametral convergences.

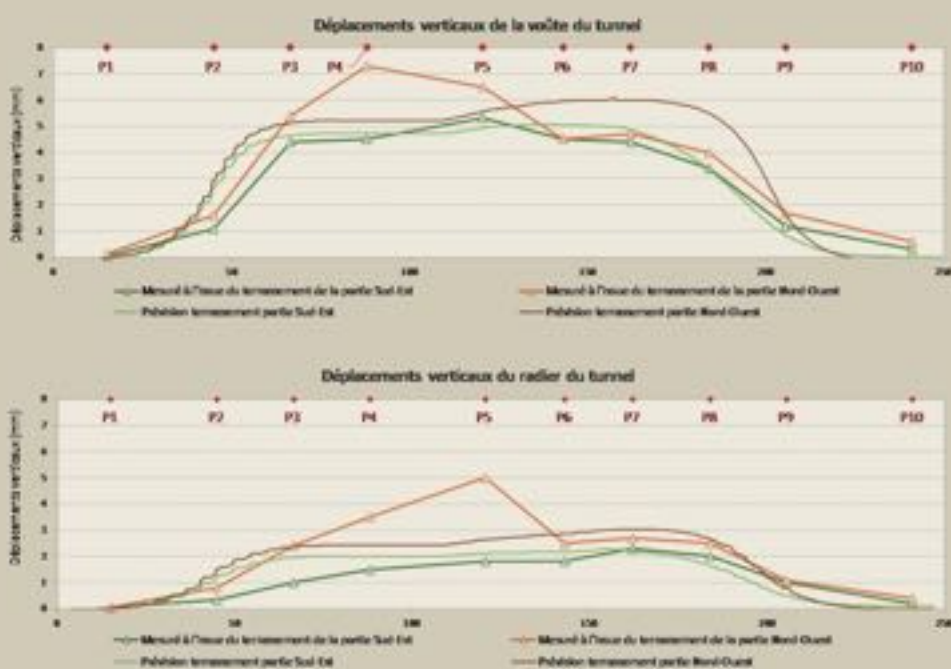
AUTRES OBSERVATIONS

Il était prévisible que des venues d'eau se manifestent sur certaines fissures du revêtement. Celles-ci sont apparues en piédroits (niveau 2 selon classification AFTES).

CONCLUSIONS

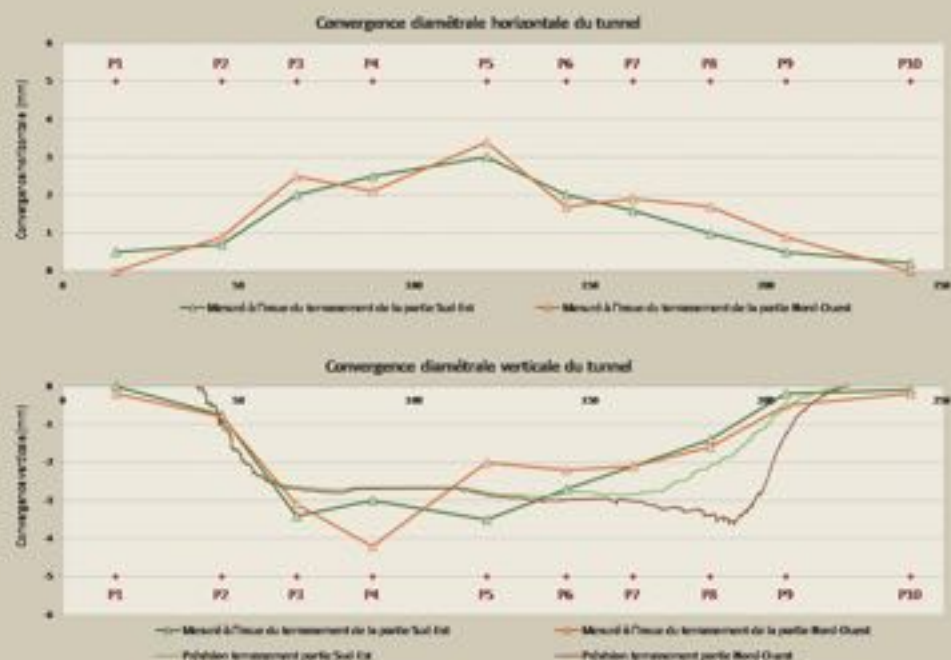
La construction du nouveau parking Jean-Jaurès selon un phasage des

SOULÈVEMENTS DE LA VOÛTE ET DU RADIER DU TUNNEL



12 © ARCADIS

CONVERGENCES DIAMÉTRALES



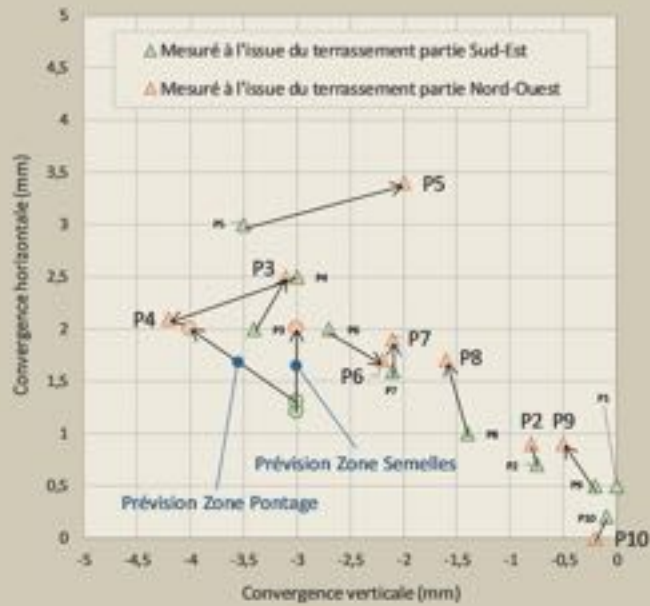
13 © ARCADIS

CONVERGENCES DIAMÉTRALES

Déplacement d'ensemble du tunnel



Déformations diamétrales



© ARCADIS

14

travaux optimisé au-dessus du tunnel du métro s'est déroulée conformément aux prévisions de comportement de ce tunnel.

Les caractéristiques de déformabilité de la Molasse et leurs variabilités à l'échelle d'un ouvrage ont pu être

14- Convergences diamétrales.

14- Diametral convergences.

précisées et pourront être utiles pour l'élaboration de futurs projets (on pourra également se reporter à l'article portant sur les travaux d'extension des stations de la ligne A du métro toulousain du n°947 de cette revue). Le bruit et autres artéfacts attachés

aux mesures optiques réalisées à une certaine distance (ici jusqu'à 80 m) nécessitent un grand nombre de mesures pour dégager une tendance et une valeur de déplacement significative. Le suivi "en continu" est alors indispensable. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- PIEUX BERLINOIS Ø 500 ET 600 mm : 8 100 m**
- PIEUX SÉCANTS Ø 600 ET 700 mm : 5 100 m**
- PIEUX DU PONTAGE Ø 1 200 mm : 700 m**
- POUTRES PRAD (DALLE DE COUVERTURE) : 3 400 t**
- DALLE ALVÉOLÉE (NIVEAU - 1) : 1 600 t**
- BÉTON (HORS PIEUX, POUTRES ET DALLE) : 7 500 m³**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE : Indigo**
- MAÎTRE D'ŒUVRE : Groupement Gtm/Bourdarios/Taillandier/Scalene/Befs**
- ENTREPRISE LOT 1 GROS ŒUVRE : Gtm/Bourdarios**
- ÉTUDES DE PROJET ET D'EXÉCUTION : Ingerop**
- ÉTUDES D'OPTIMISATION DE LA CONCEPTION, ÉTUDES GÉOTECHNIQUES, CONTRÔLE EXTERNE DES ÉTUDES PRO ET EXE : Arcadis**

ABSTRACT

UPLIFT OF BOTTOM OF EXCAVATION IN MOLASSE - CASE OF THE NEW JEAN-JAURES CAR PARK IN TOULOUSE

OLIVIER GIVET, ARCADIS

This car park is located above the tunnel of metro line A, with central supports having foundations on portal structures straddling the tunnel. The excavation, 175 m x 30 m in area and 8 m in depth, was carried out sheltered by a wall of secant piles, with the tunnel being located between 6 and 8 m under the bottom of excavation. The performance of excavation work in two phases required the execution of a temporary central Berlin-type retaining wall and micropiles pending the execution of certain portal structures. The prediction of tunnel behaviour was based on a 3D finite element model. The predictable millimetric deformations were slightly lower than the acceptable thresholds, with a risk of widening of existing cracks and increased ingress of water. The roof of the tunnel was uplifted by 4 to 5 mm, then sustained subsidence of 0.5 to 1 mm during construction of the car park, which were close to the predicted values. Some additional ingress of water appeared in side walls. □

ELEVACIÓN DEL FONDO DE EXCAVACIÓN EN LA MOLASSE - CASO DEL NUEVO PARKING JEAN-JAURÈS EN TOULOUSE

OLIVIER GIVET, ARCADIS

Este parking está implantado encima del túnel de la línea A del metro, con apoyos centrales sustentados sobre los pórticos bajo los que discurre el túnel. La excavación, de 175 x 30 m de superficie y 8 m de profundidad, se realizó protegida por una pantalla de pilotes secantes, y el túnel se encuentra entre 6 y 8 m por debajo del fondo de la excavación. La realización de la excavación en dos fases precisó la realización de una entibación berlinesa central provisional y de micropilotes, a la espera de la construcción de algunos pórticos. La previsión del comportamiento del túnel se basó en un modelo de elementos finitos en 3D. Las deformaciones previsibles milimétricas eran ligeramente inferiores a los umbrales admisibles, con un riesgo de apertura de las fisuras existentes y de aumento de las venidas de agua. La bóveda del túnel se elevó de 4 a 5 mm y seguidamente se rebajó de 0,5 a 1 mm por efecto de asiento tras la construcción del parking, valores cercanos a las previsiones. Aparecieron algunas venidas de agua adicionales en los muros laterales. □



→ © BOUYGUES TP

HONG KONG TMCLK - "Y-PANELS" POUR TRANCHÉE COUVERTE MULTICELLULAIRE

AUTEURS : HUGO WU, SENIOR SITE COORDINATOR, INTRAFOR - SEBASTIEN CHEN, DESIGN MANAGER, BOUYGUES TP - ANTOINE SCHWOB, TECHNICAL MANAGER, BOUYGUES TP

AU CŒUR D'UNE ÎLE ARTIFICIELLE FRAÎCHEMENT REMBLAYÉE À HONG KONG, L'EXCAVATION DE LA PLUS GRANDE TRANCHÉE COUVERTE MULTICELLULAIRE JAMAIS RÉALISÉE AU MONDE BAT SON PLEIN. SANS AUCUN BUTON MÉTALLIQUE ET À UNE PROFONDEUR ATTEIGNANT LES 45 MÈTRES, CETTE TRANCHÉE D'UN DEMI-KILOMÈTRE DE LONG REPOUSSE LES LIMITES DU CONCEPT DE SOUTÈNEMENT TEMPORAIRE MULTICELLULAIRE. AU CŒUR DE CE DÉFI, 30 PANNEAUX DE PAROI MOULÉE HORS-NORMES, EN FORME DE "Y", DÉCRITS DEPUIS LEUR CONCEPTION JUSQU'À LEUR RÉALISATION.

LE CONTEXTE

Le projet de Tuen Mun - Chek Lap Kok (TMCLK) démarre en juillet 2013 lorsque Dragages Hong Kong et Bouygues Travaux Publics remportent le plus grand contrat en conception-construction jamais attribué à Hong Kong. Ce projet de tunnel routier s'inscrit dans la continuité du nouveau pont Hong Kong - Zhuhai - Macao, dans le cadre de la liaison des territoires du Delta des Perles avec Shenzhen

1- Vue d'ensemble de la tranchée multicellulaire.

2- Y-Panel en construction.

1- Overall view of the multicellular cut-and-cover.

2- Y-Panel under construction.

au Nord, Macao et Zhuhai à l'Ouest, et Hong Kong en tant que plateforme centrale. Plus précisément le tunnel TMCLK relie la région de Tuen Mun au nord à l'île de l'aéroport de Hong Kong au sud avec près de 6 km de tunnel dont 4,2 km sous-marin (figure 3).

C'est dans la partie Sud du projet, au sein de la nouvelle île artificielle de HKBCF (Hong Kong Boundary Crossing Facilities), que la solution d'une tranchée couverte multicellulaire compo-

sée de 15 cellules a été retenue. Cette solution permet de faire face à une géologie particulièrement adverse due à une *reclamation* récente sur un fond marin non dragué.

LA CONCEPTION - LE BESOIN D'INNOVER

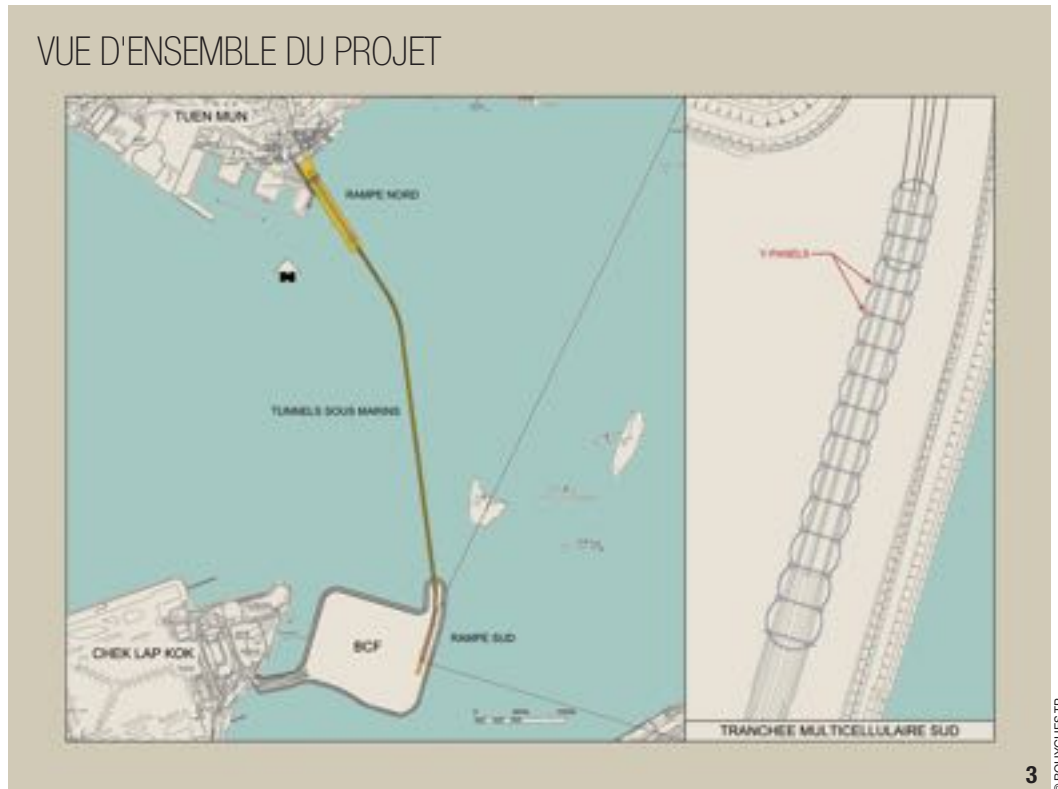
La phase d'étude de la solution soutènement multicellulaire commence en juin 2017, cette solution résout en théorie les problèmes de constructibilité, de coût et de planning associés à une tranchée couverte classique avec parois droites et butons métalliques. Le principe de base est d'utiliser l'effet d'arche pour résister aux pressions latérales de l'eau et du terrain (figure 4) et de limiter ainsi l'effet de la flexion verticale. Des segments arqués de parois ramènent les efforts au niveau de panneaux de connexion - les "Y-Panels" - qui retransmettent des efforts transverses via des butons en béton armé construits durant l'excavation et des parois moulées transverses sous le niveau d'excavation final (figure 5). Un des principaux défis est alors de trouver un concept de "Y-Panel" suffisamment résistant à la flexion verticale pour éviter d'avoir des butons en béton armé trop resserrés et, en particulier, d'éviter tout obstacle permanente. Cela implique alors une hauteur libre de plus de 16 m entre butons au-dessus du niveau final d'excavation (figure 6).



VUE D'ENSEMBLE DU PROJET

- 3- Vue d'ensemble du projet.
- 4- Principe de soutènement multicellulaire.
- 5- Modèle 3D - Principe des Y-Panels.

- 3- General view of the project.
- 4- Schematic of multicellular supporting structure.
- 5- 3D model - Schematic of Y-Panels.



3

© BOUYGUES TP

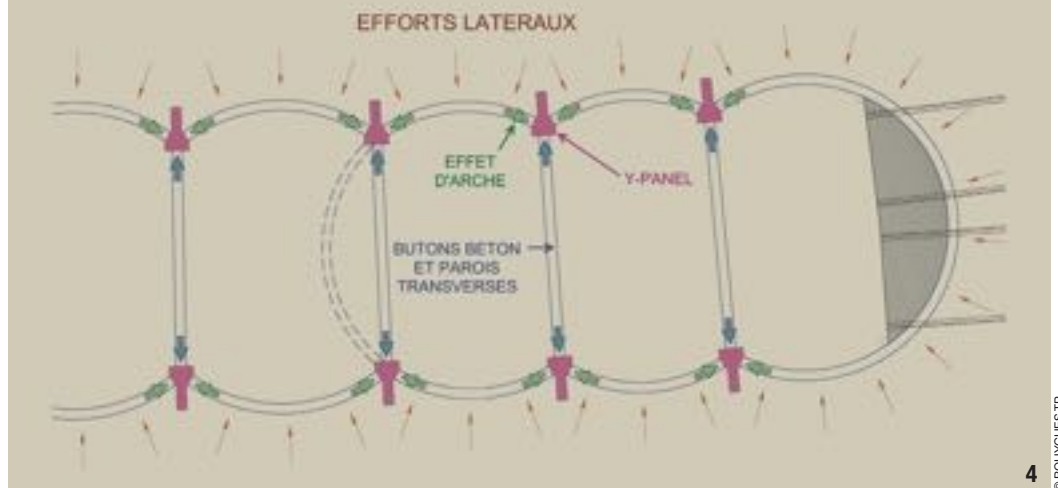
À cause de la taille, de la géométrie et de la géologie à laquelle cette tranchée couverte doit faire face, aucun concept existant de paroi moulée ne permettait de résister aux efforts concentrés dans les "Y-Panel". Par conséquent, il était impératif d'innover. Le développement des "Y-Panel" a alors été le fruit d'une coopération rapprochée entre les équipes techniques et travaux de la Joint-Venture Dragages-Bouygues TP (DBJV), la compagnie spécialisée en fondation VSL-Intrafor et le bureau d'études Atkins.

INVENTER UNE GÉOMÉTRIE DE PANNEAU DE PAROI MOULÉE

La géométrie d'un élément structurel en béton armé n'est généralement contrainte que par la faisabilité du coffrage. Cependant, dans le cas d'une paroi moulée, le principe de base est normalement d'utiliser un assemblage de petits panneaux rectangulaires courts indépendants pour limiter les problèmes de stabilité lors de l'excavation des panneaux. Dans le cadre du "Y-Panel" inventer une nouvelle géométrie devient alors bien plus compliqué. Les objectifs liés à la conception viennent se heurter directement aux contraintes particulières de la paroi moulée :

→ Pour la conception, il faut un ferrailage continu et une section structurelle la plus large possible. Mais les géométries usuelles de paroi rectangulaire ou même en "T" ne suffisent pas. Il a alors été nécessaire de trouver une géométrie constructible prenant en compte les contraintes de stabilité de tranchée, de tolérance, de verticalité, de phasage, ainsi que de connexion avec les structures adjacentes.

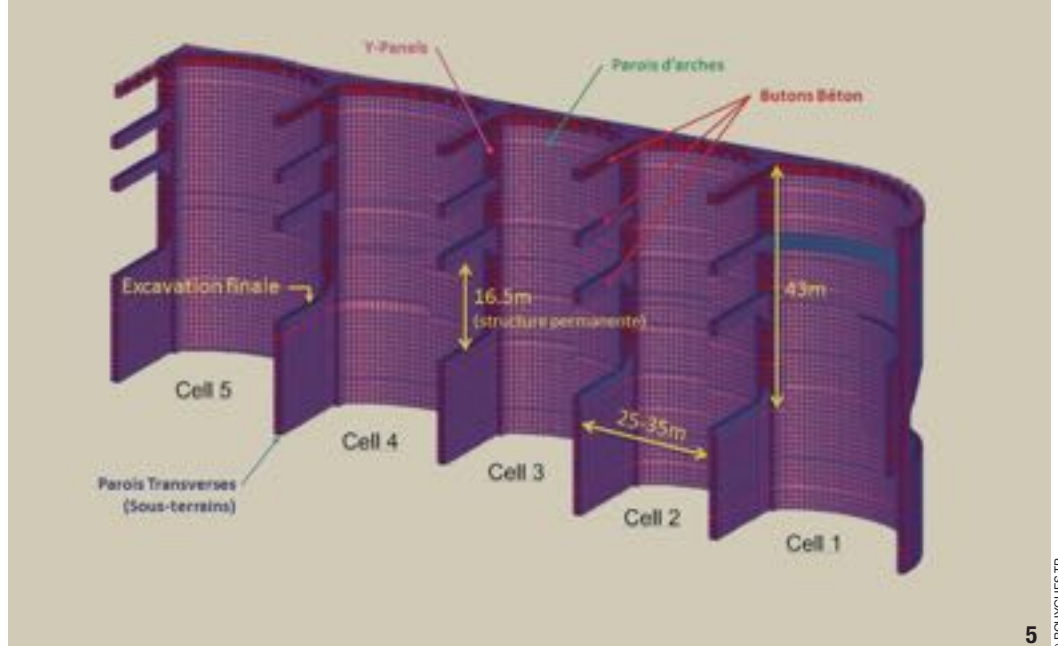
PRINCIPE DE SOUTÈNEMENT MULTICELLULAIRE



4

© BOUYGUES TP

MODÈLE 3D - PRINCIPE DES Y-PANELS



5

© BOUYGUES TP



6

© BOUYGUES TP

→ Pour reprendre les efforts de flexion, les aciers doivent être concentrés dans la face interne du "Y-Panel", ce qui pose problème pour la répartition du poids de la cage de ferrailage et par conséquent génère un levage asymétrique.

→ La géométrie du Y-Panel a également dû prendre en compte les contraintes de panneautage interne et externe. Le Y-Panel lui-même doit pouvoir être excavé par un outil rectangulaire qui ne peut excaver qu'en situation symétrique sur ses deux bords longs pour éviter un déséquilibre qui entraînerait une déviation. Les panneaux adjacents du Y-Panel doivent ensuite pouvoir se connecter soit en tant que panneaux primaires (réalisés au préalable) soit en *re-cut* (panneau recoupant dans un Y-Panel déjà bétonné).

La réconciliation de ces contraintes a nécessité plus de deux mois d'études avec des sessions hebdomadaires de brainstorming impliquant à la fois les départements techniques et travaux de DBJV et VSL-Intrafor, et le bureau d'études Atkins. L'étude de faisabilité, les calculs préliminaires et la conception détaillée ont impliqué 4 consultants différents (Atkins, Ian Hooper Consulting, Meinhardt, Golder) et plus d'une dizaine de modèles 3D sous 3 logiciels différents (Plaxis 3D, SAP2000, Strand7). Plus d'une vingtaine de géométries différentes ont été passées au crible pour arriver au meilleur compromis entre le design et la constructibilité.

6- Y-Panel et butons en béton.
7- Géométrie d'un Y-Panel.

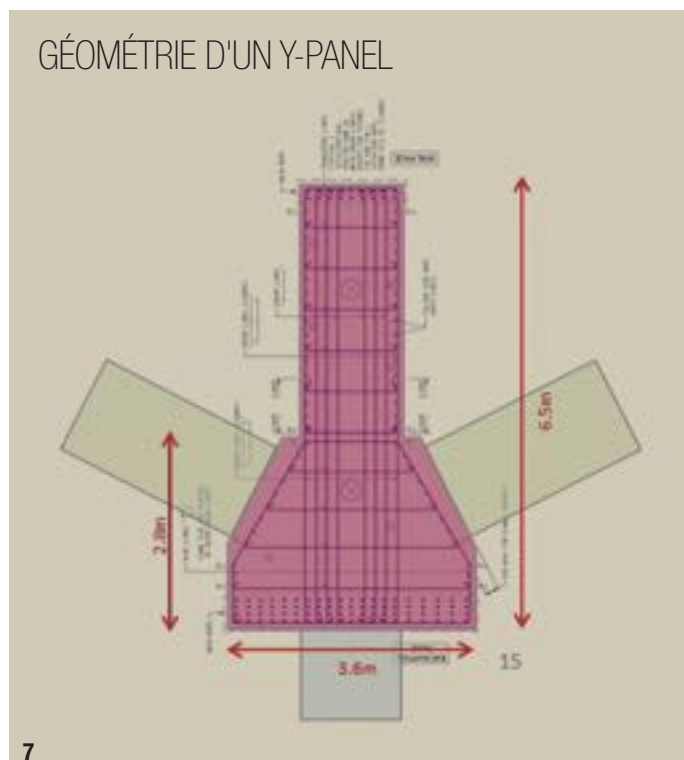
6- Y-Panel and concrete struts.
7- Geometry of a Y-Panel.

La géométrie finale (figure 7) présente les avantages suivants :

- Grande largeur disponible côté excavation (où le ferrailage principal doit être installé) ;
- Grande section de béton (> 15 m²) pour la reprise des efforts tranchants ;
- Géométrie compatible avec l'intersection angle des arches et des parois transverses ;

- Les arches arrivent proche du côté interne, ce qui évite une sur-largeur de la tranchée ;
- Géométrie compatible avec le panneautage des outils de creusement de paroi moulée (5 passes de 1,5 x 2,8 m) ;
- Compatible avec les positions/séquençage des porte-joints :
 - le "Y-Panel" est un successif du panneau transverse adjacent,
 - les panneaux d'arches adjacents remordent dans le "Y-Panel" pour assurer un bon contact malgré les angles de jonction qui peuvent varier.

GÉOMÉTRIE D'UN Y-PANEL



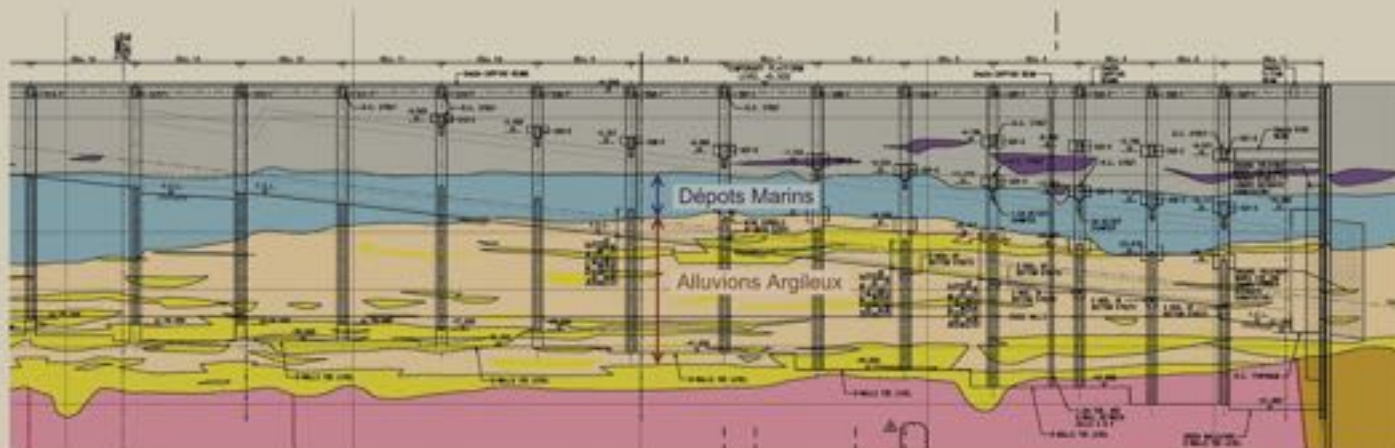
7

© BOUYGUES TP

LES DÉFIS DE L'EXCAVATION DES Y-PANELS

Le premier obstacle rencontré fut d'assurer la stabilité de la tranchée dont les dimensions (6,5 m de longueur pour 3,6 m de largeur à la base du T) combinées à la nature peu consolidée du terrain ont mis en évidence la nécessité d'un pré traitement. Sur la profondeur des "Y-Panels" (jusqu'à 56,5 m), entre 20 et 30 m de sols argileux (dépôts marins et alluvions) (figure 8) présentent un réel risque de stabilité de tranchée. La solution du Cutter Soil Mixing (CSM) (figure 9) a été retenue pour établir un périmètre de 1,2 m d'épaisseur d'un mélange sol-coulis avec une résistance en compression de 1,5 MPa. Une optimisation du design et du panneautage a permis finalement de réduire l'épaisseur du CSM à 1,0 m. ▢

COUPE GÉOLOGIQUE



8

© BOUYGUES TP

Malgré la confirmation par les modélisations Plaxis 3D d'une déformation théorique acceptable de la tranchée lors de son excavation, un essai grandeur nature de stabilité de tranchée a été mené pour confirmer les résultats du modèle. Pour cet essai, une combinaison des conditions les plus défavorables de terrain et de profondeur d'excavation a été choisie afin de s'assurer de la stabilité de toutes les futures tranchées des Y-Panels. Les gonflements et déplacements de la tranchée ont été mesurés pendant l'excavation du panneau test et pendant 2 semaines après son achèvement à l'aide d'inclinomètres disposés autour de la tranchée et de tests Kodan réalisés durant et après l'excavation. Aucune instabilité de tranchée n'a été enregistrée ce qui a validé la solution de prétraitement et la technique d'excavation.

L'excavation des Y-Panels a été réalisée principalement à la benne hydraulique (figure 10) qui s'est montrée efficace pour recouper dans les panneaux de CSM construits au préalable. Le système de mesure de la verticalité de la machine couplé à l'expérience des opérateurs a permis de respecter un critère de verticalité très contraignant de 1/400. Le panneautage en 5 passes et la séquence d'excavation du panneau test (figure 11) ont été conservés pour des conditions optimales de stabilité et pour éviter les situations de déséquilibre entre le terrain et le CSM. Ainsi les trois premières passes permettent d'ouvrir le panneau et les deux dernières d'enlever le merlon central de CSM.

L'agencement du CSM autour du Y-Panel ainsi que la taille de la cage

de ferrillage ont été influencés par la séquence d'excavation relative des panneaux adjacents. En effet le Y-Panel est réalisé après le dernier panneau de paroi moulée transverse pour chaque cellule, mais avant les panneaux de fermeture des deux arches adjacentes.

LES DÉFIS DU FERRAILLAGE

Pour l'optimisation du planning et en particulier afin de garder la tranchée ouverte sous bentonite le moins de temps possible, l'utilisation de portions

8- Coupe géologique.

9- Cutter Soil Mixing pour stabilisation de tranchée.

8- Geological cross section.

