

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

SOLS ET FONDATIONS. SYCTOM D'IVRY/PARIS XIII. PROJET NATIONAL ARSCOP. LYON PART-DIEU ET TOUR TO-LYON. RTE MET EN SOUTERRAIN DES LIGNES ELECTRIQUES AU NORD DE PARIS. PAROI MOULEE DEFINITIVE SANS ARMATURE. DALLE-SUPPORT DU BANC DE SOUDAGE DES RESERVOIRS D'ARIANE 6. LE REGINA BYPASS. DES PIEUX SECANTS A ALGER. CALAIS PORT 2015 - DES REMBLAIS HYDRAULIQUES. CONTOURNEMENT OUEST STRASBOURG. REMBLAIS DE LA RN88

N° 965 DÉCEMBRE 2020



LIGNE 15 SUD : GARE
DE BRY - VILLIERS -
CHAMPIGNY
© COTEG

LES TRAVAUX
FÉDÉRATION
PUBLICS NATIONALE



La protection
de l'ensemble
de vos projets
immobiliers

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

Globale Maître D'Ouvrage

Promoteurs immobiliers, investisseurs, collectivités territoriales, maîtres d'ouvrage publics ou privés, sécurisez votre activité de manière innovante grâce à notre nouveau contrat **Globale Maître D'Ouvrage.**

Pour plus de renseignements, contactez-nous au 04 72 74 52 52

l'Auxiliaire
Entreprendre avec assurance

50, cours Franklin Roosevelt - BP 6402 - 69413 Lyon cedex 06
Tél : 04 72 74 52 52 - auxiliaire@auxiliaire.fr

Siret 77564905600014 - Code APE 6512 Z
Entreprise régie par le code des assurances - Société d'assurance mutuelle à cotisations variables
Société d'assurance exonérée de plein droit de la TVA (article 261 C.2° Du C.G.I.)

Directeur de la publication
Bruno Cavagné**Directeur délégué**
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fnfp.fr**Comité de rédaction**

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

Ont collaboré à ce numéro

RédactionMonique Trancart (actualités),
Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente**

Com et Com

Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copernic - 20 av. Edouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.frFrance (9 numéros) : 190 € TTC
International (9 numéros) : 240 €
Enseignants (9 numéros) : 75 €
Étudiants (9 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)**Publicité**

Rive Média

10, rue du Progrès - 93100 Montreuil
Tél. : 01 41 63 10 30
www.rive-media.fr**Directeur de clientèle**Bertrand Cosson -
b.cosson@rive-media.fr
L.D. : 01 41 63 10 31**Site internet : www.revue-travaux.com****Édition déléguée**

Com'1 évidence

2, chemin dit du Pressoir
Le Plessis

28350 Dampierre-sur-Avre

Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.com

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

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

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

Éditions Science et Industrie SAS

9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0218 T 80259
ISSN 0041-1906

LES FONDEMENTS DU MÉTIER



© CAROLINE MOUREAUX

S'il est une base commune à tous les ouvrages de travaux publics, c'est bien qu'ils ont affaire avec le sol, qu'il s'agisse d'y creuser un tunnel, d'y fonder un pont ou d'en soutenir les terres. Ainsi, la géotechnique (mécanique des sols comprise) est l'un des piliers de la formation des ingénieurs et techniciens des travaux publics. Lorsqu'elle est abordée après des études scientifiques très poussées, elle désarçonne par son côté empirique. Mais c'est le seul moyen de modéliser les milieux trop complexes pour être décrits par des équations.

C'est aussi pour cela que l'expérience et l'expérimentation demeurent toutes deux nécessaires lorsque l'on parle de sols et de fondations, en d'autres termes d'interaction sols/structures, que ce soit pour lancer des innovations ou pour faire face aux aléas des chantiers.

En métropole, les pôles urbains accueillent de nombreux travaux, que l'épidémie de Covid-19 n'aura fait que ralentir ou reporter modérément. Les entreprises françaises demeurent aussi très présentes à l'international sur ce créneau. Ce sont autant de

terrains de jeu pour développer les solutions audacieuses et originales, là où l'imagination ne semble pas avoir de limites.

Encore faut-il que les modalités contractuelles permettent de créer un terreau favorable au lieu de reproduire les solutions éprouvées. Les pratiques devenues usuelles pour les travaux souterrains mériteraient d'être étendues aux autres contrats où le sol est une donnée importante : limite des conditions normales d'exécution, plan de management des risques... Dans certains cas, c'est aussi la conception-réalisation qui peut être une bonne solution. Mais, au-delà du contrat, l'état d'esprit des intervenants du chantier est fondamental. L'expérience - encore elle - montre que c'est souvent au moment des études d'exécution, à la lumière des méthodes maîtrisées par l'entreprise, qu'émergent les idées permettant d'optimiser la conception du maître d'œuvre. Il faut donc que chaque intervenant accepte les confrontations d'idées et prenne, avec un minimum de courage, sa part des risques dans ce processus d'adaptation, même s'il intervient tardivement, vers la recherche d'un gain partagé.

Certes, en matière de bonnes pratiques contractuelles, la réalité du quotidien est parfois décevante au regard des discussions que nous pouvons avoir au sein des associations professionnelles ou de ce que l'on peut lire dans les documents méthodologiques. Plus qu'un motif de découragement, cela doit nous inciter à poursuivre nos efforts collectifs. Ces dernières années, ceux-ci ont été perturbés par des changements fréquents des règles applicables pour la passation des marchés publics. Espérons que le code de la commande publique soit dorénavant une base pérenne et que le chantier de la réécriture des cahiers des clauses administratives générales aboutisse à un bel édifice reposant sur de bonnes fondations.

ALAIN CHABERTDIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT
TUNNEL EURALPIN LYON-TURIN

SOLS & FON DATIONS

TRAITEMENT DES LOESS ET DES LEHMS POUR LES TERRASSEMENTS DU CONTOURNEMENT OUEST DE STRASBOURG © VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT



04 ALBUM

08 ACTUALITÉ



18

**ENTRETIEN AVEC
THIERRY HUYGHUES-
BEAUFOND**

GRAND PARIS EXPRESS :
CONSEILS ET EXPERTISES TECHNIQUES
DANS L'OMBRE DES CHANTIERS

**24 COTEG : TERRASSEMENT SÉLECTIF
ET DÉPOLLUTION**



32

**SYCTOM
D'IVRY/PARIS XIII**

Fondations spéciales
d'un site industriel en activité



38

PN ARSCOP

Un Projet National
pour le développement
du pressiomètre



43

**PÔLE D'ÉCHANGES
MULTIMODAL**

de Lyon Part-Dieu
et tour To-Lyon



48

**RTE MET EN
SOUTERRAIN DES
LIGNES ÉLECTRIQUES**

au nord de Paris



54

**UNE PAROI MOULÉE
DÉFINITIVE EN BÉTON
NON ARMÉ**

sur le chantier de la Ligne 15 Sud
du Grand Paris Express



61

**DALLE-SUPPORT
DU BANC DE SOUDAGE**

des réservoirs d'Ariane 6



66

LE REGINA BYPASS

Remblais de grande hauteur
en Saskatchewan



74

**LES PIEUX SÉCANTS
DU SIÈGE DE LA
SOCIÉTÉ GÉNÉRALE**

à Alger



81

CALAIS PORT 2015

Traitement et suivi
des tassements des
remblais hydrauliques



88

**TRAITEMENT DES LOESS
ET DES LEHMS**

pour les terrassements
du Contournement Ouest
de Strasbourg



94

**REMBLAIS DE
GRANDE HAUTEUR
DE LA RN88**

au cœur de l'Aveyron



APRÈS
"LE CRAYON"
ET "LA GOMME",
**LA TOUR
TO-LYON,**
ÉRIGÉE À
LA PART-DIEU,
VA PERCER LE
CIEL LYONNAIS

Soletanche Bachy est à nouveau à l'œuvre à la Part-Dieu, qu'elle fréquente depuis les années 70, pour réaliser les infrastructures du parking Place Basse et de la tour To-Lyon, dans un contexte dont la complexité est augmentée par la multiplicité des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre. Les techniques déployées sont, elles-aussi, multiples. On note la mobilisation de la méga-foreuse Starsol®, prénommée Barbara, une Fundex F5000 capable de forer en tarière creuse jusqu'à 50 m de profondeur. Précisons que "Crayon" et "Gomme" sont les sobriquets donnés, en raison de leur silhouette, aux tours Crédit Lyonnais et Incity par les Lyonnais. (Voir article page 43).



© FORUMPHOTOS.COM

© THIBAUT DE VRESE



TRAVAUX D'AMPLEUR SUR LE SYCTOM D'IVRY/PARIS XIII EN MAINTENANT SON ACTIVITÉ

Nge Fondations est partie prenante dans la transformation du Sycatom d'Yvry/Paris XIII pour en faire l'une des plus grandes unités de traitement des déchets en France, tout en maintenant l'activité. Nge Fondations réalise, sur l'Unité de Valorisation Énergétique, deux grandes fouilles à 12 m de profondeur entre la Seine et les voies SNCF de la gare d'Austerlitz, mettant en œuvre un éventail de techniques de fondations et de soutènements, dans un contexte de forte coactivité. La transformation, en deux phases, s'étale sur cinq ans, avec une mise en service prévue pour 2023. (Voir article page 32).



© NGE FONDATIONS

MESURER LES DÉFORMATIONS DE SURFACE PAR IMAGERIE RADAR

Les images radar émises par les satellites peuvent révéler des déformations de terrain de quelques millimètres. Indura a consacré un webinaire à leur utilisation en travaux publics.

« Nous avons utilisé des images radar pour suivre les effets des rabattements de nappe sur les ouvrages et les avoisinants de la zone de la gare Haussmann-Saint-Lazare dans le cadre du projet d'extension vers l'ouest du RER Eole à Paris, indique Matthias Jauvin, responsable recherche et production du GIE Aurigami⁽¹⁾. Grâce à cela, nous avons délimité la cuvette de déformation liée au pompage. » Le lien entre l'actuelle gare et le tunnel vers Nanterre (Hauts-de-Seine) se situe entre deux nappes phréatiques, d'où la nécessité de les rabattre en tenant compte du risque de dissolution de gypse.

Les mesures interférométriques ont débuté en 2016-2017 pour établir un état zéro. Elles se sont poursuivies une fois par mois lors des travaux préparatoires (2017-2018). Depuis, elles ont lieu deux fois par mois pendant les travaux de rabattement (cinq ans) afin de surveiller les déformations. À fin septembre, cela représentait 230 images radar, 70 mises à jour et 4 millions de mesure de déplacement sur des cibles ponctuelles (toit, cheminée, antenne, etc.).

« L'imagerie radar, ici par satellite, est intéressante car le capteur émet ses ondes sans énergie extérieure, donc tout le temps, sur des gammes de fréquence qui traversent les nuages, » souligne Emmanuel Trouvé, directeur du Laboratoire d'informatique, systèmes, traitement de l'information et de la connaissance⁽²⁾, intervenu avec Matthias Jauvin, au webinaire Indura sur la mesure des déformations de surface par imagerie radar, le 1^{er} octobre. Indura est partenaire du consortium Booster Cospace Centaura⁽³⁾ qui vise à encourager les projets innovants utilisant les données spatiales.

→ Interpréter et corriger

La déformation géométrique d'une surface ou dans un sol peut être tirée de la rétrodiffusion des ondes électromagnétiques provenant de satellites.

À l'heure actuelle, parmi les satellites disponibles, deux, jumeaux, évoluent sur le même orbite : un Sentinel 1-A lancé en octobre 2014 et un 1-B, en avril 2016. Ils travaillent sur des bandes de 250 km de large à 700 km au-dessus de nos têtes. Comme la Terre tourne aussi, ils couvrent toute sa surface, à eux deux,

tous les six jours. Leurs données sont acquises systématiquement et leur accès, gratuit. La résolution des images est de 5 à 20 m.

De l'image radar à la mesure d'une déformation, il y a tout un processus. Les données sont traitées par des spécialistes pour les interpréter et corriger toutes les perturbations. Ils se concentrent sur la différence de phase des paires d'images disponibles. La différence correspond à celle du temps de propagation de l'onde radar. Ils la corrigent des perturbations possibles - différence d'orbite des deux satellites, délai dû à un phénomène atmosphérique, etc. - pour ne conserver que la différence de phase (ci-dessous) liée à la déformation.

→ Sensibilité au changement en surface

Le signal rétrodiffusé est caractérisé par son amplitude (réflectivité sur la surface imagée) avec une précision au mieux métrique, et par l'information de phase (état vibratoire de l'onde électromagnétique à son retour au capteur) avec une précision liée à une fraction de longueur d'onde qu'on va utiliser pour mesurer des déplacements centimétriques. « Les deux sont complémentaires, informe Emmanuel Trouvé. L'amplitude est moins précise, il faut des objets à suivre à la surface (cibles), mais elle est robuste au changement de surface entre deux passages. L'information de phase se perd très facilement en cas de changement comme une chute de neige, ou de la végétation qui a poussé, etc. Dans ce cas, on peut améliorer le résultat par les séries temporelles. »

Avec des longueurs d'onde situées entre 3 et 6 cm, la précision peut descendre à



L'avancée de crevasses sur le glacier d'Argentière (Chamonix, Haute-Savoie) est obtenue par l'amplitude de 3 images du satellite allemand TerraSar-X, matérialisées par des lignes rouge, verte et bleue.

plusieurs millimètres, voire au millimètre près, après traitement. Le recours à l'interférométrie sera facilitée quand le Service européen de mouvement de surface aura sorti sa carte annuelle en 2021. Bien qu'elles se ressemblent au premier abord, l'image radar et l'image optique

n'ont pas grand-chose à voir l'une avec l'autre.

La superposition avec un système d'informations géographiques exige une conversion.

→ Traverser la glace

Les échos radar sont forts en ville du fait du grand nombre d'objets qui les renvoient. Les ondes sont réfléchies à la surface du sol. En montagne, elles peuvent traverser la glace sur plusieurs mètres ainsi que la neige à condition qu'elle soit sèche.

Voir le webinaire sur : <https://vimeo.com/showcase/7046286>.

⁽¹⁾ GIE Mire et Aliter Videre (2016). Cf. *Travaux* n°947, décembre 2018, pp 34-39.

⁽²⁾ Listic hébergé par Polytec Annecy-Chambéry.

⁽³⁾ Piloté par le pôle Imaginove en région Auvergne/Rhône-Alpes.

QUAND UTILISER L'INTERFÉROMÉTRIE RADAR ?

« En milieu urbain, avec l'interférométrie radar, nous pouvons suivre des déformations de surface de quelques millimètres par an, » assure Matthias Jauvin, lors du webinaire sur ce thème d'Indura (cf. ci-contre).

En conception, elle permet d'identifier des zones instables. En exploitation, elle peut remplacer les mesures traditionnelles sur une structure ou l'environnement (géotechnique). En construction, elle sera utile sur un chantier long en complément d'autres méthodes d'auscultation.

L'INNOVATION AU COEUR DE VOS CHANTIERS



MAMMOET est le leader mondial en levage, transport et manutention lourde. Nous intervenons depuis plus de 15 ans sur les ouvrages d'art en France et avons l'intention de poursuivre ce développement dans les années à venir. À mesure que les infrastructures civiles se développent, nous fournissons des solutions pertinentes qui se concentrent sur le maintien de l'activité opérationnelle en minimisant les perturbations.

Main dans la main, construisons le monde de demain.

VENEZ EN APPRENDRE D'AVANTAGE SUR MAMMOET.COM

MAMMOET FRANCE S.A.

59, Avenue André Roussin
13016 Marseille

France

+33 (0) 4 95 06 14 74

mammoetfrance@mammoet.com

 **MAMMOET**
SMARTER, SAFER, STRONGER

EPF GRAND-EST

L'établissement public foncier de Lorraine devient EPF de Grand-Est par le décret du 19 octobre. Cet EPF d'État étend son action à l'Aube, la Marne, la Haute-Marne et les Ardennes non couverts jusqu'ici par un EPF.

Ailleurs, certains territoires disposent d'un EPF local, aux mains de collectivités comme ceux du Dauphiné ou de la Savoie. Ces établissements conseillent les collectivités souvent à propos de friches polluées qu'ils peuvent être amenés à remettre en état.

Les besoins de la région Grand-Est sont importants en reconversion de sites industriels, militaires, hospitaliers, en revitalisation de centres-villes ou encore en logements.

La transformation de terrains inutilisés en agglomération vise à limiter l'étalement urbain.

www.cohesion-territoires.gouv.fr/les-etablissements-publics-fonciers-epf

APPEL À PROJETS FRICHES POLLUÉES

Les porteurs de projet de reconversion de friches polluées issues d'anciens sites ICPE* ou miniers ont jusqu'au 25 février pour demander une aide de l'État, à travers l'Ademe. C'est le 1^{er} appel à projets financé par le fonds de recyclage de friches créé en juillet (300 millions, plan de relance) par les ministères de la Transition écologique et du Logement. L'appel, lancé le 6 novembre, est doté de 40 millions d'euros sur deux ans.

Par ailleurs, le Cerema reçoit 1 million d'euros pour développer des outils numériques d'observation du foncier pour faciliter les inventaires de friches.

<https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/>

* Installation classée pour la protection de l'environnement.

AMÉNAGEMENT D'UNE ZAC : CONNAÎTRE LES SOLS AVANT TOUT



© VINCENT MULLERS/SPL DES DEUX RIVES

Plateforme de mise en état sanitaire des terres excavées sur le quartier Citadelle de la Zac des Deux Rives à Strasbourg (Bas-Rhin).

La connaissance des sols a été intégrée dès le départ dans le projet de la zone d'aménagement concerté (Zac) des Deux Rives dans l'agglomération de Strasbourg (Bas-Rhin). Ainsi, peut être défini leur traitement en vue de leur utilisation future. « C'est très important que le volet sites et sols soit la base du reste, il faut s'en donner le temps et les moyens, » a témoigné Thibaut Lebrun de la société publique locale à qui l'Eurométropole de Strasbourg a confié l'aménagement⁽¹⁾. L'objectif recherché est l'autonomie en production de terre végétale, sans import ni export de matériaux, et en circuit court. La Zac étant bordée de bassins et par le Rhin, des bateaux peuvent transporter les terres d'une zone à l'autre.

La SPL des Deux-Rives, créée en 2014, travaille avec un plan guide sols évolutif. La caractérisation des sols à travers 800 sondages et 1 500 analyses était terminée à début septembre. Leur valorisation a commencé.

→ Trois plateformes

Trois plateformes reçoivent des terres. Sur la première dite géotechnique (secteur Starlette), sont stockés et concassés des matériaux de démolition réutilisables en structure de voirie. La deuxième, dans le même secteur, enrichit des terres limoneuses, stériles du fait des activités passées dans le port mais saines, destinées aux plantations. Sur la 3^e plateforme (secteur Citadelle) sont traitées les terres polluées (mise en état sanitaire) pour les

rendre compatibles avec leurs futurs usages.

Les travaux de la Zac des Deux Rives ont démarré en 2017 et devraient se terminer en 2032.

Sur 74 ha, en partie est des 250 ha du projet Deux Rives, elle fait le lien entre l'Eurométropole et Kehl, ville allemande, sur l'autre rive du Rhin. Un tramway relie les deux collectivités depuis 2017.

→ 4 quartiers dans le port

Le port fluvial de Strasbourg avait démarré son activité industrielle fin 19^e siècle une fois les rives du Rhin protégées des crues. À partir de 1973, il cède des terrains à la ville pour reconversion.

Quatre quartiers sont en cours d'aménagement, d'ouest en est : Citadelle, ancien site militaire devenu industriel ; Starlette, où ont été produits de 1931 à 1996 des boulets de charbon "extras", usine démolie ; Coop en souvenir d'une ancienne coopérative ; Rives et ponts du Rhin, face à la rive allemande, déjà habitée et en voie de requalification.

Nouveaux habitants et travailleurs sont attendus à partir de 2021. L'ensemble accueillera 9 200 habitants.

En savoir plus sur :

www.spldeuxrives.eu. ■

⁽¹⁾ Intervenu aux assises de l'économie circulaire de l'Ademe, le 8 septembre, atelier 12, Valoriser les terres excavées pour des aménagements sobres en ressources. À voir sur : www.assises-economie-circulaire.ademe.fr.

RENÉGOCIER UNE CONCESSION

Le Syndicat départemental d'énergies de l'Yonne (Sdey) a renouvelé le contrat de concession avec Enedis (réseau) et EDF (tarifs), le 26 octobre, avant son terme prévu en 2029. Il s'est inspiré du nouveau cahier des charges de concession conçu en 2017 par la Fédération nationale des collectivités concédantes et régies (FNCCR), France urbaine et les fournisseurs d'énergie.

Le Sdey, propriétaire de 4 300 km de réseau basse tension desservant 148 000 usagers, entend ainsi accélérer la transition énergétique à travers le partage de données, des réseaux intelligents en faveur du photovoltaïque, des

bornes pour véhicules électriques, etc. La qualité du réseau sera améliorée et les câbles continueront d'être dissimulés.

→ 54 millions sur trente ans

Enedis s'est engagé à lui verser 54 millions d'euros sur trente ans, notamment en redevance. Dans un 1^{er} temps, il va investir 9,5 millions d'euros par an sur 2021-2024.

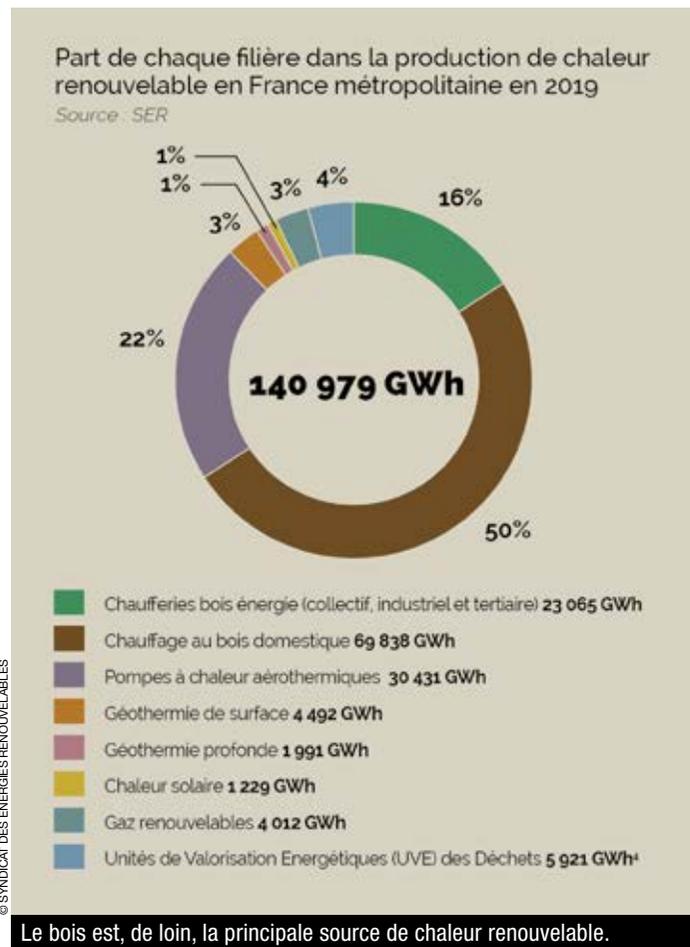
Par une convention spécifique, le distributeur apporte aussi 3,3 millions d'euros sur huit ans en vue du remplacement des cabines hautes par des transformateurs plus discrets, d'améliorations et d'innovations, sous maîtrise d'ouvrage du Sdey. ■



© STUDIO XAVIER MORIZE

Les cabines hautes sont supprimées et remplacées par des transformateurs plus discrets.

ÉNERGIES RENOUVELABLES : CHALEUR FRILEUSE, HYDRAULIQUE GÉNÉREUSE



« La France n'est pas sur la bonne trajectoire pour atteindre ses objectifs en matière de neutralité carbone, » soulignent les auteurs du Panorama 2020 de la chaleur renouvelable et de récupération⁽¹⁾.

La neutralité carbone voudrait que nous nous passions davantage des énergies fossiles. Or, seulement 21 % de la consommation finale de chaleur provenait en 2019 des renouvelables, soit 141 000 GWh sur 677 000, principalement grâce au bois. Nous étions à 20 % en 2018. À ce rythme, atteindre 33 % en 2020 semble hors de portée. « Un écart considérable persiste entre les objectifs de la loi de transition énergétique et de la programmation pluriannuelle de l'énergie, et ce qui se passe sur le terrain, » estiment les auteurs. Pourtant, « les projets de chaleur renouvelable et de récupération qui économisent de l'énergie et se substituent aux sources fossiles, (...) constituent des leviers immédiats de relance économique des territoires. » Le fonds chaleur est cependant passé en

trois ans de 220 millions d'euros à 350. De plus, le plan de relance autorise 700 millions d'euros de crédits supplémentaires pour des projets de transition vers la chaleur bas carbone dans l'industrie, d'ici 2022. Le panorama propose de renforcer le soutien à toutes les filières



L'énergie hydroélectrique fournit 62,5 TWh sur 122 TWh d'origine renouvelable (2019-2020). Ici, crête du barrage de la centrale d'Eguzon sur la Creuse (70,6 MW, Indre).

dont celles du froid, de la récupération, et des réseaux urbains.

→ 62,5 TWh hydrauliques

L'électricité d'origine renouvelable se porte mieux. L'hydroélectrique arrive en tête avec 62,5 TWh produits de mi-2019 à mi-2020 sur un total renouvelable de 122 TWh.

La puissance installée en renouvelables atteint 54,6 GW, selon le Panorama de l'électricité renouvelable 2020⁽²⁾. Les réacteurs nucléaires cumulaient, en 2018, 62,4 GW.

L'État a pour objectif de réduire la part du nucléaire dans la consommation d'énergie primaire (qui diffère de la puissance) à 50 % en 2035 contre 70 % environ actuellement.

→ Moins de 60 euros le MWh produit

D'ici 2028, il engage 3 à 5 milliards d'euros en faveur des projets d'électricité renouvelable, principalement photovoltaïque et éolienne. Leur prix de production baisse de semestre en semestre au fur et à mesure des appels d'offres de la Commission de régulation de l'énergie. Les lauréats du 21 octobre arrivent à un prix moyen de 57,4 euros/MWh produit en solaire photovoltaïque posé et de 59,7 euros en éolien terrestre. Ces prix se rapprochent de ceux du nucléaire (hors EPR). ■

⁽¹⁾ Comité interprofessionnel du bois énergie, Fédération des services énergie environnement, Syndicat des énergies renouvelables, Uniclimate (industries thermiques, aéroliaques et frigorifiques).

⁽²⁾ Établi par l'Association des distributeurs d'électricité en France, l'Agence opérateurs de réseaux d'énergie, Enedis, RTE et le Syndicat des énergies renouvelables.

PARKING MUTUALISÉ

Le parking ouvert en juillet dans le quartier de Moulon à Gif-sur-Yvette (Essonne, Paris-Saclay) accueille au rez-de-chaussée, le stationnement public. Le 1^{er} étage est réservé au personnel des équipements environnants (écoles, mairie annexe, etc.). Le 2^e revient aux clients d'un hôtel à livrer fin 2022. Les habitants du quartier pourront se garer aux 3^e, 4^e et 5^e étages. Une rampe en colimaçon dessert chaque niveau évitant d'avoir à traverser les plateaux pour accéder au sien.

L'ensemble, de 317 places, est en béton, teinté en blanc en façade et en rives.

Colonnes et garde-corps métalliques laissent passer la lumière tout en cachant les voitures de l'extérieur.

Architectes : Gap architectes avec Un1on. Maîtrise d'ouvrage : Dream (mandataire).



Les étages sont desservis par une rampe circulaire.

AUTOCONSOMMATION SUR 10 KM

Un producteur d'électricité renouvelable en autoconsommation peut désormais en fournir à ses voisins dans un rayon de 10 km, ceci en milieu rural. Naguère, la distance n'était que de 2 km. L'arrêté pris par Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique, devrait faire émerger des opérations comme les centrales villageoises du Val-de-Quint (Drôme).

Le plafond des projets candidats aux appels d'offres en autoconsommation va passer de 1 MW à 10.

PONT HAUBANÉ EN NORVÈGE

Début novembre, Eiffage Génie Civil était l'adjudicataire pressenti par Nye Veier, société détenue par le ministère des Transports norvégiens, pour la conception-construction d'un tronçon d'autoroute entre Langanen et Rugtvedt, comté de Telemark à l'ouest d'Oslo (sud Norvège). Le tronçon E18 comprend 7 km de voie autoroutière, 4 viaducs dont celui de Grenland avec une travée haubanée de 330 m, un tunnel de près d'1 km et 3,3 km de tunnels à équiper. Eiffage s'appuie sur le savoir-faire de sa filiale Métal pour le pont de Grenland. Le contrat devait être confirmé en décembre pour une livraison du tronçon en 2025. Il s'élève à 190 millions d'euros.



© NYE VEIER

Vue du futur viaduc de Grenland, un des ouvrages sur le tronçon E18.

CEMENTYS ET SOCOTEC SE RAPPROCHENT

Cementys a fait entrer Socotec à son capital à hauteur de 65%. Le groupe spécialisé en auscultation et surveillance d'infrastructures et d'ouvrages, bien placé à l'international, entend ainsi accélérer son développement. Socotec renforce sa position en monitoring, instrumentation, inspection et diagnostic dans le monde.

EIFFAGE MÉTAL SE DÉPLOIE EN ÉOLIEN OFFSHORE

Ailes Marines a confié à Eiffage Métal Avec Engie Solutions, la construction d'une sous-station électrique du parc éolien au large de Saint-Brieuc (Côtes-d'Armor), début septembre. Ailes Marines est chargée du développement du parc, de la construction et de l'exploitation du projet, lauréat d'un appel d'offres en 2012. La société de projet est détenue à 100% par Iberdrola (Espagne) qui a racheté les parts de RES et de la Banque des territoires en 2020.

→ Plus de 5000 tonnes en mer

L'ensemble de 62 éoliennes de 8 MW (496 MW) couvrira 75 km² à plus de 16 km de la côte. Elles produiront l'équivalent de la consommation annuelle d'électricité de 835 000 habitants, soit 1 820 GWh, selon Eiffage et Engie.

La production électrique est d'abord centralisée sur une plateforme en mer qui transforme l'électricité avant de l'envoyer vers la terre ferme. La sous-station se compose d'un jacket métallique (fondation) de 63 m de haut et 1 630 tonnes, stabilisé par des pieux de 315 tonnes.

→ Jacket et topside en construction

La partie supérieure (topside) mesure 55 m de long, par 31 de large et 23 de haut. Elle pèse 3 400 tonnes. À Eiffage Métal, reviennent l'ingénierie et les



© EIFFAGE MÉTAL

La sous-station électrique des 62 éoliennes au large de Saint-Brieuc (Côtes-d'Armor) sera transportée en mer en 2022.

structures en acier du jacket et du topside, construites par Smulders, sa filiale en Belgique qui a déjà à son actif au moins 30 sous-stations et 100 jackets.

Engie Solutions (Belgique) prend en charge les systèmes électriques, toutes tensions, y compris les essais préalables.

L'ingénierie et la construction à terre ont commencé. Le transport sur site de la sous-station est planifié pour la mi-2022. L'entrée en production du parc d'éoliennes est prévue en 2023 (information 2018).

→ Fondations à Saint-Nazaire

Eiffage Métal s'est aussi engagée en août 2019 avec Deme dans la conception, fabrication et installation des fondations monopieux des éoliennes entre 12 et 20 km de la péninsule de Guérande, à 20 km à l'ouest de Saint-Nazaire (Loire-Atlantique). Les monopieux et les pièces de transition sont fournis par le groupe néerlandais Sif. Le fond marin se situe entre 12 et 25 m.

Le parc de 480 MW appartient à EDF Renouvelables et Enbridge. Les premiers travaux en mer durent plus d'un an, du printemps 2021 à l'été 2022. ■

IDEOL MULTIPLIE LES PARTENARIATS

Début octobre, MHI Vestas et Total se sont rapprochés d'Ideol pour intégrer le projet Eolmed. La ferme pilote de 3 éoliennes flottantes à 15 km au large de Gruissan (Aude) est aux mains d'un consortium piloté par Quadran (énergéticien). Il inclut également Bouygues Travaux Publics.

Ces turbines auront une puissance de 10 MW, jamais atteinte jusqu'ici par MHI Vestas. Elles seront assemblées à Port-la-Nouvelle (Aude) où les flotteurs seront aussi construits.

Notons qu'Ideol a signé un accord de collaboration le 29 octobre avec Bygging Uddemann pour fabriquer des flotteurs en béton.

→ Éoliennes et plateformes pétrolières

Par ailleurs, le spécialiste des fondations flottantes va évaluer avec le fonds d'investissement Kerogen Capital les avan-

tages des éoliennes en mer pour couvrir les besoins électriques de plateformes pétrolières ou gazières. À début novembre, il n'était pas encore décidé si l'élec-

tricité serait consommée sur place (autoconsommation) ou si elle partirait dans le réseau. Les pétroliers cherchent à améliorer leur empreinte carbone. ■



© MHI VESTAS

Les éoliennes flottantes d'Eolmed auront une puissance de 10 MW, supérieure à ce modèle de turbine offshore de 8,4 MW (Portugal, 2019).

Évolution du droit du travail
Digitalisation des échanges
Protection des données

broctheE	123456789
seiv8D	987654321
2014-01-04 14:17:00	123456789
01/01/2014 00:00:00	123456789
11-01-2014 12:30:00	123456789
broctheE@broctheE	123456789



**Bienvenue
dans un monde
qui se construit autrement.**

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

Notre métier : assurer le vôtre.

www.groupe-sma.fr

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


SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

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

TÉLÉPHÉRIQUE EN MONGOLIE

Poma a remporté avec Egis le marché de la 1^{re} ligne de téléphérique à Oulan-Bator, capitale de la Mongolie. Les 6 km et trois stations relient le centre-ville à Bayankhoshuu, faubourg où de nombreux nomades se sont installés. La ville abrite 1,5 million de personnes dont 60% habitent dans des quartiers de yourtes couvrant 90% du territoire. Ce transport de voyageurs par câble franchit le fleuve Tuul-Gol et la ligne du Transmongolien (train). Il s'inscrit dans un programme de réaménagement financé par la Banque asiatique de développement. Poma (mandataire) fournit 122 télécabines et installe leur système de fonctionnement. Egis construit les stations, leurs fondations, et se charge de l'alimentation électrique. Il réalise les études et supervise les travaux.

SUPPRESSION DU DERNIER SEUIL SUR L'YZERON (RHÔNE)



Le seuil de Taffignon (Rhône) est un obstacle à la migration des poissons. Il sera démolé en 2021.



La capitale de la Mongolie recevra un transport urbain par câble du type de celui de Saint-Domingue (République dominicaine, 2018).

La 1^{re} phase de la suppression du seuil de Taffignon sur l'Yzeron à Francheville (Monts du Lyonnais, Rhône) se termine après six mois de travaux. Le seuil est le dernier obstacle à la migration des poissons, depuis le Rhône vers le bassin versant de l'Yzeron. Il est aussi le plus complexe. Cet ouvrage a servi de prise d'eau avant d'être aussi traversé par une conduite d'eaux usées/eaux pluviales dans les années 1960. En témoigne sa forte pente en maçonnerie qui recouvre

une conduite ovoïde de 1800 mm de haut.

Ce chantier est le plus important d'une opération sur une vingtaine de seuils lancée en 2006 par le Syndicat mixte d'aménagement de gestion de l'Yzeron, du Ratier et du Charbonnières (Sagyrç). Il absorbe 1,4 million d'euros des 2,405 millions HT au total.

Avant de démolir l'ouvrage qui franchit un dénivelé de plus de 5 m, il faut déplacer le collecteur unitaire.

Le réseau en provenance de vingt communes du bassin versant descend désormais 60 m plus bas sur la rive gauche, passe sous la rivière et remonte en rive droite pour rejoindre la conduite existante.

→ Deux files sous la rivière

Il comprend tout d'abord une nouvelle canalisation en 1400 mm de diamètre en PRV (Amiblu) en tranchée. Puis le passage sous la rivière est réalisé en deux tubes de 1000 mm. Cette transition s'opère dans une chambre de raccordement précédée d'un dégrilleur. Grâce à ce dédoublement, une file peut être coupée par vanne et batardeau pour l'entretien assuré par les services de la Métropole de Lyon. En rive droite, la seconde chambre comporte un puits vertical de

façon à remonter les eaux en siphon vers le collecteur existant. Elle comporte un point bas pour les dépôts qui seront ensuite aspirés par hydrocureuse, cette berge étant accessible par piste.

→ Chambres de plus de 60 tonnes

Avant de supprimer le seuil, des enrochements sont placés, rive gauche, pour protéger la nouvelle conduite et la chambre de l'érosion par la rivière. Au seuil, sera substituée une rampe en enrochement sur 120 m à 4% de pente pour les poissons. Les blocs rocheux tapissent le lit, certains saillent pour créer des abris et ralentir l'écoulement. Les chambres en béton pèsent plus de 60 tonnes. Afin de faciliter leur transport et leur manutention par camion-grue, elles sont composées de plusieurs modules préfabriqués (Alkern).

→ Extraire les sables

Les travaux se tiennent en période de basses eaux. Ils reprendront en juin 2021 avec la démolition du seuil, la création de la rampe piscicole et la végétalisation des berges en amont pour les soutenir. Les sables retenus par le seuil devront être extraits du site car ils sont défavorables à la reproduction des espèces. Maîtrise d'œuvre : Setec Hydratec. Entreprise : Rampa TP. ■



Partie basse de la chambre en rive droite, après passage sous l'Yzeron et avant d'être complétée verticalement par d'autres modules jusqu'à rejoindre l'ancien collecteur ovoïde en béton, visible ici en haut à droite.

DIX GUIDES ET RECOMMANDATIONS "CHUTES DE BLOCS"



© N. VILLARD-NGE/ACRO BTP/MS/COLAS

Défecteur avaloir freiné, en protection d'une route départementale sous carrière en Haute-Savoie.

Le projet national Chutes de blocs, risques rocheux, ouvrages de protection (C2rop, 2015-2020) devrait avoir un successeur.

Le Comité d'orientation pour la recherche appliquée en génie civil (ministère de la Transition écologique) examine en janvier la demande de labellisation du C2rop2.

« Le C2rop2 va maintenir le lien créé par le C2rop, hors situation de chantier, entre maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises et académiques, a indiqué Philippe Robit, directeur de la recherche de NGE Fondations, lors du webinaire Indura sur les ouvrages déflecteurs⁽¹⁾. Tout le monde s'est mis autour de la table pour structurer un métier, nous pouvons tout nous dire. »

« Les partenaires de C2rop restent très mobilisés et veulent encore avancer, observe Claude Rospars, directrice scientifique et technique de l'Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (Irex), animateur des projets nationaux. Deux questions sont prégnantes : l'impact du changement climatique sur le comportement des failles rocheuses et les capacités des nouveaux moyens de mesure et de surveillance. » C2rop2 se propose de travailler sur

4 axes : aléas dans un contexte de changement climatique ; risque, acceptabilité et gestion du risque ; ouvrages de protection ; surveillance. « Nous allons enfin nous attaquer aux ancrages⁽²⁾, » souligne Philippe Robit.

→ Guide sur les déflecteurs

Le premier C2rop se clôt avec la publication de dix guides et recommandations qui font l'objet de webinaires par Indura, un des 45 partenaires.

Le groupe de travail sur les ouvrages déflecteurs a commencé par homogénéiser les dénominations et les modes de justification des ouvrages.

« Ce sont des équipements souples qui canalisent pierres ou blocs entre le terrain et l'ouvrage sur tout ou partie de sa propagation, rappelle Pierre Azemard, ingénieur expert, co-rédacteur du guide Cerema sur ce thème. Ils ne stoppent pas un bloc, ils le guident, en limitent la vitesse et contrôlent sa trajectoire de façon à affaiblir son énergie pour qu'il s'arrête ou soit intercepté plus facilement dans une fosse, par un écran ou devant un merlon. »

→ Bloc de référence

Pas de norme dans le domaine. Le guide propose une méthode de dimensionnement. Les efforts reçus par l'ouvrage sont

quantifiés et compensés par la résistance des composants avec des coefficients de sécurité. La méthode part d'un bloc unitaire de référence à définir avec la maîtrise d'ouvrage.

« Le bloc est l'action principale qui arrive sur l'ouvrage, sa taille et sa forme seront établies à dire d'expert en parcourant le terrain, développe Pierre Azemard. Nous admettons une hauteur de chute maximale de 15 m, au-delà l'impact est trop important. »

La qualité des composants est importante. Les fournisseurs de nappes devront donner la résistance en traction dans le plan et pas seulement la résistance du fil métallique.

→ Câbles : un savoir-faire

Les câbles sont particulièrement exposés à la rupture, qu'ils ferment un déflecteur pendu en pied, qu'ils soient en rive d'un déflecteur avaloir ou qu'ils suspendent une nappe en travers d'un couloir.

« Un câble peut se tendre à la main, il faut respecter une flèche, pointe Philippe Robit. Arrêtons de passer des câbles dans l'âme des poteaux car cela les blesse. »

Les mesures de protection du personnel doivent être inscrites au marché et pas en forfait.

REHABILITATION DE COLLECTEURS PAR INJECTION

Soletanche Bachy est chargé de réhabiliter plusieurs collecteurs d'eaux usées en région parisienne : à Clichy-la-Garenne (Hauts-de-Seine), à Pantin et Noisy-le-Sec en Seine-Saint-Denis. Ces trois chantiers se terminent au 1^{er} semestre 2021.

Celui de Noisy-le-Sec, un ovoïde de 1,80 m de haut par 1 m de large sur 1710 m de long (1897-1916), a commencé en août. Il s'agit d'injecter du coulis de ciment par forage à partir de l'intérieur, dans le terrain et dans la maçonnerie en pierre de meulière à mortier de chaux. Un béton projeté viendra parfaire l'étanchéité.

Au total sur ces trois opérations, 18600 forages sont réalisés.



© SOLETANCHE BACHY

Travaux à Clichy-la-Garenne sur un collecteur de 741 m.

Voir le projet de C2rop2 sur : www.C2rop.fr/c2rop2/. ■

⁽¹⁾ Le 7 octobre ; voir aussi Glossaire du risque rocheux, le 23 septembre. À visionner sur <https://vimeo.com/showcase/7046286>.

⁽²⁾ Dans l'axe ouvrages de protection.

MUR-RIDEAU VITRÉ DE 6 m

VD-Industry a conçu un mur-rideau en acier et vitrage qui peut atteindre 6 m de haut et résister une heure au feu.

Le mur Pyrotek a été testé dans les laboratoires d'Efected en janvier 2020, sur un support en béton. Il est pare-flamme et coupe-feu.

La plus grande vitre peut atteindre 3,96 de haut sur 1,65 m de large.

MARQUAGE AU SOL FACILE

La distanciation physique à respecter entre les personnes pour se protéger de la Covid-19 peut être matérialisée par des lignes au sol.

L'applicateur Traivite Précision d'ITW Spraytec ne nécessite ni pochoir ni rubans de masquage.

Il dessine des lignes ou des courbes de 5 à 10 cm, éventuellement en progressant de l'une à l'autre des largeurs.

Il trace sur tout type de surface, du ciment aux revêtements routiers.

Les bombes de peinture contiennent une résine époxy pour accroître la résistance à l'usure. Huit couleurs sont disponibles.



© ITW SPRAYTEC

Traçage précis sans masquage.

RENOUVELLEMENT DE PARCS ÉOLIENS



© STEPHANE LEROY/KALLISTA ENERGY

À Lanfains (Côtes-d'Armor), les éoliennes de 2006 de 1,5 MW vont être remplacées par des modèles de 2 MW.

Les éoliennes de deux parcs bretons vont être changées pour de plus puissantes. À Trébry, à 30 km au sud-est de Saint-Brieuc (Côtes-d'Armor), 6 éoliennes de 2 MW (Enercon) remplacent celles de 1,5 MW installées en 2005. À Lanfains, à 25 km au sud-ouest de Saint-Brieuc, 6 machines de 2 MW prennent la place de 5 de 1,5 MW de 2006.

La production d'électricité augmente de 30 % à Trébry, et de 60 % à Lanfains. La hauteur des éoliennes reste de 90 m. Les revenus pour les collectivités locales augmentent proportionnellement à la puissance installée.

Il était logique de remettre des aérogénérateurs au même endroit car ce sont des sites bien ventés, par exemple sur la ligne de crête du mont Bel-Air (339 m) à Trébry.

Kallista Energy investit 24 millions d'euros dans cette transformation (1 million/MW) et se rembourse sur la vente des kilowattheures plus importante qu'avant. Les chantiers démarrent au printemps 2021. À Trébry, le raccordement électrique peut être réutilisé, à peu de choses près. Les nouvelles éoliennes sont décalées par rapport aux anciennes qui ne respectaient pas toutes la distance de 500 m des habitations.

→ **Terrain remis en état**

À Lanfains, le raccordement sera refait. Toutes les machines doivent être éloi-

gnées à plus de 500 m. De ce fait et parce qu'il est plus commode d'enlever les anciennes et d'implanter les nouvelles avec les mêmes engins, donc parallèlement, les fondations seront extraites et, leurs composants recyclés, et le terrain, remis en état. Les pales seront, selon le matériau, recyclées ou valorisées en cimenterie (combustible solide de récupération).

Kallista s'est appuyé sur sa 1^{re} expérience à Plouyé (Finistère) en 2017-2018. L'opérateur avait remplacé un

parc de 4 éoliennes de 750 kW de Neg Micon (2002) par des Enercon.

→ **Plus d'électricité renouvelable en Bretagne**

Ces renouvellements contribuent à accroître la part des énergies nouvelles renouvelables dans la production d'électricité en Bretagne.

La région ne produit que 17 % de l'électricité qu'elle consomme. Elle veut multiplier par 7 sa production d'électricité renouvelable d'ici à 2040 par rapport à 2012. ■



© STEPHANE LEROY/KALLISTA ENERGY

À Plouyé (Finistère), quatre machines de 2 MW ont déjà pris la place de celles de 750 kW.

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

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

• 19 JANVIER

6^e colloque national photovoltaïque
Lieu : à distance
www.colloque-PV.fr

• 3 AU 5 FÉVRIER

Technologies de résilience pour infrastructures durables
Lieu : sur internet
www.iabse.org

• 9 AU 11 MARS

Transport sédimentaire : rivières et barrages réservoirs
Lieu : EDF Lab à Saclay (Essonne)
www.barrages-cfbr.eu

• 16 ET 17 MARS

Biennale des territoires
Lieu : Montrouge (Hauts-de-Seine)
www.biennaledesterritoires.fr

• 15 AU 19 MARS

World Renewable Energy Congress
Lieu : Lisbonne (Portugal)
<https://wrec2020.tecnico.ulisboa.pt>

• 13 AU 15 AVRIL

Semaine de l'innovation transport et logistique
Lieu : Paris (Porte de Versailles)
www.sitl.eu

• 19 AU 24 AVRIL

Intermat
Lieu : Paris Nord-Villepinte (Seine-Saint-Denis)
<https://paris.intermatconstruction.com>

• 27 AU 29 AVRIL

Wind Europe : Electric City
Lieu : Copenhague (Pays-Bas)
<https://windeurope.org/ElectricCity2021>

• 16 AU 19 MAI

Eurogeo 7, conférence européenne géosynthétiques
Lieu : Varsovie (Pologne)
<https://eurogeo7.org>

• 19 AU 22 MAI

Geofluid
Lieu : Piacenza (sud de Milan, Italie)
www.geofluid.it/app/index.jsp

• 2 ET 3 JUIN

Solscope
Lieu : Lyon Eurexpo
www.solscope.fr

NOMINATIONS

CINOV INGÉNIERIE :
Damien Racle a été nommé président de l'organisation professionnelle. Il remplace Jean-Marc Gallet de Saint-Aubin.

CSCEE :
La présidence du Conseil supérieur de la construction

et de l'efficacité énergétique est entre les mains de Christophe Caresche après la nomination de l'ancien président, Thierry Repentin, à la tête de l'Agence nationale de l'habitat (Anah).

HAROPA :

Le 1^{er} juin 2021, Stéphane Raison prendra la suite de Catherine Rivoallon en tant que directeur général, pour préfigurer le nouvel Haropa, qui deviendra un établissement public en 2021 après avoir été un GIE à partir de 2012. Haropa regroupe les ports du Havre, de Rouen (Seine-Maritime) et Paris.

SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS :
Judith Beuve-Teichert succède à Gérard Cherel à la direction du pilotage, des méthodes et des outils de la SGP. De plus Corine Loreaux-Mazier remplace Dominique Legrand à la direction des achats.



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° 966 « Spécial Gares »
- TRAVAUX n° 967 « Énergie »



Bertrand COSSON

Tél. 01 41 63 10 31
b.cosson@rive-media.fr

GRAND PARIS EXPRESS CONSEILS ET EXPERTISES TECHNIQUES DANS L'OMBRE DES CHANTIERS

Dans le cadre de la réalisation du Grand Paris Express, l'unité des Infrastructures et Méthodes Constructives a dans ses attributions la collecte de toutes les données de site : les campagnes de reconnaissance géotechnique, les travaux géodésiques (les relevés topographiques), les données d'état du bâti et des avoisinants afin d'élaborer une cartographie précise. En parallèle, elle accompagne les directions de projet en fournissant conseils et expertise technique spécifique. Une activité presque de l'ombre mais à l'efficacité de laquelle est liée la réussite d'un projet qui demeure, par son ampleur et ses délais de réalisation, tout à fait exceptionnel, ainsi que nous l'explique et nous le précise Thierry Huyghues-Beaufond, responsable de cette unité dont il est d'ailleurs à l'origine de la création. **Entretien avec Thierry Huyghues-Beaufond, responsable de l'Unité des Infrastructures et Méthodes Constructives de la Société du Grand Paris Express (SGP).** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1

Comment l'idée de créer une telle unité s'est-elle imposée pour la construction du Grand Paris Express ?

L'unité des Infrastructures et des Méthodes Constructives a vu le jour au début de l'année 2011 alors que j'intégrai la société du Grand Paris en juin 2012, la société ayant elle-même été créée en juin 2010.

Nous avons démarré à trois collaborateurs avec, outre moi-même, avec mon expérience acquise dans la conception des ouvrages souterrains et de suivi d'exécution des travaux au sein de la RATP, une géotechnicienne, qui est aujourd'hui, chef de projet secteur sur la ligne 15 Sud-Ouest, et un expert en conception des projets d'infrastructures

ferroviaires, en l'occurrence un ingénieur issu du cru de l'ingénierie RATP ayant réalisé une grande partie de sa carrière à l'export sur des projets d'infrastructures.

Ce triptyque - méthodes constructives, travaux et expérience géotechnique - pour lancer les campagnes de reconnaissance - a constitué le noyau dur de cette unité.

Elle s'est enrichie progressivement et emploie actuellement 10 collaborateurs qui sont majoritairement des géotechniciens ou des géologues ainsi que deux ingénieurs en Génie Civil ayant notamment suivi l'enseignement du Chebap, c'est-à-dire des spécialistes des ouvrages en béton à tous les niveaux de l'acte de construire.



2



3

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © ALSTOM - FIGURE 3 © SGP/LETICIA PONTUAL

Ce choix était lié, dès le départ, au fait que le Grand Paris Express est un projet directement lié aux travaux souterrains de sorte qu'il exige des collaborateurs ayant des connaissances du sous-sol de manière générale tout en constituant un panel qui ne soit pas issu seulement du monde de la maîtrise d'ouvrage mais aussi de ceux de la maîtrise d'œuvre et de l'entreprise.

1- Thierry Huyghues-Beaufond, responsable de l'Unité des Infrastructures et Méthodes Constructives de la Société du Grand Paris (SGP).

2- La Société du Grand Paris et Île-de-France Mobilités lèvent le voile sur les futures rames conçues par Alstom pour les lignes 15, 16 et 17.

3- Aménagement intérieur des nouvelles rames conçues par les designers Patrick Jouin et Ruedi Baur.

4- Baptême du premier tunnelier "Florence" qui s'élancera sur le parcours de la future ligne 17, le 20^e à entrer en action sur l'ensemble du réseau.

5- Parois moulées à l'ouvrage Barbusse sur la ligne 15 Sud.

THIERRY HUYGHUES-BEAUFOND : PARCOURS

Thierry Huyghues-Beaufond est titulaire d'un Mastère de Génie Civil et Technologie de la Construction de l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (1986) et d'une maîtrise de Génie Civil de l'École Normale Supérieure de Cachan (1988).

