

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

SOLS ET FONDATIONS. A480 - TOARC CENTRE. TOUR KEIKO A ISSY-LES-MOULINEAUX. CALAIS PORT 2015. PARIS XIII^e - BASSIN AUSTERLITZ. GPE LIGNE 18. LIGNE 14 - CREUSEMENT DANS UN CONTEXTE GEOTECHNIQUE COMPLEXE ET URBAIN DENSE. INFRASTRUCTURE DE LANCEMENT POUR LA FUSEE ARIANE 6 A KOUROU. MODERNISATION DE LA LIGNE FERROVIAIRE DES HORLOGERS. NOUVEAU CENTRE HOSPITALIER PRINCESSE GRACE A MONACO. TALUS D'ETREMBIERES - A40 ANNEMASSE-GENEVE

N° 974 DÉCEMBRE 2021



CENTRE HOSPITALIER
PRINCESSE GRACE
À MONACO
© SAMIA MOUNIR

LES TRAVAUX
PUBLICS
FÉDÉRATION
NATIONALE



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

- Paroi moulées & Soutènements
- Pieux de fondations & Micropieux
- Sondage de reconnaissance
- Clous & Tirants d'ancrage
- Reprise en sous-oeuvre
- Combléments de carrières
- Traitement de terrains
- Jet grouting
- Congélation de sol
- Fondations de pylônes & éoliennes

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

NOUS CONTACTER

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

Directeur de la publication
Bruno Cavagné

Directeur délégué
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fntp.fr

Comité de rédaction

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

Ont collaboré à ce numéro

Rédaction
Monique Trancart (actualités),
Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente

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

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

Publicité

Rive Média
10, rue du Progrès - 93100 Montreuil
Tél. : 01 41 63 10 30
www.rive-media.fr

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

Site internet : www.revue-travaux.com

Édition déléguée

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

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

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

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

Éditions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
ISSN 0041-1906

DE GRANDS CHANTIERS À DEMARRER DANS LA PROFESSION DES FONDATIONS SPÉCIALES



© DR

Voici un an que je suis devenu Président du Syndicat des Entrepreneurs de Sondages, Forages et Fondations Spéciales (SOFFONS). Je profite de la tribune qui m'est offerte aujourd'hui pour rendre hommage à mes illustres prédécesseurs, qui ont contribué à amener la profession des fondations spéciales au niveau d'excellence où elle se trouve aujourd'hui.

Quels sont les grands chantiers qui s'ouvrent devant nous ?

Bien sûr, il y a les grands projets eux-mêmes que nos entreprises vont être amenées à réaliser dans les quelques années à venir : la deuxième phase du Grand Paris Express, le Canal Seine Nord Europe, le métro de Toulouse, etc.

Mais il y a d'autres chantiers qui contribueront à continuer de faire progresser notre profession.

Je pense bien entendu en premier lieu à la sécurité. La révision de la norme EN 16228, qui concerne les protections sur les foreuses, est déjà bien avancée. En parallèle, le guide de l'INRS, qui définit notamment les conditions d'utilisation du mode spécial, a été publié en mai 2021.

Pour ce qui est de nos matériels les plus lourds, l'enjeu de la qualité des plateformes de travail est

fondamental, car nous avons encore trop souvent des machines qui se retournent. Une prise de conscience de tous les acteurs de nos chantiers est absolument nécessaire si nous voulons éviter ces accidents qui peuvent s'avérer dramatiques.

La conception des ouvrages géotechniques : elle passe par la révision de la norme NFP 94500 qui définit les missions d'ingénierie géotechnique. Cette révision a été amorcée en 2019 en collaboration avec le SYNTEC et l'USG et devrait aboutir en 2022. Elle a pour but de moderniser cette norme qui date de 2006 et d'améliorer nos capacités de conception.

En parallèle, notre métier évolue avec l'arrivée massive de ce qu'il est convenu d'appeler la digitalisation. Les fondations spéciales utilisent depuis longtemps les enregistrements de paramètres et autres dispositifs électroniques embarqués. L'arrivée de l'intelligence artificielle y prend alors tout son sens. Elle permettrait par exemple d'en tirer des lois de comportement de nos outils de forage en fonction d'une typologie de nature de sols.

Il me reste à conclure sur le défi qui est probablement le plus important pour nos métiers des Travaux Publics : la réduction de notre empreinte carbone et notre transition énergétique. À la fois pour notre image dans le grand public, mais aussi pour continuer d'attirer des talents vers notre extraordinaire profession. Cette transition passe par l'utilisation de bétons bas carbone et la réduction de nos quantités de matériaux par l'optimisation de nos ouvrages. Elle concerne aussi nos matériels qui s'orientent vers l'utilisation de nouvelles énergies et nouvelles motorisations (électriques, hydrogène, etc.). Il est aussi bon de rappeler que lorsque nous construisons un métro, un canal, ou un ouvrage d'épuration, nous agissons aussi pour le climat !

Vous le voyez : les chantiers sont nombreux et je suis très enthousiaste à l'idée de continuer de moderniser notre profession dans un monde qui se transforme !

OLIVIER PETER

PRÉSIDENT DU SOFFONS ET DE L'UMTM
DIRECTEUR GÉNÉRAL DE SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

SOLS & FON DATIONS

RÉGÉNÉRATION ET MODERNISATION DE LA LIGNE FERROVIAIRE DES HORLOGERS © GEOS INGENIEURS CONSEILS

04 ALBUM

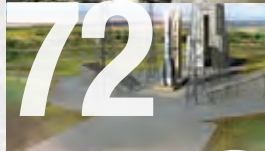
06 ACTUALITÉ



16

**ENTRETIEN AVEC
NICOLAS UTTER**
CFMS - MÉCANIQUE DES SOLS
ET GÉOTECHNIQUE :
UN MONDE SOUTERRAIN
À METTRE EN LUMIÈRE

**24 CONFLUENCE :
L'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE -
UNE DISCIPLINE PASSIONNANTE**



A480 - TOARC CENTRE
Ouvrage avec pieux berlinois
dans une digue contenant
des enrochements

**TOUR KEÏKO
À ISSY-LES-MOULINEAUX**
Un chantier
multi-techniques

CALAIS PORT 2015
Les murs en remblai renforcé
à l'épreuve des embruns

**PARIS XIII^e -
BASSIN AUSTERLITZ**
Essai de chargement
sur barrette

GPE LIGNE 18
Forme bilobe pour
le puits d'entrée -
sortie des tunneliers

**RETOUR D'EXPÉRIENCE
DE LA LIGNE 14 SUD**
Excavation au tunnelier
sous les carrières souterraines
du Calcaire Grossier de Paris

**L'INFRASTRUCTURE
DE LANCÉMENT POUR
LA FUSÉE ARIANE 6**
à Kourou

**LA LIGNE FERROVIAIRE
DES HORLOGERS**
Régénération
et modernisation

**NOUVEAU CENTRE
HOSPITALIER PRINCESSE
GRACE À MONACO**
Fin des travaux
de fondations spéciales

**LE TALUS D'ÉTREMBIÈRES -
A40 ANNEMASSE - GENÈVE**
Confortement par pieux
d'un remblai autoroutier instable

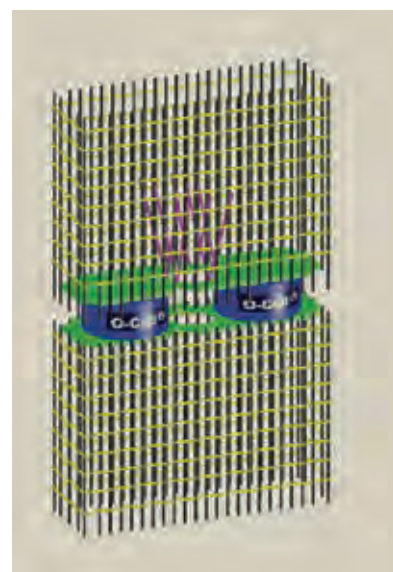


BASSIN D'AUSTERLITZ ESSAI DE CHARGEMENT O-CELLS HYDROFRAISE ÉLECTRIQUE

Le groupement Impluvium

(Urbaine de Travaux (mandataire), Sade, Bessac, Soletanche Bachy France, Sefi-Intrafor) réalise, en amont du pont d'Austerlitz à Paris, en prévision des JO 2024, un dispositif d'assainissement comportant un bassin de stockage de 46 000 m³ soumis à de fortes sous-pressions : 50 m de diamètre, radier à -34 m, paroi moulée de 1,20 m à 62 m de profondeur, barrettes. Pour optimiser la fondation, un essai de chargement sur barrette est réalisé par le procédé O-Cells (Fugro). On note aussi l'utilisation de l'Hydrofraise[®] à power-pack électrique de Soletanche Bachy. Deux premières en France.

(Voir article page 52).



© FUGRO LOADTEST

© CÉDRIC HELSY

TROPHÉES EIFFEL : L'ACIER AU SERVICE DE LA LÉGÈRETÉ ET DE LA RÉSISTANCE

Les trophées Eiffel 2021 de Construiracier distinguent des projets d'architecture métallique. Nous avons retenu une passerelle économe en matière et une structure qui protège des fouilles gallo-romaines.



Passerelle sur la Scarpe à Arras, trophée Franchir. Les appuis en béquille sont disposés de façon que les portées intérieures et extérieures soient équilibrées.

L'équilibre entre compression et traction donne à la passerelle sur la Scarpe à Arras (Pas-de-Calais) sa résistance et son apparente légèreté.

« L'idée première est de combiner la poutre structurelle et le garde-corps, et de l'ajourer au maximum : économie de matière, et surtout réduction drastique de l'épaisseur à imposer à travers le paysage, écrit Jean-François Blassel, ingénieur-architecte, président-directeur du bureau d'études Span qui a conçu la passerelle mise en service fin 2019. Le platelage en béton d'à peine 15 cm d'épaisseur agit comme la membrure

inférieure de la poutre mixte, en compression, tandis que les deux ronds parallèles en acier de 30 mm qui servent de main courante, agissent comme sa membrure supérieure, en traction. Cette configuration inhabituelle lui a valu de remporter le trophée Eiffel de Construiracier dans la catégorie Franchir et le prix 2021 Duo at work (partenariat architecte/industriel).

La passerelle est une structure en U, bipoutre, mixte acier-béton, constituée d'une dalle en béton armé qui sert de tablier et de deux treillis métalliques de 1,30 m de hauteur, dans les garde-corps.

L'âme de la poutre en treillis est formée par des barres carrées en acier en diagonale.

→ **Appuis en béquille**

« La poutre en U porte sur trois travées (11, 22 et 11 m) définies par les deux culées et les deux appuis en béquille encastrés en tête et articulés en pied, décrit Span sur son site internet⁽¹⁾. Les appuis en béquille sont disposés de façon que les portées intérieures et extérieures soient équilibrées. Cette disposition permet de maintenir les travées en encorbellement depuis les béquilles, pour obtenir une compression de la membrure inférieure en béton et une traction de la membrure en acier. »

Grâce à cet ouvrage sur la Scarpe de 44 m sur 3,5 m, une voie piétonne et cyclable franchit la rivière qui coupe en deux une ancienne déchèterie en cours de renaturation. Des péniches passent dessous.

Jean-François Blassel l'a conçue pour la communauté urbaine d'Arras, maître d'ouvrage. Bureau d'études : Span. Construction métallique : Viry avec Chia-ria (peinture). Entreprises : Freyssinet, Viry et Eurovia.

→ **Structure sur fouilles**

Parmi les 10 projets lauréats des 7^e trophées Eiffel 2021, figurent, en catégorie Architecture et ingénierie, la couverture des fouilles archéologiques d'une maison romaine à Bibracte sur le Mont Beuvray (Saône-et-Loire). La structure métallique

est peu ancrée dans le sol à cause des vestiges qu'il peut recéler. « Sa charpente en acier galvanisé (67 tonnes) porte sans appuis intermédiaires entre deux lignes de poteaux espacées de 36 m, avec un débord de 3 m vers l'extérieur, précise T/E/S/S/, l'atelier d'ingénierie⁽²⁾. Des lests suspendus (3,7 t/unité) s'opposent au soulèvement de la structure par le vent et maintiennent la toile de couverture tendue. » La mise en service a eu lieu en juillet 2021.

Maîtrise d'ouvrage : établissement public de coopération culturelle de Bibracte. Architecte : Paul Andreu Création. Bureau d'études : T/E/S/S/ Atelier d'ingénierie. Construction métallique : SMC2.

Tous les trophées sur :
www.construiracier.fr/concours/trophees-eiffel/2021-2/ ■

⁽¹⁾ Cf. <https://span.paris/passerelle-sur-la-scarpe>.

⁽²⁾ Rubrique "tous les projets" sur www.tess.fr.



La structure acier et sa couverture en toile résistent au vent grâce à des lests en béton (3,7 t/unité).

CONSTRUCTION MÉTALLIQUE : CARNETS DE COMMANDES BIEN REMPLIS

C'est avec sérénité que le secteur de la construction métallique envisage le 1^{er} semestre 2022 « grâce à des carnets de commande bien remplis et des consultations nombreuses en cette fin d'année, indiquait Roger Briand, président du Syndicat français de la construction métallique (SCMF) en octobre. Reste à espérer que les prix des matières premières se stabilisent pour que les marges des entreprises se reconstituent. »

En 2021, les marges ont été grignotées par le prix de l'acier. Des négociations avec les clients ont pu réduire les dégâts, au titre des recommandations de bienveillance de la part des acheteurs publics

(prix actualisés, suppression des pénalités de retard) ou de la clause de l'imprévision dans le privé (petites compensations). Les commandes sont soutenues par le Grand Paris Express, lignes et gares, et les jeux olympiques de 2024.

→ **Chiffre d'affaires en hausse de 6,5%**

À fin août, le secteur avait progressé de 6,5% à 3,8 milliards d'euros par rapport à l'exercice 2020, avec près de 11% à l'export.

Le SCMF regroupe plus de 800 entreprises françaises, principalement petites ou de taille intermédiaire, qui emploient 20 000 personnes. ■



La gare de Rennes après restructuration avec du métal en charpente, en couverture, en façades et en structures de passerelles.

Le génie du quotidien

La pelle sur pneus A 913 Compact Litronic

La pelle compacte est une aide flexible, habile et performante sur les chantiers grâce à sa capacité de charges élevée et un rayon de giration avant minimal, sans oublier sa grande vitesse de déplacement.

www.liebherr.com

LIEBHERR

Pelles sur pneus



BATTERIES ET SYSTÈMES

Le gouvernement a lancé un appel à projets national sur les batteries pour « soutenir la recherche, l'innovation et le premier déploiement industriel de projets pertinents sur tous les maillons de la chaîne de valeur ».

Les candidats peuvent présenter des innovations en batteries et systèmes pour les transports, les engins et le stockage, ainsi qu'en matériaux et équipements pour leur fabrication.

Il existe déjà des projets de matériaux et composants, suite à plusieurs initiatives comme "PIIEC batteries". Les batteries sont un maillon essentiel de l'électromobilité et du soutien au réseau avec intégration d'électricité d'origine renouvelable.

Offres avant le 10 janvier 2023 avec des relèves intermédiaires en mars et en septembre 2022.

ECOMINERO

Les organisations professionnelles représentant les fabricants de produits ou matériaux de construction d'origine minérale* ont créé un éco-organisme du fait de leur responsabilité de producteur depuis la loi n°2020-105 du 10 février 2020 anti gaspillage et pour une économie circulaire.

Ecominero fournira des solutions de reprise des déchets inertes. Il offrira un maillage territorial renforcé des points de reprise, une traçabilité des déchets depuis les chantiers jusqu'à la réutilisation des matériaux. Il contribuera aux plans d'écoconception de produits et matériaux. Les prestataires seront sélectionnés et contrôlés selon un cahier des charges spécifique.

Le taux de valorisation des déchets inertes du bâtiment, de 76 %, pourrait ainsi grimper à 90 % en 2028, selon ces organisations.

* Fib, Routes de France, Stic, SNBPE, SNROC, UNPG.

ÉTUDE SUR LES FUTURS ÉNERGÉTIQUES EN 2050



Raccordement électrique du parc éolien offshore de Saint-Nazaire, à La Courance, plage de Saint-Brévin-les-Pins (Loire-Atlantique).

© VALÉRY JONCHÉRAY/RTE

« Les réseaux jouent un rôle majeur dans la transition énergétique, souligne l'étude "Futurs énergétiques 2050" de Réseau de transport d'électricité (RTE). Le débat public sur le secteur électrique porte largement sur les sources de production mais sa réalité opérationnelle est de constituer une industrie de réseau. (...) Toute nouvelle installation (...) implique un raccordement et éventuellement une adaptation du réseau. Ces réseaux vont devoir accélérer leur transformation pour rendre possible la transition ».

RTE investit, à travers son schéma de développement de 2019, 33 milliards sur quinze ans pour réaliser le mix énergétique (partage entre production nucléaire et renouvelable) et renouveler ses infrastructures. Dans l'hypothèse où la part des énergies renouvelables augmente beaucoup, l'entreprise prévoit de nouveaux axes nord-sud, est-ouest, plus d'interconnexions avec l'étranger et le raccordement de parcs éoliens en mer. Les distributeurs devront aussi investir.

RTE avait caractérisé 8 scénarios à 2050 dans la 1^{re} phase de l'étude publiée le 27 janvier 2021⁽¹⁾ avec l'Agence internationale de l'énergie (AIE). La 1^{re} partie de

la 2^{de} phase, parue le 25 octobre, sort après consultation du public. La 2^{de} phase s'intitule "simulations, analyses et résultats". L'ensemble de l'étude, commandée par le ministère de la Transition écologique à RTE et à l'AIE, sera publiée début 2022.

L'analyse de RTE doit éclairer des choix politiques dans le cadre du changement climatique et de la baisse de l'utilisation des combustibles fossiles.

→ Aucun accord sur la sobriété

Agir sur la consommation d'énergie « grâce à l'efficacité énergétique voire la sobriété » est le 1^{er} des 18 enseignements de "Futurs énergétiques 2050". Toutefois, « aucun accord ni évidence ne sont ressortis de la concertation : pour certains, la sobriété est la 1^{re} réponse à la crise environnementale tandis que d'autres la rejettent au nom des libertés individuelles et du confort. » RTE l'estime utile.

Si la consommation française d'énergie finale, toutes sources confondues, doit baisser de 1 600 TWh⁽²⁾ à 930 en 2050 (-40 %) conformément à la Stratégie nationale basse consommation⁽³⁾, la part de l'électricité va augmenter. Sur les 875 TWh d'électricité consom-

mée en 2050 si rien n'était fait, RTE estime que 200 pourraient être soustraits par l'efficacité énergétique et 90, par la sobriété. La consommation finale d'électricité s'établirait alors à 555 TWh sur 930 TWh (<60 %) au lieu de 875 sur 1 600 (<55 %).

→ Délais d'installation trop longs

RTE alerte sur l'urgence à se mobiliser. « Les délais d'installation de production d'électricité bas carbone (nucléaire, éolien, photovoltaïque), sont incompatibles avec l'ambition de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 55 % en 2030 (par rapport à 1990) surtout si on renonce à l'une des trois technologies. » (18^e enseignement).

Étude à consulter sur :

www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats_0.pdf ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux n°967, mars 2021, page 10.

⁽²⁾ La consommation d'énergie primaire est 1,75 fois plus élevée que la finale du fait des pertes en ligne et des consommations des producteurs et des transformateurs (chiffres-clés de l'énergie 2020).

⁽³⁾ Introduite par la loi de 2015 sur la transition énergétique pour la croissance verte (n°2015-992) Cf. www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbcc.

1,35 MILLIARD D'EUROS POUR LE FRET FERROVIAIRE



110 millions d'euros serviront à remettre en état des voies de service. Ici, gare de triage de Gevrey-Perrigny (Côte-d'Or).

Le gouvernement a annoncé que 1,35 milliard d'euros seront mis sur la table pour faire passer la part modale du fret ferroviaire dans le transport de marchandises de 9% (2019) à 18% en 2030, objectif inscrit dans la loi du 22 août 2021 de lutte contre le dérèglement climatique et conforme à la stratégie nationale pour le développement ferroviaire⁽¹⁾. L'origine des fonds est diverse, certains étant déjà validés avant la déclaration du 1^{er} ministre, le 22 octobre, et leur échéance, pas toujours explicite. Ils proviennent de l'État, de l'Union européenne, des collectivités territoriales et d'acteurs du secteur.

Les investissements se déclinent en 8 axes.

L'axe n°3, un des deux plus coûteux, avec 238 millions d'euros, vise à améliorer le gabarit sur le réseau et dans les ports. Ont été identifiées 19 opérations (202 millions) dont l'élargissement de

tunnels dans les Vosges. À cela s'ajoutent 36 millions pour l'accès ferroviaire dans les ports fluviaux (23 opérations) dont celui de Lyon.

L'axe n°1 concerne la modernisation et la création de terminaux rail-route, de cours de chargement-déchargement et d'installations terminales embranchées (ITE) chez les clients (250 millions). D'ores et déjà, 8 terminaux multimodaux et 12 ITE ont été retenus en 2021.

→ Plus de ferré dans les grands ports

Autre gros budget : la régénération des lignes capillaires (axe n°5). Les investissements dont ceux des collectivités et des chargeurs, sont estimés à 205 millions d'euros sur des périodes remontant parfois à 2015.

Les voies de service (axe n°2) - manœuvre, recomposition des trains, remisage, changement de locomotive, etc. - seront remises en état (110 millions

d'euros d'ici 2024). De plus, la viabilité des installations de tri à la gravité, spécifiques au transport en wagon isolé et qui permettent l'assemblage et le désassemblage de lots, sera préservée grâce à 40 millions injectés. Quatre sites prioritaires sont identifiés : Miramas (2021-2025, Bouches-du-Rhône), Woippy (Moselle), Sibelin près de Lyon, Le Bourget (Drancy, Seine-Saint-Denis).

L'axe n°8 se concentre sur l'extension du réseau ferré dans les 7 grands ports maritimes⁽²⁾, soit 14 projets et près de 140 millions, dont à Dunkerque, Marseille (Mourepiane) et Le Havre (Port 2000).

→ Voies d'évitement de 850 m

Les travaux ont un impact sur la circulation des trains notamment de longue distance. L'État demande donc à SNCF Réseau de compenser les surcoûts induits par les fenêtres de travaux (axe n°7) à hauteur de 210 millions.

Les trains longs (850 m) et des voies d'évitement de cette longueur seront développés (axe n°4). 50 millions serviront à initier études et travaux.

Enfin, 85 millions devraient être disponibles pour étoffer les outils numériques de gestion des circulations et des capacités, de géolocalisation des trains et de communication du personnel (axe n°6).

En savoir plus sur :

www.ecologie.gouv.fr/dossier-presse-relance-du-fret-ferroviaire

⁽¹⁾ Stratégie nationale fret ferroviaire, 13 septembre 2021 : www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/210909_Strategie_developpement_fret_ferroviaire.pdf.

⁽²⁾ Bordeaux, Calais, Dunkerque, Le Havre, Marseille, Rouen et Saint-Nazaire.

PARTENARIAT POUR L'EXCELLENCE

La FNTP et le CCCA-BTP* ont signé le 28 octobre une convention de partenariat pour conduire la formation professionnelle en travaux publics vers l'excellence. Une étude examinera l'impact des transitions écologique et numérique sur les besoins en compétences.

L'opération Boost Apprentissage TP fera la promotion des métiers et des filières de formation auprès des plus jeunes.

Des appels à projets solliciteront l'innovation en formation, notamment par le numérique.

Une action est dédiée aux formateurs : animation de communauté de métiers, des séminaires, du conseil, etc. Sera étudiée la nécessité de créer de nouvelles certifications professionnelles.

Le CCCA-BTP instruira les demandes de label "Excellences TP" de la FNTP.

* Comité de concertation et de coordination de l'apprentissage du bâtiment et des travaux publics.



Les besoins en nouvelles compétences et certifications seront détectés.

L'UNEC À LA FNTP

L'Union nationale des entreprises de valorisation (Unepv) a rejoint, début octobre, la Fédération nationale des travaux publics.

L'Unepv, créée en 1972, regroupe des entreprises spécialisées dans la valorisation et le traitement de déchets inertes du BTP, à travers des points de stockage ou de regroupement, du tri et des aménagements paysagers.

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 :



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

Prochains numéros :

- TRAVAUX n° 975 « Énergie »
- TRAVAUX n° 976 « Maintenance des infrastructures »

RÉSEAU ÉLECTRIQUE AU SÉNÉGAL

Eiffage Energie Systèmes a commencé la réalisation d'un réseau d'électricité au Sénégal entre Touba (188 km à l'est de Dakar) et Ndioum (au nord près de la Mauritanie). Il s'agit d'implanter une ligne aérienne de 280 km de long (225 kV), de créer 3 postes de transformation et d'en étendre un, de reprendre des équipements de distribution et d'en installer pour l'exploitation-maintenance.

Le contrat de 106 millions d'euros va de la conception à la mise en service prévue à la mi-2024.

Ce projet dit de la Boucle de Ferlo, améliore aussi l'alimentation de Dakar.

Il témoigne de la volonté du gouvernement sénégalais de donner accès à l'électricité à toute la population en 2025 (Plan Sénégal émergent) contre 76 % fin 2019.

La filiale d'Eiffage a déjà livré une boucle électrique à la Société nationale d'électricité du Sénégal en 2018, entre Fatick et Kaolack (45 km) au sud-est de Dakar.



© SHUTTERSTOCK

Eiffage Energie Systèmes va installer une ligne aérienne de 280 km.

CAN RACHÈTE SP

Le groupe Can, spécialiste des travaux d'accès difficile, a racheté Stabilisation Protection (SP) le 9 novembre, une société avec qui il travaille déjà depuis plusieurs années.

SP, installée dans les Hautes-Alpes, exerce dans la stabilisation de talus, la protection et la sécurisation contre les risques naturels et les fondations spéciales.

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE D'UN QUAI À CHERBOURG (MANCHE)



© VILLE DE CHERBOURG-EN-COTENTIN

Quai de débarque de pêche, sur le quai Lawton-Collins de Cherbourg-en-Cotentin, conservé dans le cadre du réaménagement du secteur.

Cherbourg-en-Cotentin (Manche) prépare l'adaptation au risque de submersion par la mer du quai Lawton-Collins. « L'eau finit toujours par monter au-delà des dispositifs (de barrage à l'eau, NDLR), » rappelle Céline Azais, urbaniste-programmiste, cheffe de projet chez Setec Organisation, mandataire du pilotage de l'étude de programmation urbaine pour l'aménagement du site.

Le quai, situé près du centre-ville et du port de plaisance, abrite la Cité de la mer dans l'ancienne gare transatlantique (1929-1932), des friches, des hangars et du stationnement. Il s'avance vers la mer, sur 12,5 ha du sud au nord. Dans l'étude de programmation, il devient un véritable quartier avec logements et activités. La partie où débarquent les pêcheurs est conservée, un point de vente est créé.

Plusieurs niveaux de recouvrement du quai par l'eau sont envisagés selon la montée de la mer. Une frontière est établie autour de 1 m d'hauteur d'eau supplémentaire (1 fois/100 ans). Dans ce cas, l'eau submerge le bord à quai, interdit le temps que la mer redescende. Plus haut, sont implantés, au sec, jardins,

bâtiments. Quand l'eau dépasse ce niveau, événement exceptionnel, elle peut arriver au pied d'un immeuble. Les rez-de-chaussée dédiés à des activités pourraient s'en protéger par une partie en mezzanine et des réseaux rehaussés, ou une baie résistante à la pression de l'eau. Les logements, installés à partir du 1^{er} étage, communiqueraient par passerelles.

→ Crues de la Divette

« La programmation prend aussi en compte les inondations dues à la Divette et dont l'estuaire se situe en amont du quai, explique Antonin Amiot, cogérant des Marneurs, agence d'urbanisme, architecture et paysage, qui a travaillé aux côtés de Setec-Hydratec. La ville s'est installée sur sa rive gauche et a dérivé le cours d'eau pour s'étendre. » Cette double configuration influe sur les zones constructibles, les transports, la gestion des eaux et des jardins.

L'étude de l'adaptation du quai Lawton-Collins à la montée de la mer et à la plus grande fréquence d'événements extrêmes servira de modèle. Dans le cadre du Contrat de plan interrégional État-Régions Vallée de Seine⁽¹⁾, la ville, maître d'ou-

vrage, est accompagnée dans l'étude par l'Établissement public foncier Normandie et le Cerema (technique). Coût de l'étude de programmation : 155 000 HT (2021) dont 48 000 réglés par la Région et 48 000 par l'État (FNADT).

L'analyse de site est intervenue en 2018-2019 au moment où le plan de prévention des risques naturels multirisques (inondations, submersion marine et chutes de blocs) était en cours d'élaboration.

→ Négociations foncières

L'étude de programmation a été publiée en juin. Depuis, se sont ouvertes les négociations sur le foncier propriété de Ports de Normandie⁽²⁾ et de l'État. Suivront une 2^{de} phase de concertation, la dépollution puis les travaux.

À découvrir sur :

<https://lesmarneurs.cargo.site/>
Quai-Lawton-Collins
et sur : www.setec.fr
(actualité du 26 juillet). ■

⁽¹⁾ Fiche action 1.4, maîtrise du développement urbain.

⁽²⁾ Ports de Caen-Ouistreham, Cherbourg et Dieppe : alliance région, départements, agglomérations.



Rénovation de l'installation pour la production de pâte à papier de Moosterås, Suède | ©Södra

Réduisez l'impact environnemental de vos projets avec les palplanches acier **EcoSheetPile™ Plus**.
 Fabriquées à partir d'acier 100% recyclé et 100% d'électricité certifiée de sources renouvelables, leur production émet jusqu'à 61% de gaz à effet de serre de moins que les aciers conventionnels.



XCarb®
 De sources recyclées
 et renouvelables



CIELIS ÉCLAIRE PARIS

Citelum a remporté le marché de l'éclairage public, de la signalisation lumineuse et des illuminations de Paris pour dix ans, début novembre, en groupement avec Eiffage Energies Systèmes. Montant : 704 millions d'euros répartis à égalité entre les deux.

Les partenaires ont créé Cielis, société dédiée.

Le contrat comprend la rénovation de 870 km de réseau électrique, le renouvellement de milliers de supports d'éclairage et de signalisation, de sources LED ainsi qu'une plateforme de gestion de l'éclairage et des feux.

La ville espère économiser 240 GWh sur dix ans, soit 30 % de la consommation actuelle. Le projet inclut une trame sombre (sans éclairage) en faveur de la biodiversité.



La consommation électrique de l'éclairage devrait baisser de 30 %.

GPE : MAINTENANCE À PALAISEAU

La Société du Grand Paris confie à Chantiers Modernes Construction, filiale de Vinci Construction, la réalisation du centre d'exploitation et de maintenance des rames de la ligne 18 du Grand Paris Express (aéroport d'Orly/Versailles), à Palaiseau (Essonne).

Le marché se monte à 82 millions d'euros dont 20 % destinés à des PME.

CRÉATION DE TERSEN

Les sociétés Cosson, Picheta et SMS ont fusionné dans Tersen. La nouvelle entité est dédiée à l'extraction et à la valorisation de matériaux ainsi qu'à la gestion des déchets du BTP. Tersen est une filiale de Colas France.

ÉVOLUTION ET AMBITIONS CHEZ EGIS



Egis a reçu, le 15 septembre, le prix d'excellence de la Fédération internationale des ingénieurs-conseils, pour la maîtrise d'œuvre de la route du littoral à la Réunion dont la conception du viaduc-digues.

© EGIS

La Caisse des dépôts (CDC) a annoncé fin septembre qu'elle avait reçu une offre ferme de Tikehau Capital pour acquérir entre 40 et 44 % du capital d'Egis, sa filiale. L'opération devait encore, début novembre, être validée à l'issue d'une procédure d'information et consultation du personnel. Le capital d'Egis appartient actuellement à 75 % à la CDC qui l'a créé, et à 25 % aux cadres partenaires et salariés du groupe (Iosis Partenaires, fonds commun de placement d'entreprise).

Si l'offre est acceptée, la CDC conserverait 34 % des actions et le personnel, entre 22 et 26 %. Tikehau Capital s'est déclaré attaché « au maintien d'un actionnariat salarié significatif. »

→ Se développer à l'international

« La volonté de Tikehau Capital de favoriser et accroître l'engagement des managers pour un développement encore plus rapide du Groupe, est un signe positif, » indique Thomas Salvant, président d'Iosis Partenaires.

Tikehau Capital dispose du fonds T2 Energy Transition afin d'accélérer la croissance des entreprises contribuant à la transition vers une économie bas carbone. Il a finalisé début 2021 la levée d'un milliard d'euros.

L'arrivée de Tikehau Capital devrait soutenir le plan stratégique d'Egis, notam-

ment son développement à l'international avec une spécialité sur le développement durable pour répondre à l'enjeu climatique, et un doublement de son chiffre d'affaires en cinq ans.