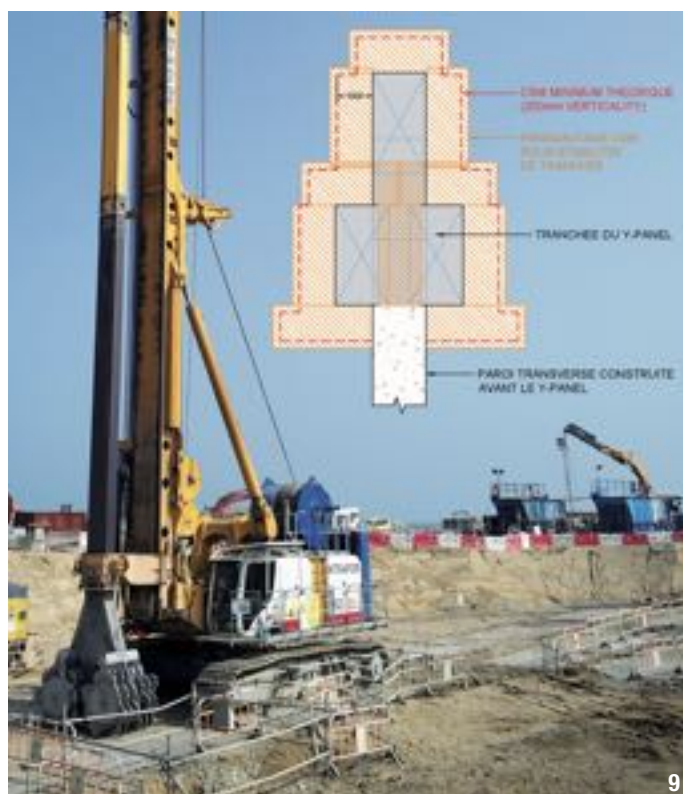
9- Cutter Soil Mixing for stabilisation of the cut-and-cover.

de cages préfabriquées de 12 m de long a été privilégié. Cependant, les dimensions de la cage ainsi que la répartition asymétrique de son poids ont requis un lit de préfabrication spécial (figure 12). La cage y est assemblée en position allongée sur sa tranche puis levée et basculée en position verticale par trois grues (figure 13). Une fois descendue dans la tranchée et connectée aux autres portions, la cage est posée sur une murette-guide conçue non seulement pour stabiliser l'excavation mais aussi pour supporter le poids de la cage qui pouvait atteindre 135 t.

Dans certaines zones de grande concentration de ferrillage (jusqu'à 4 nappes d'acier diamètre 50 mm superposées dans la face interne du panneau) qui ne permettait plus la mise en place des aciers de recouvrement des cages préfabriquées, une installation in situ de portions de cages de 6 m de longueur a été effectuée directement en position verticale au-dessus de la tranchée. Malgré l'utilisation de coupleurs permettant la connexion des barres verticales, la plus grande difficulté était de soutenir les cadences de ferrillage tout en maintenant les conditions de sécurité. Pour cela, l'utilisation de nacelles ciseaux et autres moyens d'accès et de manutention a été requise (figure 14).

LES DÉFIS DU BÉTONNAGE

En raison du grand volume de béton (plus de 1020 m³ pour le panneau le plus profond) pour un élément de paroi moulée, une logistique spéciale a été mise en place. Pas moins de 4 tubes plongeurs permettent le coulage du



9

© INTRAFOR

10- Excavation à la benne hydraulique.

11- Panneautage d'excavation en 5 passes.

12- Lit de préfabrication des cages de ferrailage.

10- Excavation by hydraulic bucket.

11- Panelling for excavation in 5 phases.

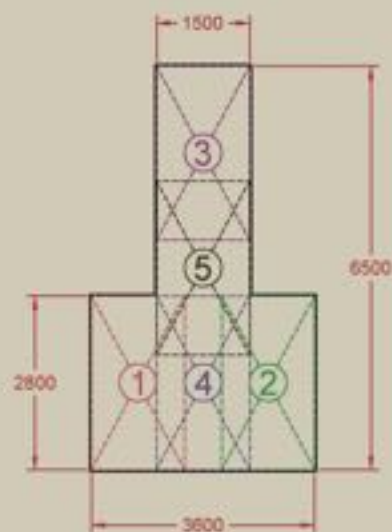
12- Precasting bed for concrete reinforcing cages.



10

© INTRAFOR

PANNEAUTAGE D'EXCAVATION EN 5 PASSES



11

© INTRAFOR

béton jusqu'au fond de la tranchée (figure 15). Le système de stockage et de traitement de la boue bentonitique a dû être dimensionné en conséquence pour absorber le volume équivalent pompé hors du Y-Panel pendant le bétonnage.

En période de pointe, 21 réservoirs de bentonite pour une capacité totale de 6160 m³ ont été installés pour faire face aux cadences de production des parois moulées de la tranchée multicellulaire.

LES "HALF STAR PANELS"

Pour des raisons de stabilité longitudinale, le différentiel d'excavation entre cellules adjacentes de la tranchée couverte a dû être limité à 3 m.

Cependant, pour des questions de planning, les trois premières cellules de la tranchée couverte multicellulaire devaient pouvoir être excavées indépendamment du reste des cellules afin de pouvoir enlever du chemin critique du projet le percement dans la première cellule des deux tunneliers (14 m de

diamètre) ayant terminé le creusement du tunnel sous-marin. Par conséquent, il a été nécessaire de développer une paire de Y-Panels spéciaux capable de loger une arche de fermeture de la cellule 3 en plus des arches latérales. (figure 16) Baptisés "Half Star Panels", ces Y-Panels spéciaux ont nécessité une géométrie encore plus particulière en étoile. Ils ont permis l'excavation en deux temps de la tranchée couverte :

→ Dans un premier temps, les cellules 1 à 3 ont pu être excavées

indépendamment comme s'il s'agissait d'un puits composé de 3 cellules.

→ Ensuite, lorsque la construction des panneaux des 15 cellules ainsi que des poutres de couronnement a été achevée, l'excavation de l'ensemble de la tranchée multicellulaire a pu démarrer. L'arche de fermeture en cellule 3 a alors été démolie au fur et à mesure de l'excavation de la cellule 4, les efforts étant transférés progressivement de l'arche de fermeture à la paroi transverse.

Le premier défi pour la réalisation des Half Star Panels a été lié aux contraintes géométriques. Il a fallu d'une part dégager un espacement suffisant pour la connexion de chacun des 4 panneaux formant les 4 branches de l'étoile et, d'autre part, minimiser le désaxement des arches et de la paroi transverse par rapport au centre du Y-Panel. Le compromis entre ces deux contraintes majeures a nécessité une étude détaillée : la prise en compte des tolérances de déviation tend à espacer les points d'ancrage des panneaux, mais un désaxement des arches crée des moments parasites au cœur du panneau et, par conséquent, génère une augmentation considérable du ferrailage en particulier sur la face interne du Y-Panel déjà très chargée.

Par ailleurs, la présence de l'arche de fermeture restreint l'espace le long de la face interne et nécessite une disposition asymétrique des aciers par rapport à l'axe du Y-Panel. Une conception spéciale de la murette-guide ainsi qu'un nouvel arrangement du lit de préfabrication ont été nécessaires.



© INTRAFOR

12

LES "QUARTER STAR PANEL"

Au niveau de la dernière cellule de la tranchée couverte, la paroi multicellulaire se connecte à une tranchée ouverte classique à parois moulées droites et butons métalliques.

Afin de stabiliser longitudinalement la tranchée multicellulaire, une paire de Y-Panels spéciaux a également dû être conçue pour s'accommoder de la connexion avec des parois droites (figure 17). Ainsi naissent les "Quarter Star Panels" qui s'intègrent d'un côté au système de tranchée multicellulaire et s'appuient longitudinalement de l'autre sur des parois droites. Ces Quarter Star Panels permettent l'excavation simultanée entre les deux types de soutènement sans contrainte de séquençage.

LES SUCCÈS DES "Y-PANELS"

Après plusieurs mois de conception, le design des Y-Panels (cellules 1 à 3) a été finalement approuvé en mars 2018. La construction a immédiatement débuté permettant le coulage du dernier panneau des cellules 1 à 3 en juillet 2018. Le reste des parois moulées s'est achevé au début du mois de novembre 2018 avec quelques semaines d'avance par rap-



13

© INTRAFOR



14

© BOUYGUES TP

port au calendrier prévisionnel établi au moment des études.

Les excavations des cellules 1 à 3 ont atteint le niveau de fond de fouille en décembre 2018 avec des cadences atteignant 4 000 m³/jour, rendues possibles grâce aux larges volumes sans obstacles et au faible nombre de butons en béton armé permis par les Y-Panels.

Alors que le premier Y-Panel a nécessité pas moins de 19 jours entre la mobilisation de la benne hydraulique et la fin du coulage, le dernier Y-Panel a été construit en seulement 7 jours.

13- Basculement de la cage de ferrailage.

14- Ferrailage in-situ.

15- Bétonnage de Y-Panel.

13- Tilting the concrete reinforcing cage.

14- In-situ reinforcement.

15- Y-Panel concreting.

Aucun incident de stabilité de tranchée n'a été rencontré. Les 30 Y-Panels ont été coulés à raison d'un par semaine, simultanément aux 121 900 m³ de paroi moulée (434 panneaux) constituant le reste de la structure multicellulaire commencée en novembre 2017 et achevée en novembre 2018.

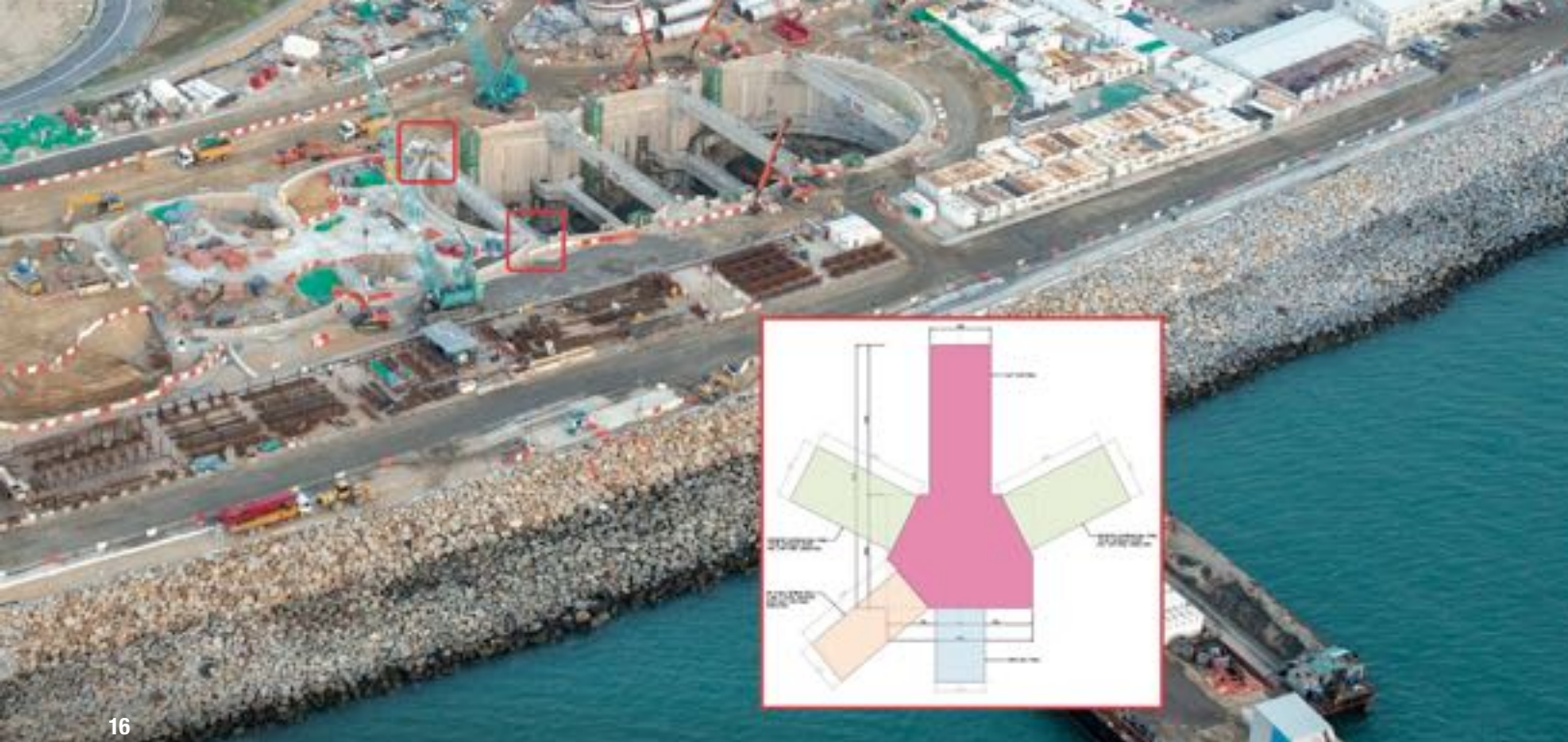
Finalement, les Y-Panels ont rendu possible la conception et la construction de la tranchée multicellulaire la plus longue, la plus large et la plus profonde du monde.

La haute capacité en flexion et en effort tranchant de ces panneaux a permis un



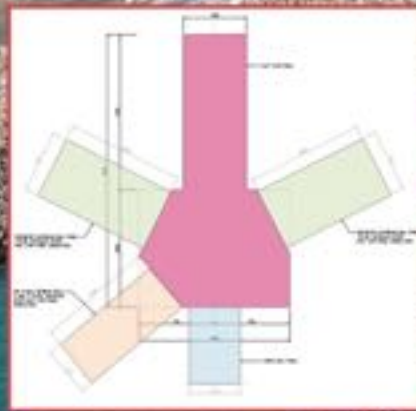
15

© INTRAFOR

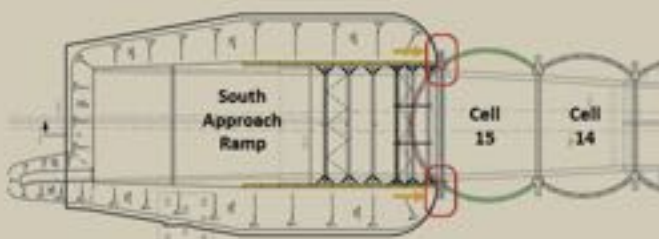


16

© BOUYGUES TP



QUARTER STAR PANEL



© BOUYGUES TP

17

système de soutènement latéral avec peu de butons en béton armé et par conséquent une excavation plus efficace.

Dans le cadre du chantier de TMCLK, ces "Y-Panels" ont été développés pour répondre à un besoin très spécifique. Cependant, vu le succès aussi bien en étude qu'en construction, il apparaît clairement que ce concept est transposable et pourrait permettre à l'avenir d'ouvrir de nouvelles possibilités pour tout projet nécessitant des travaux de soutènement latéraux de grande envergure. □

16- Half Star Panel.

17- Quarter Star Panel.

16- Half Star Panel.

17- Quarter Star Panel.

PRINCIPALES QUANTITÉS

MONTANT TOTAL DU CONTRAT DE CONCEPTION-CONSTRUCTION : 18,15 Milliards de HK\$

LONGUEUR DE LA TRANCHÉE SUD MULTICELLULAIRE : 500 m

NOMBRE DE Y-PANELS DONT 2 " HALF STAR PANELS " ET 2 " QUARTER STAR PANELS " : 30 u

TOTAL DE BÉTON DES Y-PANELS : 24 253 m³

TOTAL FERRAILLAGE DES Y-PANELS : 2 745 t

PROFONDEUR MAXIMALE DES Y-PANELS : 56,5 m

BÉTONNAGE DU Y-PANEL LE PLUS PROFOND : 1 020 m³

FERRAILLAGE DU Y-PANEL LE PLUS PROFOND : 135 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Highways Department

MAÎTRE D'ŒUVRE : AECOM

GROUPEMENT EN CHARGE DE LA CONCEPTION-CONSTRUCTION : Bouygues Travaux-Publics – Dragages HK

ENTREPRISE SPÉCIALISÉE EN FONDATIONS : Intrafor Hong Kong Ltd.

BUREAU D'ÉTUDES EN CHARGE DE LA CONCEPTION : Atkins

BUREAU D'ÉTUDES DE CONTRÔLE EXTERNE : Meinhardt

BUREAU D'ÉTUDES DE REVUE GÉOLOGIQUE : Golder

BUREAU D'ÉTUDES DE REVUE INTERNE : Ian Hooper Consulting

ABSTRACT

HONG KONG TMCLK - "Y-PANELS" FOR MULTICELLULAR CUT-AND-COVER

HUGO WU, INTRAFOR - SEBASTIEN CHEN, BOUYGUES TP - ANTOINE SCHWOB, BOUYGUES TP

Special diaphragm walls, called "Y-Panels", had to be invented for execution of the largest multicellular cut-and-cover tunnel in the world on the South ramp of the Tuen Mun Chek Lap Kok project. These huge panels of more than 15 m² cross section 55 metres deep were made possible by innovations in terms of design, construction methods and logistics. After more than one and a half years of design and construction work, the completion of the last Y-Panel in October 2018 demonstrated the feasibility and efficiency of this new type of diaphragm wall. These Y-Panels open up new prospects for future multicellular cut-and-covers. □

HONG KONG TMCLK - "Y-PANELS" PARA TÚNEL EN ZANJA CUBIERTA MULTICELULAR

HUGO WU, INTRAFOR - SEBASTIEN CHEN, BOUYGUES TP - ANTOINE SCHWOB, BOUYGUES TP

La realización del mayor túnel en zanja cubierta multicelular del mundo en la rampa sur del proyecto de Tuen Mun Chek Lap Kok ha exigido la invención de pantallas de hormigón especiales, bautizadas como "Y-Panel". Estos colosales paneles de más de 15 m² de sección y 55 m de profundidad han sido posibles gracias a innovaciones en el diseño, los métodos de construcción y la logística. Tras más de un año y medio de diseño y construcción, la finalización del último Y-Panel en octubre de 2018 ha demostrado la viabilidad y la eficacia de este nuevo tipo de pantalla de hormigón. Los Y-Panels abren nuevas perspectivas para las futuras zanjas multicelulares. □



© YVES CHANOIT

GRAND PARIS - LIGNE 15 SUD : OS 1302 P - PUIITS DE DÉPART DE TUNNELIERS EN PAROI MOULÉE

AUTEURS : AYMERIC BOFFA, CHEF DE PROJETS, SOLETANCHE BACHY FRANCE - LAURE DELVA, CHEF DE PROJETS, SOLETANCHE BACHY FRANCE

CRITIQUE EN TERMES DE PLANNING ET VÉRITABLE POINT NÉVRALGIQUE DU LOT T2A DE LA LIGNE 15 SUD, L'OUVRAGE SPÉCIAL 1302 SITUÉ EN BORD DE SEINE SUR L'ANCIENNE FRICHE INDUSTRIELLE DITE « FRICHE ARRIGHI » DOIT PERMETTRE LE DÉPART DES DEUX PRINCIPAUX TUNNELIERS DU LOT. SA FORME PARTICULIÈRE A NÉCESSITÉ UNE MODÉLISATION SPÉCIFIQUE AUX ÉLÉMENTS FINIS. CETTE DERNIÈRE A PERMIS DE JUSTIFIER CET OUVRAGE EN PAROI MOULÉE D'ÉPAISSEUR 1,50 m, QUI DESCEND S'ANCRER À 56 m DANS LE CALCAIRE GROSSIER.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Le lot T2A de la ligne 15 Sud s'inscrit dans le cadre du projet du Grand Paris Express piloté par la Société du Grand Paris. L'objectif, via 200 km de nouvelles lignes de métro automatique dont 180 km en souterrain, est de connecter les communes du Grand Paris, redyna-

miser les banlieues, désaturer les lignes de RER existantes, réduire la pollution automobile et favoriser le développement économique de la région Île-de-France. À terme, 68 nouvelles gares et de nombreuses interconnexions avec le réseau existant doivent être construites. Le lot du T2A, acquis par le groupement Horizon Grand Paris comporte (figure 2) :

**1- Vue générale
du site de la
friche Arrighi.**

**1- General view
of the "friche
Arrighi" site.**

- 6,6 km de tunnel au tunnelier ;
- 4 gares : Créteil-l'Échat (CLE), Le-Vert-de-Maisons (VDM), les Ardoines (ARD) et Vitry-Centre (VC) ;
- 1 ouvrage permettant d'assurer le débranchement d'un tunnel et la sortie du tunnelier n°5 ;
- 1 raccordement entre l'ouvrage de débranchement 1401P et le futur



© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

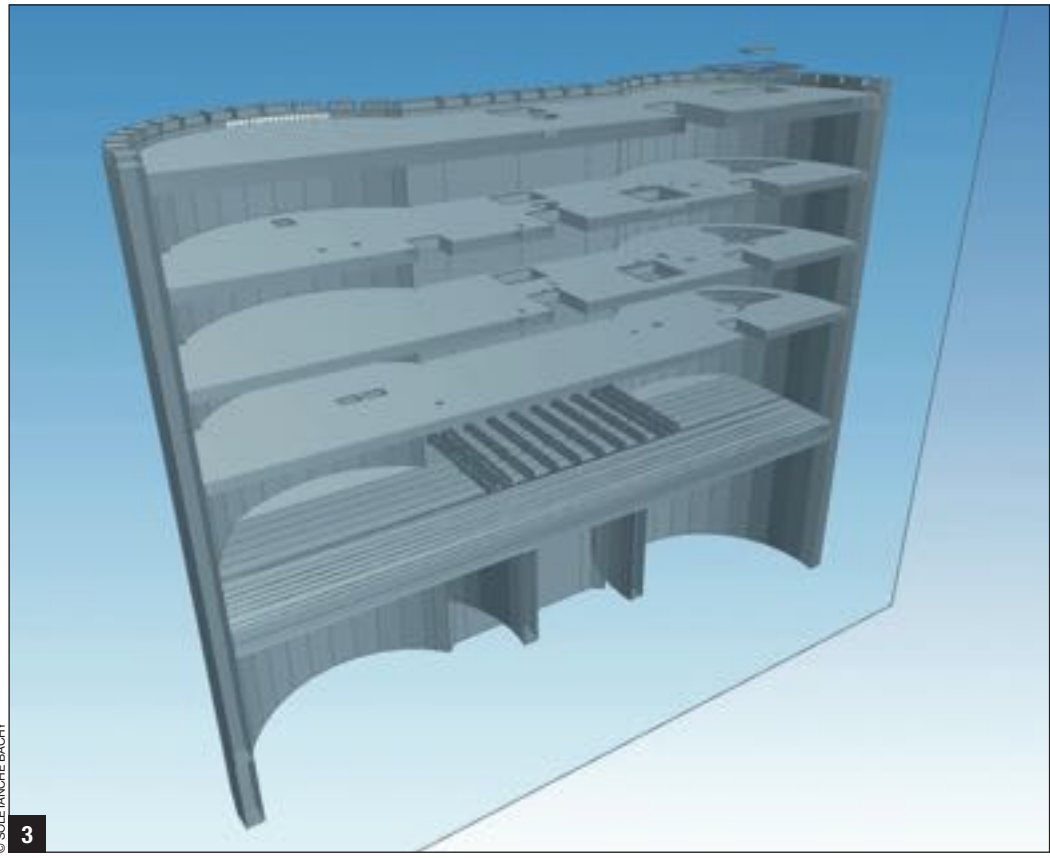
2

site de maintenance des infrastructures composé d'un tunnel, d'une tranchée couverte et d'une tranchée ouverte ;
 → 5 ouvrages annexes d'interstations 1201P, 1301P, 1402P, 1404P, 1501P ;
 → 1 ouvrage spécial 1302P servant de puits de lancement de deux tunneliers.

2- Vue générale du lot T2A de la Ligne 15 Sud.
3- Vue 3D de l'ouvrage.
2- General view of work section T2A on Line 15 South.
3- 3D view of the structure.

L'ouvrage spécial OS 1302P constitue le point névralgique du projet, car c'est le puits de démarrage de deux tunneliers : le tunnelier 4 qui assure le forage du tronçon jusqu'à Villejuif - Louis-Aragon et le tunnelier 2 qui assure le forage du tronçon jusqu'à la gare de Créteil-L'Échat.
 En phase définitive, cet ouvrage abritera les installations de ventilation/désenfou-

mage/décompression/access secours. Le chantier, situé en bord de Seine sur l'ancienne friche industrielle Arrighi, est bordé par un poste de transformation et une usine électrique. La moitié de l'emprise est traversée par des lignes à haute tension qui rendent le contexte environnemental du site davantage complexe. Le site de la friche Arrighi abrite également la base arrière des travaux spéciaux. Un magasin et un atelier y ont été installés (350 m² couverts). Ces structures transverses permettent de centraliser les commandes de matériel et de consommable, de coordonner et planifier les réparations de chantier, ainsi que de recharger les outils d'excavation. Une usine de destruction de boue commune à l'ensemble des sites du T2A a également été installée sur ce site. Elle est composée d'une unité mobile de type filtre-pressé. Deux bassins de stockage tampon d'environ 1 000 m³ permettent de lisser l'activité en fonction de la production des sites. L'ouvrage a une forme particulière (figures 1 et 3). En effet, il est constitué de 2 lobes de 26 m de diamètre intérieur, reliés par 2 parois rectilignes de 21 m de long, représentant ainsi un ensemble de 62 m de long. L'ouvrage est réalisé en paroi moulée de 1,50 m d'épaisseur s'ancrant dans le Calcaire Grossier à 56 m de profondeur. Au préalable, 87 forages de prétraitement ont été réalisés jusqu'à une profondeur comprise entre 45 et 46 m, jusqu'au toit du Calcaire Grossier. ▷



© SOLETA NCHE BACHY

3



4

© SOLETANCHE BACHY

Ces forages ont été réalisés en méthode Hi'Drill. Au total, 740 m³ de terrains ont été injectés, nécessitant 4014 m de forage.

L'ouvrage, composé d'une trentaine de panneaux (figure 6), a été réalisé par deux Hydrofraises en deux postes et une benne hydraulique KS en trois postes (figures 4 et 5). Les deux Hydrofraises ont été associées

à deux centrales à boue Sotres D500. La paroi moulée est équipée de joints CWS descendus jusqu'à la base des panneaux de paroi moulée.

Des blocs triangulaires de polystyrène sont mis en place pour garantir le renvoi d'angle des coffrages dans la partie circulaire.

Les travaux de parois moulées se sont achevés en décembre 2017. Les essais

4- Réalisation des parois moulées.

5- Vue de détail des outils.

4- Execution of diaphragm walls.

5- Detail view of tools.

de pompage ayant été concluants, les équipes des travaux spéciaux ont alors laissé la place aux équipes de terrassement et génie civil (figure 7).

CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

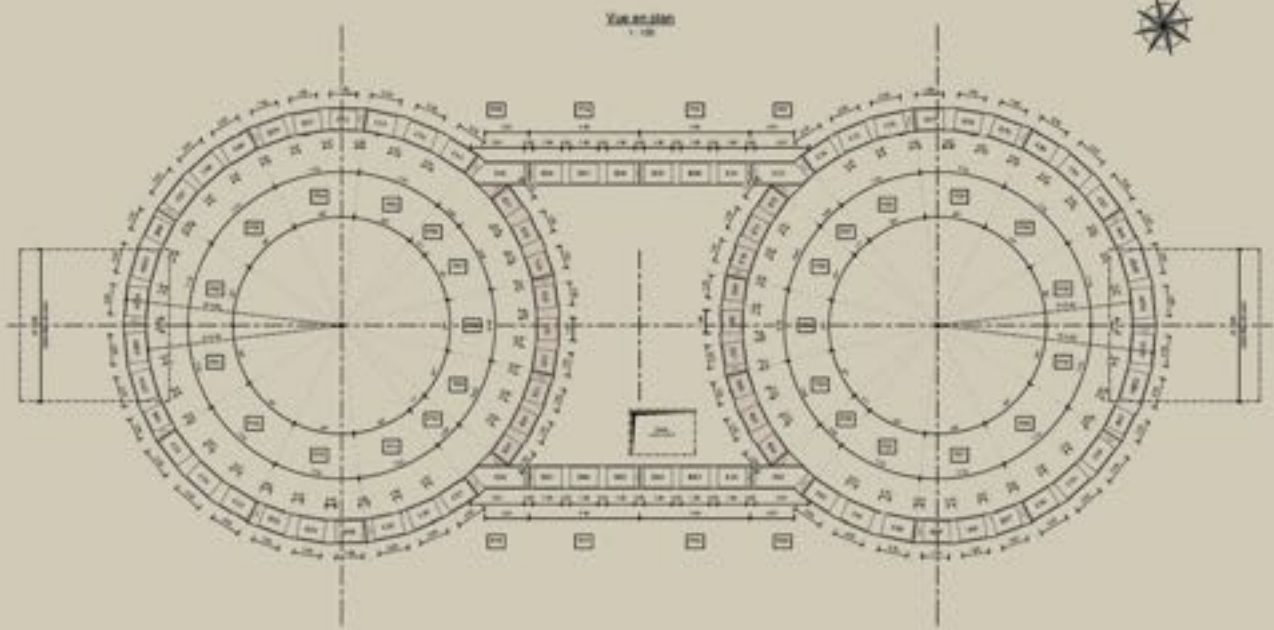
La stratigraphie rencontrée au niveau de l'ouvrage spécial 1302 est celle, relativement typique, du bassin pari-



5

© SOLETANCHE BACHY

PANNEAUTAGE DE L'OUVRAGE SPÉCIAL 1302



© SOLETANCHEBACHY

6

sien (figure 8) ; sous les remblais, nous trouvons les Alluvions Anciennes, le calcaire de Saint-Ouen, les Sables de Beauchamp, les Marnes et Caillasses, et enfin le Calcaire Grossier.

Les Marnes et Caillasses présentent deux faciès ; sur environ 8 m, la couche est altérée en tête, puis devient saine au-delà.

De même, concernant le Calcaire Grossier, une distinction est effectuée entre le Calcaire Grossier supérieur relativement perméable, et le Calcaire Grossier de base, plus imperméable.

6- Panneautage de l'ouvrage spécial 1302.

7- Le génie civil démarre sur le bilobe de la friche Arrighi.

6- Panelling for special structure OS 1302.

7- Civil works starts on the bilobe of the "friche Arrighi".

La définition de la hauteur fissurée d'environ 9 m du Calcaire Grossier a nécessité la réalisation d'une campagne de reconnaissance complémentaire.

Les sondages complémentaires ont permis de connaître précisément cette limite entre le Calcaire Grossier sain et celui qui est fissuré, et de définir ainsi la cote d'ancrage de la paroi moulée.

D'un point de vue hydraulique, l'OS 1302 rencontre 3 nappes :

→ La nappe alluviale ;

→ La nappe du Calcaire de Saint Ouen ;

→ La nappe des Marnes et Caillasses. Les niveaux de ces différentes nappes étant identiques ou très proches, nous retenons pour les calculs de soutènement les niveaux de la nappe alluviale, soit :

- Un niveau Eaux Chantier (EC) de 31,70 NGF ;
- Un niveau Eaux Basses (EB) de 29,70 NGF ;
- Un niveau Eaux Hautes (EH) de 34 NGF ;
- Un niveau Eaux Exceptionnelles (EE) de 35,50 NGF.

L'ouvrage spécial 1302 se trouvant en zone inondable, les calculs de dimensionnement intègrent deux phases supplémentaires particulières :

- Une phase de calcul accidentelle durant les travaux avec un niveau hydrostatique crue PPRI = 35,70 NGF ;
- Une phase de calcul accidentelle durant la phase service avec un niveau hydrostatique crue R.1.15 = 35,90 NGF (qui remplacera le cas EE, étant plus défavorable).

PHASAGE DE RÉALISATION

Cet ouvrage est caractérisé par sa forme particulière et le phasage qui y est associé. Sa forme est en effet constituée d'une section rectiligne au centre et deux sections circulaires se raccordant à chaque extrémité de celle-ci.