Il a acquis une expérience de 30 ans dans les domaines de la conception et de la réalisation, tous corps d'état, d'ouvrages ferroviaires souterrains en milieu urbain dense et a assuré des fonctions de chef de projets études, travaux, coordination et de directeur de projets de métro : ligne 14, première ligne entièrement automatique Météor, prolongement des lignes 14 Nord (à Saint-Lazare) et Sud, prolongements des lignes de métro 4 (à Mairie de Montrouge), ligne 8 (Créteil - Pointe du Lac), ligne 12 (à Aubervilliers), ligne 13 (à Asnières-Gennevilliers).

À ceci se sont ajoutées quelques aventures enrichissantes en Afrique du Nord pour le métro d'Alger.

Sur ces chantiers, Thierry Huyghues-Beaufond a occupé successivement les postes de chef de projets études, travaux, coordination technique de maîtrises d'œuvre puis directeur de projets au sein de Xelis, filiale de la RATP.

Il dirige depuis 2012 l'Unité des Infrastructures et des Méthodes Constructives au sein de la Société du Grand Paris (SGP) dont l'une des missions principales est d'exercer un rôle d'appui technique auprès des directions de projets, de conseil, d'expertises dans le domaine des infrastructures (tunnels, gares, sites de maintenance, ouvrages d'art) en phase de conception et en phase de réalisation.

Il contribue ainsi à la réalisation de l'un des projets français et européen les plus ambitieux : le Grand Paris Express, soit 200 km d'infrastructures et 68 nouvelles gares, l'équivalent du réseau historique du métro parisien.

Comment cette petite unité de départ est-elle intervenue dans les premiers mois de son existence ?

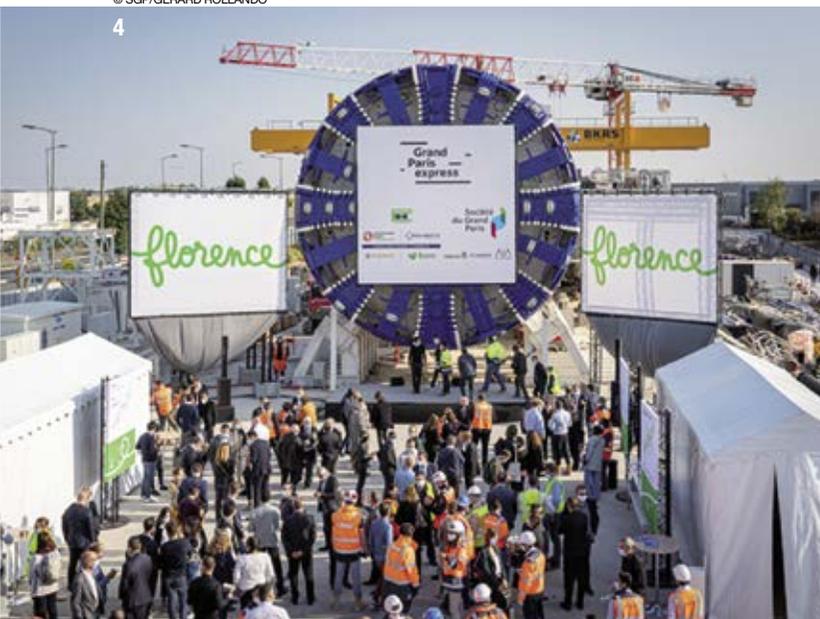
L'unité est intervenue dès les études de faisabilité en 2011 avec les deux premières personnes de mon équipe avant mon arrivée qui se situe au début des études préliminaires en 2012. Les études de faisabilité ont porté principalement sur différentes possibilités

d'implantation de gares, différents scénarios de tracé suite au grand débat public de fin 2010. Les études de tracé en plan et profil sont menées sur la base d'une enquête documentaire (consultation des cartes géologiques, des cartes des carrières, des cartes des aléas définis par les préfectures, des cartes hydrogéologiques, des bases de données publiques : Infoterre, Basol, Basias, des archives des prestataires,

des partenaires tiers comme la RATP, SNCF, ADP...). Un premier modèle géologique est alors établi permettant de décrire assez précisément la nature des terrains (sables, argiles, calcaire...), de définir des couches de même nature pour en déterminer leur répartition spatiale le long du projet et d'identifier les différentes hauteurs de nappes phréatiques contenues dans le sous-sol. Parallèlement et dès 2011, sont préparés les marchés de prestation intellectuelle et de travaux, que nous avons pilotés, c'est-à-dire les marchés de reconnaissances géotechniques, ainsi que le marché d'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage (AMO) géotechnique, remporté par la société Arcadis, qui nous a accompagné pendant 4 ans. Même si nous avons la capacité intellectuelle d'établir les programmes de reconnaissance, il ne nous semblait pas opportun, en accord avec le Directoire, d'être à la fois juge et partie de l'opération et nous souhaitons nous faire accompagner sur l'établissement du programme de reconnaissances par un bureau d'études d'ingénierie extérieur. Mais tout projet doit s'accompagner d'un recueil le plus exhaustif possible des existants présents (réseaux concessionnaires, ferroviaires, ouvrages enterrés, fondations...) du milieu dans lequel il s'insère. Les études préliminaires permettent de retenir un nombre restreint de scénarios de tracé de ligne et d'implantation de gares, de densifier la recherche informations au niveau des réseaux existants, des sous-sols déjà identifiés, des campagnes de reconnaissance ayant déjà été réalisées dans le secteur concerné par le Grand Paris Express. Puis de lancer les premières campagnes de reconnaissances géotechniques communément appelées G11. ▶

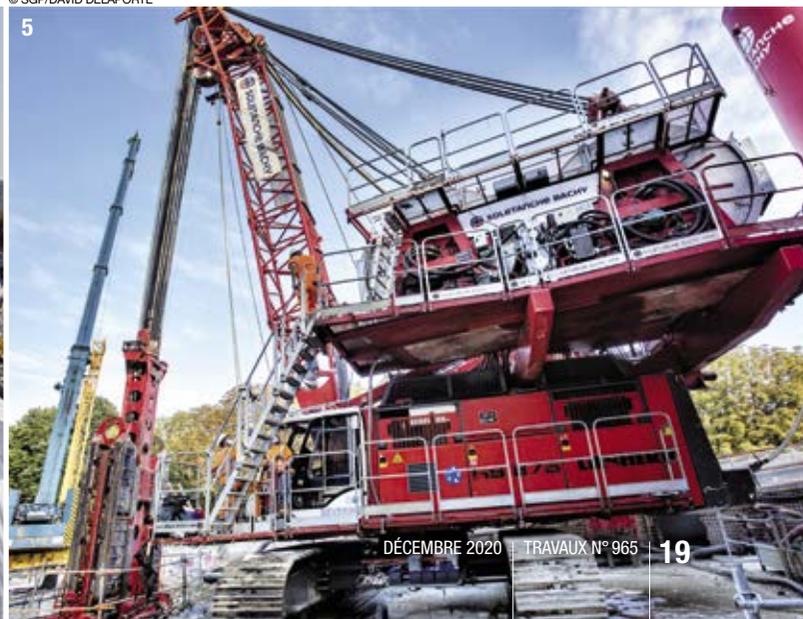
© SGP/GÉRARD ROLLANDO

4



© SGP/DAVID DELAPORTE

5



Les programmes de reconnaissances (G11 et G12) sur l'ensemble des lignes ont ainsi été établis conjointement avec nous par Arcadis qui avait aussi la charge de nous aider à piloter les prestataires de sondages de reconnaissances géotechniques.

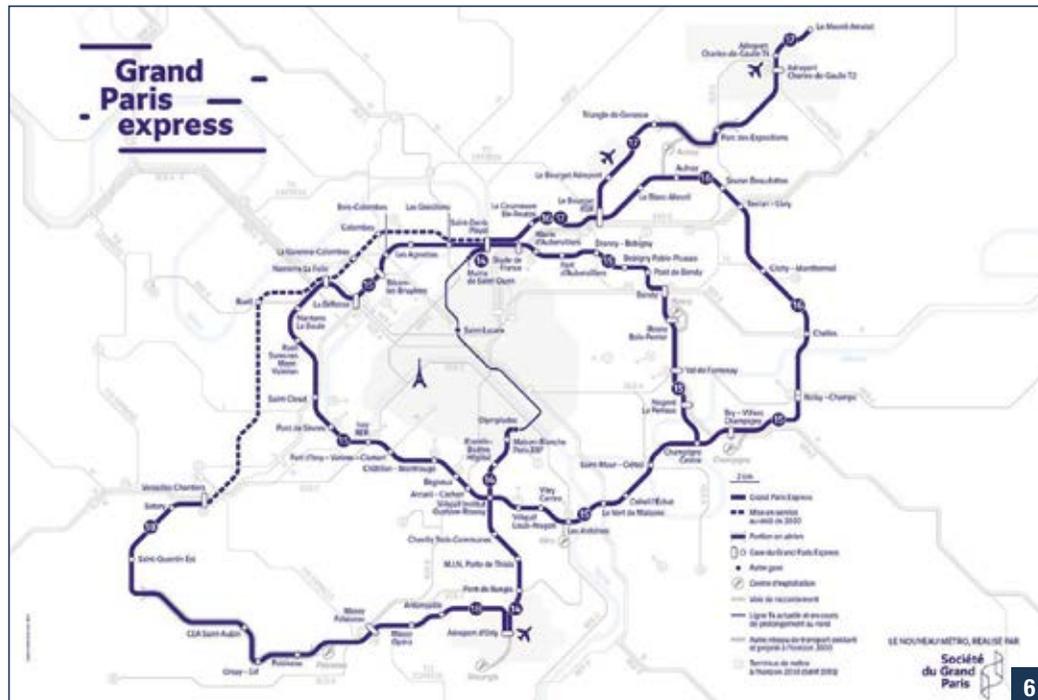
Il faut bien se rendre compte que ce projet est d'une ampleur inédite avec des délais de réalisation très contraints et les campagnes de reconnaissances devaient se faire en un temps record. Les premières missions normatives G11 et G12, effectuées juste avant l'arrivées des maîtres d'œuvre pour leurs études de conception, devaient être réalisées en 18 mois. Elle ont concerné 1 200 sondages.

À partir de là, comment s'est située l'intervention de l'Unité Infrastructures et Méthodes Constructives ?

Pour chaque direction de ligne, nous avons participé avec les équipes projet concernées à l'établissement du cahier des charges pour la désignation des différents maîtres d'œuvre en les accompagnant dans la phase d'analyse des offres et dans les auditions des candidats, l'intérêt étant que les missions géotechniques soient bien ciblées et bien perçues par rapport à nos attentes.

Cette phase a été menée pendant l'année 2012 et 2013 pendant que nous étions, en parallèle, affairés à réaliser les missions géotechniques pour établir une première "vague" de données d'entrée pour les maîtres d'œuvre quand ils arrivaient pour démarrer leurs prestations.

La désignation des premiers contrats de maîtrise d'œuvre - en 2013 - s'est faite sur la ligne 15 Sud, la plus avancée à l'époque au niveau des études de



reconnaissance. Les contrats suivants sont ensuite intervenus entre 2014 et 2015.

Pour le bouclage de la ligne 15 à l'Est et à l'Ouest, les contrats de maîtrise d'œuvre ont d'ailleurs été remplacés par des contrats de conception-réalisation, afin de mobiliser les entreprises plus tôt dans la conception et d'avoir de leur part une responsabilité et un engagement plus importants.

Lorsqu'ils sont prévisibles, comment les aléas géotechniques sont-ils gérés, voire anticipés ?

Les recherches géotechniques ont été densifiées à partir du moment où les maîtres d'œuvre ont été désignés dans les secteurs où des sujets à risque

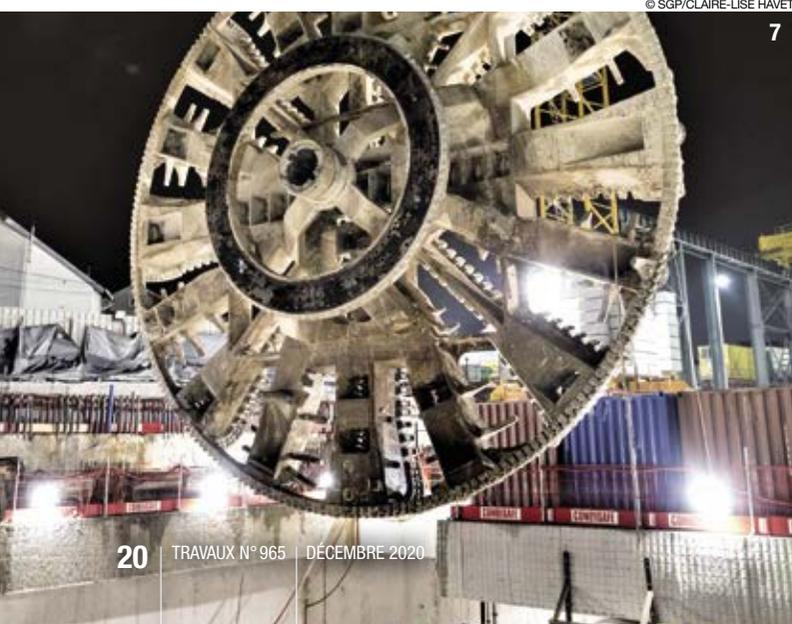
avaient été identifiés, par exemple sur la ligne 16, où des dissolutions de gypse étaient envisageables, notamment sur la commune de Sevran. Il en a été de même pour la ligne 15 Sud où les investigations ont été renforcées, conjointement avec l'Inspection Générale des Carrières, pour bien identifier et cartographier le nombre et les niveaux de carrières, quelquefois au nombre de trois alors que la bibliographie n'en avait repéré que deux.

Cette identification a été très importante car elle a conditionné le choix du passage du tunnel et donc du tunnelier sous les niveaux de carrière dans le secteur de Bagneux, Chatillon-Montrouge et Créteil.

Dans le secteur de la boucle de la Marne, les conditions géologiques ne

permettaient pas de réaliser ce que nous avons imaginé à l'origine et il a été décidé de réaliser la gare de Saint-Maur - Créteil à 57 m de profondeur (le niveau des quais se situant à 52 m) pour s'affranchir d'une géologie d'argiles particulièrement défavorable qui aurait pu entraîner des tassements difficilement maîtrisables. Un tel approfondissement de l'ouvrage entraîne d'ailleurs une modification de la méthode de travail du tunnelier compte tenu de l'accroissement important de la pression de terre au front de taille ainsi que de celle de la réalisation des parois moulées de la gare.

Une grande partie des 33 km de la ligne 15 Sud se développe dans des espaces urbanisés très contraints avec une géologie compliquée et hétéro-



7

8

gènes avec pour partie des sections à l'ouest (Arcueil/Chatillon) où se situe une immense zone de carrières souterraines de Calcaire Grossier, des Argiles Plastiques, des sections à l'Est (secteur les Ardoines - Vert de Maisons) où les pressions de la nappe phréatique sont importantes.

Certains zones présentent par ailleurs des variations latérales de faciès qui ont nécessité une adaptation des méthodes constructives, qu'il s'agisse de la construction d'une gare, du passage de rameaux d'ouvrages annexes ou, naturellement, du passage du tunnelier.

Concernant les zones de carrières, leurs étendue est telle qu'il n'a pas été possible de les éviter. Cela a nécessité

6- Le Grand Paris Express : 200 km, 68 gares.

7- Sortie de la roue de coupe du premier tunnelier du Grand Paris Express.

8- Bétonnage de la dalle sur le chantier de la gare Saint-Maur - Créteil sur la ligne 15 Sud.

9- Le tunnelier "Armelle" traverse l'ouvrage Europe sur la ligne 16 afin de poursuivre sa route souterraine vers le Blanc-Mesnil.

10- Arrivée du tunnelier "Allison" à Villejuif-Institut-Gustave Roussy.

MÉTRO PARISIEN ET GRAND PARIS EXPRESS : DES DIFFÉRENCES MAJEURES

La construction du métro parisien a commencé en 1898 avec la ligne 1 et s'achève à la veille de la Seconde Guerre mondiale. Ce chantier aboutit à la création de 160 km de voies, 14 lignes et plus de 300 stations, soit une station tous les 450 mètres.

Le chantier actuel du Grand Paris Express, entamé en 2012, s'étend quant à lui sur 200 km pour 68 gares et sera terminé en 2030, soit presque deux fois moins de temps que le métro parisien.

Le Grand Paris Express fonctionnera automatiquement et sans conducteur avec une vitesse commerciale de 55 km/h et des pointes jusqu'à 110 km/h sur certains tronçons. Les Franciliens se déplaçant du Nord au Sud et d'Est en Ouest pourront en moyenne diviser leur temps de trajet par deux.

L'une des grandes différences entre ces deux chantiers réside dans le fait que le métro intra-muros fut construit majoritairement en suivant la voirie parisienne. On ouvrait les rues pour y construire les stations, les tunnels étant creusés en partie à l'abri de boucliers, sorte de tunneliers. Puis on insérait les rails dans le sous-sol. Cet éventrement de Paris devait être impressionnant. Aujourd'hui, il serait évidemment impossible. Certains tracés de ligne imposaient de passer sous des habitations mais le plus grand exploit technique réside dans les tronçons creusés sous la Seine.

Creusé à environ 10 m de profondeur, le métro parisien s'insérait dans des terrains peu résistants. A contrario, le projet du Grand Paris Express se situe en moyenne à une profondeur de 30 m dans des horizons de sols n'ayant pour certains jamais connu de travaux.

un comblement total des cavités sur un linéaire important, un confortement des terrains au-dessus des carrières ainsi que l'approfondissement du tracé pour sécuriser le passage du tunnelier.

Alors que la profondeur moyenne des gares se situe autour de 25 à 30 m, elle atteint 50 mètres à "Villejuif Institut G. Roussy" en raison du passage du tunnel sous la vallée de la Bièvre juste avant de rejoindre la gare IGR, point le plus haut du Val de Marne, avec un profil compatible avec les contraintes

techniques imposées par les caractéristiques du matériel roulant tant en ce qui concerne les rayons de courbure que les pentes franchissables sans impacter de façon défavorable la vitesse commerciale moyenne de la ligne.

D'autres missions sont-elles confiées à l'Unité dont vous avez la responsabilité ?

L'une des missions premières de l'Unité des Infrastructures et des Méthodes constructives a été la collecte de don-

nées de sites, engagée dès 2012 et qui est sur le point de s'achever fin 2020 : elle représente environ 7000 sondages, sachant que la part la plus importante s'est déroulée entre 2012 et 2018.

En plus des reconnaissances géotechniques, l'Unité était en charge de faire réaliser des levées topographiques des existants par des cabinets de géomètres experts, données indispensables au maître d'œuvre pour une bonne implantation des ouvrages qu'il aura à concevoir et dans un souci d'éviter tout télescopage.

Elle s'est également occupée de lancer les enquêtes "bâtis" sur tous les avoisinants qui sont situés aux abords ou au-dessus du tunnel. Cela représentait environ 24000 bâtis sur les 200 km du projet et l'opération s'est déroulée principalement entre 2014 et 2019. À ceci s'est ajouté un sujet innovant qui est la surveillance des sols par le système d'interférométrie radar (InSAR). Cette "aventure" a été initiée avec la société Tre Altamira qui a remporté l'appel d'offres lancé en 2013. Le marché couvre toutes les phases du projet.

Tre Altamira a fourni un état des lieux avant travaux sur la totalité des 200 km du tracé GPE sur un faisceau correspondant à la zone d'influence géotechnique du projet. Durant la phase travaux, elle fournit une mise à jour mensuelle des mesures de mouvements de surface à tous les acteurs impliqués (MOA, MOE, entreprises). La mission est programmée pour acquérir une image tous les 11 jours. Parallèlement, elle 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. ▷

© SGP/GÉRARD ROLLANDO

9



© SGP/DAVID DELAPORTE

10



DÉCEMBRE 2020 | TRAVAUX N° 965

21

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. Le marché s'étend de 2014 à 2030, avant, pendant et après les travaux. Une autre mission que nous animons aussi depuis la création de cette unité, est l'expertise technique auprès de nos directions de projet. L'unité les accompagne en fournissant conseils et expertise spécifique. Nous sommes là pour challenger les maîtres d'œuvre (MOE) dans leurs propositions de conception et fournir un "second regard" en phase de travaux avec l'appui de nos Assistants à Maîtrise d'Ouvrage (AMO) qui sont principalement des ingénieries spécialisées dans la géotechnique. Il ne s'agit pas pour nous de nous substituer au rôle de MOE mais d'intervenir en apportant ce second regard sur l'exécution des travaux. C'est d'autant plus important que lorsque la phase d'exécution est lancée, le maître d'œuvre a beaucoup moins de temps pour "s'approprier" les adaptations, les variantes des groupements constructeurs. Le maître d'ouvrage, avec ses experts et consultants indépendants, se doit d'avoir une certaine hauteur de vue et disposer des compétences techniques nécessaires pour être en position de saisir les enjeux. Nous défendons la vision d'un maître d'ouvrage qui est en capacité de sécuriser ses choix et ses décisions tout en garantissant in fine la viabilité de ses ouvrages.

Comment fonctionne ce second regard ?

Sans se substituer au rôle du maître d'œuvre, la mission Second Regard



© SGP/AXEL HEISE

est utilisée afin d'analyser des notes de conception et/ou de réalisation des maîtres d'œuvre et/ou des groupements constructeurs à la demande de l'unité IMC et/ou de la direction de projet dès lorsqu'il apparaît que la conception ou la réalisation nécessite une analyse par un tiers et la production d'une note technique. Cette mission est sous le pilotage de l'unité IMC.

Le Second Regard peut également intervenir lorsqu'il y a un désaccord entre le maître d'œuvre et le groupement constructeur soit à la demande du maître d'œuvre et de la direction de projet qui porte le sujet. Dans le cadre d'une note technique voire sur la base de calculs si nécessaire, le second regard fait une analyse sur la technique de chaque solution ainsi que des risques encourus.

In fine, l'unité IMC s'assure que la direction de projet a en finalité, les

11- Les chantiers du Grand Paris Express mobiliseront 21 tunneliers en simultané.

12- Terrassements dans la gare d'Arcueil-Cachan sur la ligne 15 Sud.

13- Chantier de parois moulées à Saint-Denis - Pleyel sur la ligne 16.

14- KM8 : au fond du puits, sur la ligne 14, "Allison" trace sa route sur un pont suspendu à 12 m de haut.

15- Travaux de fondations pour la gare "Fort d'Issy-Vanves-Clamart".

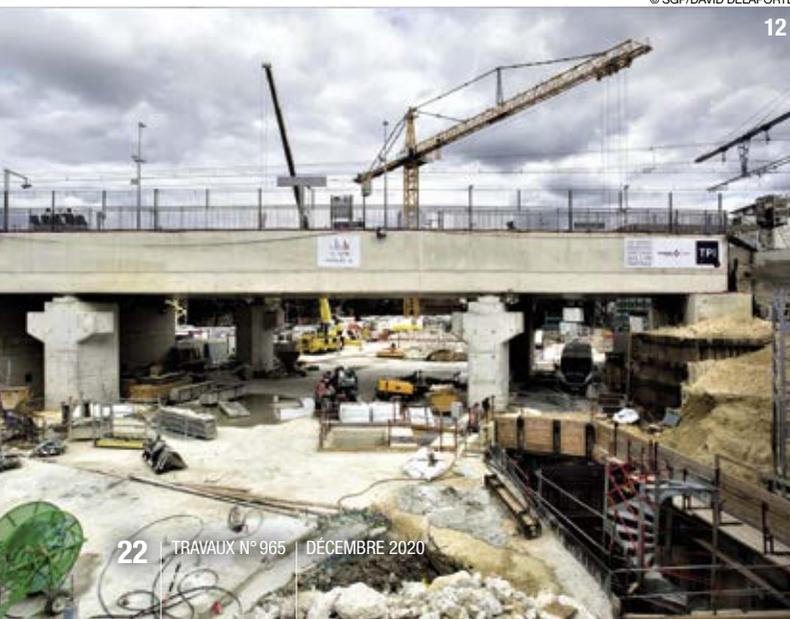
moyens de prendre les décisions qui l'engageront contractuellement.

D'autre part le Second Regard assure une veille sur les notes techniques échangées entre le maître d'œuvre et le groupement constructeur de façon à essayer de repérer les zones où une difficulté pourrait apparaître, engendrant de nombreux échanges infructueux. Sur le lot 1 de la ligne 16, par exemple, dont le maître d'œuvre est Egis et le groupement d'entreprises Eiffage Génie Civil/Razel-Bec/TSO, notre unité s'est adjoint les services du bureau d'études d'ingénierie Terrasol pour les missions de géotechnique et de "second regard", pour les phases de conception et de réalisation. Cette démarche n'entrave en rien le rôle du MOE Egis, qui reste responsable de sa conception et du contrôle d'exécution des travaux. Lorsque les deux protagonistes "maître d'œuvre/entreprise" semblent en désaccord, nous faisons intervenir ce "second regard" et nous discutons de façon collégiale afin de parvenir à l'accord qui semble le plus acceptable. Il en est ainsi pour tous les lots, sachant que la prise de décision finale reste quand même à la main du maître d'ouvrage. Dans le cas où un litige n'aurait pas pu trouver une solution amiable, il est prévu de faire appel, si nécessaire, à un comité d'experts indépendants, dans une telle éventualité.

En complément du dispositif de second regard, nous avons mis en place un comité d'experts appelé "Comité des Travaux Souterrains (CTS)". En effet, la réalisation de travaux souterrains comporte toujours une part importante d'aléas qui peuvent avoir des conséquences très graves en termes de coûts, de délais, d'impact sur les personnes et les biens, et d'image pour le maître d'ouvrage.

© SGP/DAVID DELAPORTE

12



© SGP/CLAIRE-LISE HAVET

13



Le CTS composé d'experts indépendants est chargé de donner des avis techniques, des recommandations et des suggestions sur les éléments de conception et de réalisation des ouvrages souterrains proposés par les maîtres d'œuvre ou les entreprises de travaux, tant sur le plan technico-économique que sur celui de l'évaluation des risques liés à la réalisation des travaux.

Un comité d'experts nous assiste d'ailleurs en permanence, aussi bien en

phase de conception que de réalisation pour pousser à l'extrême les interrogations lorsque celles-ci surviennent, quel qu'en soit le sujet.

Ce comité est intervenu pour le cas de la gare de Saint Maur - Créteil, dont la profondeur non prévue initialement nécessitait une modification importante du projet initial. Il en a été de même pour la gare du Vert-de-Maisons où la décision d'en réaliser une partie en congélation a nécessité une réflexion approfondie sur la technique

et le phasage à mettre en œuvre pour sécuriser au maximum la mise en œuvre délicate de cette technique de terrassement.

Les techniques de construction ont-elles évolué face à la prise de conscience du respect de l'environnement ?

L'évolution a commencé par le respect de l'environnement. Sachant que 45 millions de tonnes de terre vont être excavées sur le chantier du Grand

Paris Express, la Société du Grand Paris s'est engagée à revaloriser près de 70%. Les nombreux forages nécessaires aux reconnaissances de sols ont permis d'identifier les couches exploitables. Pour le secteur Arcueil-Cachan-Bagneux, par exemple, on a récupéré le calcaire grossier (utilisé à l'époque pour construire les immeubles haussmanniens) situé au niveau des futures gares pour en faire du ciment qui sera utilisé par endroits pour combler les carrières du Grand Paris Express. □

LE CHANTIER CONTINUE MALGRÉ LA CRISE

Malgré une interruption des chantiers de 6 à 8 semaines, la Société du Grand Paris et les entreprises partenaires sont restées mobilisées pour faire avancer le projet du Grand Paris Express tout au long de la crise sanitaire. La Société du Grand Paris a pleinement joué son rôle de maître d'ouvrage pendant cette période : interruption des travaux, mise en sécurité des chantiers, redémarrage avec de nouvelles normes de sécurité sanitaire et prises de décisions claires et partagées avec les entreprises.

Le redémarrage rapide des chantiers était une nécessité pour protéger les entreprises, sauvegarder les emplois et préserver les savoir-faire. Le chantier du Grand Paris Express revêt un enjeu économique majeur dans le contexte de la relance avec ses 4 à 5 milliards d'euros de commande par an, au profit de plus de 1000 entreprises engagées dans le projet, des majors du BTP aux TPE-PME.

Aujourd'hui, les chantiers génèrent près de 7000 emplois directs et jusqu'à 15000 au pic de l'activité dans les 3 à 5 ans qui viennent. Le financement du projet est sécurisé jusqu'en 2023 ce qui permettra de préserver la visibilité et les plans de charge des entreprises, et donc les emplois.

Durant la crise, les équipes de la Société du Grand Paris sont restées mobilisées, en télétravail, pour poursuivre les activités d'études, continuer les recrutements (300 recrutements attendus en 2020) et maintenir la chaîne de production des appels d'offre afin que les entreprises ne se retrouvent pas face à un "trou d'air" dans leurs carnets de commande dans quelques mois. Par ailleurs, plusieurs marchés ont été attribués pendant cette période : le premier lot de génie civil de la ligne 18 (entre aéroport d'Orly et Palaiseau sur le plateau de Saclay) à la mi-mai ainsi que les deux premiers marchés tous corps d'État sur les lignes 16 et

17 pour le futur centre d'exploitation d'Aulnay (attribué au groupement Brézillon) et pour la future gare de Saint-Denis Pleyel (attribué à BESIX). Récemment, les deux premiers marchés de façades de quai pour les lignes 16 et 17 et la 15 Sud ont été attribués au groupement INEO UTS (filiale d'ENGIE Solutions) - Portalp et au groupement Gilgen Door Systems AG - SDEL INFI.

Au total, 80 appels d'offres sont en cours.

À peine 5 ans après les premières enquêtes publiques, l'intégralité du tronçon sud de la ligne 15 et la ligne 16 entre Saint-Denis-Pleyel et Clichy Montfermeil sont en travaux ; les travaux de génie-civil ont démarré sur la ligne 17 avec un tunnelier qui partira de Bonneuil à la fin de l'année ; les travaux de génie civil démarreront à la fin de l'été sur la ligne 18 et le premier rail sera soudé à Noisy-Champs sur le tronçon sud de la ligne 15. Concernant la réalisation des tunnels du réseau, 20 tunneliers seront en activités à la fin de l'année et le pic sera atteint en 2021, une situation inédite en Europe. Les chantiers avancent à un rythme soutenu malgré les difficultés et les aléas.

Du côté des lignes encore en étude, le projet avance également. La réalisation des tronçons Est et Ouest de la ligne 15 est engagée avec la publication du premier Avis d'Appel Public à la Concurrence (AAPC) de marché de conception-réalisation pour une partie du tronçon Ouest de la ligne 15 en février, le second AAPC sera publié cet été, il concernera une partie du tronçon Est de la ligne 15.

Enfin, le matériel roulant est présenté depuis le mois d'octobre à la Fabrique du Métro : une rame du futur métro grandeur nature y est exposée.

© SGP/DAVID DELAPORTE

14



© SGP/GÉRARD ROLLANDO

15





1
© COTEG

COTEG TERRASSEMENT SÉLECTIF ET DÉPOLLUTION

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

GESTION DES SITES ET SOLS POLLUÉS, TERRASSEMENTS NOTAMMENT EN GRANDE PROFONDEUR, AMÉNAGEMENTS PAYSAGERS, DÉSAMANTAGE, DÉMANTÈLEMENT DANS LE NUCLÉAIRE, SONT AUTANT DE MÉTIERS CONSTITUANT L'EXPERTISE DE COTEG, QUI PLACE AU CŒUR DE SES COMPÉTENCES L'INSERTION DES OUVRAGES DANS LEUR ENVIRONNEMENT NATUREL ET HUMAIN DEPUIS 1971. LES CHANTIERS DE TERRASSEMENT EN SOUTERRAIN LIÉS AU GRAND PARIS EXPRESS - TUNNELS ET GARES - LUI DONNENT ACTUELLEMENT UNE OCCASION DÉFINITIVE D'IMPOSER SES COMPÉTENCES DANS LES DOMAINES DONT ELLE S'EST FAIT UNE SPÉCIALITÉ. AVEC OLIVIER QUIGNON, DIRECTEUR DE L'AGENCE COTEG, RETOUR EN ARRIÈRE ET FOCUS SUR L'ACTUALITÉ DE L'ENTREPRISE.

Coteg (Compagnie de Terrassements Généraux) a été créée en 1971 par un entrepreneur indépendant qui a démarré avec une pelle hydraulique et quelques camions en effectuant principalement des travaux de terrassement liés à la construction

de bâtiments à Paris et à sa périphérie. Rapidement, l'activité se développe à l'ensemble de l'Île-de-France et l'entreprise ne cesse de croître pour devenir l'un des plus importants transporteurs de matériaux de terrassement avec une flotte de plus de

1- Terrassement de la gare de Saint Maur - Créteil du lot T2B de la ligne 15 Sud.

70 camions au début des années 90. À la même époque, Razel, l'un des leaders français du terrassement de grosse masse souhaitait étendre son parc de matériel et son champ de compétences au terrassement urbain. L'opportunité de la reprise de Coteg



OLIVIER QUIGNON : PARCOURS

Olivier Quignon est diplômé de l'ESITC de Metz (École Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction) en 2000.

Il commence sa carrière en 2000 chez Eurovia, dans l'Oise, qu'il quitte en 2003 pour l'agence Colas de Loéal Mendon en Bretagne puis rejoint l'agence Colas de Nantes en tant qu'adjoint d'exploitation en 2006.

En février 2009, il devient chef d'agence de Sacer Toulouse (filiale Colas) où il reste jusqu'en septembre 2012 avant de retrouver Colas Centre Ouest, à Airvault, dans les Deux-Sèvres, comme chef d'agence en juillet 2012 et jusqu'en décembre 2013.

Il est directeur de l'agence Coteg de Fontenay-sous-Bois depuis janvier 2014 et directeur du PTU (Pôle Terrassement Urbain) de Razel-Bec depuis 2017. Au travers de ce PTU, il chapeaute Coteg, Socemat et Vitrans-Matthieu, deux entités "matériel" mettant leurs moyens à disposition de Coteg. Soit un total de 200 personnes et un chiffre d'affaires global de plus de 50 M€.

s'est présentée au début des années 90 et a été saisie par Razel pour conforter sa présence sur les grands chantiers routiers et ferroviaires de l'époque - notamment les lignes nouvelles de TGV - tout en prenant une position significative sur les chantiers de terrassement en région parisienne. Coteg a même élargi son champ d'activité en répondant à des appels d'offre publics et en construisant en 2002 l'un des premiers jardins filtrants pour une station d'épuration.

« L'activité terrassement pur devenant de plus en plus concurrentielle, indique Olivier Quignon, il devenait nécessaire de trouver de nouveaux domaines d'expansion. C'est alors qu'est apparu le virage de la dépollution, notamment dans les marchés publics. La technique s'est développée, les acteurs se sont

2- Olivier Quignon, directeur de l'agence Coteg.

3a- Pelle à câble Liebherr HS 8070 sur le chantier de la gare Pont de Rungis.

3b- Tracé de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express.

formés, tant au niveau des hommes que des matériels et l'année 2005 marqua le début de l'activité de dépollution des sols, devenue aujourd'hui le domaine d'excellence de Coteg en Île-de-France. »

Au nombre des réalisations en matière de terrassements de sols pollués en

zone urbaine, celle de la ZAC des Docks à Saint-Ouen constitue un bon exemple : après investigations environnementales complémentaires et définition d'un plan de maillage pour le mouvement des terres ainsi que le pompage/écrémage du flottant de la nappe phréatique, tri et criblage des matériaux, confinement des matériaux impactés par mise en place d'une étanchéité par géomembrane. Soit 95 000 m³ de déblais, 30 000 m³ de terres criblées, 10 000 m³ de remblais sur site, 15 000 tonnes de déblais évacués en ISDND (Installations de Stockage De Déchets Non Dangereux) et 5 000 tonnes en centre de traitement biologique ainsi que le transport et l'évacuation des matériaux en centre de comblement de carrières de gypse. Coteg est d'ailleurs membre de

l'UPDS (Union des Professionnels de la Dépollution des Sites). Elle est certifiée ISO 9001 depuis 1998, ISO 45 001 depuis 2011, et CEFRI E⁽¹⁾ depuis 2016. Elle dispose aujourd'hui d'une expertise complète dans ces domaines.

« En 2010, pour poursuivre sa stratégie de réalisation de travaux spéciaux, précise Olivier Quignon, dans le cadre de la modernisation et de la mise en sécurité des tunnels aux normes nationales, l'entreprise a conçu ses propres camions destinés à la pose de plaques anti-feu, améliorant ainsi fortement les conditions de travail des opérateurs qui, dans ce type de situation, peuvent être victimes de troubles musculo-squelettiques (TMS). C'est ainsi qu'elle a mis en place, notamment, 39 580 m² de protection incendie de type N1 ; N2, ▷



3a

© COTEG



3b

© GRAND PARIS EXPRESS



4a

© COTEG



4b

© GRAND PARIS EXPRESS

N3+HCM 60 dans le tunnel du Landy (93), travaux effectués de nuit sous protection de blocs GBA. Un procédé à la fois innovant, sécurisant et adapté aux problématiques de travaux urbains. » En 2014, elle s'est engagée dans la certification amiante après avoir formé son personnel pour les travaux en sous-section 3 (retrait, encapsulage de matériaux amiantés).

En 2015, Coteg a réalisé son premier chantier dans un site lié à l'industrie nucléaire grâce à son personnel formé à la prévention de ces risques spécifiques ainsi que son premier chantier de dépollution in situ à Vélizy-Villacoublay (78). En 2016, une opportunité de s'investir dans l'exécution de terrassements à grande profondeur, en particulier en souterrain, s'est présentée et Coteg

4a- Terrassement de l'ouvrage 1103 de la ligne 15 Sud.

4b- Tracé de la ligne 15 Sud.

5- Terrassement en sous-cœuvre dans la gare de Bry-Villiers-Champigny.

s'est vu confier la réalisation du bassin enterré d'eau pluviale d'Issy-les-Moulineaux, de 40 m de diamètre et 25 m de profondeur.

En 2017, ont commencé à apparaître physiquement les marchés de travaux du Grand Paris Express et, sous maîtrise d'ouvrage de la Société du Grand Paris (SGP), Coteg a débuté les travaux de terrassement et de gestion des



5

© COTEG

déblais du tronçon T2B de la ligne 15 sud de l'ouvrage.

« Dans le cadre des marchés du Grand Paris Express, poursuit Olivier Quignon, Razel-Bec a été confronté à la difficulté de gestion des déblais : jusqu'à présent, une terre qui était prélevée à une profondeur de 30 m à 40 m était considérée comme un matériau inerte - déblai non "anthropique" - mais aujourd'hui, il est demandé aux entreprises d'assurer à la fois l'identification, la traçabilité, la caractérisation et la gestion de terres présentant des impacts de pollution. À partir de là, les entreprises de travaux souterrains se sont rapprochées de Coteg en regard de son expertise dans le domaine ainsi que de sa connaissance très fine des exutoires possibles en Île-de-France. Elle a ainsi été intégrée pour répondre à ces appels d'offre en qualité de sous-traitant en alliant l'ensemble de ses compétences que sont le terrassement de grande profondeur pour les ouvrages et la gestion des marins de tunnelier. »

6- Projet de réaménagement du nouveau quartier de la "Rose de Cherbourg" à Paris - La Défense, en bordure de la future tour Hekla due à l'architecte Jean Nouvel.

7a- Premières phases du terrassement de l'ouvrage 902 de la ligne 15 Sud.

7b- Le terrassement de l'ouvrage 902 en cours d'achèvement à grande profondeur.



© LAUTRE IMAGE

RAZEL-BEC : LE PÔLE TRAVAUX PUBLICS DU GROUPE FAYAT

Bâtitseur et précurseur, Razel-Bec a largement participé à la construction d'infrastructures de transport, chemins de fer et routes, à la production d'énergie, aménagements hydro-électriques, centrales et autres infrastructures liées à l'alimentation et au traitement de l'eau.

Les techniques ont évolué mais la mission de l'entreprise reste la même : améliorer les transports par les terrassements, les tunnels, les ouvrages d'art.

À cela s'ajoute son expertise du génie civil industriel qui lui permet d'accéder à des marchés de stations d'épuration ou de construction/déconstruction dans le secteur nucléaire. En témoignent, pour ne citer qu'eux, les chantiers de l'usine de dépollution de l'agglomération havraise, de l'enceinte du réacteur nucléaire Jules Horowitz à Cadarache, ou encore le marché de conception-réalisation d'ICEDA (Installation de Conditionnement et de d'Entreposage des Déchets Activés) à Bugey.

Tout a commencé en 1888 !

Razel-Bec est le résultat de 130 ans d'expérience dans les Travaux Publics, symbole de l'union de deux grandes familles d'entrepreneurs, qui ont construit la France du 20^e siècle, mais aussi l'Afrique de l'après-guerre.

En 2009, Razel est rachetée par le groupe Fayat. Ce rachat est suivi en 2012 par la fusion-absorption de Bec par l'entreprise Razel, toutes deux filiales du groupe Fayat, qui en constituent aujourd'hui le pôle Travaux Publics.

Razel-Bec, ce sont 6000 collaborateurs, hommes et femmes, constituant et animant ses unités opérationnelles et d'appui, et grâce auxquels la constitution d'un pôle Travaux Publics fort a été envisageable et rendu possible.

Parmi les derniers chantiers obtenus en France, en juillet 2020, la Rose de Cherbourg : ce marché remporté par l'agence Grands Chantiers de Razel-Bec Direction régionale Nord consiste à réaliser des travaux d'aménagement des espaces publics à Puteaux, dans le quartier d'affaires de La Défense Sud.

Réel projet urbain développé par l'établissement public Paris La Défense (MOA), les travaux sur le secteur de la Rose de Cherbourg, visent à moderniser l'échangeur autour de la tour Hekla. Le but est d'améliorer le lien entre la dalle de La Défense et la ville de Puteaux en redonnant un caractère plus urbain au boulevard circulaire et de créer une nouvelle centralité de proximité par la réalisation de bureaux, services, commerces et logements.

En parallèle, Coteg a développé aussi son expertise avec des partenariats pour la gestion des déblais de parois moulées, par définition impactés chimiquement.

LIGNE 15 SUD : LOT T2B

Le lot T2B de la ligne 15 Sud - entre Bry-Villiers-Champigny et Créteil l'Echat - comprend le creusement d'un tunnel bi-voies de 7,2 kilomètres et 8,70 m de diamètre intérieur, la construction de sept ouvrages annexes inter-gares et d'un ouvrage annexe pour la connexion future avec la ligne 15 Est, ainsi que la réalisation de trois gares : Bry-Villiers-Champigny, Champigny-Centre et Saint-Maur-Créteil. Dans le détail, les intervenants sont constitués du groupement Eiffage Génie Civil, mandataire, et Razel-Bec avec Eiffage Fondations, Sefi-Intrafor, Icop, Coteg et Capocci (sous-traitants), et les ingénieries partenaires Egis et Tractebel.

Les travaux ont débuté en avril 2017 et seront réalisés sur un délai de cinq ans. Ils nécessitent l'utilisation de deux tunneliers et mobiliseront jusqu'à 800 personnes.

Sur ce lot, Coteg assure la gestion des terrassements et des marins du tunnelier ainsi que celle des déblais des parois moulées et des ouvrages.

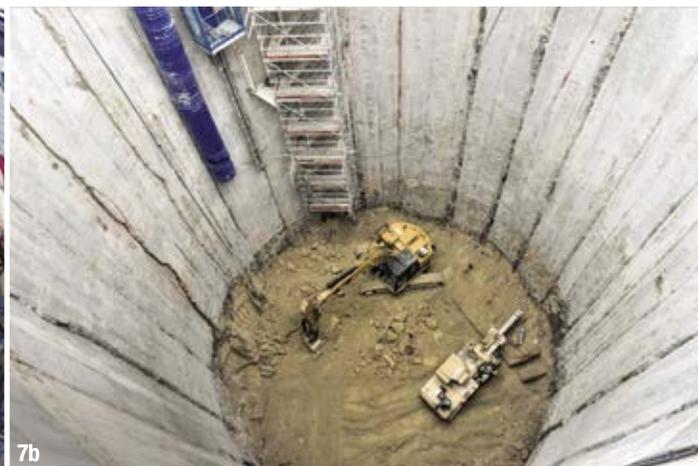
Le parc de matériels mis en œuvre est à la hauteur de la tâche à accomplir : assurer l'évacuation de quelque 2000000 de m³ de matériaux.

Il est constitué de 2 pelles à câbles Liebherr 8070 et Liebherr 855, 6 pelles sur chenilles de 10 à 50 t Mecalac 10 MCR, Caterpillar 325, Liebherr 936 et 946, Volvo EC 235, 2 chargeurs sur chenilles Caterpillar 953 et 963, 2 chargeuses sur pneus Caterpillar 966, un compacteur vibrant, un boueur sur chenilles Komatsu DX 61 et 20 camions semi-remorques. ▶



© COTEG

7a



7b



8



9



10



11

LIGNE 14 : LOT GC03

Coteg intervient également sur le lot GC03 de la ligne 14 Sud du Grand Paris Express, sous maîtrise d'ouvrage RATP, en sous-traitance d'un groupement constitué de Razel-Bec (mandataire) avec Eiffage Génie Civil, Sefi-Intrafor, Eiffage Fondations et I.CO.P. Le lot GC03 de la ligne 14 reliera la station de métro Olympiades à l'aéroport d'Orly. À noter que Razel-Bec intervient désormais sur 10 gares et plus de 20 km de tunnels sur le Grand Paris Express : ligne 14 Nord, ligne 14 Sud, ligne 11, ligne 15 Sud et RER Eole. L'intervention de Coteg sur le lot 14 est identique dans la forme à celle mise en œuvre sur le lot T2B de la ligne 15 Sud. Le volume de matériaux à trier et à évacuer s'élève à 650 000 m³.

Sur ce lot, le parc de matériels est tout aussi conséquent : 2 pelles à câbles Liebherr 8070 et Liebherr 855, 6 pelles sur chenilles de 10 à 50 t Mecalac 10, Caterpillar 325, Liebherr 936 et 946, Volvo EC 235, 2 chargeurs sur chenilles Caterpillar 953 et 963, 2 chargeuses



12

COTEG : DES CHIFFRES SIGNIFICATIFS

Depuis 2008, les travaux exécutés par Coteg lui ont permis d'atteindre des chiffres significatifs dans les différentes spécialités qu'elle exerce :

- Plus de 5 millions de m³ de terres excavées,
- Plus de 3 millions de tonnes de terres non inertes gérées,
- 1 000 000 tonnes de terres évacuées par voie fluviale,
- 150 000 tonnes évacuées par train,
- Plus de 10 000 big-bags de terres ionisées évacuées en camion de type "tautliner",
- 80 000 m² de protection incendie.

8- Pelle Caterpillar 325 assurant le terrassement de la gare de Saint Maur - Créteil.

9- Terrassement de la gare de Créteil-l'Echat par une pelle Caterpillar 325F.

10- Pelle sur pneus Liebherr 914 Compact sur le chantier de la gare de Champigny Centre.

11- L'ouvrage 1001 du lot T2B de la ligne 15 Sud.

12- Depuis 2008, les travaux exécutés par Coteg lui ont permis d'atteindre des chiffres significatifs.



13
© COTEG

sur pneus Caterpillar 966, un compacteur et une vingtaine de camions semi-remorques.

USINE DU SIAAP DE CLICHY-LA-GARENNE

Un autre chantier de référence est le terrassement du bassin créé dans le cadre de la refonte de l'usine de Clichy-la-Garenne du SIAAP.

Construite il y a près de 160 ans, cette usine de relevage et de prétraitement est le point de passage d'une importante partie des eaux usées de

13- Vue d'ensemble du chantier de réaménagement de l'usine du SIAAP à Clichy-la-Garenne.

14- Début des terrassements du bassin de refonte de l'usine de Clichy-la-Garenne.

15- Évacuation par voie fluviale des déblais de terrassement du bassin de refonte de l'usine du SIAAP.

l'agglomération parisienne. Le site va être entièrement réaménagé afin de répondre aux exigences de la réglementation, et plus particulièrement à la directive européenne cadre sur l'eau (DCE). Dès 2008, date de la programmation de cette opération, les équipes du SIAAP ont défini précisément les différents enjeux et objectifs de ces travaux qui visent notamment à moderniser les installations et augmenter leur capacité de prétraitement qu'il est prévu de porter de 19 à 35 m³/s. « Sur ce chantier où Coteg est co-

traitant avec Bessac, poursuit Olivier Quignon, elle a géré le traitement des déblais du micro-tunnelier mis en œuvre pour assurer la jonction entre le bassin de pré-traitement et le bassin de stockage des eaux pluviales.

Les travaux se déroulent à partir d'un puits à 30 m de profondeur, au fond duquel a été descendu un micro-tunnelier baptisé Liliane de 3,50 m de diamètre qui creuse une galerie de 184 m le long du fleuve pour déboucher sur un nouveau bassin de stockage d'une capacité de 70 000 m³. »



© COTEG

14

15



16a

© SIAAP

Une intervention analogue, réalisée en sous-traitance du groupement Urbaine de Travaux/Bessac/Sade, s'est déroulée sur un chantier de micro-tunnelier dans le cadre de la restructuration de la station d'épuration Seine Aval à Achères.

Le collecteur servira à acheminer les effluents issus de la future unité de décantation primaire vers l'unité de bio filtration. D'une longueur de 1 120 m, il a été réalisé à l'aide d'un tunnelier Bessac intervenant en diamètre 5,88 m. Pour le chantier du Siaap, Coteg met

16a- Le bassin de refonte lors d'une phase déjà avancée des terrassements.

16b- Aspect final de l'usine de Clichy - La Garenne à l'issue de sa refonte.

en œuvre, comme pour les deux chantiers cités précédemment, au travers de Vitrans-Matthieu et de Socemat, également filiales de Razel-Bec, un parc adapté à la taille des travaux : 1 pelle à câbles de 80 t Liebherr 855, 3 pelles sur chenilles de 25 à 40 t CAT 325,



16b

© SIAAP

Liebherr 936, Volvo EC 235, une pelle sur pneus de 22 t Liebherr 922, un compacteur et un bouteur sur chenilles D61.

CŒUR DE MÉTIER : LE TERRASSEMENT SÉLECTIF

Le cœur de métier de Coteg est l'évacuation, la gestion et le traitement des déblais de terrassement.

Il faut rappeler qu'au cours des dix dernières années, les marchés réglementaires ont connu une évolution profonde.

Une terre polluée l'est par rapport à des valeurs plafonds de seuils à ne pas dépasser définis par l'arrêté du 12 décembre 2014. Sur certains sites de stockage de terre, depuis un arrêté de 2016, ce seuil peut être augmenté dans un rapport x3.

En 2018, une autre évolution réglementaire initiée par la RATP autorise le stockage des terres sans limite de seuil en ayant fait la démonstration qu'il n'aura pas d'impact sur les nappes, mais sans jamais atteindre le seuil fixé pour les déchets dangereux. Cette spécificité est intrinsèque à chaque site receveur, en fonction du sol en place et des circulations d'eau.

« C'est pour répondre à l'évolution de la réglementation relative à la gestion des déblais de terrassement, précise Olivier Quignon, que Coteg a complètement redéfini son approche des marchés.

L'entreprise ne dispose en propre d'aucun matériel. Elle emploie 36 collaborateurs dont plus de la moitié sont des cadres, le reste de l'effectif étant constitué par des opérateurs à pied et des chefs de chantier.

Les matériels sont mis à disposition par Razel-Bec et Vitrans-Matthieu, elle-même partie intégrante du groupe, assurant l'une et l'autre la location de matériels avec chauffeurs, de la mini-pelle de 5 tonnes à la pelle à câble de 80 tonnes. »

L'entreprise fonctionne comme un bureau d'ingénierie. Dans le concept développé par Razel-Bec lors de l'acquisition de Coteg, l'objectif était de créer une entité dont la principale valeur ajoutée était le savoir-faire de ses personnels en matière non seulement de terrassement, c'est-à-dire d'extraction de matériau, mais surtout de tri et de traitement de ces matériaux à destination des sites les mieux appropriés pour les recevoir, tant d'un point de vue économique qu'au niveau du respect de l'environnement.

C'est la compétence des équipes qui la constituent qui font la force de Coteg et

© COTEG



UN PARC DE MATÉRIEL CONSÉQUENT

Le parc des matériels mis en œuvre par Coteg sur ses différents chantiers de terrassement, qu'ils soient en souterrain ou à ciel ouvert, permet de répondre à la totalité des cas de figure.