→ Cinq engagements

Le groupe s'est exprimé fin octobre sur cinq engagements en faveur de l'environnement. Ses activités sont centrées sur la ville, le bâtiment et les transports qui représentent plus de la moitié des émissions de gaz à effet de serre dans le monde.

Sa contribution à la neutralité carbone commence par une baisse de la consommation d'énergie de ses bâtiments en France et va s'étendre aux implantations à l'étranger.

Les projets des clients seront envisagés sous une démarche d'écoconception et d'éco-exploitation. En 2025, 70 % du chiffre d'affaires d'Egis correspondra à des projets de ce type et tous, en 2030.

→ 3^e pilier d'activité

Le groupe s'appuiera sur les solutions basées sur la nature et la reforestation pour séquestrer plus de carbone. Il intégrera une étude de vulnérabilité climatique dans ses services d'ingénierie destinés aux territoires et aux infrastructures.

Enfin, il développe un 3^e pilier d'activité dédié à la transition énergétique. Il a consacré 11 millions d'euros en recherche et développement en climat-énergie-biodiversité, en 2020. ■

SURVEILLANCE PAR ONDES SISMIQUES

Egis a acquis, en octobre, la société Sisprobe spécialisée dans l'imagerie et la surveillance de sites basées sur la propagation du bruit ambiant. L'imagerie haute résolution de la sub-surface utilise les ondes générées par le vent, la houle ou des activités urbaines et industrielles.

Le savoir-faire de Sisprobe en traitement du bruit sismique pour des applications industrielles est issu de vingt ans de recherche à l'Institut des sciences de la terre de l'Université Grenoble-Alpes qui continue d'abriter son équipe.

159 LAURÉATS AU 4^e APPEL À PROJETS TRANSPORTS EN SITE PROPRE ET PÔLES MULTIMODAUX



© LIFFRÉ-CORMIER COMMUNAUTÉ

Liffré-Cormier Communauté (Ille-et-Vilaine) prépare son 2^e pôle d'échanges multimodal après avoir inauguré celui de Saint-Aubin-du-Cormier (photo) en février.

La communauté de communes de Liffré-Cormier (26 830 habitants, 9 communes) prépare son 2^e pôle d'échanges multimodal. Elle a inauguré le premier sur son territoire à Saint-Aubin-du-Cormier en février. Ces implantations correspondent au schéma des déplacements de Liffré-Cormier Communauté (EPC) afin de répondre aux besoins vers Rennes à 20 km au sud-ouest et vers Fougères, à 30 km au nord-ouest. Le 2^e pôle se situe à Sévailles, près de l'échangeur 27 de l'autoroute A84

(Rennes-Caen). Y seront accueillis tous les modes de transport individuels dont le covoiturage, et les cars du réseau régional interurbain Breizhgo. Sa mise en service est prévue fin 2022 ou début 2023. Le futur "pôle de connexion intermodal" recevra 80 000 euros de l'État à travers l'Agence de financement des infrastructures de transport de France, en tant que lauréat du 4^e appel à projets transports en commun en site propre (TCSP) et pôles d'échanges multimodaux (Pem).

Pour la 1^{re} fois, ce type d'appel à projets incluait les Pem hors périmètre ferroviaire. L'aide porte sur le volet infrastructures. Le ministère des Transports a publié la liste des 159 lauréats le 6 octobre. Sur 190 dossiers présentés, 95 projets de TCSP ont été retenus et 64 Pem. Au total, l'enveloppe de subventions atteint 900 millions d'euros - 858 millions TCSP et 42 millions Pem - « le plus gros montant accordé dans l'histoire des appels à projets TCSP, » écrit le ministère. Les pôles d'échanges multimodaux relevant d'une communauté de communes, comme Liffré-Cormier, bénéficient d'un bonus.

→ Six projets à Strasbourg

Signalons parmi les 64 projets de Pem, celui de Fougères (Ille-et-Vilaine) qui reçoit 800 000 euros, ceux de Quimper (Finistère), Vannes (Morbihan) et Chartres (Eure-et-Loir), chacun doté de 1,99 million. L'Eurométropole de Strasbourg devrait toucher 1,3 million d'aides pour 3 projets de pôles et 39,6 millions pour 3 TCSP. Mamoudzou (Mayotte, 71 437 habitants, 2017) bénéficiera de 1,75 million pour son Pem et de 5,42 millions pour 3 TCSP dont une ligne maritime. ■

PRIX DE LA TRANSFORMATION DE BUREAUX EN LOGEMENTS : 2^e ÉDITION

Le 23 rue Maximilien Robespierre à Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine) n'est plus une adresse de bureaux mais de logements, depuis juillet 2020. Par ses qualités, l'opération baptisée "Les cèdres" a remporté le prix international de la transformation des bureaux en logements, remis le 20 octobre par la Maison de l'architecture Île-de-France et

Paris Île-de-France capitale économique⁽¹⁾.

« Le bâti existant n'est pas l'archétype d'un bâtiment de bureaux, écrit La Soda, société d'architecture chargée de la mutation pour Immocades. La construction emprunte un vocabulaire architectural assez élégant qui associe grandes baies vitrées, porte-à-faux et une certaine générosité des espaces, vocabulaire que nous avons voulu conserver et sublimer. »

L'ensemble des années 1970, composé d'une barre (R+1) et d'un cube (R+2) partiellement enterrés, a pris un peu de hauteur grâce à des surélévations discrètes qui n'atteignent pas les prescriptions du plan local d'urbanisme. Un bâtiment neuf est ajouté sur la parcelle autour d'un patio partagé. Quatorze logements, tous dotés d'un espace extérieur, sont créés.

Les concepteurs ont exploité la pente du terrain et les surfaces souterraines aveugles. Le parking de surface, "descendu" et recouvert, devient souterrain⁽²⁾.

→ Creusement et ouvertures

Des ouvertures dans les murs du sous-sol offrent de la lumière à certains logements. De petites extensions sont intervenues. Le patio est planté autant que faire se peut.

Des panneaux de bois habillent les façades nouvelles, l'existant étant couvert d'un bardage métallique, le tout dans une couleur sombre voisine de celle d'origine. Deux mentions spéciales de cette 2^e édition ont également été attribuées ainsi qu'un prix étudiant⁽³⁾. ■

⁽¹⁾ Organisme de promotion privé du Grand Paris.

⁽²⁾ Gros œuvre : LBC.

⁽³⁾ Cf. actualité du 13 octobre sur : www.maisonarchitecture-idf.org.

PASSERELLE COURONNÉE

La passerelle de la gare de Chartres (Eure-et-Loir) a remporté un trophée de la Construction, catégorie Infrastructures, en septembre. Ouverte en mai 2021, elle reliera à terme une aire de transports multimodale, devant la gare, à un complexe culturel et sportif en travaux, situé de l'autre côté des voies, tout en desservant les quais. De 70 m de long et 7 de large, elle est reconnaissable à son belvédère couvert aux formes courbes. Appelée estacade, cette plateforme couverte ajoute 8 m au tablier. L'estacade abrite les cages d'ascenseurs. Elle doit permettre le transit de 220 passagers par minute.

→ Colis de 200 tonnes

Le tablier courbe et l'estacade sont constitués d'éléments préfabriqués assemblés sur place. Des colis de 130 tonnes et 200 tonnes ont été emmenés sur les piles à 40 m de distance par une grue. À noter la mise en lumière soignée.

Intervenants : Chartres aménagement (SPL) ; Architecture et ouvrages d'art (Lavigne et Chéron), Société d'étude et de calculs en ouvrages d'art (Secoa/Artelia), RFR Structure et Enveloppe (Artelia) ; Bouygues TP Région France. Les trophées de la Construction, organisés par Batiactu, sont attribués sur 7 catégories.



© MAXIME VERRÉT

Les 14 habitations des Cèdres s'ouvrent sur un patio au lieu d'une cour de bureaux à Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine).



© GT

Le tablier et l'estacade de la passerelle de Chartres (Eure-et-Loir) sont courbes.

CERIB : OFFRE KAIROS

Le Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton (Cerib) propose ses services en matière de diagnostic d'infrastructures et de bâtiments en béton. Son offre Kairos est une aide à la décision pour évaluer la durée de vie résiduelle des ouvrages et de leurs composants.

Voici les étapes de sa démarche : analyse sur site, prélèvement d'échantillons, caractéristiques des matériaux et indicateurs de durabilité.

En matière de prédiction, il modélise et quantifie l'évolution physico-chimique à partir de l'état existant et de l'environnement, ceci grâce au modèle SDReaM-crete.

Enfin, il détermine la durée de vie résiduelle et propose des "conclusions opérationnelles" à partir desquelles les gestionnaires décideront des opérations de maintenance-réparation.

À noter que le Cerib travaille aussi sur le diagnostic post-incendie et sur la performance des bétons destinés au stockage de déchets radioactifs.

ESPACES SOUTERRAINS À ATHÈNES EN 2023

La 49^e assemblée générale de l'Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain (ITA-AITES) se tient pour la 1^{re} fois en Grèce, à Athènes, du 12 au 18 mai 2023.

La Greek Tunnelling Society l'organise avec des partenaires locaux.

Thème : comment étendre les espaces souterrains (Expanding underground).

<https://wtc2023.org>

L'ÉCOLE FRANÇAISE DU BÉTON DISTINGUE DEUX DOCTORANTS

Deux doctorants ont obtenu un prix de la fondation École française du béton, en octobre. La fondation soutient et valorise des travaux d'étudiants ou d'enseignants sur le béton.

Christian Marcelo Martin, Argentin, ingénieur en génie civil, diplômé de l'Université de Buenos Aires où il prépare un doctorat en partenariat avec l'École des ponts Paristech, observe les interactions entre des micro-billes de verre creuses et du ciment dans des coulis destinés aux puits de stockage de CO₂.

« Les microsphères sont utilisées dans l'industrie des hydrocarbures pour cimenter les puits d'extraction, écrit-il. Certains réservoirs d'hydrocarbures, épuisés, peuvent être utilisés pour le stockage géologique du CO₂. Je vérifie que ces puits, ainsi modifiés, seront adaptés à l'injection et au stockage de

dioxyde de carbone et je déterminerai la durabilité du coulis dans ces conditions. »

→ Écaillage du béton et salage

Second étudiant distingué par l'École française du béton : Sara Al Haj Sleiman, ingénieure en génie civil diplômée de l'Université libanaise. En dernier année de doctorat à l'École Centrale de Nantes, elle développe un nouveau protocole d'évaluation de la résistance du béton à l'écaillage par le gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

Elle constate le manque de fiabilité des essais normatifs européens dont « les résultats sont régulièrement discutés, » écrit-elle. Elle impose un cycle de gel-dégel « plus pertinent (...) basé sur les conditions climatiques réelles auxquelles le béton est le plus souvent exposé. » Son travail serait duplicable à l'échelle industrielle. ■



© CHRISTIAN MARCELO MARTIN

Christian Marcelo Martin étudie la présence de microbilles de verre creuses dans le ciment qui tapisse les puits d'extraction d'hydrocarbures reconvertis en stockages de CO₂.

LE MOTEUR À HYDROGÈNE JCB REMPORTE UN TROPHÉE



© JCB

Prototype de chariot télescopique, 2^e engin JCB à hydrogène.

ne pensons pas que l'électricité soit la solution pour notre secteur. Elle ne peut être utilisée que sur des machines compactes. »

Le fabricant britannique investit 100 millions de livres sterling dans l'hydrogène, a mis 100 ingénieurs sur ce développement et pense en recruter encore 50. Il espère commercialiser ses premiers engins fin 2022. JCB avait déjà remporté ce trophée en 2019 pour le lancement de sa mini-pelle électrique 19C-1^E-Tech.

→ Caméra en tête de flèche

Parallèlement, le renouvellement des engins au diesel se poursuit. Ainsi, la gamme des chariots télescopiques rota-

tifs s'enrichit-elle d'un modèle qui travaille jusqu'à 25,5 m de haut avec une capacité de levage jusqu'à 5,5 tonnes. Ce modèle baptisé 555-260R, lancé en octobre, a des caractéristiques communes avec ceux à châssis rigide. Il existe en version à ralenti automatique et arrêt temporisé du moteur.

Le déploiement, l'arrimage et la mise à niveau automatique de l'engin se fait en une seule manipulation. En option, des phares de travail et des caméras dont une en tête de flèche.

Grâce à des accessoires, le 555-260R peut aussi faire office de grue et de plateforme élévatrice. ■

Le moteur à hydrogène conçu par JCB a remporté le trophée Dewar du Royal Automobile Club au Royaume-Uni, début novembre. Le moteur à combustion à hydrogène est implanté sur deux prototypes du constructeur : une chargeuse-pelleteuse et un chariot télescopique. Depuis 2004, JCB fabrique ses propres moteurs.

« Nous produisons majoritairement des machines alimentées au diesel, a déclaré Lord Bamford, président de JCB. Nous investissons dans l'hydrogène car nous



© JCB

Ce chariot télescopique peut lever jusqu'à 5,5 tonnes.

La CNETP regroupe près de **8 300 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues au près de **270 000 salariés**.



NOS MISSIONS

- La gestion des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics
- la mise en œuvre du régime de chômage intérimaires auprès des entrepreneurs de Travaux Publics

**CAISSE NATIONALE
DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS**

Au service de la Profession des Travaux Publics

NOUS CONTACTER

📍 31 rue le Peletier 75453 PARIS CEDEX 09

☎ Entreprises : 01.70.38.07.70

☎ Salariés : 01.70.38.09.00

sur Internet : www.cnetp.fr

sur l'appli mobile : **CNETP Salarié**






AGENDA

ÉVÉNEMENTS

Malgré l'amélioration de la situation sanitaire, nous invitons les lecteurs à toujours vérifier par internet que les événements annoncés dans cette rubrique sont maintenus, à quelle date et dans quelles conditions (en présentiel et/ou en ligne). Des manifestations reportées en 2022 ont conservé "2021" dans leur nom.

• **10 JANVIER**
H2 Entreprises, conférence nationale hydrogène renouvelable
Lieu : Paris et à distance
www.h2entreprises.com

• **10 AU 12 JANVIER**
Infra Bim Open 2021
Lieu : Lyon et à distance
www.infrabimopen.com

• **13 JANVIER**
Évaluation et gestion des murs de soutènement
Lieu : webinaire (16h-18h)
www.afgc.asso.fr

• **18 AU 20 JANVIER**
48^e congrès Atec ITS France
Lieu : Montrouge (Hauts-de-Seine)
<https://congres.atec-its-france.com>

• **25 JANVIER**
Analyse du cycle de vie en génie civil
Lieu : Puteaux (La Défense)
<https://augcav.sciencesconf.org>

• **25 ET 26 JANVIER**
9^e assises nationales sur la qualité de l'environnement sonore
Lieu : Paris (Jussieu)
www.bruit.fr

FORMATIONS

• **1^{er} FÉVRIER**
Aspects juridiques du Bim
Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

• **23 ET 24 MARS**
Bim en gestion, exploitation et maintenance
Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

NOMINATIONS

ECOMINÉRO :
Michel André (Cemex) a été nommé président d'Ecominéro, société à mission, éco-organisme d'économie circulaire des fabricants de produits ou matériaux de construction d'origine minérale.

EPA NICE ECOVALLÉE :
Damien Teichner a rejoint l'établissement public d'aménagement Nice Ecovallée en tant que directeur général adjoint, en novembre.

EPFA GUYANE :
Gabriel Serville a été élu président du conseil d'administration de l'Établissement public foncier et d'aménagement de la Guyane. Il représente la Collectivité territoriale de Guyane. Il succède à Rodolphe Alexandre. De plus, Sophie Charles est élue deuxième vice-présidente du bureau de l'EPFA.

ERRATUM TRAVAUX n°972

Dans le numéro 972, page 22, la légende de la figure 17 est erronée. Il s'agit du Pont Neuf de Toulouse et non de celui de Paris.

En dépit de son nom, c'est le plus vieux pont de Toulouse encore debout qui enjambe la Garonne, les autres ayant été emportés par les crues du fleuve. Il fut construit entre 1544 et 1632.

Dès le début, le Pont Neuf fut étudié afin de résister aux assauts de la Garonne. Cet ouvrage est, semble-t-il, le premier pont moderne qui utilise l'anse de panier dans le dessin de ses voûtes.

Trois dispositifs lui permirent de sortir sans dommages de l'inondation du 23 juin 1875 : sept arches irrégulières, des piles de pont ouvertes par six dégueuloirs (ou ouïes) et des crêtes en avant de chaque pile.

Le pont ne rompit jamais malgré les terribles crues de 1727, 1772, 1835, 1855 et 1875.

On doit sa conception à Jacques Le Mercier et Pierre Souffron et son architecture finale à Nicolas Bachelier et Louis Privat.

CFMS

MÉCANIQUE DES SOLS ET GÉOTECHNIQUE : UN MONDE SOUTERRAIN À METTRE EN LUMIÈRE

Le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique a élu en octobre 2020 son nouveau président, Nicolas Utter, directeur des études de Soletanche Bachy pour la France métropolitaine et l'outre-mer, Monaco, la Suisse et le Benelux. Il succède à Valérie Bernhardt, directrice générale de Terrasol, désormais en charge de la communication du comité. Cette élection n'est pas la seule nouveauté du CFMS qui se dote également d'un nouveau président pour la commission scientifique et technique, tout comme pour celle du CFMS Jeunes. **Avec Nicolas Utter, le point sur le CFMS version 2021 et ses évolutions à venir.**

PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1- Nicolas Utter, président du Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS).

Qu'est-ce que le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique ?

Le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS) est une société savante qui a été créée en 1948 par Albert Cacquot.

Ses principaux objectifs sont la promotion du rôle de la géotechnique dans l'acte de construire et dans la prévention de la maîtrise des risques aussi bien lors de la construction des ouvrages que face aux risques naturels. Un volet important est le partage d'informations, la diffusion des connais-

sances scientifiques et techniques, la promotion de la recherche en mécanique des sols et en géotechnique.

Pour moi, très schématiquement, la mécanique des sols est l'application des lois de la mécanique et de l'hydraulique à l'étude et à la caractérisation du comportement des sols tandis que la géotechnique est l'utilisation de la mécanique des sols dans le monde de la construction.

Le CFMS est composé actuellement de 700 membres individuels et de 60 membres collectifs, essentiellement des entreprises. Il est affilié à la Société



2



3

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © APAGEO - FIGURE 3 © CÉDRIC HELSY

2- Depuis 1984, héritier des Techniques Louis Ménéard, inventeur de l'appareil en 1957, Apageo conçoit et fabrique des pressiomètres Ménéard.

3- Devant le stade de France, chantier de fondation à la tarière continue creuse, inventée par Paul Dupeuble (SIF Bachy).

4- L'édition 2020 des règles professionnelles TA 2020 relatives à la conception, au calcul, à l'exécution, au contrôle et à la surveillance des tirants d'ancrage.

5- La revue française de géotechnique a été fondée en 1977, parrainée par les comités français de mécanique des sols, des roches, de géologie de l'ingénieur et des géosynthétiques.

6- Chantier de 550 pieux à la tarière continue creuse pour l'usine Safran d'Itteville dans l'Essonne avec deux foreuses de 450 ch (Pieux Ouest).

7- Le chantier de l'aéroport de Fort Lauderdale en Floride : 27 870 m² de murs en Terre Armée[®] assurant l'élévation du sol de 18 m à l'une des extrémités du site.

NICOLAS UTTER : PARCOURS

Nicolas Utter, ingénieur TP91, a consacré l'ensemble de sa carrière au groupe Soletanche Bachy, où il a exercé la fonction d'ingénieur travaux, puis intégré le bureau d'études techniques.

Il y a conduit des études d'ouvrages de tailles et de typologies variées : ouvrages portuaires, fondations d'immeubles de grande hauteur, tranchées couvertes, stations enterrées de métro, ouvrages d'assainissement, ...

Membre du groupe miroir français de l'Eurocode 7 (CNJOG), il enseigne la mécanique des sols et la géotechnique aussi bien en formation initiale qu'en formation continue, et contribue ainsi à la transmission d'un savoir-faire technique pour les nouvelles générations.

Nicolas Utter est également président de la commission technique du SOFFONS (Syndicat des entrepreneurs de sondage, Forage et FONdations Spéciales), et vice-président du conseil de l'ENSG (École Nationale Supérieure de Géologie).

Au sein du CFMS dont il est membre depuis plus de 25 ans, il a été élu membre de la commission scientifique et technique, puis vice-président du conseil avant d'en prendre la présidence en octobre 2020.

Il est accompagné dans ses nouvelles missions par une équipe renouvelée dont le nouveau président de la commission scientifique et technique, Fahd Cuirra, et le nouveau président du CFMS Jeunes, Alexandre Lopes.



4 © CFMS



5 © CFMS

Internationale de Mécanique des Sols et de Géotechnique (ISSMGE) ⁽¹⁾.

Sa structure est constituée d'un conseil d'administration, dont j'ai été élu président en octobre 2020, d'une commission scientifique et technique, présidée par Fahd Cuirra (Terrasol) qui pilote de nombreux groupes de travail.

La communauté géotechnique qui constitue les membres du CFMS est composée de trois collèges : un collège "ingénierie" (ingénieries géotechniques, bureaux d'études de sol, contrôleurs techniques), un collège dans lequel figurent les entreprises qui exécutent les travaux, un collège regroupant les établissements d'enseignement supérieur et de recherche. Cette répartition fait la richesse des recommandations que nous publions car elles bénéficient des derniers développements de la recherche en géotechnique, dans la pratique de l'ingénierie et dans celle des travaux.

Sous la supervision de la commission scientifique et technique, des groupes de travail analysent des problématiques spécifiques de la géotechnique pour lesquelles les connaissances disponibles sont jugées insuffisantes ou obsolètes au regard de l'évolution des techniques et de la réglementation. Leur travail qui peut s'étendre sur plusieurs années aboutit à la rédaction de documents de synthèse ou de recommandations dont l'objectif est d'être porté à la connaissance des adhérents du CFMS et, plus généralement, du monde de la géotechnique.

Parmi les sujets en cours :

→ Caractérisation des sols gonflants et éventuelle conséquence qu'ils peuvent avoir sur le dimensionnement des ouvrages - un sujet qui a émergé à la faveur des travaux du Grand Paris Express ;

© PIEUX OUEST

6



© TERRE ARMÉE

7





8 © CFMS

- Recommandations pour le rabattement de nappes lié aux travaux de construction ;
- Utilisation des modèles numériques pour le dimensionnement des ouvrages géotechniques ;
- Instrumentation des ouvrages géotechniques ;
- Recommandations pour la conception et le dimensionnement d'éoliennes flottantes ;
- Recommandations sur les tirants d'ancrage, connues sous le nom de TA95 publiées dans les années 70, remises à jour en 2020 sous l'appellation TA2020.

Près de 50 ans après le premier opus, les règles professionnelles "TA2020" sont les dignes héritières des précédentes éditions. Rédigées par les meilleurs experts français, dont certains ont également participé aux travaux européens sur les tirants, elles sont bien sûr en parfaite conformité avec les nombreux textes français et européens traitant de l'exécution, de la conception, des essais et des matériaux constitutifs des tirants d'ancrage ; saluons là l'important travail de synthèse de leurs rédacteurs qui se sont acquit-

tés sans faillir de cette tâche difficile. Mais bien au-delà de cette indispensable adéquation réglementaire, ce texte bénéficie de l'expérience et du savoir-faire acquis par les entreprises et les ingénieries françaises durant des décennies, dans toutes sortes de configurations de terrains, parfois au-delà de nos frontières.

Il convient de noter une évolution qui n'est pas que sémantique : si les précédentes éditions s'appelaient "recommandations", les TA2020 bénéficient du label de "règles professionnelles" délivré par l'Agence Qualité Construction ; c'est la consécration du statut d'ouvrage de référence de ce document, rédigé par tous les acteurs de la communauté géotechnique française : contrôleurs techniques, entreprises, fournisseurs, ingénieries, maîtrises d'œuvre, services techniques de l'État.

Très complètes et pédagogiques, conçues pour être autonomes, les TA2020 trouveront une place de choix dans les bibliothèques techniques, et pourront servir de base à de nombreux marchés.

Ces recommandations, que le CFMS vient de publier en anglais, sont mises

à disposition en ligne sur le site du comité.

D'autres nouveautés ?

Tous les deux ans depuis 2008, le CFMS décernait le prix Kerisel qui récompensait un jeune géotechnicien ou chercheur ayant contribué, de manière significative, à l'amélioration des analyses, des méthodes et des techniques utilisées en mécanique des sols et en géotechnique. Cela ne fonctionnait pas de façon satisfaisante car concourraient à la fois des docteurs en mécanique des sols qui venaient de soutenir leur thèse et de jeunes professionnels qui avaient déjà plusieurs années d'expérience. Afin de comparer des projets comparables, nous avons donc créé en 2021 le prix Boussinesq⁽²⁾ qui est spécifiquement orienté sur les jeunes docteurs, le prix Kerisel continuant de vivre sa vie mais avec un autre objectif, l'un et l'autre prix étant remis en alternance tous les deux ans. Le prix Boussinesq vise à distinguer l'auteur de la thèse de doctorat la plus remarquable, achevée dans une institution française à chaque exercice biennal, sur l'un des sujets concernant

le CFMS, à savoir des recherches intéressantes directement ou indirectement la mécanique des sols et la géotechnique, ainsi que les techniques spécifiques concernant les travaux en interaction avec les terrains.

Le premier lauréat est Alexandre Lopes pour sa thèse intitulée : "Détermination du module de cisaillement des sols sous faibles déformations à partir d'une sonde pressiométrique innovante. Application au dimensionnement cyclique des pieux". Alexandre Lopes est ingénieur chef de projet chez Terrasol. Il est également président du CFMS Jeunes. Son prix lui a été remis le 28 septembre dernier.

À ce propos, qu'en est-il du CFMS Jeunes ?

Le CFMS Jeunes a été créé en 2018. Il s'agit d'un groupe de travail dont l'objectif principal est de mettre en avant le potentiel que peuvent apporter les jeunes géotechniciens pour promouvoir la géotechnique en France et à l'international et établir des relations solides avec ses différents acteurs. C'est un vecteur de transmission des savoirs après des jeunes générations.

© FRANCIS VIGOUROUX

9



© CATHERINE BOUTET

10



8- Les 9^e Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur ont réuni 296 participants du 13 au 15 juin 2018 sur le campus de l'École des Ponts Paris-techn et de l'Ifsttar à Marne-la-Vallée.

9- Premiers essais sur la LGV Sud-Europe-Atlantique où la vitesse est montée jusqu'à 352 km/h sur l'un des deux ouvrages en Terre Armée[®].

10- La photo de Catherine Boutet, lauréate du deuxième concours-photos organisé par le CFMS en 2020 : vaste marinière normande à Gerponville (76).

11- Bandeau d'annonce des 11^e Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur du 28 au 30 juin 2022 à la Cité Internationale de Lyon.

12 et 13- La première Hydrofraise compacte à grippeurs[®] électrique HC05GE sur le chantier de Testimonio II à Monaco : supprimer tous les rejets de CO₂ et de gaz de combustion en économisant près de 5 000 litres de fuel par semaine de travail.



11 © CFMS

Comment le CFMS a-t-il vécu l'année 2020 et les six premiers mois de 2021 ?

La crise sanitaire a perturbé nos travaux de l'année 2020. Nous n'avons pas pu organiser les journées scientifiques et techniques comme nous le faisons traditionnellement depuis des décennies. Parmi les sujets traités lors des dernières qui ont pu se tenir en "présentiel", il faut citer :

- Tirants d'ancrage/recommandations TA2020, évoquées précédemment ;
- Big Data/machine learning ;
- À la frontière entre géotechnique et parasismique ;
- Grands projets d'infrastructures en région parisienne.

Pour remédier aux problèmes posés par le confinement, nous avons monté une série de webinaires en ligne.

Il s'est agi de visio-conférences d'un format court - de l'ordre de 60 minutes - qui ont permis d'apporter un éclairage sur des sujets spécifiques parmi lesquels : doctorants en géotechnique, utilisation pratique de la nouvelle norme NF 94 270 pour le calcul des soutènements en sols cloués, réalisation d'une gare cathédrale sous un site en exploitation...

Ces webinaires ont été enregistrés et sont tous disponibles sur le site du CFMS.

C'est également le cas depuis 2017 de nos journées scientifiques et techniques, dont certaines sont co-organisées avec d'autres sociétés savantes françaises telles que le Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'environnement (CFG), l'Association Française des Tunnels et Espaces Souterrains (AFTES), l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS)... ou des sociétés étrangères membres de l'ISSMGE (Belgique, Royaume-Uni, Suisse...).

Nous avons d'ailleurs repris ces journées scientifiques et techniques. La première, organisée le 16 septembre dernier en collaboration avec la FNTP, a porté sur les ouvrages portuaires. ▷

L'ISSMGE EN BREF

L'ISSMGE est le principal organisme professionnel représentant les intérêts et les activités des ingénieurs, universitaires et entrepreneurs du monde entier qui participent activement à l'ingénierie géotechnique.

Son objectif est la promotion de la coopération internationale entre les ingénieurs et les scientifiques pour l'avancement et la diffusion des connaissances dans le domaine de la géotechnique, et ses applications d'ingénierie et environnementales

En tant qu'organisation véritablement mondiale, l'ISSMGE met l'accent sur le leadership professionnel de quelque 90 sociétés membres et d'environ 20 000 membres individuels.

Son site Internet est destiné à fournir à ses membres des nouvelles et des informations régulières et à jour sur les activités de la société dans le monde, y compris des webinaires et des conférences.

© CÉDRIC HELSY



12

© CÉDRIC HELSY



13

DES PIEUX "CONNECTÉS" À ABIDJAN..

La Tour F d'Abidjan, réalisée par le groupement Spie Batignolles Fondations / Besix aura plus de 400 m de hauteur. Elle reposera sur un ensemble de 70 barrettes à pointe injectée, de plus de 60 m de profondeur.

La conception de ses fondations a notamment mis en œuvre des essais de chargement de pieux avec vérins embarqués.

Deux pieux d'essais de 1,50 m de diamètre et de 50 m de profondeur ont pu être réalisés au droit des futures barrettes de l'ouvrage. Chaque pieu comportait une cellule Osterberg composée de 2 vérins de chargement de forte capacité. Ces essais avaient trois objectifs : définir le facteur de portance k_p minimal obtenu grâce à l'injection de pointe, mesurer les frottements latéraux le long des pieux, évaluer l'abattement des frottements latéraux en partie supérieure des fondations profondes de plus de 25 m.

...ET DES BARRETTES "CONNECTÉES" À PARIS

À Paris, la section d'assainissement de la ville de Paris a chargé le groupement Impluvium (Urbaine de Travaux / Sade / Bessac / Soletanche Bachy France / Sefi Intrafor), de construire un bassin de stockage et restitution d'eau de 46 000 m³ (bassin Austerlitz de 50 m de diamètre et 30 m de profondeur), deux ouvrages de récupération des eaux depuis des déversoirs d'orages se trouvant de part et d'autre de la Seine (puits Valhubert et puits Tournaire), ainsi qu'un collecteur de 610 m de long pour relier les différents ouvrages*.

Deux premières en France sur le chantier.

Avec l'aide de son partenaire Fugro, le groupement réalise, pour la première fois en France, un essai de chargement bidirectionnel sur barrette. Le dispositif est composé de deux vérins immergés et d'une instrumentation répartie sur toute la hauteur de la barrette pour caractériser les paramètres de sols des terrains d'ancrage : Argiles Plastiques, Marnes de Meudon et Craie Campanienne. Les résultats obtenus permettront de finaliser le design des fondations à l'intérieur du bassin prévu à ce stade par : 20 barrettes en épaisseur 1 m à 80 m, 236 micropieux à 63 m en arase basse.

Sur ce chantier, Soletanche Bachy signe l'arrivée du Power Pack électrique en France. Pour cela, les équipes du chantier et du pôle technique du Service Matériel de Montereau ont travaillé à l'élaboration d'un dispositif de raccordement multiple autour de l'ouvrage, facilitant ainsi la mise en place de l'Hydrofraise® à tout instant.

M.M.

* Ces travaux sont suivis par le groupement de maîtrise d'œuvre Artelia / Prolog.

Nous allons également maintenir en parallèle les webinaires dont l'organisation est plus facile à mettre en place que celle des journées, puisqu'ils ne font appel qu'à un ou deux intervenants alors que les journées scientifiques et techniques présentent les conférences de 8 à 10 personnes tandis que le public peut aller jusqu'à 150 personnes.

Le 28 septembre, a également été organisée la conférence annuelle Coulomb⁽³⁾ qui, depuis 2001, est présentée par un scientifique issu d'un milieu industriel ou universitaire dont les travaux ont apporté un développement majeur dans le domaine de la géotechnique, soit sous l'aspect théorique, soit sous l'aspect expérimental, soit par des réalisations exceptionnelles.

Cette année, la conférence "Sustainable land reclamation in coastal area", a été présentée par le professeur Masaki Kitazume du Tokyo Institute of Tech-

nology. Elle visait à rendre compte des enseignements tirés des grands projets d'extension en mer, en matière de techniques, de renforcement et d'amélioration des sols en place.