© SOLETANCHEBACHY

7

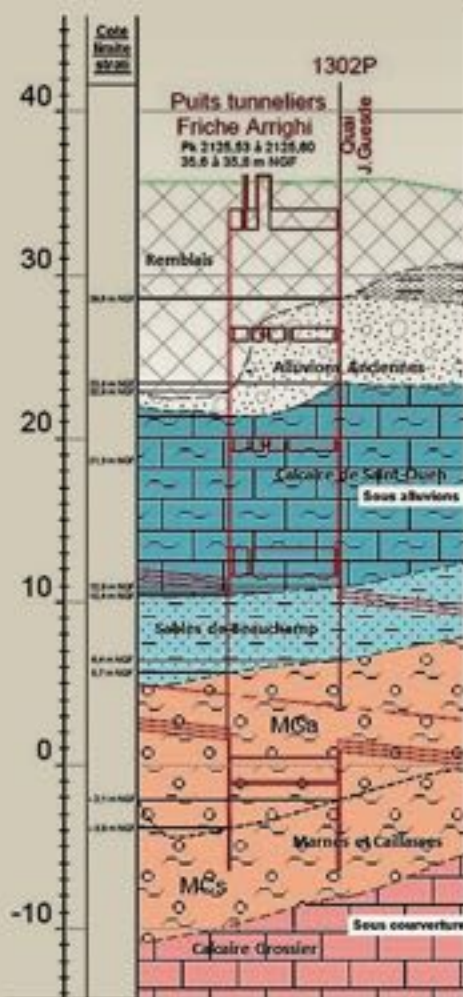
Les sections circulaires se composent elles-mêmes d'une partie définitive constituant l'enceinte étanche de l'ouvrage et d'une partie provisoire permettant d'obtenir un anneau rigide fermé lors des phases provisoires de construction.

Cette partie provisoire est démolie au fur et à mesure de l'avancement des terrassements et de la réalisation des dalles en zone centrale qui permettent de la remplacer dans sa fonction de butonnage de l'anneau de béton (figure 9).

Une fois la paroi moulée réalisée, le phasage de terrassement inclut la réalisation des dalles centrales butonnantes, de cerces en béton armé dans les parties circulaires (qui seront intégrées dans les dalles définitives lorsque celles-ci seront coulées) et la démolition de la paroi provisoire.

Pour chaque niveau de l'ouvrage, on terrasse progressivement dans les lobes, en démolissant au fur et à mesure la paroi provisoire (figure 10). Une fois atteint le niveau nécessaire à la réalisation de la dalle suivante, on terrasse la zone centrale (située sous une dalle supérieure) tout en commençant le ferrailage des cerces. On peut ensuite ferrailer et couler la dalle centrale grâce à une trémie aménagée dans les dalles supérieures. Un unique lit de butons métalliques provisoires est posé entre la dernière dalle et le radier, afin de soutenir les parois moulées lors de la dernière phase de terrassement (figure 11). Ils sont déposés une fois le radier-voûte de l'ouvrage réalisé.

EXTRAIT DU PROFIL EN LONG DE LA FRICHE ARRIGHI



8

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT

Un ouvrage circulaire présente une rigidité importante grâce à sa forme cylindrique que l'on peut assimiler à un empilement d'anneaux en béton. Dans ces anneaux, un effet voûte se développe, de la même manière que pour des voûtes en pierre de cathédrales ou de ponts. Le béton armé de ce type d'ouvrage travaille donc majoritairement en compression.

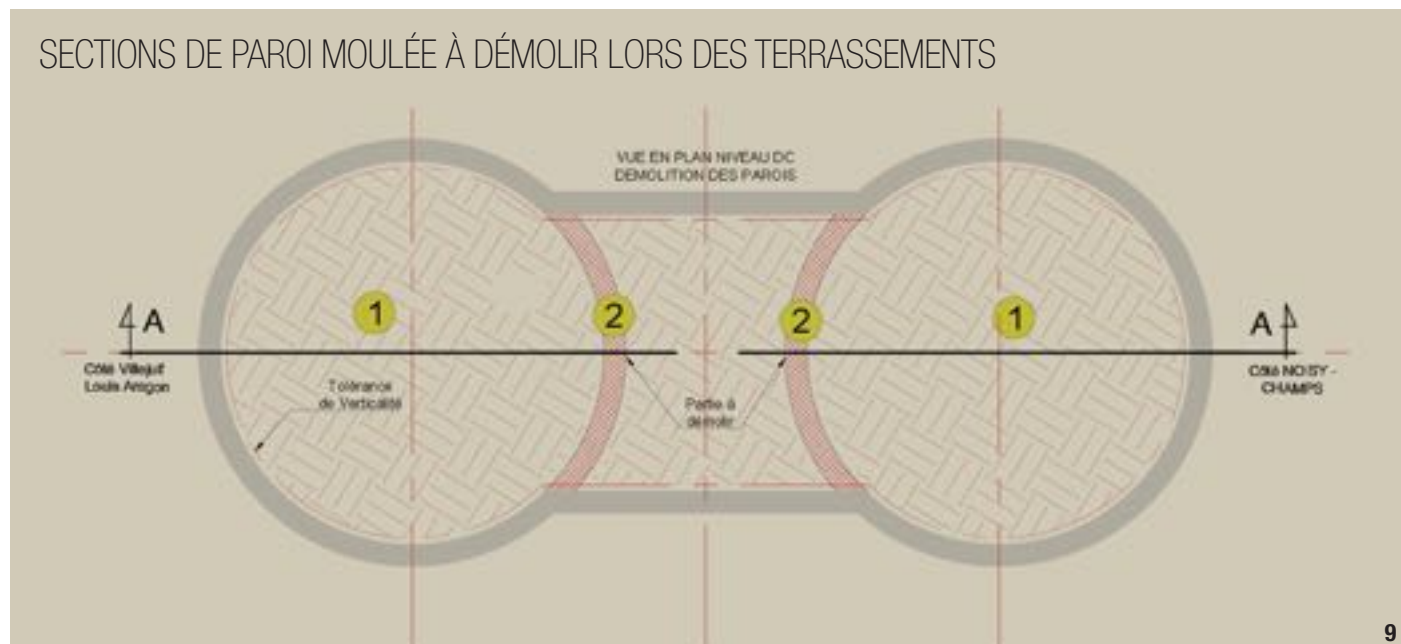
Le fait de réaliser des percements dans des ouvrages circulaires est relativement courant et peut se traiter assez simplement en termes de dimensionnement sans recourir à des modélisations complexes.

Notre cas se rapproche de cette problématique par la démolition d'une partie des anneaux de béton situés aux extrémités de l'ouvrage, mais est bien plus complexe en raison de la géométrie de l'ouvrage et du remplacement progres-

8- Extrait du profil en long de la friche Arrighi.
9- Sections de paroi moulée à démolir lors des terrassements.

8- Excerpt from the longitudinal profile of the "friche Arrighi".
9- Sections of diaphragm wall to be demolished during earthworks.

SECTIONS DE PAROI MOULÉE À DÉMOLIR LORS DES TERRASSEMENTS



9

© HORIZON



10
© HORIZON



11
© SOLETANCHE BACHY

10- Vue du chantier lors du terrassement sous la dalle S1.

11- Vue de chantier lors du terrassement au fond de fouille.

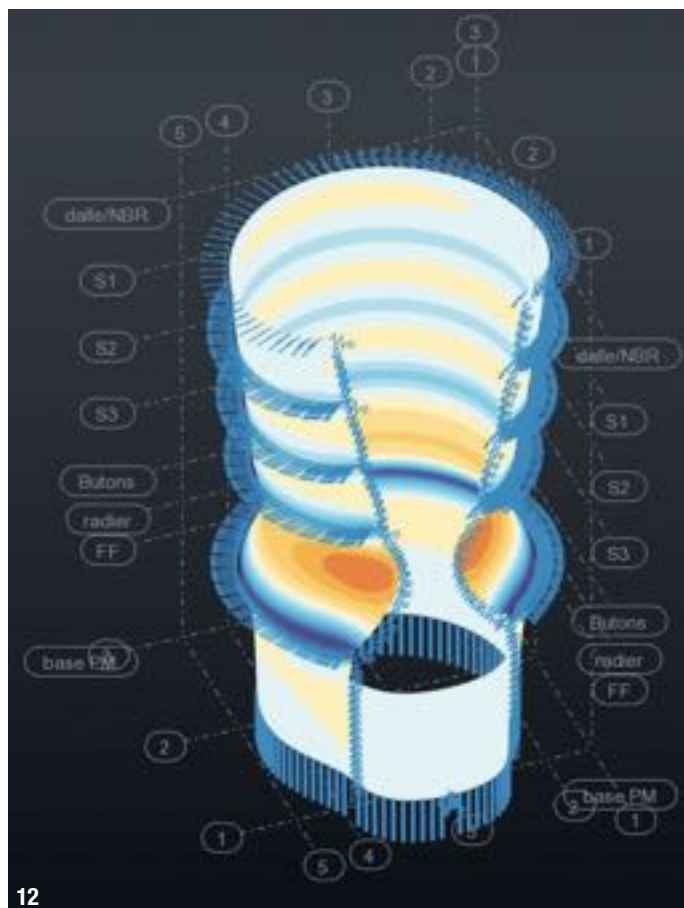
12- Vue de la déformation et de la flexion verticale de la structure.

10- View of the site during earthworks under slab S1.

11- View of the site during earthworks in the bottom of excavation.

12- View of structure deformation and vertical flexure.

sif de la paroi démolie par les dalles définitives de l'ouvrage.
Le choix a donc été fait de dimensionner les parois moulées en partie de manière classique à l'aide de calculs d'interaction sol-structure 2D aux



12
© SOLETANCHE BACHY

coefficients de réactions. Ces calculs sont toutefois incapables de prendre en compte la géométrie particulière de l'ouvrage, et notamment le raccordement entre les parties planes et circulaires.

En conséquence, ces calculs standards ont été complétés par des calculs de structure tridimensionnels aux éléments finis à l'aide du logiciel Robot (figure 12).

Afin de simplifier le dimensionnement de l'ouvrage, il n'a pas été totalement modélisé. En coordination avec le bureau d'études de génie civil, seule la partie circulaire définitive d'un lobe a été modélisée ; le reste de la structure est simplement représenté par des appuis élastiques dans le modèle de calcul.

Une problématique rencontrée avec l'utilisation de ce type de calculs est qu'il n'intègre pas de notion de phasage de calcul, qui est une notion essentielle pour des calculs en interaction avec le sol.

Les phases de construction les plus critiques de l'ouvrage en termes de dimensionnement ont été identifiées suite à une analyse du modèle de calcul aux coefficients de réaction.

On a donc réalisé plusieurs modèles associés à ces différentes étapes de construction, afin de pouvoir appréhender l'impact des différentes situations rencontrées par l'ouvrage lors de sa réalisation.

Les résultats obtenus ont permis d'affiner la modélisation réalisée aux coefficients de réaction et de quantifier les efforts provenant de mécanismes plus complexes qui découlent de la destruction d'une partie de l'ouvrage.

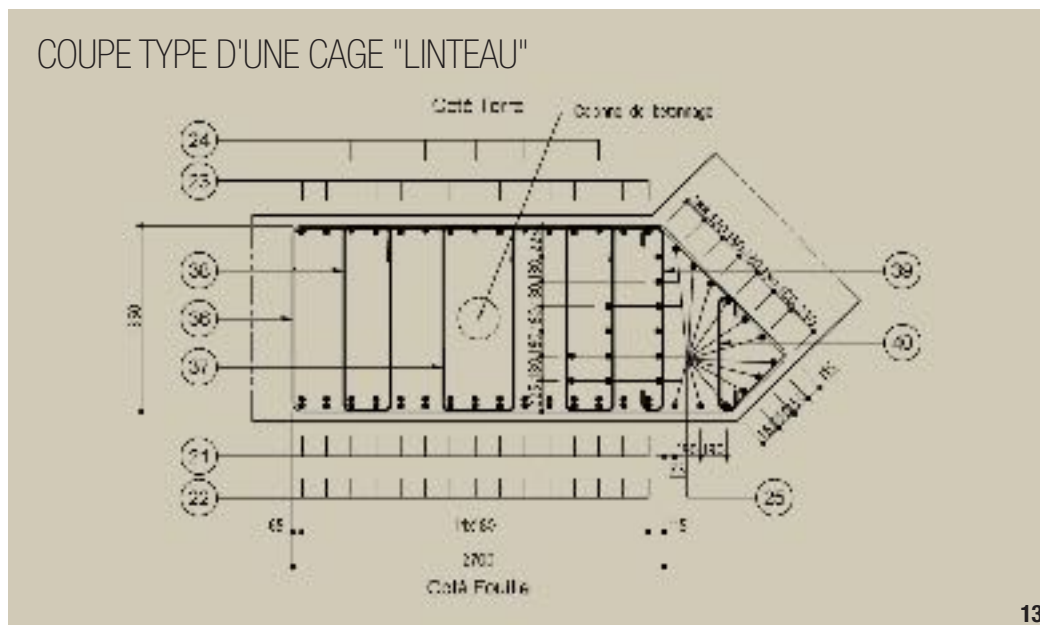
INCIDENCE SUR FERRAILLAGE

Les différents calculs menés ont mis en évidence deux types principaux de contraintes dans la structure qui ont nécessité un renforcement du ferrailage de la paroi moulée.

Tout d'abord, la perte de rigidité cylindrique liée à la destruction de la paroi moulée provisoire engendre une flexion verticale de la paroi moulée qui n'existait pas lorsque les anneaux de béton étaient complets et bloquaient celle-ci horizontalement. Il a donc été nécessaire de renforcer le ferrailage vertical de toutes les cages d'armatures situées à moins d'une dizaine de mètres de la jonction entre la paroi plane et la paroi circulaire.

D'autre part, afin que les parties circulaires de la paroi puissent s'appuyer sur les dalles espacées de 7 à 10 m, les armatures de la paroi moulée doivent remplir le rôle de linteau vertical. Par conséquent, des cages de près de 30 t ont été mises en place aux quatre points de jonction entre la paroi circulaire, la paroi plane et les dalles.

Ces cages présentent, de plus, une forme s'adaptant parfaitement à la forme de la paroi, afin de réduire au maximum les zones non armées (figure 13).



13

© SOLETANCHE BACHY

CONCLUSION

Aujourd'hui, les terrassements de l'ouvrage spécial 1302 sont terminés et le radier a été coulé.

Ce dernier a fait l'objet d'une variante technique : d'un radier classique, nous sommes passés à un radier-voûte qui, par sa géométrie, a permis d'en

13- Coupe type d'une cage "linteau".

13- Typical section of a "lintel" reinforcing cage.

optimiser l'épaisseur et le ferrailage. Par ailleurs, les éléments de la tête de coupe du premier des 3 tunneliers du groupement Horizon sur le lot T2A sont arrivés sur le site de la friche Arrighi. Le tunnelier doit parcourir une distance de 4300 m et ressortir à la station de Villejuif - Louis-Aragon. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

LINÉAIRE DE PAROI : 215 m
PROFONDEUR DE LA PAROI : 56 m
SURFACE : 11 483 m²
BÉTON : 18 219 m³
ACIER : 700 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris
MAÎTRE D'ŒUVRE : Systra
ASSISTANT MAÎTRISE D'OUVRAGE : Artemis (groupement Arcadis ESG, Artelia)
CONTRÔLE TECHNIQUE (OCTA) : Groupement Bureau Veritas / Apave
GROUPEMENT : Horizon Grand Paris (Bouygues Travaux Public, Soletanche Bachy France, Bessac, Soletanche Bachy Tunnel)

ABSTRACT

GRAND PARIS - LINE 15 SOUTH: OS 1302 P - DIAPHRAGM-WALL STARTING SHAFT FOR TUNNEL BORING MACHINES

AYMERIC BOFFA, SOLETANCHE BACHY - LAURE DELVA, SOLETANCHE BACHY

Société du Grand Paris commissioned the Horizon consortium for execution of work section T2A on Line 15 South. One of the main structures of the work section is OS 1302P, which is located on the edge of the Seine on former industrial waste land known as the "friche Arrighi". OS 1302 is key to the work section T2A project, because it is the starting shaft for two tunnel boring machines: TBM 4 which drills the section up to Villejuif - Louis-Aragon, and TBM 2 which drills the section up to Créteil-L'Échat Station. The structure executed by the diaphragm wall technique is 1.50 metres thick and has a rather peculiar shape which required finite element modelling. It consists of two lobes of inner diameter 26 metres, linked by two straight walls 21 metres long. To limit drainage flow rates, the diaphragm walls are anchored in the Lutetian limestone at a depth of 56 metres. □

GRAND PARIS - LÍNEA 15 SUR: OS 1302 P - POZOS DE SALIDA DE LAS TUNELADORAS CON PANTALLAS DE HORMIGÓN

AYMERIC BOFFA, SOLETANCHE BACHY - LAURE DELVA, SOLETANCHE BACHY

La empresa Société du Grand Paris ha encargado al consorcio Horizon la realización del lote T2A de la Línea 15 Sur. Una de las principales obras del lote es el OS 1302P, situado a orillas del Sena, en un antiguo polígono industrial llamado «polígono Arrighi». El OS 1302 es un elemento clave del proyecto del lote T2A, dado que es el pozo de salida de dos tuneladoras: la tuneladora 4, que perfora el tramo hasta Villejuif - Louis-Aragon, y la tuneladora 2, que perfora el tramo hasta la estación de Créteil-L'Échat. La obra, realizada con pantalla de hormigón de 1,50 m de espesor, tiene una forma bastante particular que ha necesitado una modelización de elementos finitos. En efecto, está formada por 2 lóbulos de 26 m de diámetro interior unidos por dos 2 paredes rectilíneas de 21 m de largo. Para limitar los caudales de achicamiento, las pantallas de hormigón están ancladas en la roca calcárea bruta a 56 m de profundidad. □

AUSCULTATION ET MONITORING : QUAND LA QUALITÉ DE LA MESURE EST CLÉ



Auscultation topographique manuelle de convergence



Mesures inclinométriques en forage.

Correctement réalisés, auscultation et monitoring apportent sécurité et tranquillité d'esprit aux entreprises de travaux, aux maîtres d'œuvre et aux maîtres d'ouvrage.

La réussite des chantiers de monitoring dépend de quatre facteurs essentiels qu'il ne faut pas perdre de vue.

EXPÉRIENCE DE L'ENTREPRISE

La mise en place et la maintenance des systèmes de mesures liés aux travaux urbains est un métier, qui requiert la connaissance d'un état de l'art et l'application de méthodes précises, fruits de l'expérience.

Que l'on parle de techniques de pointe comme les théodolites robotisés dits CYCLOPS, ou de techniques historiques comme les mesures inclinométriques manuelles, la précision du résultat dépend du niveau d'expérience de l'entreprise et des ingénieurs et techniciens chargés des mesures. Sur des théodolites robotisés, la précision de mesure peut être très variable, bien réalisée on obtient une précision de 1 mm, mal exécutée elle peut atteindre 5 à 10 mm. Sur des inclinomètres manuels, on peut facilement obtenir des mesures inutilisables car entachées d'erreur.

MOBILISATION DE L'ÉQUIPE

La recherche de la qualité de mesure requiert un effort permanent de l'ensemble de la hiérarchie. Le directeur du projet, notamment, a un rôle primor-

dial et doit faire face à des exigences pouvant sembler contradictoires. Pourtant, impératifs économiques et pression du planning ne doivent pas s'opposer à la qualité de la mesure qui doit rester l'objectif prioritaire de toute l'équipe.

MOYENS

Bien évidemment, les moyens suffisants doivent être mis en place. Toute insuffisance en la matière peut coûter très cher au final. L'exemple type, ce sont les tâches de maintenance des systèmes automatisés. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, un système de mesure automatique nécessite une surveillance humaine constante. Sans maintenance, les mesures sont rapidement susceptibles de s'arrêter, ou de dériver, ou de perdre en précision.

OUTILS

Les systèmes fournissent des dizaines de milliers de mesures chaque jour qui constituent une importante base de données. Leur analyse simple et rapide est indispensable. Il faut mettre à disposition automatiquement et en temps réel une présentation synthétique des résultats aux ingénieurs chargés des travaux, afin qu'ils en tirent facilement les informations essentielles.

Seul le respect de ces règles de fonctionnement garantit la qualité des mesures nécessaires au bon déroulement des chantiers. Les succès commerciaux récents de SIXENSE Soldata sur plusieurs chantiers du Grand Paris semblent montrer une évolution chez les décideurs vers cette recherche de la qualité de la mesure.

Il faut garder à l'esprit que toute mesure erronée ou imprécise est inutile.

SIXENSE Soldata remercie ses clients du Grand Paris :

Ailes Foundations, Bessac, Botte Foundations, Bouygues Construction, Chantiers Modernes Construction, Demathieu Bard, Dodin Camperon Bernard, Eillage, Franki Foundations, GTS, Guinot, Impienia, Impresa Fizzarotti, Leon Grosse, Razel-Bec, RGE Génie Civil, SADE, Set-Hirator, Société du Grand Paris, Soletanche-Bachy, Soletanche Bachy Tunnels, Spie Batignolles TPCL, Spie Foundations, Vinci Construction France, VINCI Construction Grands Projets



SIXENSE Soldata
Parc de l'île • 21 rue du Port
92022 Nanterre Cedex
contact@sixense-group.com
www.sixense-group.com



1

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

VILLA ENGELIN À MONACO

AUTEURS : CHRISTINE MORLOCK, CHEF DE PROJET, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, ARCADIS - PIERRE-YVES LEBLANC, CHEF DE PROJET, ARCADIS - CHRISTIAN MARCHAT, DIRECTEUR TECHNIQUE STRUCTURE, ARCADIS

LE PROJET VILLA ENGELIN Rassemble des modes de soutènement variés pour établir un soutènement de grande hauteur : microberlinoise tirantée d'une vingtaine de mètres de haut surplombant une paroi moulée d'une trentaine de mètres de profondeur associée à une dalle transfert de forte épaisseur, pièce maîtresse du projet qui a permis d'appliquer la méthode up & down et de réduire ainsi fortement le délai de construction.

PRÉSENTATION DU PROJET ET DE SON ENVIRONNEMENT

La principauté de Monaco a lancé un plan de construction de logements domaniaux dans lequel s'inscrit le projet villa Engelin (figure 1).

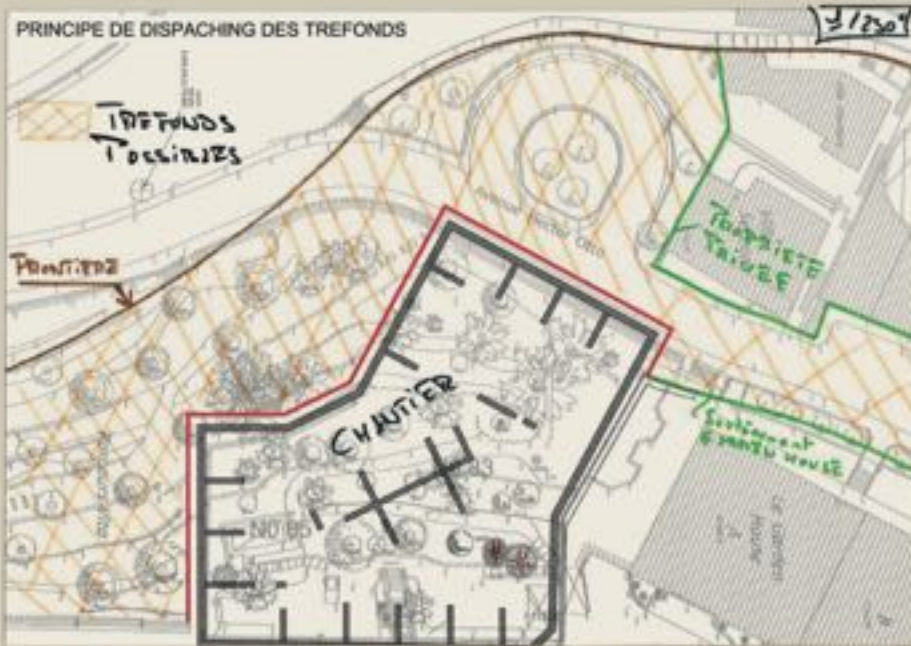
Le projet comporte 31 niveaux dont 9 niveaux de sous-sol, 5 d'entresol et 17 de superstructure. Il est implanté en entrée Ouest de Monaco à côté des serres du jardin botanique et le long de la frontière avec la France.

1- La tour finie.

1- The finished tower.

La réalisation des niveaux de sous-sol et d'entresol a nécessité des terrassements importants avec notamment la réalisation d'une microberlinoise tirantée pour le soutènement de l'avenue Hector Otto afin de permettre la

LOCALISATION DU TERRAIN



© RAPPORT ARCADIS

2

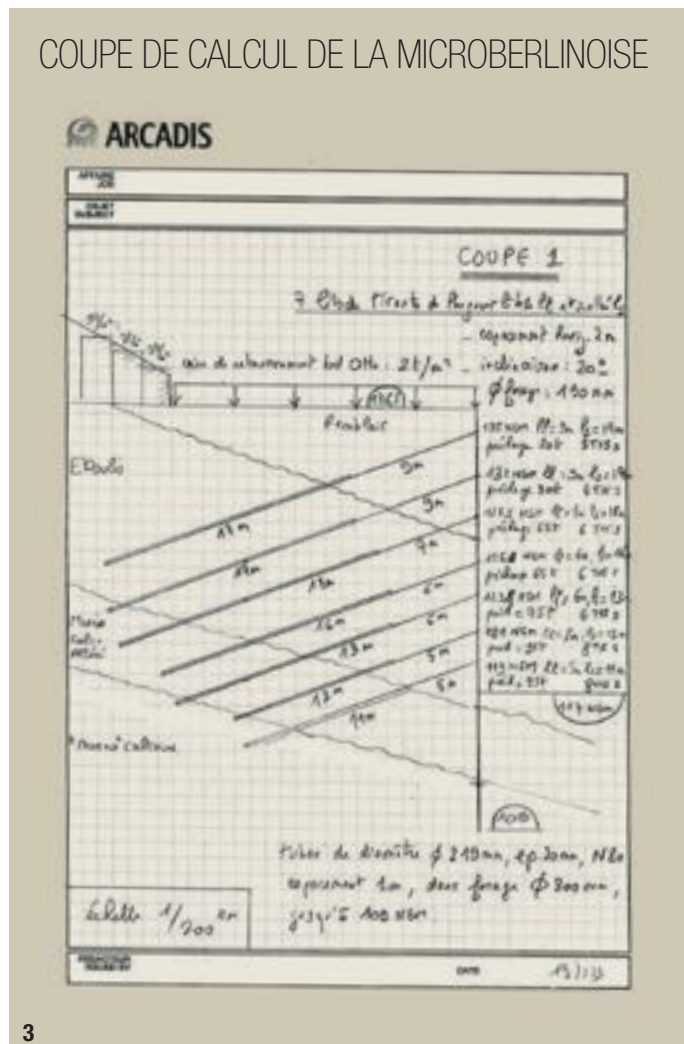
2- Localisation du terrain.
3- Coupe de calcul de la microberlinoise.

2- Location of the land.
3- Design section of micropile Berlin wall.

réalisation des niveaux entresols et d'une paroi moulée pour la création des sous-sols. L'entreprise Smetra (du groupe monégasque Caroli) a réalisé l'ensemble des travaux (soutènement et superstructure). Arcadis était l'ingénierie technique du maître d'œuvre de l'opération et a également réalisé, pour le compte de l'entreprise générale, les études d'exécution dans le but d'optimiser la durée des travaux.

Le projet Villa Engelin s'inscrit sur un terrain d'une surface limitée à 1400 m², en site urbain très contraint. En effet, le terrain se situe à la frontière entre la France et la principauté de Monaco, en mitoyenneté avec les serres du jardins botaniques à l'ouest et la résidence du Garden House à l'est ainsi que des voiries au nord et au sud (boulevard Hector Otto et boulevard des Jardins Exotiques) (figure 2).

COUPE DE CALCUL DE LA MICROBERLINOISE



3

© RAPPORT ARCADIS

Le terrain présente un dénivelé de 22 m du terrain naturel sur la parcelle. Sur ce dénivelé, le projet prévoit la création de 5 niveaux d'entresol, ce qui nécessite la réalisation d'une importante microberlinoise tirantée.

En plus, neuf niveaux de sous-sol pour la création de parkings seront terrassés à l'abri d'une paroi moulée périphérique réalisée à partir d'une plateforme située au niveau du point bas du terrain. Cela amène à une hauteur de soutènement globale de l'ordre de 50 m.

Le délai de réalisation très serré (un démarrage des travaux en juillet 2015 pour une livraison prévue initialement à l'été 2018 et avancée à décembre 2017) a orienté la technique de terrassement et construction selon la méthode *up & down*, c'est-à-dire que les travaux de terrassement et de gros œuvre du sous-sol se sont faits en même temps que la superstructure.

MICROBERLINOISE TIRANTÉE

Un soutènement par microberlinoise tirantée a été réalisé sur le talus amont du terrain, en contrebas du boulevard Hector Otto.

Ce soutènement a une hauteur de l'ordre 19 m et il est composé :

- De micropieux forés en diamètre 300 mm descendus une dizaine de mètres sous le fond de fouille et équipés de tubes en acier (Nuance 500 MPa) de diamètre extérieur 168, 219 ou 252 mm et d'épaisseur 28, 20 ou 19 mm, selon les profils ;
- D'un voile en béton projeté d'une épaisseur de 0,35 m avec nappes de treillis soudés ST65 ;
- De tirants provisoire IGU (injection globale et unitaire) forés en diamètre 190 mm, inclinés à 20° par rapport à l'horizontale, équipés de câbles T15S (de nuance d'acier 1860 MPa) de longueur variable.

Les micropieux ont été réalisés depuis la partie haute du terrain avant les terrassements. Les tirants sont faits par lignes lors de 8 passes de terrassement, de hauteur variable de 1,5 à 3 m (figures 3 à 5).

En phase définitive, les tirants sont détendus au fur et à mesure de la construction de la superstructure, des éléments en béton armé en prolongement des planchers viennent butonner la paroi. L'ensemble a été dimensionné au séisme.

Pour capter les venues d'eau possible, des nappes drainantes (Enkadrain) ont été mises en place sur 30 % de la surface de la paroi.



4

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

4- Vue
d'ensemble
du chantier.
5- Micro-
berlinoise.

4- General
view of the
project.
5- Micropile
Berlin wall.

Des barbacanes régulièrement réparties permettent d'évacuer l'eau vers un exutoire pérenne.

CONCEPTION ET EXÉCUTION DE LA PAROI MOULÉE

À la suite de la réalisation de la paroi micro-berlinoise, les parois moulées ont été réalisées à partir du niveau bas du boulevard du Jardin Exotique.

Pour les calculs, on a retenu 9 coupes de calculs différentes en fonction des sols et, notamment, des charges apportées par les avoisinants.

Cette paroi de hauteur 25 m auxquels il faut rajouter 3 m de fiche, se com-



5

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS



6



7

pose de panneaux d'épaisseur 0,80 m et de longueur 2,80 m. Elle est ferrillée pour reprendre les efforts de poussée statique des terrains mais aussi ceux dus au séisme dont le risque est important en principauté de Monaco.

Le phasage de réalisation en *up & down* a demandé notamment de réaliser les planchers d'infrastructures suspendus les uns aux autres. De ce fait la paroi moulée a été butonnée par les planchers de parking tant en phase provisoire qu'en phase définitive, les voiles intérieures des parkings ont été réalisés avant les terrassements sous forme de barrettes et ont donc

6- Creusement de la paroi moulée.

7- Vue générale du chantier.

8- Terrassement des sous-sols.

9- Technique *up & down*.

6- Diaphragm wall excavation.

7- General view of the site.

8- Basement earthworks.

9- Up & down technique.

pu servir d'appuis pour les planchers. Une optimisation structurelle a permis d'ouvrir des passes de terrassement de hauteur 5,80 m offrant ainsi plus de liberté à la réalisation du plancher et au terrassement en taupe. Cette technique a permis de s'affranchir de tirants et de butons (figures 6 à 9).

Ainsi ces choix constructifs ont permis d'avoir un impact favorable sur le délai de la construction.