Il est fourni par Razel-Bec mais également par deux filiales spécialisées du groupe : Vitrans-Matthieu et Socemat et se compose de la façon suivante :

- 2 pelles à câbles de 70 et 80 t,
- 29 pelles sur chenilles de 10 à 50 t,
- 13 pelles sur pneus de 10 à 22 t,
- 7 chargeurs sur chenilles,
- 9 chargeuses sur pneus,
- 4 compacteurs vibrants,
- 1 bouteur sur chenilles,
- Une flotte de 58 camions semi-remorques et 12 camions 8x4.

Auxquels s'ajoutent 11 camions grues, un concasseur et deux cribles.

17- Le parc de matériel de Coteg permet de répondre à la totalité des cas de figure.

lui permettent de se distinguer de ses concurrents : agglomérer des engins est un moyen de produire mais ne constitue pas une force commerciale en soi, la performance se situe au niveau des études préalables et des techniques élaborées pour réaliser les travaux dans les conditions les plus

favorables tant techniquement qu'économiquement.

Au sein de Razel-Bec, Coteg forme une entité « agile, réactive, évolutive » selon les propos d'Olivier Quignon.

C'est ainsi qu'elle est passée successivement de la fouille parisienne à la protection incendie des tunnels, suite à la catastrophe du Mont Blanc en 1999, entre 2005 et 2015, marché qui a aujourd'hui quasiment disparu, puis au traitement et à la dépollution de sols, afin de répondre au mieux à l'évolution et aux contraintes nouvelles qu'elle impose aux entreprises de res-

pecter. Une cellule "amiante" a ainsi été constituée afin de s'impliquer dans ce que sont devenus désormais les chantiers de VRD où la prise en compte de l'amiante est une obligation.

Après une première expérience en 2015, la certification CEFRI "E" obtenue en 2016 doit lui permettre d'intervenir dans les marchés de démantèlement du parc nucléaire dès que les opérations prévues seront engagées.

UNE PROGRESSION RÉGULIÈRE

La faculté de s'adapter en permanence aux marchés les plus porteurs a permis à Coteg de progresser de façon très significative depuis son entrée dans le groupe Razel-Bec : 5,6 M€ de CA en 2015, 13 M€ en 2018, 19 M€ en 2019 et les prévisions pour 2020 tablent sur 32 M€, avec un effectif passant de 28 à 36 personnes.

« Cette progression est due essentiellement à la gestion judicieuse des matériaux transportés, indique Olivier Quignon. Pour donner un exemple, un camion-type de 25 t représente un chargement de 500 € s'il transporte des déchets de classe 3+, les plus courants, mais 2000 € pour des déchets de classe 2 et 3000 € pour des classe 1. »

« La prestation initiale de reprise des matériaux est toujours identique mais le prix de facturation des matériaux connaît une progression quasiment exponentielle en fonction de leur nature. D'où l'importance du travail d'ingénierie lors de la préparation et de l'évaluation des chantiers. »

Les chantiers du Grand Paris Express ne sont pas les seuls auxquels s'intéresse Coteg. D'autres, plus modestes, présentent des spécificités techniques intéressantes : par exemple, la démolition de 6 ouvrages, le désamiantage et les mouvements de terre du barreau de l'A186 entre l'A3 et le cœur de Montreuil pour la construction de la ligne T1 du tramway, pour ramener l'autoroute, qui était en surplomb, à hauteur de la ville (groupement Coteg/Capocci), la construction du tramway T10 à Clamart (groupement Razel-Bec/Coteg) avec la gestion et les caractérisations des terres impactées, le ripage d'un ouvrage d'art à Bonneuil sur Marne (groupement Razel-Bec/Maia Sonnier) au niveau des terrassement et de la gestion des déblais. □

1- Le référentiel de certification CEFRI "E" spécifie les dispositions d'organisation devant être prises par les entreprises employant du personnel de catégorie A ou B travaillant dans des installations nucléaires.



1
© GROUPEMENT IP13

SYCTOM D'IVRY/PARIS XIII : FONDATIONS SPÉCIALES D'UN SITE INDUSTRIEL EN ACTIVITÉ

AUTEURS : SÉBASTIEN ALLOITEAU, CHEF DE PROJET ÉTUDES, NGE FONDATIONS - THOMAS IMBERT, INGÉNIEUR ÉTUDES, NGE FONDATIONS - THOMAS SUTRE, RESPONSABLE TRAVAUX, NGE FONDATIONS

LE PROJET DE TRANSFORMATION DU SYCTOM D'IVRY/PARIS XIII EST DÉCOMPOSÉ EN DEUX PHASES DE TRAVAUX, QUI S'ÉTALENT SUR UNE PÉRIODE DE CINQ ANS : L'UVE (UNITÉ DE VALORISATION ÉNERGÉTIQUE) ET L'UVO (UNITÉ DE VALORISATION ORGANIQUE). IL PRENDRA FIN EN 2023 AVEC LA MISE EN SERVICE INDUSTRIELLE ET L'EXPLOITATION DES NOUVELLES UNITÉS. NGE FONDATIONS INTERVIENT SUR LA TRANSFORMATION DE L'UVE NÉCESSITANT LA RÉALISATION DE DEUX FOUILLES DE 2 700 ET 5 700 m², DE 8 ET 12 m DE PROFONDEUR, À PROXIMITÉ DE LA SEINE ET À SEULEMENT QUELQUES MÈTRES DU FAISCEAU DE VOIES SNCF DE LA GARE D'AUSTERLITZ.

LE PROJET

La reconstruction du centre d'Ivry/Paris XIII figure parmi les plus grands projets d'installations de traitement de déchets conduits en France actuellement. L'objectif est de transformer le centre actuel, tout en le maintenant en activité, en une usine de référence en France et en Europe. L'ouvrage se

compose d'un bâtiment de 9 niveaux et d'une cheminée monumentale, assis sur 2 à 3 niveaux de sous-sols.

LE SITE ET L'ENVIRONNEMENT DU PROJET

Le site est bordé :
→ Au sud-ouest, par les voies SNCF de la gare d'Austerlitz (figure 2) ;

1- Vue globale de la fouille.

1- Overall view of excavation.

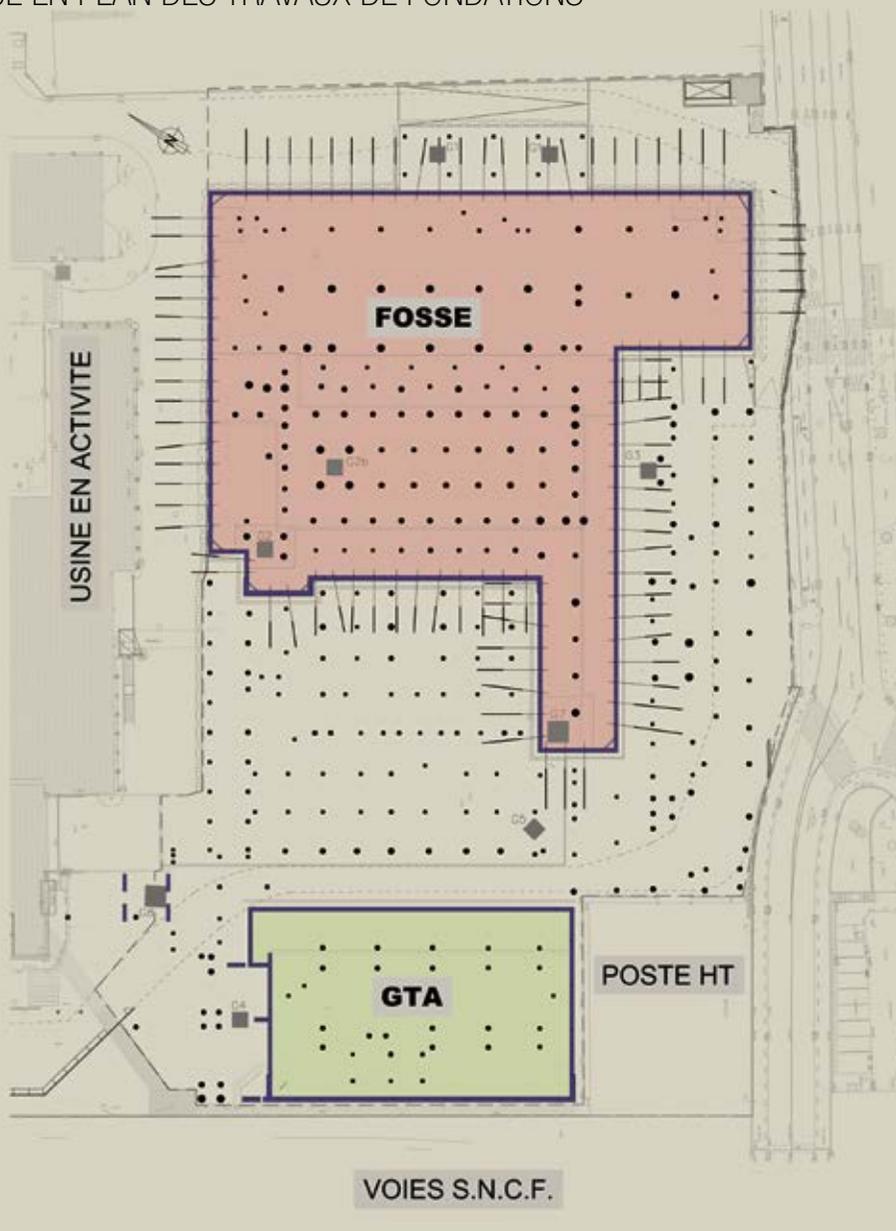
→ Au sud-est, par la rue Molière ;
→ En partie Nord, par les bâtiments de l'usine actuelle maintenue en activité.

Le contexte géologique consiste en une épaisseur de remblais surmontant les alluvions fluviales de la Seine. Viennent ensuite les Fausses Glaises, les Argiles Plastiques, puis les Marnes



2

VUE EN PLAN DES TRAVAUX DE FONDATIONS



3

2- Vue d'architecte du projet.
3- Vue en plan des travaux de fondations.

2- Architect's view of the project.
3- Plan view of foundation works.

et les Calcaires de Meudon au-dessus de la Craie.

Le projet est influencé principalement par la nappe alluviale présente à une profondeur de l'ordre de 5 m, pouvant remonter au niveau du terrain naturel en cas de crue exceptionnelle.

Le terrain abrite des résidus des démolitions antérieures, notamment d'anciens pieux laissés en place.

L'ÉTUDE DES SOUTÈNEMENTS

Le projet prévoit la réalisation de deux enceintes en paroi moulée, pour un linéaire total de 520 m : une enceinte dite "Fosse" de dimensions approximatives 80 m x 60 m, et une enceinte dite GTA (Groupe Turbo-Alternateur) de dimensions 50 m x 30 m (figure 3).

LA ZONE FOSSE

La fouille de la zone Fosse a été terrassée classiquement à ciel ouvert. Les dimensions de la fouille ont conduit à retenir une solution de stabilisation de la paroi moulée en phase provisoire par des tirants d'ancrage.

Deux lits de tirants ont été nécessaires pour les parties les plus profondes (figure 4).



4

© FRANCK BADAIRE PHOTOGRAPHE

La présence de nombreuses anciennes fondations profondes à l'arrière de la paroi moulée (pré-existantes ou réalisées pour le projet), ainsi que les zones d'interaction de tirants engendrées par le tracé de la paroi, ont nécessité une étude géométrique détaillée pour éviter les intersections d'ouvrages. Cette étude a conduit à azimuter et à modifier l'inclinaison de très nombreux tirants. La paroi moulée a été réalisée en 62 cm d'épaisseur. Sur le linéaire Sud-Ouest de la fouille, la présence de poteaux libres sur plus de 20 m de haut (figure 5) et encastrés en pied dans la paroi moulée, a nécessité un épaissement de la paroi à 82 cm.

lées des deux fouilles ont été fichées à minima de 1,50 m dans l'horizon étanche des Argiles Plastiques.

Une campagne de sondages destructifs complémentaires réalisée par Fugro a permis de repérer le toit des Argiles Plastiques sur le tracé de la paroi, dans les zones où une incertitude subsistait (figure 8).

Les efforts de flexion parasites sur la hauteur de la fiche hydraulique de paroi moulée, engendrés par les caractéristiques mécaniques médiocres des Fausses Glaises et des Argiles Plastiques, ont été estimés. Un calcul de section en béton non armé a permis de

démontrer la non-nécessité d'armer la fiche hydraulique des parois moulées.

4- Paroi moulée et tirants.

5- Poteaux de structure encastrés dans les soutènements.

4- Diaphragm wall and tie anchors.

5- Structural columns fixed in the retaining structures.

L'ÉTUDE DES FONDATIONS ORGANISATION DES ÉTUDES

Étant donné la nature et les dimensions de l'ouvrage de génie civil à réaliser, de nombreuses contraintes de dimensionnement ont été prises en compte lors des études : classe de conséquence 3, dilatation thermique liée notamment à la présence de four à haute température, gestion du retrait dans les radiers, interactions parois moulées/infrastructure... Plusieurs itérations ont été nécessaires pour converger en effort-déformation,

LA ZONE GTA

Pour la fouille GTA, du fait des faibles limites de déplacements imposées par la proximité des voies et de l'impossibilité de mise en œuvre de tirants, un mode de terrassement en sous-cœuvr a été retenu (figure 6).

La paroi moulée périphérique a été butonnée par les poutres définitives de la dalle de couverture, elles-mêmes supportées par des poteaux profonds provisoires en béton armé, constitués par les pieux de fondation (figure 7). La limitation des déplacements du soutènement le long des voies SNCF a imposé la réalisation de panneaux unitaires de longueur 3 m en épaisseur 82 cm ; le reste de la paroi moulée étant foré en épaisseur 62 cm, avec des longueurs de panneaux classiques de 6 à 7 m.

FICHE HYDRAULIQUE DES PAROIS MOULÉES

Afin de limiter les débits d'exhaure en phase provisoire, les parois mou-



5

© FRANCK BADAIRE PHOTOGRAPHE

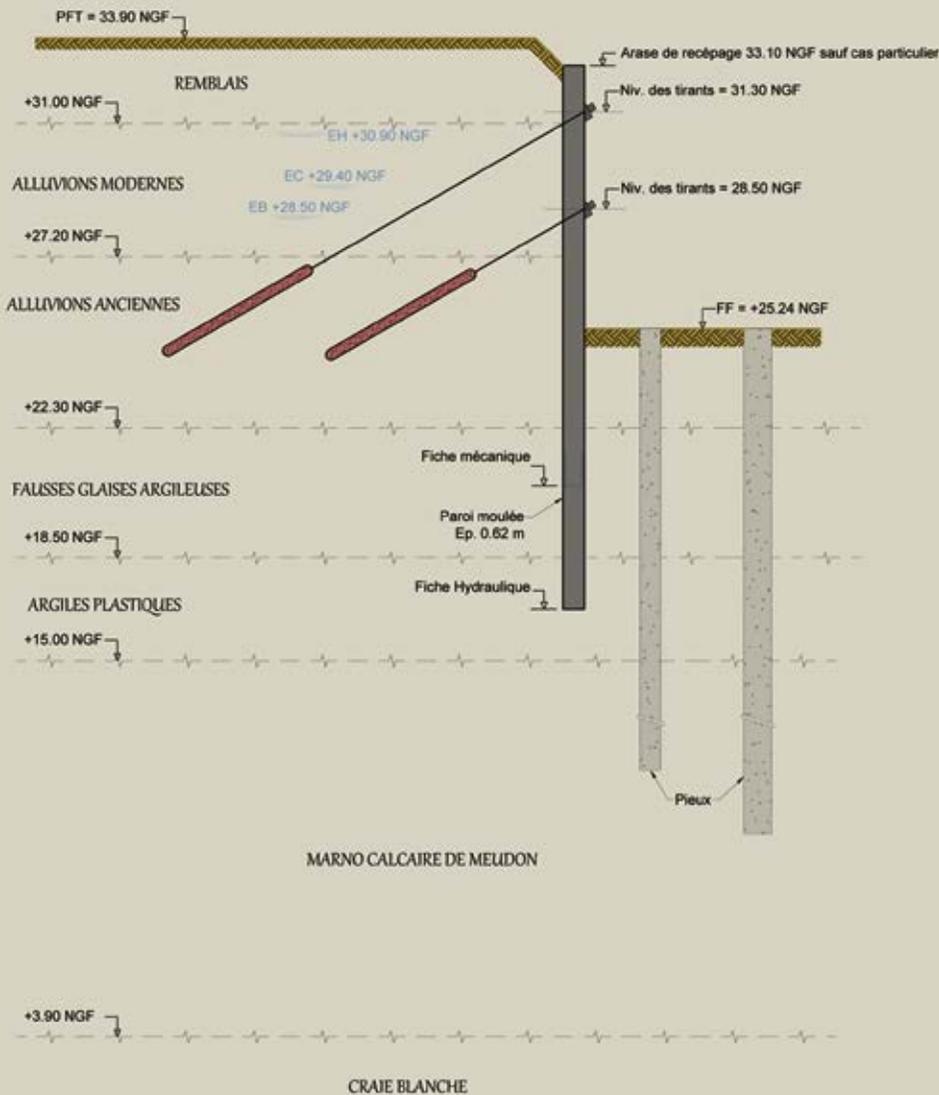


6 © FRANCK BADAIRE PHOTOGRAPHE



7 © FRANCK BADAIRE PHOTOGRAPHE

COUPE TRANSVERSALE SUR SOUTÈNEMENT ET FONDATIONS Zone Fosse



8 © NGE FONDATIONS

6- Travaux de Génie Civil réalisés en sous-œuvre.
7- Poteaux provisoires et poteau définitif.
8- Coupe transversale sur soutènement et fondations - Zone Fosse.

6- Civil engineering works performed by underpinning.
7- Temporary columns and final column.
8- Cross section on retaining structure and foundations - Pit Zone.

entre le modèle numérique global de la structure et le modèle des fondations. Ceci a imposé de nombreux échanges entre les trois bureaux d'études structure impliqués sur le projet (Biep - Isc - Nge Fondations).

SPÉCIFICITÉS DES FONDATIONS
 L'ensemble des fondations profondes du projet a été dimensionné puis réalisé suivant le cahier des charges de pieux tarière creuse type III propre à Nge Fondations. L'application de ce cahier des charges a permis une optimisation substantielle du nombre de pieux de fondation sur le projet, passant de 460 unités en phase DCE à 370 unités en phase d'exécution.

L'application des textes normatifs, la justification calculatoire de la reprise de ces efforts de traction, ainsi que les problématiques de mise en œuvre d'armatures dans le béton frais sur 30 m de profondeur, ont conduit Nge Fondations à mettre en place un système de barre Gewi®. La solution retenue est mixte ; elle se compose d'une cage d'armature classique permettant la reprise des efforts de flexion en tête, prolongée par une barre de type Gewi® jusqu'à la base des fondations (figure 9).

La réalisation d'une cheminée d'évacuation monumentale de la zone GTA nécessite l'utilisation pendant les travaux d'une grue à fût scellé parmi les plus grandes d'Europe à ce jour, de capacité de levage de 80 t à 40 m. Les efforts apportés par la grue n'ont pas permis de mettre en œuvre un système classique de fondation sur pieux. La réalisation de quatre barrettes de 21 m de profondeur fortement armées sur toute leur hauteur, a été nécessaire pour fonder cette grue.

L'UTILISATION DU BIM (Building Information Modeling)

Nge Fondations a choisi de produire les plans de ses propres études d'exécution à partir d'une maquette numérique. Cette étude a permis à la Direction Technique de Nge Fondations de tester en temps réel ses développements internes BIM dans l'environnement Revit®, et ainsi de "tutoyer" le plan BIM 2022 qui fixe un objectif ambitieux de 100% d'usage BIM pour la construction neuve. Le bureau d'études a géré, depuis une maquette numérique, 99 livrables classiques 2D indispensables au chantier ainsi que le suivi quantitatif des matériaux. Même si la phase de préparation et de montage de la maquette a nécessité un investissement supérieur à celui d'un processus 2D classique, cette dernière a permis de gérer les très nombreuses évolutions et adaptations du projet avec une parfaite cohérence entre les différents plans. Chaque modification du projet se répercutait en cascade de manière automatique sur tous les plans 2D. La maquette numérique a également permis de détecter, visualiser et gérer les nombreux conflits relatifs aux tirants (figure 10).

LES TRAVAUX DE FONDATION

Les travaux de paroi moulée, de pieux et de tirants d'ancrage ont été réalisés en propre par Nge Fondations, en sous-traitance du groupement IP13 (Eiffage

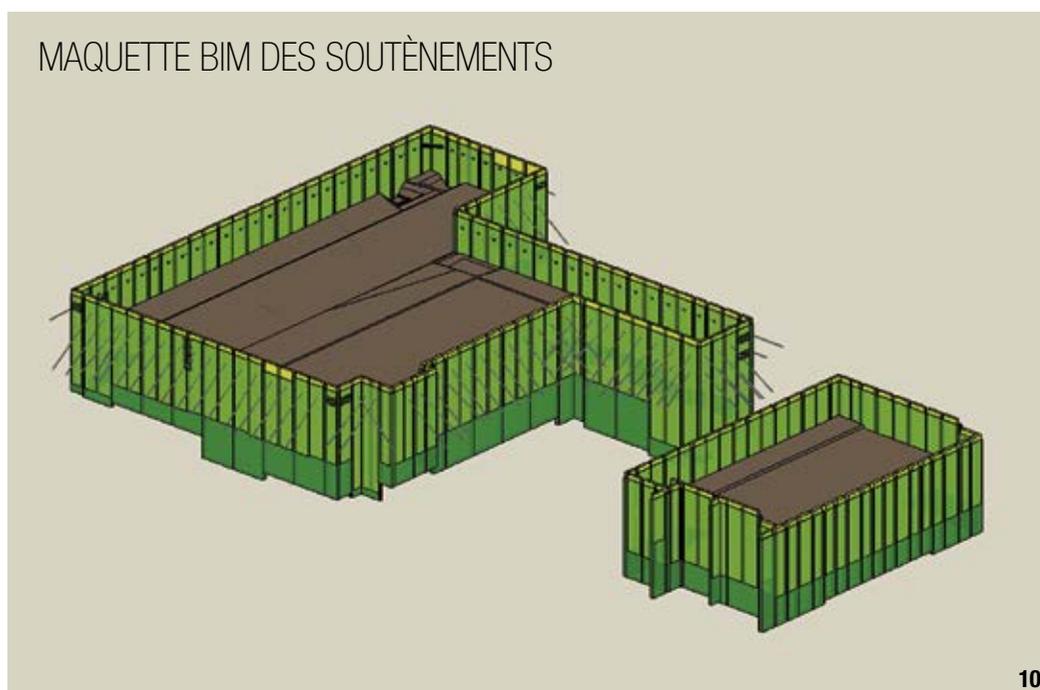


Génie Civil - Chantiers Modernes). Au total, ce sont deux ateliers de paroi moulée (benne à câbles et benne hydraulique), deux ateliers de pieux tarière creuse type 3 et deux ateliers de tirants qui ont été mobilisés en quasi-simultané pour l'exécution des travaux de fondation (figure 11). La coordination des travaux de fondation a été un point primordial pour permettre la coactivité des différents acteurs du projet (entreprises de démolition, terrassement, génie civil...) et ainsi respecter les délais d'un planning très tendu.

La proximité des voies SNCF et du poste de transformation HT (Haute Tension) a imposé, dès la phase de préparation, une étude de la cinématique et de l'évolution des engins, afin d'éviter tout risque de basculement et de projection vis-à-vis de ces ouvrages sensibles. Le linéaire de paroi moulée situé à 5 m du faisceau ferroviaire, réalisé sous ITC (Interruption Temporaire

9- Manutention d'une cage d'armature "mixte".
10- Maquette BIM des soutènements.

9- Handling a composite reinforcing cage.
10- BIM model of retaining structures.



MAQUETTE BIM DES SOUTÈNEMENTS



11

© GROUPEMENT IP13

de Courant), a fait l'objet d'une étude spécifique de calepinage et d'ordonnement concernant l'excavation des panneaux, afin de se conformer aux critères imposés par les référentiels SNCF. Les travaux de fondations ont débuté en juin 2019 avec la réalisation des premiers pieux de structure et se

11- Vue globale des ateliers de forage.

11- Overall view of drilling rigs.

sont terminés en octobre 2019 avec la mise en tension des derniers tirants du second lit. Entre temps, et au plus fort de l'activité, ce ne sont pas moins de 220 m² de paroi moulée et 260 m de pieux qui étaient forés et bétonnés

chaque jour. Organisées en simple poste pour limiter les nuisances en milieu urbain, 45 personnes de Nge Fondations ont œuvré pendant 5 mois pour réaliser dans les délais les fondations et soutènements. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

LINÉAIRE DE PAROI MOULÉE : 520 m
LINÉAIRE DE PIEUX : 9200 m
SURFACE DE PAROI MOULÉE : 8 400 m²
BÉTON THÉORIQUE : 10 500 m³
ARMATURES : 400 t
TIRANTS : 1 100 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Syctom
ASSISTANCE MAÎTRISE D'OUVRAGE : Wsp
GÉOTECHNICIEN PHASE G2 : Fugro
GÉOTECHNICIEN PHASE G4 : Wsp
BUREAU DE CONTRÔLE : Veritas
GROUPEMENT MANDATAIRE : Groupement IP13
(Eiffage Génie Civil - Chantiers Modernes)
ENTREPRISE DE FONDATIONS : Nge Fondations

ABSTRACT

IVRY/PARIS XIII "SYCTOM" (REFUSE TREATMENT BOARD): SPECIAL FOUNDATIONS FOR AN OPERATIONAL INDUSTRIAL FACILITY

SÉBASTIEN ALLOITEAU, NGE FONDATIONS - THOMAS IMBERT, NGE FONDATIONS - THOMAS SUTRE, NGE FONDATIONS

More than six months of design engineering and five months of works were needed for the Nge Fondations teams to complete the first "UVE" (energy recovery unit) of the Ivry/Paris XIII "SYCTOM" refuse treatment board project. This is a multi-technique project with major co-activity by the various entities involved, in both the design engineering phase and the works phase. All the stakeholders in the project worked together with a concern for efficiency, in accordance with a tight schedule and on a site remaining in operation. Nge Fondations, tasked with execution of the retaining structures and foundations for the future industrial facility, signs here a fine project highlighting its multi-trade expertise. □

SYCTOM DE IVRY/PARIS XIII: CIMIENTOS ESPECIALES DE UNA PLANTA INDUSTRIAL EN ACTIVIDAD

SÉBASTIEN ALLOITEAU, NGE FONDATIONS - THOMAS IMBERT, NGE FONDATIONS - THOMAS SUTRE, NGE FONDATIONS

Los equipos de Nge Fondations han necesitado más de 6 meses de estudio y 5 meses de obras para realizar el primer tramo de la UVE (Unidad de Valorización Energética) del proyecto del Syctom de Ivry/Paris XIII. Se trata de un proyecto multitécnico con una fuerte coactividad entre los distintos intervinientes, tanto en la fase de estudio como en la de realización. El conjunto de actores implicados en el proyecto han colaborado para maximizar la eficacia y respetar una planificación ajustada, en una planta mantenida en actividad. Nge Fondations, responsable de la ejecución de los sostenimientos y los cimientos de la futura planta industrial, puede presumir de una excelente realización que pone de manifiesto la polivalencia de sus competencias. □

PN ARSCOP - UN PROJET NATIONAL POUR LE DÉVELOPPEMENT DU PRESSIOMÈTRE

AUTEURS : SÉBASTIEN BURLON, DIRECTEUR TECHNIQUE DU PROJET NATIONAL ARSCOP, DIRECTEUR D'ÉTUDES, TERRASOL-SETEC - PHILIPPE REIFFSTECK, DIRECTEUR TECHNIQUE DU PROJET NATIONAL ARSCOP, DIRECTEUR DE RECHERCHE, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL - ROGER FRANK, PRÉSIDENT DU PROJET NATIONAL ARSCOP, DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE, ÉCOLE DES PONTS

LE PRESSIOMÈTRE CONSTITUE L'OUTIL DE BASE DE LA RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE ET DU CALCUL DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES EN FRANCE. LE PROJET NATIONAL PN ARSCOP RÉPOND À UN TRIPLE OBJECTIF : PÉRENNISER LA PRATIQUE DE L'INGÉNIERIE ACTUELLE DU PRESSIOMÈTRE EN PROCÉDANT À UN ÉTAT DES LIEUX APRÈS 60 ANS D'UTILISATION, POURSUIVRE LE DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL QU'EST LE PRESSIOMÈTRE ET DES MÉTHODES DE CALCUL ASSOCIÉES. L'OBJECTIF EST D'ENCORE MIEUX RÉPONDRE AUX ENJEUX DE CONCEPTION ACTUELS, NOTAMMENT EN LIEN AVEC LA PRÉVISION DES DÉPLACEMENTS DES CONSTRUCTIONS ET ENFIN DE DIFFUSER TOUT CE SAVOIR-FAIRE À L'INTERNATIONAL.



© JEAN LUTZ SA



© GEOMATECH

GENÈSE DU PROJET NATIONAL ARSCOP

L'ingénierie française du génie civil est dépositaire d'un savoir-faire précieux. Ainsi, au cours des quarante dernières années, elle a accumulé de nombreux succès techniques et s'est exportée dans le monde entier. Les grands ponts (Pont de Normandie, Viaduc de Millau, Pont Vasco de Gama, Pont

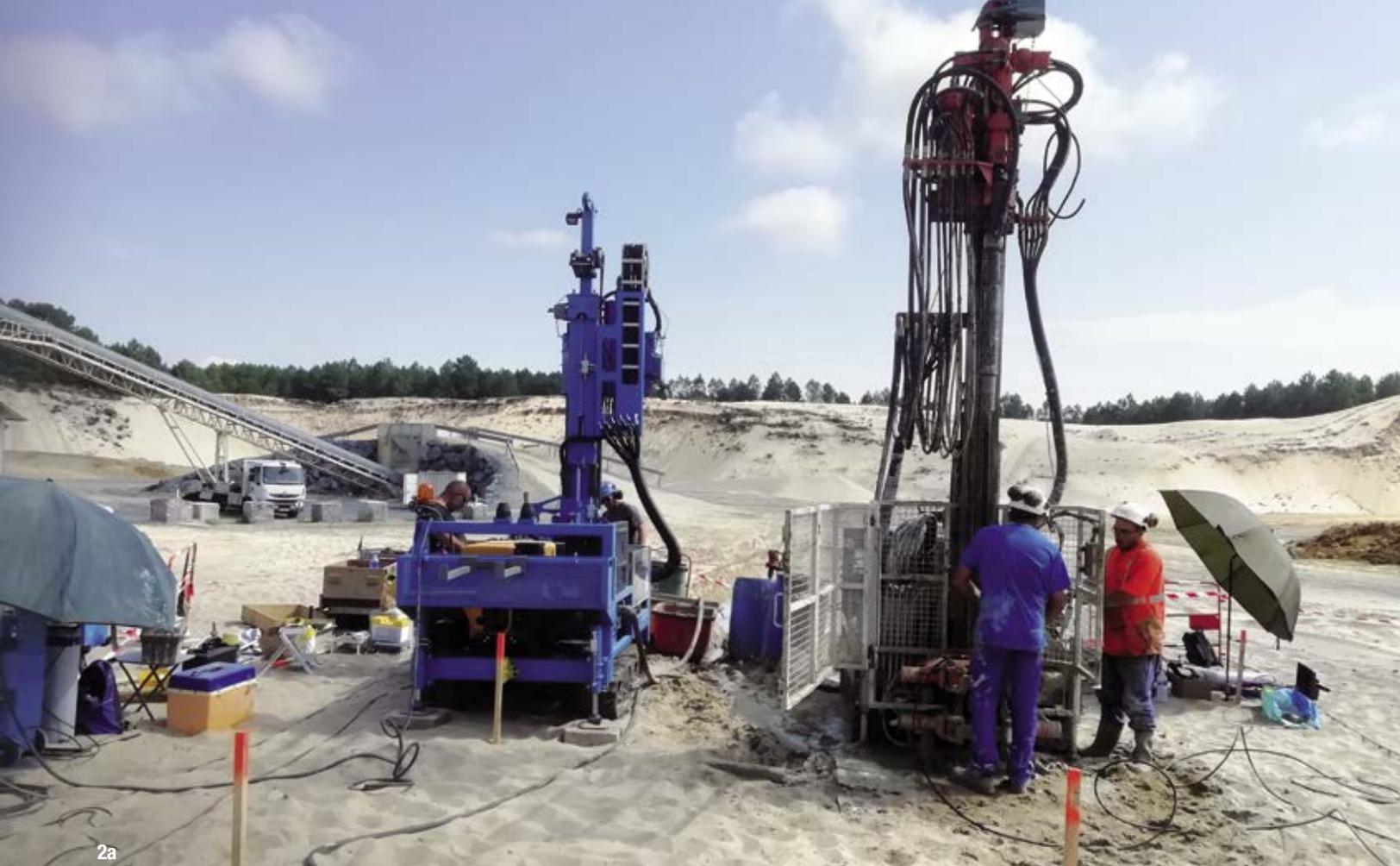
de Rion-Antirion, etc.), les grandes tours (Khalifa, Petronas, Tours de La Défense), les aménagements en mer (Dubai, Monaco), les grandes installations industrielles (barrages et centrales nucléaires) ainsi que les infrastructures linéaires (autoroutes, lignes ferroviaires à grande vitesse, tramways) et souterraines (Jubilee line, métro parisien) en sont des exemples remarquables.

Ces réussites n'auraient pu se faire sans une ingénierie géotechnique capable de dimensionner les ouvrages dans leur environnement complexe et de maîtriser les risques induits par leur construction.

Cette maîtrise dans le dimensionnement des ouvrages géotechniques s'appuie pour une large part sur le pressiomètre qui est devenu, en France

et dans d'autres pays, près de 60 ans après son invention par Louis Ménard, un outil incontournable de l'ingénierie géotechnique.

La capacité du pressiomètre à alimenter de manière fiable les méthodes de calcul pour concevoir les ouvrages souterrains, les soutènements et les fondations des ouvrages d'art et des bâtiments, pour suivre leur construction



2a

© JEAN LUTZ SA

1a & 1b- Vue de la chambre d'étalonnage de Jean Lutz SA pour valider le dispositif de mesure de pression interstitielle et du montage expérimental mis en œuvre par Géomatech pour tester le canon géotechnique.

2a & 2b- Essais croisés sur les sites de Messanges (a) et du métro de Toulouse (b) impliquant les partenaires Eurogé, Fondasol, Ginger, Apagéo, Jean Lutz SA.

1a & 1b- View of the calibration chamber of Jean Lutz SA to validate the pore pressure measuring device and the experimental test rig used by Géomatech to test the geotechnical test barrel.

2a & 2b- Combined tests on the sites of Messanges (a) and the Toulouse metro (b) involving the partners Eurogé, Fondasol, Ginger, Apagéo and Jean Lutz SA.



© GINGER

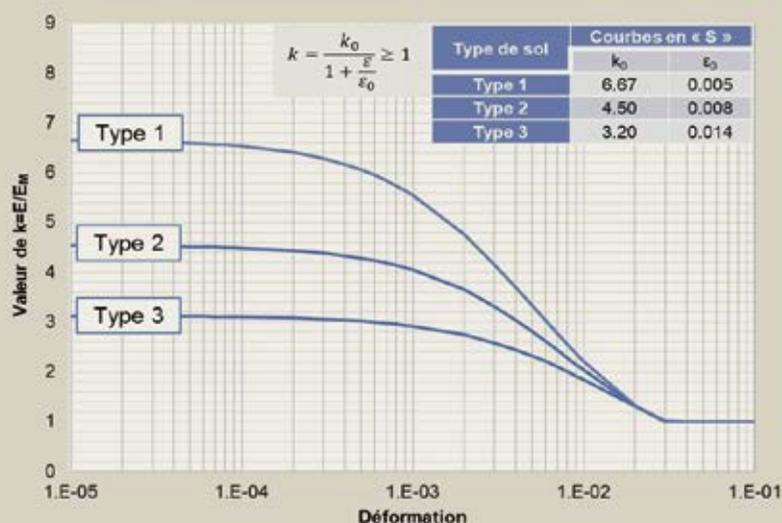
2b

et pour analyser en service leur comportement, a permis à l'ingénierie de minimiser les risques pour les maîtres d'ouvrages et les maîtres d'œuvre.

Les ouvrages cités précédemment ont pu être réalisés car l'essai pressiométrique présente plusieurs avantages par rapports aux autres essais in situ et aux essais de laboratoire :

- C'est un essai in situ, qui permet de mesurer le comportement du sol dans son état de contrainte naturelle, sans remaniement ni changement de contrainte important comme c'est le cas du prélèvement par carottage nécessaire aux essais de laboratoire ;
- C'est un essai qui permet de mesurer le comportement mécanique du sol depuis les petites déformations jusqu'à la rupture ;
- C'est un essai qui implique un volume de plusieurs dm³ et intègre ainsi un volume de sol beaucoup plus important que les échantillons de laboratoire souvent limités à 0,5 dm³ ;
- C'est un essai qui est moins sensible à la granulométrie du sol que les essais de laboratoire ou le pénétromètre. Avec l'essai pressiométrique, on peut réaliser des essais représentatifs dans des sols grossiers ;
- C'est un essai qui concerne un volume de sol important, et permet d'intégrer l'ensemble du comportement du sol à un niveau altimétrique choisi, contrairement aux essais de laboratoire qui sont de dimension finie ;

VALEURS DES MODULES DE DÉFORMATION À UTILISER POUR LE CALCUL DU TASSEMENT DES SEMELLES ET DES RADIERS



Type de sol	Type
Sables et graves Roche très fracturée	1
Sables, graves serrés Limens	2
Argiles, argiles surconsolidées Roche peu fracturée	3

(Projet national ARSCOP, 2018)

3

© PROJET NATIONAL ARSCOP

→ C'est un essai qui permet d'identifier les couches de sol, de localiser leurs interfaces.

Cet outil possède donc des potentialités remarquables : il permet au cours d'un seul essai d'apprécier à la fois les propriétés de déformation et de rupture des sols et des roches tendres à travers la mesure d'un module dit pressiométrique, d'une pression de fluage et d'une pression limite. Dans des versions plus évoluées comme le pressiomètre auto-foréur, il permet aussi d'accéder à la mesure de l'état initial des contraintes dans le terrain et donc du coefficient de pression des terres au repos. Les travaux menés en France, notamment au sein des Laboratoires des Ponts et Chaussées puis au travers de précédents Projets Nationaux, ont permis d'utiliser les résultats de l'essai pressiométrique comme des données de conception des ouvrages géotechniques, pour les écrans de soutènement, les fondations superficielles ou profondes ou les renforcements de sol. Depuis son invention, le pressiomètre apparaît donc comme un outil de reconnaissance des sols, d'une part, et de conception des ouvrages géotechniques, d'autre part. Un certain nombre de réflexions a été mené à l'occasion de la présentation des états de l'art nationaux et internationaux des congrès sur le pressiomètre de 2005 et 2013 et lors des réunions des groupes de travail sur la norme européenne relative au pressiomètre et sur les normes de dimensionnement des fondations profondes et des fondations superficielles. Notamment,

un certain nombre de possibilités sont apparues pour son évolution future : adaptations du mode opératoire aux besoins, amélioration du matériel, de l'interprétation et de l'analyse des données déduites de l'essai, etc. Pour la construction d'ouvrages présentant des enjeux majeurs comme les grandes fouilles et les tunnels du Grand Paris, les remblais et les ouvrages d'art des LGV ou les grands centres de production d'électricité, les limitations actuelles constituent un frein à l'utilisation du pressiomètre et à une gestion plus appropriée des risques.

Sur la base de ce constat, le Projet National dédié au pressiomètre a été mis en place : ARSCOP pour nouvelles Approches de Reconnaissances des Sols et de Calcul des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre. Labelisé Projet National par le ministère, il est administré et géré par l'IREX (Institut pour la Recherche Appliquée et l'Expérimentation en Génie Civil). Ce projet de recherche collective s'articule autour de trois axes : l'axe 1 est dédié au développement des procédures et du matériel d'essai, l'axe 2 à la synthèse des méthodes de calcul actuelles et à la proposition de nouvelles approches permettant notamment une meilleure estimation des déplacements des constructions et l'axe 3 à la diffusion des connaissances acquises dans le cadre de recommandations.

AXE 1

L'axe 1 a pour objectif le développement de matériels et de méthodes

3- Valeurs des modules de déformation à utiliser pour le calcul du tassement des semelles et des radiers.

3- Modulus of deformation values to be used for calculating the compression of foundation slabs and rafts.

d'essais permettant, d'une part d'accroître la fiabilité de l'essai et, d'autre part, de mesurer des propriétés du terrain que le matériel actuel ne peut pas permettre. Cet axe a démarré par un retour d'expériences réalisé auprès de la profession pour mieux cerner les écarts entre les prescriptions des normes d'essais en vigueur et les besoins actuels. Des échanges, entre les fabricants de matériels (Lutz, Apageo, Geomatech, Calyf), les entreprises (Fondasol, Geotec, Ginger Cebtp, Hydrogéotechnique et d'autres encore) ou encore Ifsttar et le Cerema, ont permis de préciser les contraintes des matériels actuels et de travailler à la conception de nouvelles sondes et contrôleurs pression-volume (sonde monochambre avec enveloppe kevlar, sonde haute pression, système de pilotage automatisés, etc.) (figure 1), de nouveaux modes opératoires et de nouvelles méthodes d'interprétation. Des techniques indirectes de mesure

de la déformation radiale (dans le cadre d'une thèse Cifre au sein de l'entreprise Fugro) et des dispositifs de mesure de la pression interstitielle au cours de l'expansion d'une sonde pressiométrique (dans le cadre d'une thèse Cifre au sein de l'entreprise Jean Lutz SA) ont fait l'objet d'un développement industriel. Ces développements ont bénéficié des nouveaux matériaux comme le kevlar ou de la miniaturisation de l'électronique et des nouvelles générations de capteurs de pression pour résoudre les difficultés inhérentes à un essai dans un forage. Ces avancées ont permis de dépasser les difficultés qu'avaient rencontrées les développements antérieurs. Ces nouvelles techniques ont été testées en laboratoire en chambre d'étalonnage puis sur le terrain lors des essais croisés entrepris dans le cadre du projet, mais aussi lors de projets industriels en conditions tout à fait réelles (figures 1 et 2). Ces travaux ont abouti à la proposition de protocoles d'essais dédiés à la conception de pieux sous charges latérales.

Le développement d'un appareillage capable d'appliquer des sollicitations cycliques et de modes opératoires adaptés pour permettre l'étude du chargement latéral cyclique des fondations et de la liquéfaction des sols a été aussi un développement majeur de cet axe. Les matériels et les données collectées ont permis de construire une base de données nécessaire pour valider un cadre de construction des courbes liant la contrainte de cisaillement cyclique normalisée au nombre

de cycles à la liquéfaction à l'instar des essais de laboratoire et élaborer des abaques de liquéfaction comparables à ceux disponibles pour le pénétromètre statique (CPT) et l'essai de pénétration au carottier (SPT). Par ailleurs, les résultats obtenus ont permis le développement d'outils de calcul (axe 2) pour la détermination de paramètres en petites déformations et l'étude des chargements cycliques : loi de comportement pour la mécanique des milieux continus, courbe de transfert t-z et p-y pour le calcul des pieux sous charge axiale et transversale, etc.

Des recherches théoriques et numériques ont été réalisées pour faciliter l'interprétation de l'essai dans les différentes natures de sol et cerner les facteurs d'influence comme la mauvaise saturation. Une étude des phénomènes déterminant la génération de pression interstitielle et leur dissipation en fonction du type de sol a été entreprise pour proposer des méthodes d'estimation de la perméabilité. Certaines études ont été consacrées à l'analyse des facteurs

d'erreurs de l'essai tels que les pertes de charges ou les effets des membranes. Cet axe a également permis le développement d'une sonde totalement innovante capable de générer des ondes à sa base et de suivre leur propagation dans le sol environnant grâce à des géophones. Cette sonde a pu être validée dans un massif de sol en étudiant différentes configurations de position de la source afin d'optimiser la qualité du signal et la rapidité de réalisation de la mesure (figure 1).

4- Variation du module de déformation du terrain sous le bâtiment réacteur d'une centrale nucléaire.

4- Variation in the ground modulus of deformation under the reactor building of a nuclear power station.

Ces matériels et les données collectées ont fourni une base de données utilisée dans les tâches de l'axe 2.

Une campagne d'essais croisés sur différents sites de référence très bien connus afin de comparer les pratiques et valider les différents développements et résultats obtenus lors du projet par des techniques de mesure in situ ou en laboratoire validées.

AXE 2

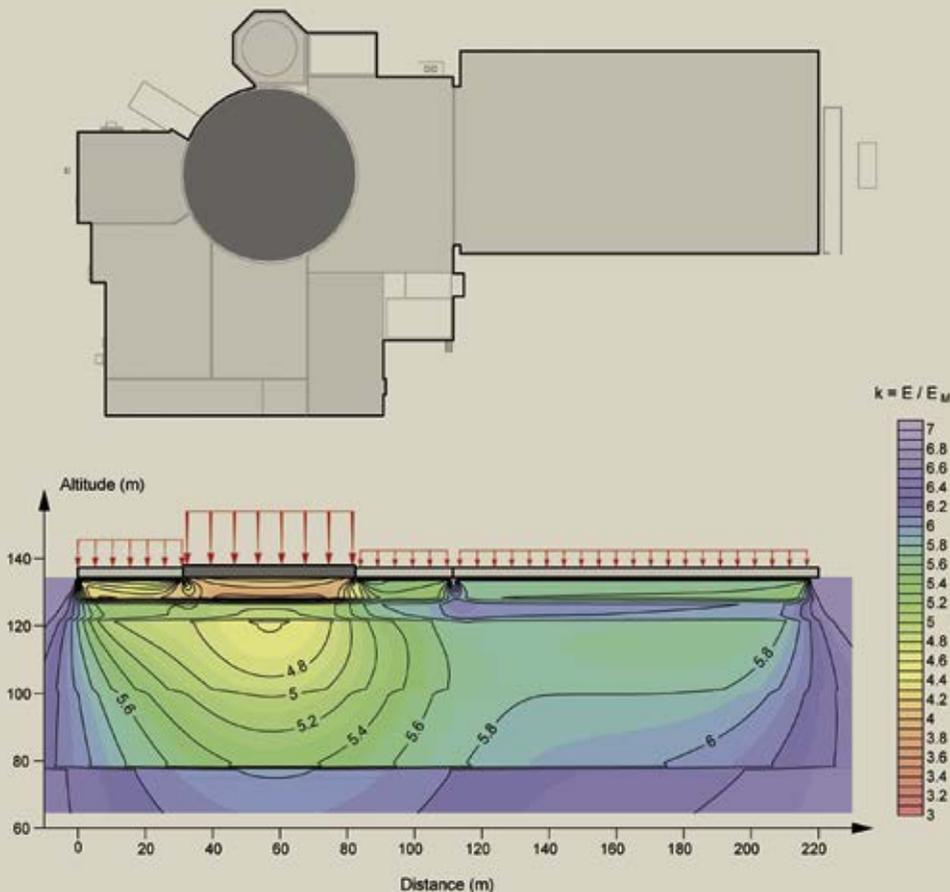
L'axe 2 dédié à la synthèse des méthodes de calcul actuelles et à la proposition de nouvelles approches permettant une meilleure estimation des déplacements des constructions comprend trois contributions majeures. La première contribution est dans la lignée des travaux réalisés durant la rédaction de la norme NF P 94-262, relative au dimensionnement des fondations profondes en France selon l'Eurocode 7. Elle permet d'aboutir à la proposition de nouvelles règles pour l'estimation de la raideur axiale des

micropieux. Cette contribution complète ainsi les règles de portance qui avaient été complètement révisées en 2012 et reprend l'analyse plus détaillée de la méthode de calcul pour l'estimation de la raideur axiale des pieux. Ce travail a en outre permis de fusionner les bases d'essais de chargement de micropieux de l'Ifsttar et de la SNCF. Toujours dans le domaine des fondations profondes, la prise en compte des charges transversales a aussi été étudiée en proposant de nouvelles règles d'interaction entre le pieu et le terrain. Ces règles, pour partie, dérivent de travaux plus anciens basés sur l'utilisation d'un pressiomètre autoforeur.

La seconde contribution est relative au calcul des radiers et des semelles (figure 3). Elle assure une approche unifiée du calcul de ces deux types d'ouvrages fondés superficiellement. L'approche développée, tout en rendant compte du comportement non linéaire des terrains, se veut simple et facile à mettre en œuvre. Son utilisation peut être étendue à des calculs complexes mettant en œuvre des méthodes hybrides (association de solutions numériques et de solutions analytiques permettant un gain avéré en temps de calcul) ou des méthodes numériques comme la méthode des éléments finis. Cette approche, mise en œuvre dans le logiciel Foxta développé par Terrasol, a été validée sur des ouvrages de taille très variable : des semelles ayant fait l'objet d'essais de chargement par le Lcpc dans les années 80 aux radiers des tours de La Défense ou d'ouvrages nucléaires (figure 4). Pour les semelles, l'approche proposée permet de mettre à jour les formules historiques développées par Ménard lors de la mise au point du pressiomètre il y a un peu plus de 60 ans. Dans tous les cas, l'objectif est de proposer une approche plus fiable et plus robuste de l'estimation des tassements pour concevoir des ouvrages plus économiques.

La troisième contribution est relative au calcul des pieux sous chargements cycliques. À la suite d'un précédent Projet National SOLCYP, il s'est agi de proposer, sur la base du matériel d'essais dans l'axe 1 d'ARSCOP, des procédures d'essais et d'interprétation de l'essai pressiométrique permettant de fournir des modules de déformation dans les gammes des faibles déformations de l'ordre de 10^{-4} (figure 5). Les modules ainsi obtenus permettent de mieux appréhender les raideurs des terrains mises en jeu lors de chargements cycliques.

VARIATION DU MODULE DE DÉFORMATION DU TERRAIN SOUS LE BÂTIMENT RÉACTEUR D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE



La démarche développée permet aussi d'alimenter les méthodes de calcul de tassement des radiers et des semelles en fournissant un module spécifique à chaque niveau de déformation.

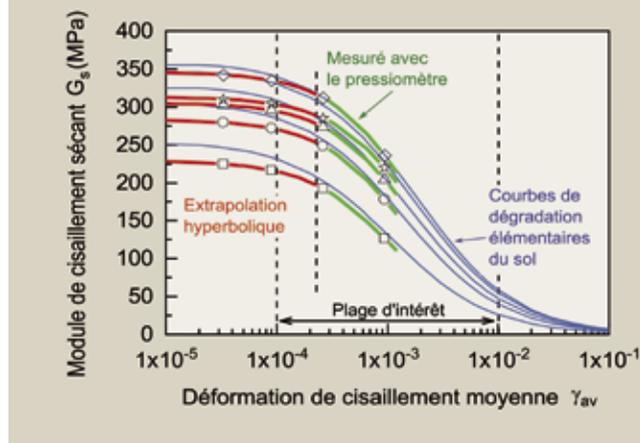
Enfin, des travaux ont aussi été réalisés dans le cadre des excavations du Grand Paris. Il apparaît que le module pressiométrique permet de bien estimer les déformées des écrans, mais que les cuvettes de tassements résultent de mécanismes liés à la contractance et la dilatace des terrains qui ne peuvent pas être pris en compte par le pressiomètre. Pour ces ouvrages, à défaut de résultats positifs sur l'utilisation du pressiomètre, c'est le domaine d'application de l'outil qui est désormais bien précisé, ce qui est malgré tout un résultat en soi. La mesure de la pression interstitielle ouvre de nouvelles perspectives pour ces applications.

D'autres développements plus fondamentaux sont aussi proposés pour interpréter plus en détail les résultats de l'essai pressiométrique et dériver des propriétés fondamentales du terrain, comme son angle de frottement ou son module de déformation, en fonction de différentes conditions de drainage autour de la sonde.

AXE 3

Traditionnellement, tous les Projets Nationaux comprennent un axe dédié à la valorisation des travaux réalisés. Dans le cas du PN ARSCOP, cette valorisation passe par la publication de recommandations qui sont en cours de rédaction. Ces recommandations, rédigées en français et en anglais, constitueront un document de référence pour la réalisation des essais pressiométriques et l'uti-

EXEMPLE DE COURBE DE DÉGRADATION DU MODULE DE CISAILLEMENT G ALIMENTÉE PAR DES MESURES PRESSIOMÉTRIQUES



5

© A.LOPES, D'APRÈS LA THÈSE DE A.LOPES, UNIVERSITÉ. PARIS EST, 2020

lisation de méthodes de calcul basées sur des données pressiométriques.