D'autres projets sont-ils en cours ?

On peut citer un projet de "capsule temporelle" lancé par la Société Internationale de Mécanique des Sols et de Géotechnique. Le CFMS a été sollicité pour participer à ce projet au travers de l'un de ses deux vice-présidents : François Depardon (ex Egis géotechnique, aujourd'hui indépendant) ainsi que le groupe CFMS Jeunes.

L'ensemble de leurs études sera présenté lors du prochain congrès de la ISSMGE à Sidney au printemps 2022. L'objectif est de recenser les apports réalisés en mécanique des sols et géotechnique depuis 100 ans et quelles sont les visions qu'il est possible d'augurer pour les 100 années à venir.

Le CFMS a organisé au CNAM le 15 octobre dernier, avec la participation de l'AFPS, l'AFTES, le CFGI, le CFMR et le CFBR⁽⁴⁾ deux journées d'hommage à Pierre Habib et Pierre Duffaut, qui ont été des grands noms de la mécanique des sols et de la mécanique des roches.

Ces événements témoignent du fait que la vie reprend, même si elle ne s'est jamais totalement arrêtée, en particulier sur les chantiers, en dépit de la crise sanitaire.

Quelles sont les innovations apparues en mécanique des sols et en géotechnique ces dernières années ?

S'il n'y a pas eu de révolution, des évolutions ont tout de même fait leur apparition.

14- La future tour F à Abidjan : plus de 400 m de hauteur.

15- Le chantier de Spie Batignolles Fondations de la tour F à Abidjan.

16- Le chantier d'Austerlitz signe pour Soletanche Bachy l'arrivée du "Power Pack électrique" en France.

17- Le chantier du bassin de stockage / restitution derrière la gare d'Austerlitz à Paris.



14



15

J'ai évoqué précédemment les techniques liées à la caractérisation des sols gonflants et les recommandations sur les tirants d'ancrage.

Il faut évoquer aussi celle relative aux voiles par passes - technique d'exécution de fouilles relativement peu profondes pratiquée surtout en milieu urbain - sujet sur lequel il n'existe pas vraiment de texte réglementaire ou de recommandations auquel s'intéresse un groupe de travail du CFMS. Cette technique ne demande pas de moyens techniques importants mais nécessite que soient pris en compte avec beaucoup d'exigences les risques associés afin d'éviter les pathologies liées à la nature des terrains concernés par les travaux de terrassement qui accompagnent cette technique. L'objectif du CFMS est de diffuser les bonnes pratiques.

Nous nous sommes emparés de ce sujet, en mettant autour de la table tous les intervenants concernés, afin d'établir des recommandations dont l'avancement est en bonne voie. Des recommandations ont également été publiées récemment sur les éoliennes en mer et les éoliennes terrestres.

Ce qui est important lorsque nous publions des recommandations est que nous nous efforçons de traiter tous les volets concernant le sujet, de la conception à l'exécution des travaux en passant par le dimensionnement. Des recommandations sont également en préparation relatives aux modèles numériques. Leur objet est de donner aux bureaux d'étude et aux entreprises les clés pour bien les maîtriser, ce qu'on en est en droit d'en attendre et comment les utiliser pour le dimensionnement. Lorsque ces outils numériques très complexes sont mal utilisés, ils peuvent amener les intervenants



© CÉDRIC HESLY

dans des voies dangereuses pour les ouvrages : s'ils sont surdimensionnés, par souci sécuritaire, leur coût risque de n'être plus compétitif - ce qui est un "moindre mal" - s'ils sont sous-dimensionnés et passent à côté des vrais problèmes, ils peuvent être à l'origine d'un sinistre.

Comment les entreprises françaises dans le domaine de la mécanique des sols et de la géotechnique se situent-elles par rapport à leurs concurrentes étrangères ?

Un bon marqueur de leur influence et de leurs compétences est qu'enor-

mément de procédés utilisés dans le monde entier ont été inventés en France : le pressiomètre a été inventé par Louis Ménard, la tarière continue creuse pour la réalisation de pieux moulés par Paul Dupeuble (SIF Bachy), le tube à manchette pour les injections par Henri Cambefort (Solétanche), l'Hydrofraise® pour les parois moulées par Soletanche Bachy, la Terre Armée par Henri Vidal...

C'est un bon exemple du rayonnement et de la diffusion du savoir-faire français. Ces techniques, ces outils, sont désormais diffusés dans de nombreux pays à l'étranger et mis en œuvre, en premier lieu, par les entreprises qui les ont mises au point mais aussi par nombres d'entreprises étrangères.

Les chantiers du Grand Paris Express sont-ils à l'origine d'évolutions dans les techniques des travaux en souterrain ?

C'est au niveau de la réalisation des gares que les évolutions les plus significatives sont apparues.

Les chantiers du Grand Paris Express ont amené à travailler à des profondeurs rarement atteintes à ce jour pour la réalisation de parois moulées et de joints entre les panneaux de parois, jusqu'à 70 mètres, et ont remis sur le devant de la scène, à grande échelle, une technique qui n'était plus gère utilisée en France, celle de la congélation des sols.

Sur la Ligne 15 Sud, par exemple, des travaux de congélation sont en cours pour la gare de Vert-de-Maison. Cette gare présente d'ailleurs une particularité. Alors que toutes les autres gares de la ligne sont réalisées à l'abri d'un écran en paroi moulée, il se trouve que celle de Vert-de-Maison se situe partiellement sous une résidence d'habitation ▷

© CÉDRIC HESLY

17



classée au bâtiments historiques, ce qui excluait non seulement sa démolition mais aussi la réalisation d'une paroi moulée.

Une partie de la gare est donc réalisée comme pour les autres gares du GPE à l'abri d'une enceinte en paroi moulée mais l'autre sera excavée à l'issue de traitements de sol par injections et congélation, en particulier sous le square Dufourmantelle.

Un autre impact du Grand Paris Express est qu'il a amené les entreprises à contracter pour des montants auxquels on n'est pas habitué en France : un lot du Grand Paris Express, c'est de l'ordre de 2 milliards d'euros de travaux.

Des avancées ont été réalisées également au niveau du traitement des boues de forage afin d'obtenir un matériau qui soit plus facile à gérer dans les décharges.

Une autre évolution est apparue dans les matériels mis en œuvre avec l'apparition de foreuses et d'Hydrofraise® à énergie électrique, à proximité de la gare d'Austerlitz, à Paris, ce qui constitue une avancée notable en termes de nuisance sonore et de pollution de l'air.

D'autres travaux réalisés par des entreprises françaises en France et à l'international sont actuellement en cours, mettant en œuvre des moyens inédits tant au niveau des techniques que des matériels, en Côte d'Ivoire, par Spie Batignolles Fondations, dans le cadre de la réalisation de la tour F, 6^e tour administrative du centre d'Abidjan et à Paris par Soletanche Bachy, pour la construction du bassin d'Austerlitz et de ses ouvrages associés, en prévision des JO de Paris 2024.

La tour F d'Abidjan, d'une hauteur de 283 mètres sera l'une des plus hautes tours d'Afrique.

Le chantier parisien entre dans le cadre du plan d'amélioration sanitaire de la Seine en amont du Trocadéro en vue du déroulement de certaines épreuves de natation des JO : il s'agit d'un bassin de stockage/restitution de 46 000 m³ enterré des eaux résiduaires derrière la gare d'Austerlitz. À terme, ce projet permettra l'installation de lieux de baignade pérennes dans la Seine à Paris, au titre de l'héritage laissé à la population à l'issue des jeux.

Parmi les innovations, il faut citer une technique inédite de chargement de barrette réalisée avec succès sur deux chantiers à Abidjan (Spie Batignolles Fondations) et à Paris (Soletanche Bachy).

L'innovation réside dans l'installation dans la barrette d'un vérin de telle sorte que c'est la barrette elle-même qui fait office de massif de réaction pour l'essai. Le dispositif est composé de deux vérins immergés et d'une instrumentation répartie sur toute la hauteur de la barrette pour caractériser les paramètres de sols des terrains d'ancrage. À ma connaissance, il s'agit du premier essai de ce type réalisé en France.

L'intérêt de mesurer directement sur un chantier la résistance d'une barrette permet d'aller plus loin dans le dimensionnement en l'optimisant que lorsque ce dernier est calculé à partir d'une base de données, comme cela était fait généralement.

Outre les conférences scientifiques et les webinaires, d'autres manifestations sont-elles organisées en vue de la promotion de la géotechnique ?

Le CFMS, le CFGI et le CFMR (Comité Français de Mécanique des Roches) organisent tous les deux ans les journées nationales de géotechnique et de

géologie de l'ingénieur (JNGG). Elles réunissent, à chaque fois dans une université différente, près de 300 participants parmi tous les acteurs de la géotechnique : enseignants-chercheurs, bureaux d'ingénierie et d'investigation, maîtres d'œuvre, contrôleurs techniques, entreprises de travaux dans le sol. La prochaine édition aura lieu du 28 au 30 juin 2022.

Le congrès international de mécanique des sols (ISSMGE) participe lui aussi à cette promotion. Il a été organisé à Paris en 1961 et en 2013 et a réuni plus de 2 000 participants, en accueillant également la conférence des jeunes géotechniciens (iYGEC).

La Revue Française de Géotechnique, publication scientifique trimestrielle fondée en 1977 par le professeur Pierre Habib, contribue, sous une autre forme, à la diffusion des connaissances.

Parrainée par les comités français de mécanique des sols, de mécanique des roches, de géologie de l'ingénieur et des géosynthétiques, la RFG publie

des articles originaux et des notes techniques relevant de ces domaines⁽¹⁾. La promotion de la géotechnique est une préoccupation permanente du CFMS. L'ingénierie géotechnique n'ayant pas toujours une place suffisante et reconnue dans l'acte de construire, le CFMS a créé en 2015 un groupe de travail "promotion de la géotechnique".

Ce groupe est chargé d'établir un diagnostic de la situation, d'analyser les différentes problématiques identifiées et de proposer des actions adaptées. Deux axes de réflexion principaux structurent ses travaux : au niveau de l'enseignement, comment attirer et bien former les jeunes vers le métier de géotechnicien dans les cursus post-baccalauréat ; au niveau du monde professionnel, comment (re)valoriser la place de l'ingénierie géotechnique auprès des professionnels de la construction, qu'il s'agisse des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre, de architectes, des ingénieries en génie civil, des entreprises. □

- 1- International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).
- 2- Joseph Valentin Boussinesq est un hydraulicien et mathématicien français (1842-1929) élu membre de la section de mécanique de l'Académie des sciences en 1886.
- 3- Charles-Augustin Coulomb (1736-1806) est un officier, ingénieur et physicien français passé à la postérité pour la formulation précise des lois du frottement solide (poussée des terres sur les murs de soutènement, "roideur" des câbles, stabilité des voûtes), et pour l'invention du pendule de torsion, dynamomètre de précision qui lui permet de formuler la loi d'attraction entre solides électrisés (balance de Coulomb).
- 4- AFPS (Association Française du Génie Parasismique), AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain), CFGI (Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'environnement), CFMR (Comité Français de Mécanique des Roches) CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs).
- 5- <https://www.geotechnique-journal.org/>

18- Forage de la paroi moulée de la station RER Gare-de-Lyon en 1974 par une Hydrofraise de la première génération, inventée par Solétanche.
19- Henri Vidal a déposé son brevet de Terre Armée® en 1963 et réalisé un an après un premier ouvrage pour EDF à Pragnères, dans les Pyrénées.



© SOLETANCHE BACHY



© TERRE ARMÉE



L'assurance
de l'activité
professionnelle
des entreprises
de BTP



GLOBAL CONSTRUCTEUR

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

Notre contrat **GLOBAL CONSTRUCTEUR**
couvre votre entreprise, vos chantiers
et vos clients en **un seul et unique
contrat.**

Contrat élaboré par la **SGAM BTP**
pour le compte des Mutuelles affiliées.

l'Auxiliaire
Entreprendre avec assurance

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

Siret 77564905600014 - Code APE 6512 Z
Entreprise régie par le code des assurances - Société d'assurance mutuelle à cotisations variables



1
© CONFLUENCE

CONFLUENCE L'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE : UNE DISCIPLINE PASSIONNANTE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

CONFLUENCE RÉALISE PRINCIPALEMENT DES MISSIONS D'ÉTUDES ET DE CONSEILS GÉOTECHNIQUES À FORTE VALEUR AJOUTÉE, DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT, DES OUVRAGES D'ART ET DES TRAVAUX PUBLICS. CES PRESTATIONS SONT EFFECTUÉES TANT POUR DES MAÎTRES D'OUVRAGES PUBLICS ET PRIVÉS QUE POUR DES ENTREPRISES : EXPERTISES, GÉNIE CIVIL, DIGUES, BARRAGES ET BASSINS, BÂTIMENTS ET VILLAS, RISQUES NATURELS, TERRASSEMENTS... PIERRE-YVES VECCHIO, CO-FONDATEUR ET GÉRANT DE CONFLUENCE MET EN ÉVIDENCE LES SPÉCIFICITÉS DE CETTE PME QUI A SU SE FAIRE UNE PLACE À CÔTÉ DES MAJORS DE LA PROFESSION.

En effet, si son activité est axée sur l'ingénierie géotechnique, le conseil et l'assistance, elle accompagne également ses clients dans les domaines connexes à l'ingénierie en prenant en charge les son-

dages de reconnaissance, les essais et contrôles sur chantier, ainsi que les essais en laboratoire et le suivi des ouvrages.

La société a été créée en 2007 par Pierre-Yves Vecchio et Jean-Marc

1- La sondeuse EMCI 4.50 en opération sur un chantier de montagne.

Gaudichon qui sont restés associés jusqu'en 2012, date à laquelle ce dernier est devenu ingénieur-consultant indépendant tandis que Pierre-Yves Vecchio continuait l'aventure de Confluence dont il est le gérant.

2- Pierre-Yves Vecchio, co-fondateur et gérant de Confluence.

3- Sondage au pénétromètre dynamique Paganì TG63-100kN dans la station des Orres, dans les Hautes Alpes.

4- Essais d'arrachement suite à un affaissement de chaussée à Rotalier, dans le Jura.

© MARC MONTIGNON

2

PIERRE-YVES VECCHIO : PARCOURS

Pierre-Yves Vecchio, ingénieur géotechnicien, est diplômé de l'Institut des Sciences et Techniques de Grenoble (Polytech'Grenoble, 1995).

Après une dizaine d'années passées dans des bureaux d'études spécialisés en géotechnique - Groupe J, Geotech, Ginger (ex CEBTP), Antea - il crée en 2007 Confluence avec Jean-Marc Gaudichon.

Depuis sa création, ce bureau d'étude spécialisé en géotechnique s'est développé régulièrement pour atteindre en 2021 une vingtaine de collaborateurs et réaliser un chiffre d'affaires de 2 millions d'euros.

Confluence est membre de l'USG (Union Syndicale Géotechnique), du CFMS (Comité Français de Mécanique des Sols) et de l'AFGC (Association Française de Génie Civil).

Pierre-Yves Vecchio est titulaire d'un numéro d'agrément, lui permettant d'assurer des formations qui peuvent être prises en charge par les organismes de financement. Dans ce cadre, Confluence assure régulièrement des formations dans le domaine de la géotechnique : approches théoriques, illustrations pratiques, études de cas, ...

Gérant de Confluence depuis 2007, Pierre-Yves Vecchio est également président depuis 2015 de la délégation Cobaty des Pays de l'Ain.

À la base, Confluence est un bureau d'études spécialisé en géotechnique qui a évolué progressivement de deux personnes en 2007 à 20 en 2021 dont dix ingénieurs, dont la moyenne d'âge est de 34 ans.

« *L'une de nos particularités, indique Pierre-Yves Vecchio, est que nous possédons les moyens à la fois humains et matériels pour réaliser l'ensemble des investigations géotechniques nécessaires à nos études : sondages, essais sur chantier, essais en laboratoire et instrumentation des ouvrages* ».

Le siège social est situé à Saint-Vulbas, dans l'Ain, où les installations abritent également le laboratoire complet de mécanique des sols. Confluence dispose par ailleurs de trois agences à Gap (Hautes Alpes), Annecy (Haute Savoie) et Lyon (Rhône) dont la création récente vise à renforcer la présence de Confluence, grâce à une proximité plus affirmée, au sein de la métropole lyonnaise.

L'essentiel de ses interventions se situe dans le quart sud-est de la France mais, ponctuellement, Confluence est appelée à accompagner ses clients sur les sites de leurs chantiers, dans le nord de la France et sur la façade atlantique. Tout récemment, elle a été appelée sur des ouvrages de la région parisienne.

Si son métier de base est l'ingénierie, la société s'est dotée rapidement de moyens en matériels importants pour disposer d'une totale indépendance pour la réalisation des sondages sur le terrain et des essais en laboratoire, de façon à recourir le moins possible à la sous-traitance.

Sur la base de la loi MOP, relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée, Confluence décline l'ensemble des missions géotechniques G1 à G5, de l'étude de faisabilité jusqu'à la réception des travaux : depuis les phases préliminaires (G1), jusqu'aux phases de conception (G2-AVP, G2-PRO) puis d'exécution (G3). Elle effectue également les suivis de réalisation (G4, G3-suivis), et des diagnostics et expertises après sinistres.

Elle a également la spécificité de travailler autant en conception géotechnique pour les maîtrises d'ouvrage, publiques ou privées qu'en exécution lorsqu'il s'agit d'accompagner les entreprises de Travaux Publics et de bâtiment pour étudier plus en détail les solutions techniques, proposer des variantes, assurer un suivi de chantier.

DES MISSIONS DE 1 000 À 100 000 €

Une autre de ses spécificités réside dans la grande diversité de sa clientèle qui va de particuliers désirant construire une habitation à de grands projets d'infrastructure tels que des viaducs, des retenues collinaires, des barrages, des ouvrages de soutènements, des routes, des centres commerciaux, des stations d'épuration...

« *Nos missions s'échelonnent ainsi de 1 000 à 100 000 €, précise Pierre-Yves Vecchio. C'est un peu le grand écart mais notre taille et notre petite structure nous permettent de disposer de suffisamment de souplesse pour travailler aussi bien sur des petits projets que sur des opérations très techniques* ». ▸



3 © CONFLUENCE



4 © CONFLUENCE



5 © CONFLUENCE

De ce fait, la typologie des aménagements qu'elle est amenée à réaliser découle de cette diversité : bâtiments d'habitation et villas, bureaux ainsi que les projets d'aménagement évoqués précédemment.

« Dans le bâtiment, surtout en milieu urbain mais pas uniquement, précise Pierre-Yves Vecchio, cela nous amène à intervenir sur des terrains délaissés jusque-là parce que la pression foncière était moindre. Il s'agit le plus souvent de terrains qui n'intéressaient personne soit en raison de leur configuration, soit en raison de la nature du sous-sol - présence d'eau, portance médiocre, forte pente - et, de ce fait, leur aménagement est de plus en plus complexe. En milieu urbain, en particulier, où le foncier vierge est quasiment nul, les

constructions sont réalisées sur des terrains déjà aménagés précédemment, souvent en plusieurs étapes successives, ce qui nous amène à intervenir sur des opérations de démolition, avec toutes les incertitudes qu'elles sous-entendent au niveau de l'existant à démolir ».

En Génie Civil, l'entreprise intervient fréquemment pour la construction de réservoirs, de ponts et viaducs routiers et ferroviaires avec des maîtres d'ouvrage tels que SNCF Réseau mais aussi des majors tels que Vinci, Eiffage, NGE, Demathieu Bard, tant au niveau des fondations et des terrassements que des soutènements, du renforcement ou de l'amélioration de sols, de l'instrumentation et de la surveillance d'ouvrages.

5- Dans les Hautes-Alpes, Confluence a réalisé le calcul et le dimensionnement des fondations du viaduc de Bonne, traversant la combe de Bonne dans le cadre de la rocade de Gap.

6- Sondages à l'aide d'une pelle araignée Menzi Muck à Gap, dans les Hautes Alpes.

7- Opération "Coup de Poing" avec la création d'un pont-rail SNCF sur la déviation de Marignier, en Haute-Savoie.

En particulier, de nombreux projets sont en interaction avec des nappes phréatiques. Aussi, l'entreprise est-elle en mesure de surveiller leurs battements de façon régulière afin de suivre en permanence leurs niveaux caractéristiques à l'aide pompes piézométriques équipées de capteurs automatisés transmettant leurs mesures à un logiciel de contrôle.

MESURES SUR CHANTIER ET EN LABORATOIRE

Ces interventions sont réalisées sur chantier avec les matériels propres de l'entreprise. Elle dispose de deux ateliers de sondage polyvalents : sondeuse EMCI 4.50 (50 ch) et pénétromètre statique-dynamique Pagani TG63-100KN.



6 © CONFLUENCE



7 © CONFLUENCE



© CONFLUENCE
8

Sur chantier, Confluence est équipée pour effectuer des contrôles et essais dans le domaine des terrassements, des confortements, des fondations, de l'hydrogéologie.

En laboratoire, les essais sont effectués à l'aide d'un matériel complet d'instrumentation : identifications GTR et essais Proctor, traitements des sols aux liants, bâtis oedométriques, essais de cisaillement...

L'entreprise s'est dotée également de matériels de mesure et de centrales d'acquisition pour analyser le comportement des ouvrages et suivre des sites naturels affectés par des instabilités.

Chaque ingénieur dispose de nombreux logiciels de calculs, pour mener à bien les dimensionnements des ouvrages géotechniques conformément aux réglementations en vigueur (Eurocodes, normes, fascicules, ...).

Il peut utiliser des logiciels spécialisés pour les calculs de fondation (Geofond, Plaxis 2D), soutènement et confortement (K-Rea, Geospar, Geostab), exploitation des sondages (EXGTE, Xpress), stabilité des talus (Geostab), analyse

8- Chantier du contournement Est de Roissy, dans le Val d'Oise.

9- Confortement de talus suite à un affaissement de la RD 1084 à Cerdon, dans l'Ain.

10- Modification d'un important barreau autoroutier sur le réseau APRR à Sevenans, dans le Territoire de Belfort.

des interactions sols-structures (Flac et Plaxis) ...

« À l'appui des résultats de nos sondages et essais, des calculs et des études techniques, poursuit Pierre-Yves Vecchio, nous conseillons la meilleure solution d'aménagement pour un projet, en prenant en compte les aspects techniques, les coûts et les délais. Nous restons ensuite disponibles pour expliquer aux maîtres d'ouvrage ou au

entreprises nos études et intervenir lors des travaux ».

Les retenues collinaires et les barrages d'altitude constituent, du fait de l'implantation de Confluence dans la région rhônalpine, l'une de ses spécialités, qu'il s'agisse d'ouvrages à vocation agricole pour l'irrigation, en l'occurrence plutôt en plaine, ou d'équipements de production de neige artificielle pour les stations de sports d'hiver, toujours en altitude. Il s'agit d'ouvrages dont la capacité peut atteindre jusqu'à 100 000 m³ et la hauteur une vingtaine de mètres. Pour la réalisation de ces retenues, Confluence assure l'étude de l'ensemble des opérations : terrassements, étude de réemploi des matériaux, construction des remblais, stabilité des digues, ouvrages techniques annexes.

Elle réalise des études et des solutions de confortement de terrains suite à des effondrements, généralement en bord de route sur des départementales, avec suivi de l'exécution.

Le domaine du risque naturel fait partie de ses compétences en particulier le diagnostic de falaises rocheuses susceptibles d'effondrement : pour des

mairies ou des particuliers, elle assure l'étude et la réalisation d'ouvrages de protection contre les chutes de blocs : ancrages, filets, grillages, merlons.

« Lorsqu'une mairie veut protéger des habitations au pied d'une falaise contre les chutes de blocs, précise à ce sujet Pierre-Yves Vecchio, elle est confrontée à deux choix : soit elle choisit la protection dite active, en empêchant la masse rocheuse de tomber, ce qui sous-entend la construction d'ouvrages spécifiques, pour empêcher la masse de se détacher de la falaise, soit elle s'oriente vers une protection dite passive : dans ce cas, on laisse la masse tomber mais on la bloque dans son élan en pied de versant avant qu'elle n'impacte les habitations par la création, par exemple, de merlons assez hauts et assez raides pour assurer la sécurité des habitations ».

Une autre activité s'est développée depuis quelques années suite aux désordres apparus avec le retrait/gonflement des argiles, consécutif aux périodes prolongées et de plus en plus fréquentes de déficit hydrique, voire de sécheresse.



9
© CONFLUENCE



10
© CONFLUENCE

Ce problème a globalement augmenté et touche désormais des constructions qui, jusque-là n'avaient pas été concernées. Il affecte désormais en France nombre de régions, notamment le Val de Saône, près de Lyon et la région de la Bresse, dans l'Ain, territoires de prédilection de Confluence. Les terrains dont ils sont constitués contiennent beaucoup d'argile et subissent ces phénomènes de retrait et de gonflement, impactant des maisons dont certaines, centenaires, n'avaient jamais connu de désordres consécutifs à cette évolution climatique. Les résoudre fait désormais partie du métier de Confluence.

Après diagnostic, elle est en mesure de proposer des solutions adaptées aux terrains pour bloquer les fondations. Cela va du simple approfondissement de la fondation à l'injection de résine ou la réalisation de micropieux.

« À cette première facette de la problématique des fondations sur terrains argileux, poursuit Pierre-Yves Vecchio, s'ajoute désormais l'application de la loi ELAN⁽¹⁾ dont l'un des volets rend les études géotechniques obligatoires dans certains cas de figure. Dans les zones cartographiées à risques moyens ou forts de retrait/gonflement des argiles, la loi ELAN impose que le vendeur du terrain fournisse à son acheteur une étude préliminaire de niveau G1-PGC (Étude préliminaire - Principaux Généraux de Construction). Cela permet à l'acheteur de savoir, en toute connaissance de cause, s'il aura ou non un surcoût de construction en fonction du risque lié aux argiles. Cela permet aussi de valoriser ou de dévaloriser le terrain à sa juste valeur. La loi impose une deuxième obligation au nouveau propriétaire s'il veut faire construire : une mission complémentaire de niveau G2-AVP (Conception - Avant Projet) qui doit être communiquée à l'entreprise chargée de la construction. Ce qui sous-entend l'intervention d'un géotechnicien pour définir le projet. Précédemment à la loi ELAN, aucune étude géotechnique n'était obligatoire au sens de la réglementation même si les compagnies d'assurances et les maîtres d'œuvre la demandait la plupart du temps ».

DES INTERVENTIONS DIVERSIFIÉES

Sous maîtrise d'ouvrage SNCF Réseau, Confluence a réalisé les études pour la création d'un pont-rail de 30 m de longueur, sur une ligne existante, sur la déviation de Marignier, en Haute-Savoie, mis en place par ripage : études



© CONFLUENCE

11 - Chantier d'extension du bâtiment SSR du centre hospitalier de Viriat, près de Bourg-en-Bresse.

12- La tour d'observation ornithologique du Parc des Oiseaux à Villars-les-Dombes.

13- Conception, réalisation et suivi des études géotechniques du stade de Décines, devenu Groupama Stadium, de l'Olympique Lyonnais.

géotechniques du projet, dimensionnement géotechnique de l'ouvrage (calcul des fondations, des terrassements, de la phase provisoire de ripage), visa et suivi de chantier en phase travaux. L'ouvrage a été construit au niveau de la voie ferrée et mis en place de nuit sur le remblai dans un délai incompressible dans le cadre d'une OPC "Opération Coup de Poing".

Pour SNCF Réseau, également, elle a étudié le merlon de protection contre les chutes de blocs sur la voie reliant Culoz à Modane, en Savoie. Les investigations ont été réalisées sur site et sous contrainte SNCF afin de dimensionner

l'ouvrage tant en ce qui concerne la stabilité que les fondations et les matériaux mis en œuvre.

Dans les Hautes-Alpes, Confluence a réalisé le calcul et le dimensionnement des fondations du viaduc de Bonne, traversant la combe de Bonne dans le cadre de la réalisation de la rocade de Gap.

L'ouvrage comporte 4 appuis avec culées fondées sur pieux en zone sensible de glissements de terrain et remblais contigus à la culée sud en gabions sur remblai allégé (maîtrise d'ouvrage DREAL PACA, entreprise Campenon Bernard Sud-Est).

À Paris, dans le 15^e arrondissement, pour le ministère des Armées, Confluence a réalisé pour Altea, entreprise en charge des travaux, le dimensionnement géotechnique d'un écran brise-vue de l'ordre de 500 m de longueur en bordure du boulevard périphérique (mission G2PRO) avec calcul des micropieux de fondations et calcul des tirants d'ancrage de renforcement de structures existantes.

À Viriat, dans l'Ain, le projet concernait la réhabilitation du bâtiment SSR (Soins de Suite et de Réadaptation) du centre hospitalier de Bourg-en-Bresse, confiée à Citinea.



12

© CONFLUENCE



13

© CONFLUENCE



14

DES BARRAGES " GONFLABLES " SUR L' AISNE ET LA MEUSE

Dans le domaine des barrages en béton armé, Confluence a participé à la reconstruction de 29 barrages sur l'Aisne et la Meuse pour le compte de VNF, maître d'ouvrage et de Bameo-Corebam, concepteur-constructeur.

Il s'agissait de remplacer des ouvrages anciens dits " barrages à aiguilles " dont l'entretien nécessitait des interventions de plus en plus fréquentes et, surtout, mobilisait des équipes contraintes de travailler dans des conditions dont la sécurité était difficile à assurer.

Le remplacement des barrages à aiguilles construits au 19^e siècle par des barrages automatiques constitue pour les cours d'eau de l'Aisne et de la Meuse un enjeu majeur en termes de navigabilité, de sécurité et de biodiversité. Il s'inscrit dans le programme de modernisation de la voie d'eau de VNF.

L'automatisation des barrages permet de sécuriser le travail des techniciens et de réguler la ligne d'eau pour la navigation. La modernisation des barrages s'accompagne du rétablissement de la continuité écologique des cours d'eau grâce à la construction de passes à poissons qui permettent de rétablir la circulation des poissons migrateurs, sur chacun des ouvrages ainsi que de la production d'énergie verte avec la création de trois centrales hydro-électriques à Givet, Ham-sur-Meuse et Fumay et la mise en conformité de la microcentrale de Revin (anciennement FHYM- Forces Hydrauliques de la Meuse).

Les barrages automatisés de l'Aisne et de la Meuse sont les premiers en France à être équipés de bouchures gonflables à l'eau, composées d'une membrane en élastomère renforcé fixée sur un radier (ou socle) en béton et sur les piles (ou piliers) des ouvrages.

Grâce à un système de capteurs situés à l'amont et à l'aval du barrage, la hauteur des membranes est régulée automatiquement pour maintenir une cote prédéterminée pour chacun des barrages. En cas de crue, les bouchures se vident jusqu'à s'aplatir au fond du lit du fleuve afin de ne pas faire obstacle à la montée des eaux. Les nouveaux barrages automatiques supervisés à distance offrent l'avantage d'une meilleure réactivité en période de crue car ils s'abaissent rapidement.

« Les études géotechniques d'exécution concernaient plusieurs aspects du chantier, précise Pierre-Yves Vecchio : stabilité des terrassements et fouilles provisoires, fondations, réutilisation des matériaux et protocoles de compactage, contrôles visuels et réception de fonds de fouilles, recommandations pour les essais sur ancrages et micropieux, assistance géotechnique et suivis de travaux ».



15



16

14 et 15- L'un des 29 barrages " gonflables " reconstruits sur l'Aisne et la Meuse pour remplacer les barrages dits " à aiguilles " datant du 19^e siècle.
16- Le chantier de reconstruction du barrage de Ham-sur-Meuse.

L'étude a consisté à réaliser des investigations géotechniques, évaluer l'état hydrique de stocks de déblais/remblais, adapter les préconisations de terrassements en fonction de l'état de la plateforme, calculer le soutènement nécessaire pour l'accès à un sous-sol (mission G3).

À Cerdon, dans l'Ain, suite à un affaissement de chaussée de la RD1084, Confluence a réalisé pour le conseil départemental de l'Ain le diagnostic et le dimensionnement d'un confortement

de talus aval de la route (mission G5 puis G4).

Les études ont consisté en des investigations géotechniques et un profil sismique, caractériser la nature des formations en présence, prendre en compte les risques naturels, construire des profils géotechniques pour calcul de stabilité et de confortement. À ceci s'est ajouté un avis sur la stabilité générale ainsi que la définition des mesures de confortement, d'entretien et de surveillance à mettre en œuvre pour sécuriser le site et le suivi de l'exécution des travaux réalisés par NGE Fondations. Dans le cadre du contournement Est de Roissy, dans le Val d'Oise, Confluence a réalisé les études géotechniques d'exécution de deux passages supérieurs (PS7 et PS9) de 70 m de longueur unitaire pour l'entreprise de travaux Baudin Chateaufort. La mission comprenait le dimensionnement géotechnique des ouvrages tant au niveau des fondations profondes que des fondations superficielles ainsi que la stabilité des terrassements provisoires (G3).