DALLE DE TRANSFERT

À partir de l'arase supérieure des parois moulées décrites ci-dessus, des voiles d'épaisseur identique ont été réalisés

créant ainsi le premier niveau d'entresol. Ces voiles ont été surmontés d'une dalle transfert d'épaisseur 1,50 m, qui est une des pièces maîtresses du projet. Cette dalle a été le point de départ du phasage en *up & down* permettant ainsi de transférer les efforts de la superstructure à l'infrastructure à la fois en phase provisoire et en phase définitive. Une étude et un dimensionnement spécifique ont été menés avec le fournisseur de coffrage afin de limiter au maximum les flèches au coulage et au décoffrage.

Cette dalle se situe à la cote 123.5 NGM, soit 6,5 m au-dessus du terrain naturel dans ce secteur (boulevard des Jardins Exotiques à la cote 117 NGM), d'où la technique utilisée pour la réalisation des voiles (figure 10).

CONTRÔLE ET SUIVI

Pendant le chantier (figure 5), de nombreux contrôles et suivis ont été réalisés pour s'assurer de la stabilité de la paroi et des mitoyens. Pour cela, il a été mis en place :

- Des inclinomètres ;
- Des cibles topographiques en tête de paroi puis régulièrement sur la paroi ;
- Des cibles topographiques sur les façades des bâtiments mitoyens.

Ces cibles étaient relevées de façon continue à l'aide d'un théodolite automatique.

Les mouvements étaient analysés de façon hebdomadaire par l'entreprise et la maîtrise d'œuvre. Aucun mouvement significatif n'a été observé pendant les travaux. ▸



8



9



10

© PHOTO THÉQUE ARCADIS

10- Vue générale de la dalle transfert et des voiles en cours de ferrailage et bétonnage.

10- General view of the transfer slab and shear walls undergoing reinforcement and concreting.

Les seuils de déplacements imposés dans le CCTP n'ont jamais été atteints ni dépassés.

D'autre part, des essais de contrôles sur les clous ont été menés conformément au CCTP et selon la norme NF P94-153. Ils étaient tous conformes. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE :

Direction des Travaux Publics de Monaco

MAÎTRISE D'ŒUVRE :

Groupement Architectes F + e + o (Arch Monaco + Emmanuel et Olivier Déverini) - Arcadis (BET Technique) - Eodd (BET HQE)

ENTREPRISE LOT 1.10

(Terrassements - Soutènements - Généraux) : Smetra-Alberti (Groupe Caroli)

INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE (mission géotechnique G3) : Arcadis

INGÉNIERIE STRUCTURE (Exécution) : Arcadis

PRINCIPALES QUANTITÉS

VOLUME DE DÉBLAIS TERRASSÉS : 51 500 m³

MICROPIEUX : 2 400 m

TIRANTS : 6 400 m

PAROI MOULÉE : 4 750 m²

BARRETTES : 2 630 m²

DALLE DE TRANSFERT :

• Épaisseur : 1,50m

• Béton : 2 333 m³

• Aciers : 404 t

ABSTRACT

VILLA ENGELIN IN MONACO

CHRISTINE MORLOCK, ARCADIS - PIERRE-YVES LEBLANC, ARCADIS - CHRISTIAN MARCHAT, ARCADIS

The Villa Engelin project was able to be completed in a very short time frame, even though it is situated on a narrow area of land with a very big difference in altitude (22 m). The very high retaining structure at the back of the site (50 m) was provided by an anchor-tied micropile Berlin wall (8 layers of tie anchors) about twenty metres high to establish a work platform from which a diaphragm wall about thirty metres deep was constructed. A very thick transfer slab, built as a superstructure 6.5 m above the diaphragm wall, formed the cornerstone of the project, making it possible to build by the up & down technique, executing simultaneously the 9 basement levels on one side and the 5 mezzanine levels on the other side, then the 17 superstructure levels. Thanks to this method, the project was completed more than six months ahead of schedule. □

VILLA ENGELIN EN MÓNACO

CHRISTINE MORLOCK, ARCADIS - PIERRE-YVES LEBLANC, ARCADIS - CHRISTIAN MARCHAT, ARCADIS

El proyecto Villa Engelin ha podido realizarse en un plazo muy breve pese a estar implantado en un terreno exiguo y con un desnivel muy pronunciado (22 m). El muro de contención de gran altura pendiente abajo (50 m) se ha llevado a cabo mediante una microberlinesa atirantada (8 lechos de tirantes) de unos veinte metros de altura para crear una plataforma desde la cual se ha realizado una pantalla de hormigón de unos treinta metros de profundidad. Una losa de transferencia de gran espesor, construida en superestructura a 6,5 m por encima de la pantalla de hormigón, ha sido la pieza maestra del proyecto: ha permitido realizar simultáneamente, mediante la técnica up & down, los 9 niveles de sótano, por una parte, y los 5 niveles de entresuelo, por otra, y seguidamente los 17 niveles de superestructura. Gracia a este método, la obra ha terminado con más de seis meses de antelación respecto al calendario previsto. □

L'ASSUREUR DES PROFESSIONNELS DE LA CONSTRUCTION

Retrouvez toutes
nos solutions
d'assurance sur
www.auxiliaire.fr

Entreprises
de bâtiment

Entreprises
de travaux publics

Maîtres d'œuvre
et architectes

Fabricants
et négociants

Maîtres
d'ouvrage





1
© GEOS

DÉVIATION DE LA RN19 À BOISSY-SAINT-LÉGER

AUTEURS : ARNAUD JUIGNET, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - CÉLINE LEFÈVRE, INGÉNIEUR PRINCIPAL, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - YVES LE FLOC'H, DIRECTEUR TRAVAUX, INGEROP - JULIEN KIRMAIER, INGÉNIEUR HYDROGÉOLOGUE, ARCADIS

LA RÉALISATION DE LA DÉVIATION DE LA RN19 À BOISSY-SAINT-LÉGER A POUR OBJECTIF D'AMÉLIORER LES CONDITIONS DE CIRCULATION ET LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE DANS LA TRAVERSÉE DE LA COMMUNE. LES TRAVAUX COMPRENNENT NOTAMMENT LA CONSTRUCTION D'UNE TRANCHÉE OUVERTE, D'UNE TRANCHÉE COUVERTE, D'UN PASSAGE SUPÉRIEUR AINSI QUE DES TERRASSEMENTS POUR PERMETTRE LA MISE EN PLACE DE LA NOUVELLE SECTION DE ROUTE À 2x2 VOIES. ILS S'INSCRIVENT DANS UN CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DÉLICAT, NÉCESSITANT DES ADAPTATIONS PARTICULIÈRES.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

L'opération de déviation de la RN19 se situe dans le département du Val-de-Marne (94), sur la commune de Boissy-Saint-Léger, dans sa section comprise entre la RN406 à Bonneuil-sur-Marne et la RD94E à Villecresnes.

Ce projet constitue la première étape d'un programme global consistant en l'aménagement de la RN19 en voie

express sur la totalité du barreau de liaison entre la RN406 et la RN104 (Francilienne).

Les caractéristiques actuelles de la RN19 ne lui permettent pas d'assurer sa fonction de desserte du quart Sud-Est de l'agglomération parisienne de manière fluide, sécurisée et sans nuire au cadre de vie des communes traversées, notamment Boissy-Saint-Léger. Pour réduire les nuisances que connaît

1- Travaux de parois moulées de la tranchée ouverte - 09/2017.

1- Diaphragm wall works for the open cut - 09/2017.

cette commune, le projet de déviation de la RN19 permet de délester le centre-ville de Boissy-Saint-Léger d'un trafic très important de transit (60 000 véhicules par jour pour les deux sens de circulation cumulés) et de soulager les villes environnantes d'une circulation parasite importante découlant des encombrements actuels de la RN19. Outre l'optimisation des trajets, l'opération vise à augmenter la sécurité des

VUE EN PLAN GÉNÉRALE DU PROJET



© INGEROP/ARCADIS

2

usagers mais également à améliorer le cadre de vie des riverains par l'éloignement du trafic du centre de Boissy. Le projet de déviation comprend la réalisation de 3 km de 2x2 voies, partiellement en tranchée couverte et ouverte (figure 1), avec deux échangeurs (un diffuseur au niveau du croisement avec les voies du RER A et un demi-diffuseur au niveau de l'entrée Sud de Boissy-Saint-Léger).

Le projet comporte 1,5 km à 3 voies dans le sens Paris-Provence afin d'intégrer une voie pour véhicules lents. En phase de réalisation, le projet est scindé en trois marchés de travaux principaux (figure 2) :

2- Vue en plan générale du projet.
3- Profil en long géologique du projet.

2- General plan view of the project.
3- Geological longitudinal profile of the project.

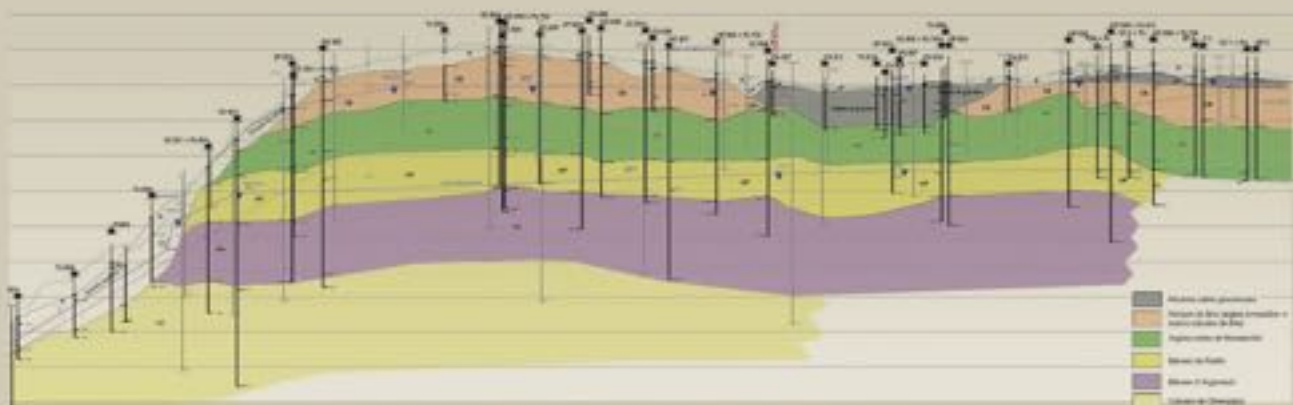
- **Marché 1** : la tranchée couverte d'environ 760 m et les équipements ;
- **Marché 2** : la tranchée ouverte d'environ 450 m et le diffuseur de Boissy-Sud ;
- **Marché 3** : le diffuseur du RER, la section courante et la rampe Nord d'accès à la tranchée.

Les aménagements paysagers font l'objet d'une maîtrise d'œuvre spécifique et donneront lieu à un marché dédié au traitement paysager de l'espace libéré au-dessus de la tranchée couverte et des talus de la rampe Nord. Le planning des travaux est le suivant :

- **Marché 1** : 2014-2017 (génie civil, terrassement et chaussées)/2018-2020 (équipements en tranchée couverte : ventilation, éclairage, équipements d'exploitation) ;
- **Marché 2** : 2017-2019 ;
- **Marché 3** : 2018-2020.

La fin des travaux préalables à la mise en service de la déviation de la RN19 est prévue en décembre 2019, mais des travaux de mise au profil définitif des bretelles des diffuseurs de Boissy-Sud et du RER seront ensuite nécessaires pour achever le projet au premier semestre 2020. Cet article s'intéresse en particulier aux marchés de travaux 2 et 3 dont les travaux sont actuellement en cours. ▷

PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE DU PROJET



© INGEROP/ARCADIS

3

PIEZOMÉTRIE AVANT TRAVAUX SIMULÉE AU NIVEAU DU PLATEAU DE BOISSY-SAINT-LÉGER

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Le projet s'inscrit en partie au bord du plateau de Brie (tranchée) et en partie sur le versant et en pied de celui-ci (rampe et section courante).

La succession géologique au niveau du plateau est la suivante (figure 3) :

- Des formations superficielles : Remblais/Limons des Plateaux, sur une épaisseur comprise entre 1 et 2 m ;
- Le Calcaire de Brie, sur une épaisseur pouvant atteindre 7 m ;
- L'Argile Verte, sur une épaisseur comprise entre 6 et 8 m ;
- Les Marnes de Pantin, sur une épaisseur comprise entre 5 et 7 m ;
- Les Marnes d'Argenteuil, sur une épaisseur comprise entre 10 et 12 m ;
- Le Calcaire de Champigny.

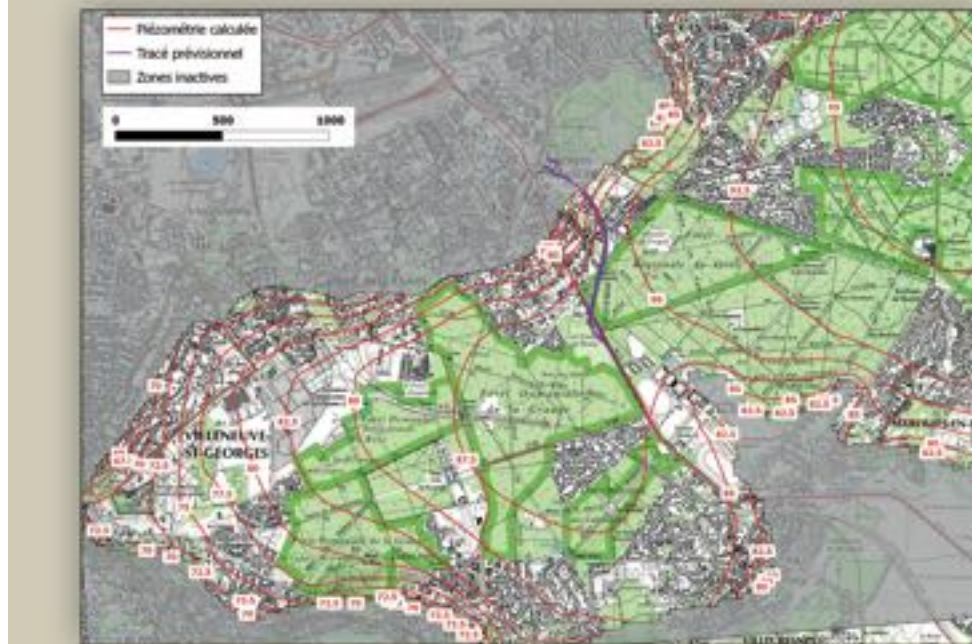
Dans le versant, les reconnaissances ont mis en évidence la présence d'Éboulis de nature sableuse à argilo-marneuse (matériaux glissés mêlant Argile Verte, Calcaire de Brie, Limons des Plateaux) surmontant les Marnes de Pantin, les Marnes d'Argenteuil et le Calcaire de Champigny. Les Éboulis sont progressivement remplacés par des Alluvions dans la vallée de la Marne.

Du point de vue hydrogéologique, les formations en présence contiennent deux nappes distinctes, séparées par l'horizon imperméable de l'Argile Verte :

- Une nappe superficielle dans les Alluvions et le Calcaire de Brie, soutenue par l'Argile Verte ;
- La nappe des Marnes de Pantin, soutenue par les Marnes d'Argenteuil.

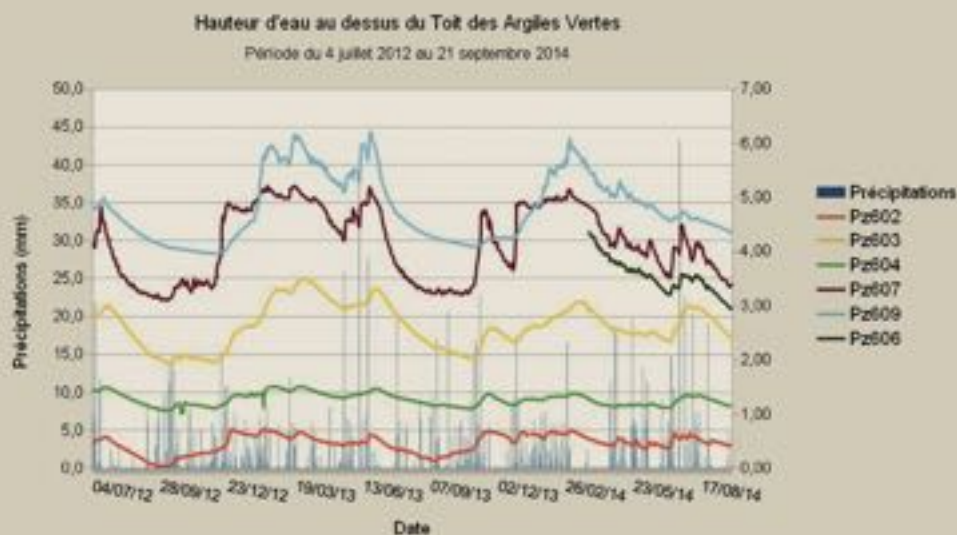
Le Calcaire de Brie est une formation aquifère contenant une nappe libre alimentée par les précipitations qui circulent dans la porosité de fissures (fractures) de la roche. Cette nappe s'écoule depuis le centre du plateau jusqu'aux coteaux où elle est drainée à l'interface avec l'Argile Verte sous les Éboulis (figure 4a). Ces écoulements étaient autrefois captés par des sources (ex. : lavoir de Boissy) que l'urbanisation de la zone a fait disparaître.

Le suivi piézométrique étendu en place depuis 1995 a été complété lors des travaux par des piézomètres proches de l'ouvrage dont certains équipés de capteurs automatiques. L'extension de l'urbanisation de la zone a engendré une baisse sensible du niveau piézométrique moyen à long terme sur le plateau. Le suivi automatique révèle une forte réactivité de la nappe après les pluies (figure 4b).



4a

FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES ET PLUVIOMETRIE 2012-2014



4b

Le Calcaire de Brie a été complètement érodé jusqu'à l'Argile Verte au niveau de l'interface des marchés 1 et 2 sur environ 350 m. Le talweg ainsi créé a été comblé par des Alluvions grossières (sables et graviers).

La formation des Marnes de Pantin est partiellement saturée et n'est pas significativement affectée par le projet, de même que le Calcaire de Champigny.

PROBLÉMATIQUES / SOLUTIONS RETENUES

Du sud vers le nord, le projet se situe d'abord dans la forêt régionale de Grosbois, puis en zone urbaine avant de rejoindre l'échangeur du RER et le tracé de la RN 19 actuelle vers la

4a- Piézométrie avant travaux simulée au niveau du plateau de Boissy-Saint-Léger.

4b- Fluctuations piézométriques et pluviométrie - 2012-2014.

4a- Simulated piezometric measurements before the works on the Boissy-Saint-Léger platform.

4b- Piezometric fluctuations and rainfall - 2012-2014.

RN 406. Afin de limiter les nuisances vis-à-vis des riverains, la partie urbaine est en tranchée couverte. Celle-ci se raccorde à la RN 19 par la rampe au nord et par la tranchée ouverte au sud. La ligne rouge du projet atteint une profondeur de l'ordre de 14 m pour la tranchée couverte ainsi que pour la rampe Nord, et de l'ordre de 10 m pour la tranchée ouverte.

TRANCHÉE OUVERTE

Pour la tranchée, les terrassements concernent les formations superficielles (Remblais et Limons des Plateaux), les Alluvions, le Calcaire de Brie, l'Argile Verte et ponctuellement les Marnes de Pantin, à l'extrémité Nord.



5

© GEOS

Compte tenu des hauteurs à soutenir et de la présence de la nappe superficielle du Calcaire de Brie, la tranchée a été réalisée en parois moulées, butonnées pour la tranchée couverte (par des butons métalliques définitifs aux extrémités et par la dalle de couverture en partie centrale) et tirantées pour la tranchée ouverte.

Les parois moulées de la tranchée ouverte sont ancrées dans les Marnes de Pantin et les Marnes d'Argenteuil (pour la partie la plus profonde).

Les tirants sont constitués de 5 à 7 torons de précontrainte T15,7 ancrés dans les Marnes de Pantin et préchargés afin de limiter les déplacements du soutènement. Leur longueur totale est comprise entre 26 et 42 m du fait de leur inclinaison comprise entre 25 et 45° et de la profondeur des Marnes de Pantin. Le scellement est réalisé par injection de coulis de type IRS (Injection Répétitive et Sélective). Les sections en parois moulées du pro-

5- Ouvrage d'art PS10 - 01/2019.

6- Forage des parois moulées de la tranchée ouverte - 09/2017.

7- Poutre de couronnement et tirants en attente de mise en tension - 05/2018.

5- Engineering structure PS10 - 01/2019.

6- Drilling diaphragm walls for the open cut - 09/2017.

7- Capping beam and tie anchors pending tensioning - 05/2018.

jet recoupe complètement l'aquifère du Calcaire de Brie et engendrerait sans dispositions adaptées un effet barrage d'ampleur plurimétrique préjudiciable aux habitations avoisinantes : remontée de la nappe à l'est de l'ouvrage pouvant inonder les caves, baisse à l'ouest susceptible d'induire des tassements.

Un dispositif de franchissement passif constitué de tranchées drainantes situées de part et d'autre de l'ouvrage et reliées par des siphons transitant sous la chaussée de la future RN19 permet de rétablir la continuité hydraulique de l'aquifère en phase définitive. Les tranchées drainantes et les collecteurs sont conçus et réalisés pour éviter leur colmatage par la précipitation des carbonates : les tranchées sont remplies de matériaux siliceux, le drain collecteur au fond de chaque tranchée est placé à proximité du sommet de l'Argile Verte afin d'être toujours en eau. Les tranchées drainantes amont

et aval sont discontinues de façon à ne pas perturber l'écoulement naturel de la nappe. Les regards de visite et d'entretien sont placés tous les 80 à 100 m environ sans rupture de pente entre deux regards successifs pour faciliter leur entretien ultérieur. Les tirants étant réalisés après les tranchées drainantes, des tubages métalliques sont préalablement mis en place et descendus jusqu'au toit de l'Argile Verte afin de ne pas polluer les matériaux drainants avec les coulis de scellement.

Chacun des neuf siphons qui relient les sections de tranchées drainantes situées à l'amont et à l'aval de l'ouvrage passe sous la chaussée dans un ouvrage cadre ou une buse et remonte au niveau des issues de secours situées en vis-à-vis. Le débit global attendu à travers les siphons est de l'ordre de 10 m³/h et la différence de charge résultante entre est et ouest de l'ouvrage reste de l'ordre du battement annuel moyen de la nappe (0,5 m). ▷



6

© GEOS



7

En extrémité Sud, les parois moulées ont été prolongées par une paroi au coulis, descendue jusqu'à l'Argile Verte, qui coupe les arrivées d'eau de la nappe du Calcaire de Brie. Cette disposition permet de réaliser les terrassements du déblai de l'extrémité Sud du projet hors d'eau et empêche les arrivées d'eau dans les talus en phase d'exploitation.

Une grande partie de l'arase des terrassements au niveau de la tranchée est constituée par l'Argile Verte. Afin d'éviter des désordres sur les chaussées du fait du gonflement de cette formation sujette à ce phénomène, une géomembrane surmontée d'une couche de matériaux drainants est mise en place sur l'arase avant la couche de forme. Cette disposition permet de capter les eaux de ruissellement résiduelles et de ne pas les mettre en contact avec les Argiles. La couche de forme est réalisée en matériaux du site, traités à la chaux et au liant hydraulique.

Un ouvrage d'art (PS10) est prévu au-dessus la tranchée ouverte pour rétablir l'accès à Boissy-Saint-Léger en provenance de la Province. Il s'agit d'un pont-dalle en béton armé, comportant deux travées d'un peu plus de 23 m de longueur chacune avec un appui intermédiaire (figure 5). Le tablier, de 50,6 m de longueur et de 12,7 m de largeur droite, présente un biais important de 39 grades. Les culées de l'ouvrage sont constituées par les parois moulées de la tranchée surmontées de chevêtres. Trois panneaux de paroi moulée, liaisonnés par une poutre de couronnement, sont réalisés pour établir l'appui intermédiaire (pile sur barrettes de fondation).



8a



8b

Une bache de rétention et une bache incendie sont prévues, sous la future chaussée, à l'interface entre la tranchée ouverte et la tranchée couverte. La bache de rétention collecte les eaux de ruissellement de la tranchée ouverte qui sont pompées et refoulées par un réseau spécifique en tranchée couverte jusqu'à un bassin d'assainissement à ciel ouvert. La bache incendie collecte les eaux de lavage ou d'incendie de la tranchée couverte.

RAMPE NORD

Pour la rampe Nord, les terrassements, pouvant atteindre 14 m de hauteur, concernent les Éboulis, les Marnes de Pantin, les Marnes d'Argenteuil et le Calcaire de Champigny et sont en interaction avec les écoulements de versant. Compte tenu de la nature argilo-marneuse des sols et de leurs caractéristiques mécaniques médiocres, les pentes retenues pour les talus situés côté Ouest sont de 3H/1V et, à proximité de la tranchée couverte, de 2H/1V avec mise en place d'un masque poids. Deux à trois niveaux de tranchées drainantes sont exécutés au niveau de risbermes intermédiaires afin

8a- Tranchée blindée pour la réalisation des tranchées drainantes - 05/2018.

8b- Lit de pose, drain et massif drainant au fond d'une tranchée blindée - 09/2017.

9a- Réalisation d'un tirant d'essai - 09/2017.

9b- Essai de tirant à la rupture - 10/2017.

8a- Shielded trench for execution of the drainage trenches - 05/2018.

8b- Pipe bed, drain and draining mass at the bottom of a shielded trench - 09/2017.

9a- Execution of a trial tie anchor - 09/2017.

9b- Tie-anchor breaking test - 10/2017.

de capter les circulations d'eau souterraine. Un soutènement en sol renforcé est réalisé côté Est, afin de limiter les emprises en phase définitive. Celui-ci dispose d'une base drainante et d'un dispositif de drainage amont mis en place à l'interface avec le talus provisoire afin de capter les arrivées d'eau du versant.

Les sols tassés en déblais sont constitués de sols fins marneux (classe GTR A3 principalement avec également des sols de classes A1, A2, A4 dans de faibles proportions), avec localement des sols plus sableux (classes B2, B5, B6). Les déblais sont réemployés en remblais et en couche de forme après traitement (à la chaux seule en remblais, à la chaux et au liant hydraulique en couche de forme).

Le marché 3 comprend également la réalisation d'un bassin d'assainissement à ciel ouvert dans la boucle du diffuseur du RER.

EXÉCUTION DES TRAVAUX MARCHÉ 2

La réalisation des travaux du marché 2 a commencé début 2017. Le maintien de la circulation sur la RN 19 induit un



9a



9b



10a

© GEOS

phasage complexe avec des basculements de chaussées.

Des sondages de reconnaissance complémentaires ont été réalisés pendant la période de préparation afin d'affiner le maillage antérieur ainsi que les modèles géotechniques à prendre en compte lors des études d'exécution. Riche du retour d'expérience du marché 1, au cours duquel des difficultés de forage des parois moulées ont été rencontrées du fait de la présence de blocs de meulière dans le Calcaire de Brie, le groupement d'entreprises titulaire du marché 2 a conduit une campagne de sondages à la tarière sur l'ensemble du linéaire des parois et sur toute la hauteur du Calcaire de Brie. Les murettes-guides pour le forage des parois ont ensuite été mises en place. Le forage des parois (1 100 m de parois moulées et 500 m de parois au coulis) a été réalisé par deux ateliers pendant une durée d'environ douze mois (figure 6).

Les poutres de couronnement en béton armé ont été exécutées après recèpage des parois. Elles comprennent les réservations permettant le forage des tirants et la mise en place des têtes (figure 7). Elles ont pour rôle d'assurer la liaison entre les panneaux de parois moulées et de transmettre aux tirants les efforts liés à la poussée des terres. Les tranchées drainantes ont été réalisées en méthode traditionnelle par havage d'un blindage métallique, puis mise en place du drain et du massif drainant ; un bouchon d'argile surmonté d'une épaisseur métrique de terre végétale recouvre le massif

10a- Bâche de rétention en cours de réalisation - 01/2019.

10b- Passage de nappe en cours de réalisation - 01/2019.

10a- Retention pool undergoing construction - 01/2019.

10b- Ground-water passageway undergoing construction - 01/2019.

drainant jusqu'à la surface (figures 8a et 8b). Le phasage de réalisation a tenu compte des difficultés de reprise entre passes de réalisation successives et de la profondeur à atteindre pour remplir les contraintes de mise en place du drain (profondeur, pente).

Des puits de pompage et de réinjection asservis au niveau de la nappe ont été mis en place pour la phase travaux afin de limiter l'effet barrage des parois et faciliter localement la réalisation des tranchées drainantes. Le suivi piézométrique indique que la mise en service progressive des tranchées drainantes a permis de ramener l'effet barrage de plus de 2 m à environ 0,5 m.

Préalablement aux travaux des tirants définitifs, six tirants d'essais ont été

réalisés afin de confirmer les valeurs de résistance prises en compte lors des prédimensionnements (figure 9a). Les essais à la rupture conduits sur chacun des tirants d'essais (figure 9b) se sont avérés satisfaisants et ont permis de valider l'ancrage dans les Marnes de Pantin.

Le dispositif d'auscultation a été mis en place afin de permettre le suivi des déplacements des parois et la tension dans les tirants au cours des terrassements. Il comprend :

- 12 inclinomètres mis en place dans les parois moulées ;
- 18 cales dynamométriques pour le suivi des tirants ;
- 64 cibles topographiques, réparties en 32 profils de deux cibles situées en tête et à mi-hauteur des parois.

Les terrassements ont été réalisés en grande masse, avec les points particuliers que sont les passages de nappe et les bâches, qui ont nécessité des surprofondeurs locales de terrassement (figure 10b). Des butons métalliques (figure 10a) ont été mis en place pour assurer la stabilité des soutènements au niveau des bâches.

Le PS10 a été coulé au sol, sur un dallage finement surfacé, puis le terrassement sous l'ouvrage a été effectué en taupe.

MARCHÉ 3

La réalisation des travaux du marché 3 a commencé début 2018. Comme pour le marché 2, le maintien de la circulation sur la RN 19 nécessite un phasage complexe avec des basculements de chaussées.



10b

© GEOS


11

© GEOS


12

© GEOS

Des reconnaissances géotechniques complémentaires ont été réalisées, afin notamment de préciser les conditions de réemploi des matériaux de déblai et les formulations de traitement à utiliser. Les formulations, établies sur la base des essais en laboratoire, ont ensuite été validées par des planches d'essais qui ont également permis d'adapter les procédures de compactage des remblais et des couches de forme.

Les travaux ont débuté avec les terrassements en grande masse de la rampe Nord et la réalisation du bassin d'assainissement (figure 11). Le réseau de suivi piézométrique a été complété afin de vérifier le bon fonctionnement des tranchées drainantes du talus Est (rabattement des circulations).

Dans l'objectif d'optimiser le mouvement des terres, différents traitements ont été réalisés sur les sols du site afin

de réutiliser les matériaux. En effet, le traitement des arases de terrassement à la chaux pour les améliorer préalablement à la mise en place des couches de forme traitées à la chaux et au liant hydraulique a permis d'obtenir la classe de plateforme requise (PF3).

L'entreprise a également opté pour l'utilisation des déblais traités à la chaux pour la réalisation du remblai en sol renforcé, en les associant à des renforcements en géosynthétiques spécialement adaptés aux sols présentant un pH élevé (figure 12).

En complément de ces dispositions, l'Entreprise a contracté la mise en place d'un dépôt définitif sur un terrain adjacent à la RN19, ce qui a permis d'exécuter les travaux en circuit fermé, sans recours à des matériaux d'apport et sans évacuation par transport routier.

11- Terrassements de la rampe Nord - 10/2018.

12- Montage du remblai en sol renforcé - 01/2019.

11- Earthworks on the North ramp - 10/2018.