Rédigées en anglais, elles ont pour vocation à faire reconnaître à une grande échelle les avantages du pressiomètre dans certaines conditions et à faciliter l'exportation des entreprises françaises qui devraient disposer, avec ces recommandations, d'une base leur permettant d'expliquer plus aisément certaines options de conception.

Ces recommandations constituent un document de synthèse de la pratique existante en ce qui concerne le pressiomètre : elles répondent à un manque assez paradoxal puisqu'il n'existe pas de livres traitant de manière commune de l'utilisation du pressiomètre comme outil de reconnaissance des terrains et comme outil pour un ensemble de

5- Exemple de courbe de dégradation du module de cisaillement G alimentée par des mesures pressiométriques.

5- Example of the curve of degradation of shear modulus G based on pressure measurements.

méthodes de calcul. Elles constituent un document de diffusion des travaux les plus originaux réalisés dans le cadre du projet ARSCOP, notamment le développement d'une nouvelle sonde pres-

siométrique monochambre, la mesure de la pression interstitielle lors d'un chargement cyclique ou la proposition d'une nouvelle approche de calcul traitant de manière unifiée des fondations superficielles et les radiers.

En parallèle, un certain nombre de manifestations est organisé dans des congrès nationaux et internationaux pour communiquer les principaux résultats de recherche obtenus : par exemple, durant les Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur ou durant les congrès internationaux dédiés aux essais en place, organisés tous les 4 ans sous l'égide de la Société Internationale de Mécanique des Sols et de géotechnique. Un congrès dédié au pressiomètre sera probablement organisé sous 2 ans.

PERSPECTIVES

Rassemblant à la fois de grands maîtres d'ouvrage et des entreprises ainsi que des bureaux d'études géotechniques de plus petite taille (qui constituent néanmoins le cœur de l'utilisation du pressiomètre) et les partenaires du monde de la recherche, le Projet PN ARSCOP doit permettre de contribuer à développer, harmoniser et unifier les pratiques liées à l'utilisation du pressiomètre pour tous les ouvrages géotechniques : les semelles de petite construction, les radiers de tours de grande hauteur, les pieux quels qu'ils soient, les soutènements, etc. Le projet PN ARSCOP garantit ainsi la pérennité et l'actualisation des connaissances relatives au pressiomètre. À travers ses recommandations en cours de rédaction, il contribuera à exporter le savoir-faire géotechnique français dans le monde. □

ABSTRACT

PN ARSCOP - A NATIONAL PROJECT FOR DEVELOPMENT OF THE PRESSURE METER

SÉBASTIEN BURLON, TERRASOL-SETEC - PHILIPPE REIFFSTECK, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL - ROGER FRANK, ÉCOLE DES PONTS

In France, construction design is based mostly on use of the pressure meter as a ground reconnaissance tool, and on a set of design methods based on the pressure-meter test results. This integrated approach from reconnaissance to the design stage is fairly unique in the world, and justified the National Project PN ARSCOP ("new approaches to soil reconnaissance and design of geotechnical structures with the pressure meter"). This collective research project is organised around three main lines: first, the development of test procedures and equipment; second, a review of current design methods and the proposal of new approaches permitting, in particular, improved estimation of building displacements; and third, the dissemination of existing and acquired knowledge, via recommendations. □

PN ARSCOP: UN PROYECTO NACIONAL PARA EL DESARROLLO DEL PRESIÓMETRO

SÉBASTIEN BURLON, TERRASOL-SETEC - PHILIPPE REIFFSTECK, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL - ROGER FRANK, ÉCOLE DES PONTS

En Francia, el diseño de las construcciones se basa mayoritariamente en el uso del presiómetro como herramienta de reconocimiento de los terrenos, así como en un conjunto de métodos de cálculo basados en los resultados del ensayo presiométrico. Este proceso integrado, que abarca desde los reconocimientos hasta el cálculo, es bastante único en el mundo y ha justificado el proyecto nacional PN ARSCOP (nuevos enfoques de reconocimiento de lo suelos y cálculo de las obras geotécnicas con el presiómetro). Este proyecto de investigación colectiva se articula en torno a tres ejes: el eje 1 está dedicado al desarrollo de los procedimientos y el material de ensayo; el eje 2, a la síntesis de los métodos de cálculo actuales y la propuesta de nuevos enfoques que permitan una mejor estimación de los desplazamientos de las construcciones; y el eje 3, a la difusión, en el marco de recomendaciones, de los conocimientos existentes y adquiridos. □



1
© THIBAUT DE VREESE

PÔLE D'ÉCHANGES MULTIMODAL DE LYON PART-DIEU ET TOUR TO-LYON

AUTEURS : SYLVAIN FORRAY, DIRECTEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - QUENTIN DESJARS, RESPONSABLE ANTENNE DE LYON, SOLETANCHE BACHY FRANCE

DANS LE CADRE DE LA MODERNISATION DU QUARTIER DE LA PART-DIEU À LYON, SOLETANCHE BACHY, APRÈS AVOIR CONTRIBUÉ PENDANT DES ANNÉES À LA CONCEPTION DE L'OUVRAGE, EST DésORMAIS EN CHARGE DE L'EXÉCUTION DES TRAVAUX SPÉCIAUX DU PROJET PARKING PLACE BASSE – TOUR TO-LYON. LE PROJET, COMPLEXE, REQUIERT LE DÉPLOIEMENT D'UN GRAND NOMBRE DE TECHNIQUES DIFFÉRENTES DE FONDATIONS SPÉCIALES AVEC LES SPÉCIFICITÉS GÉOTECHNIQUES ET TECHNIQUES QU'ON PEUT ATTENDRE D'UN PROJET D'UNE TELLE ENVERGURE.

RENOUVEAU DU QUARTIER DE LA PART-DIEU

Quartier d'affaires de Lyon créé dans les années 70, La Part-Dieu connaît depuis quelques années un renouveau urbain.

Depuis la disparition de la caserne dans les années 60 et la construction des bâtiments qui donnent l'aspect connu aujourd'hui, le quartier s'est bien développé et il est devenu le deuxième centre de Lyon, en parallèle du centre historique. Ces dernières années, l'urbanisme d'origine a montré ses limites et exige une cure

1- Vue d'ensemble du chantier montrant plusieurs ateliers.

1- General view of the project showing several rigs.

de jouvence et de modernisation : agrandissement de la gare (victime de son succès et saturée), piétonisation, nouveaux projets de développement... Une forte activité de construction a

ainsi été nécessaire. Soletanche Bachy a pris part à plusieurs de ces chantiers (figure 2) :

- Agrandissement du centre commercial (pieux de fondations) ;
- Allongement du tunnel Vivier-Merle (paroi moulée et injections) ;
- Création de la voie L (parois lutéliennes tirantées, pieux d'ouvrage d'art...).

L'objet de cet article est le projet phare de ce nouveau départ : le pôle d'échanges multimodal Lyon Part-Dieu et la tour To-Lyon. Cet immeuble de grande hauteur comportera 46 étages.

Il deviendra ainsi la seconde plus haute tour de la ville. To-Lyon est porté par Vinci Immobilier. Il en est de même pour le nouveau parking souterrain place Béraudier dont une partie sera ensuite cédée à Lyon Parc Auto et à la SPL Lyon Part-Dieu. Le projet est au carrefour de plusieurs marchés d'infrastructure, comportant des interfaces avec tous ces projets connexes.

Parallèlement, la SNCF renforce ses infrastructures, avec la création d'une nouvelle voie, de nouveaux accès directs aux quais, et d'un nouveau hall de gare (figures 2 et 3). ▶

La SPL (Société Publique Locale) de Lyon Part-Dieu est en charge de coordonner les projets et de porter les marchés d'infrastructures communs (par exemple, l'allongement du tunnel Vivier-Merle réalisé en 2018-2019). Plus spécifiquement, sur le projet Parking Place Basse (Béraudier) et tour To-Lyon :

- Egis et Setec, notamment avec Terrasol, assurent une mission de maîtrise d'œuvre (conception, validation des études du groupement) ;
- Les travaux sont réalisés par un groupement Vinci Construction France (avec Citinea et Vinci Construction France Travaux Publics Lyon), Soletanche Bachy France, Soletanche Bachy Fondations Spéciales, et Vinci Energies pour la tour (Lefort Francheteau pour les réseaux humides, et Cegelec pour l'électricité CFO CFA).

UN MONTAGE OPÉRATIONNEL COMPLEXE

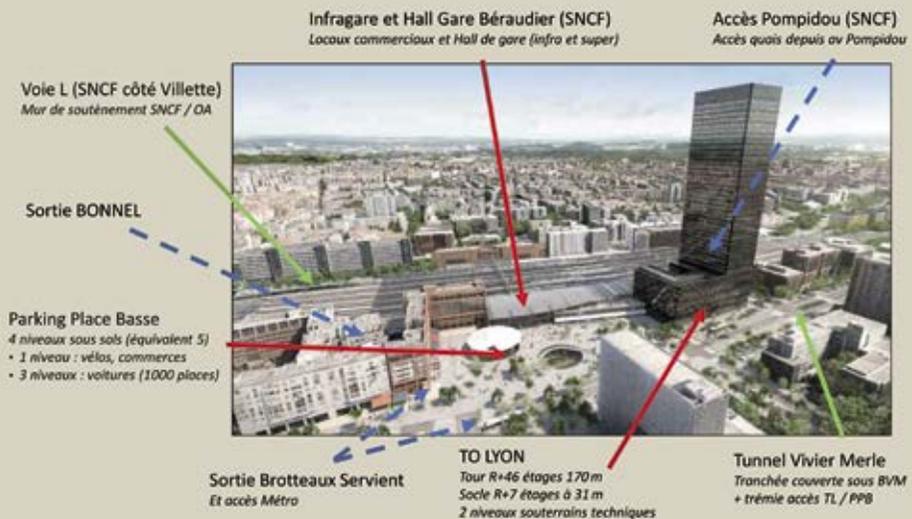
Sur la même parcelle se déroulent donc plusieurs marchés, pour le compte de plusieurs maîtres d'ouvrage et de multiples preneurs : SNCF, hôtel, petits commerces, parking souterrain, connexion au métro, concessionnaires réseaux. Certaines portions d'ouvrage, structurellement liées à un projet, seront ensuite rétrocédées au projet voisin pour rendre cohérents les volumes en termes de fonctionnalité. Aussi le montage est-il assez complexe, avec plusieurs maîtrises d'œuvre, des coordinations serrées entre les différents marchés et des mises à disposition, anticipées ou temporaires, d'espaces et d'ouvrages entre les différents projets.

Cette imbrication des marchés pour plusieurs maîtres d'ouvrage se traduit par des enchaînements de tâches serrés, marqués par des constats de mise à disposition de zones et d'ouvrages à intervalles réguliers, ainsi que par des interfaces techniques à redéfinir régulièrement, en fonction des avancements de chacun des projets.

L'HISTORIQUE

La conception du projet a démarré au début des années 2010, avec déjà Vinci Immobilier, Vinci Construction France et Soletanche Bachy. Dès l'origine, une démarche de partenariat a été établie entre les entités. Cela s'est traduit par un grand nombre de scénarios étudiés (nombre de niveaux variables dans les parkings, deux tours ou une seule, cas d'une gare Part-Dieu souterraine).

VUE DU QUARTIER AVEC LES DIFFÉRENTS PROJETS

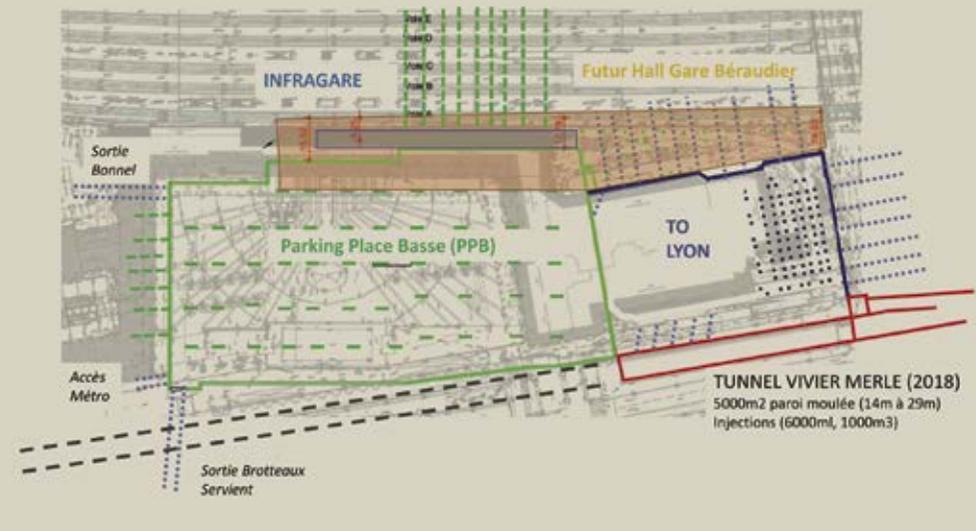


2

© CHANTIER

VUE EN PLAN DU CHANTIER

avec les différents éléments du programme



3

© CHANTIER

Le contrat a été signé à l'été 2019, avec un démarrage immédiat des études et des essais géotechniques.

DESCRIPTIF DES FONDATIONS

- Différentes techniques de travaux spéciaux sont déployées sur le projet :
- Paroi moulée : 18 000 m² à la benne hydraulique KS, à une profondeur de 25 m à 30 m ;
 - Barrettes : 67 unités à 35 m de profondeur ;
 - Micropieux : 1 000 unités à 35 m de profondeur ;
 - Tirants : 75 unités entre 33 et 15 m de profondeur ;
 - Forages et injections : 130 forages pour injection bentonite/ciment et microciment ;

2- Vue du quartier avec les différents projets.

3- Vue en plan du chantier avec les différents éléments du programme.

2- View of the district with the various projects.

3- Plan view of the project with the various programme components.

→ Pieux de fondation : 106 pieux en diamètre 1 220 mm, 31 en diamètre 820 mm.

Le choix a été retenu de réaliser l'infrastructure du parking en taube avec poutres et planchers coulés à la descente du terrassement. La paroi moulée n'est donc pas appuyée provisoirement par des tirants, ou des butons - bracons (hors certaines zones ponctuelles), mais bien par la structure en génie civil définitive de l'ouvrage.

Côté tour, la paroi moulée est autostable sur deux faces, et tirantée (figure 4) sur deux faces (limitation des déplacements côté voies SNCF).

Les travaux sont menés en 2 postes de travail avec 1 à 2 ateliers pour chaque technique.



© CÉDRIC HELSLY
4

UN RYTHME SOUTENU

Le phasage spécifique du chantier tourne autour des objectifs suivants :

- Maintenir en permanence le flux piéton qui accède à la gare Lyon Part-Dieu ;
- Démolir les bâtiments et ouvrages existants, avec pour contrainte la présence d'amiante dans les bâtiments et la proximité immédiate des voies SNCF (ITC, techniques spécifiques, limitation des engins et des possibilités de levage) ;
- Démarrer les fondations dès lors que la démolition est suffisamment engagée ;
- Basculer au plus vite la circulation des usagers sur une passerelle et un hall d'accueil provisoires, construits de manière anticipée ;
- Libérer le foncier Nord, afin de terminer les démolitions, puis l'enceinte étanche du parking ;
- Respecter le calendrier des mises à disposition anticipées de zones et ouvrages, afin que chaque projet qui se connecte au parking souterrain puisse avancer et livrer pour assurer une fonctionnalité totale lors de la réception des ouvrages.

Une coactivité forte est liée à ce phasage. Ceci exige des réunions très fréquentes avec les différents intervenants du chantier.

La Covid-19 (confinement de mars) a mis un coup d'arrêt au chantier. Toutefois, ce projet a été parmi les premiers à reprendre, avec mise en place de protocoles spécifiques, avant même la fin du premier confinement, en vue de réduire l'impact de la pandémie sur le projet du maître d'ouvrage.

4- Forage des tirants.

5- Centrale à boue du chantier en cours de montage.

4- Tie anchor drilling.

5- Slurry mixing plant for the project under-going assembly.

GÉOTECHNIQUE

Les terrains du projet sont caractéristiques de la rive Est du Rhône à Lyon, que l'on retrouve sur les quartiers de La Part-Dieu et de Gerland.

À quelques mètres de profondeur, les alluvions sablo-graveleuses du Rhône, relativement compactes et très ouvertes, baignent dans la nappe phréatique du Rhône.



5
© PHOTEC

À une vingtaine de mètres de profondeur la molasse est atteinte, avec ses caprices en partie supérieure - altérée ou non, ses variations de cotes altimétriques, et sa perméabilité relative.

La molasse constitue le terrain d'ancrage pour la paroi moulée (fiche hydraulique), et pour la pointe des pieux de la tour.

L'emprise générale du projet est vaste : certaines zones n'avaient pas pu être l'objet d'investigations en raison de la présence de bâtiments existants.

Il a ainsi été procédé à des sondages de reconnaissance une fois ces bâtiments démolis, en parallèle des travaux dans certaines zones. Ces forages ont mis en évidence la présence d'un dôme de molasse dans une partie de l'emprise, à quelques mètres du fond de fouille. Les études d'exécution ont ainsi déterminé que des drains de décharge de la molasse devaient être localement exécutés.

PHASAGE ET INSTALLATIONS DE CHANTIER

Pour Soletanche Bachy, le projet se décompose en deux grandes phases de travaux, qui correspondent aux emprises disponibles en maintenant par ailleurs les accès piétons à la gare Lyon-Part-Dieu.

La première et plus grosse phase de travaux (70 % de la paroi moulée, 100 % des pieux, 75 % des micropieux) s'achèvera pour Noël 2020.

Il s'agira ensuite de se remobiliser pour la parcelle Nord où passent actuellement les piétons, à l'été 2021.

Avec une libération progressive des emprises par la démolition et la construction d'ouvrages anticipés par le gros œuvre, il s'est révélé complexe de trouver une zone fixe pour la centrale à boue, laquelle devait être accessible jusqu'à la fin de la seconde phase.

C'est finalement à l'extrémité Sud de la parcelle, contre l'avenue Pompidou, qu'a été érigée l'installation sur plusieurs niveaux, capable de desservir deux ateliers de bennes d'excavation hydrauliques (figure 5).

PAROI MOULÉE ET BARRETTES

La paroi moulée (figure 6) et les barrettes sont forées à des profondeurs conséquentes, avec un rythme de 2 à 3 bétonnages par jour. Par ailleurs, les contraintes additionnelles suivantes ont dû être prises en compte :

- Une plate-forme à l'ouest 3 m plus haute, mais de 10 m de large seulement ;
- Une connexion aux parois du tunnel Vivier-Merle dans des pavés au coulis datant de 2018 ;
- Des parois proches des voies SNCF où les panneaux sont limités à 5,5 m de long ;
- Des poteaux préfondés définitifs à poser dans ces mêmes panneaux ;
- 2 coffrages Water Stop sont posés pendant 10 mois en attendant la seconde phase.

Outre la fonction soutènement, l'un des enjeux pour la paroi moulée est de garantir la fiche hydraulique de la paroi dans les molasses, afin de maîtriser les débits de pompage lors des phases de terrassement jusqu'à l'achèvement du radier.

Le suivi qualité de la réalisation de la paroi moulée exige une profondeur d'ancrage minimale de quelques mètres dans la molasse. Sont ainsi pratiqués les contrôles suivants :

- Renseignement sur le rapport de l'opérateur grutier de la cote de rencontre du toit de la molasse ; ▷

→ Prélèvement et conservation d'échantillons à chaque passe de paroi moulée.

MICROPIEUX

Le parking est prévu avec un radier ancré, résistant aux sous-pressions. La plupart des parkings du quartier étaient réalisés auparavant sur le principe suivant : paroi moulée fondée dans la molasse, radier drainant, pompage permanent (nappe de la molasse) et rejet dans la nappe (du Rhône) via des puits de réinjection. Ici, le pompage sera arrêté après réalisation du radier étanche, avec 15 m de charge d'eau : 1 000 micropieux serviront à ancrer l'ouvrage (figure 7).

Ces micropieux sont forés en méthode Hi'Drill. Cette méthode utilise des très hautes fréquences de vibration, très éloignées des fréquences de résonances propres des ouvrages existants, sans risque donc de les endommager. Les forages ont une profondeur moyenne de 36 m. Ensuite, les tubes de forte inertie (114 mm de diamètre, 20 mm d'épaisseur) sont équipés en arase basse à 15 m.

Les 21 km de tubes ont nécessité un laminage spécifique, à commander très rapidement et sans avoir finalisé les études d'exécution.

D'une seule foreuse au démarrage, les moyens se sont renforcés dès la fin des parois moulées, avec trois engins mobilisés en deux postes.

PRÉFONDÉS

Un enjeu du chantier Parking Place Basse est la réalisation anticipée d'ouvrages avant la fermeture de l'enceinte et le rabattement. En effet, la création du hall de gare et de la passerelle sont nécessaires pour finir les démolitions sur l'emprise Nord. Par contre, la dalle de transition qui sépare les travaux en taube des travaux aériens est sous le niveau de la nappe : il était donc nécessaire de trouver des solutions permettant de préfondrer les ouvrages. En conséquence, les fondations prévoyaient différents types de poteaux profonds, adaptés aux efforts à prendre en charge, aux méthodes d'exécution et aux contraintes.

La conception de ces profonds a dû être faite dans un délai assez court. Différents types d'ouvrages ont été retenus :

→ Poteaux métalliques en tubes 139 mm : dans la paroi moulée, pour porter la dalle anticipée et être inclus à terme dans un voile - et en intégrant les futures ouvertures.



6

© CEDRIC HELSLY

→ Poteaux béton de diamètre 600 mm (les seuls profonds définitifs) : ils portent le hall de gare.

→ Rehausse de certaines barrettes jusqu'au TN et rehausse en génie civil : supports de la passerelle et des grues.

→ Doubles profilés métalliques contreventés posés dans les barrettes, pour porter la dalle anticipée : ces profonds seront remplacés par un poteau réalisé entre les deux profilés.

Ces mêmes méthodes ont été appliquées pour fonder 2 grues à tour. L'une d'elle s'appuyant sur la paroi moulée mitoyenne des projets To-Lyon et Parking Place Basse, un appui glissant a été créé, afin que les déplacements de la paroi moulée ne provoquent pas une déformation globale du massif de grue porté sur 2 autres profonds.

PIEUX DE LA TOUR

Le projet initial prévoyait la réalisation de 90 pieux en diamètre 1500 mm.

6- Benne hydraulique KS et panneau en cours d'équipement.

7- Maquette 3D du parking et du hall de gare avec les micropieux.

6- KS hydraulic grab and panel in course of equipment.

7- 3D model of the car park and station hall with micropiles.

bara, une Fundex F5000 capable de forer en tarière creuse jusqu'à 50 m de profondeur (figure 8).

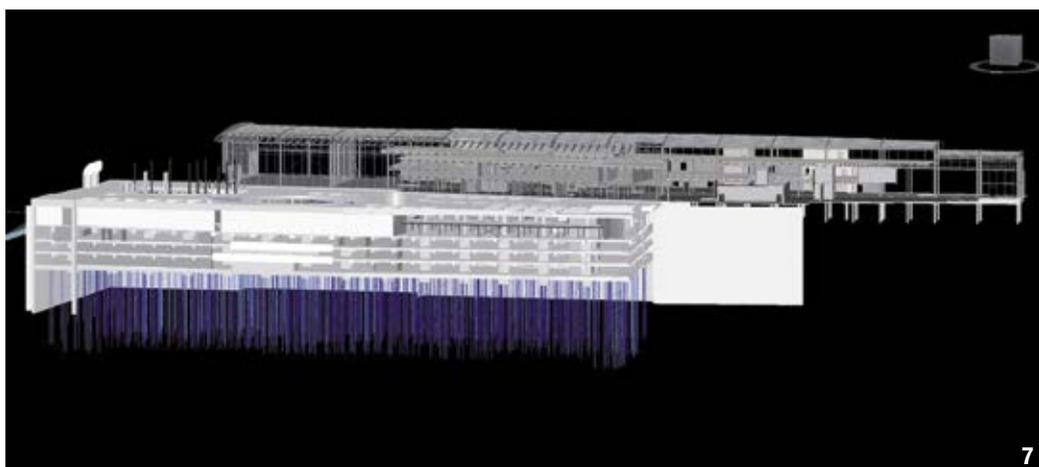
Sur le projet, la machine s'est limitée à 25 mètres de profondeur. Barbara a tenu toutes ses promesses pour la réalisation des pieux (forage et bétonnage) avec plusieurs mètres d'ancrage dans la molasse compacte selon la technique Starsol®. Des pompes à béton haut débit ont été mobilisées pour bétonner très rapidement les pieux. Comme les pieux sont forés depuis la plate-forme actuelle, avant un terrassement de 6 m, un pré-recépage a été mis en œuvre : le lendemain, la tête de pieux est reforée, un adjuvant spécifique ayant été prévu pour éviter la prise trop rapide du béton. Le terrassier ne rencontre ainsi que du béton prédécoupé et déstructuré devant lui, au lieu d'une forêt de colonnes en béton.

Une optimisation en phase exécution a permis de retenir des pieux en 1 200 mm.

Soletanche Bachy Fondations Spéciales a mobilisé la plus imposante de ses foreuses en technique Starsol®, Bar-

INSTRUMENTATION

La proximité immédiate d'avoisnants sensibles, tels que les ouvrages fer-



7

© CHANTIER



© THEBAUT DE VREESE

8

roviaires de la gare Lyon-Part-Dieu, le tunnel Vivier-Merle, les voies du Tramway T1 et les nombreux bâtiments de ce quartier d'affaires, nécessite la mise en place d'un système d'auscultation complet, assuré par la société Sixense Monitoring.

Sept systèmes de topographie automatique Cyclops, complétés par un réseau de plusieurs dizaines de clinomètres, ont été installés pour assurer la surveillance de ces avoisinants.

Une instrumentation géotechnique en parois moulées ou forages, de type chaînes inclinométriques 4DShape,

permet le suivi de la stabilité des soutènements et de l'interaction sols/structures.

Un suivi hydraulique complet, assuré par un réseau de piézomètres et de cellules de pression interstitielle, a

8- Foreuse de pieux F5000.

8- F5000 pile driller.

également été mis en place en raison du contexte hydrogéologique particulier de ce secteur.

L'ensemble de ces dispositifs permet de surveiller le comportement en continu et en temps réel de ces ouvrages, ainsi que les sous-sols avoisinants. Ils sont indispensables pour le pilotage des différentes phases de travaux et plus particulièrement les terrassements et le rabattement de nappe associé.

Les milliers de données d'auscultation enregistrés chaque jour, sont traités par le logiciel Geoscope.

POINT D'ÉTAPE

Actuellement, la fouille To-Lyon est terrassée et les parois moulées sont rabotées.

Côté PPB, la circulation piétonne a été basculée début novembre et les démolitions ont repris sur les bâtiments au nord. Soletanche Bachy prévoit un retour courant mai pour achever les travaux spéciaux de ces projets.

Le chantier peut être suivi en direct ou en replay par le lien :

<https://www.lyon-partdieu.com/en-images/webcam-chantiers/> □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRES D'OUVRAGE : Vinci Immobilier / SNCF Gares & Connexions

MAÎTRES D'ŒUVRE : Setec Tpi, Setec Als, Terrasol, Arep, Dominique Perrault, Sud Architectes, Egis Bâtiments

ENTREPRISES : plusieurs groupements avec Vinci Construction France Travaux Publics Lyon, Citinea, Soletanche Bachy France, Soletanche Bachy Fondations Spéciales

SOUS-TRAITANT TERRASSEMENT : Vinci Construction Terrassement

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROI MOULÉE : 18 000 m²

BARRETTES : 67 u

MICROPIEUX : 1 000 u

TIRANTS : 75 u

FORAGES INJECTIONS : 130 forages

PIEUX DE FONDATION : 106 pieux en diamètre 1 220 mm, 31 en diamètre 820 mm

ABSTRACT

MULTIMODAL TRANSPORT HUB OF LYON PART-DIEU AND TO-LYON TOWER

SYLVAIN FORRAY, SOLETANCHE BACHY - QUENTIN DESJARS, SOLETANCHE BACHY

The Place Basse Car Park / To-Lyon Tower project is a complex project with several project principals and several project managers. It contributes to the renovation of the Part-Dieu district. The project involves numerous phases making it possible, in particular, to maintain access to the existing station. Numerous techniques are employed by Soletanche Bachy for the infrastructure: diaphragm wall retaining structure, foundations by barrettes and piles, and foundation raft anchoring by micropiles. The works as a whole also employ extensive instrumentation. □

POLO DE INTERCAMBIOS MULTIMODAL DE LYON PART-DIEU Y TOUR TO-LYON

SYLVAIN FORRAY, SOLETANCHE BACHY - QUENTIN DESJARS, SOLETANCHE BACHY

El proyecto Parking Place Basse - Tour To-Lyon es un proyecto complejo con varios contratistas y directores de obra que contribuye a la renovación del distrito de La Part-Dieu. El proyecto consta de numerosas fases que permiten, en particular, mantener los accesos a la estación existente. Soletanche Bachy ha aplicado numerosas técnicas para las infraestructuras: sostenimiento mediante pantallas de hormigón, cimientas mediante pilotes y pilotes flotantes, anclaje de la solera por micropilotes. Asimismo, el conjunto de las obras ha empleado una instrumentación avanzada. □



1
© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

RTE MET EN SOUTERRAIN DES LIGNES ÉLECTRIQUES AU NORD DE PARIS

AUTEUR : THIBAUT LE METTALLE, DIRECTEUR DE PROJET, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

DANS UN ENVIRONNEMENT TRÈS URBANISÉ, RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ MET EN SOUTERRAIN 4 LIGNES ÉLECTRIQUES DE 225 kV SURVOLANT LES COMMUNES DE SAINT-DENIS (93), VILLENEUVE-LA-GARENNE (92) ET L'ÎLE SAINT-DENIS (93). CE PROJET RÉPOND À UNE DEMANDE DE LA COMMUNE DE VILLENEUVE-LA-GARENNE, DE LA SOLIDÉO ET DE LA MÉTROPOLE DU GRAND PARIS. AU PIED DU VILLAGE DES ATHLÈTES, UNE GALERIE SOUTERRAINE DE 2,5 km VERRA LE JOUR EN 2021. SON CREUSEMENT EST PRÉCÉDÉ DE LA CONSTRUCTION DE DEUX PUIS SERVANT D'ENTRÉE ET DE SORTIE AU TUNNELIER. CELLE-CI A DÉBUTÉ EN MARS 2020 ET A NÉCESSITÉ LA MISE EN ŒUVRE DE DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE FONDATIONS SPÉCIALES COMME LES PAROIS MOULÉES ET LES INJECTIONS À GRANDE PROFONDEUR.

Pour répondre à la pression foncière en Île-de-France, RTE est engagé avec les services de l'État pour répondre de façon planifiée et priorisée aux demandes de mises en souterrain de lignes électriques exprimées par les communes. Ces projets sont régis par le Code de l'Énergie qui fixe un cadre juridique et préserve le réseau stratégique : toutes les lignes ne

peuvent être mises en souterrain pour des raisons de sécurité d'alimentation électrique.

La loi prévoit également un barème pour ces projets qui sont cofinancés par les collectivités demanderesse et RTE. Le programme de mise en souterrain d'initiative locale (MESIL) autour de Paris concerne à ce jour 6 projets considérés comme prioritaires par

1- Foreuse à la benne à câbles et Rotoforeuse® en forage.

1- Driller with cable grab and Rotoforeuse® during drilling.

la Préfecture de la Région Île-de-France :

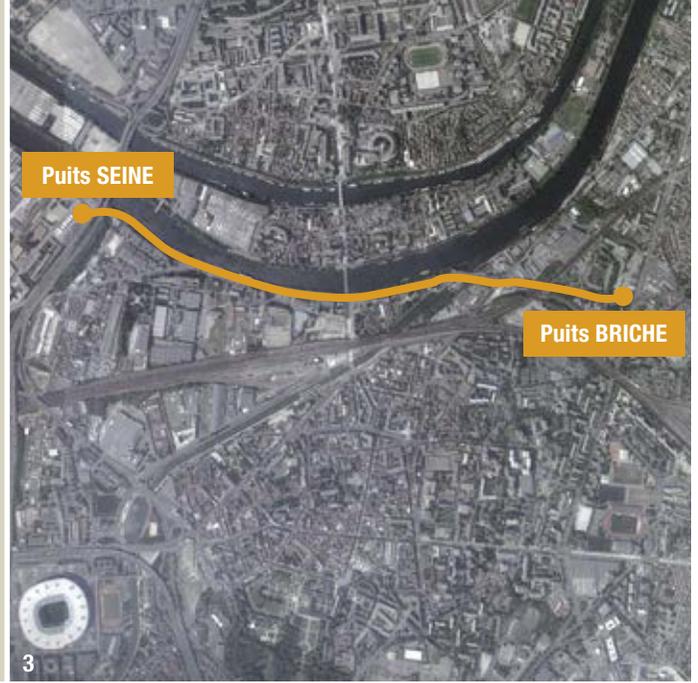
→ 4 en phase d'étude technique et financière dans les Yvelines, l'Essonne, le Val-de-Marne et les Hauts-de-Seine.

→ 2 en cours : un dans les Hauts-de-Seine (Clamart, Plessis-Robinson) et un à cheval sur Villeneuve-la-Garenne et Saint-Denis.



2

© RTE



3

© GEOPORTAIL

D'ici 2024, la mise en souterrain de 4 lignes électriques 225 000 v surplombant les communes de Saint-Denis et Villeneuve-La-Garenne et l'île Saint-Denis permettra de retirer 15 km de lignes et 27 pylônes. 81 ha de terrain seront libérés, soit l'équivalent de 115 terrains de football, au service de projets d'aménagements du territoire. Pour ce faire, une galerie technique sera réalisée dans un tunnel reliant deux puits en parois moulées distants de 2,5 km (figure 2). Le premier, servant de puits d'entrée au tunnelier, a été réalisé en 2020 à côté du poste électrique RTE dénommé "Seine". Le second puits, situé à proximité du fort de la Briche, est appelé puits "Briche" et a également vu ses travaux s'achever

2- Cartographie de la mise en souterrain des 4 lignes électriques.

3- Tracé de la galerie entre les deux puits.

4- Vue en coupe de la galerie sous l'autoroute A86.

2- Map of underground of the 4 electric power lines.

3- Alignment of the duct between the two shafts.

4- Cross-section view of the duct under the A86 motorway.

en 2020. Les 4 liaisons seront déroulées dans la galerie en 2022 pour une mise en service en 2023.

LE GÉNIE CIVIL DU PROJET

Pour ce projet en conception-réalisation, plusieurs campagnes de reconnaissances géotechniques ont eu lieu afin de caractériser les différents horizons géologiques. Ont ainsi été réalisés :

- Des sondages carottés à partir desquels ont été faits des essais en laboratoire ;
- Des essais pressiométriques ;
- De nombreux piézomètres.

Ces campagnes ont mis en évidence la succession des formations de terrains suivantes au droit du projet :

→ Les remblais et Marnes Infra-Gypseuses ;

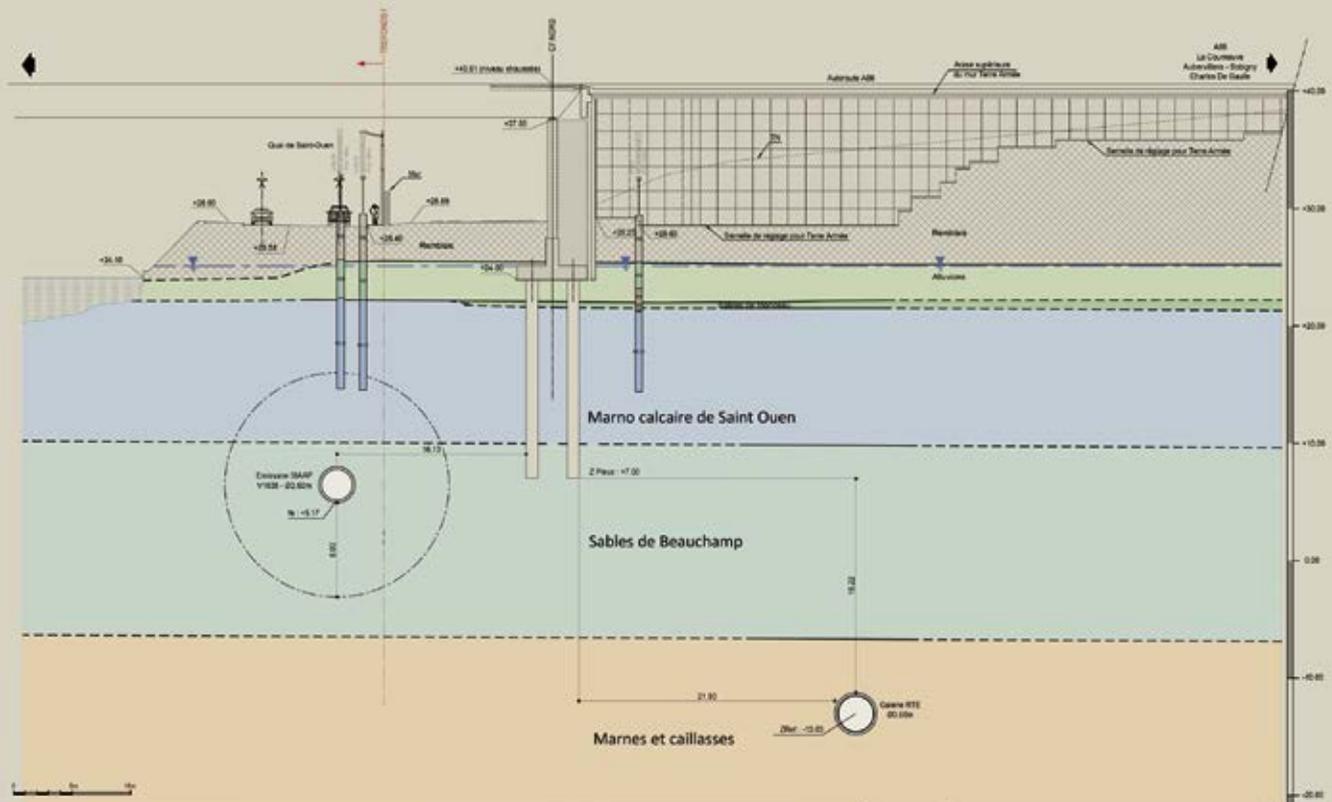
- Les Sables de Monceau ;
- Le Marno-Calcaire de Saint-Ouen ;
- Les Sables et Grès de Beauchamp ;
- Les Marnes et Caillasses ;
- Le Calcaire Grossier.

La galerie technique prévue pour le projet présente un diamètre nominal de 3,10 m afin d'accueillir 12 câbles et d'offrir la possibilité d'en ajouter 6 en secours.

Le tracé (figure 3) et le profil en long du projet ont été adaptés et l'on peut alors distinguer 3 tronçons :

- La galerie s'éloigne du puits d'entrée en direction de la Seine ;
- Elle longe ensuite la Seine sous le trottoir Ouest du quai adjacent ; ▷

VUE EN COUPE DE LA GALERIE SOUS L'AUTOROUTE A86



4

© SETEC TPI

→ Puis elle passe sous l'écluse du canal de Saint-Denis en évitant le pont et continue selon l'axe de la rue pour déboucher dans le puits Briche à 2,5 km.

Le point bas de la galerie est situé au niveau du puits Seine à 47 m de profondeur. Elle part ensuite en pente montante de 0,5 % jusqu'à l'écluse puis de 4 % de l'écluse jusqu'au passage sous le collecteur Garges-Epinay, et enfin de 6 % jusqu'au puits Briche afin de minimiser la profondeur de terrassement de celui-ci. Sur la majeure partie du tracé (environ 2 000 m), la galerie technique est située dans les marnes et caillasses (figure 4). La galerie quitte ensuite cette formation, traverse les Sables de Beauchamp, et arrive au puits Briche dans le Marno-Calcaire de Saint-Ouen. Il était en effet exclu de traverser les horizons supérieurs qui présentaient des caractéristiques géotechniques trop faibles. Au regard du tracé de la galerie, des conditions géologiques, hydrogéologiques et géotechniques rencontrées et du contexte environnemental (présence

de la Seine, d'une galerie du Siaap, du bâti, de réseaux, d'axes de circulation), l'utilisation d'un tunnelier avec bouclier fermé à front confiné est le procédé le mieux adapté pour la réalisation de la galerie. La méthode de confinement retenue est celle du tunnelier à pression de boue.

PUITS SEINE : INJECTIONS PRÉALABLES ET PAROIS MOULÉES

Le puits "Seine" est situé à proximité de la Seine. Il sert d'entrée en terre pour le tunnelier et, en phase définitive, d'accès à la galerie technique tout en permettant de faire remonter les câbles jusqu'à l'ouvrage de raccordement au poste électrique existant.

Le puits est de forme elliptique, de grand axe 16,50 m et de petit axe 13,50 m. Il est réalisé en parois moulées d'épaisseur 1,04 m ancrées dans le calcaire grossier à -30,50 NGF soit 63 m de profondeur. Le radier est, quant à lui, situé à la cote -17,20 NGF (figure 5). Préalablement à tous ces travaux, une

campagne de pré-injections au coulis de bentonite-ciment a été réalisée pour éviter les pertes de boue lors du forage des parois, en particulier dans les Marnes et Caillasses qui peuvent présenter des vides, dans les Sables de Beauchamp où l'on pouvait rencontrer des zones décomprimées et dans le Marno-Calcaire de Saint-Ouen où un phénomène de dissolution du gypse pouvait être observé.

Deux lignes d'injections ont été réalisées à 0,50 m de part et d'autre de la future paroi moulée. Sur l'extérieur du puits, les forages étaient espacés de 2,10 m et descendus jusqu'à la base des parois moulées. Sur l'intérieur, l'espacement était de 1,65 m en moyenne (variable en raison de l'ovallité du puits). Ces forages étaient stoppés au toit des calcaires grossiers (-22,40 NGF) afin de ne pas former de cheminées pouvant laisser circuler l'eau (figure 6).

Pour le forage, c'est la technique de la tête vibrante qui a été mise en œuvre sur une foreuse Soilmec SM18. Par cette technique, un tube ouvert de diamètre 114 est descendu jusqu'à la cote finale. À l'abri de ce tube, le forage a été équipé d'un tube lisse de 50/60 jusqu'au toit de la zone à traiter puis d'un tube crépiné jusqu'au fond. Ensuite, le tube métallique est arraché de façon à ne laisser que l'équipement. Les coulis de comblement étaient mis en place gravitairement. Ceux de clavage, fabriqués sur site, étaient réalisés à l'obturateur simple branché en tête de forage.

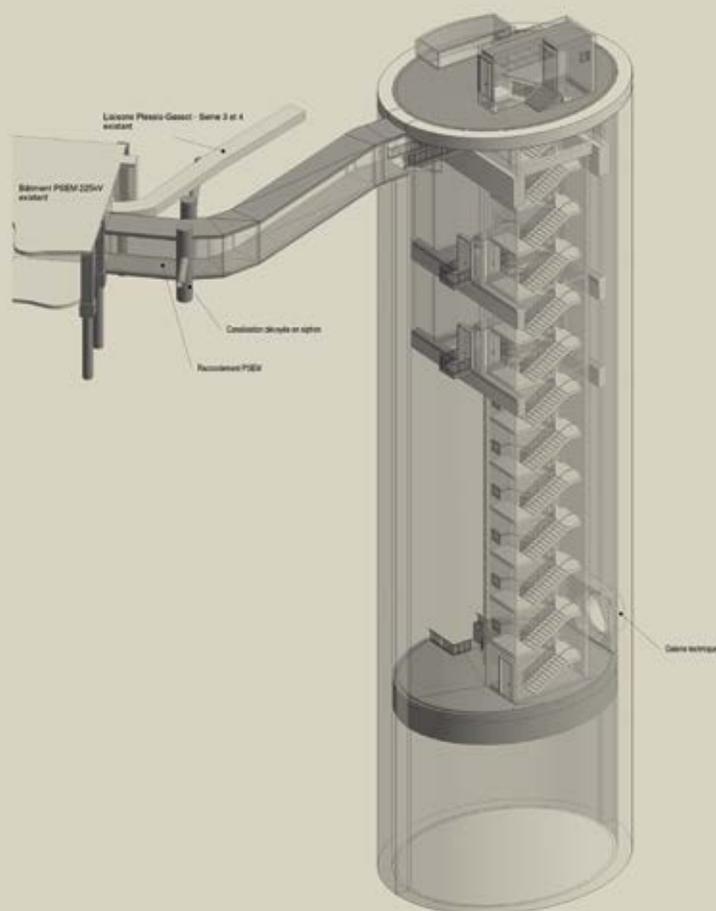
5- Représentation du puits Seine.

6- Implantation des lignes d'injections préalables.

5- Représentation of the Seine shaft.

6- Layout of preliminary grouting lines.

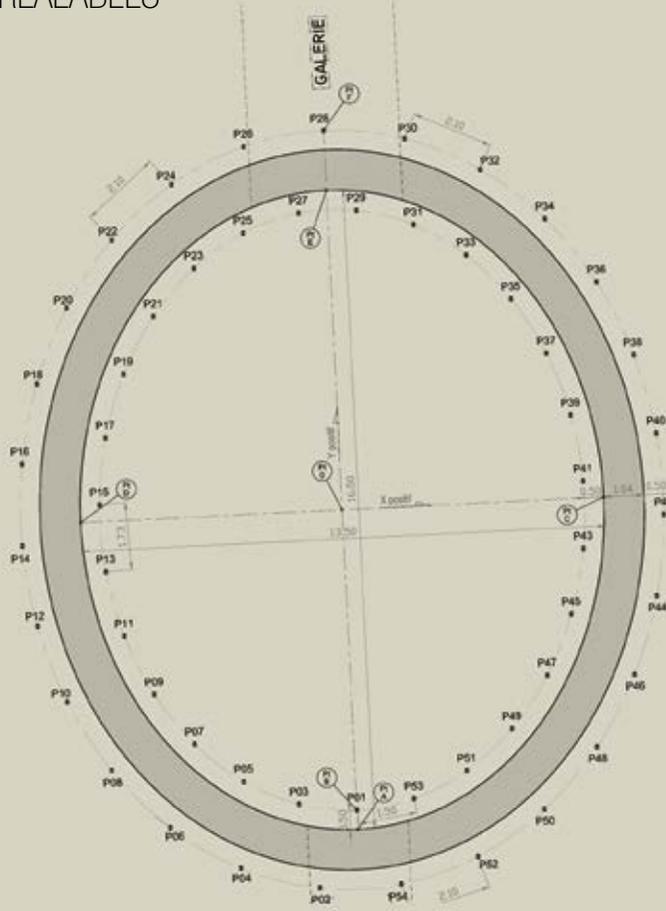
REPRÉSENTATION DU PUIT SEINE



5

© SETEC TPI

IMPLANTATION DES LIGNES D'INJECTIONS PRÉALABLES



6

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

Les parois moulées du puits principal ont été réalisées à l'aide de deux pelles à câbles Sennebogen 6140HD, l'une équipée d'une benne à câbles pour forer les horizons de tête susceptibles d'être pollués et l'autre équipée de la Rotoforeuse® (figure 1), une hydrohauveuse conçue et développée par Spie Batignolles Fondations et donc capable de répondre aux besoins spécifiques des chantiers. On notera qu'il lui est désormais possible de descendre à plus de 70 m de profondeur en épaisseur 1800 mm. Pour ce chantier, elle était équipée d'un "joint tournant", technologie permettant d'orienter l'outil à 360°, et donc de positionner la grue parallèlement au forage, libérant ainsi de l'espace pour les autres ateliers. Alors que l'emprise au sol au droit du puits était faible, il a été systématiquement possible de forer un panneau et d'en équiper ou bétonner un autre en même temps. Il fallait environ une semaine pour réaliser chacun des 8 panneaux de parois moulées dont un primaire (il s'agit du panneau de démarrage qui est réalisé en "pleine terre" avant toute excavation de part et d'autre), 6 successifs qui "prolongent" des panneaux existants et enfin un panneau secondaire qui est réalisé entre deux panneaux.

Le forage était réalisé sous bentonite afin d'assurer la stabilité de l'excavation. À la benne, les déblais étaient vidés directement dans des camions puis stockés sur chantier pour assurer leur décantation. Vers 10 m de profondeur, la Rotoforeuse® était mise en place au droit du forage pour attaquer le terrain par broyage à l'aide de deux roues équipées de dents. Les déblais étaient alors aspirés par une pompe intégrée au châssis de l'outil et refoulés par marirage dans des conduites métalliques vers une unité de dessablage composée notamment d'un BE550 (figure 7). Des capteurs transmettaient en instantané les mesures de déviations et de profondeur au foreur afin de pouvoir corriger la trajectoire de l'outil.

Comme sur tout projet de parois moulées, l'étanchéité entre panneaux est assurée par la mise en place d'un joint dit *waterstop*. Pour le maintenir, un coffrage métallique porte-joint (palplanche CWS) était placé aux extrémités de chaque panneau. Il était ensuite décoffré par la benne à câble lors du forage du panneau suivant, laissant le joint *waterstop* coincé dans le béton de chaque panneau. Une particularité de ce puits tenait à sa forme d'ellipse et à ses axes de faibles longueurs. Il a donc fallu



7
© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

7- Unité de desablage BE550.

8- Mise en place de nidaplast.

7- BE550 desanding unit.

8- Placing Nidaplast.

utiliser des coffrages perdus en nidaplast (figure 8) afin que l'angle donné au porte-joint par rapport au forage soit rempli et qu'une remontée de béton soit évitée dans la passe à bétonner.

Une fois le panneau curé et la boue de forage substituée par une boue neuve dite de bétonnage, les cages d'armatures pouvaient être descendues dans le panneau et celui-ci bétonné.



8
© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

RADIER INJECTÉ

Afin de maîtriser les débits d'exhaure et d'assurer la stabilité du fond de fouille, un bouchon injecté est réalisé en base de paroi sur une hauteur de 5 m dans la couche de calcaire grossier située entre 57 et 62 m de profondeur à partir de forages réalisés depuis la surface selon un maillage de 1,50 m x 1,50 m. Ce sont, cette fois-ci, deux foreuses équipées de tête vibrante, une Soilmecc SM18 et une Casagrande C8XP (figure 9), de Spie Batignolles Fondations qui travaillent sur site. Afin d'assurer l'étanchéité du radier, des mesures de déviation sont réalisées dans tous les forages à l'aide d'une sonde Reflex Ez-track (figure 10). Les points d'impact résultant de toutes ces mesures sont ensuite géoréférencés et positionnés par rapports aux points d'impact des forages adjacents. Pour garantir l'absence de surpression hydraulique sous le fond de fouille, des drains verticaux sont prévus le long de la paroi moulée dans l'emprise du puits. Il s'agit de 12 drains en diamètre 200 mm. Ces drains seront réalisés une fois le terrassement de l'intérieur du puits suffisamment avancé.

BOUCHON D'ENTRÉE EN TERRE

Lorsqu'un tunnelier entre ou sort d'un puits, son fonctionnement subit un changement très important en termes de pression de confinement au front de taille. Les effets de ce changement doivent être contrôlés par la mise en place de dispositifs particuliers et de procédures de limitation des risques. Pour l'entrée et la sortie du tunnelier, deux aspects principaux sont à gérer :

- Assurer la stabilité du front à partir de l'ouverture de la paroi de soutènement en place ;
- Limiter ou empêcher les venues d'eau qui risqueraient d'apporter des fines et d'engendrer l'inondation de l'ouvrage, des tassements excessifs, des phénomènes de renard ou des décompressions de terrain.

Dans le cas de l'entrée en terre, le tunnelier ne peut pas disposer au démarrage de toute la pression de confinement opérationnelle. Ainsi, afin de garantir l'étanchéité de l'ouvrage vis-à-vis des venues d'eau, des mesures adaptées doivent être prises avant l'injection de mortier de bourrage du premier anneau.

La couverture de terrain est de 44 m, et la hauteur de la colonne d'eau en voûte est de 38 m.



9

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

D'un point de vue géotechnique, le creusement sera effectué dans la formation des Marnes et Caillasses.

Pour garantir l'absence de pression d'eau sur la partie en terre et en même temps stabiliser celle-ci, un bouchon d'injection au coulis de bentonite-ciment est réalisé à partir de forages exécutés depuis la surface et équipés de tubes à manchettes renforcés de diamètre 48/42 mm. Ils sont injectés par passes d'injections répétitives et sélectives d'un mètre. Le critère d'arrêt est fixé à l'obtention d'une pression de refus, en respectant des volumes injectés de 300 litres/passe/jour.