Sur l'autoroute A36 du réseau APRR à Sevenans, dans le Territoire de Belfort, Vinci Construction a confié à Confluence les études et le suivi géotechnique d'exécution (G3) des travaux de construction et de modification d'un important nœud autoroutier.

Le projet comprenait 10 ouvrages pour lesquels elle a effectué le dimensionnement des fondations et des améliorations de sol ainsi que l'analyse des interactions entre ouvrages et l'estimation des temps de consolidation sous remblais.

UNE TOUR ORNITHOLOGIQUE

Dans un environnement préservé, Naturein, régie départementale du parc des oiseaux des Dombes et le cabinet d'architecture Barillot ont fait appel à Confluence pour la construction d'une tour d'observation ornithologique de 27 m de hauteur à Villars-les-Dombes dans des terrains très argileux.

Considéré comme l'un des plus importants parcs ornithologiques en Europe, le Parc des Oiseaux présente une collection d'oiseaux exceptionnelle de plus de 3000 individus, représentant près de 300 espèces originaires de tous les continents.

La mission comprenait la réalisation des campagnes de reconnaissance, la définition des principes généraux de construction puis la rédaction des rapports géotechniques d'avant-projet et de projet pour les fondations et les terrassements ainsi que le contrôle en phase chantier des terrassements et des niveaux d'assise des fondations.

LE NOUVEAU STADE DE L'OL

C'est un projet d'une toute autre ampleur auquel a été confrontée Con-



17

© CONFLUENCE

fluence avec la conception et la réalisation des études et des suivis géotechniques du stade de Décines, près de Lyon, devenu Groupama Stadium (60 000 places), et qui est le stade de l'OL (Olympique Lyonnais).

Pour cette mission d'un montant de 180 000 euros, son intervention comportait plusieurs aspects : définition et suivi du programme d'investigations complémentaires, dimensionnement des fondations (portance, tassement, raideur, ...), analyse des interactions entre ouvrages, suivi des tassements des ouvrages, suivi des travaux, avec réception des fondations et contrôle des tassements.

17- La retenue d'altitude du lac des Echaud II aux Menuires.

18- Sondages de reconnaissance pour le futur lac des Echaud II près de la station des Menuires.

19- À Faucon-Barcelonnette, dans les Alpes-de-Haute-Provence, avant-travaux de protection contre les inondations de bâtiments agricoles et d'habitation.

À Faucon-de-Barcelonnette, dans les Alpes de Haute Provence, l'ONF a confié à Confluence l'étude d'avant-projet de protection contre les inondations de bâtiments agricoles et d'habitations en amont du site du "Pont de la Fabrique" par une digue et l'arasement d'un merlon existant. Les investigations géotechniques comportaient plusieurs volets : reconnaissance visuelle et des interactions avec les environnants, fouilles à la pelle hydraulique, essais d'infiltration, mesures de densité in-situ. L'étude géotechnique a permis de définir des hypothèses géotechniques ainsi que les calculs de stabilité des digues et des conditions de réemploi des matériaux.



18

© CONFLUENCE



19

© CONFLUENCE



20

© CONFLUENCE



21

© LE DAUPHINÉ LIBÈRE

48 000 m³ POUR DE LA NEIGE ARTIFICIELLE

Toujours dans le domaine de l'eau mais en altitude, en Savoie, la Sevalbel (Société d'Exploitation de la Vallée des BELleville) a confié à Confluence l'étude pour la construction d'une retenue d'altitude sur le domaine skiable des Menuires. Il s'agissait de réaliser un lac artificiel - le lac des Echauds 2 - à vocation de neige de culture avec un fort souci d'intégration paysagère, d'une surface d'eau de 9 000 m² pour un volume de 48 000 m³.

Une mission complexe en raison de la nature du site et de l'altitude (plus de 2 000 mètres) : définition du contexte géologique et géotechnique au moyen d'une étude bibliographique, de relevés stratigraphiques, d'investigations sur site (fouilles à la pelle hydraulique, sondages au pénétromètre dynamique,

20- Le "Pas de l'Aigle" à Morzine : une vue à couper le souffle entre Mont-Blanc et lac Léman.

21- À 2 019 m d'altitude, sur la pointe de Nyon près de Morzine, la passerelle en porte-à-faux du "Pas de l'Aigle".

22- La retenue d'altitude du Gourc de la Peur à Isola 2000.

sismique réfraction) et d'essais en laboratoire sur échantillons.

À ceci se sont ajoutés l'évaluation de la rippabilité des matériaux de la zone d'emprunt, les calculs de stabi-

lité des talus en déblais et remblais dans différentes situations (phases de construction et fonctionnement, vidange rapide, séisme) avec une analyse paramétrique, ainsi que les études des conditions de réemploi des matériaux présents au droit du site et les prescriptions sur les principes de drainage de l'ouvrage.

LE "PAS DE L'AIGLE" À MORZINE

En haute montagne, toujours, l'agence Alpes de Confluence vient de réaliser l'étude géotechnique d'exécution de l'ouvrage dit "le Pas de l'Aigle" au sommet de la pointe de Nyon à Morzine, en Haute Savoie. À 2 019 mètres d'altitude, cette passerelle en verre de 15 mètres constitue une avancée au-dessus du vide pour mieux percevoir le paysage environnant : 350 mètres de vide sous les pieds, un panorama à

près de 360° avec une vue à couper le souffle entre Mont Blanc et Lac Léman. La mission comprenait notamment le calcul des micropieux d'ancrage de la passerelle en porte-à-faux dans le massif rocheux.

D'autres missions de diagnostic mettent en évidence la diversité des interventions de Confluence dans des environnements très différents les uns des autres : restructuration du palais de justice de Vienne avec la création d'escaliers et d'ascenseurs en extérieur et de nouveaux murs porteurs ; extension du centre de tri de Paprec à Villers-Saint-Paul, dans l'Oise, calcul et dimensionnement des fondations superficielles d'un nouveau centre commercial Baobab à Mamoudzou, sur l'île de Mayotte, confortement des tours et remparts de l'enceinte du calvaire à Montbrison, dans la Loire, nouveaux accès des quais de la gare de Lyon – Part-Dieu à Lyon, dans le Rhône, nouveau casier de stockage de déchets non dangereux à Pierrefeu-du-Var, dans le Var...

« *L'objectif de Confluence, conclut Pierre-Yves Vecchio, est d'apporter à ses clients des solutions fiables et optimisées, de façon à garantir la réalisation d'aménagements adaptés à chaque terrain, en prenant en compte les aspects économiques et environnementaux des projets. Les exemples qui viennent d'être cités constituent un panel significatif bien que non exhaustif de son activité* ». □



© DR

1- Élaborée en partant du terrain, la loi ELAN a pour ambition de faciliter la construction de nouveaux logements et de protéger les plus fragiles. Elle a été définitivement adoptée au Sénat le 16 octobre 2018.



1

© WELER

A480 - TOARC CENTRE - OUVRAGE AVEC PIEUX BERLINOIS DANS UNE DIGUE CONTENANT DES ENROCHEMENTS

AUTEURS : CHRISTOPHE LABBE, CONDUCTEUR DE L'OPÉRATION A480, AREA - JEAN-PHILIPPE PINCHART, DIRECTEUR DES TRAVAUX, EGIS - GHISLAIN MAUBERT, CHARGÉ D'AFFAIRES, BALINEAU

LA RÉALISATION DES TRAVAUX DU TOARC CENTRE DE LA SECTION URBAINE DE L'A480 DANS GRENOBLE COMPRENNENT DE MULTIPLES OUVRAGES DONT DE NOMBREUX OUVRAGES LINÉAIRES EN PALPLANCHES À RÉALISER DANS LA DIGUE DU DRAC. SI LA RECONNAISSANCE DE SOL AVAIT IDENTIFIÉ DES SOLS ALLUVIONNAIRES À GROSSE GRANULOMÉTRIE, ELLE N'AVAIT PAS DÉTECTÉ DES ENROCHEMENTS MÉTRIQUES PRÉSENTS SUR UNE PARTIE DU LINÉAIRE. LES OUVRAGES POSITIONNÉS AU DROIT DE CES BLOCS ONT ALORS ÉTÉ MODIFIÉS POUR DEVENIR DES PAROIS BERLINOISES AVEC PIEUX MÉTALLIQUES FORÉS AU MARTEAU FOND-DE-TROU.

L'A480, L'AUTOROUTE URBAINE DU 21^e SIÈCLE

L'autoroute A480 se situe entre les autoroutes A48 (Lyon-Grenoble) et A51 (Grenoble-Sisteron). Cette autoroute de liaison à 2x2 voies a été construite en 1968 pour les jeux olympiques. Elle assure aujourd'hui le passage de plus de 100 000 véhicules par jour.

Cette autoroute ne répondait plus au besoin de développement de la mobilité de l'agglomération grenobloise. La congestion du trafic aux heures de pointe et le sentiment d'insécurité sur l'axe entraînaient des reports de trafic sur d'autres voiries urbaines ce qui était préjudiciable au développement des transports en commun et des circula-

**1- Atelier
de forage
au marteau
fond-de-trou.**

**1- Down-
the-hole drill
boring rig.**

tions douces. L'autoroute fonctionnait comme une coupure urbaine dans la ville et l'échangeur actuel du Rondeau complexifiait les circulations. L'aménagement de l'A480 et du Rondeau ont donc été conçus, avec les différents partenaires en charge de l'urbanisme et de la mobilité dans l'agglomération, pour résoudre ces difficultés.

L'aménagement de l'A480 a été pris en charge par Area dans le cadre du plan de relance autoroutier en 2015. Des travaux préparatoires ont eu lieu dès 2016 et les travaux principaux consistent notamment en la création d'une troisième voie dans chaque sens de circulation de la section urbaine située entre le diffuseur n°15 de Saint-Martin-le-Vinoux et l'échangeur du Rondeau (figure 2).

Les travaux de la section urbaine sont très interdépendants en raison de l'exiguïté du chantier et de la nécessité de maintenir pendant toute la durée du chantier le transit des usagers sur 2x2 voies réduites en journée et pendant les weekends pour limiter la gêne. Ces travaux ont été séparés en 2 lots de travaux principaux appelés TOARC (Terrassements Ouvrages d'Art et Rétablissements de Communication). Le TOARC Nord a pour objet l'aménagement depuis l'A48 jusqu'au début du diffuseur n°2 (Vercors) et le TOARC Centre a pour objet l'aménagement de

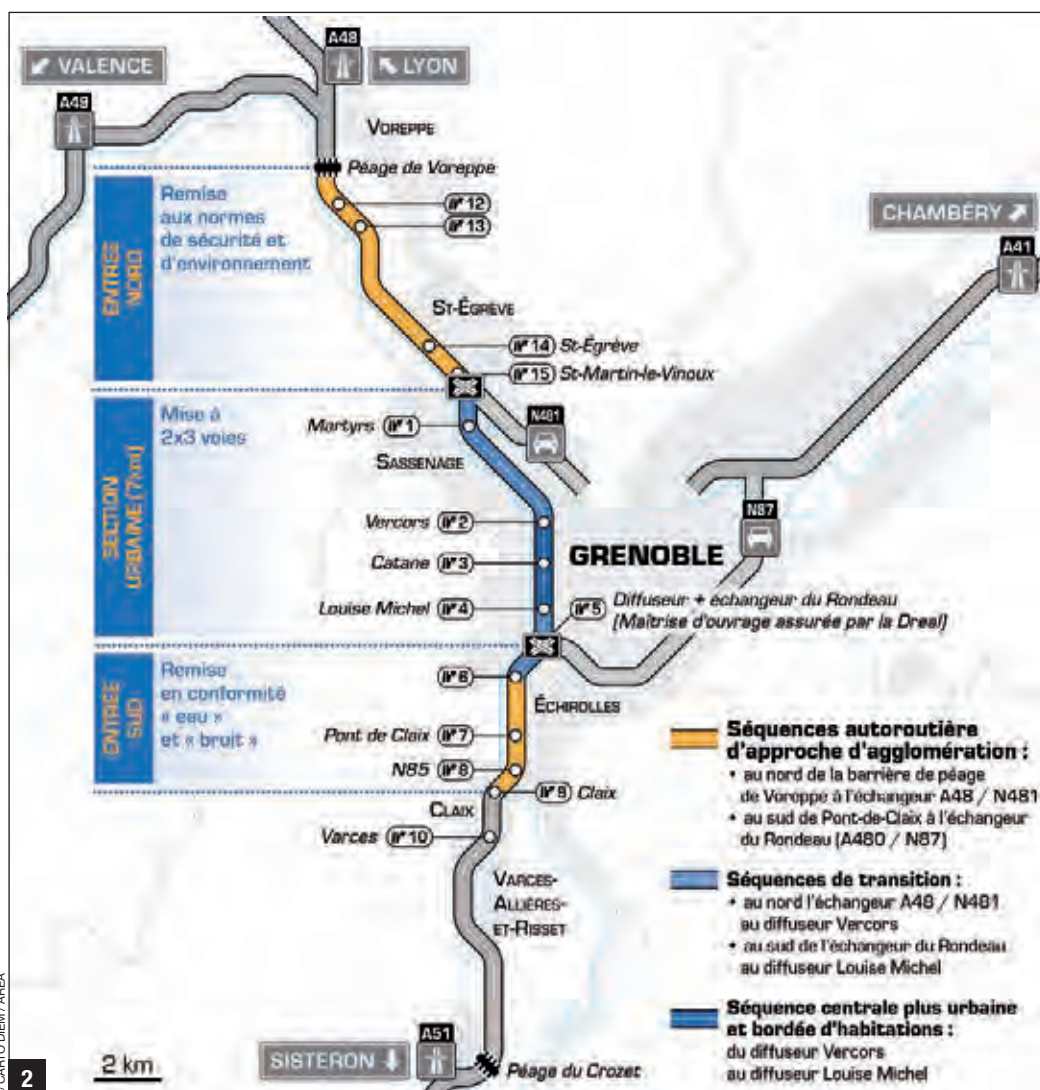
l'A480 entre le diffuseur n°2 (Vercors) inclus et l'échangeur du Rondeau. Ces lots de travaux ont débuté en janvier 2019 et s'achèveront en 2022.

Le TOARC Centre a été confié au groupement d'entreprises : Spie Batignolles Valérian / Spie Batignolles Malet / Demathieu Bard Construction / Spie Batignolles Génie Civil / Soletanche Bachy Fondations Spéciales / Soletanche Bachy France / Balineau / Pass.

L'entreprise Spie Batignolles, mandataire du groupement, assure la direction du chantier. Au sein de ce groupement, l'entreprise Balineau est chargée des travaux de palplanches.

2- Plan de situation des travaux de l'A480.

2- Location drawing of works on the A480.



LA DIGUE DU DRAC

Sur 5 km entre le seuil de l'III et le carrefour du Rondeau, l'A480 se confond avec la digue en rive droite du Drac. Cette digue protège l'agglomération grenobloise contre les crues du Drac. Dans le cadre du réaménagement de l'autoroute, le maintien de l'efficacité de cette digue est une obligation du projet. Construire la troisième voie de circulation de la partie centrale de l'A480 dans chaque sens de circulation sans augmenter l'emprise de l'autoroute a nécessité une modification du profil du talus qui sépare le Drac de l'A480.

Dès lors, des soutènements en palplanches ancrées de plusieurs mètres sous la chaussée étaient prévus pour permettre à la fois de gagner de la place pour les nouvelles voies et d'assurer la stabilité de la digue.

SOLUTION DE BASE DES OUVRAGES DANS LA DIGUE

L'ensemble de cette digue était donc traité par une suite de 10 ouvrages

dénommés " murs " constitués de rideaux de palplanches de hauteur variable surmontés d'un écran acoustique, sur un linéaire global de 1 600 m (figure 3).

Pour l'intégration urbaine des murs de palplanches, Area a souhaité habiller les rideaux de palplanches de parements en gabions. Ceux-ci sont remplis de galets issus de carrières locales, dont la couleur rappelle ceux du Drac.

La solution par rideau de palplanches avait été proposée par le maître d'œuvre Egis-Ingerop pour plusieurs raisons : En premier lieu, la mise en place d'un rideau de palplanches se fait sans déblayer dans le corps de digue, ce qui permet le maintien de la fonction de protection hydraulique de la digue. Ensuite, le rideau de palplanches est fréquemment utilisé en milieu aquatique car il assure à la fois la retenue hydraulique et la retenue des terres. Dès la conception, le choix du profil de palplanche de type PU (PU18 à PU22) de largeur réduite à 600 mm avait été fait afin de bénéficier d'une bonne inertie pour une bonne mise en œuvre en terrain graveleux. En outre, pour fiabiliser la mise en œuvre des palplanches par vibrofonçage, l'entreprise Balineau avait opté pour du préforage préalable systématique, à la tarière de grand diamètre. Ces préforages étaient réalisés par Soletanche Bachy Fondations Spéciales au sein du groupement.

TRAVAUX SOUS LIGNE HTA

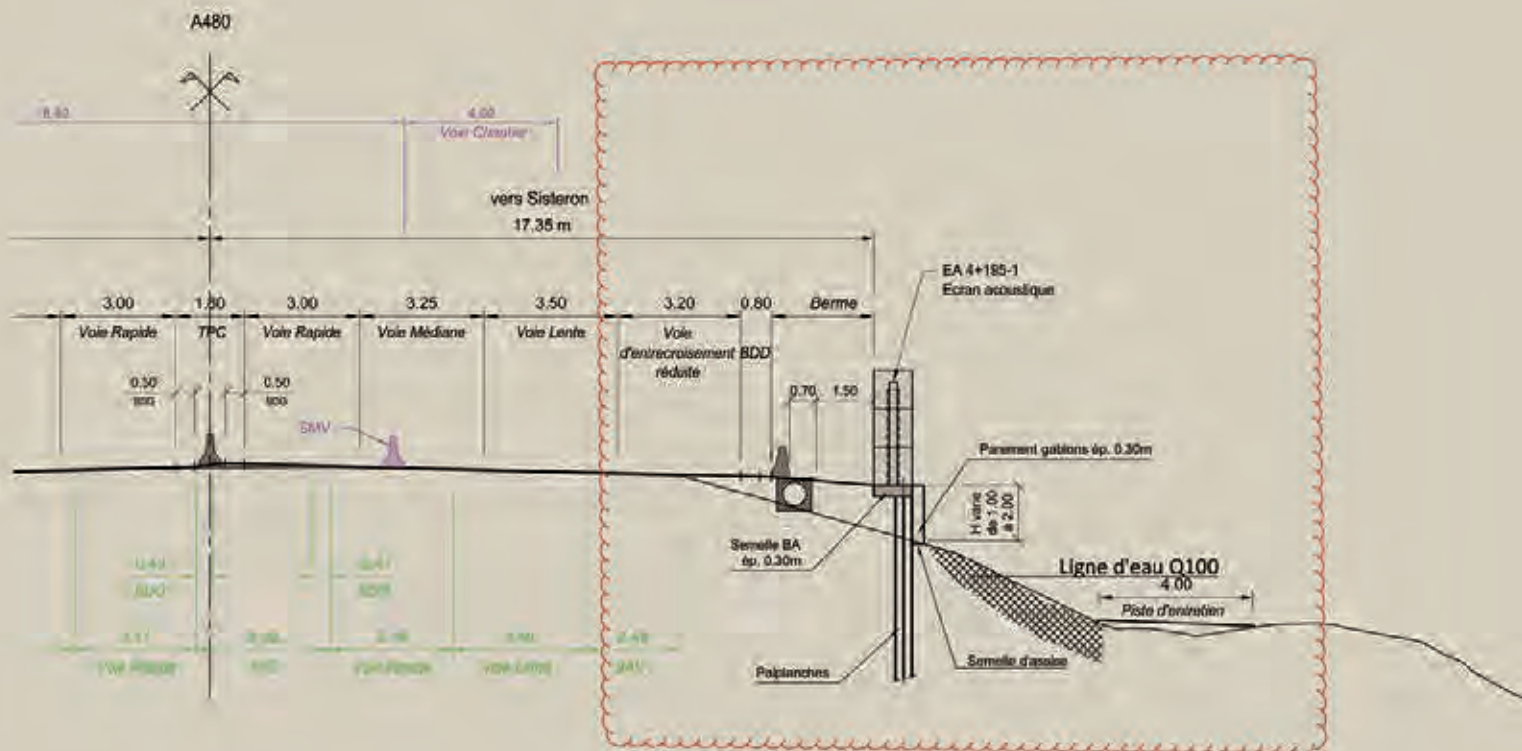
Sur une grande partie de la digue, dans l'alignement de ces rideaux de soutènement, est présente une ligne électrique aérienne HTA 24 000 V. Les câbles de cette ligne, positionnée entre 19 et 24 m de hauteur par rapport à la plateforme de l'autoroute, constituaient une contrainte forte puisqu'il n'était pas prévu d'interruption de leur alimentation.

En particulier pour les travaux de Balineau et de Soletanche Bachy Fondations Spéciales, cette présence de ligne nécessitait non seulement un matériel de préforage ayant la capacité de préforer avec une hauteur limitée, mais encore de réaliser la mise en œuvre des palplanches dans cette hauteur limitée (figure 4).

PRÉSENCE D'ENROCHEMENTS IMPRÉVUS

Les premiers " murs " ont été exécutés comme prévu. Mais, aux 2/3 de l'avancement du chantier, des difficultés très significatives de préforages sont apparues.

COUPE INITIALE CARACTÉRISTIQUE DE L'OUVRAGE 4+180



3

© EGIS

Dès lors, une campagne de sondages a été lancée consistant à espacer les préforages tous les 10 m pour une première analyse. Ces sondages ont présenté des refus quasi-systématiques, mettant en évidence un important niveau de blocs pluridécimétriques à

métriques, dont le toit était situé à 4 m environ de profondeur (figure 5). À cette profondeur, il devient difficile d'extraire des blocs à la pelle mécanique sans créer de grandes fouilles, ce qui n'est pas réalisable dans le contexte d'emprise réduite.

L'historique connu des aménagements de la digue du Drac ne permettait pas de positionner précisément les enrochements mis en œuvre au cours du temps. Lors des sondages en phase étude ces blocs n'avaient pas été reconnus. La campagne de sondages par préfo-

rage a permis de délimiter la zone de présence de ces enrochements et de confirmer la faisabilité de la solution initialement prévue vers le sud, passé cette zone, pour le mur 5+765 (de 300 m environ) réalisé au premier trimestre 2021.



4

© BALINEAU



5

© BALINEAU

3- Coupe initiale caractéristique de l'ouvrage 4+180.

4- Positionnement de l'atelier de forage sous la ligne haute tension.

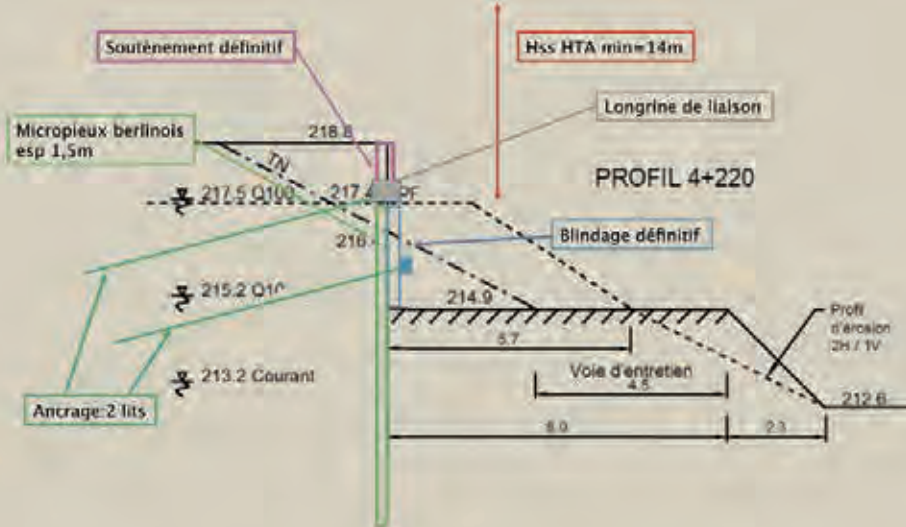
5- Enrochements à l'origine des refus du préforage.

3- Characteristic initial cross section of structure 4+180.

4- Positioning of the boring rig under the high-voltage line.

5- Riprap resulting in pre-boring rejects.

COUPE TYPE SOLUTION MICROBERLINOISE



6- Coupe type solution microberlinoise.

7- Coupe type solution berlinoise.

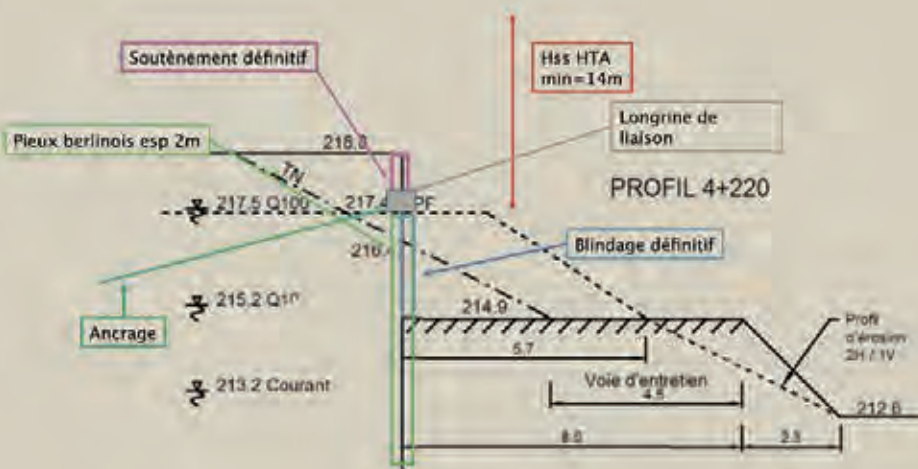
8- Coupe de l'ouvrage finalement réalisé.

6- Typical section of micropile Berlin wall solution.

7- Typical section of Berlin-type retaining wall solution.

8- Cross section of the completed structure.

COUPE TYPE SOLUTION BERLINOISE



DÉTERMINATION DE LA SOLUTION ADAPTÉE

Dès lors, deux solutions variantes de forage au marteau fond-de-trou ont été envisagées :

→ La paroi microberlinoise (figure 6) ;

→ La paroi berlinoise (figure 7).

La paroi microberlinoise étudiée comprenait des micropieux espacés de 1,50 m maximum et de plusieurs lits d'ancrages subhorizontaux permettant de reprendre les efforts de poussée. La solution de paroi berlinoise étudiée comprenait des pieux liaisonnés en tête par une poutre de couronnement avec en son sein une ligne d'ancrages subhorizontaux.

Si la première solution avait une faisabilité évidente, la seconde était à analyser en fonction des contraintes particulières du site, à savoir, la nature rocheuse du sol à traverser et la présence de la ligne haute tension.

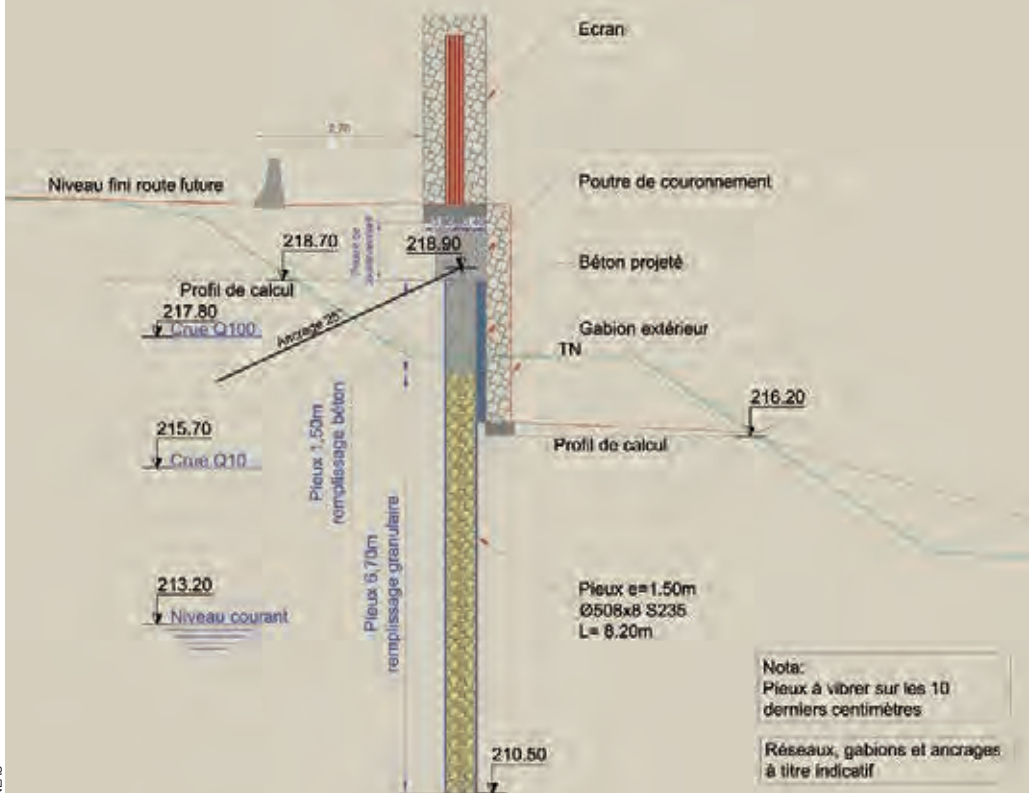
Balineau a alors proposé une solution de forage au marteau fond-de-trou, sur foreuse à mât télescopique, pour la mise en œuvre de pieux métalliques. La paroi berlinoise pouvait ainsi être construite sur ces pieux métalliques par l'intermédiaire de connecteurs soudés sur les tubes. Enfin, le béton projeté armé remplissait les intervalles sous la poutre de couronnement qui solidariserait l'ensemble.

CHOIX DE LA SOLUTION PAR LES INTERVENANTS

Le choix de la solution a été guidé par une analyse multi-critères (coûts, délais, contraintes environnementales et circulation de chantier).

Ces deux solutions étaient proches du point de vue technique et financier. Cependant la solution de paroi berlinoise présentait un profil de conception plus simple et permettait un gain de temps significatif.

COUPE DE L'OUVRAGE FINALEMENT RÉALISÉ



Ce gain de temps était notamment lié à l'utilisation d'une solution "métal" permettant de mobiliser immédiatement les pieux pour les phases suivantes (sans délai de prise de béton).

La configuration de la paroi berlinoise visait à reprendre principalement des efforts horizontaux, l'utilisation de tubes acier de forte inertie étant particulièrement adaptée à la reprise de tels efforts (figure 8).

Le soutènement étant réalisé par les pieux métalliques et la poutre de couronnement clouée, le remplissage en béton projeté entre les pieux ne nécessitait pas de clouage complémentaire et pouvait être dissocié. Pour cette raison, cette solution permettait de ne pas démonter l'entièreté d'un perré existant sur une partie du linéaire. Celui-ci pouvait donc être conservé pour assurer le rôle de protection de la digue contre l'érosion de surface qu'il assurait jusqu'alors (figure 9).

MISE AU POINT DE LA MÉTHODE

La mise en œuvre par forage au marteau fond-de-trou engendrant un vide annulaire extérieur entre le tube et le sol (le taillant avec ailettes sorties ayant un diamètre supérieur à celui du tube, figure 13), une opération de scellement complémentaire était nécessaire.

Dans le contexte de sol non-cohérent du site, le scellement des pieux par injection présentait un risque fort de pollution des eaux du Drac à proximité, il a donc été décidé de sceller les pieux par vibrofonçage.

Après remplissage des tubes avec les cuttings et un complément de matériaux graveleux d'apport, un vibrofonçage des tubes pour les derniers décimètres avec un vibrofonceur PTC 13H a été réalisé. Celui-ci a permis de terminer l'opération en garantissant le serrage des matériaux dans les pieux et autour. Dès lors les opérations de couronnement des pieux pouvaient être engagées, avant d'enchaîner sur la réalisation des tirants, puis des terrassements par passe et enfin le béton projeté entre les pieux (figure 10).

Cet ouvrage aura fait appel à une coordination des différentes entités du Groupement TOARC Centre, pilotées par la direction de chantier de Spie Batignolles. En effet, la poutre en béton armé et ses connecteurs ont été réalisés par les équipes de Demathieu Bard et les ancrages de celle-ci ainsi que la paroi en béton projeté par les équipes de Soletanche Bachy.

L'ATELIER DE FORAGE AU MARTEAU FOND-DE-TRU

L'atelier porteur est une machine ABI 12/15. Cet atelier, habituellement dédié au vibrofonçage de palplanches ou profilés, dispose d'un mât télescopique de hauteur variable entre 9,5 et 18,5 m. Pour un poids en ordre de marche de 45 t, ce porteur peut donc avoir une hauteur réduite tout en étant équipé d'une ligne d'outils de forage d'un poids conséquent.