12- Erection of reinforced-soil embankment - 01/2019.

CONCLUSION

Le projet de la déviation de la RN19 à Boissy-Saint-Léger fait appel à un large éventail de techniques (fondations spéciales, traitements de sols, remblais renforcés, ouvrages hydrauliques...) afin de parfaitement maîtriser le contexte et les conditions géotechniques et hydrogéologiques du site et de réduire les impacts de l'ouvrage en phase définitive (emprises et effet barrage notamment). Les ouvrages géotechniques et hydrogéologiques se comportent actuellement conformément aux prévisions établies lors des phases de conception. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : DRIEA Île-de-France - DiRIF - SMR

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Ingerop / Arcadis

GÉOTECHNIQUE : Arcadis / Geos Ingénieurs Conseils

HYDROGÉOLOGIE : Arcadis

ENTREPRISES MARCHÉ 1 : Sogea Tpi / Gtm Tp / Botte Fondations / Vinci Construction Terrassement / Emulithe / Sdel / Cegelec

ENTREPRISES MARCHÉ 2 : Razel-Bec / Nge Fondations / Emulithe

ENTREPRISES MARCHÉ 3 : Vinci Construction Terrassement / Gtm Tp / Wiame Vrd

PRINCIPALES QUANTITÉS

MARCHÉ 2

BÉTON POUR PAROIS MOULÉES : 13500 m³

ACIERS POUR PAROIS MOULÉES : 1100 t

COULIS POUR PAROIS : 2400 m³

TIRANTS : 265 u / 8100 m

TRANCHÉES DRAINANTES : 800 m

DÉBLAIS : 170000 m³

MARCHÉ 3

DÉBLAIS : 250000 m³

MASSIF EN SOL RENFORCÉ : 2000 m² (parement)

SOLS TRAITÉS EN ARASE : 27000 m²

COUCHE DE FORME TRAITÉE : 11000 m³

TRANCHÉES DRAINANTES : 1300 m

ABSTRACT

RN19 DIVERSION AT BOISSY-SAINT-LEGER

ARNAUD JUIGNET, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - CÉLINE LEFÈVRE, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - YVES LE FLOC'H, INGEROP - JULIEN KIRMAIER, ARCADIS

The RN19 diversion project at Boissy-Saint-Léger involves the execution of an open cut, a cut-and-cover, an overpass and earthworks to enable commissioning of the new two-lane dual-carriageway road section over a distance of about 3 km. The works comprise, in particular, the execution of diaphragm walls, anchor ties, a reinforced soil mass and soil treatments to recycle the excavated materials. A system of longitudinal drainage trenches linked by transverse siphons was put in place to ensure the hydraulic transparency of the trench intercepting the Brie Limestone aquifer over its entire height. □

DESVIACIÓN DE LA RN19 EN BOISSY-SAINT-LEGER

ARNAUD JUIGNET, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - CÉLINE LEFÈVRE, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - YVES LE FLOC'H, INGEROP - JULIEN KIRMAIER, ARCADIS

El proyecto de la desviación de la RN19 en Boissy-Saint-Léger incluye la realización de una zanja abierta, un túnel en zanja cubierta, un paso superior y movimientos de tierra para permitir la puesta en servicio de la nueva sección de carretera de 2x2 carriles, de unos 3 km de tramo. Para ello se precisa realizar pantallas de hormigón, tirantes de anclaje, un macizo en sobre suelo reforzado y tratamientos del suelo para aprovechar materiales procedentes de los escombros. Se ha creado un dispositivo de zanjas drenantes longitudinales unidas por sífonos transversales para garantizar la transparencia hidráulica de la zanja que intercepta el acuífero del Calizo de Brie en toda su altura. □



**Comment
protéger
une trémie
d'escalier ?**

PréventionBTP

En direct

Une réponse immédiate à vos questions sécurité
et prévention grâce à nos experts OPPBTP



preventionbtpdirect.fr



PASSEZ SIMPLEMENT À LA PRÉVENTION

OPPBTP
La prévention BTP



1

© RÉGION BRETAGNE

PROJET DE DÉVELOPPEMENT DU POLDER DE BREST : TERRASSEMENTS ET STABILISATION

AUTEURS : RICHARD PINOLI, RESPONSABLE PORTS VOIES NAVIGABLES GÉOTECHNIQUE, ARCADIS - ELISE SALMON, INGÉNIEUR CHARGÉE D'ÉTUDES, ARCADIS - CLÉMENT DAVAUX, DIRECTEUR TRAVAUX, LAGADEC - YANNICK FAGON, CHEF DE PROJET ADJOINT, RÉGION BRETAGNE

APRÈS S'ÊTRE VU CONFIER EN 2007 LA PROPRIÉTÉ DU PORT DE COMMERCE DE BREST, LA RÉGION BRETAGNE A DÉFINI DÈS 2010 UNE STRATÉGIE PORTUAIRE DE DÉVELOPPEMENT VERS DE NOUVELLES FILIÈRES INDUSTRIELLES, NOTAMMENT LES ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES (EMR). ELLE A CONFIE LA MISSION COMPLÈTE DE MAÎTRISE D'ŒUVRE DES AMÉNAGEMENTS TERRESTRES DU PROJET DE DÉVELOPPEMENT DU POLDER DE BREST À UN GROUPEMENT D'INGÉNIERIES EN 2013. LES TERRASSEMENTS ET LA STABILISATION D'UNE ZONE DE 24 ha DU POLDER 124 DE BREST SONT ACTUELLEMENT EN COURS.

VERS DE NOUVELLES FILIÈRES INDUSTRIELLES

C'est en raison de l'augmentation de la taille des navires et de la recherche d'une amélioration des conditions nautiques d'accueil au niveau de certaines souilles des quais du port de Brest et le souhait de se positionner fortement dans le développement des EMR (nécessitant des quais dédiés aux colis lourds et de grandes surfaces portuaires) que la Région Bretagne a lancé

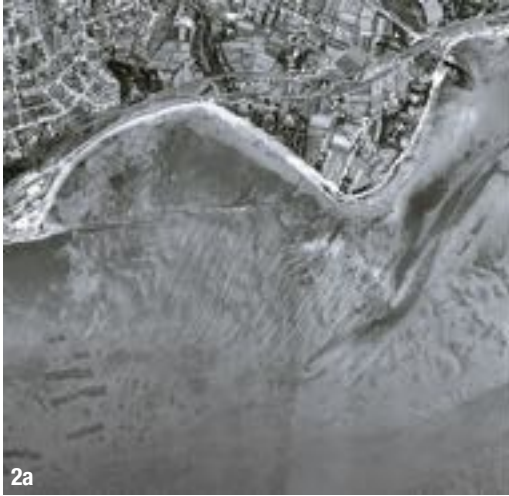
le projet de développement du polder de Brest. Ce projet s'articule autour de deux axes : des travaux maritimes dédiés à la construction d'un quai et d'une digue d'enclôture et des travaux terrestres de confortement et d'extension du polder 124 de Brest. Ce projet regroupe douze marchés de travaux maritimes et terrestres et se terminera en 2021 par le remplissage d'un casier maritime avec les produits de dragage (figure 1).

1- Vue aérienne du polder de Brest le 13/11/2018.

1- Aerial view of the Brest polder on 13/11/2018.

HISTORIQUE DU POLDER 124 DE BREST

Le comblement de l'anse de Saint-Marc s'est fait entre la fin des années 50 et la fin des années 70, par la construction d'un cordon d'enclôture et le remplissage de la zone isolée de la rade par des remblais hydrauliques. La création des derniers polders dont le polder 124 objet des présents travaux a accompagné la construction de la forme de radoub n°3 (décidée



© SITE GEOBRETAGNE.FR

en 1975), pour valoriser les 7,6 millions de mètres cubes de produit de dragage nécessaires à l'aménagement de la forme. À la fin du remplissage du casier par les produits de dragage, les remblais en place n'étaient accessibles qu'à des engins flottants. Aussi, des travaux d'assainissement superficiel des polders 124 et 3 ont été lancés sans succès. Ces terrains ont ensuite été laissés en l'état, avec une tentative de "consolidation superficielle" dont le but était de rendre accessible le site à des engins de chantier.

Entre 2003 et début 2011, des remblaiements par apport terrestre ont été réalisés de manière disparate notamment par l'entreprise Kerleroux gestionnaire de l'installation de stockage de déchets inertes sur la concession présente au sud et à l'est du polder 124 (figure 2).

SYNTHÈSE GÉOTECHNIQUE

Une synthèse des investigations géotechniques réalisées sur le polder 124 de 1977 à 2013 a été effectuée dans le cadre du projet de développement du polder de Brest et a rassemblé les données d'environ 270 sondages géotechniques (pénétrométriques, pressiométriques, carottés, destructifs, CPTu ...) et 150 essais en laboratoire (granulométries, limites d'Atterberg, essais d'identification, de compactage, de compressibilité, œdométriques ...) réalisées lors de 9 campagnes géotechniques.

Cette synthèse a permis de caractériser les différents horizons de sols reconnus :

→ Remblais d'apport terrestres renfermant une proportion très variable de débris de démolition, et de déchets, et dont les épaisseurs sont extrêmement variables ;

2- Vues de l'anse de Saint-Marc en 1952 et 2012.

3- Mise en place de drains verticaux et préchargement.

2- Views of Saint-Marc cove in 1952 and 2012.

3- Placing vertical drains and preloading.

- Remblais hydrauliques constitués d'une argile vasarde plus ou moins sableuse grise et de silt fin sableux (maërl), de très faibles caractéristiques mécaniques et issus des opérations de dragage de 1978 ;
- Alluvions marines se présentant sous la forme d'une alternance d'horizons argileux et sableux renfermant une part de coquillages en particulier à la base du faciès (toutefois la différenciation entre les remblais hydrauliques et les

alluvions en place peut être difficile à réaliser en raison de leur nature et compacité similaires) ;

- Substratum schisteux ou gneissique avec une frange d'altération et dont le toit a une pente orientée nord/sud.

L'ensemble des reconnaissances géotechniques a permis d'établir des modèles géotechniques selon un découpage du polder en huit zones, servant notamment à l'estimation des tassements.

ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Le projet d'aménagement terrestre du polder 124 de Brest a impliqué la gestion préalable des terres polluées dans la couche des remblais d'apports terrestres.

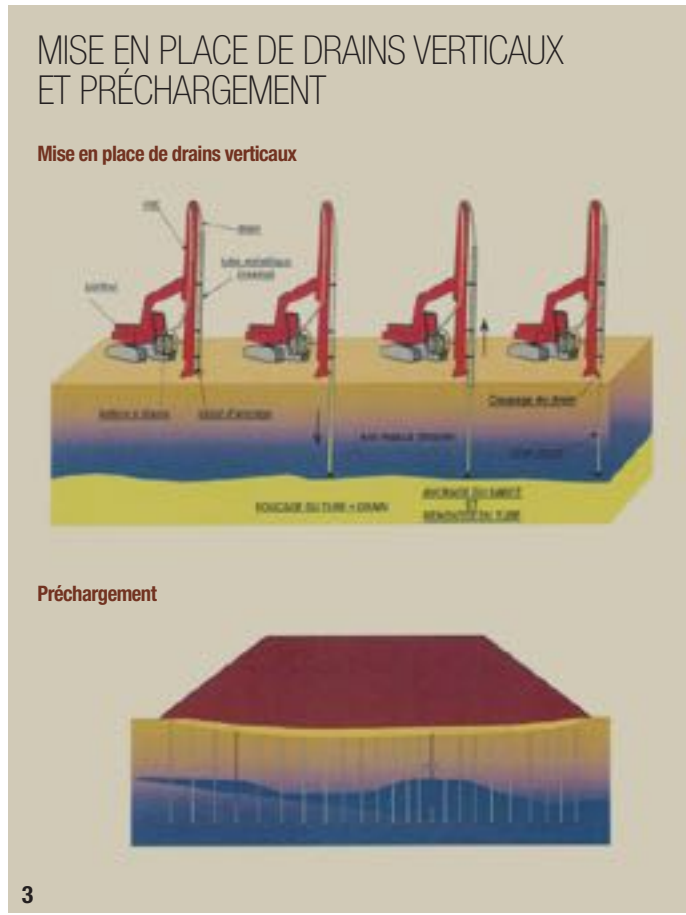
En effet, depuis sa constitution, le polder a été géré par apports de remblais successifs. Une part de ces matériaux était polluée, conduisant à ce qu'une partie du polder puisse présenter des pollutions concentrées ponctuelles et diffuses.

À partir de reconnaissances in-situ, un cabinet spécialisé a réalisé une étude de danger qui a regroupé les matériaux de surface du sites en quatre classes :

- Les matériaux ne présentant pas de trace de pollution ;
- Les pollutions diffuses dont les concertations sont suffisamment faibles pour envisager un simple recouvrement ;
- Les pollutions concentrées diffuses pour lesquelles un confinement dans le merlon paysager avec dispositif d'étanchéité par géomembrane a été retenu ;
- Les pollutions fortement concentrées et localisées pour lesquelles une évacuation et un traitement en centre spécialisé a été effectuée.

Un lot de travaux a été établi pour les terres présentant des pollutions concentrées. Ces matériaux ont été évacués par bateaux aux Pays-Bas, dans un centre spécial, pour être traités par cycles de lavage.

Le principal facteur de transfert des polluants est l'eau. C'est pourquoi, la gestion des eaux pendant les travaux du polder a été un des principaux enjeux environnementaux de ce projet : mise en œuvre d'une station de traitement des eaux (débit de pointe décennal de 4 300 m³/h pour l'unité principale et de 680 m³/h pour l'unité secondaire) pour traiter les eaux des voiries imperméabilisées, suivi de la qualité des eaux de rejet, mise en œuvre de bassins tampons ...



3 © ARCADIS


4

© RÉGION BRETAGNE

CHOIX DE LA TECHNIQUE DE STABILISATION

La technique de stabilisation retenue est le préchargement par mise en œuvre d'un remblai de 3,5 à 4 m de hauteur associé à un drainage vertical pour accélérer la consolidation, l'objectif général étant d'uniformiser la consolidation des sols en place et de mettre en œuvre une plateforme reprenant 4 t/m² avant l'exploitation du site. Néanmoins, des consolidations ultérieures complémentaires seront à réaliser spécifiquement au droit des descentes de charge les plus importantes en fonction des usages des industriels (assemblage sous grue, stockage, roulage ...).

Le drainage vertical est assuré par la mise en place de drains géotextiles préfabriqués (figure 3). Cette technique permet aux pressions interstitielles de s'équilibrer plus rapidement avec la pression hydrostatique du milieu naturel, les sols étant naturellement très peu perméables.

Le préchargement est conduit jusqu'à l'obtention d'au moins 90 % de la consolidation des terrains sous l'action du préchargement, de manière à garantir une surconsolidation des terrains sous les charges d'exploitation. Lors des études d'exécution, les entreprises de travaux ont calculé les tassements correspondant à 90 % de la consolidation des sols en fonction :

- Du temps de préchargement ;
- De la hauteur de terrain compressible suivant les huit différents modèles géotechniques établis dans la synthèse géotechnique ;

- D'un maillage fixé à 2 m par 2 m ;
- D'une charge d'exploitation de 40 kPa ;
- De la hauteur des remblais de préchargement.

Des calculs de tassements ont été menés à partir des coefficients de consolidation verticale et horizontale déterminés au préalable dans la synthèse géotechnique, avec une première approche par des calculs oedométriques et une deuxième approche par des calculs aux éléments finis avec une modélisation axisymétrique des drains.

4- Vue aérienne sur les travaux de terrassements.

5- Coactivité sur le chantier.

**4- Aerial view of earthworks.
5- Concurrent work on site.**

Dans la modélisation axisymétrique, le calcul est mené sur une maille élémentaire cylindrique en considérant le drain comme l'axe de révolution.

Les calculs ont été menés en prenant en compte l'hypothèse d'une préconsolidation des remblais existants sous leur poids propre. Ces deux approches de calculs ont permis d'estimer les tassements obtenus pendant la phase de préchargement (variant de 0,5 m à 1,4 m suivant les zones) et les tassements résiduels obtenus en 10 ans de consolidation sous une


5

© RÉGION BRETAGNE



© RÉGION BRETAGNE
6

charge d'exploitation de 40 kPa (de l'ordre de 5 cm). Le temps de préchargement a été estimé à environ 5 mois pour atteindre 90 % de la consolidation des sols.

TRAVAUX DE TERRASSEMENTS GÉNÉRAUX

Les travaux de terrassement généraux ont été optimisés de manière à minimiser les mouvements de terres et à limiter l'apport de matériaux extérieurs. Dans un premier temps, les terrassements en déblais ont été réalisés afin d'atteindre les cotes définies au marché avec un tri des matériaux impropres au réemploi. Les déblais pouvant être réutilisés comme remblai de préchargement ont été mis en dépôt sur le polder. Un suivi des tassements a été effectué pendant la période de préchargement. À la fin de cette période, les travaux de terrassement se sont poursuivis par le déchargement, le nivellement des ter-

6- Atelier de réalisation des avant-trous et atelier de mise en œuvre des drains verticaux.

7- Rouleaux de drains verticaux.

8- Travaux de réglage le long de la digue initiale du polder 124.

6- Plant for executing preliminary holes and equipment for placing vertical drains.

7- Rolls of vertical drains.

8- Grading works along the initial dyke of polder 124.

rains et la mise en œuvre d'une couche de matériau d'apport de type 0/80 sur 0,3 m d'épaisseur pour atteindre la cote de la plate-forme livrée.

Les travaux de terrassements ont mobilisé 4 ateliers de terrassement avec des pelles de 50 t, des dumpers et des bulls D6 (figure 4). Ces engins, guidés au GPS, ont été mobilisés pour terrasser et transporter 14 000 m³ par jour. Pour maintenir ce rythme de terrassement, les équipes ont travaillé en poste sur 2x8 h. La gestion de ces flux importants de circulation est un enjeu important dans ce projet, une mission d'ordonnancement et de pilotage de chantier (OPC) a été spécialement mise en place pour gérer ces flux. Ainsi, un phasage des travaux tenant compte de la circulation de transit et de la coactivité a été cruciale pour garantir la réalisation des travaux des différents lots en toute sécurité et de manière efficace (figure 5).

TRAVAUX DE STABILISATION : DRAINS VERTICAUX ET PRÉCHARGEMENT

Après la réalisation d'avant-trous, les drains ont été mis en œuvre sur la hauteur des remblais et des alluvions soit des hauteurs de 13 à 20 m environ et suivant une maille carrée de 2 m x 2 m (figure 6). Ce sont des drains plats en PVC (figure 7) de largeur 98 mm et de 3 mm d'épaisseur, entouré d'une gaine géotextile (filtre en polypropylène) et mis en place dans le sol par fonçage statique à l'intérieur d'un casing (carré métallique).

Ce casing est installé sur une pelle mécanique sur chenille équipée d'un mât à drains.

L'ancrage des drains dans la couche plus compacte est fait par l'intermédiaire d'un sabot perdu.

Après remontée du casing, le drain qui reste dans le sol est coupé au-dessus de la plate-forme de travail. Après la mise en œuvre des drains verticaux, les matériaux stockés ont été réemployés en remblai de préchargement.

La pente des talus des remblais de préchargement a été réglée à 3H/2V (figure 8).

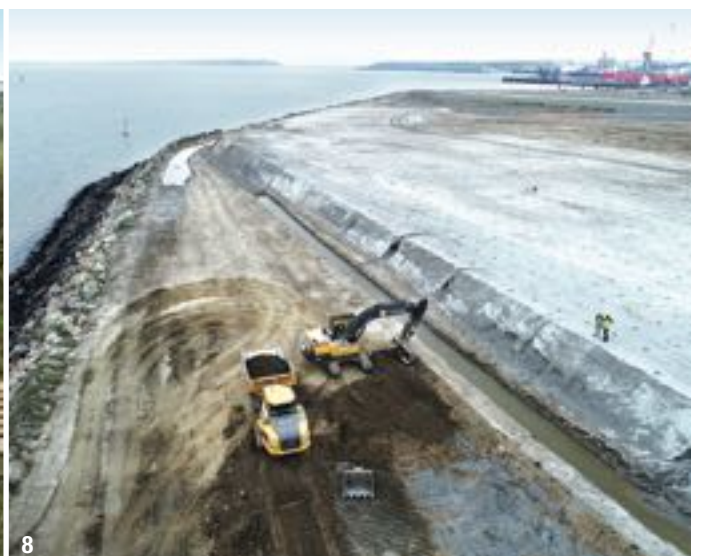
SUIVI DES TASSEMENTS ET CONTRÔLES

Le suivi des tassements a permis de vérifier le degré de consolidation atteint à la suite du préchargement. Il s'est fait à l'aide des dispositifs de mesure suivant :

→ Vingt profilomètres de 100 à 150 m de longueur (figure 9) : ce procédé consiste à installer en tranchée un tube en PEHD et à mesurer régulièrement sa position relative, tous les mètres, à l'aide d'une sonde hydrostatique tirée par un câble ; ▷



7
© ARCADIS

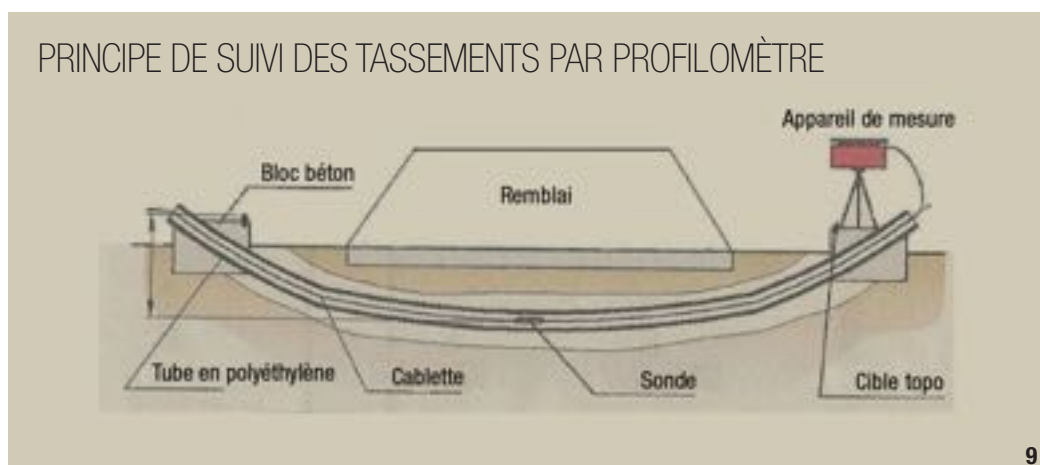


8
© RÉGION BRETAGNE

→ Des levés topographiques hebdomadaires de 100 repères de surface installés sur les remblais de préchargement et de 100 plaques de tassement avec piges de mesures permettant de mesurer directement le tassement à la base du remblai ;

→ Des essais pénétrométriques statiques CPTu (figure 10).

Le contrôle de la portance de la plate-forme livrée est prévu à l'aide d'essais à la plaque, d'une fréquence d'un essai tous les 2500 m², pour justifier une classe de plate-forme PF2 (EV2 > 50 MPa).



L'AVANCEMENT DES TRAVAUX : 2015 - 2020

À ce jour, l'ensemble du préchargement a été réalisé sur le chantier en deux phases distinctes.

Le drainage vertical et la stabilisation des terrains sont terminés.

Les prochaines étapes consistent principalement en 2020/2021 à réemployer les derniers matériaux de préchargement pour recouvrir le casier remblayé avec les produits de dragage. □

9- Principe de suivi des tassements par profilomètre.

10- Contrôle de compacité par CPT.

9- Profilometer technique for monitoring subsidence.

10- CPT compaction test.

PRINCIPALES QUANTITÉS

DATE DE RÉALISATION DES ÉTUDES : 2013-2015

DATE DE RÉALISATION DES TRAVAUX DE TERRASSEMENTS ET DE STABILISATION : 2015-2020

INVESTISSEMENT : 32 M€ pour l'ensemble des travaux terrestres

SURFACE AMÉNAGÉE DU POLDER : 41 ha

SURFACE CONCERNÉE PAR LES TERRASSEMENTS : 28 ha

SURFACE PRÉCHARGÉE : 20 ha

VOLUME DE DÉBLAIS : 300 000 m³

VOLUME DE REMBLAIS : 440 000 m³

COUCHE DRAINANTE : 57 000 m³ de 40/70

COUCHE DE FORME : environ 80 000 m³ de 0/80

NOMBRE DE DRAINS VERTICAUX : 50 000 u

LINÉAIRE DE DRAINS VERTICAUX : 650 km



10 © LAGADEC

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Région Bretagne

GROUPEMENT DE MAÎTRISE D'ŒUVRE : Arcadis (mandataire), Artelia et A3 Paysage

ENTREPRISES DE TRAVAUX POUR LE LOT TERRASSEMENT - CONSOLIDATION DE SOLS : Lagadec TP (mandataire), Charier TP, Marc SA, Charier GC et Inclusol

ABSTRACT

BREST POLDER DEVELOPMENT PROJECT: EARTHWORKS AND STABILISATION

RICHARD PINOLI, ARCADIS - ELISE SALMON, ARCADIS - CLÉMENT DAVALX, LAGADEC - YANNICK FAGON, RÉGION BRETAGNE

In 2010, the Brittany Region, which has owned the commercial port of Brest since 2007, defined a strategy for the development of new sectors of industry. In 2013, it awarded to an engineering consortium a project management contract for land improvements on Brest polder 124, 24 ha in area, by 2021. This polder is located at the level of the former Saint-Marc cove which, after the establishment of a surrounding dyke in the 1950s, was filled with the dredging products and, after 2003, with very heterogeneous filler earth. The works required treatment of the polluted filler-earth materials, stabilisation of the hydraulic backfills and marine alluvia by vertical drains, and soil preloading while optimising earth movements. □

PROYECTO DE DESARROLLO DEL PÓLDER DE BREST: MOVIMIENTOS DE TIERRAS Y ESTABILIZACIÓN

RICHARD PINOLI, ARCADIS - ELISE SALMON, ARCADIS - CLÉMENT DAVALX, LAGADEC - YANNICK FAGON, RÉGION BRETAGNE

La región de Breñaña, propietaria del puerto comercial de Brest desde 2007, ha definido desde 2010 una estrategia de desarrollo hacia nuevos sectores industriales. En 2013, encargó a un consorcio de ingeniería la dirección de las obras de rehabilitación terrestre del polder 124 de Brest, de una superficie de 24 ha, en el horizonte 2021. Este polder está situado justo en frente de la antigua ensenada de Saint-Marc, rellenada en 1950, previa construcción de un dique de cercado, con materiales de dragado, y posteriormente, en 2003, con aportaciones terrestres muy heterogéneas. Las obras han requerido un tratamiento de los materiales contaminados procedentes de las aportaciones terrestres, una estabilización de los terraplenes hidráulicos y los aluviones marinos mediante drenajes verticales y una precarga, todo ello optimizando los movimientos de tierras. □



C'est le métier qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

www.btp-banque.fr



1
© CÉDRIC HELSLY

LA ROTULE DU QUAÏ DE FOS-SUR-MER

AUTEURS : CHRISTOPHE SOUSTELLE, DIRECTEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - GUSTAVO PEREIRA, INGÉNIEUR PRINCIPAL AU BE GROUPE, SOLETANCHE BACHY

SOLETANCHE BACHY FRANCE, MANDATAIRE DU GROUPEMENT SOLETANCHE BACHY FRANCE / MENARD / EUROVIA / BUESA, CONSTRUIT UNE EXTENSION DE QUAÏ À CONTENEURS POUR LE GRAND PORT MARITIME DE MARSEILLE SUR LA COMMUNE DE PORT-SAINT-LOUIS-DU-RHÔNE (13). CE NOUVEAU QUAÏ, DE 240 M DE LONG ET DE 17 m DE TIRANT D'EAU, A DÉBUTÉ EN AVRIL 2018 PAR LES TRAVAUX D'INSTALLATION GÉNÉRALE ET SERA LIVRÉ 24 MOIS PLUS TARD, EN AVRIL 2020. SITUÉS ENTRE DEUX QUAÏS EXISTANTS, LES TRAVAUX CONSISTENT EN UN RACCORDEMENT DE CES DERNIERS, AFIN D'AGRANDIR LA ZONE D'EXPLOITATION DES CONTAINERS DONT LE TRAFIC EST EN CROISSANCE DANS LA RÉGION MARSEILLAISE.

CONCEPTION

Le contexte géotechnique à Fos comprend une couche superficielle de sables (épaisseur réduite, en général), suivie par une couche épaisse de limons normalement consolidés (jusqu'à -19 CM). Le substratum est

formé par les cailloutis de Crau, avec des degrés d'altération, de compacité et de cimentation divers. La construction du quai nécessite l'installation, par clapage et moyens terrestres, d'une épaisseur de remblais atteignant 20 m, déposés directement sur les limons de

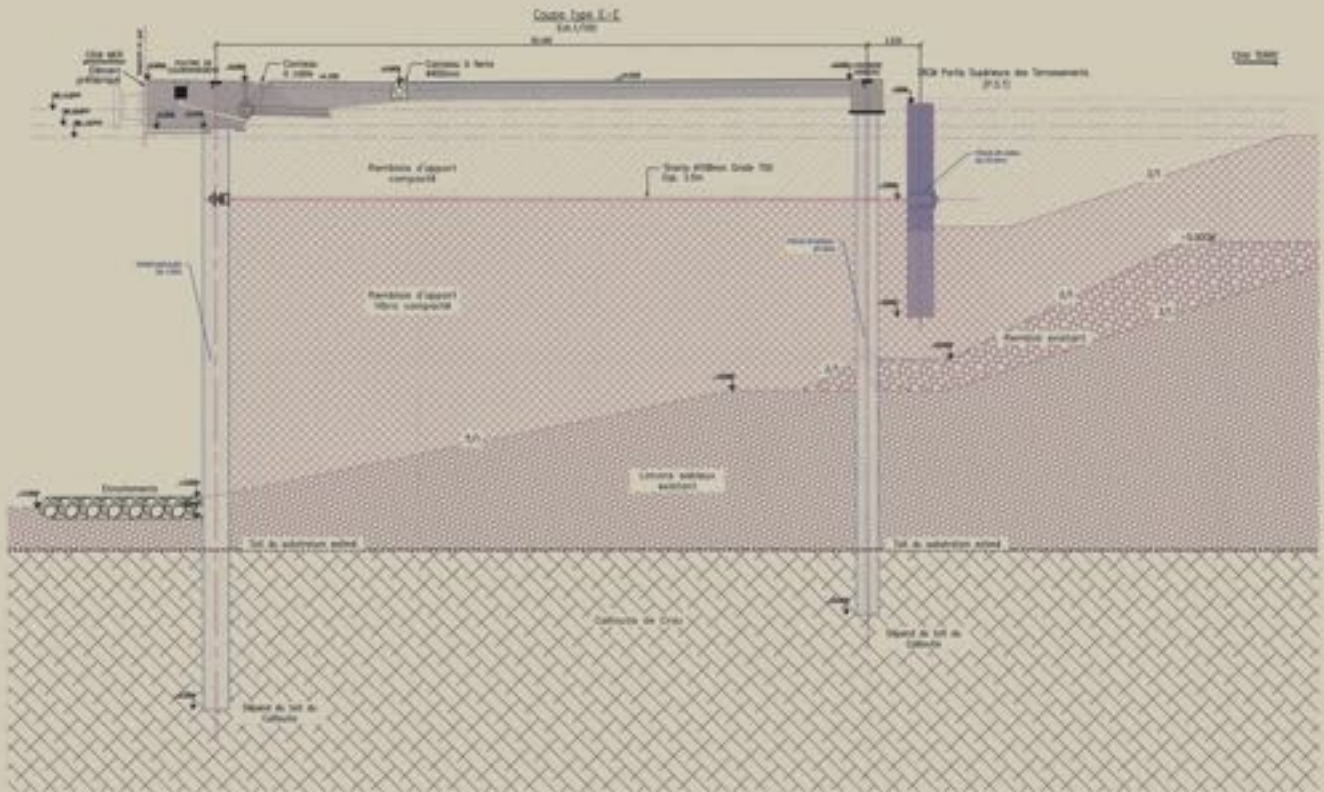
1- Vue d'ensemble du quai.