PUITS BRICHE : SORTIE DU TUNNELIER

Le puits "Briche" est situé lui aussi à proximité d'un poste électrique. Il sert de puits d'arrivée au tunnelier et permet de faire remonter les câbles jusqu'aux ouvrages de raccordement aux pylônes aéro-souterrains EE36N et FXN réalisés en 2019 et 2020. Il est de forme circulaire de diamètre 15,20 m et est réalisé en parois moulées de 0,62 m d'épaisseur ancrées à 9,00 NGF soit 27 m de profondeur. Des essais au micro-moulinet ont été réalisés en phase d'exécution et ont permis de valider un ancrage



10

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

9- Foreuses C8XP et SM18 : forages du radier injecté.

10- Sonde reflex Ez-track pour mesurer la verticalité du forage.

9- C8XP and SM18 drilling machines: boreholes for grouted foundation raft.

10- Reflex Ez-Trac sensor to measure borehole verticality.

des parois dans l'horizon des Sables de Beauchamp peu productifs. Contrairement au premier puits, un radier injecté n'était pas nécessaire.

Une campagne d'injection préalable aux parois moulées a été réalisée durant l'été 2020 afin de limiter le risque de perte de boue. Les parois moulées ont été forées à la benne à câble, outil bien adapté à la foration de ces terrains et à la faible grésification des Sables de Beauchamp au niveau du fort de la Briche. À la différence du premier puits où l'entreprise intervenait à bonne distance des lignes aériennes, ce second puits se trouvait à proximité immé-



11

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

PRINCIPALES QUANTITÉS

PUITS SEINE

- 54 forages d'injections préalables - 3200 m de forage - 400 m³ de traitement
- Parois moulées - 8 panneaux de 63 m de profondeur en 1,04 m d'épaisseur :
 - 3200 m²
 - 3700 m³ de béton
 - 235 t d'acier de cages d'armatures
- Radier injecté :
 - 91 forages - 5700 m - 230 m³ de traitement estimé
- Bouchon d'entrée en terre de 7,9 m x 7,9 m x 13,34 m :
 - 79 forages - 4000 m - 180 m³ de traitement

PUITS BRICHE

- 40 forages d'injections préalables - 1100 m de forage - 250 m³ de traitement
- Parois moulées - 8 panneaux de 27 m de profondeur en 0,62 m d'épaisseur :
 - 1270 m²
 - 940 m³ de béton
 - 60 t acier en cages d'armatures

11- Réalisation des parois moulées du puits Briche.

11- Execution of diaphragm walls for the Briche shaft.

diatée de lignes électriques aériennes (figure 11) et enterrées, ce qui nécessitait des modes opératoires très spécifiques avec l'utilisation d'une grue mobile à flèche télescopique équipée d'un "mur virtuel" et la présence de chefs de manœuvre pour tous les mouvements d'engins. Par ailleurs, pour le projet, ce sont près de 80 compagnons et encadrants qui ont été formés au "pass RTE - pass HT" leur permettant de travailler dans de telles conditions. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : RTE (Réseau de Transport d'Electricité)
ASSISTANT AU MAÎTRE D'OUVRAGE : Arcadis
MAÎTRE D'ŒUVRE : Setec Tpi
ENTREPRISE GÉNÉRALE : Spie Batignolles Génie Civil
FONDATIONS : Spie Batignolles Fondations
POSE DES CÂBLES : Spac

ABSTRACT

RTE PLACES ELECTRIC POWER LINES UNDERGROUND TO THE NORTH OF PARIS

THIBAUT LE METTAILLE, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

The undergrounding of above-ground electric power lines north of Paris is designed to eliminate existing pylons and free up plots of land in a very dense urban environment. The article discusses civil works for the project, including a main services duct executed by tunnel boring machine and the execution of the TBM ground entry and exit shafts with very deep diaphragm walls. For the temporary phases of earthworks or the start of TBM excavation, highly technical grouting was also needed, all making this a multi-technique project. □

RTE SOTERRA LÍNEAS ELÉCTRICAS AL NORTE DE PARIS

THIBAUT LE METTAILLE, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

El soterramiento de líneas eléctricas aéreas al norte de París tiene como objetivo eliminar los pilonos existentes y liberar parcelas de terreno en un entorno urbano muy denso. Incluye la ingeniería civil del proyecto, que consta de una galería técnica realizada con tuneladora y de pozos de entrada en tierra y de salida de la tuneladora de pantalla de hormigón a gran profundidad. Para las fases provisionales de movimiento de tierras o de inicio de excavación de la tuneladora, también ha sido preciso realizar inyecciones muy técnicas, todo lo cual convierte este proyecto en una obra multitécnica. □

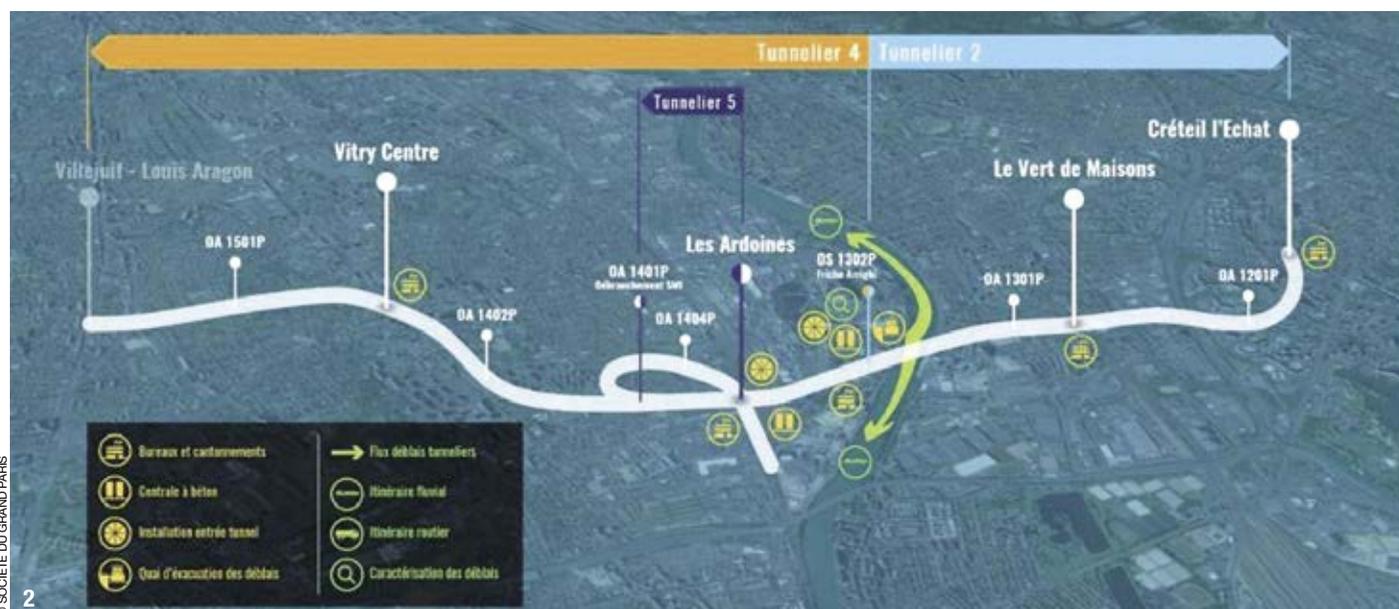


© CEDRIC HEISLY

UNE PAROI MOULÉE DÉFINITIVE EN BÉTON NON ARMÉ SUR LE CHANTIER DE LA LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS

AUTEURS : PAULINE CANTO, INGÉNIEURE D'ÉTUDES, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MARION LE BATARD, INGÉNIEURE TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - PAUL VIDIL, DIRECTEUR ADJOINT DU BUREAU D'ÉTUDES, SOLETANCHE BACHY FRANCE

À L'AUBE D'UNE NOUVELLE ÈRE EN MATIÈRE DE CONSTRUCTION ÉCOLOGIQUE ET MOINS ÉNERGIVORE, LE Puits CIRCULAIRE 1501P DU LOT T2A DE LA LIGNE 15 SUD S'INSCRIT COMME UNE PREMIÈRE RÉFÉRENCE DE PAROI MOULÉE DÉFINITIVE PARTIELLEMENT ARMÉE À TRÈS GRANDE PROFONDEUR. LA SUPPRESSION DE 50 % DES CAGES D'ARMATURE ET DU CONTRE-VOILE DE GÉNIE CIVIL INTÉRIEUR EST POSSIBLE GRÂCE À LA FORME CIRCULAIRE DE L'OUVRAGE (SOUTÈNEMENT AUTOSTABLE), À UN CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE FAVORABLE ET À UNE BONNE MAÎTRISE DES DÉVIATIONS DES OUTILS DE FORAGE.



PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Projet d'infrastructure et de transport majeur pour la région Île-de-France, le Grand Paris Express prévoit la mise en service de 200 km de nouvelles lignes de métro automatiques (dont 180 km en souterrain), avec comme ambitions principales : désengorger le réseau RER existant, favoriser les échanges socio-économiques avec les communes périphériques, réduire le trafic automobile et limiter la pollution atmosphérique. Pour répondre à ces objectifs, il est prévu la construction de 68 nouvelles stations et de nom-

1- Panneau de paroi moulée en cours de forage à la benne hydraulique KS.

2- Vue générale du lot T2A de la ligne 15 Sud.

1- Diaphragm wall panel during KS hydraulic bucket drilling.

2- General view of work section T2A on Line 15 South.

breuses interconnexions avec le réseau existant.

Le lot T2A de la ligne 15 Sud, attribué par la Société du Grand Paris (SGP) au groupement d'entreprises Bouygues Travaux Publics/Soletanche Bachy France/Soletanche Bachy Tunnels/Bessac/Sade réunis sous la bannière commune "Horizon", comporte (figure 2) :

- 6,6 km de tunnel au tunnelier ;
- 4 gares : Créteil-l'Échat, Le-Vert-de-Maisons, Les-Ardoines et Vitry-Centre ;
- 1 ouvrage de débranchement pour les tunneliers : 1401P ;

→ 1 raccordement entre l'ouvrage de débranchement 1401P et le futur 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 puits d'entrée des deux tunneliers : ouvrage spécial 1302P.

L'Ouvrage Annexe (OA) 1501P, localisé dans la commune de Vitry-sur-Seine, est un puits de secours et de ventilation/désenfumage raccordé par 2 rameaux à la future ligne de métro. ▷


3

© CÉDRIC HELSLY

Son enceinte périphérique de forme circulaire, avec un diamètre intérieur de 19 m, est constituée d'une paroi moulée de 1,20 m d'épaisseur descendue à 65 m de profondeur.

L'excavation de la paroi moulée a été menée dans un environnement restreint inférieur à 1 000 m², contraignant les équipes travaux à installer la centrale de fabrication à boue 360 m en aval du site (figures 3 et 4). L'ouvrage, qui comporte 14 panneaux (7 primaires et 7 secondaires unitaires) a été foré par joints remordus en remplacement des joints CWS prévus en conception (figure 5). Cette solution a permis de limiter la co-activité sur chantier (suppression d'une grue de manutention pour le levage des coffrages) et de s'affranchir des risques de mise en œuvre de joints de 65 m dans une emprise exiguë. C'est également dans cet esprit qu'a été étudiée de manière approfondie la mise en place d'armatures uniquement dans les panneaux de paroi moulée pour lesquels cela était strictement nécessaire.

Un rameau d'accès de secours ainsi qu'un rameau de ventilation/décompression seront raccordés à l'OA 1501P à 45 m de profondeur (figure 6). Afin de faciliter le percement de la paroi moulée lors de l'excavation en traditionnel des 2 rameaux, les cages d'armature ont été équipées de barres en fibre de verre sur la hauteur de chaque ouverture (les portions de paroi situées au-dessus et en-dessous de l'ouverture étant classiquement armées).

CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE ET PROCESSUS D'EXCAVATION

L'OA 1501P traverse les horizons du plateau de Villejuif avec, en partant du terrain naturel à 97 NGF (figure 7) : remblais sur 6 m d'épaisseur, Calcaire de Brie sur 6 m, Argiles Vertes sur 7,5 m, Marnes de Pantin sur 5,5 m, Marnes d'Argenteuil sur 10 m, Masses et Marnes du Gypse sur 32 m, Marnes Infragypseuses sur 1 m, et Calcaire de Saint-Ouen sur 22 m, couche dans laquelle est ancrée de 1,5 m la paroi moulée (base à 31,5 NGF).

3- Vue générale de la centrale située à 360 m en aval du site.

4- Réalisation des parois moulées de l'OA 1501P.

3- General view of the plant located 360m downstream of the site.

4- Execution of diaphragm walls for the 1501P structure.

En raison de cette stratigraphie hétérogène, les parois moulées ont fait l'objet d'une excavation mixte. Les panneaux primaires ont été forés à l'aide d'une benne hydraulique KS sur les 31 premiers mètres (figure 1), car plus adaptée aux sols argileux et plastiques et au moyen d'une hydrofraise dans les terrains sous-jacents jusqu'à la base de panneau.

Des pieux, de diamètre 1 000 mm, ont ensuite été réalisés sur chaque passe de panneau remordu, et remblayés avec des matériaux graveleux. Cela a


4

© CÉDRIC HELSLY

COUPE TRANSVERSALE DE LA STRATIGRAPHIE DU SITE

7- Coupe transversale de la stratigraphie du site.

8- Vues générales de la fouille actuellement en cours de terrassement et de la paroi moulée.

7- Cross section of site stratigraphy.

8- General views of excavation currently in progress and diaphragm wall.

Au total, 426 m³ de terrain ont été injectés pour un total de 1860 m de forage.

Des travaux d'injection d'étanchement ont également été menés au droit des rameaux afin de réduire la perméabilité des terrains encaissants, avec au total 3390 m de forage répartis sur 52 forages.

Les travaux de parois moulées, qui ont duré 4 mois, se sont achevés le 12 janvier 2020, et ont laissé la place aux équipes de terrassement et de génie civil (figure 8).

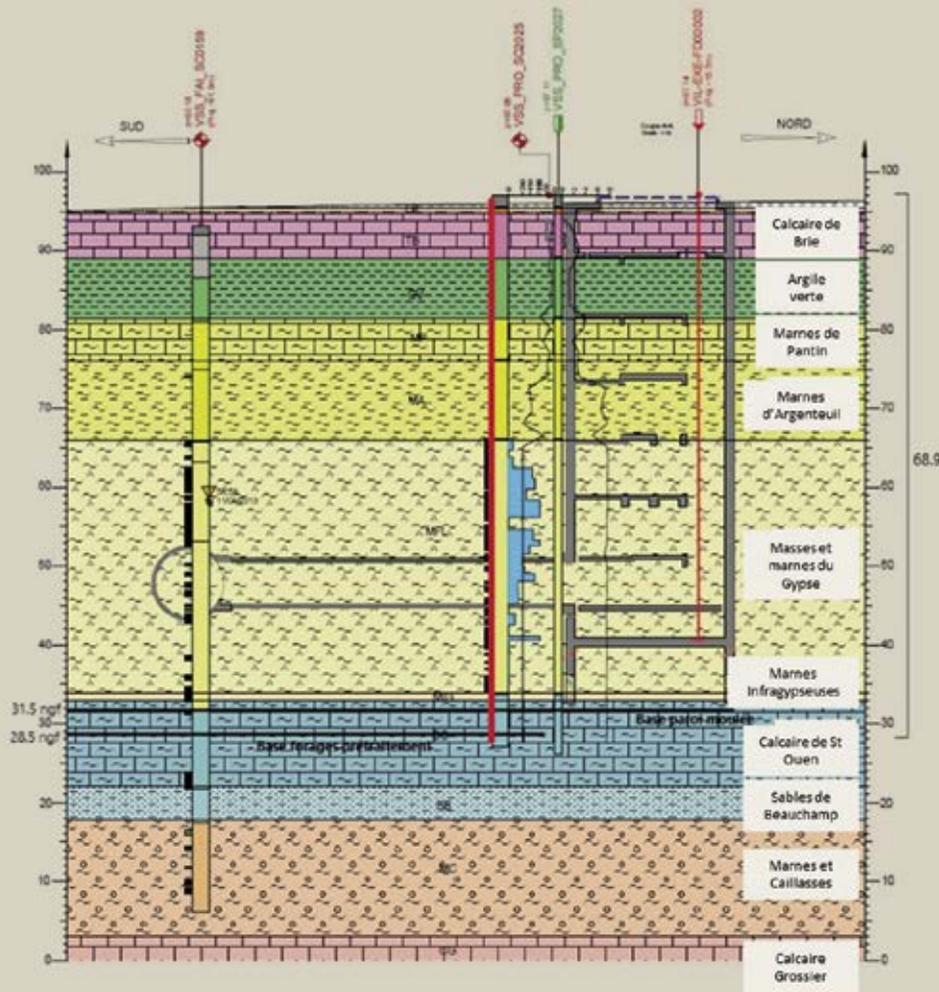
CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT

La paroi moulée circulaire de l'OA 1501P travaille en compression annulaire, rendant ainsi autostable ce soutènement sur les 57 m de hauteur d'excavation des terres.

La stabilité horizontale de l'écran a été étudiée classiquement à l'aide de calculs d'interaction sol-structure 2D aux coefficients de réaction, en assimilant la paroi moulée à un empilement d'anneaux en béton caractérisés par une rigidité cylindrique et au sein desquels se développent des effets voûte.

Le percement de la paroi moulée lors de la création des 2 rameaux empêche le développement des contraintes d'anneau dans l'emprise des ouvertures et induit une redistribution des efforts de part et d'autre de celles-ci, avec pour conséquence (figure 9) :

- Une concentration de contrainte orthoradiale ;
- Une génération de traction verticale dans la zone de diffusion des contraintes : effet linteau ;
- Un assouplissement de la raideur cylindrique des panneaux situés au



7

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS



8a



8b

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

voisinage des ouvertures, assouplissement d'autant plus important à mesure que l'on se rapproche des ouvertures. Ces panneaux adjacents subissent une génération de moments verticaux additionnels.

Cet assouplissement de la raideur cylindrique, estimé à l'aide d'abaques internes développés par Soletanche Bachy, a conduit à la mise en œuvre de cages plus ou moins ferrillées selon la proximité des ouvertures sur la moitié

de l'ouvrage (7 panneaux armés) avec (figure 10) :

- Des cages linteaux renforcées de part et d'autre des ouvertures (ratio d'acier 60 kg/m³) ;
- Des cages au droit des rameaux,

armées au ferrillage minimum avec un élément mixte acier/fibre de verre sur la hauteur des ouvertures pour faciliter le percement de la paroi moulée (ratio d'acier : 45 kg/m³) ;

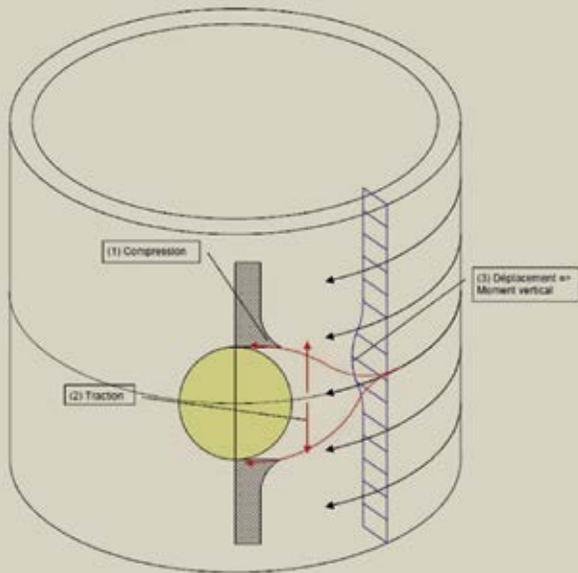
- Des cages faiblement armées au-delà des cages linteaux (ratio d'acier : 50 kg/m³).

Les sollicitations de flexion verticale étant suffisamment faibles et l'impact des ouvertures négligeable sur la seconde moitié du puits, les parois moulées ont été justifiées en béton non armé sur les 7 panneaux restants, conformément à la section 12 de l'Eurocode 2-1-1.

La connexion avec les planchers du génie civil intérieur est assurée par des scellements sur la partie non armée de l'ouvrage, et des coupleurs préalablement disposés dans les cages de paroi sur la partie armée du puits. Les cages d'armature ont également été équipées de tubes de réservation pour les auscultations soniques et inclinométriques de la paroi moulée.

Afin de renforcer localement la rigidité de la paroi moulée, un contre-voile de 40 cm était initialement prévu au marché au niveau des ouvertures des rameaux (figure 11).

SOLLICITATIONS INDUITES par la création d'une ouverture dans une paroi moulée circulaire



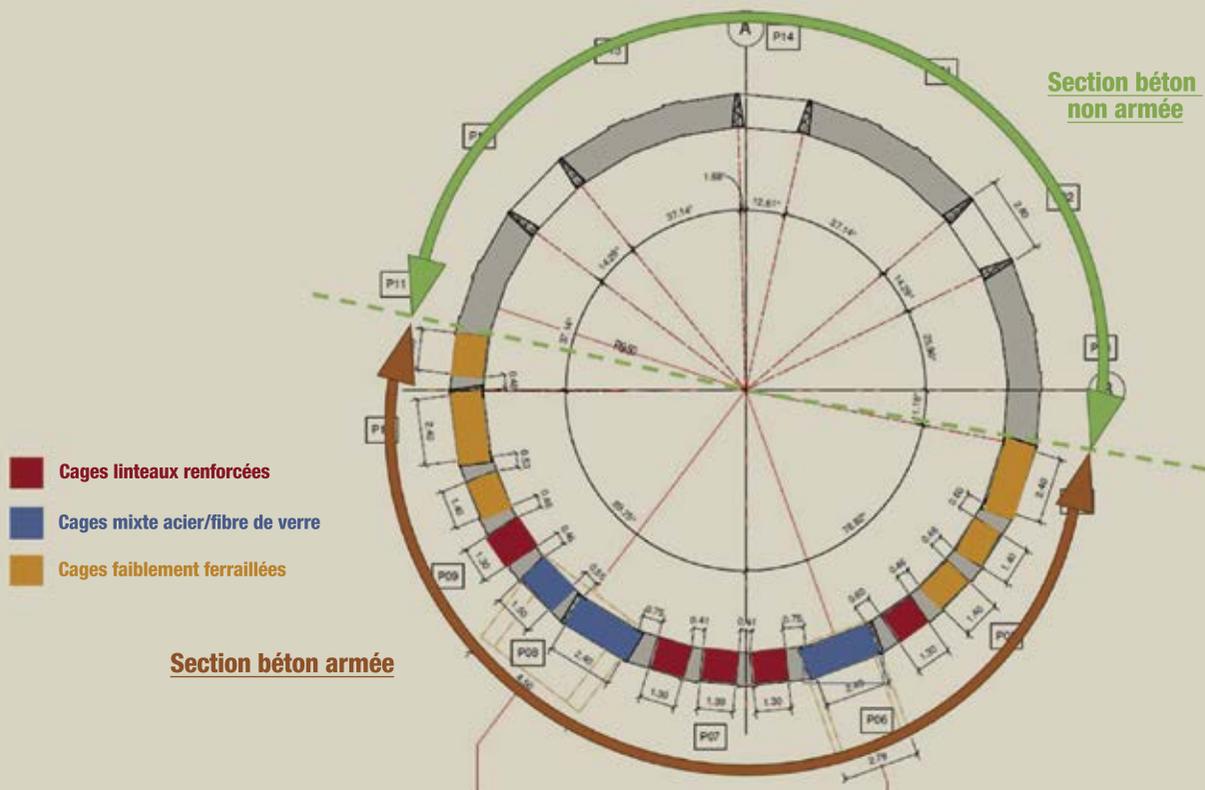
9- Sollicitations induites par la création d'une ouverture dans une paroi moulée circulaire.

10- Répartition des cages d'armature et identification de la partie non armée.

9- Stresses resulting from the creation of an opening in a circular diaphragm wall.

10- Distribution of concrete reinforcing cages and identification of the unreinforced section.

RÉPARTITION DES CAGES D'ARMATURE ET IDENTIFICATION DE LA PARTIE NON ARMÉE



Section béton armée

Section béton non armée

- Cages linteaux renforcées
- Cages mixte acier/fibre de verre
- Cages faiblement ferrillées

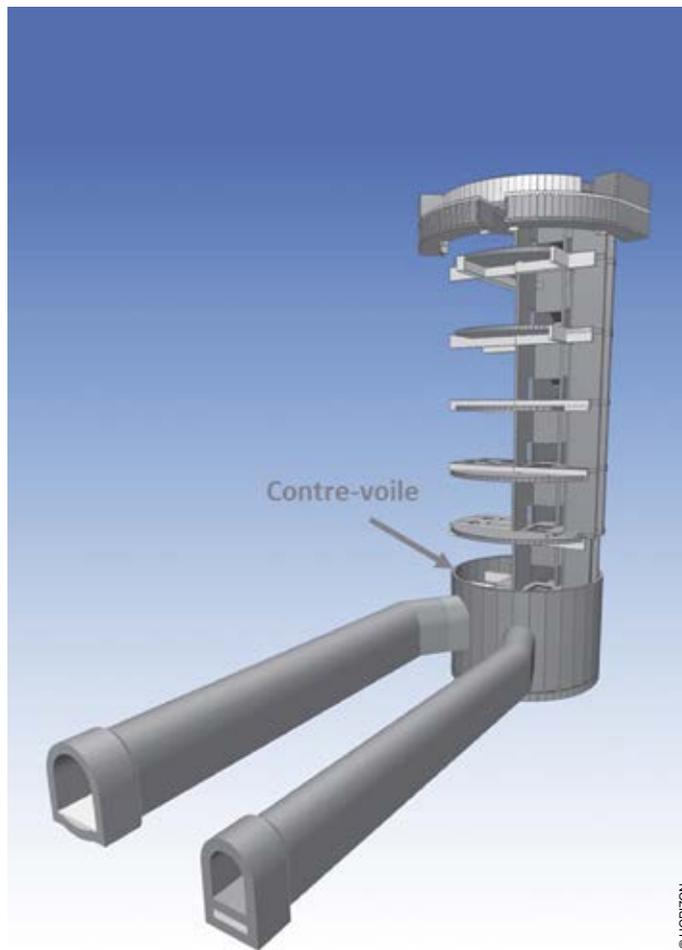
Lors des études d'exécution, l'épaisseur du contre-voile a été intégrée dans les vérifications des contraintes de compression annulaires avec, comme hypothèses, une tolérance de déviation de l'outil de forage de 0,5 %, et un béton de paroi moulée C35/45.

Suite aux travaux de paroi moulée, il a été constaté une nette amélioration des caractéristiques du béton de paroi grâce aux essais de compression sur éprouvettes, ce qui a permis de le surclasser en classe de résistance C45/55. Par ailleurs, la paroi moulée a été forée avec une déviation de 0,15 % bien inférieure au critère contractuel grâce aux mesures de contrôle et de correction en continu des outils de forage, ce qui correspond à une déviation réelle de 7 cm au lieu de 27 cm théorique. La combinaison de ces deux facteurs a permis de justifier les contraintes annulaires de compression dans la paroi moulée sans tenir compte de l'épaisseur du contre-voile, qui a donc pu être supprimé.

CONCLUSION

L'OA 1501P a fait l'objet d'optimisations techniques fortes réalisées dans le respect des normes en vigueur et des spécifications du marché. Ces adaptations ont permis de contribuer à la :

- Réduction du coût de la construction avec une économie de 115 t d'acier dans les parois moulées et la suppression d'un contre-voile (292 m³ de béton armé) pour le génie civil intérieur ;
- Réduction des délais des opérations d'équipement et de bétonnage des parois moulées ;
- Réduction des moyens de levage grâce à la suppression de la moitié des cages d'armature de paroi et à la suppression des joints CWS ;



© HORIZON
11

11- Localisation du contre-voile au droit des rameaux.

11- Location of the retaining wall at the connecting-gallery level.

- Réduction des risques de défauts d'enrobage et donc de reprise du parement sur la partie non armée ;
 - Réduction du transport grâce à la suppression des cages d'armature.
- L'OA 1501P constitue donc une première référence d'ouvrage définitif dont la moitié de l'enceinte en paroi moulée est sans armatures. Cela avait déjà été réalisé pour des ouvrages provisoires (puits de la ligne 14 - passage sous le RER C - puits d'essai de Saint-Maur), mais jamais sur un ouvrage définitif sans contre-voile.

Au-delà de la réduction des quantités et des délais, cette optimisation s'inscrit tout à fait dans la démarche environnementale de Soletanche Bachy de réduction de l'utilisation des ressources en ne mettant en œuvre que ce qui est strictement nécessaire, dans le respect du corpus normatif, grâce notamment à la maîtrise des déviations à forte profondeur et à la qualité des bétons de parois moulées. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

LINÉAIRE DE PAROI : 60 m
PROFONDEUR DE LA PAROI : 65 m
SURFACE : 3 796 m²
BÉTON : 4 556 m³
ACIER : 116 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris (SGP)
MAÎTRE D'ŒUVRE : Systra
ASSISTANT MAÎTRISE D'OUVRAGE : Artemis (groupement Arcadis Esg, Artelia)
CONTRÔLE TECHNIQUE (OCTA) : bureau Veritas / Apave
GROUPEMENT : Horizon Grand Paris (Bouygues Travaux Publics, Soletanche Bachy, Bessac, Soletanche Bachy Tunnels)

ABSTRACT

A PERMANENT DIAPHRAGM WALL IN PLAIN CONCRETE ON THE SITE OF LINE 15 SOUTH OF THE 'GRAND PARIS EXPRESS' PROJECT

PAULINE CANTO, SOLETANCHE BACHY - MARION LE BATARD, SOLETANCHE BACHY - PAUL VIDIL, SOLETANCHE BACHY

Since February 2017, the Horizon consortium has been active on the site of work section T2A for Line 15 South of the 'Grand Paris Express' metro project. Project 1501P is a permanent escape and ventilation shaft consisting of a circular enclosure 1.20m thick and 19m in diameter, executed by the diaphragm wall technique by the Soletanche Bachy teams. This wall, which is the deepest of the five accessory structures of the work section (65 metres deep), is special in that it is not reinforced over 50% of its length. Such technical optimisation is possible thanks to the shaft's circular shape, the weak water thrust and loads applied to the wall, and the absence of groundwater at the bottom of excavation. □

UNA PANTALLA DE HORMIGÓN NO ARMADO DEFINITIVA EN LA OBRA DE LA LÍNEA 15 SUR DEL GRAND PARIS EXPRESS

PAULINE CANTO, SOLETANCHE BACHY - MARION LE BATARD, SOLETANCHE BACHY - PAUL VIDIL, SOLETANCHE BACHY

Desde febrero de 2017, el consorcio de empresas Horizon está movilizado en la obra del lote T2A de la línea 15 Sur del Grand Paris Express. El proyecto 1501P es un pozo definitivo de emergencia y ventilación, formado por un recinto circular de 1,20 m de espesor y 19 m de diámetro, realizado en pantalla de hormigón por los equipos de Soletanche Bachy. Esta pantalla de hormigón, la obra realizada a más profundidad (65 m) de las 5 construcciones anexas del lote, presenta la particularidad de no estar armada en el 50% de su recorrido. Esta optimización técnica ha sido posible gracias a la forma circular del pozo, a un empuje del agua y una cargas aplicadas a la pared débiles, así como a la ausencia de capa en el fondo de excavación. □

DALLE-SUPPORT DU BANC DE SOUDAGE DES RÉSERVOIRS D'ARIANE 6

AUTEURS : CÉCILE BABIN, INGÉNIEUR PRINCIPAL, TERRASOL - MICHEL LEVY, EXPERT, SETEC TPI

POUR LIMITER LE TEMPS DE RÉGLAGE DU BANC DE SOUDAGE QUI ASSEMBLE, ENTRE EUX, DES ÉLÉMENTS CYLINDRIQUES DE 5,4 m DE DIAMÈTRE ET DE 4 m DE LONGUEUR, TRÈS MINCES (2,5 mm) EN ALUMINIUM, POUR LES RÉSERVOIRS D'ARIANE 6, ARIANEGROUP A DEMANDÉ QUE LA DALLE-SUPPORT DE CE BANC AIT DES DÉFORMATIONS VERTICALES INFÉRIEURES À 50 MICRONS (0,05 mm) LORSQUE DES CHARGES MOBILES DE 60 t SE DÉPLACENT D'UN BOUT À L'AUTRE DES 52,9 m DE LA DALLE. L'ARTICLE DÉCRIT LES MÉTHODES UTILISÉES POUR Y PARVENIR MALGRÉ UN SOL DE FONDATION MÉDIOCRE.



INTRODUCTION

Setec-Bâtiment (filiale à 100 % du groupe Setec) a été chargée de la maîtrise d'œuvre du bâtiment de l'usine de production des éléments d'Ariane 6, située aux Mureaux (Yvelines), à 500 m de la Seine. Au sein de ce bâtiment

1 - Fosse des équipements de soudage.

1 - Welding equipment pit.

(N80), la dalle supportant la machine de production des réservoirs de carburant (banc de soudage) a fait l'objet d'une attention particulière.

Un réservoir cylindrique de carburant a une longueur de près de 30 m et un diamètre de 5,40 m. Il est en alumi-

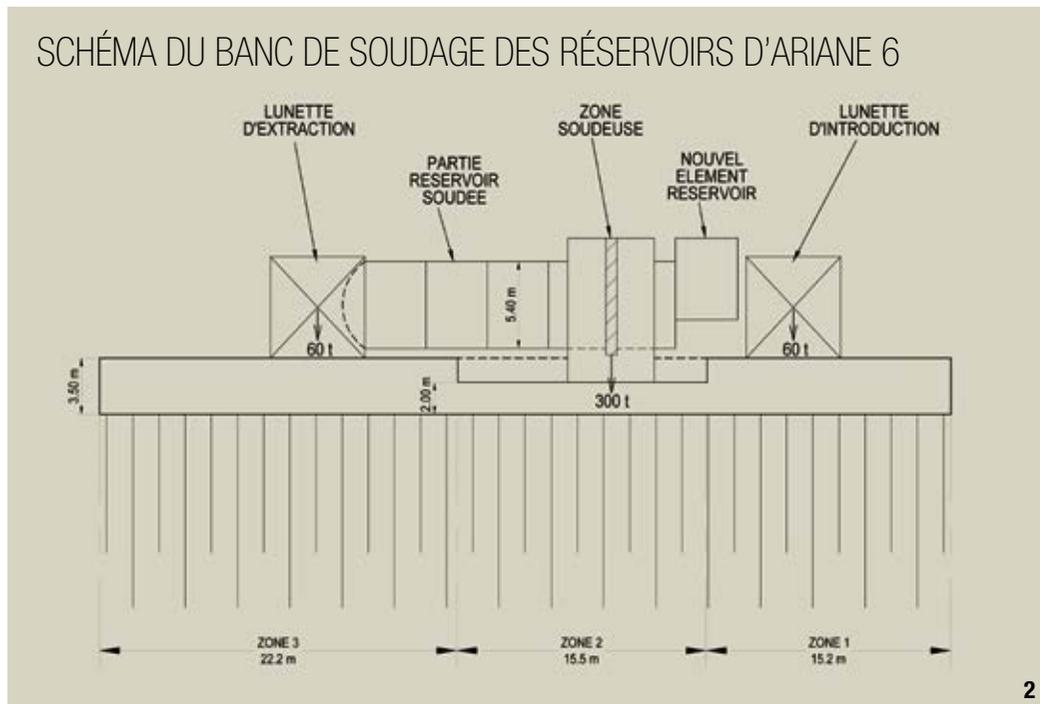
nium de très faible épaisseur pour être aussi léger que possible. Il est constitué d'éléments cylindriques de 4 m de longueur soudés entre eux sans métal d'apport, par la méthode FSW (Friction Stir Welding), et d'un élément de fermeture (fond) à chaque extrémité. ▷

La machine de production (figure 2) a une longueur d'une cinquantaine de mètres. Elle comporte 3 zones qui permettent d'assurer la cinématique des différentes pièces à souder, celles-ci étant supportées par des outillages très massifs (2 lunettes + zone de soudage) de sorte à garantir des positionnements très précis des pièces afin de réaliser leur soudage par la technique FSW (Friction Stir Welding). La masse totale de la machine de soudage est de la classe 300 t. Les différentes configurations conduisent à pouvoir déplacer les 2 lunettes (classe 60 t chacune) sur une distance de la classe 50 m concernant l'espacement maximal des lunettes c'est-à-dire sur toute la longueur de la dalle.

On conçoit donc que, si l'on veut éviter de régler, à chaque opération de soudage, l'ouverture d'un joint sur toute la circonférence du réservoir (opération qui demande beaucoup de temps sur la machine quasi-similaire qui sert actuellement à fabriquer les réservoirs d'Ariane 5), il est souhaitable que les tassements différentiels, se produisant entre les lunettes, soient très faibles lorsque les lunettes se déplacent depuis la position la plus proche de la soudeuse jusqu'à la position la plus éloignée, à l'extrémité de la dalle qui supporte la machine.

L'exigence la plus critique imposée à la dalle est que les déplacements verticaux locaux, au droit des lunettes et de la zone de soudage, ne dépassent pas quelques dizaines de microns : cette exigence découle des exigences de circularité imposées au réservoir (classe 1 mm) afin que celui-ci assure ses fonctions au sol et en vol.

Le constructeur de la machine de soudage a donc demandé que les tassements différentiels (ou déformations verticales) entre les lunettes, d'une part, et entre les lunettes et la zone de la soudeuse, d'autre part, soient inférieurs à 50 microns (0,05 mm), quelles que soient les positions de ces lunettes. La conception et la réalisation du bâtiment, du process et des machines se sont déroulées en parallèle afin de réduire le cycle global. En cours de projet, la conception initiale de la dalle (dalle en béton armé de 0,50 m d'épaisseur, fondée sur pieux) a été jugée incompatible avec l'exigence majeure de déformation, alors même que le béton de la dalle était prêt à être coulé. Il y avait donc nécessité de refaire les études et de modifier les méthodes de réalisation, sans modifier les délais prévus au départ, afin de ne



pas retarder le premier vol d'essai de la fusée Ariane 6.

CHOIX DE LA SOLUTION

Devant cette demande, inhabituelle dans le domaine des travaux publics où l'on travaille rarement avec une précision meilleure que le millimètre, Setec a réfléchi aux solutions qui pourraient permettre de respecter cette condition. Deux sortes de solutions pouvaient être envisagées :

→ Soit réaliser une dalle très épaisse (de l'ordre de 6 m), simplement posée sur le sol, quelle que soit la qualité de ce dernier. Une telle

2- Schéma du banc de soudage des réservoirs d'Ariane 6.

3- Vue en plan du banc de soudage des réservoirs d'Ariane 6.

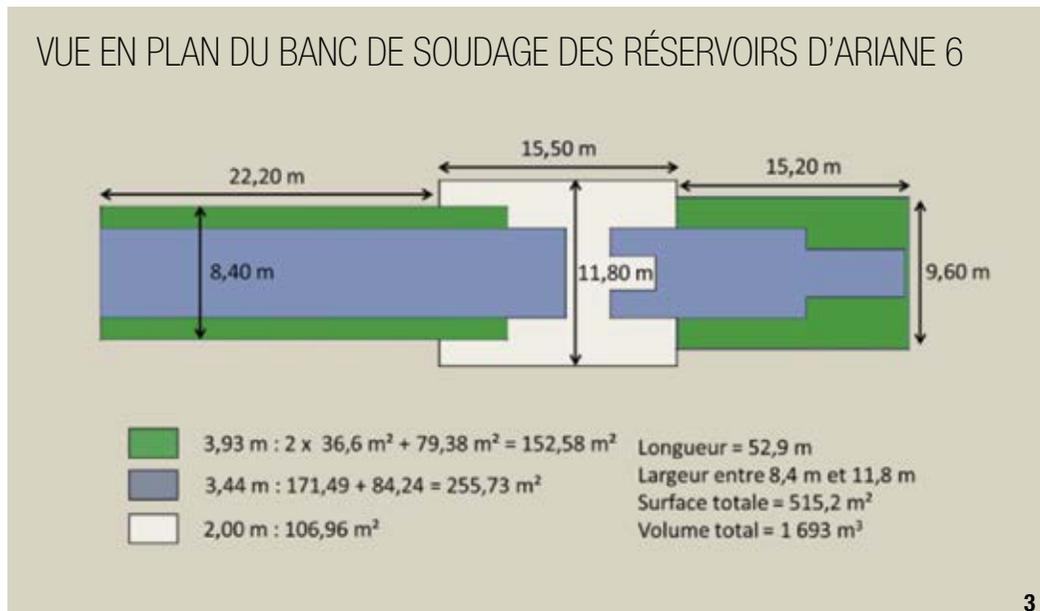
2- Diagram of welding bench for Ariane 6 fuel tanks.

3- Plan view of welding bench for Ariane 6 tanks.

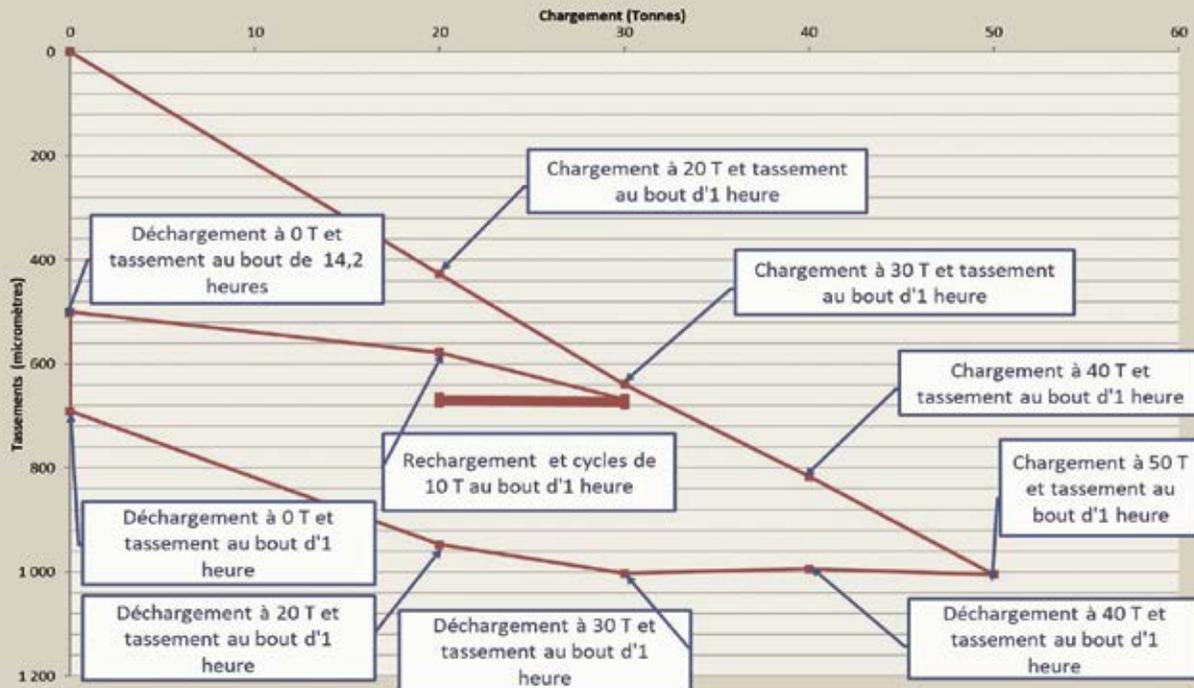
dalle peut tasser en restant plane, à quelques dizaines de microns près (même si elle ne reste pas horizontale, ce qui est acceptable).

→ Soit réaliser une dalle un peu moins épaisse, mais cependant de plusieurs mètres d'épaisseur, posée sur une fondation rigide (pieux si nécessaire).

Avant de faire le choix, Setec a informé le client qu'une variation de température de quelques degrés de l'air intérieur de l'usine suffisait à déformer la dalle de telle sorte que les différences de niveau entre les extrémités de la dalle et la zone de la soudeuse



MESURES D'UN ESSAI DE CHARGEMENT DE PIEU



© SETEC
4

dépassent les 50 microns. Celui-ci a demandé de ne pas tenir compte de cette variation thermique, dans la mesure où la température moyenne serait maintenue constante pendant la fabrication d'un réservoir et dans la mesure où la conception de la machine permettrait d'absorber une grande partie de la potentielle déformation "en arc" typique de la variation de la température.

Le chantier étant déjà lancé, il fallait aussi tenir compte des matériels que l'entreprise pouvait mettre en œuvre sans perte de temps, dans le respect du planning demandé ; de plus, le toit de l'usine étant déjà construit, on dis-

4- Mesures d'un essai de chargement de pieu.

5- Dispositif de chargement de l'essai de pieu.

6- Dispositif de mesure de l'essai de chargement.

4- Pile loading test measurements.

5- Loading device for pile test.

6- Loading test measuring device.

posait d'une hauteur limitée à 10 m au-dessus du plan de travail pour réaliser les fondations et l'enceinte de soutènement des bords de fouille.

La solution de la dalle très épaisse n'a pas été retenue, pour les raisons suivantes :

→ Le dessous de la dalle aurait été situé à 2,50 m sous le niveau de la nappe ;

→ Les précautions à prendre vis-à-vis de la RSI (réaction sulfatique interne) auraient augmenté les délais.

La solution d'une dalle moins épaisse (3,50 m environ), fondée sur pieux, utilisant la machine déjà sur place, a donc été retenue pour être étudiée (figure 3).

CONDITIONS DE SOL ET ESSAIS DE CHARGEMENT DE 3 PIEUX

Pour cette solution, le problème principal provenait des conditions défavorables de sol.

Depuis la surface, le sol comporte une couche de remblai compacté de 3,65 m d'épaisseur moyenne, d'assez bonne qualité (pression limite $p_l^* = 1$ MPa et module pressiométrique $E_m = 12$ MPa), mais d'épaisseur insuffisante pour fonder superficiellement une dalle moyennement épaisse, puis une couche d'alluvions modernes de 2,50 m d'épaisseur moyenne, de qualité médiocre ($p_l^* = 0,6$ MPa, ▷



© SETEC
5

6

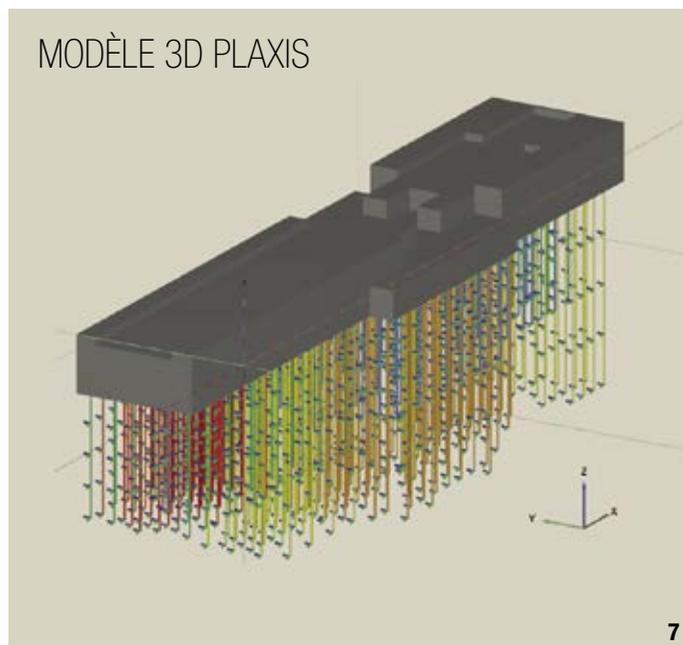
$E_m = 6$ MPa), puis une couche d'alluvions anciennes de meilleure qualité ($pl^* = 4,6$ MPa, $E_m = 46$ MPa), d'une dizaine de mètres d'épaisseur, dans laquelle on peut ancrer des pieux. En dessous, à environ 15 m de profondeur, on trouve une couche de craie dont la partie supérieure est de qualité médiocre ($pl^* = 1,7$ MPa, $E_m = 17$ MPa) et susceptible de fluer à long terme. À plus grande profondeur, on trouvait de la craie saine très résistante, mais la réalisation de pieux d'environ 30 m de longueur à partir de la surface, aurait été trop compliquée dans les conditions du chantier. Les caractéristiques géotechniques ci-dessus présentées ne sont qu'un extrait de l'ensemble des caractéristiques qu'il a fallu mesurer pour dimensionner un projet aussi exigeant. Une campagne de reconnaissance des sols dédiée, bien exécutée, suivie, avec des essais réalisés par des laboratoires compétents, a permis de caler les différents paramètres pour les nombreux modèles de calcul construits à l'avancement du projet. On pourra citer parmi eux : les essais à la colonne résonnante, pour déterminer les modules à très petites déformations, ou encore les essais de fluage de la craie, pour déterminer ses capacités à fluer à long terme.

La machine permettant de faire des pieux $\varnothing 42$ cm étant déjà sur place et ayant commencé à travailler pour l'ancienne solution, on a réalisé des essais de chargement de 3 pieux permettant d'établir une courbe de tassement en tête de pieu en fonction d'une charge croissante (figures 4, 5 et 6).

Ces essais ont montré que, pour des pieux ancrés dans les alluvions anciennes, le tassement de la tête de pieu sous charge, était de l'ordre du millimètre pour des charges habituelles (1 mm pour 30 t, ce qui est cependant, 20 fois plus que le tassement maximum requis). Heureusement, après un cycle de chargement-déchargement, le 2^e chargement produisait des tassements trois fois moindres, ce qui était encore beaucoup, par rapport aux 50 microns recherchés. Ces essais ont finalement montré que pour espérer satisfaire au critère des 50 microns, il ne faudrait pas faire supporter à des pieux de 42 cm de diamètre, ancrés dans les alluvions anciennes, des charges supérieures à 3 t.

CALCULS DE LA SOLUTION RETENUE

Setec, maître d'œuvre, et l'entreprise Sogea-Picardie (filiale de Vinci



Construction France) avec l'aide de son géotechnicien Structures Géotechnics, ont mené simultanément des calculs pour aboutir, aussi vite que possible, à une solution commune.

Terrasol (filiale à 100 % de Setec) a procédé, à l'aide du programme Plaxis, à des calculs successifs (figure 7) pour déterminer les tassements d'un radier modélisé comme un élément volumique fondé sur pieux, de 3,5 m d'épaisseur (épaisseur la plus grande possible, sans descendre sous le niveau de la nappe phréatique). Dans ces calculs, les diverses couches de sol sont introduites, ainsi que les pieux, de façon détaillée, en tenant compte des essais géotechniques pratiqués

sur les diverses couches de sols. Les résultats de ces calculs permettent de déterminer les ressorts qui pourront représenter l'ensemble (pieux + sol) dans le calcul détaillé de la structure

7- Modèle 3D Plaxis.

8- Pieux de fondation de la dalle-support.

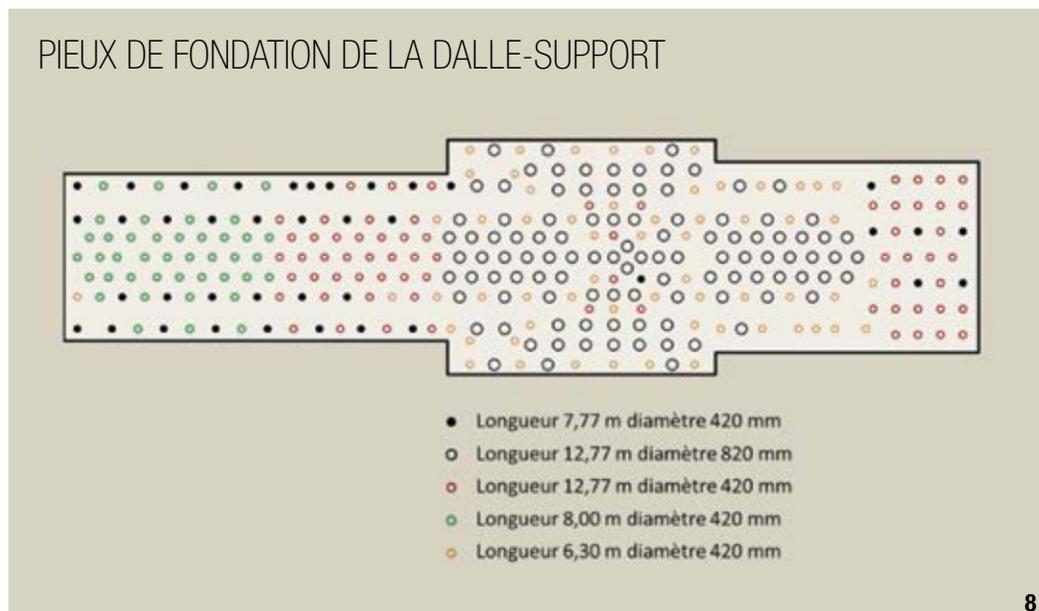
7- Plaxis 3D model.