Pour réaliser des pieux de 8,2 m de profondeur, ce type d'atelier est capable de travailler sans engager la limite inférieure du gabarit de la ligne HTA située à 14 m de hauteur (figure 4).

9- Perré existant.

10- Ouvrage en cours d'avancement avec les enrochements traversés visibles.

9- Existing breast wall.
10- Structure during work progress showing the riprap passed through.



9

© WELER



10

© BALNEAU



11
© BALINEAU

Pour la réalisation de ce type de pieu, constitué d'un tube métallique, les deux étapes de production à distinguer sont la mise en position verticale du tube sur la ligne de forage, d'une part, et la descente dans le sol du tube par forage, d'autre part.

Pour la première étape, la solution qui a été privilégiée était la mise en place d'un cardan sur la ligne d'outils afin de pouvoir fléchir celle-ci jusqu'à une position horizontale. Le nouveau tube étant alors en attente en position sub-horizontale, la ligne d'outils pouvait être engagée dans le tube par simple chenillage de l'atelier sur quelques mètres (figure 11).

11- Ligne de forage sans le tube du pieu.

12- Éclaté du taillant avec ailettes et sabot.

13- Taillant avec ailettes sorties.

11- Boring line without the pile tube.

12- Exploded view of the drill bit with blades and shoe.

13- Drill bit with blades extended.

La deuxième étape de production consistait à réaliser le forage. La nature du sol, de type sablo-graveleux, avec blocs d'encrochements calcaires, a porté Balineau très logiquement vers une solution de type marteau fond-de-trou avec taillant pilote à ailettes (figure 10). Cette tête de forage comprend des éléments mobiles, trois ailettes, qui vont permettre de forer sous le tube lui assurant son passage à travers les blocs monolithiques. La forme même du taillant avec ses conduits d'extraction à l'arrière des ailettes donne un passage aisé pour la remontée des cuttings, ce qui facilite l'avancement du forage (figures 12 et 13).

Les travaux se situant en milieu terrestre et non fluvial, la ressource d'eau était rare et le choix s'est porté sur un fonctionnement en circulation directe de l'air dans le marteau fond-de-trou avec récupération de cuttings en tête du tube de pieu sous la table de rotation au moyen d'une boîte de conception Balineau.

Des tuyaux souples permettaient enfin l'acheminement de l'air chargé en contrebas de la digue en zone latérale, garantissant la sécurité du personnel autour de la machine, avec, de l'autre côté, le maintien de la circulation routière permanente jouxtant l'atelier. ▷



12
© ROBIT



13
© BALINEAU



14

© EGIS - ZINEB KALLOUCH

Pour leur entraînement à l'avancement du marteau fond-de-trou, les tubes étaient équipés d'un sabot en pied, préalablement soudé en usine afin de respecter des tolérances de positionnement assez sensibles.

La méthode de forage au marteau fond-de-trou nécessite une alimentation en air comprimé importante puisque le cahier des charges du marteau 12 pouces demande 66 m³/min, à 17 bars, pour un fonctionnement optimal.

Il a donc fallu mobiliser un ensemble de 4 compresseurs 30 m³/min - 25 bars (dont un en secours) et monter l'ensemble de ces unités de fabrication

d'air en ligne avec commande centralisée. Le graissage de ligne était assuré, dans ce contexte environnemental sensible au bord du Drac, avec de l'huile biodégradable.

Les marteaux, taillants et ailettes nécessitent un entretien régulier, comprenant le démontage partiel, voire complet, de l'ensemble. D'une part, il est nécessaire de continuer à travailler pendant le temps de cet entretien. D'autre part, bon nombre de ces pièces ne sont pas disponibles en stock et elles nécessitent plusieurs semaines pour être approvisionnées. Les enjeux dans ce type de chantier ne sont pas compatibles

14- Ouvrage fini.

14- Finished structure.

avec une panne potentielle d'une telle durée. Il est donc essentiel, en phase de préparation de chantier, de prévoir le nombre suffisant de pièces mécaniques et d'outils de forage de rechange et la disponibilité sur site de deux lignes complètes de forage.

Si cette méthode permet des cadences instantanées de forage importantes, les opérations intermédiaires d'entre-

tien, de démontage et remontage des lignes ont, quant à elles, un impact sur la cadence moyenne de l'ensemble de l'opération.

Enfin, au regard des coûts de ces pièces (marteaux, taillant pilote, jeux d'ailettes...), la mise en œuvre de ce type de méthode a un coût de démarrage important et ne peut s'envisager que pour des quantités d'ouvrage significatives.

Pour l'ouvrage complet, comprenant 133 pieux forés de 8,2 m de profondeur, Balineau a réalisé les travaux en continu sur une durée totale de 35 jours travaillés (figure 14). □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 133 pieux de 8,2 m de profondeur
- 109 t de tubes métalliques
- 1 090 m de forages au marteau fond-de-trou
- 232 m de paroi berlinoise
- Cadence moyenne de 4 pieux par jour pendant 35 jours

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Area

MAÎTRISE D'ŒUVRE TOARC CENTRE : Egis - Ingerop

TOARC CENTRE : Groupement Spie Batignolles Valérian / Spie Batignolles Malet / Demathieu Bard Construction / Spie Batignolles Génie Civil / Soletanche Bachy Fondations Spéciales / Soletanche Bachy France / Balineau / Pass

ABSTRACT

A480 - TOARC CENTRE - STRUCTURE WITH KING PILES IN AN EMBANKMENT CONTAINING ROCKFILL

CHRISTOPHE LABBE, AREA - JEAN-PHILIPPE PINCHART, EGIS - GHISLAIN MAUBERT, BALINEAU

For the improvement of road traffic on the urban section of the A480 motorway in the Grenoble urban area, Area and Egis awarded a contract to a consortium of eight firms to perform works for the TOARC Centre between road interchange No.2 and the Rondeau interchange, including numerous engineering structures. These included numerous rail and road structures in sheet piling to be constructed in the Drac embankment. Soil reconnaissance had identified alluvial soils of large particle size, but it had not detected one-metre riprap present on part of the length to be treated. The structures located at the level of these blocks were then modified to become Berlin-type retaining walls with steel piles bored by a down-the-hole drill. □

A480 - TOARC CENTRE - CONSTRUCCIÓN CON PILOTES BERLINESES EN UN DIQUE QUE CONTIENE ESCOLLERAS

CHRISTOPHE LABBE, AREA - JEAN-PHILIPPE PINCHART, EGIS - GHISLAIN MAUBERT, BALINEAU

En el marco de la mejora del tráfico vial de la A480 en su sección urbana situada en el área metropolitana de Grenoble, Area y Egis han encargado a un consorcio de 8 empresas la realización de las obras del TOARC Centre (movimiento de tierras, obra de fábrica y restablecimiento de la comunicación) entre el difusor n°2 y el intercambiador de Rondeau, formado por múltiples elementos. Entre ellos, debían realizarse numerosas construcciones lineales en tablestacas en el dique del Drac. El reconocimiento del suelo había identificado suelos aluviales de granulometría gruesa, pero no las escolleras, de un metro de longitud aproximadamente, presentes en una parte del tramo a tratar. En consecuencia, los elementos situados frente a estos bloques se modificaron para convertirlos en muros berlineses con pilotes metálicos, perforados con un martillo de fondo. □



1
© CYRILLE CASTEL

TOUR KEÏKO À ISSY-LES-MOULINEAUX UN CHANTIER MULTI-TECHNIQUES

AUTEURS : CLÉMENT CHAPLAIN, INGÉNIEUR D'AFFAIRES, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - THÉOPHANE DEROUX, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - JIMMY NAPOL, DIRECTEUR TRAVAUX, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - ROMAIN OZANNE, RESPONSABLE DE MISSION MOEX, ARTELIA

LA TOUR KEÏKO, IMMEUBLE DE GRANDE HAUTEUR CONSTITUÉ DE 15 NIVEAUX EN SUPERSTRUCTURES ET 6 SOUS-SOLS EN INFRASTRUCTURES, EST L'ÉLÉMENT FINAL DU PLAN DE DÉVELOPPEMENT DE LA ZAC DU PONT D'ISSY, SUR LA COMMUNE D'ISSY-LES-MOULINEAUX. SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS, EN CHARGE DU MACRO-LOT FONDATIONS/TERRASSEMENTS, RÉALISE UN CHANTIER MULTI-TECHNIQUES (PAROIS MOULÉES, BARRETTES, PIEUX, MICRO-PIEUX, VOILE PAR PASSES, REPRISE EN SOUS-CŒUVRE, RABATTEMENT DE NAPPE) ET GÈRE LES TERRASSEMENTS EN GROUPEMENT AVEC L'ENTREPRISE CAPOCCI, DANS UN ENVIRONNEMENT URBAIN DENSE.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Orchestrée par le promoteur Sefri Cime et l'agence d'architecture, de design et d'urbanisme Loci Anima fondée par Françoise Raynaud en 2005, la construction de cette tour qui s'élève à plus de 69 m de haut est destinée à la création de 25 000 m² de bureaux. Situé à l'angle de la rue Rouget-de-

**1- Vue générale
des travaux de
fondations.**

**1- General view
of foundation
works.**

Lisle et du quai du Président-Roosevelt en bord de Seine sur la commune d'Issy-les-Moulineaux, le chantier de la tour Keiko a débuté en septembre 2019. Après avoir réalisé les installations générales de chantier, Spie Batignolles Fondations a entamé les travaux d'infrastructure de la tour en commençant par le forage du puits circulaire qui constitue l'enceinte des 6 niveaux de

sous-sols. Ce puits circulaire en parois moulées d'une profondeur de 47 m et d'épaisseur 82 cm permet de créer une boîte étanche autostable sur 19 m de fouille. Une partie des charges de la tour est reprise par les parois moulées et, en dehors du puits, ce sont des pieux et des micropieux de fondations qui jouent le rôle principal d'ancrage de ces charges dans le sol. ▶

Le premier sous-sol, d'une profondeur de 4 m, a une emprise au sol plus importante que le puits circulaire. Le soutènement qui le constitue est réalisé en voile contre terre fondé sur pieux ou bien micropieux dans une zone située sous la passerelle piétonne dont la circulation a été conservée pendant toute la durée du chantier. La circulation de cette passerelle reliant le quai du Président-Roosevelt à la station de RER C Issy-Val-de-Seine a notamment pu être conservée grâce à la reprise en sous-œuvre réalisée dans le cadre du chantier.

Les sous-sols de la tour Keïko représentent plus de 49 000 m³ de terres évacuées sous rabattement de nappe. Les travaux du lot fondations se sont achevés dans le respect du planning fin juin 2021 soit 23 mois après le démarrage du chantier (figures 2 et 3).

LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Sur l'emprise du projet, les soutènements et fondations vont rencontrer les horizons suivants à partir d'un niveau de terrain naturel à 32 NGF environ (figure 4) :

- Les **Remblais**, sur les quatre premiers mètres, sont composés de matériaux très hétérogènes : limons, limons sableux ou graveleux, sables fins pouvant être argileux ou à passages grésifiés, passées tourbeuses et d'argile, ou encore fragments de craie et de marne calcaire ;
- Les **Alluvions Modernes**, sur trois mètres, sont caractérisés par un terrain sableux (pouvant être argileux), silto-sableux ou limon argileux ;
- Les **Alluvions Anciennes**, sur les six mètres suivants, sont subdivisées en deux sous-faciès : le premier est observé sous forme de sables fins à moyens graveleux plus ou moins limoneux gris ou gris beige voire beige orangé à crème ; le deuxième constitué de grave sableuse localement indurée et de sable graveleux ;
- Les **Craies**, à partir de 19 NGF environ, peuvent contenir des silex et, selon leur consistance, être subdivisées en craie altérée, craie fragmentée, craie consistante et craie rocheuse. Les propriétés mécaniques comme l'imperméabilité sont croissantes avec la profondeur ; la craie est d'abord observée sous forme de fragments crayeux au sein d'une matrice marneuse pour finir en craie rocheuse pouvant être fracturée à fragmentée.

Le contexte hydrogéologique est caractérisé par deux nappes : la nappe alluviale, qui correspond avec les alluvions de la Seine, et la nappe d'accompagnement de la Craie. Bien que séparées par un faciès marnéux semi-perméable présent dans la craie altérée, elles sont considérées comme communicantes. Un effort de sous pression de la nappe remontant jusqu'à 31,70 NGF au maximum (cote casier) s'exerce sur la structure.

2- Vue d'ensemble des terrassements.

3- Perspective de la maquette BIM des fondations.

2- General view of earthworks.

3- Perspective view of the BIM model of the foundations.

LE PUIXS CIRCULAIRE

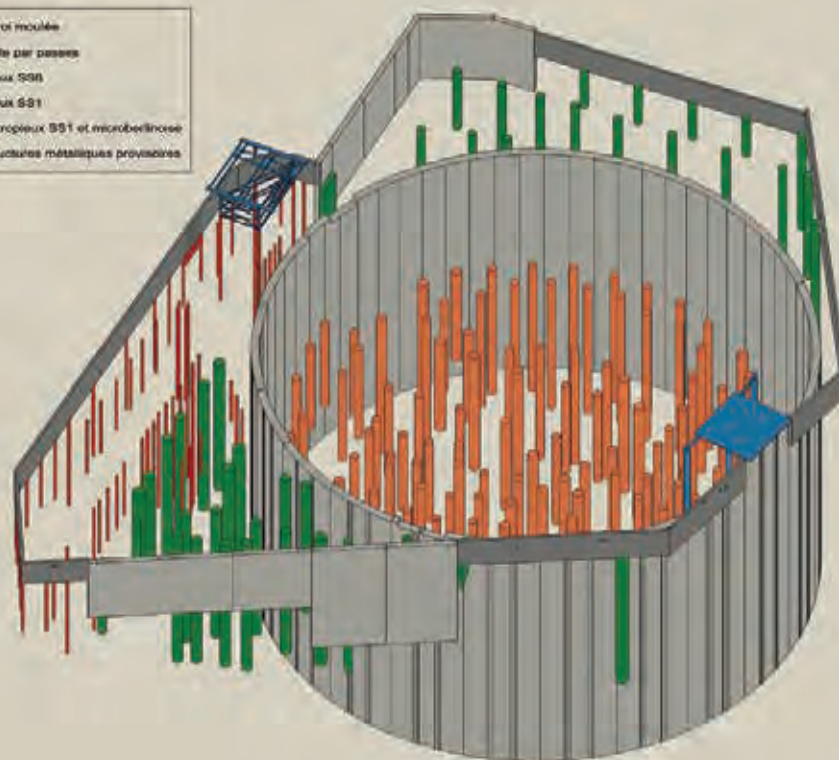
Le soutènement principal abrite six niveaux de sous-sol sur une hauteur de près de 19 m. L'écran circulaire du puits est fait de 23 panneaux de paroi moulée de 82 cm d'épaisseur (figure 5). La forme circulaire de cette fouille lui confère une stabilité naturelle qui permet l'économie d'appuis tels que des butons ou des tirants d'ancrage. Le diamètre du puits, de près de 52 m, est particulièrement imposant en



2

© STUDIO 80

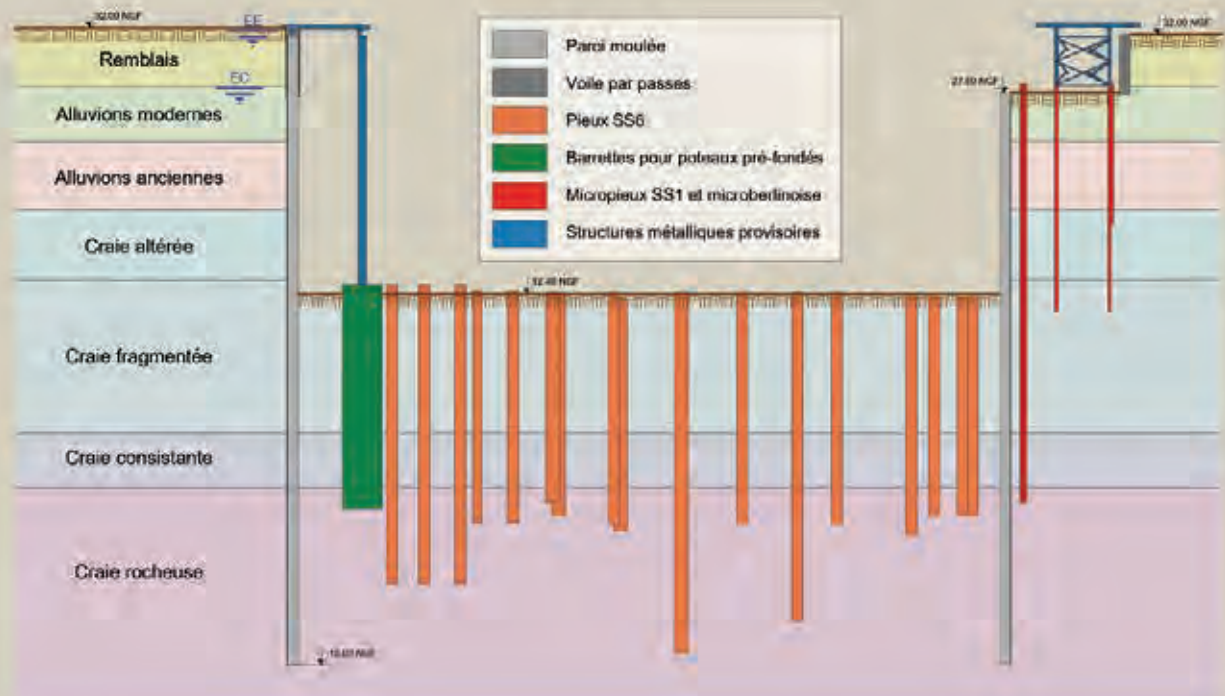
PERSPECTIVE DE LA MAQUETTE BIM DES FONDATIONS



3

© SPIE BATIONOLLES FONDATIONS

VUE EN COUPE DES SOUTÈNEMENTS ET FONDATIONS



© SPIE BATHIGNOLLES FONDATIONS

4

comparaison à l'épaisseur de l'écran. Le bon fonctionnement de l'ouvrage est conditionné par la continuité des 23 panneaux qui doivent former un anneau de béton d'épaisseur régulière. Tout l'enjeu et la difficulté de ce type de construction sont là. Les forages de paroi moulée doivent être exécutés avec la plus grande verticalité afin de garantir, malgré la profondeur, la continuité de la voûte de béton moulée dans le sol excavé. Les forages réalisés à la benne à câble ont montré une déviation inférieure à 0,5% de la profondeur. Une telle performance permet d'assurer la rigidité et la résistance du puits. Maîtriser la trajectoire de l'outil de forage est compliqué par la présence de fondations profondes existantes. Elles sont coutumières des anciennes zones industrielles comme celle-ci mais ne font pas pour autant l'objet d'un récolement précis et exhaustif. Le base du puits descend à -15 NGF, au sein de la craie rocheuse peu perméable, afin de réduire le pompage nécessaire à l'assèchement du puits lors des travaux.

LE SOUTÈNEMENT PÉRIPHÉRIQUE

L'ensemble de l'emprise du projet est terrassé sur quatre mètres et demi de profondeur afin de réaliser un niveau

4- Vue en coupe des soutènements et fondations.

5- Forage des parois moulées.

4- Cross-section view of the retaining structures and foundations.

5- Drilling the diaphragm walls.

de sous-sol. La tenue de terres est assurée par un voile par passes de 30 cm d'épaisseur. Sur 68 m de son linéaire, le soutènement périphérique est approfondi de 3 m par la présence de carneaux de ventilation ; une paroi moulée de 52 cm d'épaisseur remplace alors le soutènement en béton projeté. La proximité immédiate avec une fondation avoisinante de la passerelle piétonne du RER C a localement imposé une technique de soutènement plus rigide. C'est la technique de la microberlinoise qui est alors utilisée pour

cette zone où le gabarit sous la passerelle est réduit à 4,5 m (figure 6).

Le soutènement périphérique est stabilisé par un niveau de butons appuyés en fond de fouille. Lorsqu'il est tangent au puits, il prend appui sur des profilés verticaux scellés dans la paroi moulée circulaire. Ce dernier système d'appui est équipé d'un tirant de contreventement afin de limiter sa déformation (figure 7).

La combinaison de ces différentes techniques de soutènement permet de satisfaire aux exigences de conception, de s'adapter aux contraintes d'exécution, mais aussi d'assurer la performance économique du projet.

LES PIEUX DE FONDATION

La géométrie travaillée de la structure induit une excentricité entre le chargement descendant significatif apporté par la tour de grande hauteur et la sous-pression induite par la nappe souterraine. Les fondations doivent reprendre près de 170 kPa de pression d'eau lors de l'arrêt du pompage (phase travaux). Ainsi, les fondations peuvent être soit fortement comprimées (550 t), soit fortement tendues (270 t). Ces charges sont principalement reprises par des pieux d'un diamètre allant jusqu'à 1,02 m.



5 © CYRILLE CASTEL

On dénombre au total 3500 m de pieux de fondations répartis entre le premier sous-sol (1200 m) et le sixième sous-sol (2300 m). Les pieux les plus profonds sont ceux localisés au fond du puits où les chargements sont les plus importants. Leur base peut atteindre -12 NGF, ce qui représente presque 30 m de forage à travers la craie dure. L'utilisation du procédé Staforeuse® a permis d'optimiser le dimensionnement des pieux réalisés à la tarière creuse (figure 8). Cette technique de fondation, développée depuis 20 ans, montre des caractéristiques de portance supérieures à celles données par la NF P 94-262. Elle fait l'objet d'un cahier des charges fourni, témoin d'un procédé innovant et éprouvé. Les gains d'une telle démarche sont sensibles au niveau des délais d'exécution, mais aussi d'un point de vue économique et environnemental par la réduction de consommation de béton.

Pour les pieux du fond de puits sollicités en traction, il convient également de vérifier que le poids de terre compris dans les cônes d'arrachement équilibre l'effort de sous-pression de la nappe. L'estimation de ce poids est compliquée par une implantation très irrégulière des pieux. Une modélisation 3D est donc utilisée pour affecter à chaque pieu en traction un volume de sol stabilisateur réaliste (figure 9).

LES MICROPIEUX

Une partie du projet est surplombée par la passerelle piétonne du RER C. Elle impose aux engins de travaux un gabarit de 4,50 m de hauteur. Les fondations réalisées normalement par pieux sont donc faites de micropieux pour cette zone contrainte (figure 10). Il a fallu 66 micropieux forés en diamètre 250 mm et armés de tubes en acier de nuance 560 MPa pour reprendre les charges appliquées. Le gabarit très restreint a également poussé à l'utilisation du procédé dit "auto-foré", c'est-à-dire que le tube d'armature définitive du micropieu est également utilisé comme outil de forage. Ce mode opératoire a pour principal atout de réduire la manutention et donc d'accroître la productivité et la sécurité. Le scellement des micropieux est injecté à faible pression (type II). Six essais préalables (figure 11) ont permis de caractériser les frottements des micropieux avec les alluvions anciennes (500 kPa), la craie altérée (200 kPa) et la craie fragmentée (170 kPa). Ces résultats présentent un frottement admissible de service pris avant fluage


6

© CYRILLE CASTEL

6- Voile par passes sous passerelle et micropieux munis de plaques d'appui.

7- Butonnage du voile par passes tangent au puits.

6- Shear wall built by alternating passes under a foot bridge and micropiles provided with base plates.

7- Shear wall staying by alternating passes tangent to the shaft.


7

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

et sans coefficient minorateur. Ils indiquent une capacité portante au moins équivalente à celle de micropieux scellés par Injection Globale Unitaire (IGU). De telles performances traduisent la qualité de l'exécution des micropieux dans des terrains sensibles à cette technique, en premier lieu les alluvions.

REPRISE EN SOUS-CŒUVRE

La passerelle du RER C longue et surplombe le chantier. Plus encore, ses escaliers reposent sur l'emprise de la fouille du R-1. Une reprise en sous-cœuvrage s'impose pour le maintien de ces escaliers depuis la phase de terras-

sement du premier sous-sol jusqu'à la construction de l'infrastructure définitive du parking enterré. Dans un premier temps, quatre micropieux porteurs sont réalisés. L'ossature métallique qui prend appui sur les micropieux est ensuite disposée de façon à moiser les appuis des escaliers (figure 12). Des vérins plats sont positionnés entre les micropieux et la structure métallique afin d'assurer

8- Forage des pieux en fond de puits.

9- Modèle 3D des cônes d'arrachement.

8- Pile drilling at bottom of shaft.

9- 3D model of pull-out cones.

le transfert des charges de la passerelle aux quatre appuis avant le déchaussement de la semelle de fondation. Cette opération est réalisée en une seule nuit afin de minimiser l'impact sur l'accès de la passerelle qui reste en service lors des travaux (figure 13). Un suivi topographique en continu de la passerelle permet un éventuel ajustement des efforts des vérins.

LE RABATTEMENT DE NAPPE

La nappe alluviale se situant à 27,50 NGF et le fond de fouille du projet à 12,40 NGF, la fouille a dû être mise hors d'eau avant le démarrage des terrassements. L'objectif de rabattement de nappe a été fixé à 11,80 NGF, soit légèrement sous le fond de fouille. Avec une perméabilité de la craie rocheuse de l'ordre de 5×10^{-6} m/s, une fiche hydraulique de la paroi moulée circulaire à -15 NGF et une surface de fouille de 2100 m², le débit d'exhaure estimé est de l'ordre de 75 m³/h.

Afin de permettre le rabattement de la nappe sur plus de 15 m de haut, il a fallu réaliser 4 puits de pompage répartis uniformément dans la fouille principale. Ces puits ont été ancrés dans la craie rocheuse à la cote 4,40 NGF afin de prendre en compte l'effet de cône de l'épuisement de la fouille. Ces puits de pompage de diamètre 300 mm ont été équipés de tubes métalliques crépinés de diamètre 200 mm. Un essai de pompage a été réalisé avant les terrassements afin de confirmer le bon dimensionnement du système de pompage. L'essai a été concluant. En effet, le débit réellement constaté sur site avoisine les 10 m³/h et les travaux de terrassements ont pu être lancés.

LES TERRASSEMENTS

Les terrassements ont été décomposés en deux phases. La première phase de terrassement correspondant au volume du 1^{er} sous-sol a été réalisée en parallèle des travaux de voile contre terre afin d'atteindre un fond de fouille intermédiaire à -4,50 m sous le niveau du terrain naturel. Cette première phase représente un volume de 17 000 m³ de terres évacuées en un peu plus de 2 mois. La seconde phase de terrassement, quant à elle, correspond au volume de terres contenu dans l'enceinte de la paroi moulée circulaire. Ce deuxième volume s'élève à plus de 32 000 m³, évacué en un peu moins de 3 mois (figure 14).

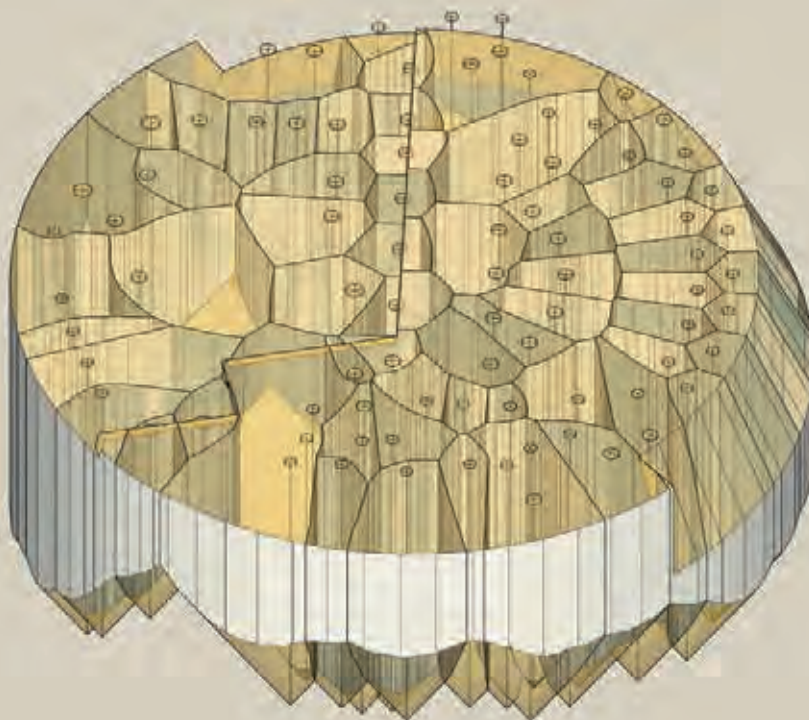
Étant donné l'exiguïté de la zone de circulation du chantier et les cadences élevées à respecter, il a fallu déporter l'aire de stationnement de la pelle à câble, noyau central de la chaîne d'évacuation des terres, en réalisant une estacade. Cette plateforme métallique a été positionnée afin de reposer sur la paroi moulée circulaire, d'une part, et des poteaux métalliques préfondés dans des barrettes, d'autre part.

Au total, 49 000 m³ de terres caractérisées ont été évacuées dans le respect des filières spécialisées, avec des pics ▾



8 © CYRILLE CASTEL

MODÈLE 3D DES CÔNES D'ARRACHEMENT



9 © SPIE BATHIGNOLLES FONDATIONS



10

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS



11

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

de cadences allant jusqu'à 700 m³/j, soit une soixantaine de camions par jour, ce qui correspond au remplissage d'un camion toutes les 7 minutes en moyenne les jours de pic.

LES LABÉLISATIONS HQE, BREEAM ET E+/C-

Désireux de proposer des bureaux de grande qualité pour les futurs usagers de la tour Keïko, le maître d'ouvrage Sefri Cime a fait preuve d'ambition en visant les labels suivants :

- Certification E+/C- au niveau E2C1 ;
- Certification HQE au niveau Excellent ;
- Certification BREEAM au niveau Very Good ;
- Certification Ready to Osmoz ;
- Certification WiredScore au niveau gold.

L'ensemble de ces labélisations a pour but de baisser l'empreinte carbone et les consommations énergétiques de l'ouvrage à la fois lors de sa construction mais également tout au long de son exploitation. En effet, ces labélisations s'expriment de manière concrète dans la vie du chantier, par des moyens mis en œuvre afin de réduire de façon directe l'impact environnemental du chantier comme l'emploi de béton bas carbone, mais également par le biais d'une analyse constante de l'organisation du chantier avec notamment le suivi quotidien de l'ensemble des flux entrants et sortants. Ces analyses quotidiennes ont pour but de quantifier l'impact environnemental du chantier et de le limiter au maximum en adaptant son organisation comme en revalorisant certains types de déchets par l'intermédiaire de sociétés spécialisées.

10- Forage des micropieux sous passerelle.

11- Essai de traction sur micropieu.

12- Reprise en sous-œuvre de la passerelle.

13- Continuité de service de la passerelle.

10- Drilling micropiles under the foot bridge.

11- Tensile test on micropile.

12- Foot bridge underpinning.

13- Continuity of service of the foot bridge.

En outre, le chantier de la tour Keïko se voulant à respectueux des riverains, un suivi acoustique a notamment été mis en place avant même le démarrage des travaux pour s'assurer d'un niveau sonore contenu afin de ne pas gêner les riverains.

CONCLUSION

Si le chantier de la tour Keïko a bel et bien été lancé en septembre 2019, il aura fallu 25 maquettes à échelle réduite et plus de onze années de conception pour dessiner l'ensemble du quartier du Pont d'Issy.

En effet, le projet de reconstruction de la ZAC du Pont d'Issy initié en 2008 est la transformation d'un quartier de plus de 96 000 m². Loci Anima a conçu dans ce quartier trois tours de logement, une tour de bureaux (Tour Keïko) (figure 15) et l'immeuble Aquarel siège de Capge-



12

© CYRILLE CASTEL



13

© STUDIO 80

mini dont les infrastructures ont également été réalisées par Spie Batignolles Fondations. Ce futur éco-quartier a notamment reçu la Pyramide d'Or de la mixité urbaine délivrée par la Fédération des Promoteurs Immobiliers en 2016. Finalement la tour Keiko a trouvé preneur en mars 2021. Elle accueillera fin 2023 les employés de l'Aema (fusion de Aesio et Macif) qui deviendra propriétaire de la tour. □

14- Vue aérienne des terrassements.

15- Vue architecturale de la tour.

14- Aerial view of earthworks.

15- Architect's view of the tower.