1- Overall view of the quay.

façon à former la plate-forme finie autour du niveau +2,5 CM.

La solution de base proposée par le marché consistait en un soutènement du type combi-wall (pieux tubulaires en acier de diamètre 1800 mm espacés de 3,9 m, complétés par des

COUPE TYPE DU QUAI



© SOLETANCHE BACHY

2

palplanches), appuyé par un niveau d'ancrages passifs (tirants métalliques de 120 mm et contre-rideau continu en palplanches PU32). Cependant, le retour d'expérience des ouvrages adjacents laissait anticiper des difficultés de battage des pieux et palplanches,

2- Coupe type du quai.

3- Calculs Plaxis pour le quai.

2- Typical cross section of the quay.

3- Plaxis calculations for the quay.

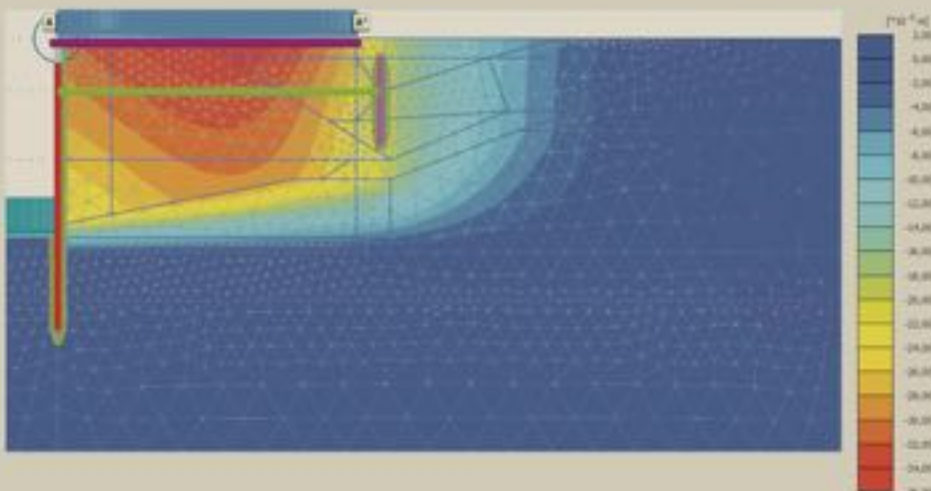
notamment à cause de la résistance du substratum. Une analyse comparative effectuée par le groupement a permis de déterminer le potentiel d'une solution alternative en parois moulées ; cette solution permettrait de garantir, avec un degré de fiabilité satisfaisant,

l'encastrement de la fiche dans les cailloutis de Crau, tout en gardant une performance globale au moins aussi élevée que celle de la solution de base (notamment en termes de résistance, raideur et durabilité).

La solution variante développée par le groupement est basée sur une paroi moulée de 1200 mm d'épaisseur, fortement ferrillée et fichée à -26 CM dans le cailloutis sain ($p_l > 6$ MPa). Comme pour la solution de base, le soutènement est retenu par un niveau d'ancrages passifs. À la différence de celle-ci, chaque tirant (du type Asda 500 MPa avec 110 mm de diamètre) est relié à un pieu métallique faisant office de contre-rideau (figure 2).

Les calculs ont été effectués majoritairement avec le support de logiciels internes du groupe Soletanche Bachy (notamment : PARIS pour les calculs d'interaction sol structure, CACAO pour le ferrailage automatisé des parois moulées), ainsi qu'avec des logiciels externes de référence (en particulier PLAXIS et ROBOT, logiciels aux éléments finis pour des analyses géotechniques et structurelles, respectivement) (figure 3). Parmi les facteurs clés de la conception de la solution, on peut indiquer : ▷

CALCULS PLAXIS POUR LE QUAI



© DR

3


4

© CÉDRIC HELSLY

le comportement mécanique des remblais à court et à long terme (facilité par la qualité des matériaux de carrière concassés, ainsi que par le traitement par vibrocompactage), les tassements de plate-forme (fortes épaisseurs de remblais, directement sur des limons compressibles), l'analyse du comportement sismique du quai (y compris les analyses de propagation d'ondes pour optimisation du coefficient sismique pseudo-statique), ainsi que la conception de la poutre de couronnement (monolithique, liaisonnée aux quais existants et obéissant à des critères de dilatation thermique et de retrait assez contraignants). On peut aussi souligner les charges très élevées associées à des critères de défor-

mation contraignants, pour les grues portiques travaillant sur des quais de cette dimension.

Les études de la solution variante ont été entièrement développées en interne par Soletanche Bachy, tant pour la partie géotechnique (parois, tirants, remblais, hydrogéologie, pieux) que pour le génie civil (poutres de couronnement, poutre de voie de grue arrière, ouvrages annexes), avec la collaboration des autres membres du groupement (en particulier Menard pour l'amélioration de sol). Ce mode d'organisation a permis d'assurer une interface souple entre les équipes études et commerce (en phase d'appel d'offres), et entre les études et l'équipe chantier (en phase d'exécution).

4- Vue générale du chantier de parois moulées.

5 & 6- Benne hydraulique KS.

4- General view of the diaphragm wall project.

5 & 6- KS hydraulic bucket.

fendable de 420 000 t de matériaux de carrière de granulométrie variée. Ce n'est pas moins de 200 camions qui ont approvisionné ce chantier pour atteindre des cadences de mise en œuvre de 10 000 t par jour.

Les carrières locales du massif de la Nerthe ont permis, non seulement d'assurer les cadences élevées, mais également de disposer de matériaux nobles de granulométries 40/400, 0/100 et 0/40 permettant d'assurer la stabilité globale de cette digue provisoire.

DÉROULEMENT DES TRAVAUX

JUIN À SEPTEMBRE 2018

Cette première phase a consisté, pour Buesa, à mettre en œuvre une digue longitudinale stable. Les travaux sont réalisés par clapage avec une barge

OCTOBRE 2018

Les travaux de vibrocompaction de Menard permettent de consolider cette digue et de lui apporter les caracté-


5

© CÉDRIC HELSLY


6

© CÉDRIC HELSLY



© CÉDRIC HELSLEY

ristiques mécaniques nécessaires à sa stabilité globale. Sur la base d'un maillage de 3,5 m x 3,5 m, l'aiguille vibrante a réalisé en 3 semaines plus de 400 impacts pour atteindre un module Em de 30 MPa et un Dr jusqu'à 90%.

NOVEMBRE 2018

Arrivée du matériel de paroi moulée : centrale à boue, équipements de bétonnage et porteurs LB 855 (figure 4).

7- Bétonnage des parois moulées.

8- Réparation des outils de forage.

7- Diaphragm wall concreting.

8- Repairing drilling tools.

Le choix a été fait d'excaver les parois à l'aide de deux types d'outils : une benne hydraulique de type KS (figures 5 et 6) et une benne lourde M8 pour l'ancrage dans le substratum. En 3 postes, une équipe de 30 personnes permet de réaliser les parois moulées, de 28 m de profondeur et de 1,2 m d'épaisseur, à une cadence de 4 à 5 panneaux par semaine. Le volume total de béton (figure 7) à couler représente plus de

9000 m³, mobilisant deux centrales à béton. L'ancrage des parois se fait dans des alluvions de la Crau consolidées par les temps géologiques. Ces alluvions, composées de galets roulés de 100 à 200 mm dans une matrice indurée ressemblant à du béton, mettent à mal les outillages (figure 8). Les bennes lourdes assurent cependant l'ancrage du pied de paroi, critère de choix technique par notre client qui avait proposé une solution de base en combi-wall.

La solution en paroi moulée permet d'assurer un ancrage parfait dans tout type de terrain et répond aux charges toujours plus fortes apportées par les futurs portiques de déchargement des containers.

FÉVRIER 2019

La nouvelle année voit la mise œuvre, par les équipes de Soletanche Bachy, de la poutre de quai. Il s'agit d'un ouvrage d'une hauteur de 2,30 m et d'une largeur de 4,60 m. La base de la poutre de couronnement est située sous le niveau de la mer (figure 9). Un masque a donc été constitué en bétonnant les enrochements en place et en les surélevant d'un bardage pare-écume. Il faut cependant un peu de clémence du ciel pour pouvoir couler en place des plots de 16 m de long au fil de l'eau et à l'abri des enrochements. ▷



© CÉDRIC HELSLEY



9

© SOLETANCHE BACHY



10

© CÉDRIC HESLY

Après plusieurs semaines de béton de propreté immergé et d'élévation du mur de protection, les équipes de Soletanche Bachy ont pu mettre en œuvre les murs préfabriqués à l'abri de pompes de relevage et dans une enceinte quasi étanche (figure 10). La poutre comporte en effet, côté mer, un mur préfabriqué (figure 11). Le GPMM, en raison de ses expériences précédentes, a souhaité ajouter une peau supplémentaire pour retarder les agressions de la mer. Cet ouvrage permet de réduire les impacts des agressions chimiques de l'eau de mer et des agressions mécaniques des vagues. Utilisant un béton de haute durabilité,

tous les moyens ont été mis en œuvre pour augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Démarrées 6 mois auparavant, les études de béton, en partenariat entre le laboratoire de Soletanche Bachy et Lafarge, ont permis d'atteindre des objectifs de faible porosité ($< 12\%$) et de faible diffusion des ions chlorures ($< 3 \cdot 10^{-12}$ m/s). Pour conserver les performances obtenues sur ces bétons, il a été choisi de monter une aire de préfabrication foraine sur le site (figures 12 et 13). En effet, il n'était pas envisageable, dans le temps imparti, de redémarrer les études de béton avec une centrale à

9- Recépage de la paroi et terrassement pour la poutre.

10- Mise en place des murs préfabriqués.

11- Coupe de principe de la poutre.

9- Trimming the wall and earthworks for the beam.

10- Placing precast walls.

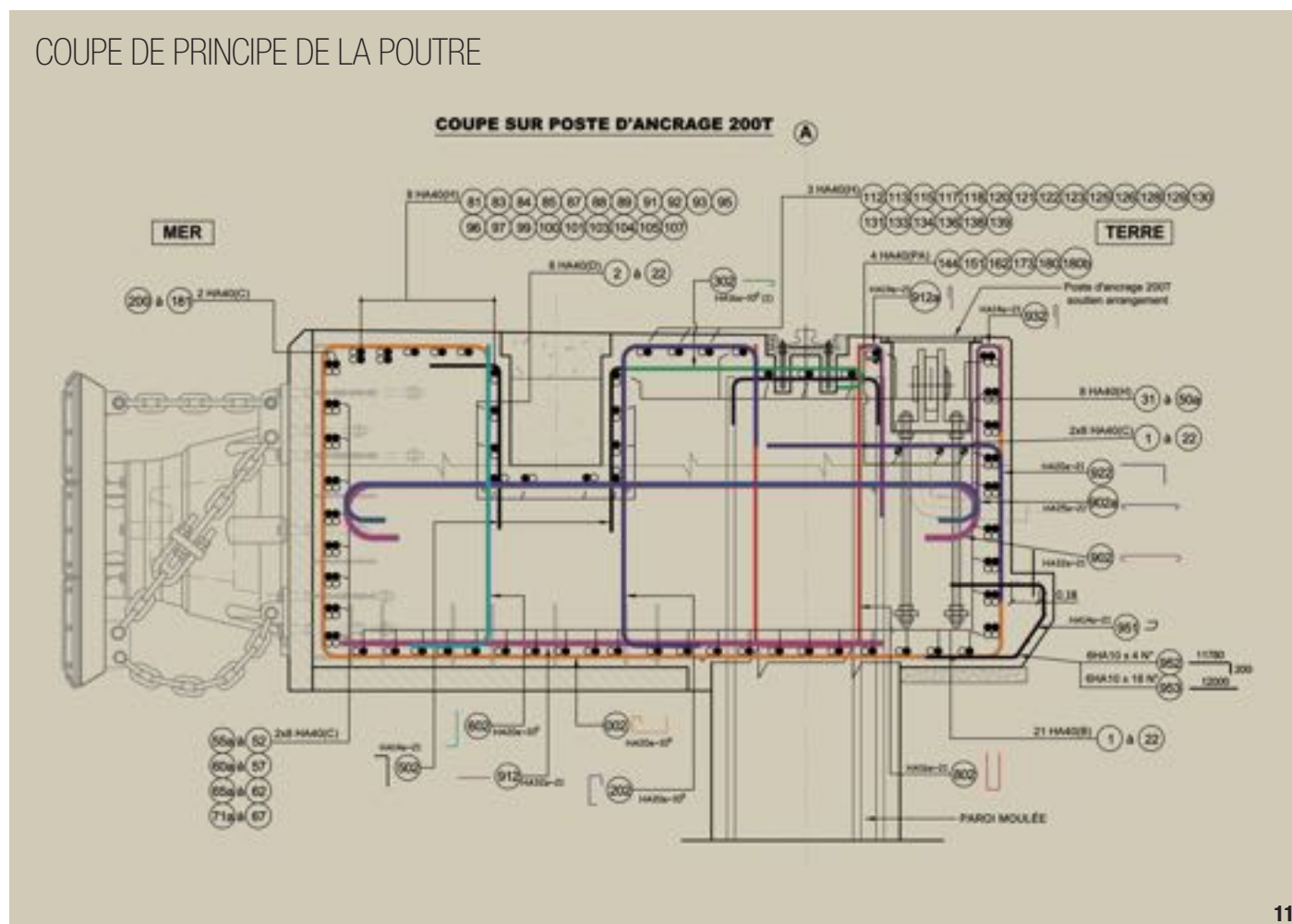
11- Schematic cross section of beam.

proximité d'une usine de préfabrication. La surface disponible autour du site a permis de monter une aire de préfabrication et de couler les 110 éléments préfabriqués en 2 mois. Ces masques, composés d'attentes en barre inox, ont nécessité de créer une aire de retournement spécifique pour pouvoir apposer une couche de peinture époxy, constituant une protection supplémentaire sur le béton haute durabilité.

MARS ET AVRIL 2019

Les équipes des armaturiers peuvent à présent confectionner la poutre de couronnement, au sec et à l'abri de la houle (figure 14).

COUPE DE PRINCIPE DE LA POUTRE



11

© SOLETANCHE BACHY



© SOLETANCHE BACHY

12

13

- 12- Aire de préfabrication.**
- 13- Stockage des éléments préfabriqués.**
- 14- Ferrailage de la poutre.**

- 12- Precasting area.**
- 13- Storage of precast parts.**
- 14- Beam reinforcement.**

Une équipe de 10 compagnons met en place barres HA 40, épingles et étriers. Après le raccordement sur le quai existant, la cadence des armatures monte à 12 m de poutre par jour.

Les équipes de génie-civil de Soletanche Bachy ferment la poutre à l'arrière par des coffrages et placent tous les équipements à incorporer dans la poutre : échelles, défenses, bollards, caniveaux, voie de roulement, réseaux. L'ensemble est posé à l'aide de gabarits et les bétonnages se font en 2 levées de 200 m³ environ.

Le raccordement est un point essentiel abordé dès la phase de la conception. Le quai de la rotule raccorde deux quais existants exploités par les sociétés Seayard et Eurofos. La construction du nouveau quai génère des déplacements non négligeables, notamment lors de la pose du tirant d'ancrage et du terrassement à l'avant du quai.

La solution en parois moulées permet de dissocier les ouvrages en réalisant le raccordement aux quais existants en dernier lieu.



14

© CÉDRIC HESLY

Auparavant, une équipe d'hydrodémolition a décapé 2 m de quai de chaque côté de l'ouvrage faisant office de clavetage.

PROCHAINES ÉTAPES

MAI À AOÛT 2019

Il s'agira, dans un premier temps, de rabattre la nappe, afin de pouvoir installer 2250 m de tirants passifs de diamètre 110 mm et leurs tubes d'ancrage arrière (figure 15). La stabilité globale du quai est assurée par l'ancrage de la paroi moulée en pied dans les cailloutis de Crau et par ce tirant ancré à un tube arrière.

Le niveau des tirants est situé sous le niveau général de la mer. Un réseau de puits et de pompes sera donc mis en œuvre pour assurer l'assèchement de la fouille 24h/24. Le phasage comporte les opérations successives de terrassement côté terre, pose des tirants et des tubes d'ancrage, terrassement côté mer pour récupérer les déblais à l'avant du quai et les gerber à l'arrière avec les moyens nautiques et terrestres de Buesa.

Une deuxième opération de vibrocompactage sera nécessaire pour améliorer les capacités portantes de la plateforme définitive ainsi créée.

Les tirants passifs de type M108 de Asdo seront accouplés en fond de fouille et reliés à la paroi moulée par un système de rotules mises en place au préalable dans les cages d'armatures de ces dernières (figure 16).

SEPTEMBRE À OCTOBRE 2019

Il s'agira des dernières opérations de génie civil avec la poutre arrière (figure 17).



© SOLETANCHE BACHY



© SOLETANCHE BACHY

Celle-ci est fondée sur 79 pieux de type Starsol de 1 020 mm de diamètre, ancrés à 25 m de profondeur. Cette poutre recevra le rail arrière du portique de déchargement.

**NOVEMBRE 2019
À MARS 2020**

Les réseaux et les plates-formes seront mis en place par Eurovia pour une livraison au mois d'avril 2020. □



© SOLETANCHE BACHY

15- Vue 3D des terrassements pour mise en place des tirants passifs et des tubes.

16- Vue de la rotule dans les cages d'armatures de parois moulées.

17- Vue 3D de la réalisation de la longrine arrière.

15- 3D view of earthworks for placing passive tie anchors and tubes.

16- View of the "rotule" in the concrete reinforcing cages of diaphragm walls.

17- 3D view of execution of the rear longitudinal member.

**PRINCIPALES
QUANTITÉS**

DIGUE PROVISoire :
401 000 t

PAROIS MOULÉES :

- Longueur : 240 m
- Béton : 9 000 m³
- Acier : 1 200 t

MASQUES PRÉFABRIQUÉS :
114 éléments unitaires

POUTRE DE COURONNEMENT :

- Béton : 2 456 m³
- Acier : 415 t

TIRANTS : 68 unités (2 400 m)

PIEUX : 79 unités

LONGRINE ARRIÈRE :

- Béton : 720 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Grand Port Maritime de Marseille

MAÎTRE D'ŒUVRE : Grand Port Maritime de Marseille

ASSISTANCE À LA MAÎTRISE D'ŒUVRE : Cerema / Fondasol / Brl

CSPS : Veritas

ENTREPRISES : Groupement Soletanche Bachy France (mandataire) / Menard / Buesa / Eurovia

ABSTRACT

**THE "ROTULE" OF THE QUAY
AT FOS-SUR-MER**

CHRISTOPHE SOUSTELLE, SOLETANCHE BACHY FRANCE -
GUSTAVO PEREIRA, SOLETANCHE BACHY

At Fos-sur-Mer, for the port authority Grand Port Autonome de Marseille, the consortium led by Soletanche Bachy is building a quay 240 m long with a 17-metre draught between two existing quays. Originally planned as a combi-wall, the solution finally adopted consists of a diaphragm wall anchored in the Crau gravel and anchored by a system of passive tie anchors connected to steel piles acting as an inner curtain wall. The wall is topped by a capping beam protected on the sea side by precast sheets of high-durability concrete. The rear track of the handling gantry rests on a longitudinal member with foundations on Starsol piles. □

**LA RÓTULA DEL MUELLE
DE FOS-SUR-MER**

CHRISTOPHE SOUSTELLE, SOLETANCHE BACHY FRANCE -
GUSTAVO PEREIRA, SOLETANCHE BACHY

En Fos-sur-Mer, por cuenta del Gran Puerto Autónomo de Marsella, el consorcio liderado por Soletanche Bachy realiza un muelle de 240 m de longitud y 17 m de calado entre dos muelles existentes. Inicialmente prevista en combi-wall, la solución elegida consta finalmente de una pantalla de hormigón anclada en la grava mediante un sistema de tirantes pasivos unidos a pilotes anclados que actúan como contramuro. La pantalla está coronada por una viga, protegida del lado mar por placas prefabricadas de hormigón de gran durabilidad. La vía posterior del pórtico de manutención reposa sobre un larguero sustentado por pilotes Starsol. □



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

SANTÉ

PRÉVOYANCE

RETRAITE

ÉPARGNE

ASSURANCES

ACTION SOCIALE

VACANCES

 **PRO BTP**
GROUPE



RÉHABILITATION DU SITE DE CLARIANT À HUNINGUE (68)

AUTEUR : MARGAUX RIBES, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

EN 2011, CLARIANT FERME SON USINE CHIMIQUE ALSACIENNE SITUÉE À HUNINGUE, DANS LE HAUT-RHIN. DANS UNE DÉMARCHÉ DE DÉVELOPPEMENT DURABLE, L'INDUSTRIEL DÉCIDE DE LANCER UN VASTE PROJET DE DÉPOLLUTION DU SITE AVANT DE LE METTRE EN VENTE.

1- Foreuse Mait HR165 modifiée - Barillet à tarières à droite.

2- Vue en plan du terrassement et de la paroi en pieux tangents.

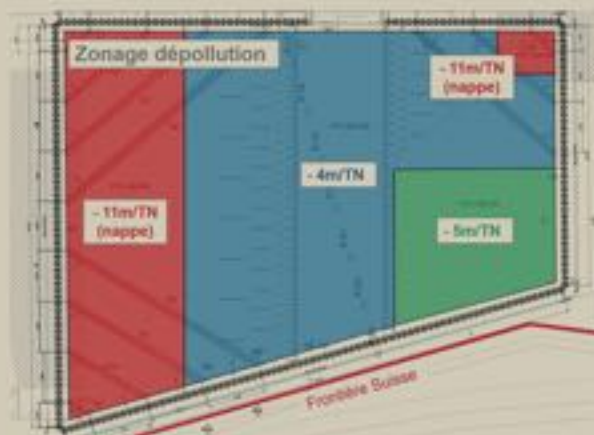
3- Vue en élévation du terrassement et de la paroi en pieux tangents.

1- Modified Mait HR165 driller - Auger drum on the right.

2- Plan view of earthworks and the tangent-pile wall.

3- Elevation view of earthworks and the tangent-pile wall.

VUE EN PLAN DU TERRASSEMENT ET DE LA PAROI EN PIEUX TANGENTS



© SOLETANCHE BACHY

2

Clariant a délégué la maîtrise d'œuvre au bureau d'ingénierie Ramboll. L'étude des sols a permis d'identifier toutes les zones à traiter et un appel d'offres aux entreprises est alors lancé.

Le marché est finalement attribué, en 2017, à l'entreprise Remea, filiale de Menard - groupe Soletanche Freyssinet, spécialisée dans les travaux de dépollution des sites industriels, qui répond en groupement avec l'entreprise Cardem pour les travaux de démolition des vestiges.

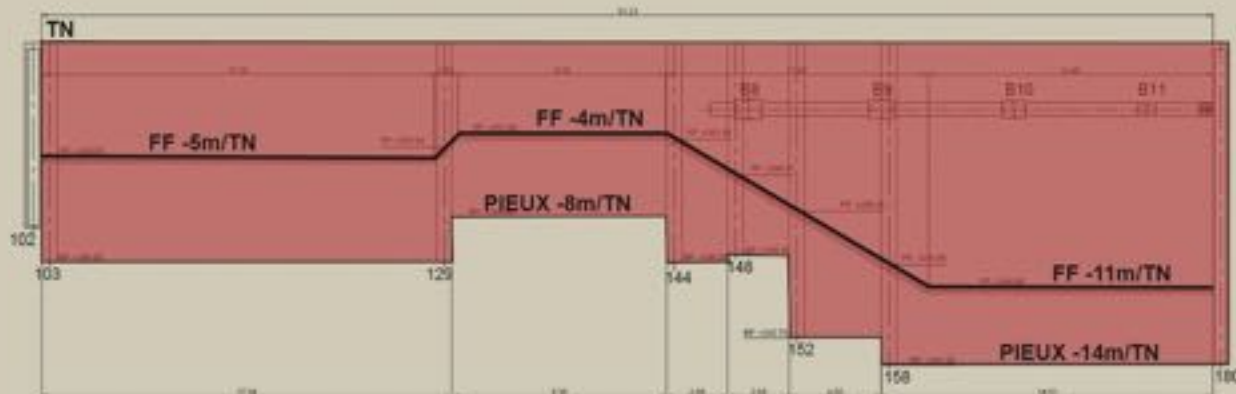
Les zones à traiter posent deux problématiques importantes :

PREMIÈRE PROBLÉMATIQUE LA PROXIMITÉ DE LA FRONTIÈRE SUISSE AVEC L'UNE DES ZONES LES PLUS IMPACTÉES

Cette contamination des sols a été identifiée, par endroits, jusqu'au niveau de la nappe phréatique, située à 11 m de profondeur (figure 2).



VUE EN ÉLÉVATION DU TERRASSEMENT ET DE LA PAROI EN PIEUX TANGENTS



© SOLETANCHE BACHY

3

Les travaux de dépollution, sur cette zone, consistent alors, pour Remea, à excaver les terres polluées jusqu'à cette cote en vue de les évacuer vers une centrale de traitement montée à même le site. Étant donné la faible cohésion du terrain en place (alluvions du Rhin), retirer les terres jusqu'à cette profondeur nécessiterait la réalisation de talus qui conduirait à élargir la fouille d'une dizaine de mètres en périphérie.

Il se trouve que la zone est située au plus proche de l'enceinte, à seulement 5 m de la frontière suisse.

Cette contrainte rend donc le talutage impossible, car les travaux empièteraient à l'extérieur du site, et de surcroît sur un territoire étranger : Remea doit alors se tourner vers une solution de soutènement provisoire des terres pour mener à bien la dépollution jusqu'à la nappe.

SECONDE PROBLÉMATIQUE LA DÉPOLLUTION DES TERRES SOUS LE NIVEAU DE LA NAPPE

Les analyses chimiques menées en phase d'avant-projet par Ramboll révèlent l'éventualité, toujours dans la même zone, d'une contamination des sols jusqu'à environ 10 m de profondeur sous la nappe phréatique. Si cette pollution venait à se confirmer, Remea devrait poursuivre la dépollution des terres jusqu'à cette cote.

La présence de la nappe ne permet pas de poursuivre l'excavation au-delà des 10 premiers mètres.

Une solution technique s'impose alors : inérer les terrains pollués en place à l'aide de forages de gros diamètre.

Cela avait notamment été éprouvé lors d'une collaboration précédente entre Soletanche Bachy Fondations Spéciales et Remea pour la réhabilitation d'une ancienne usine en Normandie.

Ce sont ces problématiques qui ouvrent la porte aux fondations profondes dans le monde des chimistes ! Remea se tourne donc vers Soletanche Bachy Fondations Spéciales pour apporter des solutions géotechniques à ses contraintes de dépollution.

Les travaux sur la zone du site sont alors articulés en deux tranches : une tranche ferme pour le soutènement des terres en vue de la dépollution jusqu'au toit de la nappe, et une tranche conditionnelle pour la dépollution sous nappe déclenchée sous réserve d'analyses complémentaires menées pendant l'exécution de la tranche ferme.



4

© CLARINANT

TRANCHE FERME SOUTÈNEMENT PROVISOIRE PAR PIEUX TANGENTS ET LIT DE BUTONS

Pour répondre à la première problématique, Soletanche Bachy Fondations Spéciales propose et dimensionne pour Remea une paroi de soutènement provisoire constituée de pieux

4 & 5- Réalisation de pieux tangents en 2017.

4 & 5- Execution of tangent piles in 2017.

tangents (diamètre 62 cm), résolvant ainsi l'impossibilité de taluter jusqu'à la nappe sans franchir la frontière suisse.

Cette paroi est dimensionnée pour soutenir différentes hauteurs de terres, correspondant à des fonds de fouille variant de 4 m à 11 m de profondeur, selon la contamination (figures 2 et 3).



5

© CLARINANT



6
© CÉDRIC HELSLY

Cela a conduit à dimensionner des pieux armés de longueur variable - 8 m pour les moins profonds et 14 m pour les plus profonds - aboutissant à une paroi en "escaliers" dans un souci d'optimisation du projet. Cette paroi est alors autostable sur les zones peu excavées (jusqu'à 5 m terrassées) et nécessite d'être appuyée en tête par un lit de butons sur les zones excavées jusqu'à la nappe.

Ainsi réalise-t-on, dans un premier temps, fin 2017, les 240 pieux armés constitutifs de la paroi (figure 4).

Le site de Clariant étant situé en bord de Rhin, le sous-sol est exclusivement constitué d'alluvions modernes sous

6- Fouilles de dépollution en cours - Fondations des tentes au centre (pieux poteaux).

7- Fouilles de dépollution en cours - Butons métalliques.

6- Pollution clean-up excavations in progress - Tent foundations in the centre (column piles).

7- Pollution clean-up excavations in progress - Steel struts.

forme de graves (gros galets) à matrice sablonneuse. Ces terrains, très peu cohésifs, et la présence de la nappe, poussent à opter pour des pieux réalisés selon le procédé Starsol. Il s'agit d'un procédé breveté par Soletanche Bachy Fondations Spéciales : les pieux sont forés en tarière creuse (figure 5), et bétonnés au fur et à mesure de la remontée de la tarière par injection du béton via un tube plongeur télescopé à la base du pieu. Ce procédé est tout particulièrement adapté aux alluvions du Rhin, car il évite tout éboulement du terrain dans le pieu entre la phase de forage et celle de bétonnage. Ces travaux ont duré 1 mois et demi.

Une fois la paroi réalisée, les travaux de dépollution peuvent débuter. Ceux-ci nécessitent un confinement total de la zone pour éviter l'émanation des polluants dans l'air au cours des terrassements.

Pour cela, Remea prévoit le montage de tentes ventilées.

La ventilation évite notamment le confinement des gaz d'échappement des engins amenés à travailler sous ces tentes. Parallèlement à la réalisation de la paroi, Remea profite de la présence de Soletanche Bachy Fondations Spéciales sur site pour les charger du dimensionnement et de la réalisation des fondations de ces tentes.

Couvrir toute la surface de la zone à dépolluer nécessite en fait un assemblage de deux tentes, qui viennent alors prendre appui, en leur centre, dans les futures fouilles. Soletanche Bachy Fondations Spéciales réalise alors des pieux prenant leur ancrage sous les futurs fonds de fouille et travaillant en poteaux sur la hauteur à excaver, variant de 4 m à 11 m. Pour terminer, ces pieux ont été surmontés de massifs d'ancrage pour accueillir les pieds des tentes (figure 6).

Dans un second temps, une deuxième intervention sur le site a lieu début 2018, une fois la fouille partiellement terrassée par les équipes Remea, pour la réalisation des liernes en béton armé et la pose des 11 butons métalliques (figure 7).

TRANCHE CONDITIONNELLE FORAGES D'INERTAGE SOUS HAUTEUR LIMITÉE

Suite à des analyses complémentaires des terres polluées en profondeur, Clariant déclenche la tranche de travaux conditionnelle.



7
© CÉDRIC HELSLY



8

© CÉDRIC HELSLY

Ces travaux consistent à inertier le terrain pollué jusqu'à 11 m de profondeur, sous le niveau de la nappe.

Cet inertage est réalisé par des forages tangents.

Une telle méthode est particulièrement adaptée dans le cas de présence de sols pollués en profondeur, sous la nappe. En effet, pour effectuer un terrassement classique des terres polluées, il aurait été nécessaire de réaliser une paroi de soutènement étanche

de grande profondeur et de mettre en place un pompage avec un débit important.