8- Supporting-slab foundation piles.

de la dalle réalisé à l'aide du programme Pythagore de Setec tpi. Ce dernier calcul permettra de calculer, de façon détaillée, les déformations et contraintes en tout point de la dalle sous l'effet des surcharges placées en diverses positions. De plus, Pythagore permet de déterminer les modes propres de vibration de la structure et leur fréquence, ce qui devait s'avérer très utile pour le contrôle des déformations sous charges.

Les dimensions en plan de la dalle sont de 52,90 m en longueur et variables en largeur : 9,6 m dans la première zone (introduction), 11,8 m, dans la 2^e zone (soudeuse) et 8,4 m, dans la 3^e zone (extraction). À noter que l'épaisseur de la dalle est de 3,5 m dans les zones 1 et 3, mais que dans la zone 2 de la soudeuse elle n'est que de 2 m (figure 1).

Le calcul de Terrasol a montré qu'une solution à 5 files de pieux (au lieu de 3 en temps normal) ancrés dans les alluvions anciennes, pour la zone de 8,4 m, zone extrapolée au prorata de la largeur dans les 2 autres zones, aurait peut-être permis de respecter le critère extrêmement contraignant de tassement. Cependant, sans occulter le nombre et la qualité des essais réalisés ainsi que la précision exceptionnelle avec laquelle les calculs avaient été menés, l'enjeu calendaire et technique pour le maître d'ouvrage était tel que l'entreprise Sogea-Picardie (qui ne voulait prendre aucun risque sur le respect de ces exigences) a rajouté, avec l'accord du maître d'œuvre, plusieurs pieux, en a remplacé d'autres, par des pieux de 82 cm de diamètre et en a



allongé plusieurs à 12,8 m, ce qui l'a obligée à amener une machine supplémentaire pour les réaliser dans le court délai nécessaire. En fin de compte, sur les 315 pieux, 105 ont un diamètre de 82 cm ; 174 d'entre eux ont une longueur de 12,77 m au lieu de 8 m (figure 8).

Il était prévu également, en fin de construction du génie civil, un pré-chargement pour limiter les tassements lorsque la machine commencerait à fabriquer des réservoirs (analogie avec le 2^e cycle de chargement-déchargement des essais de pieux).

RÉALISATION

La réalisation s'est bien passée.

Le bétonnage a été réalisé en 3 couches successives, ce qui était favorable vis à vis de la RSI : 2 couches de 1,5 m d'épaisseur environ, puis une dernière couche de 35 cm pour y disposer le ferrailage de surface et les inserts nécessaires pour les différents équipements à venir. Dans la zone de la soudeuse où l'épaisseur de la dalle n'est que de 2 m, il y a eu seulement deux couches. La qualité du béton a été soignée.

Juste au moment du premier bétonnage, la Seine a été en crue et il faisait froid ; la nappe est remontée jusqu'à une dizaine de centimètres au-dessus du fond de fouille ; il a donc fallu pomper localement quelques flaques mais dès que le niveau du béton frais est monté, il n'y a plus eu de problème. Cela a justifié, a posteriori, que l'on n'ait pas retenu la solution de dalle de 6 m d'épaisseur.

Le pré-chargement de 1300 t a été réalisé avec des cubes en béton de 80 cm de côté, aisément manipulables pour la mise en place et l'enlèvement, par le pont roulant qui était déjà installé (figure 9).



9
© SETEC

9- Pré-chargement de la dalle.

9- Slab preloading.

CONTRÔLE DU RÉSULTAT

Le fournisseur de la machine pensait avoir le moyen de mesurer les déformations globales de façon très précise

une fois que la machine serait en place, ou, encore mieux, lorsque la fabrication serait commencée. Mais pour vérifier les déformations de la dalle sous surcharges, avant le montage de la machine, aucun géomètre ou topographe ne s'est déclaré en mesure de le faire, à ce moment-là.

Une solution a cependant été trouvée pour vérifier les ordres de grandeur des

déformations. En effet, en faisant les calculs à l'aide du programme Pythagore, Setec tpi a remarqué que la fréquence des modes propres de vibration de la dalle augmentait significativement lorsque la rigidité de la dalle augmentait, même faiblement.

La société H2R (expert industriel en machines-outils de grandes dimensions et systèmes intégrés), qui assistait le client pour cette usine, a réalisé, avec l'appui de son sous-traitant Apave, la mesure des fréquences des principaux modes propres (sans faire appel à un exciteur, en utilisant les excitations qui se transmettent par le sol en provenance de diverses sources environnantes). Apave a mesuré, pour le premier mode vertical (le plus important), une fréquence de 18 Hz. Le calcul que Setec tpi avait fait préalablement avec son programme Pythagore et les raideurs du support (sol + pieux) résultant des calculs Plaxis de Terrasol, donnait 17 Hz. Certes, dans le calcul, il avait fallu faire une hypothèse sur le module dynamique de déformation du béton qui est mal connu en l'absence de mesures spécifiques. Cependant, cette mesure a rassuré sur le fait que l'on avait atteint un ordre de grandeur de rigidité de la dalle et de sa fondation compatible avec le calcul qui aboutissait au respect des critères de tassement.

De fait, après l'installation de la machine (mais avant que la fabrication n'ait commencé), le constructeur a pu constater que le tassement maximal sous la surcharge mobile de 60 t respectait bien l'exigence de 50 microns. Depuis que la fabrication a commencé, le développement de cette machine-prototype a, bien sûr, rencontré des défauts de jeunesse, mais l'industrialisation avance rapidement et la déformabilité de la dalle support n'a jamais été mise en question. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : ArianeGroup

AMO : H2R

MOE : Setec-group (Setec-Bâtiment, Terrasol, Setec tpi)

ENTREPRISE : Sogea-Picardie (filiale de Vinci Construction France) avec Structures Geotechnics

ABSTRACT

SUPPORTING SLAB FOR THE WELDING BENCH FOR THE ARIANE 6 FUEL TANKS

CÉCILE BABIN, TERRASOL - MICHEL LEVY, SETEC TPI

In the new Les Mureaux plant which will produce the components of the Ariane 6 rocket, ArianeGroup asked the project manager (Setec) to co-design with Sogea-Picardie (which will produce it) a slab 52.9m long and 8.4m to 11.8m wide which is not compressed by more than 50 microns (0.05mm) under a moving load of 60 tonnes placed at any point on the slab. After numerous tests performed on a rather unsuitable floor and numerous calculations for which Setec used the Plaxis software for geotechnics and Pythagore for the structure, the project resulted in a reinforced concrete slab 3.5 metres thick, with multiple-pile foundations, which meets this unconventional criterion. □

LOSA-SOPORTE DEL BANCO DE SOLDADURA DE LOS DEPÓSITOS DEL ARIANE 6

CÉCILE BABIN, TERRASOL - MICHEL LEVY, SETEC TPI

En la nueva fábrica de Les Mureaux, que fabricará los componentes del cohete Ariane 6, ArianeGroup solicitó al contratista (Setec) que codiseñara con la empresa Sogea-Picardie, responsable de la realización, una losa de 52,9 m de longitud y de 8,4 a 11,8 m de anchura que no se asiente más de 50 micras (0,05 mm) bajo una carga móvil de 60 toneladas colocada en cualquier punto de la losa. Tras muchas pruebas realizadas en un suelo poco favorable y numerosos cálculos, para los cuales Setec utilizó los programas Plaxis para la geotécnica y Pythagore para la estructura, se ideó una losa de hormigón armado de 3,5 m de espesor sustentada sobre numerosos pilotes, que cumple con este inusual criterio. □



© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

LE REGINA BYPASS - REMBLAIS DE GRANDE HAUTEUR EN SASKATCHEWAN

AUTEURS : HUBERT LE MIERE, DIRECTEUR DE TRAVAUX, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT -
YANN MARTINOL, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

LA DÉVIATION DE L'AUTOROUTE TRANSCANADIENNE HIGHWAY 1, AUTOUR DE REGINA, CAPITALE DE LA PROVINCE DE LA SASKATCHEWAN AU CANADA, MOBILISE L'EXPERTISE DE VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT POUR LA RÉALISATION DE REMBLAIS DE GRANDE HAUTEUR CONSTRUITS SUR (ET AVEC) LES ARGILES GLACIAIRES DE REGINA (REGINA CLAY). CES TERRASSEMENTS ONT ÉTÉ REQUIS POUR LA CONSTRUCTION DES 32 PONTS ET OUVRAGES DE FRANCHISSEMENT DE CETTE NOUVELLE AUTOROUTE 2x2 VOIES DE 65 km, DÉBUTÉE EN JUILLET 2015 ET MISE EN SERVICE EN OCTOBRE 2019 POUR DÉLESTER ET SÉCURISER LE PÉRIPHÉRIQUE EXISTANT DE LA VILLE DE REGINA.

Saskatchewan, "*the land of the living skies*", ainsi est surnommée cette province des prairies de l'Ouest canadien, voisine du Manitoba et de l'Alberta (figure 2).

Ce plat pays, situé entre le bouclier canadien et les montagnes Rocheuses a un climat continental assez sec, connaît des hivers rudes et des étés

chauds. Si la température moyenne annuelle est de +1,8°C, les températures extrêmes atteignent régulièrement -40°C sous abri en hiver. En moyenne, il gèle 240 jours par an dans ces prairies (55 jours à Paris). Les précipitations sont faibles en quantité, de l'ordre de 390 mm annuel (640 mm à Paris). La topographie de ce terrain quasi plat

1- Regina Bypass.

1- Regina Bypass.

et la nature argileuse des sols de surface ne facilitent pas l'évacuation des eaux de pluie. Les eaux stagnent en surface au dégel et s'évaporent finalement grâce au vent, ou alors vont alimenter l'un des quelque 100 000 lacs de la Saskatchewan.

Une bande de 350 km le long de la frontière avec les États-Unis regroupe

l'essentiel des 1,2 million d'habitants qui peuplent cette vaste province, plus grande que la France, dont l'économie est portée par les céréales et les industries minière et forestière. Regina, la capitale de la province, située au centre de cette zone de prairies est un important nœud routier et ferroviaire traversé par l'autoroute transcanadienne, cordon ombilical de l'infrastructure autoroutière fédérale du Canada.

Le projet de contournement autoroutier de Regina (Regina ByPass) permet de délester la périphérie de la ville des trafics poids lourds est/ouest le long de l'autoroute transcanadienne HW1 et du trafic nord/sud sur les autoroutes HWY11 et HWY6 en direction respectivement de Saskatoon au nord, capitale économique de la Province et des États Unis au sud. Il permet également de sécuriser les commutations urbaines sur les 20 km de la section Est de la voie rapide en remplaçant les carrefours à niveau (standard autoroutier canadien en rase campagne) par des échangeurs dénivelés et faire ainsi baisser l'accidentologie importante, notamment chez

les jeunes conducteurs. Le projet est mené dans le cadre d'un contrat de partenariat public privé (PPP) qui comprend le financement, la conception, la construction, puis l'opération et la maintenance pour une durée de 30 ans de cette nouvelle infrastructure. Il est livré par un groupement d'entreprises françaises, canadiennes et américaines emmenées par Vinci Concessions pour le compte du Ministère de la Voirie et des Infrastructures de la Saskatchewan (Ministry of Highways and Infrastructure - MHI). Le coût de l'opération s'élève à 800 millions d'euros pour la phase construction. Débutées le 29 juillet 2015, la conception et la

construction de l'infrastructure ont été réalisées en 51 mois. La section Est, prioritaire pour le client, a été conçue et livrée en moins de 28 mois.

UN MOUVEMENT DES TERRES TRÈS DÉFICITAIRE EN REMBLAIS

L'absence de dénivelé et d'écoulements naturels rendent ces grandes plaines sujettes aux inondations, lorsque le dégel se combine à un printemps pluvieux. Ainsi :

→ Les parties supérieures des terrassements (PST) de la nouvelle autoroute doivent être hors d'eau pour les niveaux d'inondation centennaux ;

→ Les dénivellations nécessaires aux franchissements des obstacles (voies ferrées, routes secondaires et cours d'eau) doivent être réalisées en remblais et non en déblais.

Aussi pour un besoin de remblai de 14,4 millions de m³ de matériaux, le mouvement des terres fait apparaître un déficit de 11,7 millions de m³, nécessitant la création d'emprunts de matériaux à proximité du tracé.

2- Localisation du chantier et aperçu des plaines de la Saskatchewan.

2- Project location and general view of the Saskatchewan plains.

DES REMBLAIS DE 19 m DE HAUTEUR SUR SOLS COMPRESSIBLES, UNE PREMIÈRE EN SASKATCHEWAN

Les terrassements comprennent 16 obstacles principaux à franchir avec des rampes en remblais de hauteur supérieure à 10 m, dont un échangeur particulier à double dénivellation, nécessitant la construction d'un remblai exceptionnel de 19 m de haut. De tels ouvrages n'avaient encore jamais été réalisés sur les sols compressibles de la Saskatchewan, compte tenu notamment des matériaux disponibles localement et des contraintes climatiques. Afin de pouvoir livrer l'opération dans les délais prévus, des dispositions constructives particulières ont dû être mises en place pour :

- Assurer la continuité des travaux de terrassement en période hivernale ;
- Maîtriser les risques d'instabilité à court terme des sols supportant les remblais ;
- Accélérer les tassements aux abords des ouvrages d'art ;
- Prendre en compte la susceptibilité au gel et au gonflement/retrait des argiles de Regina dans la dimensionnement des corps de chaussées.

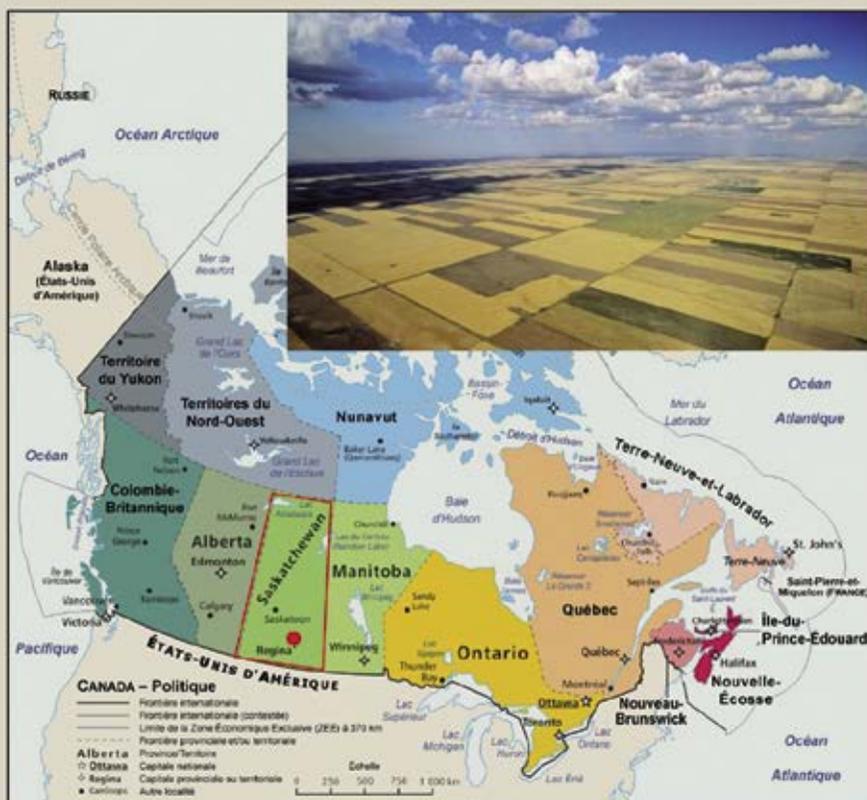
TRAVAILLER DES SOLS AVEC DES INDICES DE PLASTICITÉ (IP) DE 40% À 60%

Le substrat rocheux autour de Regina se compose de schistes argileux du Crétacé supérieur, principalement composés d'argiles montmorillonites grises fortement consolidées. Ce substratum rocheux se trouve à une profondeur variable de 30 à 60 m. Durant le Pléistocène, la glace, de plusieurs kilomètres d'épaisseur, recouvrait la région. En conséquence, le till glaciaire recouvre immédiatement le schiste, lui-même recouvert de limons et d'argiles lacustres (Regina Clay, figure 3). Cette couche de surface en argile de Regina a une épaisseur variable, de 10 à 15 m d'épaisseur.

Les rivières souterraines courant sous les glaciers ont créé des zones de passages hydrauliques avec accumulation de poches de sables et de silts, situées généralement sous les tills, dont la qualité et l'homogénéité sont très variables localement.

Dans une même zone d'emprunt, on peut rencontrer des poches de silt impropres à la construction ou des sables, graviers, parfois très propres, idéaux pour la réutilisation en couche de forme ou comme matériaux de remblais drainant des massifs en sol renforcé des culées des ouvrages d'art. ▷

LOCALISATION DU CHANTIER ET APERÇU DES PLAINES DU SASKATCHEWAN





Ces poches de sables sont souvent saturées d'eau et, en fonction de l'arrangement des tills et de la partie supérieure des schistes argileux, peuvent former des nappes perchées et créer des conditions artésiennes localement.

Le minéral d'argile de montmorillonite est connu pour être potentiellement gênant pour ses caractéristiques élevées de retrait/gonflement et pour sa faible résistance de cisaillement.

Le gonflement et le retrait alternatifs en fonction de la présence d'eau sont visibles sur les routes de la Saskatchewan qui sont souvent fissurées ou déformées. Les argiles de Regina sont des matériaux classifiés A4 au sens du Guide technique des Terrassements Routiers (GTR) et donc a priori difficilement réutilisables, tandis que les tills, sont des matériaux de type A2-A3 au sens du GTR suivant les gisements, et donc réutilisables dans des conditions de teneur en eau maîtrisées (figure 4). Des matériaux granulaires susceptibles de fournir les agrégats pour les bétons et couches de chaussées sont localisés dans des dépôts morainiques glaciaires affleurants situés à plus de 100 km du chantier.

STRUCTURES DE CHAUSSÉES

Afin de minimiser l'exposition des PST au gel/dégel et de contrer les potentiels effets de gonflement/retrait des matériaux de terrassement les moins performants par effet de poids, les chaussées intègrent (figure 5) :

- Une pente transversale minimum de 3% sur les PST ;
- Une couche de forme en sable non traité de 60 à 70 cm d'épaisseur (Sand Granular Subgrade - SGSG, figure 6) ;
- Une couche de fondation en grave concassée ;

→ Une couche de base en béton bitumineux à module élevé, formulée pour conserver des performances de souplesse acceptables en service à -40°C ;

→ Une couche de liaison + roulement en enrobés avec bitume modifié, étudiée pour résister au mieux aux cycles de gels dégelés et à l'abrasion des sels/sables de déverglaçage hivernal.

Enfin, les élévations minimales des PST sont définies en fonction des cotes de plus hautes eaux centennales pour maintenir hors d'eau les arases de terrassement en tout temps.

REMBLAIS DE GRANDE HAUTEUR

Au démarrage de l'opération et durant 6 mois, le groupement a activement recherché des terrains adjacents à

3- Aération des argiles pour les ramener à la teneur en eau spécifiée.

4- Caractéristiques et profondeur des matériaux de terrassement autour de Regina.

3- Aeration of the clays to bring them to the specified water content.

4- Properties and depth of earthworks materials around Regina.

l'emprise des travaux et procédé à leur acquisition afin de sécuriser les matériaux pour les 11,7 millions de m³ de matériaux de remblais d'apport nécessaires aux travaux.

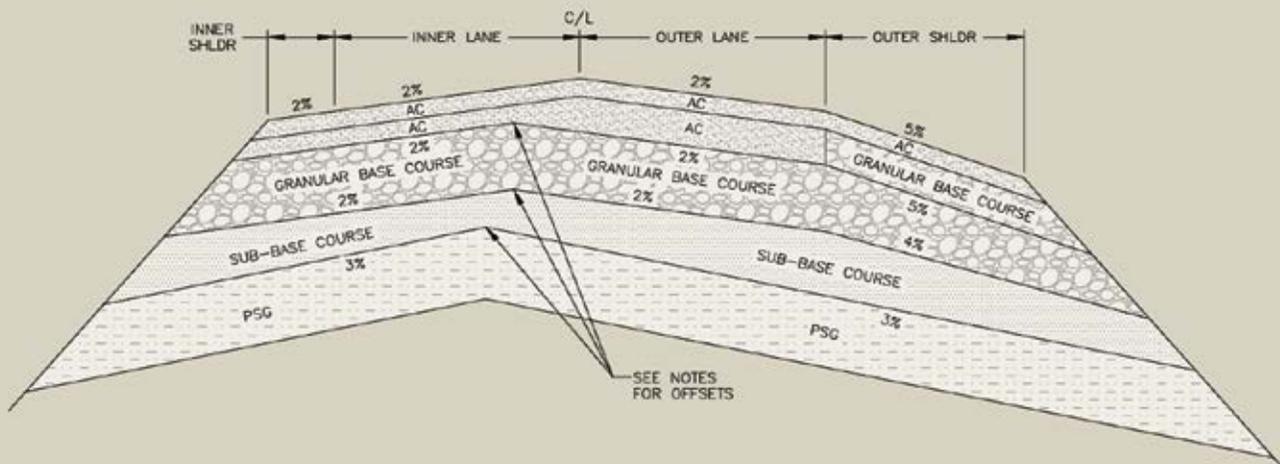
Ces emprunts ont été sélectionnés en fonction de :

- 1- La possibilité de négocier avec les propriétaires l'achat des terrains, ou des accords d'extraction de matériaux sur ces terrains privés à des prix compatibles avec les hypothèses d'étude ;
- 2- La proximité de ces terrains avec les différents échangeurs à construire ;
- 3- La qualité, la teneur en eau naturelle, proche de l'optimum Proctor, et l'homogénéité des sols présents au droit de ces terrains, vérifiée par des campagnes géotechniques complémentaires.

CARACTÉRISTIQUES ET PROFONDEUR DES MATÉRIAUX DE TERRASSEMENT AUTOUR DE REGINA

Test	Regina Clay	Till	TN = 0,00	
Granulométrie			Regina Clay	Regina Clay
	% Gravier	0%	4.5%	-15m (+/-5m)
	% Sable	8%	29.4%	var
	% Silt	41%	35.1%	var
Argilosité (Limite d'Atterberg)			Sable	Till
	Limite de liquidité	75,5%	34,2%	var
	Limite de plasticité	24,9%	19,4%	-40m (+/-10m)
Composition minéralogique	Indice de plasticité	50,6%	14,8%	
	Montmorillonite	77%	VAR	Schistes
	Illite	15%	VAR	Schistes
	Kaolinite	8%	VAR	

SECTION TYPE DE CHAUSSÉE



© MHI 5

Les argiles de Regina (A4) de surface issues de ces emprunts sont utilisées pour construire le noyau des remblais de grande hauteur. Leur extraction permet d'accéder au till (A2-A3) qui est, lui, utilisé pour encager ces noyaux argileux. Les deux matériaux sont soigneusement liés entre eux par la construction de redans de 0,50 m de hauteur lors de leur mise en œuvre (figure 7). La teneur en eau idéale de mise en œuvre des argiles de Regina est de 1% à 2% au-dessus de l'optimum Proctor. La mise en œuvre en dessous de l'op-

5- Section type de chaussée.

6- Extraction du sable pour couche de forme dans l'emprunt Nord.

5- Typical cross section of roadway.

6- Extraction of sand for capping layer in the North borrow area.

timum est à proscrire car elle favorise la fissuration par retrait, ce qui crée des cheminements préférentiels pour l'eau et rend le matériau sujet au gonflement en période de pluie/dégel.

Ces dispositions appliquées systématiquement sur tous les remblais de plus de 6 m de hauteur ont permis de réaliser des pentes de remblais stables (4H:1V) et d'obtenir des arases terrassement de qualité acceptable en till (A2-A3), tout en maximisant la réutilisation des matériaux A4 moins performants.

Stabilité des remblais en phase construction et maîtrise des tassements

Afin d'éviter la rupture des sols supports et de maîtriser les tassements admissibles dans les délais de construction imposés par le planning de l'opération, le suivi en phase construction de la stabilité des ouvrages en terre de hauteur supérieure à 6 m est impératif. Il nécessite la mise en place d'une instrumentation appropriée, une modélisation poussée des temps de tassements attendus au droit des ouvrages, ainsi que des mesures d'accélération le cas échéant.

Instrumentation des remblais

L'instrumentation consiste en des piézomètres à corde vibrante pour la mesure des pressions interstitielles, des inclinomètres, des tassomètres, accompagnés aussi de repères topographiques pour les mesures de déplacement et le suivi des tassements (figure 8).

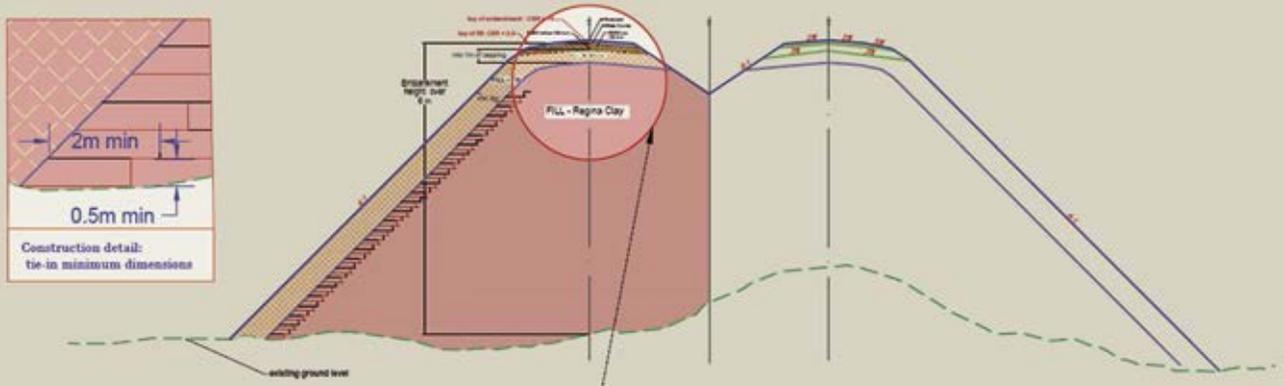
CALCULS PRÉDICTIFS DE TASSEMENT

Une campagne géotechnique complémentaire a permis un niveau d'acquisition de données suffisant pour une modélisation géotechnique fine des remblais et sols supports. Une note de calcul de stabilité et d'estimation des tassements est produite pour tous les remblais dépassant 6 m de hauteur sur la base de ces modèles. Ces notes produites par les bureaux d'étude géotechnique sont utilisées par les équipes en phase construction et les tassements compatibles avec les conditions de service des chaussées, au droit des ouvrages d'art.



© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT 6

ENCAGEMENT DES ARGILES DE REGINA A4 PAR DES TILLS A2-A3 sur les remblais de grande hauteur

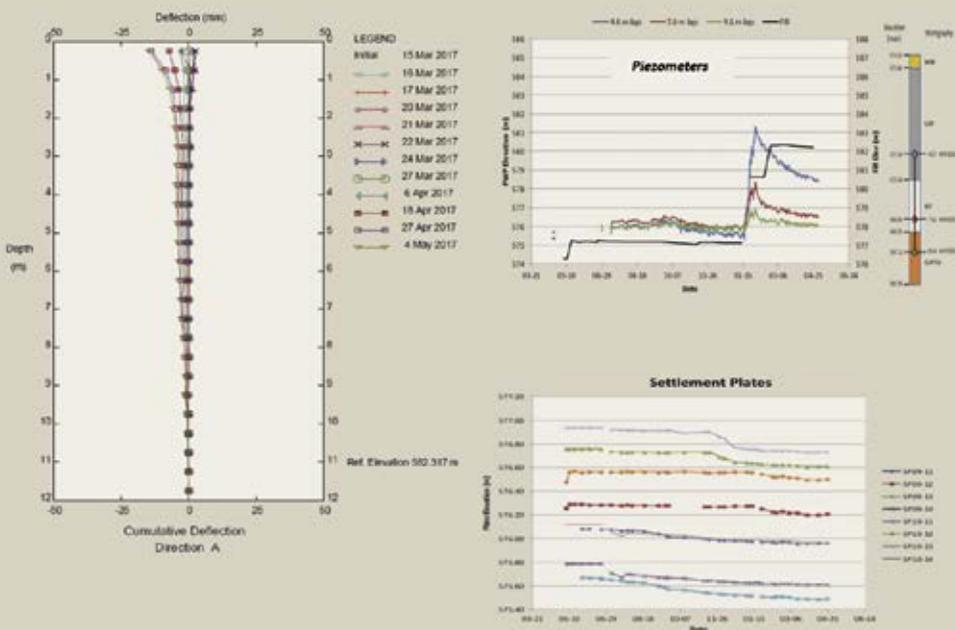


7

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

EXEMPLE DE LECTURE DE DONNÉES

Inclinomètre (à gauche), piézomètre (en haut à droite), tassements (en bas à droite)



8

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

7- Encagement des argiles de Regina A4 par des tills A2-A3 sur les remblais de grande hauteur.

8- Exemple de lecture de données - inclinomètre (à gauche), piézomètre (en haut à droite), tassements (en bas à droite).

7- Caging of Regina A4 clays with A2-A3 tills on the very high embankments.

8- Example of data reading - inclinometer (on the left), piezometer (at the top right), compression (in the bottom right).

Elles déterminent donc à la fois l'ordonnement des travaux et les méthodes constructives.

DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES ET ORDONNANCEMENT DES TRAVAUX

Pour la section Est, fortement contrainte par le planning, un programme de pré-chargement, associé à un réseau de drains verticaux, est mis en œuvre systématiquement sur tous les remblais de hauteur supérieure à 6 m pour forcer la réalisation des tassements pendant la durée du chantier. Le fonctionnement des drains verticaux dans les argiles de

Regina a permis de monter les remblais très rapidement, grâce à la dissipation accélérée des pressions interstitielles en phase travaux. Pour les sections Sud et Ouest, pour lesquelles le projet disposait d'un délai de construction de plus de 4 ans, les modèles géotechniques de tassements ont permis d'utiliser des solutions de pré-chargement sans mise en place de drains verticaux. Une permutation des échelons entre les différents remblais de grande hauteur a permis de diminuer la vitesse moyenne de montée de chaque remblai, favorisant les dissipations de pression tout en maintenant des cadences de pro-

duction élevées pour l'ensemble de l'opération. Ce phasage a permis à la fois d'éliminer les risques de rupture des sols supports à court terme, en maintenant en tout temps les valeurs de pression interstitielle mesurées sous les valeurs admissibles calculées et de dégager des délais de 6 mois à un an pour laisser agir les surcharges d'accélération des tassements avant la construction des chaussées.

TERRASSEMENTS HIVERNAUX ENTRE -10°C ET -40°C

Un programme de terrassements hivernaux a été mis en place pour dégager

les délais nécessaires aux temps de consolidation des hauts remblais et respecter les contraintes du calendrier des travaux. Débuté dans des conditions de gel très sévères de l'hiver 2016/2017, et grâce à l'expérience de nos partenaires canadiens, ce programme a permis de réaliser des remblais de grande hauteur dans des conditions de température variant entre -10°C et -40°C, en travaillant le matériau "à chaud" (figure 9). À l'instar de l'application des enrobés, le principe de ces travaux atypiques consiste à découvrir dans l'emprunt la partie superficielle et gelée des matériaux,



© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

9

pour aller chercher le sol "chaud" (non gelé), puis à le transporter, le mettre en œuvre et le compacter rapidement avant qu'il ne soit saisi par le gel.

Cette technique nécessite une activité continue, 7 jours sur 7, 24h sur 24, des équipes de terrassement (figure 10). Il est également nécessaire d'avoir au préalable identifié dans les emprunts des zones de plusieurs millions de m³ à teneur en eau naturelle proche de l'optimum.

Ces méthodes de construction de grands remblais hivernaux ne peuvent pas s'appliquer pour des travaux de déblais/remblais de faible volume

9- Sol "fumant" à l'extraction dans l'air glacé du matin.

10- Garder le matériau chaud de jour comme de nuit à -30°C / -40°C.

9- "Fuming" soil upon extraction in the icy morning air.

10- Keeping the material hot day and night at -30°C/-40°C.

et nécessitent des conditions de gel continues de 2 à 3 mois minimum. Les surcoûts de production engendrés par les conditions d'extraction et de mise en œuvre hivernales (dont un échelon supplémentaire pour la découverte des matériaux gelés) sont plus que compensés par l'amélioration des conditions de traficabilité sur les pistes gelées, avec un impact fort pour les distances de transport excédant 3 km : les pistes très résistantes (gel jusqu'à 2 m de profondeur) et l'absence totale d'eau liquide pendant plus de 4 mois sur le chantier facilitent considérablement la tâche du terrassier pour la maintenance

de ses pistes et la circulation de ses engins (figure 11).

Lors de la montée des remblais, un certain volume de matériau gèle à chaque interface entre les couches malgré le travail en continu. Afin d'observer le comportement de ces remblais au dégel, des thermomètres ont été installés pour mesurer les températures des matériaux au cœur de ces remblais. Ces thermomètres ont montré au printemps une température positive des sols sur la hauteur totale des remblais, y compris sur les couches partiellement gelées en surface après compactage. Du fait de l'activité continue, on constate donc que la quantité de chaleur emmagasinée dans les sols au moment de leur mise en œuvre est suffisante pour réchauffer les plus faibles quantités de matériaux gelés emprisonnés dans les remblais.

CAS PARTICULIER DU REMBLAI DE 19 m SUR L'ÉCHANGEUR À DOUBLE NIVEAU DE L'AUTOROUTE HW1 OUEST

L'échangeur comprend 7 ouvrages d'art et permet de raccorder à 110 km/h, en 2x2 voies, le nouveau contournement de Regina et l'autoroute transcanadienne HWY1. Afin d'optimiser le tracé et de s'affranchir d'un viaduc de 400 m pour la bretelle supérieure autorisant le mouvement de l'ouest (Calgary) vers le nord (Saskatoon), le constructeur a opté pour la construction de 2 ouvrages de 120 m de portée, reliés par un remblai de 19 m de haut et 160 m de long. Ce remblai comprend un mur de soutènement de 9 m de haut côté Nord, ▷



© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

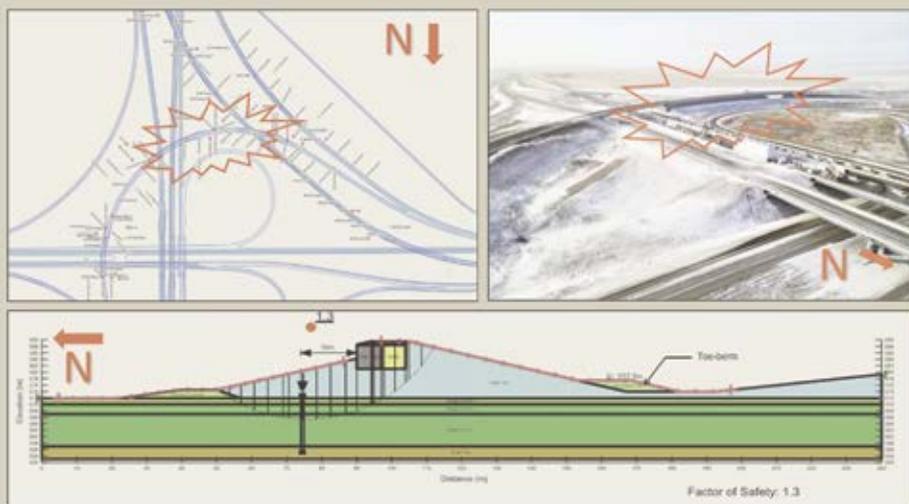
10



© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

REMBLAI DE 19 m ET SOUTÈNEMENT EN TERRE ARMÉE

sur l'échangeur HW1 Ouest, plan et position de l'instrumentation, coupe en travers avec position des butées de pied et pieux de stabilisation



12

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

11- Tombereau rigide CAT 77 à pleine vitesse sur les pistes durcies par le gel.

12- Remblai de 19 m et soutènement en terre armée sur l'échangeur HW1 Ouest, plan et position de l'instrumentation, coupe en travers avec position des butées de pied et pieux de stabilisation.

13a- Évolution des coefficients de sécurité de stabilité du remblai en fonction des pressions interstitielles.

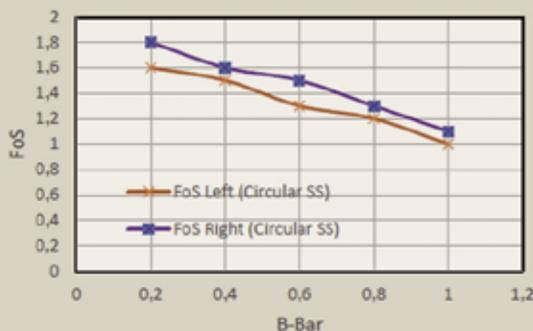
11- CAT 77 rigid dumper at full speed on tracks hardened by frost.

12- 19m embankment and retaining structure in reinforced earth on the HW1 West interchange, map and position of instrumentation, cross section with position of base anchors and stabilising piles.

13a- Evolution of embankment stability safety factors as a function of interstitial pressures.

ÉVOLUTION DES COEFFICIENTS DE SÉCURITÉ DE STABILITÉ DU REMBLAI en fonction des pressions interstitielles

A. Short Term (Effective Stress Analysis)		
B - Bar	FoS (Left side)	FoS (Right Side)
0,2	1,6	1,8
0,4	1,5	1,6
0,6	1,3	1,5
0,8	1,2	1,3
1,0	1,0	1,1



13a

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

fondé sur 10 m de remblai traditionnel (figure 12).

Les équipes ont décidé pour cet ouvrage de démarrer les remblais sans mise en place préalable de drains verticaux, avec un point d'arrêt à +6 m, pour déterminer, en fonction de la réponse réelle des sols supports au chargement, de la meilleure solution constructive.

Cette approche a permis d'estimer précisément l'évolution des pressions interstitielles grâce aux premières données mesurées in situ lors de la montée du remblai de 0 à 6 m. Les mesures ont confirmé que les délais de construction des 13 m de remblai et soutènement restants n'étaient pas compatibles avec le planning de l'opération.

Le recours à un remblai allégé a été envisagé, mais la présence du mur de soutènement en terre armée en partie supérieure de ce remblai, requérant des paramètres de friction élevés pour les matériaux de remblai de ce mur, ainsi que le coût d'un remblai de type Cématix, ont orienté l'équipe vers une autre solution. La nouvelle solution développée vise à :

- Agir directement sur les pressions interstitielles admissibles à court terme au sein du sol support ;
- Dégager du temps pour mettre en place une surcharge de 2 m en tête pour l'accélération des tassements à long terme et homogénéiser des tassements entre la zone de soutènement Nord et la zone de talus Sud.

ÉVOLUTION DES COEFFICIENTS DE SÉCURITÉ DE STABILITÉ DU REMBLAI en fonction des pressions interstitielles après exécution des butées de pied et installation des pieux

Short Term		
B - Bar	FoS (Left side with piles)	For (Right Side with toe-berm)
1,0	1,3	1,3
0,8	1,5	1,5
0,6	1,9	1,7

13b

Le coefficient de sécurité pour la stabilité en phase construction de ce remblai de 19 m a été calculé pour différentes valeurs de pression interstitielle. Les résultats de ces calculs sont présentés en figure 13a.

Pour augmenter ces pressions admissibles, la solution retenue a été de renforcer/buter les sols supports en pied de remblais par la mise en place de pieux en H battus côté Nord, et d'un remblai d'épaulement additionnel côté

13b- Évolution des coefficients de sécurité de stabilité du remblai en fonction des pressions interstitielles après exécution des butées de pied et installation des pieux.

13b- Evolution of embankment stability safety factors as a function of interstitial pressures after execution of the base anchors and installation of the piles.

Sud (figure 12). Ces pieux viennent couper le cercle de rupture des sols supports et permettent d'augmenter la pression interstitielle admissible de 0,6 bars à 1 bar comme indiqué sur la figure 13b. Cette solution a permis de diviser par trois le temps de construction de ces remblais puis de conserver 10 mois durant une surcharge de 2 m en tête et livrer dans les temps cet ouvrage en terre exceptionnel.

En novembre 2020, le projet s'est vu attribuer la médaille d'or des projets d'infrastructure par le conseil canadien des PPP, récompensant la capacité d'innovation et l'excellence d'exécution de tels projets au niveau national. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

TERRASSEMENT / CHAUSSÉES

EMPRISE DES TRAVAUX : 1 320 ha

DÉBLAIS MIS EN REMBLAIS : 2 720 860 m³

REMBLAIS D'APPORT : 11 678 850 m³

COLLECTEURS EP : 22 740 m

SABLE NON TRAITÉ : 3 959 480 t

GRAVE CONCASSÉE : 1 308 480 t

ENROBÉS : 950 760 t

OUVRAGES D'ART (32 PONTS)

SURFACE DE TABLIERS : 42 700 m²

PIEUX : 26 270 m

MURS EN TERRE ARMÉE : 23 080 m²

PRINCIPAUX INTERVENANTS

CLIENT : MHI

Saskatchewan Ministry of Highways and Infrastructures

CONCESSIONNAIRE : RBP

Regina Bypass Partners

- Vinci Concessions
- Connor, Clark & Lunn Gvest
- Graham Capital
- Parsons

EXPLOITATION-MAINTENANCE : RBOM

Regina Bypass Operations & Maintenance

- Vinci Concessions
- Carmacks (Eurovia Canada)

CONCEPTEUR-CONSTRUCTEUR : RBDB

Regina Bypass Design-Builders

- Vinci Construction Terrassement
- Carmacks (Eurovia Canada)
- Graham Construction
- Parsons

ABSTRACT

THE REGINA BYPASS - VERY HIGH EMBANKMENTS IN SASKATCHEWAN

HUBERT LE MIERE, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT -
YANN MARTINOL, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

14.4 million m³, that's the volume of earth moved by Vinci Construction Terrassement to construct the 65km bypass for the Trans-Canada Highway (Regina Bypass) around the city of Regina, in the province of Saskatchewan. This project was performed under a public-private partnership by a consortium of French and Canadian companies led by Vinci Concessions for the province's Ministry of Highways and Infrastructure (MHI), and was commissioned in October 2019. The company had to adapt and be creative to identify, extract and put in place about 11.7 million m³ of filler materials required to construct embankments up to 19 metres high, an unprecedented performance in Saskatchewan. The combination of Canadian and French talents made it possible to perform mass earthworks continuously during the winter seasons and incorporate in these exceptional earth structures Regina clays (IP 40-60%) by means of sophisticated geotechnical engineering, to deliver this new motorway infrastructure on time and on budget. □

REGINA BYPASS: TERRAPLENES DE GRAN ALTURA EN SASKATCHEWAN

HUBERT LE MIERE, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT -
YANN MARTINOL, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

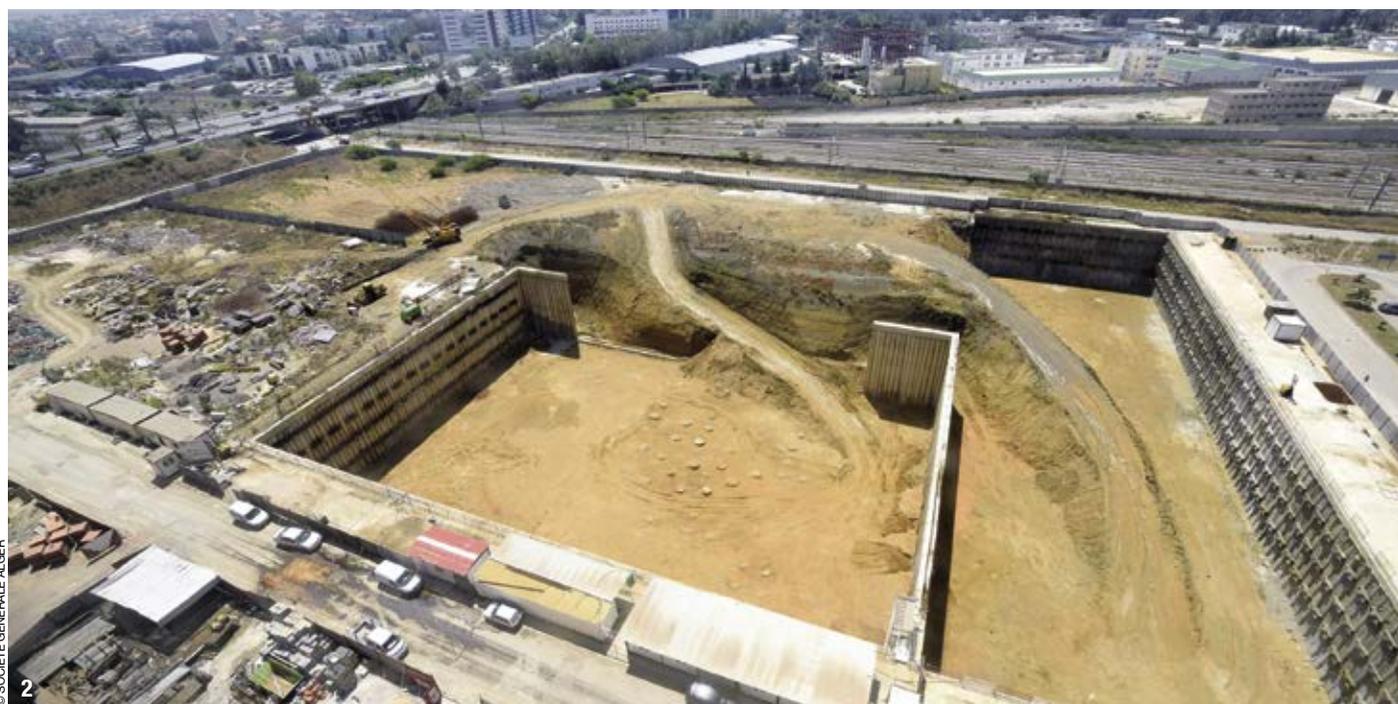
14,4 millones de m³ es el volumen de tierra desplazada por V Construction Terrassement para construir los 65 km de desviación de la autopista transcanadiense (Regina ByPass) alrededor de la ciudad de Regina, en la provincia de Saskatchewan. Esta obra, realizada en el marco de una asociación público-privada por un consorcio de empresas francesas y canadienses encabezado por Vinci Concessions, por cuenta del Ministerio de Vialidad e Infraestructuras (MHI) de la provincia, entró en servicio en octubre de 2019. La empresa ha tenido que adaptarse y demostrar creatividad para identificar, extraer y aplicar unos 11,7 millones de materiales de relleno necesarios para construir unos terraplenes de hasta 19 m de altura, una realización inédita en Saskatchewan. La combinación del talento canadiense y francés ha permitido llevar a cabo unos movimientos de tierra masivos de forma continua durante los períodos invernales e integrar arcillas de Regina (IP 40-60%) en estas obras en tierra excepcionales gracias a una avanzada ingeniería geotécnica, para entregar esta nueva infraestructura de autopista con arreglo a los plazos y los presupuestos. □



LES PIEUX SÉCANTS DU SIÈGE DE LA SOCIÉTÉ GÉNÉRALE À ALGER

AUTEUR : YOUSSEF JARADEH, DIRECTEUR TECHNIQUE, ARCADIS

LA SOCIÉTÉ GÉNÉRALE, IMPLANTÉE DANS PLUSIEURS PAYS DANS LE MONDE, A CHOISI DE CONSTRUIRE SON SIÈGE SOCIAL PRINCIPAL À ALGER SUR LE SITE DE BAB EZZOUAR QUI ATTIRE UN GRAND NOMBRE D'INVESTISSEURS CAR SITUÉ À PROXIMITÉ DE L'AÉROPORT INTERNATIONAL HOUARI BOUMEDIENE. LE PROJET CONSISTE EN UN BÂTIMENT IGH DE 50 m DE HAUTEUR COMPOSÉ DE 12 ÉTAGES, UN REZ-DE-CHAUSSÉE ET 4 NIVEAUX DE SOUS-SOLS. LE BÂTIMENT EST FONDÉ SUR PIEUX ET LE SOUTÈNEMENT DE LA FOUILLE EST EN PIEUX SÉCANTS DOUBLÉS PAR UNE PAROI EN BÉTON HYDROFUGE.



DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUE DU SITE BAB EZZOUAR

Le projet prend place sur 2 parcelles de terrain situées dans le quartier d'affaires d'Alger, sur la commune de Bab-Ezzouar. Leur surface est d'environ 4100 m² (76 m x 54 m).

La topographie est relativement plane avec des altimétries variant de 14,9 à 15,7 m NGA et une pente de l'ordre de 1%.

Le site se trouve dans la plaine de la Mitidja, zone basse environnée par des reliefs : les montagnes de Chenoua et Zaccar à l'ouest, les collines du Sahel au nord et les premiers

1- Paroi de soutènement avec 4 lits de tirants provisoires.

2- Vue du site avec les parois profondes dégagées sur 2 côtés.

1- Retaining wall with 4 layers of temporary tie anchors.

2- View of the site with uncovered deep walls on 2 sides.

chaînon de l'Atlas de Blida au sud (figure 3).

D'un point de vue géologique la plaine de la Mitidja est un ancien golfe marin (Miocène/Pliocène) qui a perdu son débouché marin au Quaternaire et dans lequel se sont accumulés des dépôts alluvionnaires. Ces alluvions sont pour l'essentiel descendues de l'Atlas.

Selon la carte géologique au 1/50 000^e d'Arba, il s'agit d'alluvions limoneuses.

ENQUÊTE HYDROGÉOLOGIQUE Données d'archives

Selon la carte hydrogéologique d'Alger établie en 1973, le toit de la nappe

phréatique au droit du site est indiqué vers +12 m NGA, soit environ 3 à 4 m sous le niveau du terrain actuel.

Piézométrie

Douze piézomètres ont été recensés dans un rayon de 200 m environ autour du site :

→ 6 piézomètres étaient cadennassés ou bouchés ;

→ Sur les 6 autres, les niveaux d'eau se situent entre 20,2 et 24,2 m de profondeur. Quatre nouveaux piézomètres ont été réalisés sur le site du projet. Les niveaux d'eau constatés sont variables : (7 à 10 m), (12 à 15 m), (17 à 20 m) et (24 à 27 m). ▷

SISMICITÉ

La région d'Alger est située dans une zone de collision entre la plaque tectonique africaine et la plaque eurasiennne. La remontée vers le nord de la plaque africaine se traduit par une intense déformation tectonique et par une activité sismique significative. Selon la Réglementation Parasismique Algérienne (RPA 2003), la commune de Bab Ezzouar est classée en zone de sismicité III (sismicité élevée).

DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU PROJET

Le siège social de la Société Générale accueillera les salariés de la banque et ses clients, des salles de conférences sont prévues également avec un restaurant d'entreprise. Aux sous-sols se trouvent des locaux à différents usages : techniques et d'autres assez nobles au premier sous-sol avec des parkings.

Enia architectes a prévu une seconde peau dentelée qui enveloppe le bâtiment en béton fibré ultra performant (BFUP), une des premières applications en Algérie de ce type du béton (figure 4).

D'après une enquête documentaire de Fondasol, une surexploitation de la nappe aquifère de la plaine de la Mitidja a provoqué un rabattement important du niveau piézométrique. Ce rabattement a engendré une inversion du sens de l'écoulement souterrain et l'intrusion marine vers l'aquifère côtier surtout en saison sèche.

Pour prendre en compte la remontée de la nappe actuellement rabattue suite à un arrêt des pompages d'eau les mesures suivantes ont été prises :

- La fiche de la paroi de soutènement, descendue dans les couches de sables grésifiés peu perméables, joue un double rôle de fiche mécanique et de fiche hydraulique : elle permet la réduction du débit de l'infiltration en formant une enceinte peu perméable. La figure 5 montre la ligne d'écoulement conduisant à un débit d'exhaure réduit.
- La liaison entre la paroi de soutènement et le radier porté du 4^e sous-sol permet d'empêcher l'infiltration des eaux grâce au double scellement et la mise en place de cordons hydro-gonflants (repère 3 sur la figure 6).
- Un tapis drainant sous le radier porté est prévu pour faire baisser la pression de l'eau infiltrée.
- La paroi de soutènement en pieux sécants est doublée par une autre

LOCALISATION DE LA PLAINE DE LA MITIDJA



3

© ARCADIS

paroi coulée ou projetée sur place pour assurer son rôle final de cuvelage structural relativement étanche conformément aux DTU 14-1 Cuvelage.