15
© LOCI ANIMA

PRINCIPALES QUANTITÉS

SURFACE PAROIS MOULÉES : 8 700 m²

LINÉAIRE PIEUX : 3 500 m

LINÉAIRE MICROPIEUX : 1 200 m

VOLUME DE TERRES EXCAVÉES : 49 000 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : SCI Issy Campus représentée par Sefri Cime

MAÎTRE D'ŒUVRE : Loci Anima Architectures

MAÎTRISE D'ŒUVRE D'EXÉCUTION : Artelia

BUREAU D'ÉTUDES STRUCTURE : Khephren Ingénierie

BUREAU D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES : Fugro

LOT 1 ET 2 - FONDATIONS ET TERRASSEMENT :

Spie Batignolles Fondations / Capocci

CARACTÉRISTIQUES DU Puits Circulaire

DIAMÈTRE : 52 m

ÉPAISSEUR DE LA PAROI MOULÉE : 82 cm

PROFONDEUR DE LA FOUILLE : 19,6 m

PROFONDEUR DE LA PAROI MOULÉE : 47 m

DÉBIT DE POMPAGE : 75 m³/h attendu
10 m³/h obtenu

ABSTRACT

KEIKO TOWER IN ISSY-LES-MOULINEAUX A MULTI-TECHNOLOGY PROJECT

CLÉMENT CHAPLAIN, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - THÉOPHANE DEROUX,
SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - JIMMY NAPOL, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS -
ROMAIN OZANNE, ARTELIA

Spie Batignolles Fondations is carrying out a multi-technology project for the construction of the Keiko Tower, a high-rise building with 15 levels above ground and 6 basements below ground in Issy-les-Moulineaux. The tower's infrastructure consists of a circular shaft 52 metres in diameter and 82 cm thick to a depth of 47 metres, and a composite enclosure consisting of diaphragm walls, shear walls built by alternating passes and a micropile Berlin wall at the height of the first basement. In all, 49,000 m³ of earth was excavated. The compressive stresses due to loading of the superstructure and tensile stresses due to hydrostatic pressure are absorbed by 66 micropiles and 155 piles. The project forms part of an HQE and BREEAM labelling approach. □

TORRE KEIKO EN ISSY-LES-MOULINEAUX UNA OBRA MULTI-TÉCNICA

CLÉMENT CHAPLAIN, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - THÉOPHANE DEROUX,
SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - JIMMY NAPOL, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS -
ROMAIN OZANNE, ARTELIA

Spie Batignolles Fondations realiza una obra multi-técnica en el marco de la construcción de la torre Keiko, edificio de gran altura, formado por 15 niveles de superestructuras y 6 sótanos de infraestructuras en Issy-les-Moulineaux. La infraestructura de la torre consta de un pozo circular de 52 m de diámetro por 82 cm de grosor, con una profundidad de 47 m y un recinto mixto, formado por pantallas de hormigón, paneles por pasadas y microberlinesa sobre la altura del primer sótano. En total, se han excavado 49.000 m³ de tierra. 66 micropilotes y 155 pilotes absorben los esfuerzos de compresión, debidos a las cargas de la superestructura, y de tracción, derivados de las subpresiones hidrostáticas. La obra se inscribe en un proceso de certificación HQE y BREEAM. □



1
© BOUYGUES TP

CALAIS PORT 2015 : LES MURS EN REMBLAI RENFORCÉ À L'ÉPREUVE DES EMBRUNS

AUTEURS : BENOIT CHANTEPERDRIX, DIRECTEUR, BOUYGUES TP, LÉNA LUSSEAU, INGÉNIEURE ÉTUDES, BOUYGUES TP - BASTIEN POTHIER, CHEF DE GROUPE, BOUYGUES TP

LE PROJET CALAIS PORT 2015 A CONSISTÉ À DOUBLER LA CAPACITÉ D'ACCUEIL DU PORT ET À AMÉLIORER L'INTERMODALITÉ GRÂCE À UNE EXTENSION TOTALE DE 65 ha DONT 45 ha GAGNÉS SUR LA MER. POUR GÉRER LA CIRCULATION SORTANTE ET ENTRANTE DANS LES FERRIES, 11 000 m² DE MURS DE SOUTÈNEMENT EN SOL RENFORCÉ AVEC LE SYSTÈME VSOL[®] ONT ÉTÉ RÉALISÉS. PLUSIEURS SPÉCIFICITÉS LIÉES À CE SITE ONT NÉCESSITÉ DES APPROFONDISSEMENTS TECHNIQUES AFIN DE RÉPONDRE AUX PARTICULARITÉS DE SON CONTEXTE MARITIME OU DANS UN SOUCI DE RÉDUCTION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL.

LE PROJET CALAIS PORT 2015

Le projet Calais Port 2015, premier chantier maritime d'infrastructures prioritaires de l'Union Européenne, a pour objectif de s'adapter à l'évolution future du trafic maritime. Afin de répondre à une croissance de 40% du trafic transmanche d'ici 2030, une augmentation de la taille des ferries ainsi que de nouvelles normes environnementales internationales, une restructuration complète et une extension du port existant est actuellement en cours de finalisation.

Le projet est porté par la région Hauts de France, propriétaire du port depuis décembre 2014. Six ans de travaux

ont été nécessaires, pour une mise en service des premiers postes à quai fin 2021.

Ces travaux ont consisté en une extension totale des terre-pleins de 650 000 m² dont 450 000 gagnés sur la mer, composée d'une digue de 3,2 km, d'une plateforme accueillant, notamment, les 3 nouveaux postes ferries pour les nouvelles générations de navires ainsi qu'un bassin de 177 ha (figure 2).

LES MURS DE SOUTÈNEMENT DE CALAIS PORT 2015

Pour le projet Calais Port 2015, la technique des sols renforcés avec le

1- Vue aérienne de la dorsale en construction.

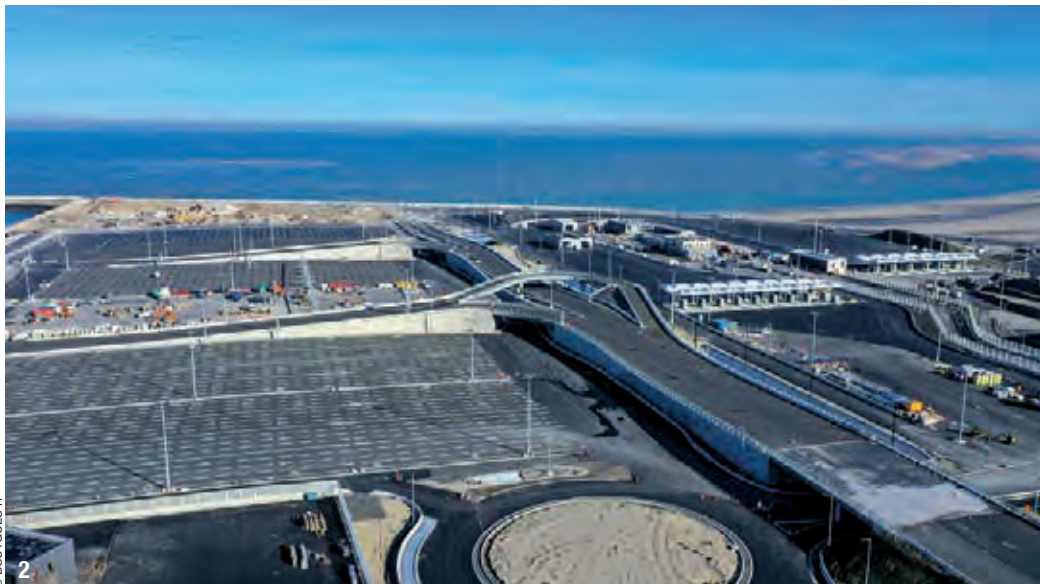
1- Aerial view of the backbone under construction.

système VSOL[®] a été sélectionnée pour réaliser les murs de soutènement créant une dénivellation nécessaire pour séparer les circulations sortant des ferries de celles prêtes à embarquer. Cette technologie a été employée essentiellement pour la " dorsale ",

véritable colonne vertébrale du projet permettant la répartition de l'ensemble des flux de la nouvelle plateforme gagnée sur la mer du nouveau port mais également pour 4 ouvrages d'art en tant que culée mixte.

Au total, 11 000 m² de murs ont été construits avec un phasage très complexe.

La dorsale de plus de 300 m de long a en effet été découpée en 11 phases de constructions successives permettant de maintenir les circulations sur le chantier, suivre le phasage de construction des ouvrages d'art et d'assurer les mouvements des terres et les préchargements (figure 1).



© BOUYGUES TP
2

LE SYSTÈME VSOL®

Le système VSOL® est une technique économique de construction d'ouvrages de soutènement en sol renforcé, régie par la norme NF P94-270 sur les remblais en sol renforcé et la norme d'exécution européenne EN NF 14475. La technique combine des éléments de parement, des éléments de renforcement et un matériau de remblai. L'intérêt du système VSOL® est de donner au sol une cohésion d'ensemble inexistante dans le sol d'origine, et ainsi de permettre à l'ouvrage de mieux résister à la poussée des terres. Le mécanisme d'interaction sol-renforcement réside dans la mobilisation de la butée qui s'exerce sur les barres transversales, mais aussi dans le frottement sur les barres longitudinales. La butée est largement prépondérante devant le frottement (80% pour la butée contre

2- Vue aérienne de la dorsale à la fin des travaux.
3- Phasage de construction - échelles de renforcement.

2- Aerial view of the backbone at the end of the works.
3- Construction work sequencing - strengthening ladders.

20% pour le frottement). La stabilité interne est justifiée lors du dimensionnement de l'ouvrage (figure 3). Le contexte maritime et l'objectif de réduction de l'impact CO₂ des travaux ont amené l'équipe de Bouygues TP en

charge du développement du système VSOL® à effectuer des analyses complémentaires afin d'adapter le procédé existant à ces spécificités.

LES PROBLÉMATIQUES DE CORROSION

Pour ces ouvrages du port de Calais, les remblais renforcés sont constitués d'armatures métalliques galvanisées à chaud avec une épaisseur minimale de 70 µm conformément à la norme EN ISO 1461 (Revêtements par galvanisation à chaud sur produits finis ferreux - Spécifications et méthodes d'essai).

En raison du contexte maritime dans lequel ces murs se situent, le dimensionnement des armatures pour une durée de vie de 100 ans a nécessité une étude spécifique poussée pour déterminer les paramètres relatifs à la

diminution de la résistance pour tenir compte des effets de la corrosion.

La version de 2010 de la norme NF P 94-270 était en vigueur lors du dimensionnement du projet. Cette norme de dimensionnement permet de prendre en compte de façon très précise les effets de la corrosion sur la diminution de section d'acier au cours du temps par la méthode dites "A, n, k" du nom des paramètres : **A** (diminution moyenne d'acier la première année), **n** (paramètre représentatif du ralentissement de perte avec le temps) et **k** (perte maximale/perte moyenne de section d'acier) qui sont établis par la norme permettant d'effectuer le calcul de la quantification de la corrosion.

La difficulté sur le Projet de Calais est que ces valeurs de la norme s'appliquent uniquement pour les cas hors d'eau, ou immergé en eau douce.

Le dimensionnement du port de Calais ne rentre donc pas dans ces critères, puisque le chantier se situe en bordure immédiate de la côte et donc soumis en permanence à l'agression des embruns marins.

Une étude détaillée relative à la corrosion a donc été menée afin de justifier la quantification de la corrosion des armatures métalliques. Le dimensionnement d'un renfort métallique prend en compte la corrosion dans le temps : le principe étant de prévoir suffisamment de matière en réserve pour que l'armature corrodée respecte toujours les critères normatifs imposés et notamment sur la résistance à la traction des armatures. Une corrosion trop importante n'assurerait plus la stabilité de l'ouvrage.

La galvanisation permet, d'une part, de retarder l'apparition de la corrosion de l'acier et, d'autre part, de ralentir le développement de la corrosion. Les armatures sont galvanisées à haute température, avec une certaine épaisseur de galvanisation (figure 4). Une épaisseur sacrifiée (l'épaisseur d'acier qui sera potentiellement corrodée sur la vie de l'ouvrage) est prévue afin de conserver une quantité d'acier suffisante. Cette épaisseur sacrifiée est donnée en fonction du caractère immergé ou non de l'ouvrage, et du type d'immersion (s'il s'agit d'eau douce ou d'eau de mer). Des essais sur les armatures VSOL® ont déjà été réalisés, montrant que de manière générale, la corrosion se développe de manière homogène sur toute la surface de l'armature (supérieure et inférieure).



© BOUYGUES TP
3



4

© BOUYGUES TP

En milieu salin, la galvanisation au zinc est une protection médiocre car la présence d'ions chlorures entraîne une corrosion plus rapide du zinc que celle de l'acier. Cependant le risque de corrosion par piqûre de l'acier noir est plus pénalisant que l'utilisation de l'acier galvanisé en environnement marin. Les scénarios les plus probables de corrosion pour le projet Calais Port 2015 sont :

→ L'apport de sel par les embruns (apport de chlorures sur le parement).

Le parement est soumis à des apports de chlorures, qui conduisent à une corrosion accélérée sur une certaine distance, principalement à l'arrière du parement.

→ L'apport de sel dû aux opérations de déverglaçages (apport périodique de sel).

Un apport périodique de sels de déverglaçage (chaque période hivernale) va impliquer une corrosion accélérée, plus importante en tête d'ouvrage qu'en pied, et à l'arrière du parement (due à une concentration plus forte des ions chlorures).

Les paramètres **A** (diminution moyenne d'acier la première année), **n** (paramètre représentatif du ralentissement de perte avec le temps) et **k** (perte maximale/perte moyenne de section d'acier) sont issus de nombreuses références de murs déjà réalisés en milieu maritimes et des règles de l'art

4- Échelles galvanisées à chaud.

5- Vue aérienne de la dorsale en construction en site maritime.

4- Hot galvanized ladders.

5- Aerial view of the backbone under construction on maritime site.

retenues pour cette étude sont donc les suivantes : **A** = 50 µm, **n** = 0,65 et **K** = 2,0 pour le site maritime du port de Calais (figure 5).

Par ailleurs, la norme de réalisation des sol renforcés NF EN 14475 impose également les critères physico-chimiques que doit respecter le matériau de remblai, mais encore une fois pour les ouvrages immergés en eau douce et non en eau salée.

Pour le projet Calais Port 2015 il a donc été nécessaire d'établir des critères renforcés pour des ouvrages immergés en eau de mer et notamment sur la résistivité du matériau. Ces critères ont eu un fort impact sur la sélection des matériaux utilisables dans les remblais renforcés de la dorsale.

des constructions d'ouvrages en site maritimes. Ceux-ci ont été adaptés au site de Calais en fonction des paramètres propres du site. Les valeurs



5

© BOUYGUES TP

ÉPAISSEURS SACRIFIÉES À LA CORROSION NF P94270

Réductions d'épaisseur de calcul Δe , pour les renforcements en acier dans des milieux modérément agressifs (en millimètres)

Renforcements en acier galvanisé (épaisseur minimale de galvanisation 70 μm)						
Environnement	Durée d'utilisation de projet					
	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Hors d'eau	0,00	0,17	0,53	0,99	1,37	1,72
En eau douce	0,14	0,36	0,82	1,39	1,85	2,26
Renforcements en acier non revêtu						
Environnement	Durée d'utilisation de projet					
	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Hors d'eau	0,45	0,79	1,64	Nécessite une justification spécifique		
En eau douce	0,67	1,12	2,24			

© ARNOR NF P 94270

6

Cette présence d'eau de mer implique qu'une attention particulière soit portée à la résistivité du matériau. En effet, il est nécessaire de limiter au maximum la migration des ions à l'intérieur du remblai afin d'éviter l'accélération du phénomène de corrosion. Pour cela le matériau de remblai doit être moins conducteur qu'en condition normale. La norme NF P94-270 de 2010 a été mise à jour en 2020, présentant une nouvelle forme de justification de la quantification de la corrosion. Les paramètres **A** (diminution moyenne d'acier la première année), **n** (paramètre représentatif du ralentissement de perte avec le temps) et **k** (perte maximale/perte moyenne de section d'acier) ne sont plus explicités. Dans la nouvelle présen-

6- Épaisseurs sacrifiées à la corrosion NF P94270.

7- Effet architectural - Passage sous l'OA6.

6- Thicknesses sacrificed to corrosion as per NF P94270.

7- Architectural effect - Passage under OA6.

tation, apparaît une valeur d'épaisseur sacrifiée en fonction de l'environnement et de la durée de service du projet. Ces valeurs sont clairement issues de

l'ancien calcul dit "**A, n, k**" et les résultats obtenus restent identiques à ceux calculés avec l'ancienne version de la norme (figure 6).

La nouvelle version de la norme ne prend toujours pas en compte le caractère immergé en eau de mer, une étude complémentaire de la corrosion est toujours nécessaire pour les projets en milieu marin.

PRÉFABRICATION DES ÉCAILLES EN BÉTON DES PAREMENTS

Afin de protéger la nouvelle extension du port, une digue de plus de 3200 m de long a été construite. Celle-ci est principalement composée de X-blocs en béton. Pour les fabriquer, une usine de préfabrication complète a été ins-

tallée sur le chantier. Afin d'optimiser la centrale à béton, le choix a été fait de réaliser également la préfabrication des écailles du système VSOL® sur site permettant d'avoir une gestion parfaitement maîtrisée de la production et de s'adapter encore mieux aux besoins du chantier, évitant ainsi plus de 160 camions soit un équivalent d'environ 100 t de CO₂ économisées, réduisant ainsi l'impact environnemental du chantier.

Pour ce qui concerne les écailles des parements en sol renforcé, des moules spécifiques ont été acheminés sur site et une formation des équipes du chantier a été réalisée au démarrage. Les opérations de préfabrication in situ ont été conduites à l'abri d'un hangar afin d'améliorer les temps de séchage. Les tolérances d'exécution ont été scrupuleusement suivies. Au total, plus de 2800 écailles ont été réalisées dans cet atelier avec un suivi qualité quotidien, aussi bien en termes de performances mécaniques que de rendu esthétique (figure 7).

Afin de suivre au mieux les profils en long en tête de mur, la grande majorité des écailles supérieures est fabriquée avec une pente adaptée (profil en long de la dorsale variable) ce qui la rend unique (figure 8). Un calepinage rigoureux doit être réalisé à la fois dans l'usine de préfabrication, mais aussi sur le chantier où les écailles sont mises en œuvre. Le chantier a instauré un suivi journalier de la production mis en parallèle quotidiennement avec l'avancement du montage des VSOL® sur site. ▷



© BOUYGUES TP

7



© BOUYGUES TP 8

Ce travail en synergie a permis d'optimiser le planning et les moyens mis en œuvre.

Pour assurer la durabilité des écailles en béton, les classes d'exposition sont considérées. Pour cela il est nécessaire de définir les actions dues à l'environnement (et notamment maritime) auxquelles le béton de l'ouvrage va être exposé pendant sa durée de service. C'est donc l'environnement du projet qui va imposer les classes d'exposition. La démarche de détermination des classes d'exposition peut être décomposée en cinq étapes, car les risques spécifiques à l'eau de mer génèrent des risques de pathologie différents.

→ Prise en compte des conditions climatiques.

XF2 (F) : saturation modérée en eau, avec agent de déverglaçage.

→ Prise en compte de la localisation géographique de l'ouvrage par rapport à la mer.

XS3 (F) : zone de marnage, zone soumise à des projections et/ou à des embruns.

→ Prise en compte de l'exposition du béton à l'air et à l'humidité.

XC4 (F) : alternance d'humidité et de séchage.

→ Prise en compte de l'action des chlorures d'origine autre que marine.

XD3 (F) : alternance d'humidité et de séchage.

→ Prise en compte du contact avec le sol et des eaux de surfaces ou souterraines.

XA1 (F) : environnement à faible agressivité.

À partir des classes d'exposition, l'enrobage des armatures est défini. L'enrobage permet de protéger les armatures constitutives du béton des phénomènes de corrosion.

Les armatures du béton armé sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH acide compris entre 9 et 13. Si le pH est moins élevé, alors cette protection ne sera plus effective. Une pénétration d'ions chlorures (liée au milieu maritime), peut franchir la zone d'enrobage et atteindre les armatures. Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par gonflement des fissures à l'extérieur de l'écaille. C'est pourquoi la valeur d'enrobage minimal retenue

8- Écailles en partie supérieure.

8- Facing panels on the upper part.

pour le projet est de 55 mm, supérieur de 10 mm à celle retenue habituellement, pour éviter toute dégradation irréversible de l'ouvrage et garantir une pérennité des écailles béton sur la durée de service. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

SURFACE TOTALE DE MURS VSOL® : 11 000 m²

QUANTITÉ TOTALE DE BÉTON : 1 540 m³ soit près de 3 000 écailles

QUANTITÉ TOTALE D'ACIER : 220 t

INTERVENANTS SUR LE MARCHÉ DE LA CONCEPTION-RÉALISATION

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société des Ports du Détroit (SPD)

ASSISTANT TECHNIQUE MAÎTRISE D'OUVRAGE : Egis

MAÎTRISE D'ŒUVRE INTÉGRÉE : Calais Port 2015 Ingénierie Intégrée (Groupement Arcadis, Bouygues TP, Colas, Spie et Sodrac International)

ARCHITECTE : Abciss architectes et Polynôme Atelier d'architecture

GROUPEMENT CONSTRUCTEUR : Calais Port 2015 Groupement

Constructeur (Bouygues TP mandataire, Bouygues TPRF, Spie Batignolles GC & Nord, Colas Nord-Est, Malet, Valerian et Jean de Nui)

ABSTRACT

CALAIS PORT 2015: REINFORCED FILL WALLS RESISTANT TO SEAWATER SPRAY

BENOIT CHANTEPERDRIX, BOUYGUES TP - LÉNA LUSSEAU, BOUYGUES TP - BASTIEN POTHIER, BOUYGUES TP

After six years' work, the Port of Calais has been completely renovated.

To keep pace with its expansion, the port has been completely reorganised in order to meet the new needs of maritime traffic. The VSOL® reinforced soil technique enabled various structures to be built chiefly on the backbone. Since the project is located in a maritime area, the impact of seawater had to be considered, notably regarding the phenomenon of corrosion of the rebars incorporated in the backfill. This phenomenon affects both the galvanised steel rebars and the concrete facing panels (manufactured on site). Since the existing standards do not take into account immersion in seawater, additional studies had to be performed. □

CALAIS PORT 2015: MUROS EN TERRAPLÉN REFORZADO RESISTENTES AL ROCÍO MARINO

BENOIT CHANTEPERDRIX, BOUYGUES TP - LÉNA LUSSEAU, BOUYGUES TP - BASTIEN POTHIER, BOUYGUES TP

Tras 6 años de obras, el puerto de Calais ha quedado totalmente renovado.

Para acompañar su ampliación, se ha realizado una completa reestructuración del puerto para responder a las numerosas necesidades de tráfico marítimo. La técnica VSOL® de terraplénado con suelo reforzado ha permitido realizar distintas construcciones, principalmente a nivel del eje dorsal. Dado que el proyecto se encuentra en zona marítima, ha sido preciso tener en cuenta el impacto del agua de mar, sobre todo en términos de corrosión de las armaduras integradas en el terraplén. Este fenómeno afecta tanto a las armaduras metálicas de acero galvanizado como a las placas de revestimiento de hormigón (fabricadas in situ). Las normas existentes no tienen en cuenta la inmersión en agua de mar, lo que ha obligado a realizar estudios complementarios. □

Villes intelligentes
Infrastructures innovantes
Réseaux performants



Bienvenue dans un monde qui se construit autrement.

L'univers de la construction se transforme. SMABTP adapte ses solutions d'assurance pour mieux vous accompagner. Avançons ensemble.

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**



© CÉDRIC HELSLY

PARIS XIII^e - BASSIN AUSTERLITZ - ESSAI DE CHARGEMENT SUR BARRETTE

AUTEURS : TONY PEREIRA CORREIA, RESPONSABLE TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MAXIME FONTY, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SOLETANCHE BACHY FRANCE - SABIKA GHEGEDIBAN, CHEF DE PROJET, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MICHEL MARON, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, SPÉCIALISTE DES ESSAIS DE PIEUX, FUGRO - BAO-ANH NGUYEN, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SEFI INTRAFOR

LA VILLE DE PARIS, DANS LE CADRE D'UN PLAN D'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DES EAUX DE LA SEINE ET DE LA MARNE, RÉALISE UN BASSIN DE STOCKAGE EN AMONT DU PONT D'AUSTERLITZ AFIN DE RÉDUIRE LE DÉVERSEMENT DES EAUX DU RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT LORS DE FORTS ÉPISODES PLUVIEUX. CET OUVRAGE DE GRANDE DIMENSION EST SOUMIS À DES SOUS-PRESSIONS IMPORTANTES. POUR OPTIMISER LA PROFONDEUR DES FONDATIONS D'ANCRAGE DU RADIER, UN ESSAI DE CHARGEMENT A ÉTÉ RÉALISÉ SUR UNE BARRETTE EN RECOURANT À LA MÉTHODE DES O-CELLS : UNE PREMIÈRE EN FRANCE !

PRÉSENTATION DU PROJET

La Section d'Assainissement de la Ville de Paris a confié au groupement Impluvium (regroupant les entreprises Urbaine de Travaux (mandataire), Sade, Bessac, Soletanche Bachy France et Sefi-Intrafor) la réalisation d'un bassin de stockage et restitution d'eau (le bassin Austerlitz), ainsi que deux ouvrages

de récupération des eaux depuis les déversoirs d'orage se trouvant de part et d'autre de la Seine (puits Valhubert et puits Tournaire) (figure 2). L'objectif de ces travaux est de :

→ Supprimer les déversements actuels d'eaux usées du réseau d'assainissement parisien par temps de forte pluie ;

1- Vue aérienne de la perforation des barrettes.

1- Aerial view of barrette drilling.

→ Améliorer la qualité sanitaire de l'eau de Seine en amont du Trocadéro, en vue de l'organisation d'épreuves de natation dans la Seine lors des J.O. de 2024 et de l'installation de lieux de baignades pérennes dans la Seine à Paris.

La maîtrise d'œuvre Artelia - Prolog de l'opération est accompagnée par



Icaruss pour la géotechnique. La mission de supervision d'exécution géotechnique G4 est réalisée par Terrasol. Btp Consultants intervient en tant que bureau de contrôle. Les études d'exécution du bassin sont réalisées par Enser pour la partie génie civil et par les bureaux d'études intégrés des entreprises de fondations spéciales. Les travaux ont démarré en août 2020 pour une durée de 44 mois, l'objectif étant de terminer avant mai 2024.

2- Localisation des ouvrages.
3- Coupe du projet prévu initialement.

2- Location of the works.
3- Cross section of the initially planned project.

CARACTÉRISTIQUES DES OUVRAGES

Le projet nécessite de réaliser principalement les travaux de génie civil suivants :

- Un bassin de stockage et restitution d'une capacité de 46 000 m³ situé en rive gauche de la Seine au droit du square Marie Curie dans le XIII^e arrondissement de Paris. L'ouvrage circulaire de 50 m de diamètre est réalisé à l'abri d'une paroi moulée de 1,2 m d'épaisseur descendue à 62 m de profondeur.
- Un ouvrage de prise d'eau situé en rive gauche de la Seine, place Valhubert dans le XIII^e arrondissement de Paris : le puits Valhubert, de 6,5 m de diamètre, est réalisé en paroi moulée de 0,8 m d'épaisseur et de 41 m de profondeur. Il sera connecté au déversoir d'orage existant Buffon, nécessitant des travaux de jet grouting.
- Un ouvrage de prise d'eau situé en rive droite de la Seine, au droit de la voie Mazas dans le XII^e arrondissement de Paris : le puits Tournaire sera raccordé aux collecteurs Diderot et Rapée. Il est réalisé par un terrassement en tranchée blindée à l'abri d'une enceinte constituée de colonnes en jet grouting.
- Un collecteur DN 2500 mm réalisé par fonçage au micro-tunnelier depuis un puits de départ positionné à côté du bassin. Le puits de 11 m de diamètre est réalisé en paroi moulée de 1 m d'épaisseur.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE & HYDROGÉOLOGIQUE

La zone de travaux du bassin se trouve au droit du square Marie Curie sur une esplanade située devant l'entrée de l'hôpital de la Salpêtrière. Les mitoyens en présence sont le viaduc de la Ligne 5 du métro aérien et un bâtiment R+2 de l'hôpital. Les terrains rencontrés sur cette emprise comprennent une frange de Marnes et Caillasses et de Calcaire Grossier sous couvertures alluvionnaires. Puis viennent les couches de l'Yprésien (Sables Supérieurs, Fausses Glaises, Sables d'Auteuil, Argiles Plastiques), et enfin les terrains d'ancrage des fondations projetées, les Marnes de Meudon et la Craie Campanienne. Les nappes en présence au droit du site sont la nappe du Lutétien, en relation directe avec la Seine, avec un niveau d'Eaux Basses situé à la cote 28,9 NGF et la nappe de la Craie en charge sous les Argiles Plastiques, avec un niveau d'Eaux Basses à 27,7 NGF (figure 3).

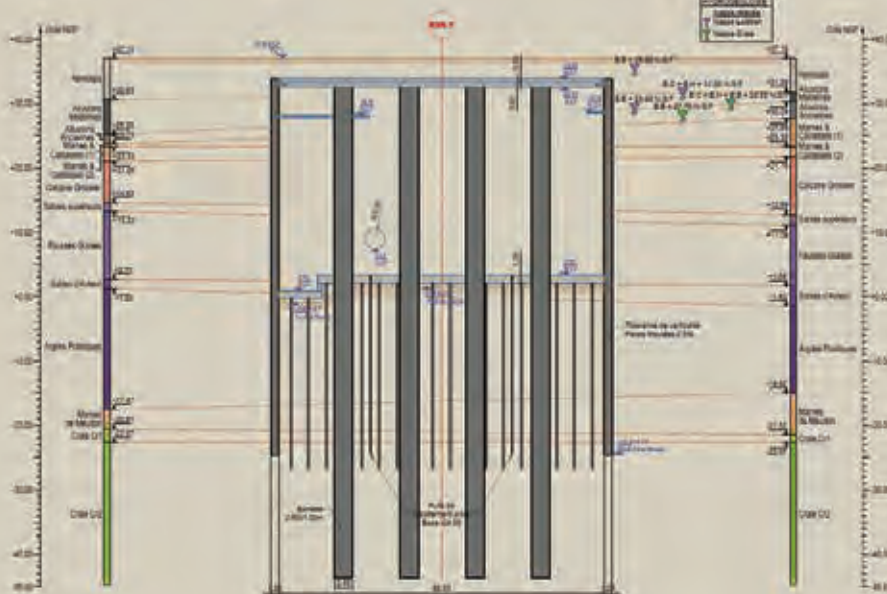
FONDATIONS NÉCESSAIRES À L'ANCRAGE DU BASSIN DE STOCKAGE

Une problématique récurrente de ce type d'ouvrage évidé et s'inscrivant dans un milieu saturé concerne la justification du non-soulèvement de l'ouvrage. Deux solutions peuvent être envisagées. La première consiste en un pompage permanent sous le radier permettant d'annuler les sous-pressions s'exerçant sur l'ouvrage. Si ce pompage dans le milieu naturel ne peut être maintenu sur la durée, alors le radier doit résister aux sous-pressions. Dans ce dernier cas, si le poids de l'ouvrage ne contrebalance pas la poussée d'Archimède, il est nécessaire d'ancrer le radier par l'intermédiaire de fondations qui mobilisent par frottement un poids de terre contribuant à l'équilibre vertical de l'ouvrage.

Dans le cas du bassin Austerlitz, d'autres considérations interviennent dans la conception de l'ouvrage : d'abord, la dalle de couverture doit être réalisée avant les terrassements pour libérer de l'emprise, ce qui implique la réalisation de préfondés pour appuyer la dalle. Ensuite, le fond de fouille est positionné juste au-dessus des Argiles Plastiques sujettes à un possible gonflement.

Tous ces éléments ont amené la maîtrise d'œuvre à retenir un vide sanitaire de 0,5 m sous le radier et un mode de fondation mixte de ce dernier avec des micropieux et des barrettes, ▷

COUPE DU PROJET PRÉVU INITIALEMENT



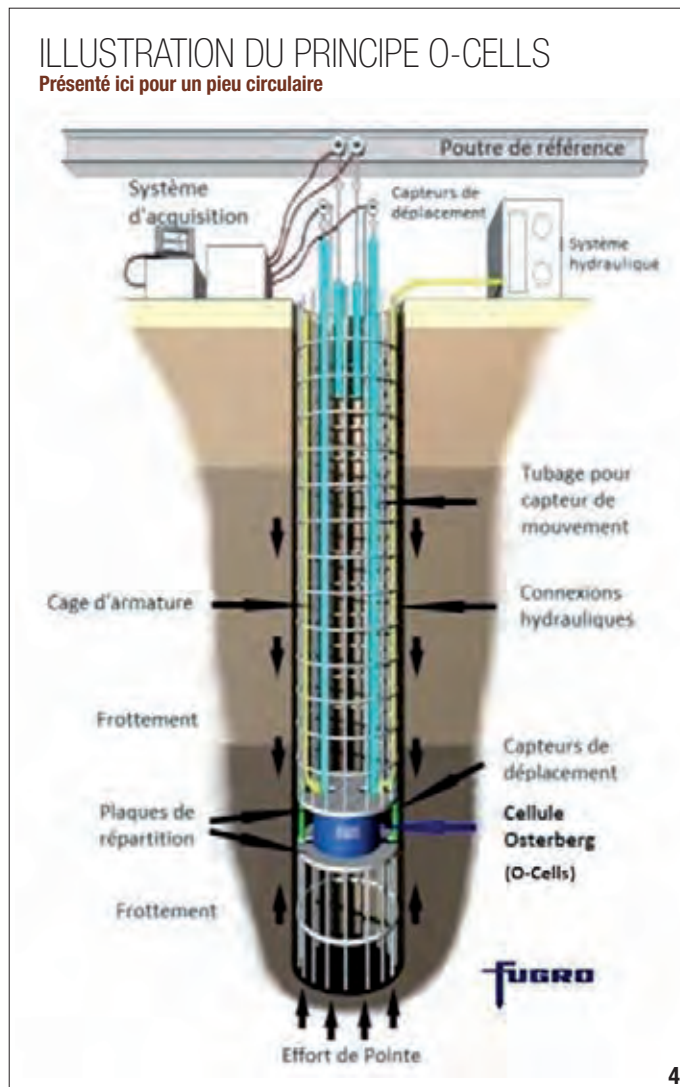
traversant les Argiles Plastiques et s'ancrant dans les Marnes de Meudon et la Craie Campanienne. Les barrettes servent de fondation à la dalle de couverture lors des phases de terrassement. Lorsque l'ouvrage est soumis aux sous-pressions s'appliquant sous le radier, les barrettes drainent une part importante des efforts de traction, du fait de leur forte raideur relativement à celle des micropieux. Enfin, en lien avec le gonflement possible des Argiles Plastiques, une force ascendante transmise aux fondations par frottement dans cette formation est également prise en compte.