L'inertage est économiquement plus avantageux et évitait le pompage de la nappe polluée.

Cependant, la présence des butons ne laisse qu'une hauteur libre de travail de 7 m. La mise en place d'une foreuse tarière creuse classique n'est donc pas envisageable avec cette restriction de hauteur. Soletanche Bachy

Fondations Spéciales conçoit donc une foreuse spécifique de tarière creuse sous hauteur limitée. Pour cela, l'entreprise s'est associée, en exclusivité nationale, au constructeur italien Mait. Les enjeux de la conception de cette foreuse étaient les suivants :

→ Adapter une foreuse du parc et la rendre polyvalente à plusieurs usages : forage traditionnel, forage en tarière creuse et forage sous hauteur limitée.

→ Concevoir une machine sécurisée et autonome, de façon à éviter des manutentions et des manipulations d'équipements de forage.

Forts de leur culture de pieux et petite perforation, les équipes de Soletanche Bachy Fondations Spéciales ont imaginé une foreuse de tarière creuse à barillet. Les éléments de tarière sont disposés dans un barillet (figure 1), qui permet la mise en place de chaque élément au fur et à mesure du forage.



9

© CÉDRIC HELSLY

8- Forages d'inertage en cours - Foreuse adaptée pour travailler sous les butons.

9- Forages d'inertage en cours - Fin d'opération d'injection.

8- Inert drilling in progress - Driller adapted to work under the struts.

9- Inert drilling in progress - End of grouting operation.



© CÉDRIC HELSLY
10

Pour permettre l'assemblage, la foreuse est également équipée de deux guillotines, disposées en parties haute (sous la tête de rotation) et en partie basse. Les guillotines sont actionnées par des vérins hydrauliques. Le barillet et les vérins sont télécommandés à distance par le foreur. Ainsi, le foreur garde-t-il la visibilité pendant toutes les phases de forage et d'assemblage. Ce système évite ainsi toute manutention de tarière, opération qui est rendue compliquée et dangereuse par la forme hélicoïdale de la tarière et son poids.

L'inertage du forage est effectué à la remontée des éléments de tarière.

Le matériau est pompé à l'aide d'une pompe à béton et acheminé jusqu'au pied de la tarière par des flexibles, puis par l'âme creuse des tarières. Au fur et à mesure de la remontée, les éléments de tarière sont désassemblés et rangés dans le barillet.

10- Forages d'inertage en cours - Aide-foreur actionnant la guillotine en partie haute en phase de remontée des tarières.

10- Inert drilling in progress - Drilling aid actuating the guillotine gate in the upper section during the auger raising phase.

Le bureau d'étude du constructeur Mait a conçu ce dispositif en portant une attention particulière sur la stabilité de la foreuse. En effet, la présence du barillet et des éléments de tarière

implique un surpoids à l'avant de la foreuse (figure 8). Des échanges ont donc eu lieu entre l'entreprise et le constructeur pour trouver le bon compromis entre des tarières suffisamment légères et résistantes pour le forage dans un terrain dur comme celui des alluvions du Rhin.

Le personnel de Soletanche Bachy Fondations Spéciales a reçu une formation spécifique pour la conduite de cette nouvelle foreuse (figures 9 et 10).

Une fois le matériel bien pris en main, des cadences de production élevées ont été atteintes.

La mise en place de la foreuse de tarière creuse à barillet a permis d'obtenir des cadences deux fois plus élevées que celles qui auraient pu être atteintes avec un matériel de forage traditionnel.

La surface de terrain concerné a nécessité 320 forages d'inertage de diamètre 600 mm. Les travaux ont duré quatre mois. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROI DE SOUTÈNEMENT : 240 pieux tangents diamètre 62 cm et 11 butons métalliques

FONDACTIONS DES TENTES : 29 pieux de fondations pour les tentes ventilées

FORAGES D'INERTAGE : 320 u diamètre 600 mm

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Clariant

MAÎTRE D'ŒUVRE : Ramboll

ENTREPRISES TRAVAUX

TITULAIRE DU MARCHÉ : Remea - terrassement et traitement des déchets

COTRAITANT : Cardem - démolition

SOUS-TRAITANTS :

- Soletanche Bachy Fondations Spéciales - pieux et traitement des sols
- Eiffage Construction - liernes et butons

ABSTRACT

REMEDICATION OF THE CLARIANT SITE AT HUNINGUE

MARGAUX RIBES, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

On the Huningue site, Soletanche Bachy Fondations Spéciales employed a retaining structure of tangent Starsol piles for pollution clean-up within the excavation. Subsequently, the pollution present deep down, below the level of the aquifer, was treated by inert drilling. Due to the presence of struts in the excavation, a pile driller had to be developed with a drum allowing inerting to be performed under a low clearance. □

REHABILITACIÓN DE LA PLANTA DE CLARIANT EN HUNINGUE (68)

MARGAUX RIBES, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

En la planta de Huningue, Soletanche Bachy Fondations Spéciales ha realizado una entibación con pilotes Starsol tangentes que permite la descontaminación del interior de la excavación. Seguidamente, la contaminación presente en profundidad, bajo el nivel de la capa, se ha tratado mediante pozos de inertización. La presencia de butons en la excavación ha precisado el desarrollo de una perforadora de pilotes con cilindro para poder realizar la inertización bajo una altura reducida. □



© GTM SUD

BOULEVARD URBAIN SUD DE MARSEILLE - ÉTUDES ET OPTIMISATIONS GÉOTECHNIQUES

AUTEURS : CLÉMENT MOUGEL, CHEF DE PROJET GÉOTECHNIQUE, EGIS - SÉBASTIEN FLORIAT, INGÉNIEUR HYDROGÉOLOGUE, EGIS

LA TRANCHÉE COUVERTE SITUÉE AU NORD DU BOULEVARD URBAIN SUD CONSTITUE UNE INFRASTRUCTURE MAJEURE DU PROJET. DE FORTES CONTRAINTES AU NIVEAU DE L'ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE, TANT EN TERMES D'URBANISME QU'AU NIVEAU DE LA GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE DU SITE, ONT DÛ ÊTRE APPRÉHENDÉES PENDANT LES PHASES DE CONCEPTION ET DE CONSTRUCTION DE L'OUVRAGE AFIN D'EN LIMITER L'IMPACT AUSSI BIEN PENDANT LA PHASE DE TRAVAUX QU'EN SITUATION D'EXPLOITATION.

LE PROJET DU BOULEVARD URBAIN SUD

Depuis plusieurs années, Marseille a engagé une véritable mutation de ses infrastructures routières pour faire de son centre-ville un cadre de vie apaisé, où voitures et modes doux de déplacement trouvent leur place au côté des piétons.

Une étape significative a été accomplie à l'automne 2018 avec l'ouverture complète de la L2 (A507).

Le lancement des travaux du boulevard urbain sud (BUS) marque l'aboutissement du projet de rocade de la deuxième ville de France.

En plus d'améliorer globalement le réseau routier de l'agglomération marseillaise en assurant une meilleure desserte du littoral, le BUS va également contribuer à améliorer l'accessibilité aux transports en commun et favoriser le développement économique des quartiers Sud, tout en améliorant

la qualité de vie des noyaux villageois. Le projet de 8,5 km est divisé en trois sections géographiques (figure 2a). La première débute au niveau de l'échangeur Florian à l'interface de l'A50 et de la L2, puis se poursuit, avec un profil à 2x2 voies souterraines (figure 2b), jusqu'à la rue Verdillon via une succession de tranchées couvertes et de zones paralumes (figure 3). Les travaux sur cette section d'un kilomètre ont débuté en octobre 2017 pour

1- Terrassement de la tranchée sous le premier lit de butons.

1- Cut-and-cover earthworks under the first layer of struts.

LOCALISATION DU PROJET DU BUS SUR LA CEINTURE MARSEILLAISE



2a- Localisation du projet du BUS sur la ceinture marseillaise.

2b- Section type de l'ouvrage.

3- Coupe schématique de la tranche 1 avec sa tranchée couverte et ses trémies d'accès.

2a- Location of the "BUS" project on the Marseille ring road.

2b- Typical cross section of the works.

3- Schematic cross section of work phase 1 with its cut-and-cover and access shafts.

TECHNIQUES DE RÉALISATION DE LA TRANCHÉE COUVERTE

La technique de parois moulées de 0,62 m d'épaisseur reliées par un ensemble radier + dalle en béton armé (ou butons définitifs dans les zones en paralume) a été mise en œuvre sur ce projet (figure 4a). Les terrassements sont, en majorité, réalisés à ciel ouvert. La paroi travaille en console pendant la première phase d'excavation, puis un lit de butons métalliques provisoires est placé en tête de paroi pour permettre d'atteindre le fond de fouille sous le niveau radier. Pour des questions de phasage de travaux et de maintien de la circulation routière, certaines sections ont dû être réalisées en terrassement en taupe (i.e. réalisation de la dalle de couverture avant les terrassements) (figure 4b).

CONTEXTE GÉOLOGIQUE / GÉOTECHNIQUE

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

D'un point de vue géomorphologique, cette tranchée couverte est située en rive gauche de l'Huveaune, au pied du massif de Saint Cyr. Le relief est mollement ondulé et marqué de quelques incisions par des talwegs descendant du massif avoisinant.

une mise en service prévue en 2020, qui concernera aussi le tronçon allant jusqu'au boulevard Sainte-Marguerite (sections 2 et 3).

Pour le compte de la Métropole Aix-Marseille Provence, qui bénéficie de l'expertise de la direction des infrastructures, le groupement Egis/Ingerop assure la maîtrise d'œuvre des travaux de la première tranche jusqu'au boulevard Sainte-Marguerite qui représente un montant de 161 M€. Les travaux de la tranchée couverte sont réalisés par Gtm Sud en groupement avec Soletanche Bachy, Marengo, Inter Travaux, Sogea Provence, Botte Fondations et Eurovia.

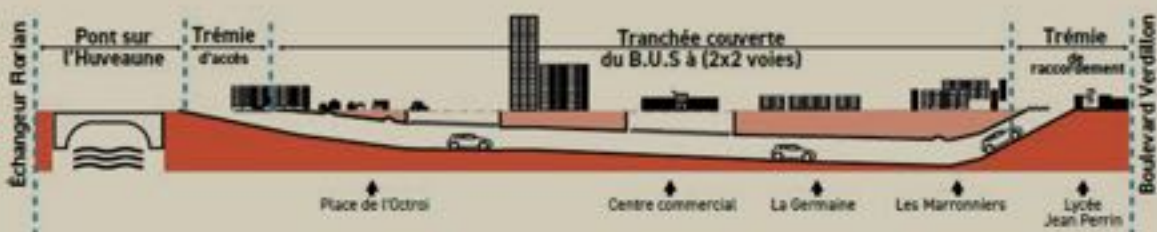
SECTION TYPE DE L'OUVRAGE



2a

2b

COUPE SCHÉMATIQUE DE LA TRANCHÉE 1 AVEC SA TRANCHÉE COUVERTE ET SES TRÉMIES D'ACCÈS



3

Une analyse du modèle numérique de terrain (figure 5), en particulier pour les zones de failles, corrélée avec un examen croisé des différents sondages géotechniques (ceux réalisés pour le projet et antérieurs), a permis d'établir un profil en long géotechnique cohérent sur l'ensemble de l'ouvrage. Celui-ci met en évidence la succession de terrains suivants :

- Remblais hétérogènes en tête dont l'épaisseur varie de 0 à 6 m.
- En partie Nord de l'ouvrage, des dépôts sablo-limoneux à gravelo-argileux alluvionnaires ou des matériaux d'érosion du massif de Saint Cyr, plus grossiers à bréchiques (cônes de déjection) sur la moitié sud du projet (puissance de 2 à 7 m).
- Le substratum du Stampien caractéristique de la région marseillaise, rencontré sur l'ensemble du projet. Celui-ci est constitué de différents faciès, majoritairement marneux et d'un faciès de poudingues très compacts.

Localement, un surcreusement net du toit du substratum au niveau du boulevard du Pont-de-Vivax (toit du Stampien à 17 m au lieu des 5-10 m habituellement rencontrés sur le projet) est vraisemblablement le témoin d'un ancien lit de l'Huveaune.

CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

D'un point de vue hydrogéologique, on note deux secteurs distincts :

- Au nord, la présence d'alluvions anciennes correspondant à la vallée de l'Huveaune.



4a
© GTM SUD

4a- Grue treillis et benne à câble utilisées pour la perforation des parois moulées.

4b- Zone de terrassement en taupe.

4a- Lattice crane and cable grab used for drilling diaphragm walls.
4b- Underground earthworks area.

- Au sud, la présence de brèches quaternaires sur des épaisseurs variables, avec un niveau de nappe généralement situé entre quelques décimètres et 2 m au-dessus du toit du substratum stampien, peu perméable. Ce secteur Sud est caractérisé par une forte hétérogénéité liée à des variations de perméabilité au sein des brèches mais également par la présence de paléotalwegs qui concentrent les écoulements et recoupent en plusieurs points le projet.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

La faible dureté du substratum marneux n'a pas été un problème pour réaliser l'ancrage des parois moulées. En revanche, l'hétérogénéité des terrains sus-jacents avec des passages bréchiques plus ou moins cimentés ou le faciès de poudingues du Stampien ont été source de challenges permanents pour les équipes. Celles-ci ont dû s'adapter rapidement aux changements de conditions géologiques malgré un environnement urbain contraint, notamment en terme de vibrations admissibles au niveau des bâtis avoisinants.

En outre, la forte variabilité lithologique a nécessité un suivi rapproché des travaux, tant au stade de la perforation des parois moulées qu'au niveau des terrassements, par l'équipe géotechnique (missions G3 et G4) afin de s'assurer en permanence de la compatibilité des hypothèses retenues en phase EXE avec la réalité des terrains rencontrés.

PROBLÉMATIQUE DU RADOUCISSEMENT DES MARNES

Le choix a été fait au stade des études EXE d'optimiser certaines hypothèses du projet, en particulier une réduction de la fiche des parois et une augmentation de la cohésion dans les marnes du Stampien.

Afin de valider ces choix, une étude de sensibilité complémentaire a été menée en phase travaux afin de tester l'influence d'une dégradation des paramètres de cisaillement. Celle-ci a consisté à annuler par itérations la cohésion lorsque le palier plastique est



4b
© EGIS

atteint en état de butée (rupture fragile) dans les marnes du Stampien au niveau de la fiche des parois moulées. Ce calcul de sensibilité a permis de mettre en évidence qu'en cas de perte de la cohésion dans les marnes du substratum ayant atteint un état de plasticité, le coefficient de sécurité vis-à-vis de la butée diminue et peut être inférieur à 1,5 en fonction des hypothèses retenues pour le sol d'ancrage. De plus, cette baisse du coefficient de sécurité s'accompagne d'une augmentation des déformations.

Compte tenu des amplitudes de déformation en jeu, leur augmentation liée à un phénomène de rupture du sol en butée serait, en pratique, difficile à suivre voire impossible à détecter par la méthode observationnelle.

Dans ces conditions, la maîtrise d'œuvre a recommandé de prévoir un allongement de la fiche des parois afin de garantir le coefficient de sécurité recherché en phase travaux, ce qui a conduit à un allongement de 0,5 m à 1,5 m en fonction des zones du projet. Afin de satisfaire des conditions de sécurité optimales durant la phase de travaux et de se prémunir contre un risque de plastification des marnes en butée au niveau de la fiche de la paroi, une valeur seuil a été définie en

termes de déplacement de la paroi pendant de la phase de terrassement du fond de fouille à partir de laquelle il serait décidé de mettre en œuvre un deuxième lit du butons (à une cote altimétrique plus basse). Cette disposition a également pour objectif de maîtriser les tassements engendrés sur les bâtis avoisinants, qui localement se trouvent à moins de dix mètres de la paroi et présentent une vulnérabilité aux tassements différentiels.

Une méthode observationnelle a donc été déployée afin de suivre au plus

5- Carte géologique harmonisée (BRGM) drapée sur le modèle numérique de terrain, le projet étant en rouge (extrait dossier PRO Egis).

5- Coordinated geological map (BRGM) draped over the Digital Terrain Model, the project being in red (extract from Egis project file).

près les déformations des parois et les efforts repris dans les butons et d'être en mesure de déclencher rapidement le renforcement du butonnage si nécessaire. Pour ce faire, une vingtaine de sections d'auscultation a été mise en place sur la tranchée (figure 6) et suivie sur une base hebdomadaire (ou plus fréquente, ponctuellement, sur des points sensibles). Chacune d'elles est composée de :

- 2 inclinomètres en paroi, ancrés de 5 m dans le substratum afin de garantir un référentiel fixe à leur base ;
- 4 cellules topographiques pour mesures de convergences, en tête et en ventre de paroi ;
- 3 jauges de déformations sur le buton de la section, afin de connaître son état de contraintes.

Il s'est révélé primordial de disposer de ces différentes sources d'information indépendantes de manière à pouvoir croiser les données collectées et analyser de manière plus robuste le comportement de l'ouvrage, en s'affranchissant au maximum des facteurs extérieurs pouvant influencer sur certaines mesures (dilatation des butons suivant la température, cibles de convergence exposées aux activités du chantier...). En parallèle, les bâtis les plus proches

de l'ouvrage ont été équipés de fissuromètres et de cibles topographiques afin de suivre l'impact du projet sur ces structures.

CONCEPTION D'UN DISPOSITIF DE TRANSPARENCE HYDRAULIQUE MIXTE

Lors des études en phase PRO, les analyses et investigations hydrogéologiques ont montré que le projet était susceptible de générer un effet barrage sur les écoulements souterrains, dans le secteur de la tranchée couverte entre la rue Verdillon et l'Huveaune. Pour atténuer ces désordres au niveau de la nappe et éviter leurs conséquences sur les avoisinants (inondations de caves à l'amont, désordres sur le bâti existant à l'aval), des dispositions constructives ont été prises, à savoir la réalisation de parois moulées en jambes de pantalon afin d'améliorer la transparence hydraulique du projet.

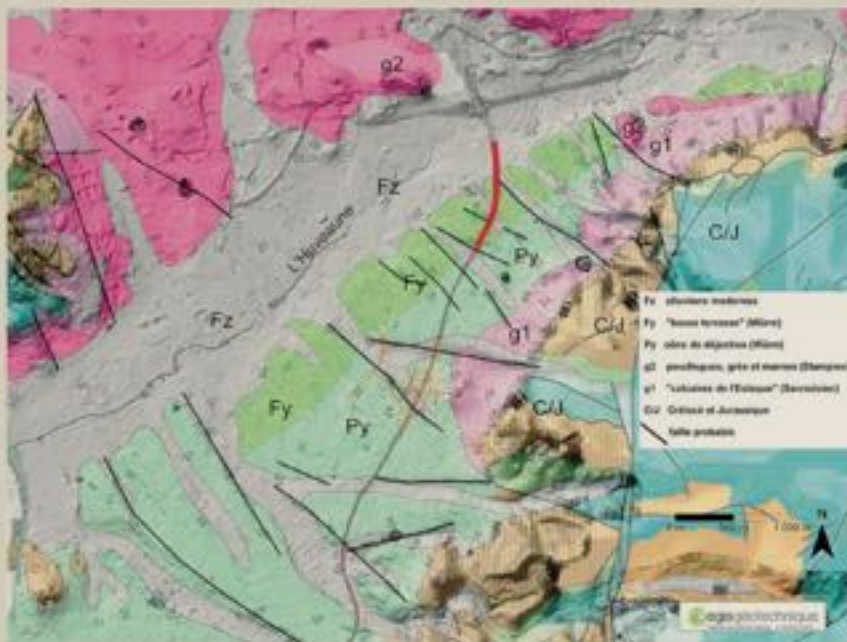
Toutefois, en raison du contexte géologique, il n'est pas possible d'assurer une transparence totale puisque le radier se situe localement dans le substratum très peu perméable (Stampien), rendant impossible tout dispositif de transparence à base de jambes de pantalons.

C'est pour cette raison que d'autres dispositions constructives ont été prises pour limiter l'impact sur la nappe du projet dans sa globalité. Cela signifie d'une part, limiter l'extension et l'amplitude de l'effet barrage en atténuant les variations du niveau piézométrique liées au projet, et d'autre part, assurer la continuité des écoulements souterrains, notamment dans les vallons de forte perméabilité perpendiculaires au projet.

Après étude et analyse des différentes techniques, les jambes de pantalon, qui ne peuvent être mises en œuvre que sur environ 60% du linéaire du projet (soit 600 m sur les 1 000 m), ont été associées à des panneaux drainants. Ces panneaux réalisés au contact des parois moulées, sur leur face extérieure, sont remplis de matériaux drainants et permettent, à l'amont, de collecter l'eau bloquée par le projet et de faciliter la répartition et l'écoulement des eaux à l'aval. Ces deux panneaux sont connectés par une conduite de liaison qui passe sous le radier de la tranchée couverte et à travers les deux parois moulées. Elle permet le transit de l'eau de l'amont vers l'aval, sous l'effet de la différence de charge entre les 2 panneaux, comme indiqué sur le schéma de principe ci-après (figure 7).

CARTE GÉOLOGIQUE HARMONISÉE (BRGM) DRAPÉE SUR LE MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN, LE PROJET ÉTANT EN ROUGE

(extrait dossier PRO Egis)



EXTRAIT DE LA VUE EN PLAN PRÉSENTANT LES SECTIONS D'AUSCULTATION SUIVIES SUR LE PROJET ET UNE COUPE TYPE DU DISPOSITIF MIS EN PLACE
(inclinomètres dans les parois, cibles de convergence et jauges de déformations sur les butons), extrait du dossier EXE



6

© GTM SUD

Au stade PRO, les dispositions constructives retenues sont synthétisées dans le tableau A.

Les longueurs cumulées pour chaque dispositif sont donc les suivantes :

- 175 m sans disposition constructive.
- 515 m de jambes de pantalon (mais, sur un linéaire de 70 m en plus, prévoir panneaux drainants complémentaires au droit des panneaux non ouverts des jambes de pantalon : ces panneaux drainants seront connectés par des conduites Ø 200 à 300 mm passant sous

le radier de l'ouvrage et traversant les parois moulées - réservation à prévoir dans le radier -, l'assise de la conduite étant placée à environ 0,8 m en sous-face du radier. Ainsi, l'écoulement de la nappe se produit d'abord par les panneaux ouverts des jambes de pantalon, puis, par les conduites reliant les panneaux drainants. Ce linéaire supplémentaire de panneaux drainants ajoute 13 conduites additionnelles sous le radier, portant ainsi le total de ces conduites à 68 environ (55+13).

→ 310 m de panneaux drainants.

En phase travaux, l'entreprise a proposé des ajustements et des optimisations de ces dispositions constructives, à partir des observations réalisées durant les travaux de parois moulées et de terrassement (méthode du suivi observationnel). Ces ajustements se traduisent notamment par une diminution du nombre de panneaux drainants. Elle a aussi dû s'adapter à certaines contraintes de chantier, liées à la géologie (discontinuités dans la profondeur du toit du Stampien, présence de blocs, variations de faciès au sein des alluvions...) ou à la présence d'éléments

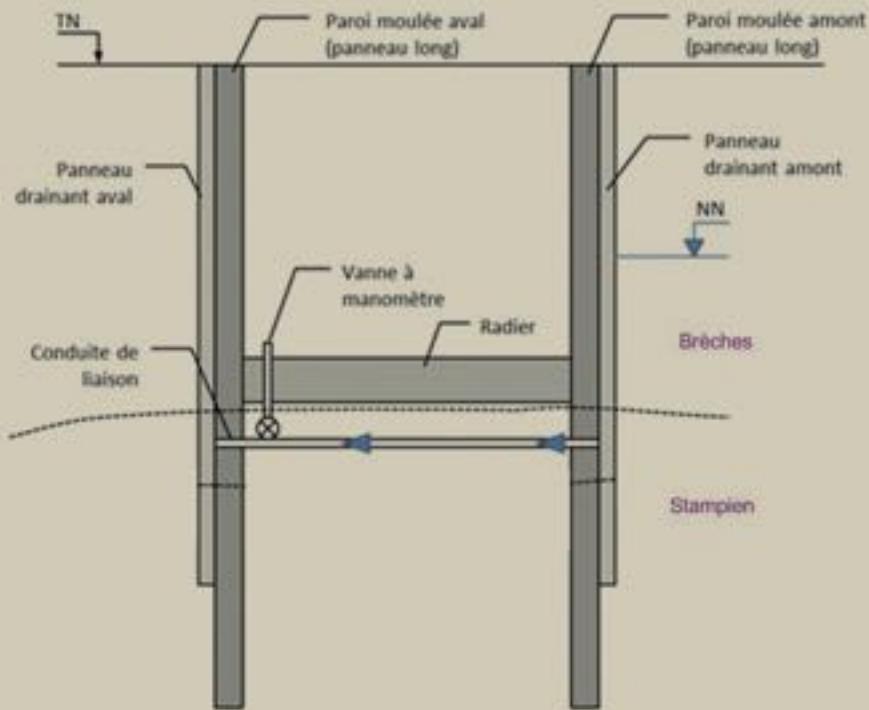
6- Extrait de la vue en plan présentant les sections d'auscultation suivies sur le projet et une coupe type du dispositif mis en place (inclinomètres dans les parois, cibles de convergence et jauges de déformations sur les butons), extrait du dossier EXE.

TABLEAU A : DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES RETENUES

Du Pk...	au Pk...	Longueur (m)	Disposition constructive	Commentaire
3840	4015	175	Aucune	-
4015	4190	175	Jambes de pantalon	Ouverture de la PM dans les brèches
4190	4405	215	Panneaux drainants	-
4405	4475	70	Jambes de pantalon + panneaux drainants	Ouverture de la PM dans les brèches mais épaisseur résiduelle potentiellement très faible
4475	4525	50	Panneaux drainants	-
4525	4680	155	Jambes de pantalon	Ouverture de la PM dans les alluvions
4680	4725	45	Panneaux drainants	-
4725	4840	115	Jambes de pantalon	Ouverture de la PM dans les alluvions
Total (m)		1000		

6- Extract of the plan view showing the monitoring sections followed on the project and a typical cross section of the system put in place (inclinometers in walls, convergence targets and strain gauges on struts), extract from work file.

SCHÉMA DE PRINCIPE DES TRAVERSÉES DRAINANTES PAR PANNEAUX DRAINANTS



CONCLUSIONS

Au premier trimestre 2020, la première section du Boulevard Urbain Sud (BUS) devrait être mise en service après deux ans et demi de travaux qui auront été nécessaires pour réaliser cet ouvrage clé dans la desserte des quartiers Sud de Marseille.

La complexité du contexte géologique et hydrogéologique a nécessité une forte implication des équipes de géotechniciens et d'hydrogéologues côté maîtrise d'œuvre et entreprise, en appui aux équipes travaux, afin d'ajuster au mieux l'ouvrage à son environnement.

La mise en œuvre de la méthode observationnelle en phase travaux a ainsi permis d'optimiser les ouvrages en réduisant la fiche des parois et le nombre de dispositifs de transparence hydraulique, ce qui constitue un atout significatif pour le projet en terme de coûts et de délais. □

particuliers du projet (issues de secours, station de pompage) ne permettant pas la réalisation des dispositions constructives définies en phase PRO. Finalement, le dispositif mis en œuvre contient :

- 16 jambes de pantalons entre les Pk 4010 et 4135 ;
- 13 panneaux drainants raccordés par des connections hydrauliques entre les panneaux amont et aval entre les Pk 4174 et 4533 ;
- 26 jambes de pantalon entre les Pk 4568 et 4796, complétées par 2 panneaux drainants aux Pk 4684 et 4707 ;
- 3 jambes de pantalon uniquement sur la paroi Ouest (aval) aux Pk 4804, 4811 et 4818 en raison de la différence de cote du toit du Stampien dans ce secteur Nord ;
- 3 traversées drainantes en matériaux calibrés et reliant des jambes de pantalons aux Pk 4604, 4625 et 4639.

7- Schéma de principe des traversées drainantes par panneaux drainants.

7- Schematic diagram of drainage crossings by draining panels.

En complément, et pour assurer le suivi du niveau de la nappe pendant les travaux et à l'issue de ceux-ci, un réseau de piézomètres est implanté et suivi régulièrement afin de garantir l'absence de désordres au niveau des écoulements souterrains liés au projet et de confirmer la transparence hydraulique de la tranchée couverte.

PRINCIPALES QUANTITÉS

LONGUEUR DE L'OUVRAGE : 998 m

PAROIS MOULÉES : 24 530 m²

FERRAILLAGE DE LA PAROI MOULÉE : 75 kg/m³

DÉBLAI TRANCÉE COUVERTE : 180 000 m³

BUTONS : 165 u

TRANSPARENCE HYDRAULIQUE PAR PANNEAUX DRAINANTS : 15 u

TRANSPARENCE HYDRAULIQUE PAR JAMBES DE PANTALON : 45 u

SECTIONS D'AUSCULTATION : 19 u

MONTANT DU MARCHÉ : 161 M€

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Métropole Aix Marseille Provence

CONCEPTION ET MAÎTRISE D'ŒUVRE TRAVAUX : Egis, Ingerop

GROUPEMENT D'ENTREPRISES DE TRAVAUX : Gtm Sud, Soletanche Bachy, Marengo, Inter Travaux, Sogea Provence, Botte Fondations, Eurovia

ABSTRACT

SOUTH MARSEILLE URBAN BOULEVARD - GEOTECHNICAL ENGINEERING AND OPTIMISATION

CLÉMENT MOUGEL, EGIS - SÉBASTIEN FLORIAT, EGIS

The cut-and-cover tunnel of the South Marseille Urban Boulevard ("BUS") is an essential link in the project to improve access to the southern district and provide a link with the A50/A507 interchange. This diaphragm-wall structure underwent optimisation during its design and execution, based in particular on use of the observational method during the works phase. The as-built structure thus represents optimal integration by limiting its impact on its environment, in terms of hydraulic transparency and built-up land. □

CIRCUNVALACIÓN URBANA SUR DE MARSILLA - ESTUDIOS Y OPTIMIZACIONES GEOTÉCNICAS

CLÉMENT MOUGEL, EGIS - SÉBASTIEN FLORIAT, EGIS

La túnel en zanja cubierta de la Circunvalación Urbana Sur de Marsella es un eslabón clave del proyecto de integración de los barrios del sur de la ciudad y de enlace con el nudo A50/A507. Esta obra en pantallas de hormigón ha sido objeto de optimizaciones a lo largo de su diseño y su realización, entre las que destaca la aplicación del método de observación durante la fase de obras. La obra ejecutada responde así a una integración óptima que limita su impacto sobre el entorno en términos de transparencia hidráulica y estructura. □



1
© YVES CHANOIT

SAINT-MAUR-CRÉTEIL - LA GARE LA PLUS PROFONDE DU GRAND PARIS EXPRESS

AUTEURS : FRÉDÉRIC LAMOTTE, DIRECTEUR DE PROJET, SEFI-INTRAFOR - DAMIEN LAMBLLOT, ADJOINT AU DIRECTEUR DE PROJET, SEFI-INTRAFOR

PARMI LES 68 GARES DU GRAND PARIS EXPRESS, LA GARE DE SAINT-MAUR-CRÉTEIL EST LA PLUS PROFONDE. LES QAIS DU MÉTRO SERONT À 52 m DE PROFONDEUR. POUR Y ACCÉDER LES VOYAGEURS EMPRUNTERONT L'UN DES ONZE ASCENSEURS À FORTE CAPACITÉ OU L'ESCALIER HÉLICOÏDAL MONUMENTAL ET DESCENDRONT À UN NIVEAU ÉQUIVALENT À UN 15^e SOUS-SOL. ILS SERONT À L'ABRI D'UNE PAROI MOULÉE RÉALISÉE PAR SEFI-INTRAFOR D'ÉPAISSEUR 1,80 m DESCENDANT À 70 m DE PROFONDEUR, DONT 35 m DANS LA CRAIE ROCHEUSE.