CHOIX DES PIEUX SÉCANTS

Le choix de la solution des fondations dépend des méthodes de construction disponibles, des matériaux disponibles,

3- Localisation de la Plaine de la Mitidja.

4- Façade en BFUP.

3- Location of the Mitidja Plain.

4- Facade in UHPFRC.

des moyens d'accès sur le chantier, du contexte du site, des avoisinants et surtout du contexte géotechnique du site.

Les investigations géotechniques montrent que les couches sur 15 à 17 m présentent de faibles caractéristiques mécaniques.

Les piézomètres montrent que le niveau de la nappe varie entre 7 m et 21 m par rapport au TN, alors que, pendant les périodes de pluie, le ruissellement de l'eau compromet la stabilité des fouilles sur les 3 à 4 premiers mètres.

Pour soutenir les parois de la fouille de 15,5 m de profondeur, trois types de soutènement étaient possibles :

→ **Les parois moulées** : cette solution présente des avantages incontestables pour, à la fois, soutenir le sol, limiter l'arrivée des eaux de ruissellement en phase de chantier et assurer une paroi relativement étanche en phase finale. L'inconvénient de cette solution réside d'une part dans la difficulté de se procurer la bentonite à des prix raisonnables et d'autre part dans le nombre limité des entreprises de fondations possédant le matériel nécessaire, ce qui compromet l'élargissement de la consultation afin d'obtenir un prix raisonnable.

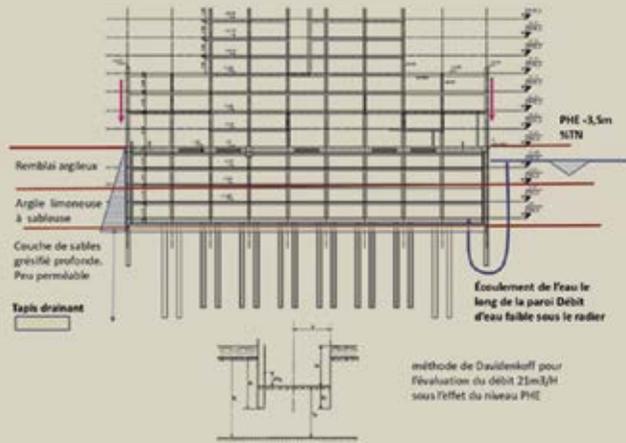
→ **Les pieux non jointifs** : solution jugée non fiable vis-à-vis du risque d'arrivée d'eau entre pieux difficilement gérable, suite à des défauts de verticalité et à des déviations ; l'écart possible illustré sur la figure 7



4

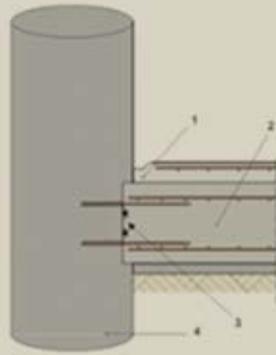
© ENIA

PRINCIPE DE LA FICHE HYDRAULIQUE



5

JOINTS HYDRO-GONFLANTS



6

5- Principe de la fiche hydraulique.

6- Joints hydrogonflants.

7- Déviation des pieux jointifs.

8- Principe des pieux sécants.

9- Murette-guide pour pieux sécants.

10- Pieux sécants non recépés.

5- Hydraulic anchor technique.

6- Hydro-swelling joint sealants.

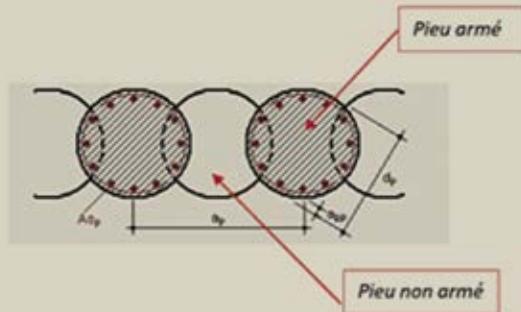
7- Deviation of close-jointed piles.

8- Secant pile technique.

9- Guide wall for secant piles.

10- Non-cut-off secant piles.

PRINCIPE DES PIEUX SÉCANTS



8



7



9



10

montre des grandes ouvertures qui favorisent le risque d'inondation des deux derniers sous-sols.

→ **Les pieux sécants** : cette solution présente un avantage indéniable par rapport à la solution précédente : les pieux sont de 80 cm de diamètre et ont un chevauchement de 10 cm (entr'axe de 70 cm). Cette solution est adaptée à la typologie du site et la jonction entre les pieux assure un bon comportement vis-à-vis de la présence probable de la nappe en sous-sol. Une paroi de doublage en béton armé a été prévue afin d'assurer l'étanchéité finale pour atteindre un niveau de paroi relativement étanche selon le DTU Couvelage.

Le principe de cette paroi de soutènement en pieux sécants consiste à alterner la réalisation des pieux d'abord par les pieux non armés (appelés primaires) de faible dosage en ciment 200 à 250 kg/m³ et des pieux armés (appelés secondaires) forés en partie dans les pieux non armés pour permettre une bonne continuité et un bon recouvrement entre ces pieux (figure 8).

La bonne réalisation des pieux sécants se fait comme pour les parois moulées à l'aide d'une murette-guide qui assure la précision requise à l'implantation des pieux au point de démarrage du forage (figures 9 et 10).



11

© ARCADIS

En l'absence de visibilité sur l'état des projets prévus sur les parcelles voisines, l'autorisation du service public n'a pas été accordée au début pour l'utilisation des tirants ni pour la réalisation des rampes d'accès.

La densité et la géométrie de butonnage de la paroi nécessitait un phasage assez complexe.

Les projets de construction des parcelles voisines n'étant pas encore établis, il a pu être obtenu l'autorisation de l'usage de tirants provisoires sur 4 lits pour la stabilisation de la paroi afin de dégager la fouille de tout obstacle et simplifier les travaux de construction de la tour et des pieux de fondations sous la tour (figure 1).

Le démarrage des travaux d'excavation dans une parcelle voisine et les besoins d'une rampe nécessitaient l'enlèvement des tirant désactivés sur deux côtés de la paroi avant la construction des planchers des sous-sols qui la butonnent. Ces excavations ont permis de constater la bonne exécution des pieux sécants sur les deux faces. La figure 11 montre les pieux du côté de la parcelle voisine.

Dans les cas courants des projets, l'excavation se fait d'un seul côté du soutènement, la face cachée contre



12

© ARCADIS

11- Vue de la paroi de soutènement côté avoisinant.

12- Repiquage du béton en hors profil.

11- View of the retaining wall on the adjacent side.

12- Repair of concrete backbreaks.

le sol retenu restant invisible. Dans ce projet, deux des quatre murs de soutènement sont visibles sur les deux faces. Ainsi, il a pu être vérifié si la déviation parfois excessive vers l'intérieur de la fouille du projet était liée à une véritable déviation ou à un phénomène de hors profil du béton qui a pris sa place dans une cavité ou faiblesse dans le sol et s'il y avait une "fenêtre" entre 2 pieux sécants.

Après contrôle des déviations il s'est avéré que la grande partie des pieux déviés vers l'intérieur de la fouille du projet était dans la limite des déviations réglementaires du côté de la fouille extérieure, sans fenêtre entre les



13- Bassin de recyclage de la boue de forage.

14- Poussée du sol reprise par le béton coulé contre les pieux sécants.

15- Contre-ventement de la tour et de l'infrastructure.

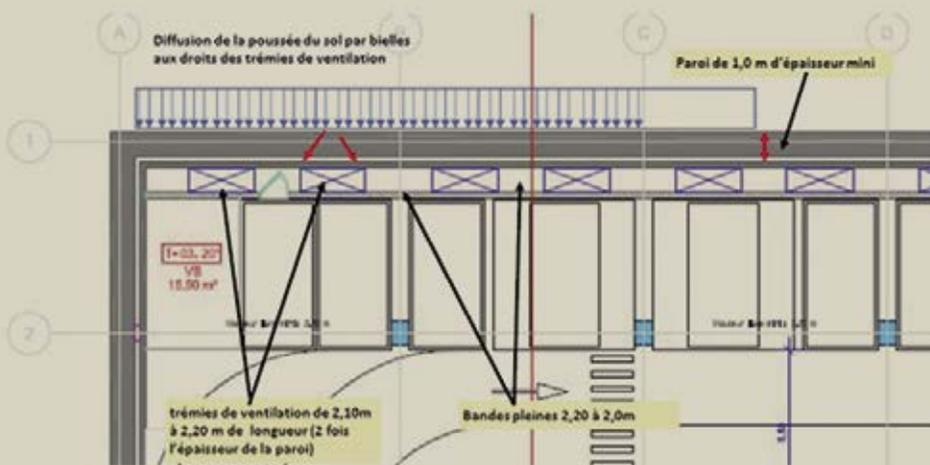
13- Drilling mud recycling basin.

14- Soil uplift repaired by concrete poured against the secant piles.

15- Bracing of the tower and infrastructure.

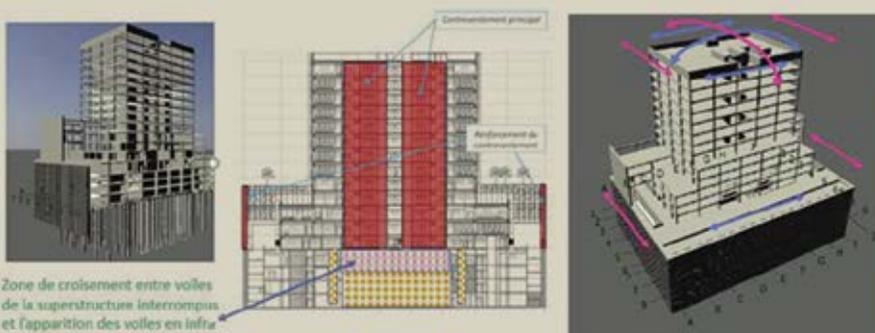
© ARCADIS
13

POUSSÉE DU SOL REPRIS PAR LE BÉTON COULÉ CONTRE LES PIEUX SÉCANTS



© ARCADIS
14

CONTREVENTEMENT DE LA TOUR ET DE L'INFRASTRUCTURE



© ARCADIS
15

pieux. La figure 12 met en évidence qu'il s'agit d'un béton en hors profil (pas d'acier visible).

La réalisation des pieux s'est faite avec une tarière creuse munie d'une tête à percussion et sous boue recyclée. Les bassins de recyclage de la boue utilisée pour les pieux sécants ont été réalisés avec la terre argileuse excavée (figure 13).

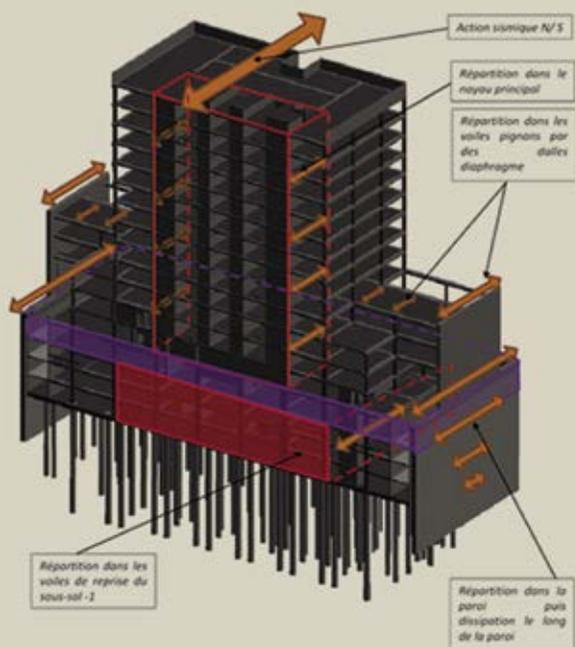
1- Pour la reprise de la poussée du sol, les planchers sont scellés sur leur périmètre dans les pieux de la paroi de soutènement et jouent le rôle de butonnage définitif.

2- Les trémies de ventilation et de désenfumage prévues le long des parois Sud et Nord devaient faire 4,5 m de largeur et 1,0 m de profondeur ; leur présence nécessite une réflexion sur le mode de reprise des poussées du sol sur les pieux ; la solution adoptée a limité leur largeur entre 2,1 et 2,3 m et leur profondeur entre 0,8 m et 1 m tout en les espaçant de 2,0 à 2,2 m afin de créer des bandes pleines de largeur suffisante pour la reprise des poussées du sol (figure 14).

3- La largeur des trémies est pratiquement le double de l'épaisseur des parois (80 cm de pieu + 25 cm de voile = 105 cm minimum). Les poussées de sol seront transmises par bielles aux bandes des dalles pleines entre trémies grâce au béton armé de la seconde paroi réalisée contre les pieux armés à cet effet. ▷

TRANSMISSION DES EFFORTS DU CONTREVENTEMENT DE LA TOUR

Schéma de principe du fonctionnement sous séisme dans le sens Nord/Sud



16

© ARCADIS

4- La seconde paroi de 20 à 25 cm minimum permet d'absorber les défauts de verticalité, de reprendre les poussées du sol croissantes en profondeur et de ponter les vides de 2,2 m. Elle rend les pieux sécants très monolithiques, même en négligeant à long terme le béton faiblement dosé en ciment des pieux non armés : en fait la paroi coulée et les pieux armés (un pieu sur deux) forment une section en double TT.

FONCTIONNEMENT D'ENSEMBLE SOUS SÉISME

Les pieux sécants doublés par la paroi de béton armé sont liés à leurs têtes par la poutre de couronnement et liés

16- Transmission des efforts du contreventement de la tour.

16- Transmission of tower bracing forces.

sur leur hauteur par le béton qui compose les pieux non armés : ils forment avec les planchers des sous-sols une enceinte solide presque indéformable vis-à-vis des poussées sismiques. Deux cas sont étudiés (figures 15 et 16) :

- Poussée sismique agissant sur une paroi et butée sismique agissant sur la paroi opposée ;
- Poussée sismique provenant du sol de la rue (domaine public non excavé) situé au nord du projet et absence de butée (hypothèse pessimiste mais réaliste) dans le cas où les parcelles voisines sont excavées sur les 3 côtés et ont des sous-sols aussi profonds.

CONCLUSION

Dans le contexte local algérien où l'usage des parois moulées est peu

répandu pour les travaux des bâtiments et pour ouvrir la possibilité à une consultation plus large égalitaire, les pieux sécants présentaient des avantages indéniables et une souplesse compatible avec le besoin de ce projet et la taille des entreprises de fondations profondes présentes sur le sol algérien. Le doublement des pieux sécants par une paroi coulé en place ou projetée contre ces pieux permet d'avoir une finition très satisfaisante et une résistance de l'enveloppe de l'infrastructure pérenne vis-à-vis des séismes et de la possible remontée de la nappe. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROI DE SOUTÈNEMENT

NOMBRE DES PIEUX : 365 pieux de 80 cm de diamètre

dont 183 pieux armés et 182 pieux non armés

LONGUEUR TOTALE DES PIEUX : 9 125 m

VOLUME DU BÉTON :

• Des pieux armés : 2 348 m³

• Des pieux non armés : 2 336 m³

ARMATURES DES PIEUX : 198 560 kg

PIEUX DE FONDATIONS SOUS LA TOUR

NOMBRE DES PIEUX : 185 pieux - diamètre de 80 à 100 cm

LONGUEUR TOTALE DES PIEUX : 3 844 m

VOLUME DU BÉTON : 3 248 m³

ARMATURES : 459 810 kg

TRAVAUX DE TERRASSEMENT

DÉBLAIS : 60 130 m³

RADIER DRAINANT : 2 300 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Banque La Société Générale

MAÎTRE D'ŒUVRE : Enia Architectes - Arcadis - Inzamam Fondasol - BET Sendjani

AMO : Artelia - Sogreah Algérie

ENTREPRISE PAROIS, FONDATIONS ET TERRASSEMENTS : Forpieux Alger

ABSTRACT

SECANT PILES FOR THE HEAD OFFICE OF SOCIÉTÉ GÉNÉRALE IN ALGIERS

YOUSSEF JARADEH, ARCADIS

The pile technique is now widely used in Algeria, but secant piles which have to overlap require fairly precise work sequencing. The first phase involves execution of the plain-concrete primary piles with a low cement factor: they consolidate the soil. In the second phase, the reinforced piles are executed before complete hardening of the concrete in the plain-concrete primary piles: their borehole takes part of the primary piles' concrete to ensure their overlapping and so that the whole unit will function as a low-permeability wall. Despite the slight constraint indicated, this technique can replace diaphragm walls, whose execution requires very specific tools that are not universally available. □

LOS PILOTES SECANTES DE LA SEDE DE SOCIÉTÉ GÉNÉRALE EN ARGEL

YOUSSEF JARADEH, ARCADIS

Actualmente la técnica de los pilotes es de uso corriente en Argelia. Sin embargo, los pilotes secantes, que deben recubrirse, requieren una gestión de las fases de realización bastante precisa. En la primera fase se realizan los pilotes primarios no armados, con una baja dosis de cemento, que consolidan el suelo. En la segunda fase, se realizan los pilotes armados antes del fraguado completo del hormigón de los pilotes primarios no armados: su perforación toma una parte del hormigón de los pilotes primarios para garantizar su solapamiento y el funcionamiento del conjunto como una pared de baja permeabilidad. Pese a la ligera complicación señalada, esta técnica puede sustituir las pantallas continuas de hormigón, cuya realización requiere herramientas muy específicas, no siempre disponibles en todas partes. □



1
© SPD

CALAIS PORT 2015 : TRAITEMENT ET SUIVI DES TASSEMENTS DES REMBLAIS HYDRAULIQUES

AUTEURS : LUC MOSCONE, MANAGER DE PROJET, ARCADIS POUR L'INGÉNIERIE INTÉGRÉE - ÉLISE SALMON, GÉOTECHNICIENNE, ARCADIS POUR L'INGÉNIERIE INTÉGRÉE - JEAN-FRANÇOIS DREVET, RESPONSABLE QUALITÉ ET ENVIRONNEMENT, BOUYGUES TP

CONFIÉE EN CONCEPTION / RÉALISATION À UN GROUPEMENT D'ENTREPRISES EN FÉVRIER 2015, LA PREMIÈRE PHASE DU PROJET CALAIS PORT 2015 SERA LIVRÉE AU PREMIER SEMESTRE 2021. ALORS QUE LES DIFFÉRENTS OUVRAGES DE CE PROJET SONT EN COURS DE FINALISATION (POSTES D'ACCOSTAGE POUR FERRIES, PLATEFORMES, MUR CHASSE-MER DE LA DIGUE, BÂTIMENTS...), LE SUIVI DES TASSEMENTS DES REMBLAIS HYDRAULIQUES MIS EN PLACE DE MI-2016 À MI 2017 SE POURSUIT. LE PRÉSENT ARTICLE REVIENT SUR LES ENJEUX LIÉS À LA MAÎTRISE DES TASSEMENTS SUR CE PROJET ET PRÉSENTE LES MOYENS MIS EN ŒUVRE TOUT AU LONG DE SA CONSTRUCTION SUR CETTE PROBLÉMATIQUE.

CONTEXTE DU PROJET

Le projet Calais Port 2015 s'inscrit dans le cadre d'un programme d'investissement important, lancé en 2007 par la Région Hauts-de-France, visant à redonner aux ports de Boulogne-sur-Mer et Calais les moyens de leur développement sur le long terme.

Il s'agit d'adapter l'actuel premier port passagers français aux évolutions futures attendues, telles que l'augmentation de la taille des navires, la croissance continue des trafics et l'évolution des modes de transport des marchandises.

1- Photographie du projet fin 2020.

1- Photograph of the project at end-2020.

La Région a désigné comme concessionnaire des deux ports la Société d'Exploitation des Ports du Détroit (SEPD) qui a alors sub-délégué la conception, la réalisation et le financement de la phase 1 du projet Calais

Port 2015 à la Société des Ports du Détroit (SPD). En tant que maître d'ouvrage, la SPD a confié au groupement composé des sociétés des groupes Bouygues Travaux Publics mandataire, Spie Batignolles, Colas et Jan de Nul la conception et la réalisation des ouvrages de la première phase du projet Calais Port 2015. Arcadis assure le rôle d'ingénierie intégrée au groupement d'entreprises et il est, en particulier, en charge de la mission de suivi géotechnique G3 au sens de la norme NF P 94-500 pour le suivi des tassements des remblais hydrauliques.

Ce projet comprend notamment (figure 2) :

- Des digues et perrés de protection en enrochements (environ 4,8 km de linéaire) dont la digue principale de 3,3 km délimitant le nouveau bassin de 90 ha pour l'accueil des navires ;
- 65 ha de terre-pleins dont 44 ha gagnés sur la mer par remblaiement hydraulique de sables dragués (plateformes du Terminal Transmanche Nord) ;
- 3 nouveaux postes d'accostage pour ferries ;

→ L'aménagement des superstructures portuaires et la refonte de tous les accès avec notamment 31 bâtiments et 8 ouvrages d'art. Le présent article porte plus particulièrement sur le suivi des tassements des remblais hydrauliques tout au long de la durée du chantier. Au préalable, sont décrits brièvement les travaux de remblaiement hydrauliques et les traitements de terrains effectués afin de comprendre les enjeux liés aux tassements.

TRAVAUX DE REMBLAIEMENT HYDRAULIQUE

Les travaux de remblaiement hydraulique se sont déroulés en 2 étapes.

1^{re} PHASE DE REMBLAIEMENT HYDRAULIQUE

Cette première phase, qui s'est globalement déroulée en juillet et août 2016, a consisté à draguer les souilles de la digue principale et du perré Est et à remblayer hydrauliquement le casier R3b (environ 800 000 m³), délimité au nord par un cavalier provisoire préalablement construit (zone blanche de la figure 3).

2^e PHASE DE REMBLAIEMENT HYDRAULIQUE

Cette 2^e phase a débuté après la fermeture du grand casier délimité par le perré Est et la digue principale (remblais R2, R3a et R4, bleu, vert et violet sur la figure 3) et du casier délimité par le perré Ouest (remblai R1, rose sur la figure 3).

L'ensemble du futur bassin, ainsi que le chenal d'accès ont été dragués au cours de cette 2^e phase à des cotes comprises entre -9,5 m Cote Marine (CM) et -11 m CM. Les sables ont été refoulés dans les casiers (environ 3 200 000 m³) de mars à mai 2017. Les préchargements nécessaires ont été directement mis en place lors de ce remblaiement hydraulique.

TRAITEMENTS DES REMBLAIS HYDRAULIQUES

La définition des traitements de terrain au sens large, que ce soient les terrains en place ou les remblais hydrauliques, repose sur :

- Le respect des objectifs de tassements imposés par le cahier des charges du projet (cf. dernier chapitre) ;
- L'atteinte d'un objectif minimal de densification des remblais.

Les terrains en place sont constitués des Sables Flandriens reposant sur l'Ar-



gile des Flandres. Avec une épaisseur d'environ 40 m et un toit entre 30 et 35 m par rapport au niveau futur du projet (≈ +10,5 m CM), les Argiles des Flandres sont une argile raide, surconsolidée et assez homogène. Les Sables Flandriens, bien qu'essentiellement sableux et assez denses, peuvent présenter, quant à eux, un faciès assez compressible constitué d'une succession d'horizons sableux, silteux et argileux, nommé SSAL par la suite. En plan, SSAL se présente sous la forme d'une bande d'orientation globalement est-ouest englobant une large partie des terre-pleins gagnés sur la mer. D'épaisseur maximale d'environ 10 m, son toit se situe à environ -10 m CM. Cette formation est progressivement remplacée par un sable silteux au niveau de l'ancienne plage au sud et au niveau de la transition entre les remblais R4b et R4a au nord. Des préchargements de terrains ont été mis en place sur les remblais R2, R3 et R4b afin de consolider le SSAL en anticipation des futures charges appor-

2- Illustrations 3D du projet Calais Port 2015.

2- 3D illustrations of the Calais Port 2015 project.

- tées par l'exploitation du port, avec une marge de sécurité : les niveaux de préchargement compris entre +12 et +14,5 m CM ont été définis en fonction des caractéristiques de SSAL. Les remblais hydrauliques mis en place afin de réaliser les terre-pleins gagnés sur la mer sont d'épaisseur assez variable :
- Quasi nulle au niveau de l'ancienne plage au sud du projet (remblai R3b) ;
 - De l'ordre de 16,5 m par rapport au niveau futur du projet à +10 m CM, au niveau de R4a, (présence d'une fosse d'érosion à -6 m CM) ;
 - De l'ordre de 10,5 m au niveau du raccordement entre le perré Est et

la digue principale, au nord (présence d'un banc de sable).

Les traitements des remblais hydrauliques ont été définis de façon à atteindre les objectifs de densité relative minimale préalablement définis et sont fonction de :

- L'épaisseur des remblais à traiter ;
- La nature de ces remblais : essentiellement des sables propres de classe essentiellement D11 avec quelques passages silteux d'après la campagne de reconnaissances géotechniques réalisée ;
- La méthode et les conditions de mise en œuvre des remblais par refoulement notamment vis-à-vis des niveaux de marées, qui conditionnent la densification des remblais. Cette densification est due à l'action combinée du compactage hydraulique du refoulement hors d'eau et du passage répété des chenilles des bulldozers étalant au fur et à mesure le mélange sable (30%) + eau (70%) dans le casier.

LES ZONES DE REMBLAIS HYDRAULIQUES DU PROJET



© ARCADIS
3

Le tableau A présente les périodes de préchargements et de traitements des remblais R1, R2, R3 et R4.

CONTRÔLE DE LA COMPACTITÉ DES REMBLAIS HYDRAULIQUES

La compacité des remblais hydrauliques (figure 4) est vérifiée au moyen de sondages CPT (figure 5). Un profil de résistance de pointe (q_c) minimal a été établi en phase conception de façon à respecter un objectif de densité relative (D_r).

Sur le chantier, une campagne CPT de référence (environ 1 CPT/1 000 m²) a été réalisée sur l'ensemble des remblais hydrauliques au plus tôt un mois après le refoulement (afin de laisser les remblais se mettre en place et dissiper

les surpressions interstitielles) pour cartographier les zones de remblais à densifier et en définir les modalités de traitement.

Après traitement (par vibrocompactage et/ou par compactage dynamique) ou absence de traitement (pour les zones de remblais hydrauliques ayant déjà atteint leur objectif de compacité), une campagne CPT de réception est réalisée (environ 1 CPT/200 m²).

3- Les zones de remblais hydrauliques du projet.

3- Hydraulic backfill areas of the project.

Le cas échéant, des traitements complémentaires sont réalisés si les objectifs de compacité ne sont pas atteints, puis une nouvelle campagne de CPT est effectuée sur les zones concernées.

LES ENJEUX DU PROJET VIS-À-VIS DES TASSEMENTS CRITÈRES DE TASSEMENT

Les critères de tassements, imposés par le programme fonctionnel détaillé (PFD) pour l'ensemble des terre-pleins sont des critères en cours d'exploitation des plateformes :

- Tassement élastique instantané absolu maximal de 1 cm sous application des charges d'exploitation ;
- Tassements absolus différés pour

la plateforme en exploitation inférieurs à 5 cm pour une durée de service de 25 ans avec un maximum de 0,5 cm par an (1 cm étant accepté pour la première année d'application des charges d'exploitation).

DÉMARCHE DE CONCEPTION

En termes de dimensionnement, la démarche suivante a été appliquée afin de vérifier les critères de tassements :

- Élaboration de modèles géotechniques pour l'estimation des tassements sur la base de l'ensemble des reconnaissances du projet pour chacun des remblais ;
- Estimation des tassements à partir de ces modèles ;
- Comparaison des estimations avec les critères définis ;
- Le cas échéant, réalisation d'une seconde estimation après prise en compte d'un traitement de terrain adapté (préchargement, traitement par VC ou CD, ...) et nouvelle comparaison des résultats avec les critères définis.

Un plan de traitement de terrain a été défini en phase d'études de conception à partir de cette démarche.

Les critères de tassements définis par le cahier des charges seront vérifiés par le suivi, pendant l'exploitation des terre-pleins, de bornes de tassements réparties sur l'ensemble des plateformes. ▷

TABLEAU A : PÉRIODES DE PRÉCHARGEMENTS ET DE TRAITEMENTS DES REMBLAIS R1, R2, R3 ET R4

Remblais	Remblaiement hydraulique	Préchargements	Enlèvement précharg. / mouvements Rb*	Traitements terrains : VC* et/ou CD*
R3b	07/16 à 08/16 : RH phase 1	09/16 à 02/17 : 6 mois	09/17 à 11/17	09/17 à 12/17
R3a	03/17 à 05/17 : RH phase 2	06/17 à 01/18 : 8 mois	02/18 à 05/18	08/17 à 01/18
R2		06/17 à 11/17 : 6 mois	12/17	10/17 et 01/18
R4b		06/17 à 12/17 : 7 mois	01/18 à 02/18	07/17 à 12/17
R4a		Non concerné	12/17 à 05/18	06/17 à 10/17
R1		Non concerné	Non concerné	08/17 à 10/17

*Rb : remblais - VC : vibrocompactage - CD : compactage dynamique

© ARCADIS

4- Remblais hydrauliques en cours de traitement par vibrocompactage.

5- Contrôle CPT réalisé après traitement de terrain.

6- Extensomètres magnétiques - à gauche : tubes PVC équipés de bagues - à droite : réalisation d'un relevé avec bague de lecture.

4- Hydraulic backfills undergoing treatment by vibratory compacting.

5- CPT test performed after ground treatment.

6- Magnetic extensometers - on the left: PVC tubes fitted with rings - on the right: taking a reading with a reading ring.

Néanmoins, il convient de s'assurer en cours de travaux que ces critères, définis à moyen et long terme pendant l'exploitation du port, seront bien respectés. À cet effet, la démarche adoptée consiste à vérifier la validité des hypothèses prises en compte pour estimer les tassements (et plus généralement la validité des modèles de calcul) par la comparaison entre :

- L'évolution des tassements estimée dans les différentes notes de calcul ;
- Les mesures de tassements obtenues in situ pendant la durée du chantier par les dispositifs de suivi mis en place au cours des 2 phases de remblaiement hydraulique.

Cette comparaison des tassements et, le cas échéant, le recalage des modèles de calcul permettent de conforter les extrapolations faites à moyen et long terme pendant l'exploitation des terre-pleins.

Un plan d'instrumentation pour le suivi des tassements des terre-pleins au cours du chantier a été établi afin de pouvoir réaliser cette comparaison et suivre les préchargements de terrain. Ce suivi repose essentiellement sur des plaques de tassements réparties sur l'ensemble des remblais hydrau-



4

© BOUYGUES TP



5

© BOUYGUES TP

liques, complétées par des dispositifs plus spécifiques.

INSTRUMENTATION MISE EN PLACE

Différents dispositifs sont utilisés sur le projet pour suivre les tassements des remblais hydrauliques.

LES PLAQUES DE TASSEMENTS

Il s'agit de tiges métalliques supportées par une plaque. Elles sont mises en œuvre au niveau fini des remblais ou des préchargements.



6a



6b

© BOUYGUES TP

7- Comparaison entre estimations de tassements au droit d'un point de calcul et mesures d'une chaîne tassométrique, après recalage.

8- Comparaison entre estimations des tassements au point de calcul 4 avec les mesures des plaques et des spits de tassements du remblai R4b et celles des extensomètres ExtM7, ExtM8 et ExtM10 à partir de février 2018.

7- Comparison between settlement estimates at a calculation point and the measurements of a settlement metering system, after resetting.

8- Comparison between settlement estimates at calculation point 4 and the measurements of the settlement plates and studs for backfill R4b and those of extensometers ExtM7, ExtM8 and ExtM10 from February 2018.

Elles sont enterrées sous 2 m de remblai, laissant apparaître les 50 derniers centimètres de tiges.

Le relevé topographique des plaques (coordonnées X, Y, Z) est réalisé chaque semaine et permet de suivre l'évolution des tassements. Les mesures topographiques de précision (au millimètre) sont réalisées à la station totale (dispositif de mesure associant un théodolite et un distancemètre).

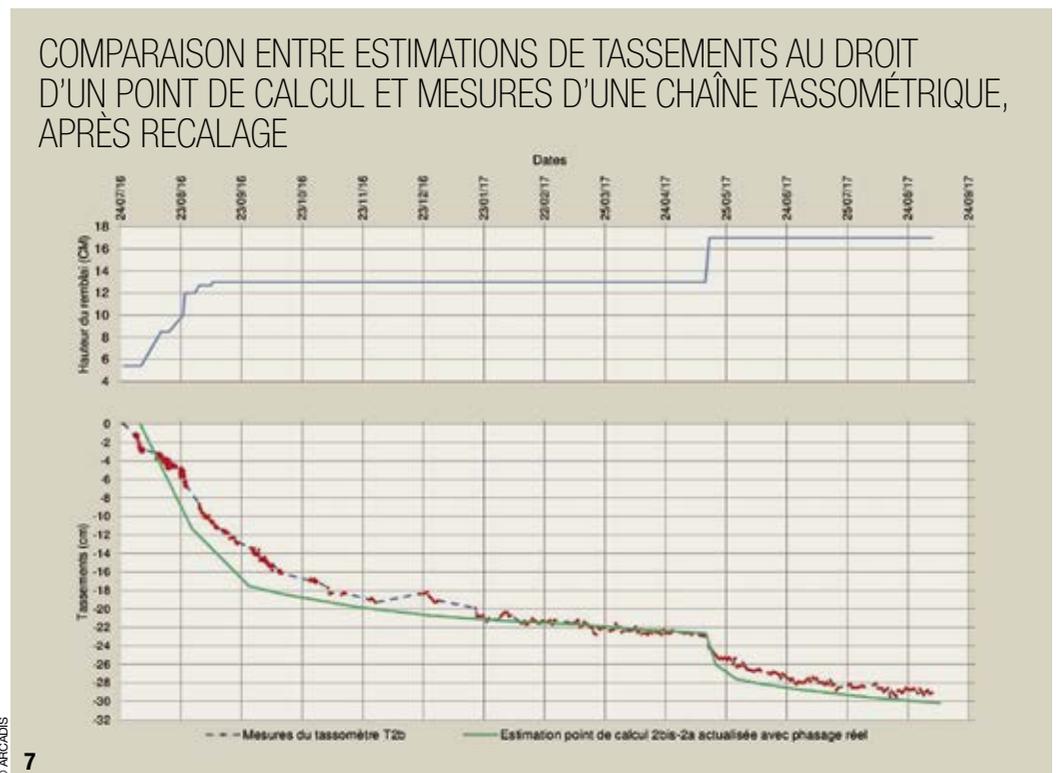
Ces plaques ont été remplacées par des spits de nivellement au fur et à mesure de la mise en place des en-

bés de voiries et des massifs des éléments de signalisation.

LES CHÂÎNES TASSOMÉTRIQUES

Elles permettent de suivre l'évolution des tassements absolus et différentiels pendant et après la mise en œuvre des remblais. Elles ont été mises en place avant remblaiement hydraulique, au niveau de l'ancienne plage et au droit de zones préchargées. Le principe est le même qu'un tassomètre hydrostatique (boules tassométriques) si ce n'est que le système de prise de

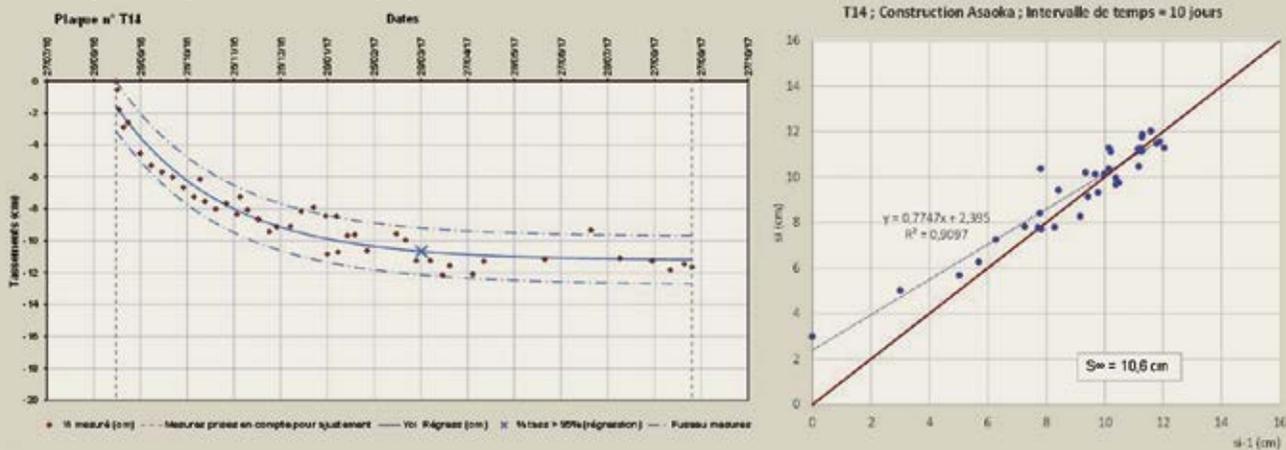
mesures est automatisé. Les cellules tassométriques sont enterrées sous le remblai, reliées entre elles par un tube rempli de fluide et connectées à un capteur de référence. Ce capteur est situé en dehors de la zone de remblai afin de ne pas subir son influence et le tout est relié à une centrale d'acquisition qui permet d'enregistrer les mesures en continu selon un pas de fréquence choisi et programmé. Cette instrumentation a été efficace jusqu'à sa destruction lors de la phase de compactage des remblais hydrauliques. ▽



PLAQUES DE TASSEMENTS - ZONE R4b - ÉVOLUTION DES TASSEMENTS À PARTIR DU 12/02/18



COMPARAISON ENTRE LA MÉTHODE D'ASAOKA ET L'AJUSTEMENT par une loi exponentielle pour les mesures de la plaque de tassement T14

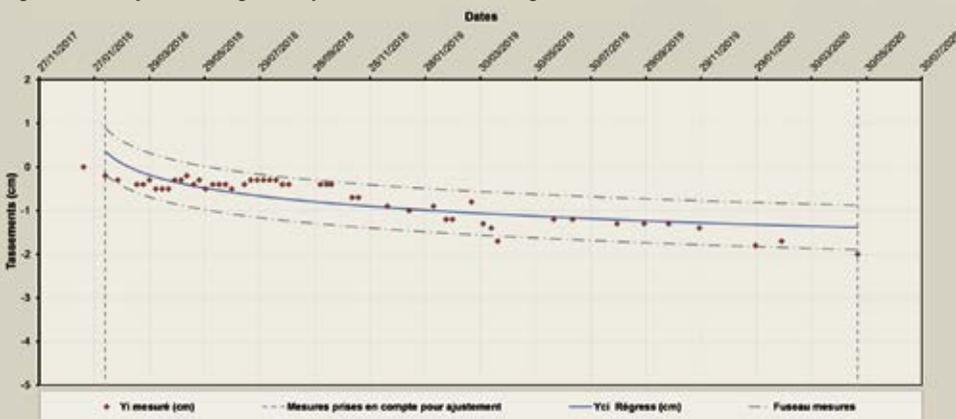


9

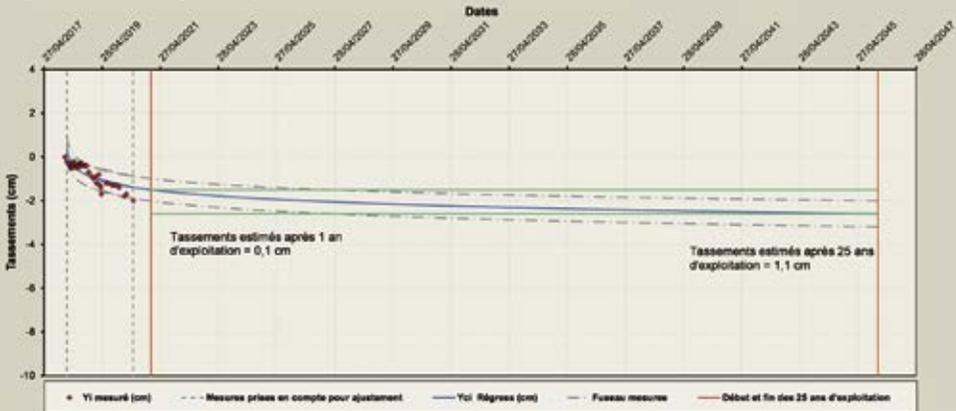
© ARCADIS

EXTENSOMÈTRE ExtM7

Calage de la loi d'ajustement logarithmique sur les mesures des bagues B7 - B1



Extrapolation de la loi logarithmique sur 25 ans d'exploitation



10

© ARCADIS

9- Comparaison entre la méthode d'Asaoka et l'ajustement par une loi exponentielle pour les mesures de la plaque de tassement T14.

10- Extensomètre ExtM7 - Ajustement et extrapolation d'une loi logarithmique par régression sur les mesures des bagues B7 - B1.

9- Comparison between the Asaoka method and adjustment by an exponential law for the measurements of settlement plate T14.

10- Extensometer ExtM7 - Adjustment and extrapolation of a logarithmic law by regression on the measurements of rings B7 - B1.

LES EXTENSOMÈTRES MAGNÉTIQUES EN FORAGE

Ceux-ci ont été installés dès la fin des travaux de compactage par vibroflotation ou dynamique. Ils permettent de suivre l'évolution des tassements à partir d'un point d'ancrage situé au fond du forage dans les Argiles des Flandres. Il s'agit de tubes PVC descendus en forage (figure 6). Ces tubes sont équipés de

bagues magnétiques disposées sur des manchons pouvant coulisser afin de suivre les déformations du terrain. Le calepinage des bagues est déterminé à partir de la géologie des terrains et des résultats des sondages CPT. Sur le projet, 13 extensomètres répartis dans les terre-pleins sont constitués de 9 à 10 bagues et font entre 40 et 50 m de profondeur. Cette instrumentation sera

en partie conservée au-delà du délai de la remise de l'ouvrage.

COMPARAISON DIRECTE ENTRE ESTIMATIONS DES TASSEMENTS ET MESURES

La comparaison directe entre estimations et mesures a été utilisée aussi bien pendant les périodes de préchargement que post préchargement.

La figure 7 montre un exemple de comparaison entre les estimations de tassements au droit d'un point de calcul après recalage du phasage de mise en place des remblais, avec les mesures d'une chaîne tassométrique.

La figure 8 montre un autre exemple de comparaison entre estimations de tassements et mesures sur une période plus longue.

On constate la difficulté d'avoir des mesures en continu au droit des plaques de tassement en raison de la réalisation des travaux en surface. Ces mêmes plaques subissent des "sauts de tassements" qu'il faut interpréter à la lumière des éventuels travaux en cours.

Les extensomètres magnétiques permettent de leur côté d'obtenir des mesures plus continues et moins perturbées, mais leur mise en place reste plus compliquée.

UTILISATION DE MÉTHODES D'AJUSTEMENT POUR LA PRÉDICTION DE L'ÉVOLUTION DES TASSEMENTS

Afin de statuer sur l'enlèvement des préchargements, il faut s'intéresser au tassement de consolidation primaire des terrains (SSAL pour le projet de Calais). Il s'agit de prédire le tassement primaire final et le degré de consolidation du sol à partir des mesures de tassement.

La méthode d'Asaoka 1978 est généralement utilisée à cet effet. Elle repose sur la représentation graphique du déplacement mesuré à un instant t en fonction du déplacement mesuré à l'instant $t-1$. La représentation graphique correspond à la résolution par différences finies de l'équation de la consolidation de Terzaghi. Cette méthode présente plusieurs inconvénients :

- Le pas des mesures doit être constant ;
- Dans la représentation graphique, l'intersection de la bissectrice et des

points du graphe est généralement mal définie ;

- Il est impossible de déterminer l'incertitude entachant les résultats. Une méthode alternative d'ajustement des tassements par une loi exponentielle, Méthode de Recordon 1988, reprise par Baguelin 1999, a été préférée dans le cadre du projet Calais Port 2015. Cette méthode présente les avantages suivants :

- Elle est cohérente avec les équations de la théorie de la consolida-

tion de Terzaghi et équivalente à la méthode d'Asaoka ;

- La détermination du tassement final et du degré de consolidation primaire par ajustement (même visuel) ne présente pas de difficulté ;
- On peut calculer les incertitudes entachant les résultats ;
- Elle est applicable à l'analyse des tassements secondaires en remplaçant la loi exponentielle par une loi logarithmique.

La figure 9 montre une comparaison entre les 2 méthodes dans le cas de mesures réalisées sur une plaque de tassement.

Si le tassement final de consolidation déduit de la construction graphique (10,6 cm) est très proche de celui obtenu par la méthode d'ajustement exponentielle (11,2 cm), on constate néanmoins l'incertitude non négligeable pesant sur la droite prise en compte dans la construction d'Asaoka sans pouvoir évaluer cette incertitude.

La méthode proposée permet quant à elle de tracer le fuseau de confiance de l'ajustement pris en compte (dans l'exemple présenté, une probabilité de 90% a été retenue pour le fuseau, soit 95% pour les bornes inférieure et supérieure). Cette méthode montre que 95% de la consolidation a été atteinte au 28/03/20 avec une probabilité de 95%.

La même méthode d'ajustement a été utilisée afin de s'intéresser à la consolidation secondaire des terrains (fluage pour les terrains argileux, *ageing* pour les terrains sableux) en remplaçant l'équation décrivant la consolidation primaire par celle de la consolidation secondaire. Par ce biais, une loi de prédiction des tassements peut être ajustée sur les mesures post consolidation primaire.

La figure 10 montre le résultat de cet ajustement sur les mesures d'un extensomètre et l'extrapolation faite la première année et sur les 25 ans d'exploitation du terminal : les critères imposés sont ici respectés. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

INVESTISSEMENT : 675 M€ en travaux
SURFACE DES TERRE-PLEINS : 65 ha dont 44 ha créés sur la mer
VOLUME DE DRAGAGE (remblais hydrauliques) : 4 millions m³
TRAITEMENT PAR VC : surface traitée : 265 000 m² ; points de traitement (y compris reprises) : 17 000 u
TRAITEMENT PAR CD : surface traitée : 162 000 m² ; points de traitement (y compris reprises) : 16 000 u
CAMPAGNES CPT DE CONTRÔLE DES REMBLAIS HYDRAULIQUES (avant et après traitement) : 3 500 u ; 35 000 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

AUTORITÉ CONCÉDANTE : Région Hauts-de-France
CONCESSIONNAIRE : Sepd (Cci Côte d'Opale, Cci région Nord de France, Cdc Infrastructure, Meridiam)
MAÎTRE D'OUVRAGE : Société des Ports du Détroit (SPD)
ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE : Egis
GROUPEMENT CONCEPTEUR-RÉALISATEUR (CR) : Bouygues Travaux Publics, Bouygues travaux Publics Régions France, Spie Batignolles Génie Civil & Nord, Malet, Valérian, Colas Nord-Est, Jan de Nul
INGÉNIERIE INTÉGRÉE AU CR : Arcadis

ABSTRACT

CALAIS PORT 2015: TREATMENT AND MONITORING OF SETTLEMENT OF HYDRAULIC BACKFILLS

LUC MOSCONE, ARCADIS - ÉLISE SALMON, ARCADIS - JEAN-FRANÇOIS DREVET, BOUYGUES TP

The first phase of the Calais Port 2015 project, awarded to a consortium under a Design and Build contract in February 2015, will be delivered in the first half of 2021. It involves, in particular, construction of the new breakwater, dredging of the future dock, and execution of quayage won from the sea. For the quayage and a compressible horizon of in-situ ground, soil improvement works (preloading, vibratory compaction, dynamic compaction and heavy surface compaction) were performed in order to comply with settlement levels not to be exceeded during the first 25 years of operation. Inspections were performed by static penetration tests and by monitoring of settlement (settlement plates/studs, settlement metering chains and borehole magnetic extensometers) during the works. They made it possible to verify and adjust, if necessary, the design calculation models allowing extrapolation of the settlement at 25 years. □

CALAIS PORT 2015: TRATAMIENTO Y SEGUIMIENTO DE LOS MOVIMIENTOS DE TIERRA DE LOS TERRAPLENADOS HIDRÁULICOS

LUC MOSCONE, ARCADIS - ÉLISE SALMON, ARCADIS - JEAN-FRANÇOIS DREVET, BOUYGUES TP

La primera fase del proyecto Calais Port 2015, cuyo diseño/realización se encargó a un consorcio de empresas en febrero de 2015, se entregará durante el 1^{er} semestre de 2021. Consta principalmente de la construcción del nuevo dique, el dragado de la futura dársena y la realización de los terraplenes ganados al mar. Los terraplenes y un horizonte compresible de los terrenos existentes han sido objeto de mejoras del suelo para impedir que superen unos umbrales límite de asiento durante los primeros 25 años de explotación: precargas, vibrocompactación, compactación dinámica y compactación pesada en superficie. Los controles se han llevado a cabo mediante ensayos de penetración estática y haciendo un seguimiento de los asientos (placas/spits de asiento, cadena de medición de asientos y extensómetros magnéticos de perforación) durante las obras. Así, han permitido verificar y ajustar, en su caso, los modelos de cálculo que permiten extrapolar la evolución de los asientos a lo largo de 25 años. □



1

© MARC DOSSMANN - PHOTO EXPRESSION

TRAITEMENT DES LOESS ET DES LEHMS POUR LES TERRASSEMENTS DU CONTOURNEMENT OUEST DE STRASBOURG

AUTEURS : JEAN PANDRAUD, DIRECTEUR TRAVAUX, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - THIERRY THOMAS, CHARGÉ DE MISSION GÉOTECHNIQUE, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - JÉRÔME BLANC, CHEF DE LABORATOIRE, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

L'AUTOROUTE A355, ÉGALEMENT APPELÉE CONTOURNEMENT OUEST DE STRASBOURG (COS), ACTUELLEMENT EN CONSTRUCTION, VA PERMETTRE DE CONTOURNER L'AGGLOMÉRATION STRASBOURGEOISE PAR L'OUEST, EN PROPOSANT UN GAIN DE TEMPS CONSÉQUENT AUX USAGERS QUI EMPRUNTERONT CETTE NOUVELLE INFRASTRUCTURE. EN 2020, LES ÉQUIPES DE DODIN CAMPENON BERNARD (MANDATAIRE), VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT, VINCI CONSTRUCTION FRANCE ET EUROVIA TERMINENT LES PRINCIPAUX TRAVAUX D'OUVRAGE D'ART ET DE TERRASSEMENT GRANDE MASSE DE CETTE AUTOROUTE POUR SE CONCENTRER SUR LA RÉALISATION DES FUTURES PLATEFORMES TRAITÉES AU LIANT HYDRAULIQUE ROUTIER, ET CECI DANS UN CONTEXTE SANITAIRE PARTICULIER.

PRÉSENTATION DU PROJET ET ENJEUX

Principalement conçue pour capter le trafic de transit, l'A355 est une autoroute d'une longueur de 24 km contournant Strasbourg par l'ouest. Elle reliera la jonction entre les autoroutes A4 et A35 au nord de Strasbourg jusqu'à la bifurcation entre l'A35 et l'A352 au sud.

Déclarée d'utilité publique le 23 janvier 2008, l'autoroute du Contournement Ouest de Strasbourg a fait l'objet de la signature d'un contrat de concession le 31 janvier 2016 pour une durée de 54 ans.

La société Arcos, filiale à 100 % du groupe Vinci, a été désignée par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, concessionnaire de

1- Gare de péage - approvisionnement de la couche de forme sur PST Sup gravillonnée.

1- Toll station - supply of the capping layer on gravelled upper formation level.

l'infrastructure en charge de financer, concevoir, construire puis exploiter, entretenir et assurer la maintenance jusqu'au terme de la concession (figure 2).

En même temps, Arcos a confié à Socos, nom du groupement d'entreprises, la conception et la construction de l'A355. Socos rassemble des compétences indispensables au bon dérou-

lement des opérations techniques et sera présent jusqu'à la mise en service de l'autoroute.

Dans ce cadre, le Sous Groupement Infrastructure, aussi appelé Sgi, composé des entreprises suivantes : Dodin Campenon Bernard, Vinci Construction Terrassement, Vinci Construction France et Eurovia est en charge de la réalisation des terrassements, des structures autoroutières (hors chaussées), de l'assainissement ainsi que des ouvrages d'art courants et non courants de la future autoroute.

Après des débuts compliqués liés à une forte opposition au projet, les travaux ont véritablement démarré en septembre 2018 par les déboisements, le dégagement des emprises et les terrassements des ouvrages.

L'année 2019 a été marquée par les travaux d'ouvrages d'art et de terras-

sement généraux, l'autoroute ayant la particularité de disposer sur ses 24 km d'une densité importante d'ouvrages (47 ouvrages d'art courant, 2 viaducs et une tranchée couverte).