Dans le cadre du dimensionnement de ces fondations, il faut rappeler que la norme d'application nationale de l'Eurocode 7 pour les fondations profondes (NF P 94-262) incite fortement à réaliser des essais pour valider les frottements limites pris en compte : si la fondation ne fait pas l'objet d'essais, la norme borne la résistance en traction de la fondation en situation d'État Limite de Service Quasi-Permanent à 0,15 fois la résistance en frottement limite. Les essais sur fondations, bien que répandus pour les micropieux, sont peu courants pour les pieux, et encore moins pour les barrettes, en lien avec les efforts à développer. Toutefois, compte tenu de l'enjeu et afin d'optimiser les fondations de type barrette, forées sous boue bentonitique, le marché a inclus dans la réalisation un essai de traction par la méthode des O-Cells. Ce type d'essai mené sur une barrette est une première en France et a été mis en œuvre par l'entreprise Fugro. L'essai est décrit ci-après.

La réalisation de la fondation qui fera l'objet d'un essai de chargement doit être mise en œuvre en début de travaux. Cela nécessite donc de mobiliser des moyens en amont des travaux de l'ouvrage, ce qui peut être coûteux (amené repli spécifique, immobilisation...). Dans le cadre du bassin d'Austerlitz, l'impact économique de cette mobilisation anticipée a été réduit par un enchaînement favorable des travaux : la barrette d'essai est réalisée dans un premier temps. Les travaux de paroi moulée du bassin, dont le dimensionnement ne tient pas compte des résultats d'essais, se poursuivent pendant 4 mois. Durant cette période, le béton de la barrette d'essai monte en résistance (1 mois), l'essai de chargement est conduit pendant 2 à 3 jours, et les résultats font l'objet d'un rapport d'analyse (3 à 4 semaines). Ensuite, le dimensionnement des fondations est

ILLUSTRATION DU PRINCIPE O-CELLS

Présenté ici pour un pieu circulaire



4

© FUGRO LOADTEST

actualisé et approuvé par les différentes parties durant les deux mois restants. Immédiatement après la fin de réalisation de la paroi moulée du bassin, les barrettes ont pu être progressivement forées et bétonnées en parallèle des panneaux de paroi du puits d'attaque au cours d'une seconde phase travaux de 3 mois (figure 1).

L'ESSAI O-CELLS

DISPOSITIF MIS EN ŒUVRE

La méthode de chargement mise en place pour le projet est appelée "essai bi-directionnel" ou "essai O-Cells". Elle a été développée par le docteur J.O. Osterberg de l'Université Northwestern de Chicago en 1989 et utilisée depuis pour tester des milliers de fondations à travers plus de 60 pays. Le principe de l'essai est l'encastrement, dans la fondation elle-même, d'un ou plusieurs

4- Illustration du principe O-Cells présenté ici pour un pieu circulaire.

5- Insertion de la cage équipée.

4- Illustration of the O-Cells technique shown here for a circular pile.

5- Insertion of the fitted rebar cage.



5

© FUGRO, MICHEL MARON

vérins spécifiquement conçus pour cet usage. L'essai utilise ainsi la réaction de la fondation elle-même pour développer la charge nécessaire sur l'autre partie de la fondation et en déterminer les paramètres de sol recherchés. En complément des vérins encastrés, six niveaux de six jauges de déformation ont été répartis dans la barrette pour évaluer la dissipation des frottements par le sol. Enfin, plusieurs capteurs de déplacement, appelés piges, mesurent les déplacements en tête, en pointe, et à différents endroits de la barrette. Ces capteurs offrent une redondance pour l'appréciation des courbes

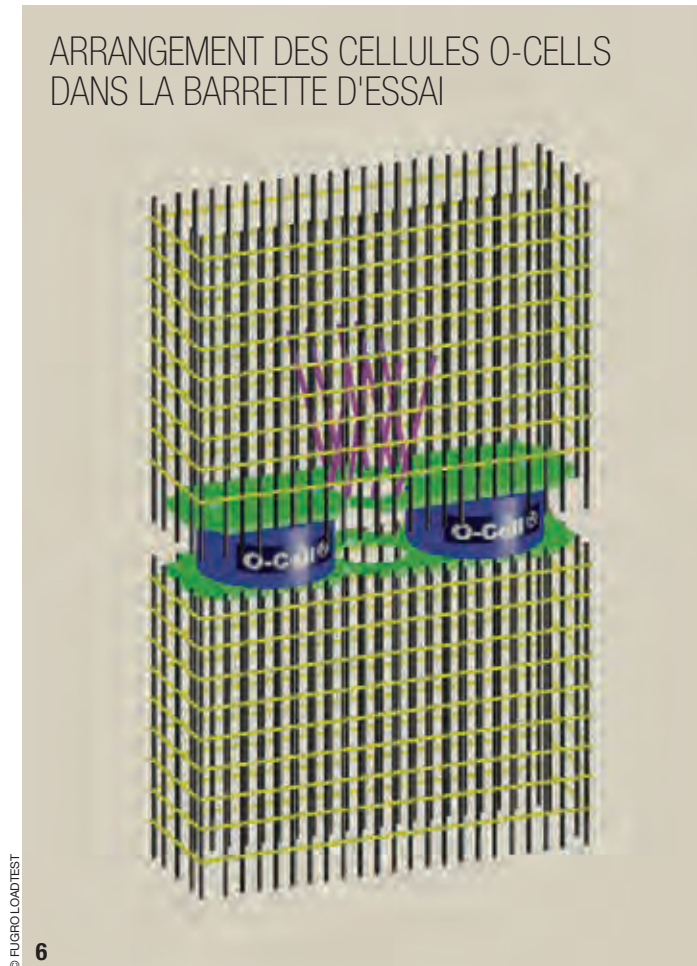
6- Arrangement des cellules O-Cells dans la barrette d'essai.

7- Tête de la barrette d'essai avec instrumentation en place.

6- O-Cells arrangement in the test barrette.

7- Head of the test barrette with instrumentation in place.

ARRANGEMENT DES CELLULES O-CELLS DANS LA BARRETTE D'ESSAI



© FUGRO LOADTEST

6

efforts - déplacements des jauges, et sont indispensables pour caractériser la pointe. La figure 4 illustre le principe de l'essai O-Cells.

L'utilisation de cette méthode, reconnue par la norme NF EN ISO 22477-1, s'est imposée au projet pour pouvoir caractériser les frottements dans les craies situées entre les cotes -21 m NGF et -22,7 m NGF, soit 58 m à 60 m sous le terrain naturel. L'avantage principal de ce dispositif O-Cells est l'application de la charge directement dans les couches d'intérêt et l'absence de massif de réaction, facteur souvent limitant de la charge maximale pour les essais conventionnels avec chargement en tête.

Le choix du calage altimétrique des cellules O-Cells est crucial pour obtenir la rupture recherchée dans l'horizon d'intérêt et ainsi remplir les objectifs de l'essai. Ce positionnement nécessite une très bonne appréciation des paramètres de sol ainsi que leur niveau de fiabilité. Ainsi, pour ce projet, les cellules O-Cells ont été positionnées à la cote -26,70 m NGF permettant d'estimer une résistance de frottement et de pointe combinée sous les cellules de 43,3 MN. Cette résistance représente la réaction disponible à l'essai.



© CEDRIC HELSLEY

7

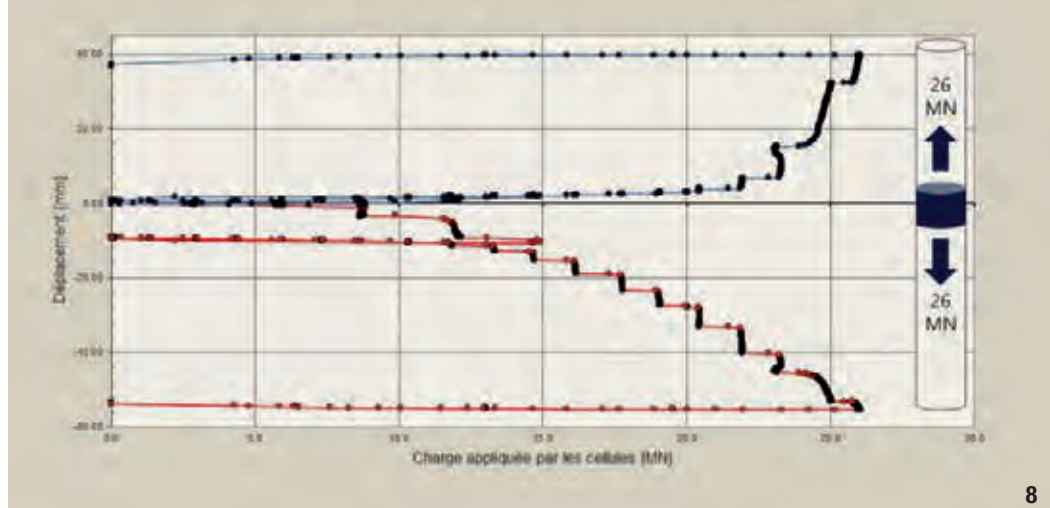
Il s'agit de vérifier que cette réaction disponible est supérieure à la résistance de la partie de sol à tester, située ici au-dessus des cellules. Plusieurs facteurs peuvent permettre d'obtenir cette vérification. Premièrement, due à l'incertitude sur les paramètres de sol issus des reconnaissances, une majoration des résistances de la partie à tester a été considérée pour la conception de l'essai. Ainsi, le frottement dans les craies situées au-dessus des cellules a été pris à 400 kPa. Deuxièmement, le concept de l'essai O-Cells ne nécessite pas un bétonnage de la barrette jusqu'à la surface. Il a ainsi été proposé d'arrêter ce bétonnage à la cote 3,5 m NGF, soit 33,7 m sous la plate-forme de travail. Cet arrêt précoce de bétonnage a pour effet de réduire la surface frottante et donc la résistance au-dessus des cellules, ainsi que le poids de la barrette, agissant contre l'effort appliqué. De plus, la cote haute de bétonnage de l'essai était bien en accord avec la conception des barrettes de l'ouvrage. Sur la base de la conception décrite ci-dessus, un système O-Cells placé à -26,7 m NGF et composé de deux cellules O-Cells de diamètre 690 mm a été sélectionné (figures 5 et 6). La figure 7 montre le dispositif de tête avec l'instrumentation en place.

DÉROULEMENT DE L'ESSAI : PRÉSENTATION DES RÉSULTATS FACTUELS

Le programme de chargement exécuté est composé de 18 paliers réguliers jusqu'à une charge maximale de 26,04 MN. À cette charge, l'ouverture des cellules était de 95,25 mm répartie entre 55,49 mm de déplacement sous les cellules et 39,76 mm de déplacement au-dessus des cellules. La figure 8 présente les courbes des déplacements enregistrés de part et d'autre du système O-Cells en fonction de la charge appliquée.

Des jauges de déformations, réparties tout au long de la barrette, ont permis d'évaluer l'effort repris depuis le point d'application de la charge jusqu'à la cote supérieure du béton. De même, à l'aide du module du béton et de la section de la fondation, il est possible de déterminer le déplacement au niveau des jauges et d'établir les courbes de mobilisation du frottement entre chaque niveau de jauges. La figure 9 présente un exemple de courbe de mobilisation du frottement en fonction du déplacement (ici entre le vérin et une des jauges positionnées au-dessus). Ce type de courbe est tracé

COURBE DÉPLACEMENTS VS CHARGE DE PART ET D'AUTRE DU SYSTÈME O-CELLS



8 © FLUGRO

pour différents tronçons de barrette entre différentes jauges de déformation, au-dessus et en dessous des vérins. L'évaluation de ces courbes et le calage avec des modèles de sol selon la méthode Frank & Zhao (Bull. liaison Labo. P. et Ch., 119, mai-juin 1982) nous ont permis d'évaluer les frottements limites de la craie, légèrement supérieurs à ceux proposés par la Norme NF P 94-262.

PRISE EN COMPTE DES RÉSULTATS DANS LE DIMENSIONNEMENT

Au marché, la profondeur des barrettes était donnée considérant qu'un essai pourrait être mené et que les limitations de la norme NF P 94-262, dans le cas de l'absence d'essai pourraient

8- Courbe déplacements vs charge de part et d'autre du système O-Cells.

9- Courbe Frottement - Déplacement.

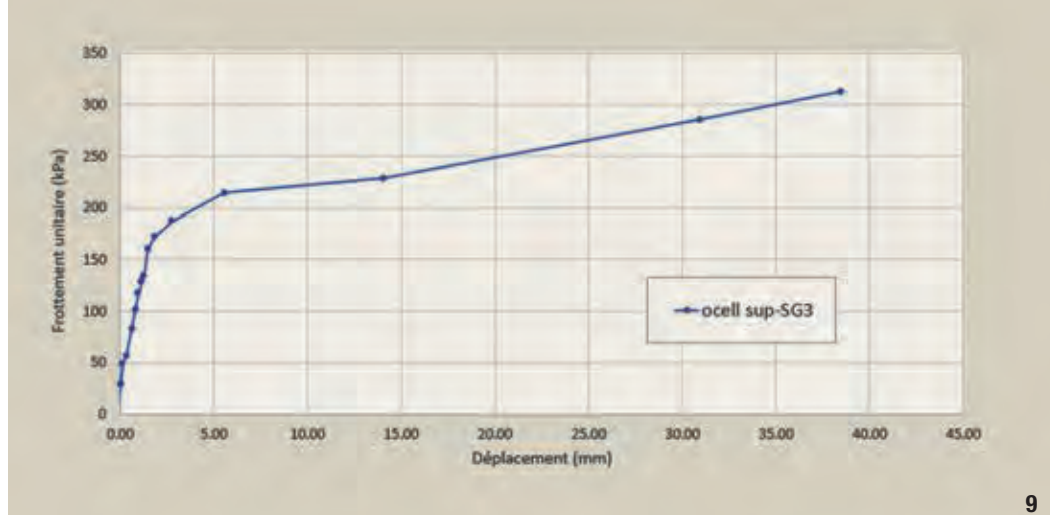
8- Displacement vs load curve on either side of the O-Cells system.

9- Friction-displacement curve.

être dépassées. Le bon déroulement de l'essai à l'aide du système O-Cells a permis de confirmer ces dispositions et même d'aller au-delà : les valeurs de frottement étant bonnes, il a été possible d'envisager la suppression des micropieux, en contrepartie de l'ajout de 12 barrettes.

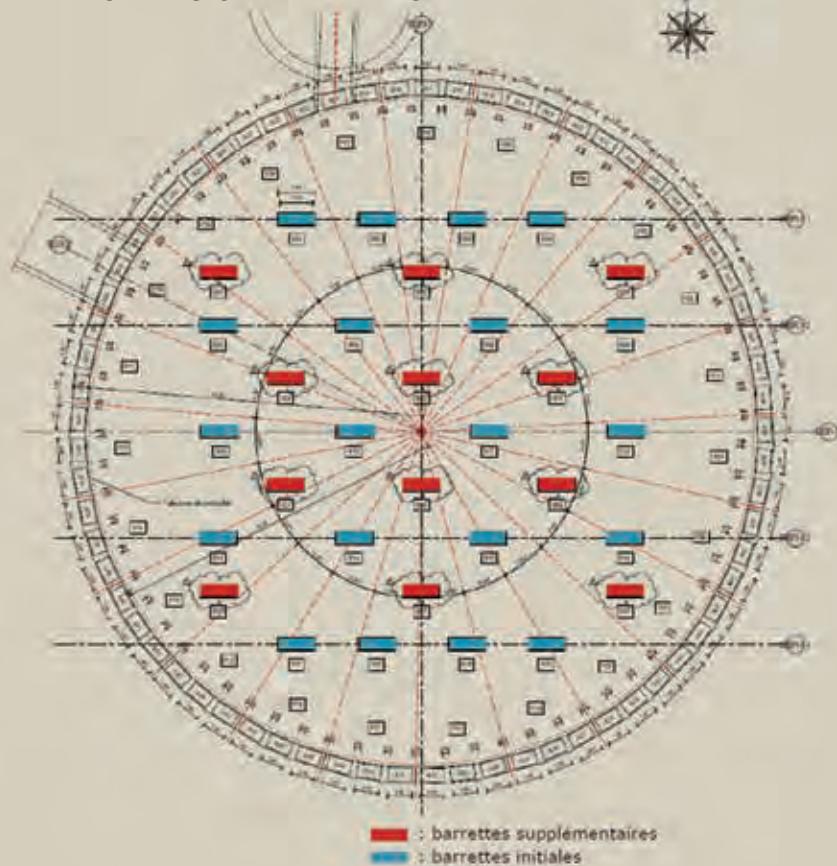
Ainsi, il a été finalement retenu de réaliser douze nouvelles barrettes, arasées sous le radier, afin de ne pas interférer avec la structure interne du bassin. Celles-ci sont rajoutées en fonction des sollicitations maximales dans le radier. Leur implantation s'inscrit de manière homogène parmi les 20 barrettes initiales du projet, avec notamment un renforcement du noyau central (figure 10). L'épaisseur du radier est légèrement épaissie à 1,50 m.

COURBE FROTTEMENT - DÉPLACEMENT



9 © FLUGRO

IMPLANTATION DES 32 BARRETTES



■ : barrettes supplémentaires
■ : barrettes initiales

10- Implantation
des 32 barrettes.

10- Layout of
the 32 barrettes.

CONCLUSIONS

Ce chantier offre un bon exemple d'optimisation d'ouvrage de fondations grâce à la réalisation d'essais géotechniques in situ. Pour la première fois en France, le système O-Cells a été mis en œuvre dans une barrette de fondation, afin de mener à bien un essai de chargement et de caractériser le frottement barrette/craie à une soixantaine de mètres de profondeur.

En outre, au-delà de l'optimisation des barrettes, le bon déroulement de l'essai a également permis de revoir le mode de fondation en supprimant les micropieux initialement prévus et en ne retenant qu'un système homogène de fondations composé de 32 barrettes travaillant en traction pour la reprise des sous-pressions de l'ouvrage. Le dimensionnement n'est plus conditionné par l'appréciation délicate des raideurs relatives entre barrettes et micropieux. L'homogénéisation du mode de fondations permet une meilleure appréciation des descentes de charges et des sollicitations dans le radier. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- Bassin de stockage de 46 000 m³
- 50 m de diamètre
- Fond de fouille à 34 m de profondeur
- 23 panneaux de paroi moulée à 62 m de profondeur
- 32 barrettes de 2,80 m x 1,00 m descendues à 81 m de profondeur
- Radier d'épaisseur 1,50 m
- 1 essai de chargement à 26 MN sur barrette (système O-Cells, Fugro sous-traitant)

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ville de Paris, Direction de la Propreté et de l'Eau
MAÎTRE D'ŒUVRE : Prolog Ingenierie (mandataire) et Artelia
ASSISTANT GÉOTECHNIQUE MAÎTRE D'ŒUVRE : Icaruss ingénieurs Conseils
MISSION DE SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXÉCUTION : Setec Terrasol
TITULAIRE DU MARCHÉ : Groupement Impluvium : Urbaine de Travaux (Mandataire), Sade, Bessac, Soletanche Bachy France et Sefi-Intrafor
CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Btp Consultants

ABSTRACT

PARIS XIII^e - AUSTERLITZ BASIN - LOADING TEST ON BARRETTE

TONY PEREIRA CORREIA, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MAXIME FONTY, SOLETANCHE BACHY FRANCE - SABIKA GHEGEDIBAN, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MICHEL MARON, SPÉCIALISTE DES ESSAIS DE PIEUX, FUGRO - BAO-ANH NGUYEN, SEFI INTRAFOR

To construct the Austerlitz storage basin, 50 metres in diameter, with a foundation raft located 34 metres below the natural ground, a network of very long foundations had to be put in place, in order to anchor the foundation raft subjected to strong water uplift forces. The Impluvium consortium in charge of the works collaborated with Fugro to conduct a loading test, of the O-Cells type, on a barrette 60 metres deep, to characterise friction with the anchoring ground. Based on this test, the stormwater basin foundation method was changed for a unique foundation method with optimised depths. This type of test, which is very widespread in other countries, was deployed in France for the first time on a barrette. □

PARÍS, DISTRITO XIII - ESTANQUE AUSTERLITZ - ENSAYO DE CARGA SOBRE PILOTE FLOTANTE

TONY PEREIRA CORREIA, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MAXIME FONTY, SOLETANCHE BACHY FRANCE - SABIKA GHEGEDIBAN, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MICHEL MARON, SPÉCIALISTE DES ESSAIS DE PIEUX, FUGRO - BAO-ANH NGUYEN, SEFI INTRAFOR

La realización del estanque de almacenamiento Austerlitz, de 50 m de diámetro, con una solera situada a 34 m bajo el terreno natural, precisa la instalación de una red de cimientos de grandes longitudes para anclar la solera, sujeta a fuertes subpresiones de agua. El consorcio Impluvium, responsable de las obras, en colaboración con Fugro, ha llevado a cabo una prueba de carga de tipo O-Cells sobre un pilote flotante de 60 m de profundidad, con objeto de caracterizar las fricciones con el terreno de anclaje. La prueba ha permitido revisar el modo de cimentación del estanque de tormentas en un modo de cimentación único con profundidades optimizadas. Este tipo de prueba, muy habitual en otros países, se ha realizado por primera vez en Francia sobre un pilote flotante. □



1

© SGP

GPE LIGNE 18 : FORME BILOBE POUR LE PUIS D'ENTRÉE - SORTIE DES TUNNELIERS

AUTEURS : OLIVIER HESSE, DIRECTEUR EXPLOITATION ADJOINT L18 LOT1, BOTTE FONDATIONS -
LAETITIA PAVEL, RESPONSABLE D'ÉQUIPE GÉOTECHNIQUE / TRAVAUX SOUTERRAINS / OUVRAGES D'ART, ARCADIS -
KARIM ZIDOUH, RESPONSABLE L18 LOT1 / SECTEUR EST (ORLY - TBM1), ARCADIS

LA LIGNE 18 DU GRAND PARIS EXPRESS RELIE LA GARE AÉROPORT-D'ORLY À LA GARE VERSAILLES-CHANTIERS. LE PUIS DE SERVICE MARÉCHAL-LECLERC À MASSY SERT DE PUIS DE LANCEMENT ET DE RÉCEPTION DE DEUX TUNNELIERS. SA CONCEPTION INITIALE A ÉTÉ MODIFIÉE POUR RETENIR UNE FORME "BILOBE" PRÉSENTANT L'AVANTAGE D'UN TERRASSEMENT SANS BUTONS FACILITANT AINSI LE MONTAGE ET DÉMONTAGE DES TUNNELIERS. SON DIMENSIONNEMENT A ÉTÉ RÉALISÉ AU MOYEN DE MODÉLISATIONS 2D, 3D ET LA RÉALISATION DES PANNEAUX EN Y, AUX DIMENSIONS HORS NORMES, A NÉCESSITÉ DES MOYENS SPÉCIFIQUES.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

La Ligne 18 (figure 2) s'étend sur une longueur d'environ 35 km de la gare Aéroport-d'Orly (gare non comprise) à la gare Versailles-Chantiers (gare incluse). Composé d'une section aérienne entourée de part et d'autre de deux sections en tunnel, ce tronçon traverse des territoires très contrastés,

notamment une zone aéroportuaire (Aéroport d'Orly), des secteurs densément urbanisés, des territoires en développement, des espaces naturels protégés, une zone en proximité des installations du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, un site militaire (plateau de Satory) et les périmètres de monuments historiques (Versailles).

1- Vue générale du puits bilobe.

1- General view of the bilobed shaft.

L'ouvrage du Puits Maréchal-Leclerc ou ouvrage annexe OA8 se situe en bordure Est de la commune de Massy, entre les gares souterraines Antony-pole (ANT) et Massy-Opéra (MAO). Cet ouvrage est positionné dans les emprises du centre Agro Paris Tech et du laboratoire des Douanes, situé le long de l'Avenue du Maréchal-Leclerc (RN20).

SYNOPTIQUE DE LA LIGNE 18 DU GRAND PARIS EXPRESS



© SGP 2

Cet ouvrage remplit plusieurs fonctionnalités en phase service : il assure la fonction d'épuisement et de relevage des eaux d'exhaure en provenance du tunnel mais également de l'ouvrage lui-même, il constitue un point d'accès pour les services de secours, un point d'extraction des fumées en cas d'incendie dans le tunnel et il assure donc le désenfumage du tunnel en phase d'exploitation. En phase travaux, l'ouvrage Maréchal-Leclerc sert de puits de lancement et de réception des deux tunneliers.

Ces différentes fonctionnalités ont conduit, en phase conception, à conditionner son dimensionnement et sa "forme de serrure" (figure 3) avec une partie circulaire de 23 m de diamètre et une partie rectangulaire de 40 m de longueur et 13,4 m de largeur utile, qui

2- Synoptique de la Ligne 18 du Grand Paris Express.

3- Ouvrage annexe 08 en forme de serrure.

4- Ouvrage annexe 08 en forme de bilobe.

2- Block diagram of Line 18 of the Grand Paris Express.

3- Lock-shaped accessory structure 08.

4- Bilobed-shaped accessory structure 08.

accueillera la logistique associée au chantier de creusement du tunnelier. La volonté forte de la SGP d'encourager l'émergence d'optimisations et d'innovations lors de la phase des consultations a conduit le groupement Vinci-Spie à proposer une variante dès l'offre avec une forme dite "bilobe" (figure 4) et à la contractualiser lors de la mise au point du marché de travaux.

INTÉRÊT DE LA SOLUTION VARIANTE

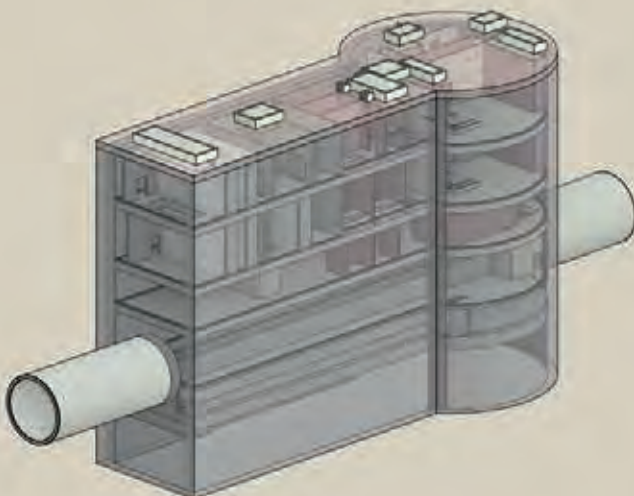
Le bilobe (figure 1) est constitué de deux cercles sécants de 27,60 m de diamètre et d'environ 36,5 m de profondeur. Il permet de dégager une longueur entre les deux tympans d'environ 50 m. La surface intérieure de l'ouvrage s'en trouve augmentée, 1 170 m² pour 930 m² en solution de base.

La forme du bilobe lui confère une stabilité lors des terrassements assurée par la paroi centrale "refend". Les deux lobes sont donc complètement libres sans butons, ce qui permet de sécuriser les délais et facilite le montage et le démontage des tunneliers sans être entravé par la présence de butons.

ÉTUDES D'EXÉCUTION - CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'OUVRAGE GÉOTECHNIQUE

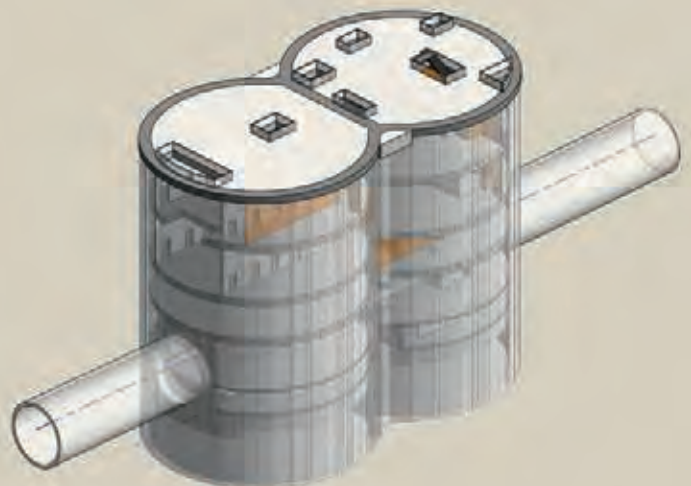
Les formations rencontrées sont celles du plateau d'Orly : les Limons de Plateaux (LP), les Sables de Fontainebleau (SF), les Marnes à Huîtres (MH), les Traveritins de Brie (TB), les Argiles Vertes (GV), les Marnes de Pantin (MSGP), les Marnes d'Argenteuil (MSGA) et les Masses et Marnes du Gypse (MFL). ▷

OUVRAGE ANNEXE 08 EN FORME DE SERRURE



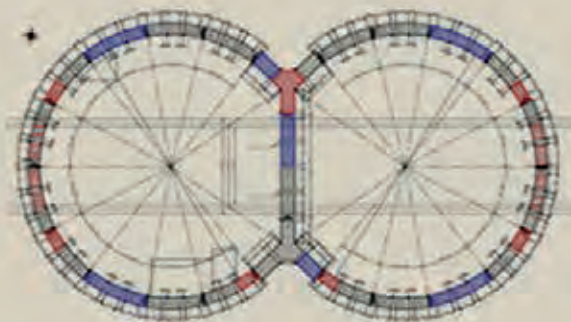
3 © ARCADIS

OUVRAGE ANNEXE 08 EN FORME DE BILOBE



4 © VINCI

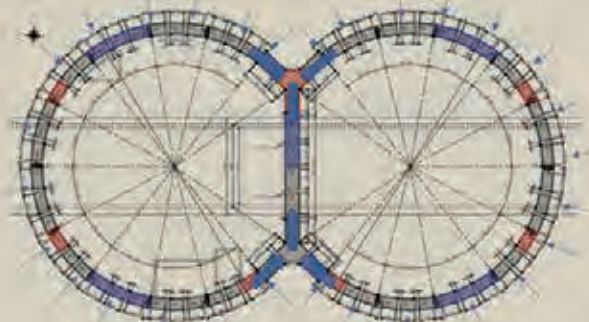
PLAN DE PANNEAUTAGE



5

© VINCI

COMPORTEMENT STRUCTUREL DE L'OUVRAGE BILOBE



6

© VINCI

- 5- Plan de panneautage.
- 6- Comportement structurel de l'ouvrage bilobe.
- 7- Modèle de calcul 3D, forme serrure.
- 8- Modèle de calcul 3D, forme bilobe.

- 5- Panelling layout.
- 6- Structural behaviour of the bilobed structure.
- 7- 3D calculation model, lock shape.
- 8- 3D calculation model, bilobed shape.

Les horizons des Argiles Vertes et des MSGA constituent des couches peu perméables qui délimitent les nappes de surface et des Marnes de Pantin. Les pressions hydrostatiques restent relativement faibles, au maximum de l'ordre de 140 kPa.