UN OUVRAGE EXCEPTIONNEL

La gare de Saint-Maur-Créteil fait partie de la Ligne 15 Sud (ligne rouge) du Grand Paris Express. Elle est implantée sur la commune de Saint-Maur-des-Fossés (94) en interconnexion avec la gare aérienne du RER A portant le même nom (figure 1).

La gare est décomposée en :

- Un puits central terrassé à l'abri de parois moulées ;
 - Deux galeries de part et d'autre du puits central, chacune terrassée en méthode traditionnelle (figure 2).
- La paroi moulée du puits central a une forme oblongue (forme de gélule) de

pourtour 170 m. D'épaisseur 1,80 m et de profondeur 70 m, elle est décomposée en 30 panneaux dont les longueurs varient de 2,80 m à 8,30 m :

- $2 \times 12 = 24$ panneaux dans les deux parties circulaires de la gare à ciel ouvert ;
- $2 \times 3 = 6$ panneaux dans les deux parties droites de la gare à ciel ouvert.

Entre chaque panneau, un joint water-stop est mis en place sur toute la hauteur de la paroi moulée. Le joint water-stop est fixé sur un coffrage métallique provisoire de 69 m de hauteur. À l'intérieur du puits central, douze poteaux pré-fondés de 85 m de pro-

1- Gare Saint-Maur-Créteil vue du ciel pendant la construction de la paroi moulée.

1- Aerial view of Saint-Maur-Créteil Station during construction of the diaphragm wall.

fondeur avec une section de 1,20 m par 2,80 m portent les sept niveaux de dalles réalisées au fur et à mesure du terrassement en taupe jusqu'au radier.

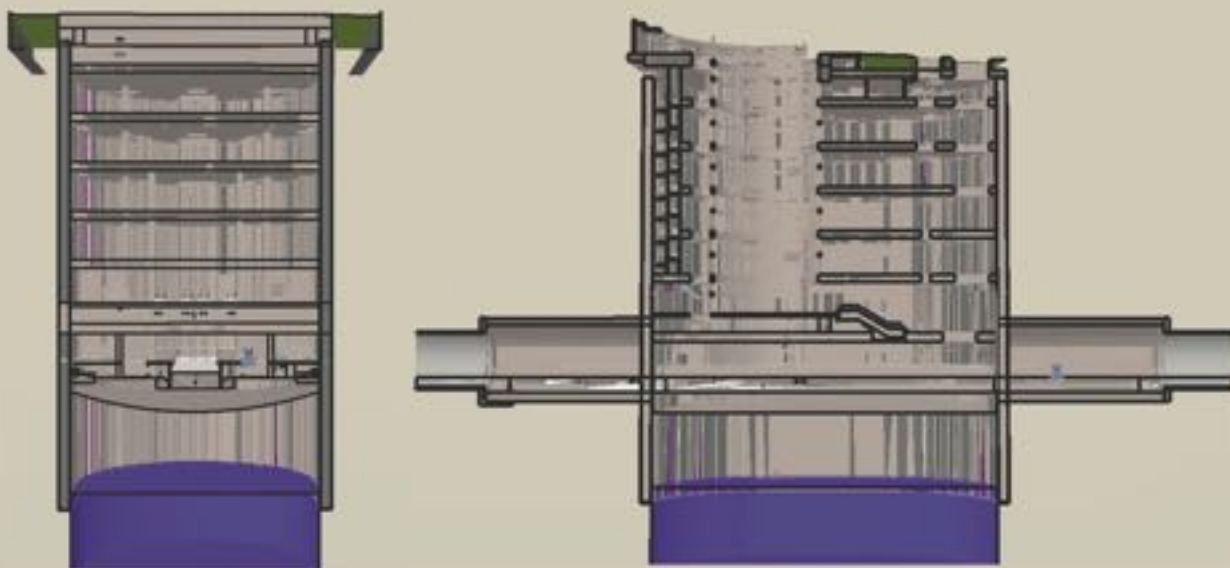
UN PLANNING AMBITIEUX MALGRÉ UN ENVIRONNEMENT EXIGEANT

Les travaux de construction de la gare à ciel ouvert démarrent à l'été 2017.

D'importants travaux préparatoires sont réalisés avant la construction de l'ouvrage définitif :

- Le soutènement de la gare aérienne du RER A avoisinante et maintenue en service ;
- La démolition de deux niveaux de parking amiantés au droit de la future gare ;
- Le remblaiement pour la plateforme de réalisation de la paroi moulée.

EXTRAIT DE LA MAQUETTE 3D DE LA GARE SAINT-MAUR-CRÉTEIL



© SEFI-INTRAFOR

2

Les travaux de paroi moulée et poteaux pré-fondés démarrent à l'automne 2018. Ils se terminent à l'été 2019. Le terrassement et le génie civil en taube prennent la suite.

Le tunnelier part de la gare de Créteil-l'Échat à l'automne 2019 et traverse la gare de Saint-Maur-Créteil "boîte pleine" à l'été 2020. À ce moment, le terrassement des 30 premiers mètres et les dalles S0, S1, S2 et S3 du puits central sont terminés.

La suite du terrassement et les dalles S4, S5, S6, S7 jusqu'au radier sont réa-

2- Extrait de la maquette 3D de la gare Saint-Maur-Créteil.

3- Schéma des étapes de l'essai de forage.

2- Extract from the 3D model of Saint-Maur-Créteil Station.

3- Diagram of drilling test stages.

lisés en fonction de l'avancement du tunnelier après sa traversée de la gare Saint-Maur-Créteil. Le percement final du tunnelier est prévu au printemps 2021 à Champigny-sur-Marne.

Ces travaux titanesques en plein centre-ville, à proximité immédiate des habitations et de la gare en service, nécessitent des précautions toutes particulières.

La réduction des nuisances sonores et visuelles, ainsi que les auscultations des bâtis avoisinants sont des points clés de la réussite du projet.

UNE HYDROGÉOLOGIE DÉLICATE

Pour parfaire le tableau, la géologie parisienne s'invite dans les défis à relever.

La commune de Saint-Maur-des-Fossés ne dispose pas en son sous-sol d'une couche rocheuse peu profonde servant de fondation comme cela est le cas pour Paris et la majorité des communes d'Île-de-France, avec la couche de Calcaire Grossier par exemple. C'est notamment pour cette raison que le tunnel de la Ligne 15 Sud est aussi profond pour son passage sous la commune de Saint-Maur-Des-Fossés.

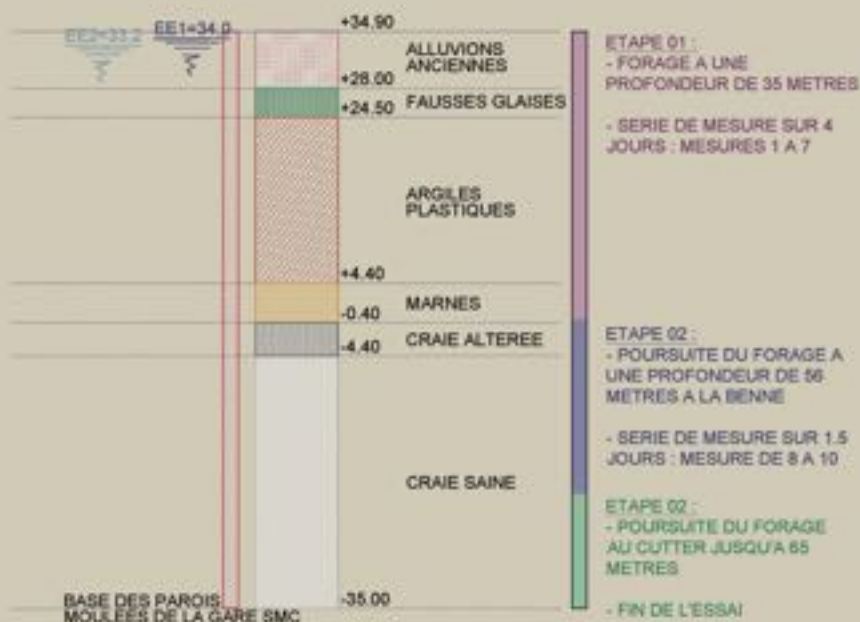
Saint-Maur-Des-Fossés est à l'intérieur d'un méandre de la Marne.

La gare de Saint-Maur-Créteil est donc pratiquement dans le lit de la Marne. Les terrains de têtes alluvionnaires sur les dix premiers mètres sont le siège des fluctuations de la nappe associée à la rivière.

En dessous, les Argiles Plastiques de l'Yprésien, sur une vingtaine de mètres, gonflent et se transforment en une pâte dès qu'elles sont en contact avec l'eau. Fortement consolidées par leur poids et le sol au-dessus, elles se relaxent lors de leur terrassement.

À partir de 30 m de profondeur, le Marno Calcaire du Montien, est un banc rocheux d'épaisseur 5 m environ. Au-delà des 35 m de profondeur, la Craie à Silex du Campanien est une roche fracturée très aléatoirement du fait de la proximité de l'anticlinal de Meudon. Les arrivées d'eau dans cet horizon, liées à la nappe phréatique captive sous pression sont notablement imprévisibles.

SCHÉMA DES ÉTAPES DE L'ESSAI DE FORAGE



© SEFI-INTRAFOR

3

Les risques géologiques majeurs identifiés pour la réalisation de la paroi moulée sont :

- La décompression élastique des argiles ;
- La convergence des argiles plastiques dans la tranchée excavée.

Ces risques peuvent entraîner :

- Le coincement de l'outil de forage ;
- Un défaut d'enrobage des armatures en acier des parois moulées ;
- L'éboulement des argiles et/ou alluvions du fait du tassement de la couche d'argile ;
- Des tassements en surface potentiellement préjudiciables pour les avoisinants.

UN FORAGE D'ESSAI GRANDEUR NATURE

Compte-tenu de la complexité de l'ouvrage et du contexte hydrogéologique, Sefi-Intrafor décide de réaliser un

forage d'essai grandeur nature avant la construction de la paroi moulée.

Le forage d'essai a pour section 1,80 m par 2,80 m et descend à 65 m de profondeur. Il se décompose en trois étapes (figure 3).

Pour chaque étape, Sefi-Intrafor mesure à intervalles réguliers :

- Le profil du forage à l'aide d'un enregistreur Koden décrit ci-dessous ;
- Les déformations du terrain autour de l'excavation grâce à des inclinomètres ;
- Les tassements du terrain à l'avant et à l'arrière de l'excavation grâce à des tassomètres.

UTILISATION DU KODEN POUR CONNAÎTRE LE PROFIL DES PAROIS DU FORAGE

Le Koden DM 684 (figure 4) est un appareil de contrôle permettant l'en-

registrement du profil de l'excavation. La sonde de mesure reliée à un treuil, utilise 4 transducteurs ultrasoniques placés en opposition suivant 2 axes perpendiculaires XX' et YY'.

Un émetteur/récepteur d'ultrasons est descendu à vitesse constante et dans un même plan dans une excavation remplie d'eau, ou de boue (densité inférieure à 1,20). Pendant son mouvement de descente ou de remontée, les échos de ces émissions ultrasoniques contre les parois de l'excavation sont enregistrés en continu de manière à définir le profil de l'excavation selon le plan de contrôle considéré.

L'émetteur/récepteur permet de mesurer la distance des parois dans deux plans perpendiculaires, ce qui permet d'effectuer deux lectures distinctes à 90°. La lecture se fait à la descente et également à la remontée.

UTILISATION DES INCLINOMÈTRES POUR CONNAÎTRE LE DÉPLACEMENT HORIZONTAL DES PAROIS DU FORAGE

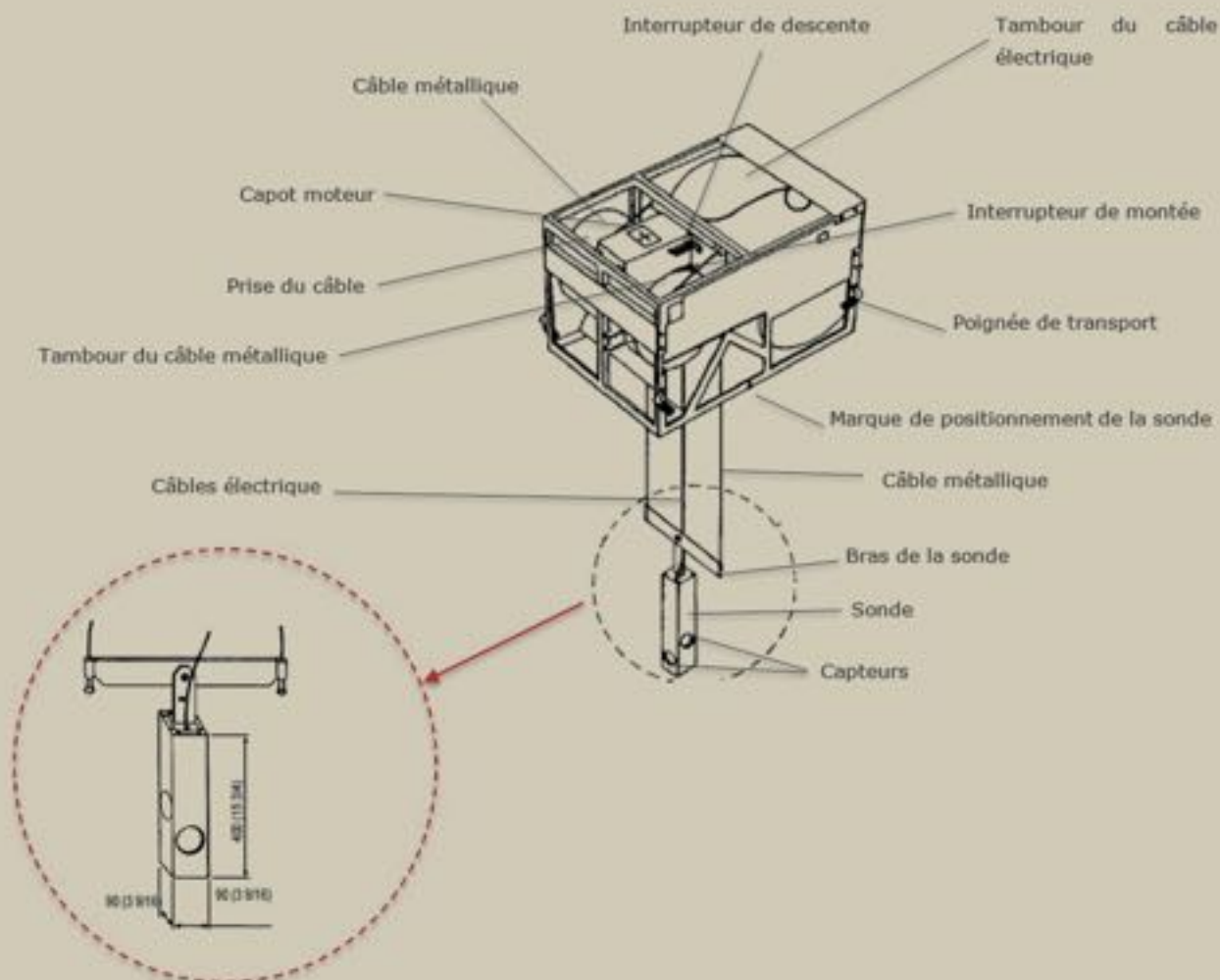
Les inclinomètres sont utilisés pour mesurer le mouvement latéral du sol ou les déformations latérales de structures. Ils sont tout à fait adéquats pour déterminer la profondeur, la direction, l'amplitude et l'évolution des mouvements.

La sonde insérée dans le tube inclinométrique est reliée à l'enrouleur par un câble gradué. Un signal déclenche l'acquisition des mesures de l'accéléromètre. Cet accéléromètre permet

4- Schéma du Koden.

4- Diagram of the Koden device.

SCHÉMA DU KODEN



de mesurer l'angle entre l'axe d'un objet et l'axe de la gravité terrestre. Les mesures d'angle sont prises à intervalles réguliers de 0,5 m de tube. Cela est mesuré et contrôlé à l'aide de marqueurs métalliques sertis autour du câble qui viennent se loger successivement dans une gorge prévue à cet effet. Une lecture initiale est obtenue à chaque pas de mesure. L'intégration des mesures incrémentales donne le profil des déplacements horizontaux du tube en fonction de la profondeur par comparaison des angles issus des mesures précédentes à une même profondeur.

En comparant les mesures ultérieures prises aux mêmes profondeurs il est possible de comparer les déformées et de connaître la direction, l'amplitude et la vitesse des déformations. En général on représente les déformées du tube en fonction de la profondeur.

UTILISATION DE L'EXTENSOMÈTRE POUR CONNAÎTRE LE TASSEMENT EN PROFONDEUR AU DROIT DU FORAGE

L'extensomètre de forage permet de mesurer précisément les tassements ou soulèvements entre une ou plusieurs ancres placées en forage et la tête de référence.

5- Récapitulatif des mesures au Koden.

6- Récapitulatif des mesures inclinométriques.

5- Summary of Koden measurements.

6- Summary of inclinometer measurements.

Les mouvements des ancres dans l'axe du forage sont mesurés en déterminant le déplacement du sommet des tiges par rapport à la tête de référence.

L'extensomètre est utilisé pour mesurer et identifier des tassements, déplacements et déformations dans le sol ou la roche, de l'ordre millimétrique. Il constitué d'une tête de référence et d'un ou plusieurs points d'ancrage placés dans le forage. Chaque point d'ancrage est relié à la tête de référence par une tige rigide métallique ou un jonc souple en fibre de verre placé dans une gaine qui permet de le désolidariser du scellement et donc d'assurer son libre déplacement.

Lorsque le sol ou la roche se déforme, les distances entre les ancrages et la tête changent. L'amplitude et la distribution de ces déplacements est mesurée avec précision au niveau de la tête de référence. La lecture peut être manuelle

avec une jauge de profondeur ou électrique avec un capteur à corde vibrante.

MESURES ET INTERPRÉTATION DES ESSAIS

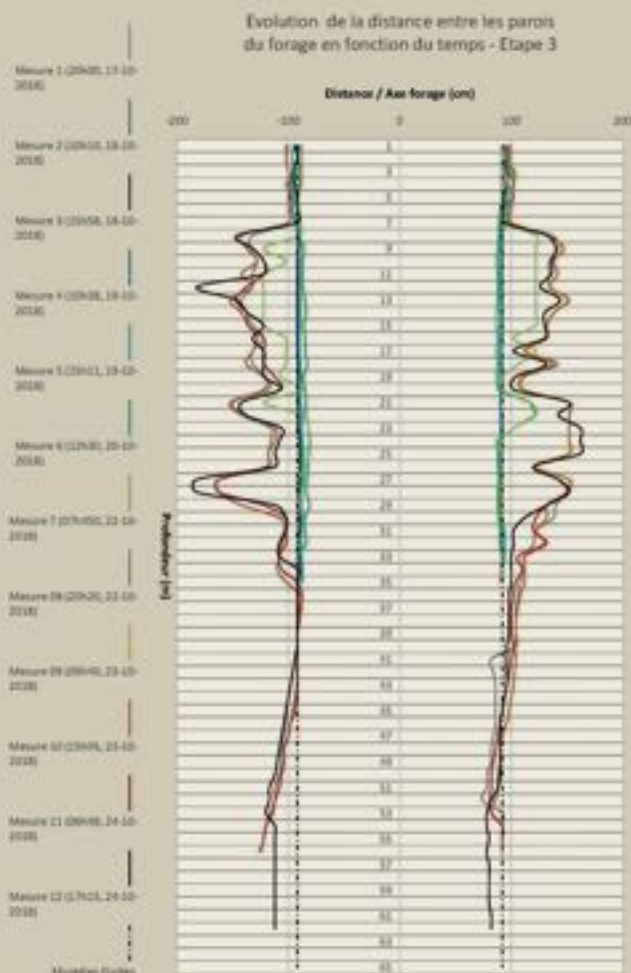
À partir des mesures au Koden et inclinométriques pendant toute la durée de l'essai, trois phases se distinguent dans le comportement des Argiles Plastiques.

Resserrement faible des argiles de 0 à 56 heures :

Les inclinomètres indiquent un déplacement des Argiles Plastiques jusqu'à 12 mm dès les premières heures d'excavation, avec un phénomène de décompression immédiate. Puis des déplacements faibles et lents sur les deux premiers jours (de 12 à 16 mm en 56 heures).

Le Koden montre un faible resserrement des Argiles Plastiques et de faibles éboulements (resserrement de 2 à 5 cm). ▶

RÉCAPITULATIF DES MESURES AU KODEN





7



8

7 & 8- Levage du coffrage métallique provisoire de 69 m de haut.
9 & 10- Cales sur les coffrages métalliques provisoires dans les parties circulaires de la paroi moulée.

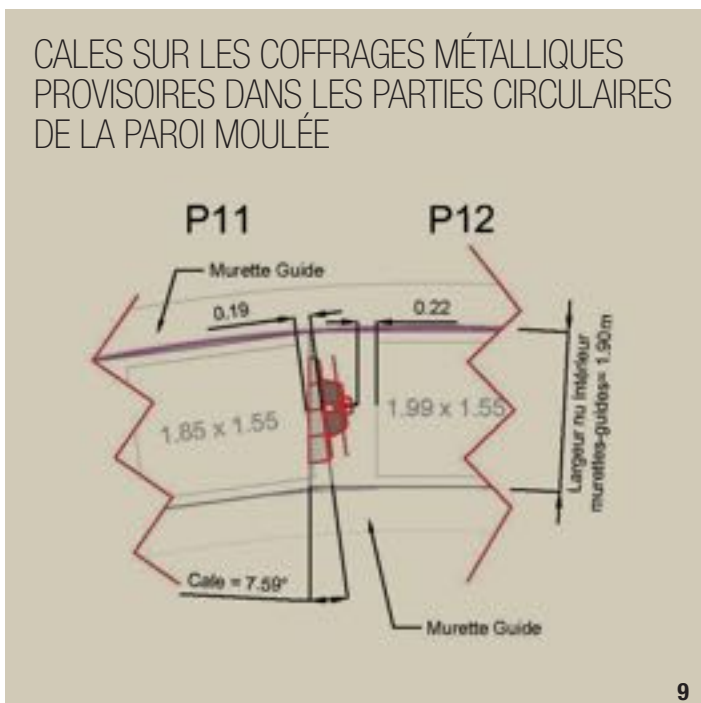
7 & 8- Lifting the temporary steel formwork to a height of 69 m.
9 & 10- Shims on the temporary steel formwork in the circular parts of the diaphragm wall.

Aucun dépôt de matériaux n'est constaté en fond d'excavation. Le premier tassomètre fait apparaître des tassements de 0 mm à 3 mm et de 1 mm à 12 mm de profondeur. Le deuxième tassomètre montre que les tassements augmentent avec la profondeur (1 mm à 3 mm jusque 2 mm à 15 m de profondeur) dès le démarrage de l'excavation. Les tassements évoluent très peu pendant toute cette phase.

Resserrement plus rapide et éboulements des argiles de 56 à 146 heures :
 Les inclinomètres montrent une augmentation de la vitesse de déplacement horizontal (de 16 à 28 mm en 90 heures). Le Koden montre des éboulements accentués et amplifiés (de 5 cm à 32 cm à 120 heures, puis des pics de 67 cm à 132 heures). Le dépôt d'argiles en fond de panneau est de 3 m

à 76 heures et 8 m à 120 heures. Pendant cette phase, l'évolution des tassements n'est pas significative, car inférieure à 1 mm. **Stabilisation des argiles au-delà de 146 heures jusque 177 heures :**
 Les déplacements horizontaux mesurés aux inclinomètres ralentissent et s'arrêtent à partir de 146 heures (de 29 mm à 30 mm en 33 heures sur I2 et 18 à 22 mm en 33 heures sur I1).

Le Koden indique une largeur d'excavation stable, même après le forage au cutter jusqu'à 65 m. On constate qu'il y a très peu de matériaux en fond de panneau à chaque mesure Koden. Pendant cette phase, les tassements évoluent de 1 à 2 mm, hormis le point à 15 m de profondeur sur le deuxième tassomètre (5 mm en cumulé). Il semble que les tassements se produisent entre 24 et 48 heures après le



9



10



11

© SEFI-INTRAFOR

resserrement et les éboulements des Argiles Plastiques.

Le récapitulatif des mesures Koden est en figure 5 et le récapitulatif des mesures Inclinométriques est en figure 6.

Comportement des argiles lors de l'exécution des parois moulées de la gare :

Le comportement de relaxation des argiles décrit ci-dessus est observé lors de la réalisation des deux premiers panneaux primaires des parois moulées.

Des éboulements importants se produisent entre 3 et 35 m de profondeur les premiers jours. Puis une période de stabilisation permet d'équiper les armatures et procéder au bétonnage.

Les surconsommations de béton importantes de 30 à 60% du volume théorique engendrent des difficultés pour la réalisation des panneaux de parois moulées adjacents du fait du béton à forer.

Phénomène étonnant, cette instabilité des argiles plastiques se réduit considérablement sur les panneaux suivants. Les surconsommations de béton sont de l'ordre de 5 à 15%, ce qui permet la réalisation des parois moulées dans des conditions plus sereines.

DES MÉTHODES DE TRAVAIL ADAPTÉES AUX ENJEUX

En dehors des surconsommations importantes de déblais de forage et de béton, avec des hors-profils de paroi moulée importants à prévoir au terrassement, le resserrement et les éboulements des Argiles Plastiques

11- Travail de nuit.

11- Night work.

sont un risque important pour la qualité de l'ouvrage lors de l'équipement et du bétonnage du panneau.

Pour limiter ce risque, il est nécessaire de réaliser l'opération d'équipement et de bétonnage en moins de 48 heures. L'équipement d'un panneau dure environ 24 heures avec :

- 14 éléments d'armatures de 15 m chacun environ, soit entre 70 et 140 t ;
- Le coffrage métallique provisoire de 69 m de haut sur lequel il est nécessaire de positionner une cale (figures 9 et 10) du fait de la forme circulaire de la paroi moulée sur la majorité du pourtour.

Le bétonnage d'un panneau dure entre 14 et 20 heures avec entre 700 et 1100 m³ à couler.

Ce qui ne laisse pas de temps pour assembler le coffrage métallique provisoire de 69 m au moment de l'équipement.

Les solutions mises en place par Sefi-Intrafor pour garantir un délai d'équipement et de bétonnage de moins de 48 heures sont :

- Travaux en 24h/24h (figure 11) ;
- Non démontage des coffrages métalliques provisoires de 69 m pendant toute la durée du chantier.

Pour ne pas démonter les coffrages métalliques provisoires de 69 m, il est nécessaire d'avoir un forage terminé à 70 m de profondeur pour pouvoir les stocker. Cependant, compte-tenu du resserrement et des éboulements des Argiles Plastiques, le forage de stockage n'est absolument pas pérenne sur la durée du chantier.

Sefi-Intrafor a donc eu l'idée d'utiliser le forage d'essai. Pour ce faire, Sefi-Intrafor a confectionné cinq caissons métalliques rectangulaires assemblés et soudés les uns aux autres au fur et à mesure de leur descente dans le forage d'essai (figure 12).



12

© SEFI-INTRAFOR

12- Assemblage des caissons métalliques pour la transformation de l'essai de forage en fosse de stockage des coffrages métalliques provisoires.

12- Assembly of steel box sections for transformation of the drilling test into a storage pit for temporary steel formwork.

Au final, le grand caisson assemblé de 60 m de profondeur et rempli d'eau empêche les éboulements de terrain et permet de stocker les coffrages métalliques provisoires à l'intérieur.

Pour manutentionner ces coffrages métalliques provisoires de 69 m, Sefi-Intrafor utilise une grue de manutention sur chenilles Liebherr LR1280 (280 t) avec 83 m de flèche treillis.

Pour le forage, deux ateliers de grues sur chenilles Liebherr HS8130 (130 t) et HS895 (200 t) avec bennes à câble lourdes de 30 t sont mobilisées en parallèle de l'atelier sur chenilles Bauer Cutter MC96+BC40, couplé à sa centrale de traitement BE550.

Une dernière grue de manutention d'appoint Liebherr LR1160 (160 t) permet de lever des charges plus lourdes que la LR1280, pour les phases de liaisonnement d'armatures par exemple. □

PRINCIPALES QUANTITÉS POUR LA PARI MOULÉE DE LA GARE DE SAINT-MAUR-CRÉTEIL

DÉBLAIS ET BÉTON : 25 000 m³

ARMATURES : 2 000 t

STOCKAGE DE BOUE BENTONITIQUE : 2 500 m³

DÉLAIS : 10 mois de travaux 24h/24h, 5j/7j

NOMBRE DE DÉCOFFRAGES : 30 décoffrages à 69 m de profondeur

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MOA : Société du Grand Paris

MOE : Systra

BUREAU DE CONTRÔLE : groupement Bureau Veritas / Apave

TITULAIRE : groupement Eiffage (mandataire) / Razel-Bec

SOUS-TRAITANT FONDATIONS PROFONDES : Sefi-Intrafor

ABSTRACT

SAINT-MAUR-CRÉTEIL - THE DEEPEST STATION OF THE GRAND PARIS EXPRESS

FRÉDÉRIC LAMOTTE, SEFI-INTRAFOR - DAMIEN LAMBLLOT, SEFI-INTRAFOR

The plastic clays of the subsoil in Saint-Maur-des-Fossés (a Paris suburb) complicate construction of the new metro line 15 South. In this area, the tunnel plunges to a depth of 55 m in the rocky chalk, well below the plastic clays. Saint-Maur-Créteil Station is therefore the deepest station of the 'Grand Paris Express' metro project. The station enclosure is executed by the diaphragm wall technique 1.80 m thick and 70 m deep. This diaphragm wall of exceptional size passes through very unstable plastic clays during drilling. To meet this challenge, Sefi-Intrafor carried out a full-scale test before starting the site works, to adapt its work methods. □

SAINT-MAUR-CRÉTEIL - LA ESTACIÓN MÁS PROFUNDA DEL GRAND PARIS EXPRESS

FRÉDÉRIC LAMOTTE, SEFI-INTRAFOR - DAMIEN LAMBLLOT, SEFI-INTRAFOR

Las arcillas plásticas del subsuelo de Saint-Maur-des-Fossés (periferia de París) complican la construcción del nuevo metro de la Línea 15 Sur. En esa zona, el túnel desciende hasta los 55 m de profundidad en la roca caliza, muy por debajo de las arcillas plásticas. Por tanto, la estación de Saint-Maur-Créteil es la más profunda de la red de transporte público Grand Paris Express. El recinto de la estación se ha realizado en pantalla de hormigón de 1,80 m de espesor, a una profundidad de 70 m. Esta pantalla de hormigón de dimensiones excepcionales atraviesa unas arcillas plásticas muy inestables durante su perforación. Para superar este desafío, Sefi-Intrafor ha realizado un ensayo a escala real antes del inicio de las obras para adaptar sus métodos de trabajo. □

1859
2019



L'assureur
SMA *160 ans*
au service
du **BTP**



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




SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

SMA **VIE**



Projet Eole, Ile-de-France, France
Réalisation des fondations du lot GC-PUI :
5 puits en parois moulées.

Intervenant partout dans le monde pour le compte de clients publics ou privés, Soletanche Bachy s'attache à proposer les meilleures solutions techniques et contractuelles.

Elle apporte aussi bien des compétences polyvalentes d'ensemblier dans le cadre de grands projets d'infrastructures, que celles de spécialiste maîtrisant l'ensemble des procédés de géotechnique, de fondations spéciales, de travaux souterrains, d'amélioration et de dépollution des sols.

Construire sur du solide

www.soletanche-bachy.com



SOLETANCHE BACHY