2- Plan de situation et informations essentielles.

3- Maquette géotechnique de la zone Sud.

2- Location drawing and essential information.

3- Geotechnical model of the South zone.

L'année 2020, véritable année pivot, met en perspective la dimension importante des terrassements sur ce chantier. C'est en effet l'année qui a vu l'achèvement des terrassements généraux (4,3 millions de m³ de déblais réalisés) et la montée en pleine puissance des travaux de plateforme : 900 000 m² de plateforme en parties supérieures des terrassements et couche de forme traitées au liant hydraulique routier (LHR) ou à la chaux.

Tout cela est le résultat d'un travail amont important dans la définition, l'étude et l'optimisation de la structure et faisant le choix fort de l'optimisation du réemploi des matériaux du site en les traitant au LHR et à la chaux. Il s'agit ainsi d'une réponse concrète apportée notamment aux engagements de l'état qui invite l'entreprise à limiter au maximum l'apport de matériaux extérieurs.

RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE, PHASE D'ÉTUDE ET ESSAIS EN LABORATOIRE GÉOLOGIE ET RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

Le contexte géologique :

L'autoroute A 355 traverse trois grandes unités géomorphologiques :

→ **Au nord** : le cône de déjection de la Zorn. Il s'agit des terrasses alluviales de la Zorn, à l'est de Vendenheim, composées de plaines occupées par des prairies et des bois.

→ **Au centre** : le plateau du Kochersberg qui couvre environ 60% du tracé et concentre la totalité des déblais du projet. Il s'agit d'une succession de plateaux et petites collines entaillées par quelques ruisseaux qui s'écoulent d'ouest en est.

→ **Au sud** : la plaine de la Bruche. Il s'agit d'une plaine occupée par des prés aux alentours de la Bruche. Deux zones inondables sont traversées, celle autour du cours principal de la Bruche, et celle autour d'un ancien bras de la Bruche, le bras d'Altorf.

Pour ce qui est du contexte géologique, le projet se situe dans la plaine d'Alsace, en partie Sud-ouest du fossé rhénan. Les terrains rencontrés sont essentiellement d'âge Quaternaire (loess et lehms du plateau du Kochersberg, et alluvions de la Zorn et de la Bruche).

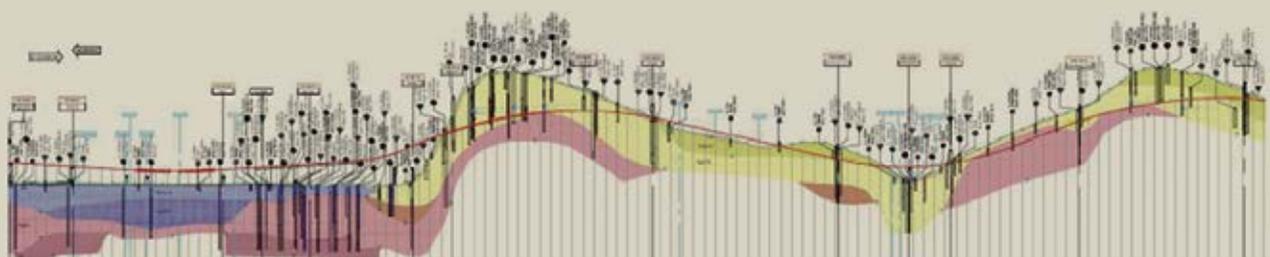
Ces terrains reposent sur un substratum d'âge Oligocène, présentant des faciès hétérogènes (argiles mameuses, argiles silteuses, passées sableuses à sablo-gréseuses) reconnus dans la vallée de la Bruche et au droit des deux déblais les plus profonds du projet (-22 m environ).

PLAN DE SITUATION ET INFORMATIONS ESSENTIELLES



- Autoroute de 24 km à 2x2 voies
- 2 échangeurs: RN4 à littenheim et RD111 à Duttlenheim
- 2 raccordements autoroutiers : A4 / A35 au nord et A352 / A35 au sud
- 2 viaducs : Vendenheim (450 m) et Vallée de la Bruche (462 m)
- 47 continuités routières maintenues : RN, RD, voies communales et chemins agricoles
- 9 cours d'eau franchis
- 61 ouvrages de perméabilité écologiques : passages petite et grande faune
- 1 section couverte à Vendenheim (295 m)
- Aménagements complémentaires : un pôle multimodal, un péage et un centre d'exploitation
- 22 communes concernées par le tracé

MAQUETTE GÉOTECHNIQUE DE LA ZONE SUD



© ARCOIS
2

© SOCOIS - SOUS GROUPEMENT INFRASTRUCTURE
3

Les matériaux loessiques du plateau de Kochersberg constituent la quasi-totalité des gisements en matériaux du site. Ils sont de nature silteuse à limono-silteuse. Il s'agit de dépôts d'origine éolienne accumulés durant les deux grandes périodes de glaciation du Riss et du Würm.

Les reconnaissances géotechniques :

Une campagne de reconnaissance géotechnique globale pour les besoins des études des terrassements (mouvement des terres et études de traitement des sols), des ouvrages d'art et de l'assainissement a été menée en deux phases successives (de septembre 2016 à mars 2017 pour la phase projet, et de septembre 2017 à mars 2018 pour la phase exécution).

Lors de cette campagne, ce sont au total 330 sondages géotechniques, tous types confondus, qui ont été réalisés (dont 90 sondages avec essais pressiométriques tous les mètres, 35 sondages carottés, 130 essais au pénétromètre type CPT, 45 piézomètres, etc.). Ces sondages ont été descendus à des profondeurs comprises entre 15 m et 40 m.

En parallèle, des essais d'identification en laboratoire (analyses granulométriques, teneurs en eau, VBs, limites d'Atterberg) et des essais de mécanique des sols pour les besoins des études de stabilité (essais triaxiaux, essais de cisaillement direct) ont été réalisés sur les échantillons issus des sondages carottés.

Ces reconnaissances géotechniques ont rapidement confirmé que les déblais du site étaient principalement constitués de matériaux loessiques rencontrés sous la forme de deux faciès :

→ **Les loëss** : limon silteux et silts (classe GTR : A1) ;

→ **Les lehms** : limon argileux (classe GTR : A2).

Aussi, lors des sondages géotechniques, ces loëss et lehms ont été reconnus localement jusqu'à plus de 30 m de profondeur.

L'homogénéité des loëss rencontrés s'est rapidement avérée "confortable", tant pour l'établissement d'un mouvement des terres optimisé (taux de réemploi de ces matériaux proche de 100%), que pour l'identification des gisements potentiels en matériaux de Partie Supérieure des Terrassements (PST) et Couche de Forme (CDF).

L'ensemble des données récoltées a permis d'établir les maquettes géotechniques (figure 3).

Ces résultats homogènes ont conforté la stratégie imaginée en phase d'appel d'offre, à savoir l'optimisation du mouvement des terres en maximisant le réemploi des matériaux du site en les traitant aux liants hydrauliques routiers ou à la chaux pour les couches nobles de la future plateforme autoroutière : les parties supérieures des terrassements et les couches de forme.

Pour cela, une large étude de traitement des sols à la chaux vive et au liant hydraulique routier, nécessitant des quantités importantes de matériaux

à l'échelle d'une campagne classique de prélèvements, a dû être réalisée en amont des travaux.

Les prélèvements ont été réalisés lors de sondages à la pelle mécanique (50 sondages) répartis sur l'ensemble des zones de déblais. Pour les deux déblais les plus profonds (jusqu'à 22 m de profondeur environ), des sondages carottés en grand diamètre (250 mm), réalisés en complément des sondages à la pelle mécanique, ont notamment permis le prélèvement d'échantillons en quantité suffisante et ceci sur toute la profondeur des déblais.

ÉTUDE EN LABORATOIRE

Les études de traitement des sols en laboratoire :

Ces études ont démarré rapidement, dès le début des reconnaissances géotechniques, ce qui a permis de tester un grand nombre de LHR (environ une quinzaine de produits existant ou adaptés pour le projet).

Le choix du LHR et de ses dosages a été dicté par l'objectif de trouver

un produit parfaitement adapté aux matériaux loessiques du site, permettant ainsi de garantir les performances mécaniques recherchées, ceci tout en anticipant les contraintes de mise en œuvre sur site. C'est pourquoi, le choix s'est tourné vers un LHR à prise lente, offrant un délai de maniabilité compatible avec les exigences d'un traitement en place.

En termes de performances mécaniques et de comportement au gel, les objectifs recherchés étaient les suivants :

→ **Pour la Partie Supérieure des Terrassements inférieure (PST inf)** : un matériau traité à la chaux vive présentant une pente de gonflement au gel $p < 0,25 \text{ mm}/(^\circ\text{C}\cdot\text{h})^{1/2}$, peu gélif (SGp) selon la norme NF P98-086.

→ **Pour la Partie Supérieure des Terrassements supérieure (PST sup)** : un matériau traité au LHR présentant une résistance $R_{tb} > 0,25 \text{ MPa}$, non gélif (SGn) selon la norme NF P98-086.

→ **Pour la Couche De Forme (CDF)** : un matériau traité au LHR présentant une résistance $R_{tb} > 0,25 \text{ MPa}$, non gélif (SGn) selon la norme NF P98-086, et de classe mécanique 4 au sens du GTS.

4- Coupe type de la structure de la plateforme support de chaussée.

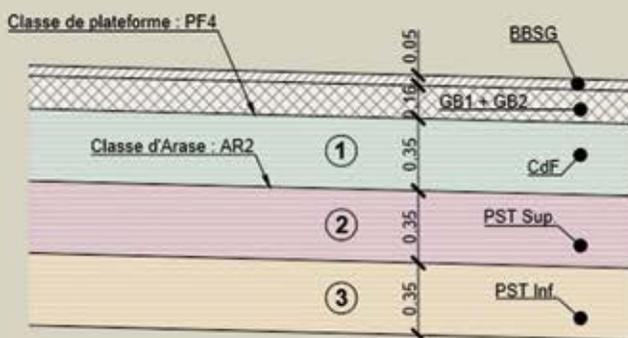
4- Typical cross section of the structure of the roadway support platform.

SOLUTION RETENUE

La plateforme support des chaussées :

Sur ce projet, la vérification au gel/dégel est la contrainte structurante de

COUPE TYPE DE LA STRUCTURE DE LA PLATEFORME SUPPORT DE CHAUSSEE



- ① • **Matériaux** : Loëss traités à 5% de LHR (GTR : A1)
 - **Objectifs** : - Densification : q3
 - Matériaux de classe mécanique 4
 - Matériaux non gélifs ($R_{tb} \geq 0,25 \text{ MPa}$)
 - **Critères de réception** : - Compacité conforme à densification q3
 - Déflexion $d \leq 20/100 \text{ mm}$
- ② • **Matériaux** : Loëss ou Lehm traités à 3% de LHR (GTR : A1 ou A2)
 - **Objectifs** : - Densification : q3
 - Matériaux non gélifs ($R_{tb} \geq 0,25 \text{ MPa}$)
 - **Critères de réception** : - Compacité conforme à densification q3
 - Déflexion $d \leq 70/100 \text{ mm}$
- ③ • **Matériaux** : Loëss ou Lehm traités + 2% de CaO (GTR : A1 ou A2)
 - **Objectifs** : - Densification : q3
 - Matériaux peu gélifs avec pente de gonflement au gel $p \leq 0,25$ (soit $Q_g = 4$)
 - **Critères de réception** : - Compacité conforme à densification q3
 - $EV2 \geq 40 \text{ MPa}$



5

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

l'ensemble PST/CDF/Chaussée. L'indice de gel de référence IR retenu étant celui d'un hiver exceptionnel fixé pour la région de Strasbourg à 405°C*jours.

Cette contrainte forte a amené à retenir un couple PST/CDF de type AR2 (cas de PST n°4)/PF4 constitué (figure 4) :

- D'une PST d'épaisseur totale de 0,70 m, réalisée en 2 couches :
 - 1 couche appelée "PST inférieure" : loess ou lehms traités à 2% de chaux vive sur une épaisseur de 0,35 m,
 - 1 couche appelée "PST supérieure" : loess ou lehms traités à 3% de liant hydraulique routier sur une épaisseur de 0,35 m.
- D'une CDF d'épaisseur 0,35 m : loess traités à 5% de liant hydraulique routier.

PHASE TRAVAUX MISE EN PRATIQUE

L'ensemble des opérations de traitement de plateforme est réalisé lors de la phase de remblai : traitement en place après approvisionnement des matériaux. Ce choix technique oblige à déployer des moyens importants en matériel (malaxeurs et épandeurs, figure 5).

Il s'explique par :

- Le découpage géographique du chantier : 2 viaducs, traversée de la RN4, 2 échangeurs, divisant le chantier en plusieurs zones indépendantes et ne permettant pas

5- Traitement et réglage de la PST sup.

5- Treatment and grading of the upper formation level.

un transport des matériaux traités le long de la trace du chantier lors de la phase de réalisation des plateformes.

- Le linéaire important du chantier et donc des grandes distances à parcourir (notamment par la route).

- Le peu d'emprises foncières en phase travaux, compliquant la gestion des stocks le long du projet.

Plusieurs échelons de traitement sont donc déployés le long de la trace, permettant une force de frappe importante (avec des pics de production pouvant atteindre les 350 000 m² par mois).

Les principales contraintes techniques mises en avant lors des études de traitement et lors des planches d'essais sont :

- L'humidification des matériaux et l'arrosage pour le maintien de l'état hydrique, qui constituent un point crucial dans la mise en œuvre des matériaux traités. L'approvisionnement en eau tout le long du tracé a nécessité l'aménagement de points d'approvisionnement régulièrement répartis le long de la trace.

- Le délai de maniabilité pour les opérations de traitement au LHR.

- Concernant le compactage, l'utilisation de compacteurs statiques (type Tamping SP2 et compacteur à pneu P2) et celle de compacteurs vibrants à pied dameur VP5 a été privilégiée car parfaitement adaptée aux matériaux loessiques du site. Les modalités de compactage retenues ont été validées lors de planches d'essais. L'une des innovations mise en pratique sur le chantier est le plan de balayage des compacteurs qui est suivi par GPS.

CONTRÔLE DES TRAVAUX

Les objectifs de mise en œuvre à atteindre pour garantir les caractéristiques mécaniques de l'ensemble des couches traitées nécessitent une grande quantité de contrôle tout au long de la mise en œuvre et ainsi une implication des services supports, tels que la topographie, le laboratoire et le service géotechnique du chantier (figure 6). Ainsi, pour la PST inférieure traitée à la chaux vive, des contrôles de portance sont réalisés pour valider la classe d'arase ainsi obtenue.

Pour la PST supérieure, traitée au LHR, des contrôles de déflexion sont réalisés pour valider la classe d'arase ainsi obtenue. Du fait du traitement aux liants hydrauliques routiers ce type d'essai a été retenu car mieux adapté que les mesures de portance in situ.

Pour la CDF, traitée aux liants hydrauliques routiers, des contrôles de déflexion sont réalisés pour valider la classe de plateforme ainsi obtenue.

Pour toutes ces couches, des essais de densité en place sont réalisés pour valider la qualité q3 de compactage ($\rho_s \geq 98,5\% \rho_{sOPN}$) avec des fréquences importantes.

L'ensemble des opérations de traitement donne aussi lieu à des analyses quotidiennes en laboratoire et contrôles, pour maîtriser en particulier les teneurs en eau des matériaux mis en œuvre.

QUELQUES CHIFFRES CLÉS

À ce stade, pour maîtriser la qualité de la mise en œuvre de la plateforme autoroutière, un nombre important de mesures a déjà été réalisé sur le chantier :

- 16 000 mesures de densité en place ;
- 7 000 mesures de portance ;
- 2 000 mesures de déflexion.

Pour réaliser ces essais et pour suivre le projet, un laboratoire dédié est également présent sur le chantier composé d'une dizaine de techniciens et d'opérateurs qui se partagent les 24 km de la trace (figure 1).

CONCLUSION

Grand chantier de terrassement, le Contournement Ouest de Strasbourg est un bel exemple d'optimisation de réemploi des matériaux disponibles sur le site.

En effet, les travaux amont d'identification, d'études et les traitements sur site ont permis de réemployer au maximum les déblais du projet pour les structures de la future plateforme autoroutière (couche de forme et partie supérieure des terrassement). Mais les loess et lehms issus des déblais ont également été traités en vue d'être réutilisés en matériaux de bloc-techniques pour ouvrage d'art ou d'assainissement, en base de remblai ou encore en matériaux insensibilisés à l'eau.

Cette optimisation est le résultat d'une collaboration étroite entre les équipes de la direction technique, le service géotechnique, le laboratoire et les équipes travaux en phase de préparation et lors de l'exécution des travaux. Ces améliorations impactant directement le mouvement des terres du projet ont permis d'optimiser les distances de transport.



© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

PRINCIPALES QUANTITÉS DU SOUS-GROUPEMENT INFRASTRUCTURE

ENTREPRISES CONSTITUANT LE SGI : Dodin Campenon Bernard, Vinci Construction Terrassement, Sogea Est, Gtm Hallé, Eurovia

MONTANT DES TRAVAUX RÉALISÉS PAR LE SGI : 300 M€

DURÉE DES TRAVAUX DU SGI : 30 mois environ

LONGUEUR TOTALE DU CHANTIER : 24 km

PRINCIPALES QUANTITÉS DE TERRASSEMENT :

- Déblais grande masse : 4 300 000 m³
- Remblais hors PST Sup et CDF : 3 500 000 m³
- Dont remblais traités : 755 000 m³
- PST traitées à la chaux vive : 350 000 m³
- PST traitées au liant hydraulique routier : 340 000 m³
- Couche de forme traitée au liant hydraulique routier : 330 000 m³

MONTANT DU CONTRAT CONCEPTION-CONSTRUCTION : 525 M€

6- Essais à la dynaplaque réalisés sur le COS.

6- Dynamic plate tests performed on Strasbourg West bypass.

Le traitement au liant hydraulique routier des structures a quant à lui permis de bénéficier d'économies en ressources naturelles et de réduction des nuisances liées au transport en limitant les apports de matériaux extérieurs. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Arcos

GROUPEMENT CONCEPTEUR CONSTRUCTEUR - SOCOS : Dodin Campenon Bernard (mandataire), Vinci Construction Terrassement, Sogea Est, Gtm Hallé, Eurovia, Cegelec Mobility

MAÎTRISE D'ŒUVRE INTÉGRÉE : Ingerop, Iur, Cbdi

ABSTRACT

TREATMENT OF LOESS AND LEHMS FOR EARTHWORKS ON THE STRASBOURG WEST BYPASS

JEAN PANDRAUD, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - THIERRY THOMAS, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - JÉRÔME BLANC VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

The Strasbourg West bypass, currently under construction, is a motorway 24km long. Earthworks began in September 2018. The reconnaissance campaigns and soil studies, for their part, started in 2016 and thus made it possible to confirm the high prevalence of loess and lehms on the site, and the potential for treatment of these materials. It is from this perspective that it was decided to optimise insofar as possible recycling of the site materials by treating them with hydraulic road binders and lime for the motorway roadbed structures. This major technical option made it possible to optimise earthmoving and limit the transport of external materials. □

TRATAMIENTO DE LOS LOESS Y LOS LEHMS PARA LOS MOVIMIENTOS DE TIERRA DE LA CIRCUNVALACIÓN OESTE DE ESTRASBURGO

JEAN PANDRAUD, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - THIERRY THOMAS, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - JÉRÔME BLANC VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

La Circunvalación Oeste de Estrasburgo, actualmente en construcción, es una autopista de 24 km de longitud. Las obras de movimiento de tierras empezaron en septiembre de 2018. Las campañas de reconocimiento y los estudios del suelo, por su parte, se iniciaron en 2016 y han permitido confirmar la fuerte prevalencia de loess y lehms en el emplazamiento, así como la posibilidad de tratamiento de estos materiales. Es por ello que se ha decidido optimizar al máximo la reutilización de los materiales existentes, tratándolos con aglutinantes hidráulicos viales y con cal para las estructuras de la plataforma de la autopista. Esta lúcida decisión técnica ha permitido optimizar los movimientos de tierra y limitar volumen de materiales de relleno externos. □



BTP BANQUE

GRUPE CREDIT COOPERATIF

C'est le métier
qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

Financière de l'État et des Bourses Publiques - Société anonyme à directeurs et conseil de surveillance au capital de 90 000 000 € - 88 rue La Pérouse CS 50066 - 75017 Paris Cedex 18 - 339 162 84 BCS Paris - INDIRIS 01 334 311 - PRO DIRECT MARITIME 1 - RC 488119

www.btp-banque.fr

REMBLAIS DE GRANDE HAUTEUR DE LA RN88 AU CŒUR DE L'AVEYRON

AUTEURS : CHARLOTTE COCHEZ, INGÉNIEURE GÉOTECHNICIENNE, ARCADIS - MATTHIAS MAVEL, RESPONSABLE TECHNIQUE, CAZAL

LA RN88 SITUÉE AU CŒUR DE L'AVEYRON EST UN AXE MAJEUR RELIANT SEPT PRÉFECTURES DE DÉPARTEMENT ET RAPPROCHANT LES POPULATIONS DES MÉTROPOLES DE TOULOUSE ET DE LYON. LE CONTOURNEMENT DE LA COMMUNE DE BARAQUEVILLE EST UN AXE NEUF CARACTÉRISÉ PAR D'IMPORTANTES VARIATIONS ALTIMÉTRIQUES. LE TRONÇON COMPORTE DE NOMBREUX TALWEGS PRÉSENTANT DES DÉCLIVITÉS DE L'ORDRE DE 10 À 15%. SON PROFIL EN LONG EST MARQUÉ PAR PLUSIEURS OUVRAGES EN TERRE DONT CERTAINS ONT DES DIMENSIONS IMPORTANTES.



1

© CLAUDE CRUELLS

PRÉSENTATION DU PROJET ET DU SITE

La phase 2 des travaux d'aménagement à 2x2 voies de la RN88, dénommée "TACE 2", débute à la Mothe (lieu-dit Les Places), dès la fin du tronçon déjà aménagé à 2x2 voies, jusqu'à l'échangeur de Marengo au droit de la RD911 à l'ouest de Baraqueville (figure 2). Ce tronçon d'une longueur de 7 km traverse la commune de

Quins et en partie celle de Baraqueville. La topographie de ce site fortement vallonnée, avec des cotes entre 635 et 780 NGF, nécessitait la mise en œuvre d'ouvrages en terre de grande hauteur. Au droit de ce linéaire, il est réalisé 19 ouvrages en terre dont 4 remblais de grande hauteur (figures 3 et 4). Ils atteindront au maximum entre 21,5 et 27 m de hauteur pour les remblais et 18 m pour

1- Vue générale des travaux de terrassement, zoom sur les ouvrages RGH12 et D8.

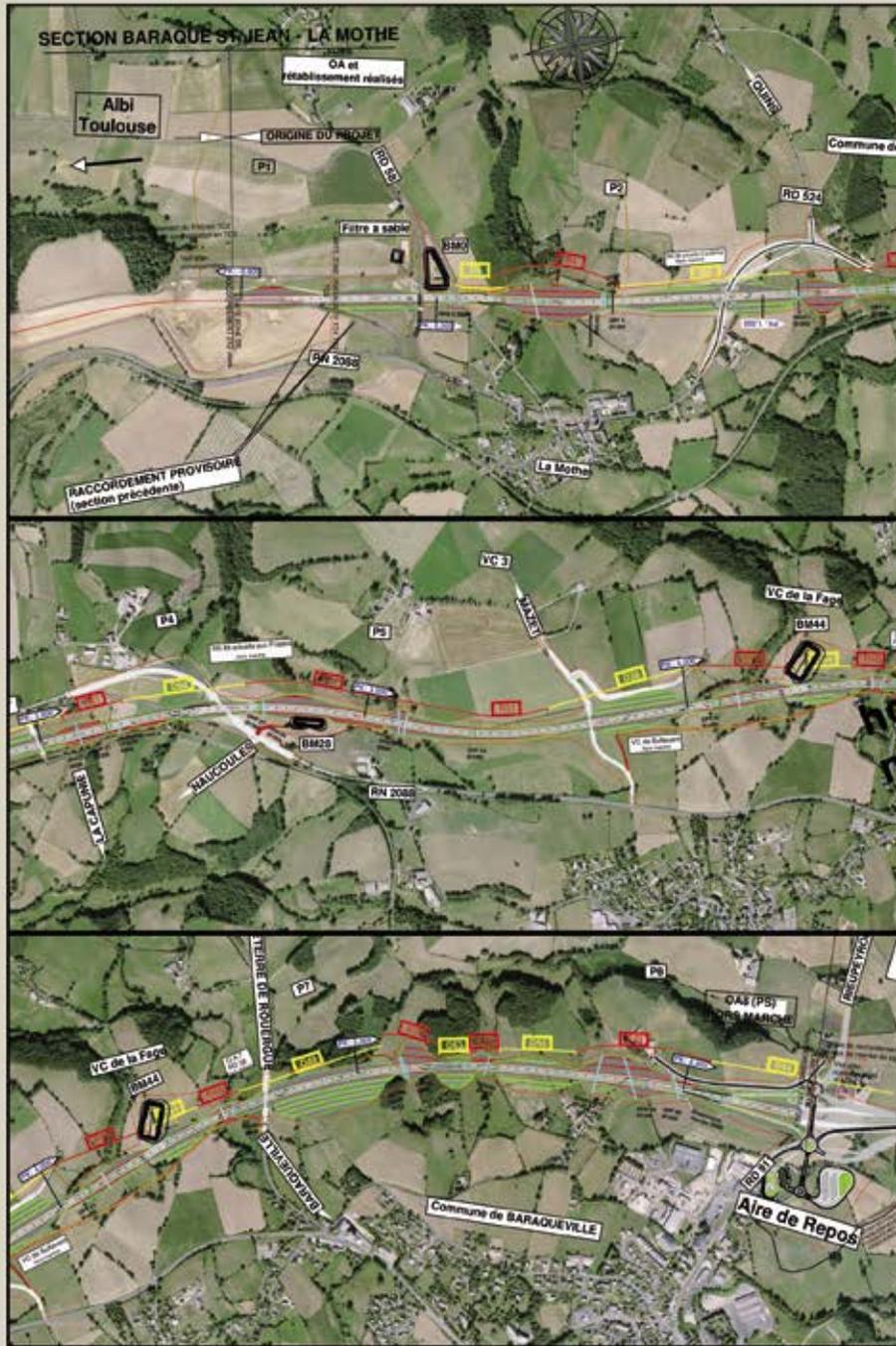
1- General view of the earthworks, focus on structures RGH12 and D8.

les déblais, avec des pentes générales de 2H/1V et des risbermes de 4 m tous les 10 m au maximum.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Le tracé de cette portion de la RN88 recoupe un substratum d'âge paléozoïque composé du nord au sud d'écaillés métamorphiques des formations suivantes (figure 5) :

PLAN SYNOPTIQUE DU TRACÉ



Des circulations d'eau ponctuelles peuvent également se développer au sein du réseau de fractures du substratum.

CONTENU DE LA CAMPAGNE GÉOTECHNIQUE COMPLÉMENTAIRE

La phase étude de la mission d'étude géotechnique d'exécution G3 a débuté par la réalisation d'une campagne complémentaire.

Le projet étant largement excédentaire en mouvements de terre, les objectifs principaux du programme concernaient l'aptitude au traitement des sols présents au droit des déblais et l'analyse du comportement de ces matériaux dans le temps. Pour ce faire, les deux grandes familles de matériaux traversés, schisteux au sud du projet sur environ 1 km et gneissiques sur le reste du tracé, ont été testées.

Le programme a consisté essentiellement en la réalisation d'essais en laboratoire :

Sur les matériaux traités aux liants :

- Résistance à la compression simple, après cure à l'air et immersion à l'eau, en vue de définir les risques d'évolution des matériaux et de valider le dosage et le type de liants hydrauliques routiers pour réduire le risque d'évolution des matériaux prévus en base de remblais. Les objectifs définis dans le CCTP, en lien avec les recommandations du GTR et du retour d'expérience du projet TerDOUEST qui complète le Guide de Traitement des Sols, étaient l'atteinte d'une résistance à la compression supérieure à 700 kPa en laboratoire et 625 kPa pour les matériaux issus de la planche d'essais après 14 jours de cure à l'air et 14 jours de cure + 14 jours d'immersion.

La figure 6 illustre, à titre d'exemple, les résultats obtenus sur les matériaux issus des déblais D8 et D49, pour différents dosages et liants testés.

Ces essais ont ainsi permis de retenir l'utilisation du Rolac Optimum ST pour ce chantier et de sélectionner en priorité certains déblais pour la constitution des bases de remblais de grande hauteur. Le déblai D18 a ainsi été écarté et sélectionné pour la réalisation de remblais de hauteur moindre comme le R21 le long des voies SNCF (figure 7).

Les déblais D8 et D49 (figure 8) ont quant à eux été sélectionnés pour la constitution des remblais RGH4 et RGH12 d'une part et RGH52 et RGH59 d'autre part. ▷

© DIF SO
2

- Porphyroïdes leucocrates fins localement sans biotite ;
- Orthogneiss alcalin plus ou moins porphyroïde à quartz bleu "métagr granite alcalin de Rodez" ou "orthogneiss de Rodez" ;
- Gneiss fins feldspathiques à passées schisteuses indifférenciées. Ce substratum est recouvert de différentes formations non représentées sur les cartes géologiques :

2- Plan synoptique du tracé.

2- Synoptic diagram of the alignment.

- Terrains d'altération d'âge indéterminé (tertiaire à quaternaire) : dépôts résiduels, altérites et arénites ;

- Dépôts alluvionnaires en fond de vallon ;
- Colluvions sur les pentes. D'un point de vue hydrogéologique, le tracé recoupe des talwegs habituellement secs et des vallées comportant des petits cours d'eau temporaires. Les horizons superficiels sont le siège de circulation d'eau (nappe phréatiques temporaires ou pérennes), convergeant dans les fonds de talwegs.



3

© CLAUDE CRUELLS



4

© CLAUDE CRUELLS

Compte tenu de la nature différente de ces deux déblais, les matériaux ont été réutilisés avec des dosages différents, soit respectivement 4 % de LHR pour D8 et 3 % pour D49, les matériaux gneissiques ayant tendance à mieux réagir au traitement que ceux de nature schisteuse.

→ Triaxiaux de type consolidé drainé, sur les éprouvettes testées initialement en compression, en vue de conclure sur les paramètres intrin-

sèques à retenir pour les modélisations. Il a notamment été déduit pour chaque famille de matériaux l'angle de frottement, issu directement des essais, la cohésion, divisée par 7 pour tenir compte de l'effet du vieillissement du matériau au cours de la vie de l'ouvrage, ainsi que le module E_{50} pour les calculs aux éléments finis.

Des jeux de paramètres de cisaillement ont ainsi été définis pour les matériaux issus de chaque déblai

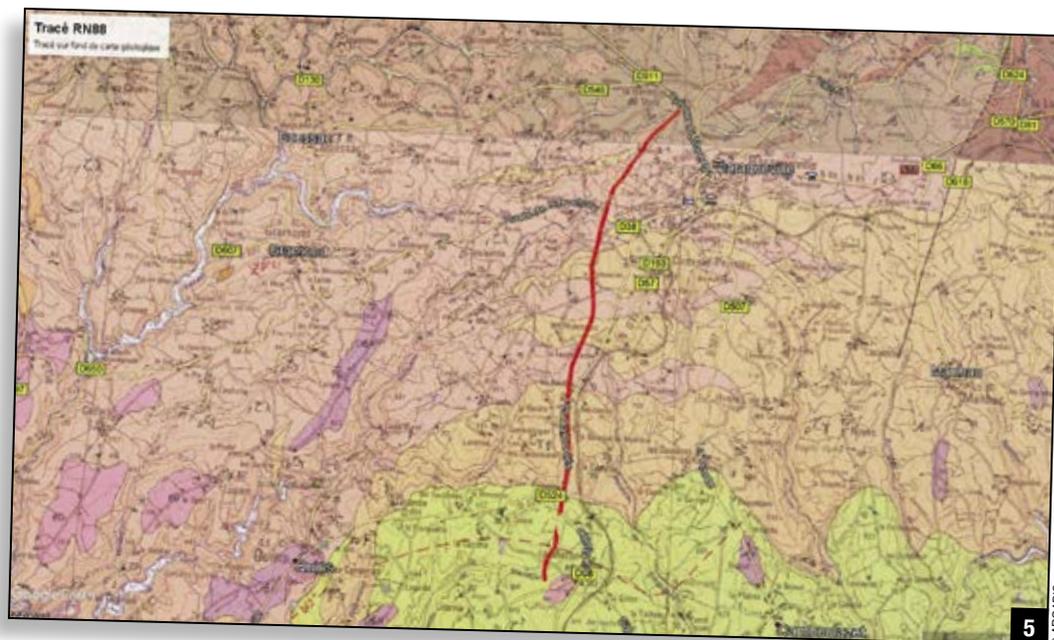
sélectionné pour le montage des remblais de grande hauteur.

Sur les matériaux bruts :

→ Œdomètres pour les matériaux bruts mis en œuvre en partie supérieure de remblai afin de valider que leur densité sèche moyenne, correspondant à un objectif de densification q_3 , leur permettait bien de rester dans un état de surconsolidation avec une contrainte effective supérieure à celle apportée par le compactage des couches

supérieures de remblai (évalué à 300 kPa pour une épaisseur de 15 m de matériaux mis en œuvre au-dessus).

Les essais triaxiaux et oedométriques ont été réalisés sur la fraction 0/50 des matériaux prélevés, qui ne représente que 50 % de la fraction totale 0/100 à 0/400 environ des sols de type B₅/C₁B₅ et B₄/C₁B₄ (et quelques C₁B₃ voire D₂ pour le D49). Pour se faire, les paramètres de cisaillement évalués ont volontairement été réduits.



5

3- Réglage de talus du déblai D38.

4- Vue d'ensemble des pentes et risbermes du D38.

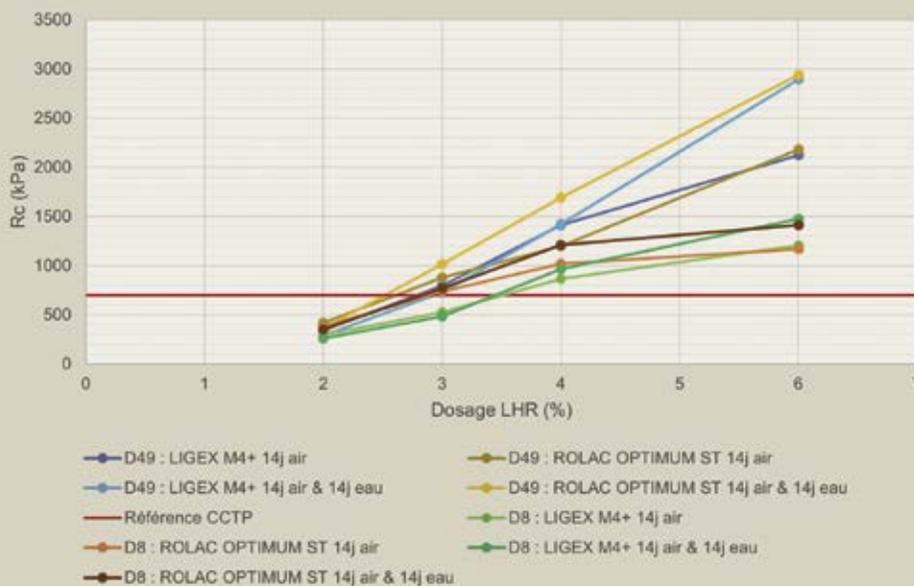
5- Tracé de la RN88 sur la carte géologique.

3- Slope grading on earth cut D38.

4- General view of the slopes and berms of D38.

5- Alignment of RN88 on the geological map.

RÉSULTATS DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION EN FONCTION DU DOSAGE EN LHR



car les matériaux testés renfermaient des éléments supérieurs à 5 mm alors que seule la fraction 0/5 mm était testée en laboratoire. Par ailleurs, la mouture en laboratoire permet une prise du liant optimisée entre les grains composant le squelette du sol. En place, les liaisons sont généralement plus fragiles au jeune âge où des blocs indurés résiduels subsistent après le malaxage. Malgré ces différences, les planches d'essais confirment l'objectif de performance attendu avec des résultats d'écrasement après 14 jours de cure à l'air et 14 jours d'immersion, conformes aux attentes du CCTP.

CONCEPTION DES OUVRAGES DE GRANDE HAUTEUR

La phase étude de la G3 a concerné d'une part les justifications de la stabilité interne et externe des ouvrages en terre (glissement, tassement et poinçonnement des sols d'assise) mais également les justifications de déformation des matériaux traités utilisés pour leur édification.

Pour éviter les risques de poinçonnement et de tassement du sol support, les alluvions et colluvions compressibles situées au niveau de l'assise des remblais de grande hauteur ont été systématiquement purgées. Des bases drainantes (figure 10) ont été réalisées systématiquement au droit des remblais de grande hauteur. Sur les flancs de talweg et dans les zones des remblais inférieurs à 15 m, des améliorations de l'assise en matériaux traités après décapage de la terre végétale étaient prévues lorsque la portance était faible ($EV_2 < 30$ MPa).

VÉRIFICATION DES ÉTUDES SUR SITE VIA DES PLANCHES D'ESSAIS

Les résultats des essais en laboratoire réalisés pour les bases de remblai ont été complétés par des planches d'essais sur site (figure 9).

Pour les matériaux extraits du déblai D8 par exemple, la méthodologie suivante a été mise en place. Trois couches de 0,40 m d'épaisseur de matériaux traités à 4% de LHR (soit 33 kg/m²) malaxés et compactés à l'objectif q_3

ont été mises en œuvre. La planche d'essais a été réceptionnée le jour du traitement de la troisième couche. La portance moyenne était de 71 MPa sur 6 points (pour un objectif de 50 MPa). Après 4 jours, la portance a été mesurée à nouveau et il a été observé une augmentation de l'ordre d'environ 40% au droit des 6 points suivis. Ces essais ont été complétés par des essais en laboratoire, et notamment des essais de résistance à la compression, sur des échantillons de matériaux prélevés dans

chaque couche de la planche d'essais à titre de comparaison.

L'ensemble des résultats confirme que les matériaux du site traités à 4% de Rolac Optimum ST et compactés à l'objectif q_3 conservent et améliorent leurs performances mécaniques, et ce même en présence d'eau. Cependant des différences notables existent entre les essais sur site et en laboratoire et sont directement liées à la granulométrie. Les résultats issus de la planche d'essais sont globalement plus pénalisants

6- Résultats de résistance à la compression en fonction du dosage en LHR.

7- Approvisionnement à partir du déblai D38, réglage et compactage du remblai R21.

6- Compressive strength results according to hydraulic road binder dosing.

7- Procurement from earth cut D38, grading and compaction of backfill R21.



© CLAUDE CRUELLS

7



8

© CLAUDE CRUELLS

L'étude de stabilité au glissement du corps du remblai (interne) et celle du remblai sur ces sols d'assise (externe) a été menée à l'aide du logiciel Talren 5.

Plusieurs profils ont été étudiés pour analyser l'effet des pentes naturelles parfois importantes, d'une part, et les hauteurs maximales de remblai, d'autre part. Pour les ouvrages en terre situés sur pente ou en versant, la stabilité a été vérifiée en considérant toutes les surfaces de rupture potentielles dont l'origine et l'émergence s'inscrivent dans une zone qui s'étend en amont et en aval à trois fois la hauteur du remblai étudié.

Très ponctuellement, des aménagements supplémentaires ont été prévus pour assurer la stabilité des ouvrages, comme la réalisation d'une bêche en matériaux granulaires aménagée ponctuellement en pied de talus aval sur 6 m au droit du RGH59 et raccordée à la base drainante (figure 11).

Les déformations de l'ouvrage ont été modélisées aux éléments finis via le logiciel Plaxis. Dans un premier temps, la loi de comportement adoptée était de type élasto-plastique avec double écrouissage "Hardening Soil Model" (HSM) sauf pour le substratum très raide. Ce dernier, qui présente un taux de déformation moindre malgré la

8- Décaissement du déblai D49.

9- Contrôles au droit de la planche d'essais.

10- Mise en œuvre de la base drainante au droit du RGH52.

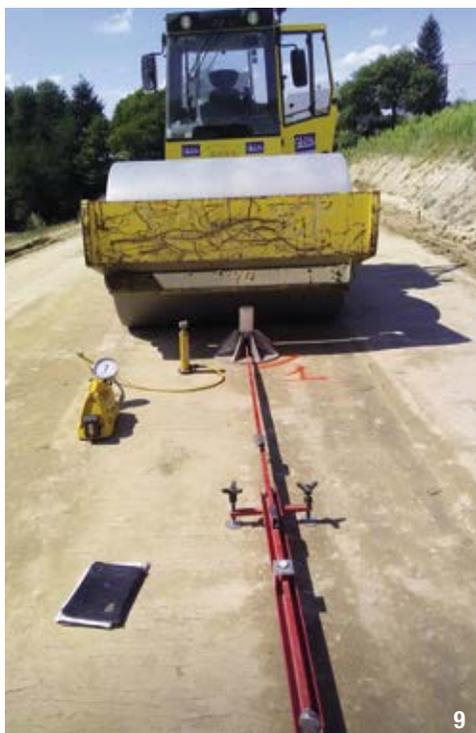
8- Excavation of earth cut D49.

9- Inspections at the test section level.

10- Laying the draining base at the level of RGH52.

surcharge liée à la mise en œuvre du remblai, a ainsi été défini avec la loi de comportement "Hardening Soil Small-Strain Stiffness" (HSS).

Cependant il a été mis en évidence que Plaxis ne prenait pas en compte les valeurs de sur-consolidation, traduisant les effets du compactage, indiquées pour les couches de remblais activées après la phase initiale (via le critère POP). Les matériaux traités étant renseignés avec des modules de déformation et des paramètres de résistance issus d'essais triaxiaux réalisés sur des échantillons compactés, il a donc été proposé de simuler l'augmentation de K_0 par la variation du coefficient de Poisson.



9

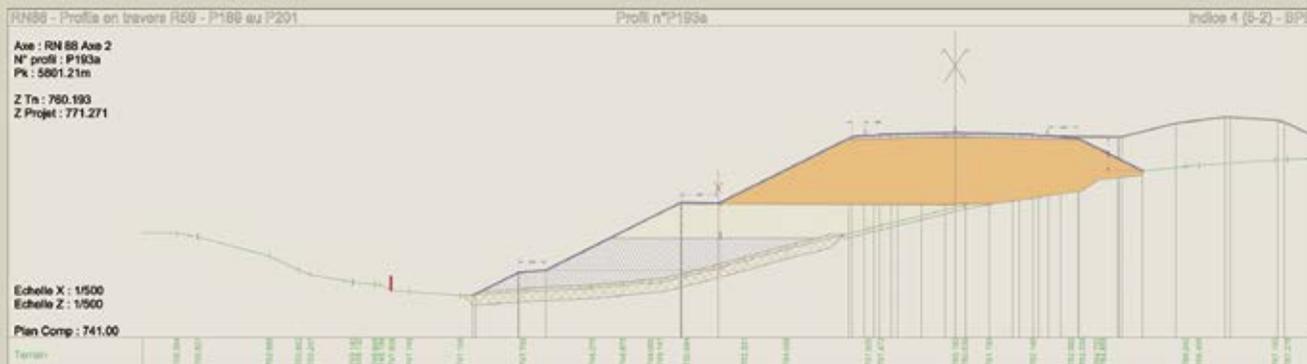
© CLAUDE CRUELLS



10

© CLAUDE CRUELLS

PROFIL EN TRAVERS DU RGH59



© CAZAL
11

Pour ce faire, la loi de comportement a été modifiée en faveur d'une loi linéaire élastique parfaitement plastique de type Mohr-Coulomb. La valeur maximale du coefficient de Poisson étant de 0,49 ; il est modélisé au maximum un KO proche de 1 à la mise en œuvre des couches compactées. Le coefficient de Poisson est ensuite réinitialisé à sa valeur caractéristique (de l'ordre de 0,25) après

11- Profil en travers du RGH59.
12- Base du RGH52 finalisée au niveau FR -15 m.

11- Cross section of RGH59.
12- Base of RGH52 finalised at level FR -15m.

mise en œuvre de la couche sus-jacente. Ce phasage a été retenu durant tout le montage du remblai de grande hauteur : de la première couche de remblai traité jusqu'à la mise en œuvre de la dernière couche de remblai non traité atteignant le fil rouge. Il a été comparé avec le même modèle (également en Mohr-Coulomb) sans variation du coefficient de Poisson. Les caractéristiques

des terrains en place sous-jacents n'ayant pas ou peu d'impacts sur le comportement du remblai (après purge des terrains meubles en base de l'ouvrage), les lois de comportements de type HSM et HSS ont été conservées. En conclusion, peu de variations de résultats sont à noter entre les modèles. Les contraintes horizontales varient faiblement mais n'influencent pas sur les tassements. Les valeurs de tassement maximal du remblai sont très proches de celles obtenues avec le modèle initial en HSM.

Pour toutes les modélisations, il a ainsi été observé des déplacements verticaux au sein du matériau traité mis en place en base de remblai inférieurs au critère de déformation défini de 1/500^e. Aucun point de rupture n'a été observé au sein du remblai et les tassements au sein des remblais non traités restaient faibles (soit limités entre 5 et 12 cm).

RÉALISATION DES REMBLAIS DE GRANDE HAUTEUR

Conformément aux consignes de mise en œuvre du GTR et des résultats des plaques d'essais, la méthodologie suivante a été réalisée sur l'ensemble des remblais de grande hauteur :

- Mise en place d'assainissement provisoire (fossé, bassin et dispositif environnemental) ;
- Décapage de la terre végétale et mise en stock pour réutilisation ultérieure ;
- Purge des alluvions et des colluvions avec une géométrie adaptée au fond de talweg ;
- Mise en place d'assainissement de type tranchée drainante en fond de purge afin de drainer et évacuer les arrivées d'eau provenant des



12
© CLAUDE CRUELLS

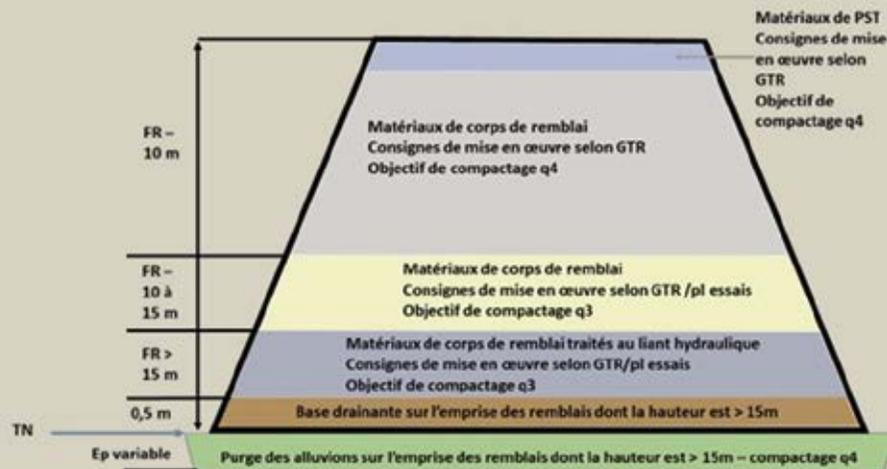
versants des talwegs ou circulant anciennement à la base des colluvions ;

- Remblaiement de la purge en matériaux granulaires pour éviter toute remontée capillaire au sein du remblai traité ;
- Mise en œuvre en base de remblai de grande hauteur, jusqu'à la cote fil rouge ("FR", soit la coté finie des entrobés) -15 m, de matériaux traités aux liants hydrauliques et compactés à l'objectif q₃ (figure 12) ;
- Mise en œuvre jusqu'à la cote FR -10 m, de matériaux à l'état naturel compactés q₃ ;
- Mise en œuvre en partie supérieure de matériaux à l'état naturel compactés q₄.

L'ensemble de ces étapes (figure 13) a fait l'objet de contrôles internes par l'entreprise, avec :

- Des levés topographiques a minima à chaque changement de structure ou point significatif ;
- Des essais de contrôle du service laboratoire sur site avec : des essais à la plaque (mesure EV₁ et EV₂), des essais en laboratoire afin

COUPE SCHÉMATIQUE DE LA COMPOSITION DES REMBLAIS DE GRANDE HAUTEUR



13

© CAZAL

de maîtriser la teneur en eau de mise en œuvre et de vérifier les performances du traitement, ainsi que des contrôles de compactage en continu avec la méthode du Q/S.

13- Coupe schématique de la composition des remblais de grande hauteur.

13- Schematic cross section of the composition of very high embankments.

Un contrôle extérieur a également été réalisé pendant toute la durée de montage de ces remblais, avec la présence en permanence d'un chargé de suivi de travaux de la DIR SO ainsi que des contrôles topographiques et en laboratoire (essais en laboratoire complémentaires et essais pénétrométriques en laboratoire) par des organismes extérieurs et mandatés par la DIR SO. □

QUELQUES CHIFFRES

MONTANT GLOBAL DU MARCHÉ : 37 M€ pour une durée de travaux global de 3 ans et demi environ

VOLUME DE DÉBLAI : 2 000 000 m³

VOLUME DE REMBLAI : 1 150 000 m³ dont :

- Plus de 150 000 m³ de base de remblai de grande hauteur traitées au liant hydraulique
- 310 000 m³ de base de remblai compacté q₃
- 650 000 m³ de remblai courant
- Excédents en modelés paysagers

ARASE : 200 000 m²

COUCHE DE FORME : 200 000 m²

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : DREAL Midi-Pyrénées

MAÎTRE D'ŒUVRE : DIR Sud-Ouest

ENTREPRISES : Groupement Colas - Cazal - Aximum

BE GEOTECHNIQUE G3 (ÉTUDE) : Arcadis

BE GEOTECHNIQUE G2-G4 : Terrasol

ABSTRACT

VERY HIGH EMBANKMENTS OF RN88 IN THE CENTRE OF THE AVEYRON

CHARLOTTE COCHEZ, ARCADIS - MATTHIAS MAVEL, CAZAL

The creation of certain new road arteries requires large earth structures which cannot be treated like standard engineering structures for which the detailing is defined in the Guide to Highway Earthworks ("GTR"). LCPC bulletin No. 243 of 2003, following on from the Nantes seminar of 2001 relating to very high embankments, specifies that this guide can no longer be applied above 15 metres. Above that height, the energy employed for compaction is less than the effect of the load generated by the overlying layers. The risk of changes in the behaviour of the materials used, due to their physical nature (creep) or variations in water content, is an important issue to be controlled as of the design stage to avoid deformation which could be prejudicial for the continued operation of these special structures. □

TERRAPLENES DE GRAN ALTURA EN LA RN88, EN EL CORAZÓN DE AVEYRON

CHARLOTTE COCHEZ, ARCADIS - MATTHIAS MAVEL, CAZAL

La creación de algunos ejes viales nuevos requiere construcciones en tierra de grandes dimensiones, que no pueden tratarse como obras corrientes, cuyas disposiciones constructivas se definen en la Guía de Movimientos de Tierras en la Construcción Vial. El boletín del LCPC n°243 de 2003, redactado tras el seminario de Nantes de 2001 relativo a los terraplenes de gran altura, precisa que esta guía no puede ser aplicada más allá de los 15 m. En efecto, a partir de esa altura, la energía aplicada durante la compactación es inferior al efecto de la carga ejercida por las capas subyacentes. El riesgo de evolución del comportamiento de los materiales utilizados, vinculado a su naturaleza física (fluencia) o a las variaciones de contenido de agua, es una cuestión importante que debe tratarse desde la fase de diseño para evitar deformaciones que podrían ser nefastas para la durabilidad de estas obras específicas. □



Bassin de stockage (70 000 m³) de l'usine de Clichy du SIAAP, Ile-de-France, France
Réalisation du futur radier : forage de 636 micropieux (24 à 27 m de longueur).

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.

S
B
SO
IL
B

Construire sur du solide

www.soletanche-bachy.com



SOLETANCHE BACHY

PRO BTP LE MEILLEUR DE LA PROTECTION SOCIALE

SANTÉ
PRÉVOYANCE
ASSURANCES
ÉPARGNE
RETRAITE
VACANCES
ACTION SOCIALE



PRO BTP
GROUPE

PRO BTP Association de protection sociale du Bâtiment et des Travaux publics régie par la loi du
1er juillet 1901 - Siège social : 7 rue du Regard 75006 PARIS - SIREN 394 164 966

www.probtp.com