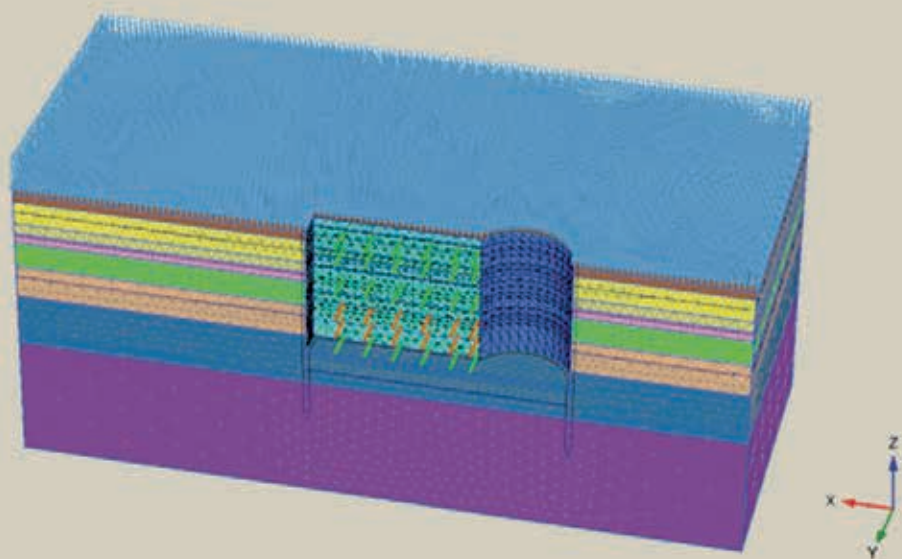
GÉOMÉTRIE

L'ouvrage est constitué par des parois moulées de 44 m de hauteur, de 1,22 m d'épaisseur pour les parties circulaires et 1,52 m pour les panneaux en forme de "Y" et le refend (figure 5). Le diamètre intérieur des lobes est de 27,6 m. La hauteur excavée atteint 36,5 m.

Les parois moulées périphériques ont une fiche ancrée dans la partie supérieure des MFL.

Le radier général, réalisé en béton armé et muni d'une étanchéité DEG extradossée, comprend des fosses pour le

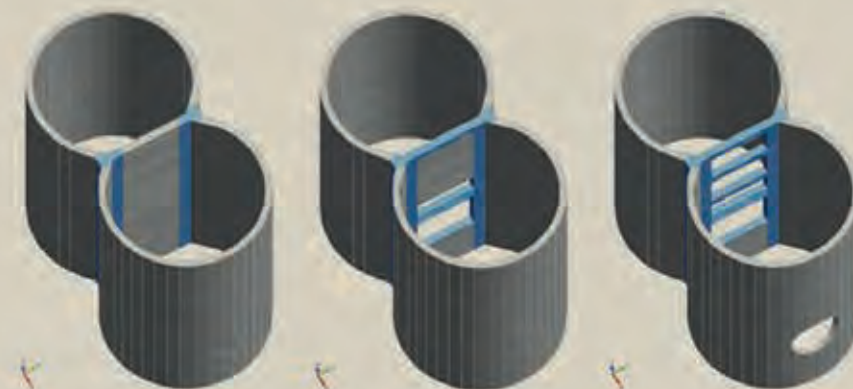
MODÈLE DE CALCUL 3D, FORME SERRURE



7

© ARCADIS

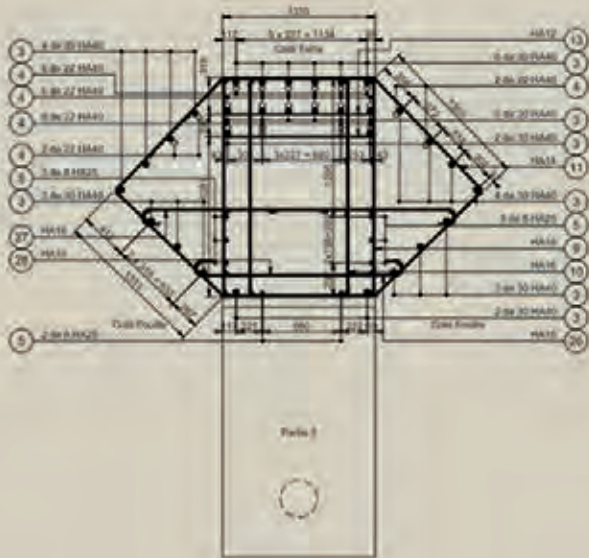
MODÈLE DE CALCUL 3D, FORME BILOBE



8

© VINCI

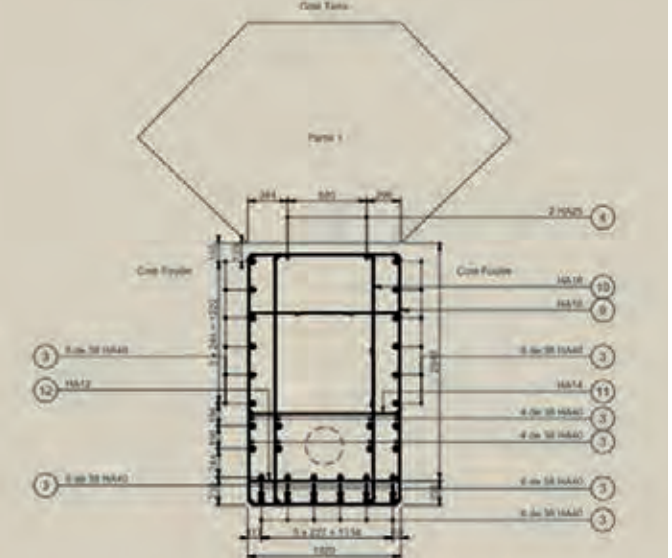
FERRAILLAGE PANNEAU Y, PARTIE 1



9

© VINCI

FERRAILLAGE PANNEAU Y, PARTIE 2



10

© VINCI

démarrage et la réception du tunnelier. Le reste du génie civil est constitué de :

- Un béton de rechargement sur le radier ;
- Une dalle de couverture avec mise en œuvre d'une étanchéité ;
- Quatre niveaux de planchers intermédiaires comprenant des quais logistiques dans la partie droite de l'ouvrage.

SURCHARGES EN SURFACE

Le puits Maréchal-Leclerc étant un puits de départ du tunnelier TBM1, des surcharges adaptées en surface

- 9- Ferrailage panneau Y, partie 1.
- 10- Ferrailage panneau Y, partie 2.
- 11- Ferrailage panneau Y, disposition des manchons.

- 9- Y-panel reinforcement, part 1.
- 10- Y-panel reinforcement, part 2.
- 11- Y-panel reinforcement, sleeve layout.

ont été considérées. Elles atteignent 50 kPa autour de l'ouvrage (surcharges surfaciques) et 3 MN par appui pour les grues mobiles. Une grue à tour est également présente au droit d'un des panneaux en Y.

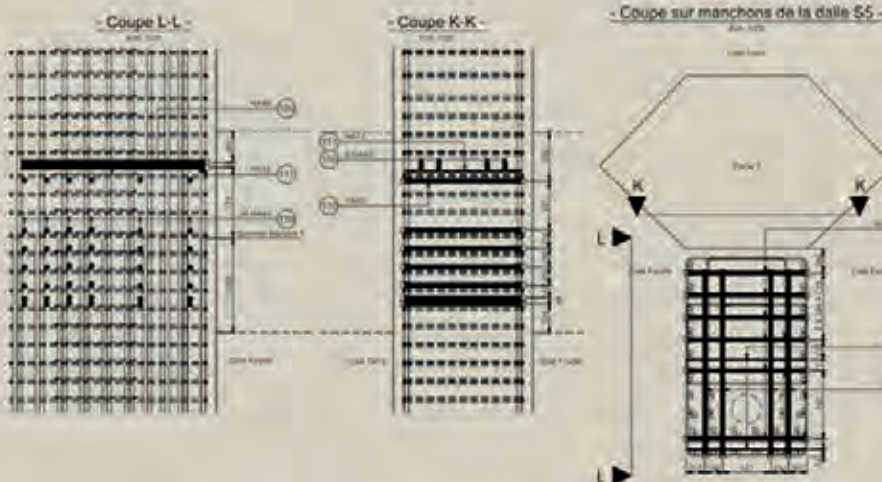
PHASAGE

Un phasage adapté pour la conception de l'ouvrage, pour le lancement du TBM1 et la réception du TBM2 a été défini comme suit :

- Réalisation des parois moulées (lobes, Y et refend), excavation en partie supérieure, recépage de la

- paroi et réalisation de la poutre de couronnement ;
- Terrassement symétrique des lobes jusqu'en sous-face du niveau N-3, soit à 24 m de profondeur ;
- Démolition du refend sur 5 m de hauteur et réalisation de la poutre butonnante S3 ;
- Terrassement symétrique des lobes jusqu'au fond de fouille, soit à 36,5 m de profondeur ;
- Réalisation du radier démolition du refend jusqu'au niveau de la poutre S3 ;
- Travaux associés au TBM1 ;
- Coulage de la dalle S3 lobe Est puis démolition du refend pour réalisation S2 ;
- Coulage de la dalle S2 lobe Est et de la poutre centrale puis démolition du refend pour réalisation de la dalle S1 ;
- Coulage de la dalle S1 lobe Est et de la poutre centrale puis démolition du refend jusqu'à la poutre de couronnement ;
- Coulage de la dalle de couverture lobe Est ;
- Travaux associés au TBM2 ;
- Réalisation du GC du lobe Ouest.

FERRAILLAGE PANNEAU Y, DISPOSITION DES MANCHONS



11

© VINCI

DÉMARCHE DES ÉTUDES

Fonctionnement structural

La forme bilobique de l'ouvrage est une forme favorable permettant la reprise des sollicitations en compression grâce à la rigidité cylindrique de chacun des lobes. Les contraintes sont ensuite transmises aux panneaux en Y et au refend (figure 6).

PANNEAU REFEND ET PANNEAU Y

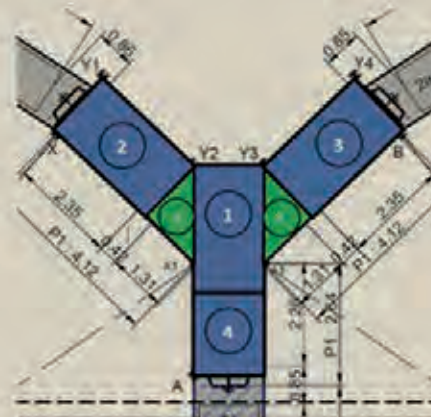


Extrait du plan de pannevage 000031_4-D

12

© VINCI

PHASAGE DU TERRASSEMENT DU PANNEAU Y



13

© VINCI

Le comportement structurel de l'ouvrage est essentiellement caractérisé par la compression du béton et dans une moindre mesure par la flexion des parois.

Modélisation 3D

Du fait de la forme complexe de l'ouvrage "en serrure", une modélisation 3D aux éléments finis avait été réalisée en phase conception (figure 7). La nouvelle géométrie a également imposé l'étude du comportement de l'ouvrage bilobe au moyen d'un modèle aux éléments finis structurel 3D.

Quatre phases de calcul ont été étudiées spécifiquement pour définir les réductions localisées de rigidité cylindrique (figure 8), à savoir à proximité du Y lors des phases de démolition du refend et autour de la zone d'ouverture au droit des tympans. Une comparaison des moments a été menée pour déterminer ces valeurs sur la hauteur des parois.

Dimensionnement

Le dimensionnement des parois moulées a été réalisé au moyen du logiciel de calcul aux coefficients de réaction Rido. Le ferrailage longitudinal des parois moulées courantes atteint 45 cm²/m environ et 115 cm²/m environ à proximité du panneau en Y. De façon complémentaire, le modèle de calcul 3D a permis de mettre en évidence les zones en traction autour de l'ouverture et de définir finement le ferrailage nécessaire.

Le dimensionnement du panneau en Y a également été réalisé au moyen du logiciel Rido. Les efforts issus du modèle 3D pour chaque phase de calcul ont été exploités et ont servi de donnée d'entrée.

La stabilité de l'ouvrage est assurée par le refend et ensuite par le radier et par les poutres butonnantes qui font partie intégrante des dalles en phase définitive. Ces structures sont liaisonnées aux panneaux en Y au moyen de connecteurs (manchons HA32 et HA40 - figure 11).

Le ferrailage du panneau en Y (figures 9, 10 et 11) a été rendu complexe du fait de la forme des cages d'armatures le constituant. Des cages rectangulaires ont constitué les ailes du Y. La cage principale était constituée de deux parties, la première en forme de losange et la seconde de forme rectangulaire. Des aciers de liaisonnement

12- Panneau refend et panneau Y.

13- Phasage du terrassement du panneau Y.

14- Vue générale du site de l'OA8.

12- Cross-wall panel and Y panel.

13- Earthworks sequencing for the Y panel.

14- General site view of OA8.

ont été mis en œuvre à la descente des éléments. Il convient de préciser que, du fait de la géométrie de la cage, des aciers longitudinaux et des cadres ont été ajoutés pour garantir sa bonne mise en œuvre.

La poutre de couronnement a été dimensionnée pour liaisonner les panneaux de parois moulées entre eux, notamment les panneaux circulaires aux panneaux en Y et au refend. Elle a eu pour rôle de reprendre en partie les sollicitations verticales des panneaux au droit des tympans et du refend, ainsi que de reprendre les flexions horizontales induites par les dissymétries de chargement en surface (présence



14

© SGP

de grues, zone de stockage des voussoirs, ...).

Contraintes dans le refend

Le bureau d'études du groupement Vinci-Spie et le service méthodes ont décidé de réaliser le refend en un unique panneau de 10,7 m de longueur.

Les contraintes dans le refend dépassant les valeurs admissibles de compression du béton, il a été nécessaire d'adapter le phasage initial qui prévoyait de démolir la partie basse du refend jusqu'à la sous-face du radier lors de la phase de terrassement.

Les nouvelles dispositions de phasage ont permis de garantir un niveau de compression admissible dans le refend qui constitue le butonnage principal de l'ouvrage dans la fouille.

Une sur-poutre butonnante a également été prévue au-dessus du radier au droit du refend pour reprendre les sollicitations supplémentaires dues aux phases à long terme notamment liées au gonflement des argiles. Elle sera réalisée après creusement des tunnels et sera incluse dans l'épaisseur du béton de rechargement.

TRAVAUX ET PARTICULARITÉ DU REFEND ET DES PANNEAUX EN Y

Compte tenu de la géologie rencontrée, les parois moulées sont forées sous boue à la benne dans les Limons de Plateaux (LP), les Travertins de Brie (TB), les Argiles Vertes (GV), les Marnes de Pantin (MSGP), les Marnes d'Argenteuil (MSGA) et les Masses et Marnes du Gypse (MFL). Vu que la paroi s'ancre de seulement 5 m dans les Masses et Marnes du Gypse et vu l'absence de blocs, l'utilisation du cutter n'était pas adaptée en raison de terrain majoritairement argileux.

Les travaux ont eu lieu entre le 15/12/2020 et 12/03/2021 à deux ateliers de paroi (benne) en deux postes.

Les figures 12 et 13 détaillent l'enchaînement des tâches associées à la réalisation du refend et des deux panneaux de paroi moulée en Y :

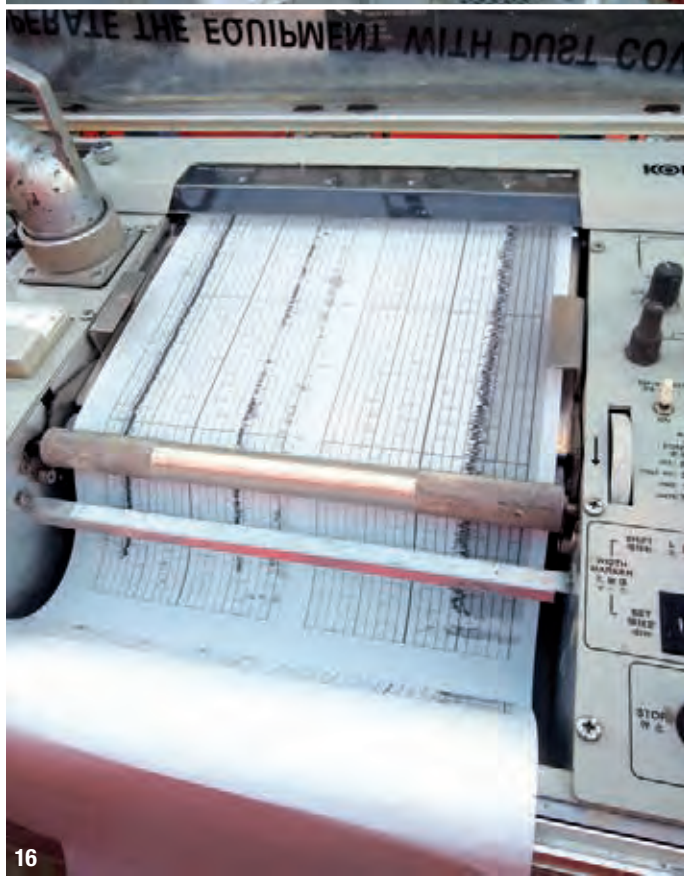
La longueur globale d'un panneau Y est de 11,69 m (axe) et la profondeur est de 42,90 m soit une surface de 502 m². La cadence de forage moyenne est de l'ordre de 5 m²/h en deux postes ce qui représente une durée de 6 jours pour le forage du panneau.

L'équipement des aciers des panneaux Y était également très important avec 90 t d'acier en 16 éléments liaisonnés

© ARCADIS



15



16

© ARCADIS

15- Appareil Koden pour mesure de la déviation lors du forage des panneaux.

16- Sortie graphique des enregistrements Koden.

15- Koden device for measuring deviation during panel drilling.

16- Koden device recording graphs.

avec plus de 700 barres horizontales et 680 manchons HA40 et HA32 en attente pour la reprise des efforts au niveau de la structure interne.

Le bétonnage des panneaux Y pour un volume de béton de 838 m³ a duré presque 10 heures avec l'utilisation de trois colonnes de bétonnage et de deux centrales à béton dédiées pour le chantier, ce qui a permis d'assurer la cadence de bétonnage de 90 m³/h. Pour maîtriser la réalisation de ces panneaux de paroi moulée hors norme, avec des durées de réalisation de près de deux semaines par panneau, plusieurs procédés spécifiques ont été développés et mis en œuvre (figure 14).

FORAGE DES Y

Pour le bon fonctionnement de l'ouvrage qui travaille en arc boutant, le respect de la tolérance de déviation de forage à la benne à câble inférieure à 0,5 cm/m est très important. Il a été décidé de renforcer le système de mesure de déviation traditionnel intégré dans la benne à câble (inclinomètre + gyroscope) par une mesure de déviation à lecture directe avant coulage en utilisant un koden (figures 15 et 16). Ce système, adapté des sonars maritimes, permet une mesure directe de la déviation avec une précision qui ne dépend plus de la profondeur du forage contrairement au système traditionnel (sonar horizontal suspendu à un treuil électrique).

Par ailleurs, ont été développés également des outils pour redresser les passes après exécution, avec un système de rabot à sol hydractif. Cette outil utilise la force de réaction de la boue pour être plaqué sur le parement à rectifier.

L'utilisation de la benne à câble a également permis le tri des différents types de sol en fonction des exutoires autorisés (4 classes d'exutoires pour ce site : ISDI, ISDI+, TN+, comblement carrière).

GESTION DES BOUES BENTONITIQUES

Du fait de la présence de gypse dans les terrains excavés, sur la base du retour d'expérience des chantiers dans ce type de terrain, une boue de forage résistante au gypse a été développée. Au vu des temps d'équipement et de bétonnage très importants, le groupement a opté pour une substitution complète de la boue avant bétonnage pour éviter tout risque de dépôt de sédiment avant bétonnage. Cette mesure a conduit à avoir des stocks de boue très importants, avec une capacité de stockage de 2300 m³.

À l'échelle du lot, le groupement a installé une zone de stockage de 1600 m³ pour le transit et le traitement des boues bentonitiques avec une unité de floculation/centrifugation permettant le réemploi de la boue sur les 17 sites du chantier, le "hub à bentonite". Ce hub a permis d'éviter le rejet en décharge de plus de 20000 m³ de boue.

ÉQUIPEMENT ET BÉTONNAGE

L'équipement des cages a nécessité l'utilisation d'une grue à chenilles de 250 t avec une flèche de 64 m, ce qui permet de relever les équipements en une seule fois (figure 17). ▷

17- Mise en place de la cage d'armatures du panneau Y.

17- Installing the Y-panel rebar cage.

Les 700 aciers de liaison nécessaires pour faire fonctionner comme une seule entité les différentes cages du Y ont été ligaturés avec des pinces de ferrailage automatiques pour optimiser le temps d'équipement.

Pour garantir la bonne mise en place du béton sur des panneaux de grande profondeur dans des terrains argileux, l'espace théorique entre les cages et le terrain a été augmenté (100 mm au lieu de 75 mm dans la norme), mais en gardant des cales à béton d'origine (75 mm). Cette mesure permet de limiter le risque de poche de boue sous les cales à béton et des défauts de mise en place du béton (gonflement des argiles, déviation, etc.).

Enfin, la rhéologie du béton a été étudiée spécifiquement pour ces panneaux avec un maintien de l'étalement à la table à choc à 600 mm +/- 50 pendant 8 heures.



17

© ARCADIS

PHASAGE TERRASSEMENT

La paroi moulée centrale (refend) a été déconstruite au fur et à mesure de son remplacement par des ouvrages de génie civil :

- Réalisation d'une poutre butonnante en tête ;
- Réalisation d'une poutre butonnante à mi-travée ;
- Fin de démolition des 5 derniers mètres de paroi moulée après réalisation du radier des deux lobes. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

VOLUME BÉTON :
9 680 m³
QUANTITÉ D'ACIER :
755 t
VOLUME DÉBLAIS :
41 200 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris
MAÎTRE D'ŒUVRE : le groupement Icare composé de Ingérop (mandataire), Artélia, Arcadis
GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Vinci Construction Grands Projet / Spie Batignolles Génie Civil / Dodin Campenon Bernard / Vinci Construction France / Spie Batignolles Fondations / Botte Fondations / Vinci Terrassement / Valérian - Spie Batignolles

ABSTRACT

GPE LINE 18: BILOBED SHAPE FOR THE TBM ENTRY AND EXIT SHAFT

OLIMIER HESSE, BOTTE FONDATIONS - LAETITIA PAVEL, ARCADIS - KARIM ZIDOUH, ARCADIS

Line 18 of the 'Grand Paris Express' metro project links Aéroport-d'Orly Station to Versailles-Chantiers Station. The Puits Maréchal-Leclerc service structure in Massy, in addition to its functions in the service phase, serves as a shaft for launching and receiving the two tunnel boring machines. Its initial design was altered to adopt a bilobed shape which has the advantage of allowing earthworks without struts in the midst of the lobes, thereby facilitating TBM assembly and disassembly. Its sizing was performed by means of 2D and 3D modelling in order to approximate its complex structural behaviour and optimise the structures. Specific facilities had to be set up to ensure satisfactory execution of the Y panels, of exceptional dimensions. □

GPE LÍNEA 18: FORMA BILÓBULA PARA EL POZO DE ENTRADA Y SALIDA DE LAS TUNELADORAS

OLIMIER HESSE, BOTTE FONDATIONS - LAETITIA PAVEL, ARCADIS - KARIM ZIDOUH, ARCADIS

La Línea 18 del Grand Paris Express pone en comunicación la estación de Aéroport-d'Orly con la de Versailles-Chantiers. La construcción de servicio Pozo Maréchal-Leclerc, en Massy, además de sus funciones en fase de servicio, sirve de pozo de lanzamiento y recepción de las dos tuneladoras. Su diseño inicial ha sido modificado hasta obtener una forma bilóbula, que permite un movimiento de tierras sin butones en medio de los lóbulos, lo que facilita el montaje y el desmontaje de las tuneladoras. Su dimensionamiento se ha llevado a cabo mediante modelizaciones en 2D y 3D para simular su complejo comportamiento estructural y optimizar las estructuras. La construcción de los paneles en Y, de dimensiones excepcionales, ha requerido el uso de medios específicos para garantizar su correcta realización. □



BTP BANQUE

GRUPE CREDIT COOPERATIF

C'est le métier
qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

www.btp-banque.fr

is autorisé et des Banques Publiques - Société anonyme à responsabilité limitée de droit français à capital de 20 milliards de francs - 15/17 Avenue de la République - 92000 Nanterre - France - RCS Nanterre 338 338 338



1

© SETEC

EXCAVATION AU TUNNELIER SOUS LES CARRIÈRES SOUTERRAINES DU CALCAIRE GROSSIER DE PARIS RETOUR D'EXPÉRIENCE DE LA LIGNE 14 SUD

AUTEURS : MARIE COBLARD, RESPONSABLE SUIVI DE TRAVAUX TUNNEL & CARRIÈRES, SETEC TPI - SILVIA DELATTRE LEVIS LEYSER, INGÉNIEUR GÉOTECHNIQUE, SETEC TERRASOL - ANNE BERGERE, L14S RESPONSABLE GÉOTECHNIQUE ELIOS, SETEC TERRASOL - LAURE NGUYEN THE DUNG, L14S RESPONSABLE GÉOTECHNIQUE, DODIN CAMPENON BERNARD

DANS LE CADRE DES TRAVAUX DE PROLONGEMENT AU SUD DE LA LIGNE 14 DU MÉTRO PARISIEN, LE CREUSEMENT DU TUNNEL EST EN PARTIE RÉALISÉ SOUS LES ANCIENNES EXPLOITATIONS SOUTERRAINES DU CALCAIRE GROSSIER AVEC UN TUNNELIER À PRESSION DE TERRE. CE CREUSEMENT S'EST DÉROULÉ DANS UN CONTEXTE GÉOTECHNIQUE COMPLEXE ET URBAIN DENSE. L'AUSCULTATION PRÉCISE ET ADAPTÉE A PERMIS DE TIRER DES ENSEIGNEMENTS PRÉCIEUX SUR LE PILOTAGE DU TUNNELIER, LE COMBLEMENT DES CARRIÈRES, L'IMPORTANCE DES RECONNAISSANCES DU CALCAIRE ET L'ÉVOLUTION DES DÉFORMATIONS DES TERRAINS VERS LA SURFACE

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET : PROLONGEMENT SUD DE LA LIGNE 14, LOT GC02 LE MARCHÉ DE TRAVAUX L14-GC02

Une présentation générale du projet de prolongement de la Ligne 14 Sud a fait l'objet d'un article dans la revue *Travaux* n°947, datée de décembre 2018.

Le prolongement Sud de la Ligne 14 relie Paris depuis la gare existante Olympiades à l'aéroport d'Orly par un tunnel de 12,5 km et 7 nouvelles gares. Le lot GC02 concerne 1/3 du linéaire du tracé du tunnel, avec :

- 4,8 km de tunnel réalisés par excavation au tunnelier ;
- 1 gare : Kremlin-Bicêtre-Hôpital (KBH) ;

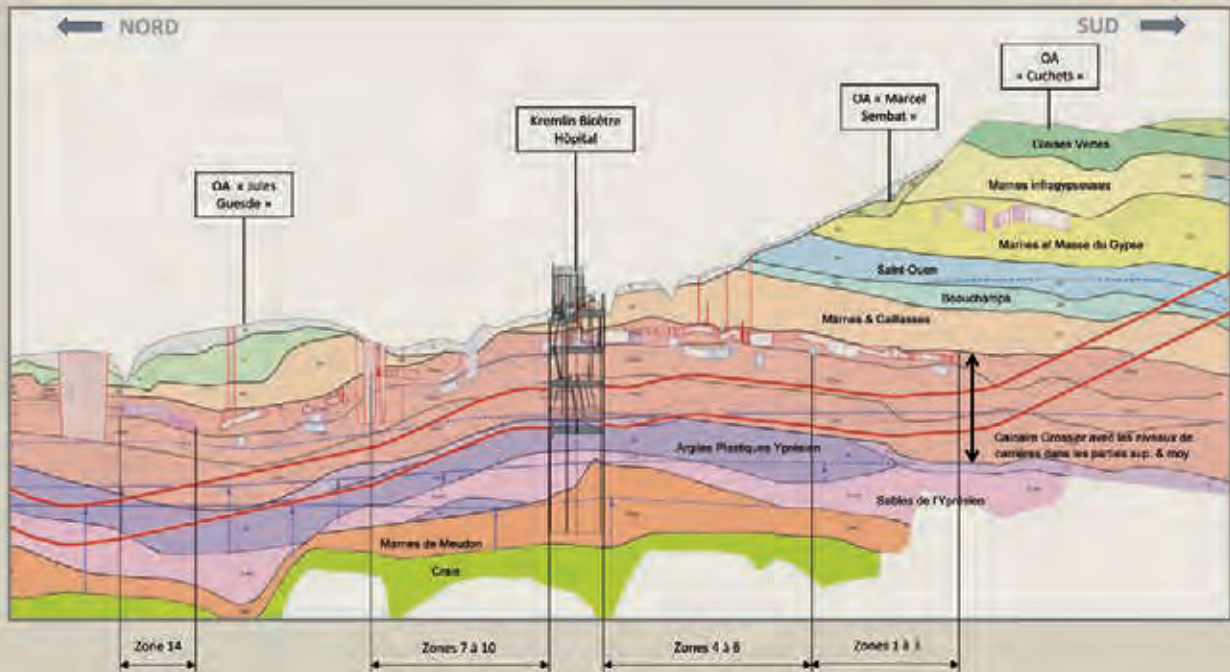
1- Photographies des carrières avant comblement.

1- Photos of the quarries before filling.

→ 5 ouvrages annexes : puits de ventilation, locaux techniques et accès pompier.

Le tunnel se termine dans la gare Maison-Blanche-ParisXIII (MBP) incluse dans le projet de prolongement de la Ligne 14 Sud mais faisant l'objet d'un marché séparé (GC01). Le tracé traverse également la gare de Villejuif-Institut-Gustave-Roussy (IGR) sous

PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE DU TRACÉ DU LOT GC02 DE LA LIGNE 14 SUD



© SETEC
2

maîtrise d'ouvrage Société du Grand Paris et incluse dans le marché L15-T3c.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Le tunnel GC02 s'inscrit dans l'ensemble géologique régional du bassin parisien et plus particulièrement dans la plaine alluviale de la Bièvre et le versant

entre le Kremlin-Bicêtre et Villejuif pour le secteur concerné par le passage sous les carrières (figure 2).

Les terrains rencontrés sont composés de formations sédimentaires disparates dans leur nature, réparties en couches relativement horizontales : Marnes et Caillasses, Calcaires Grossiers et Argiles Plastiques.

Les carrières souterraines se situent dans la partie supérieure du Calcaire Grossier et ont été exploitées selon la méthode des hagues et bourrages sur 3 étages qui se retrouvent parfois superposés.

Ces exploitations ont été en partie remblayées à l'époque de l'abandon des exploitations, des zones sont laissées

libres et restent visitables de nos jours. L'état des carrières est répertorié sur des cartes et surveillé lors de visites régulières par l'Inspection Générale des Carrières (IGC), ce qui a permis en phase de conception de reconnaître l'état des carrières et de définir des traitements préalables à l'excavation du tunnel et des ouvrages (figure 1). ▷

2- Profil en long géologique du tracé du lot GC02 de la Ligne 14 Sud.

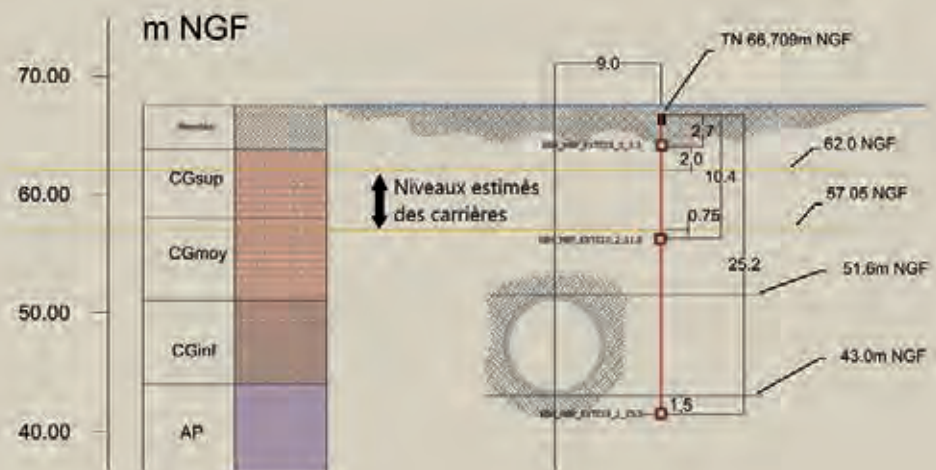
3- Schéma de principe d'équipement d'un extensomètre en forage dans une zone de carrière - exemple du C19.

2- Longitudinal geological profile of the alignment of work section GC02 of Line 14 South.

3- Block diagram of equipment of an extensometer for drilling in a quarry area - example of C19.

SCHÉMA DE PRINCIPE D'ÉQUIPEMENT D'UN EXTENSOMÈTRE EN FORAGE DANS UNE ZONE DE CARRIÈRE –

Exemple du C19



© SISENSE
3

LE PASSAGE SOUS LES CARRIÈRES SOUTERRAINES DU CALCAIRE GROSSIER

Le tunnel s'inscrit sous les anciennes carrières sur un linéaire de l'ordre de 1,6 km.

Elles sont à une profondeur variant de 40 m (au sud, au niveau du versant de la butte de Villejuif) à 15 m de profondeur (au niveau de la gare KBH) par rapport à la surface et toujours au-dessus de la nappe phréatique. Le tunnel s'inscrit majoritairement dans les niveaux inférieurs du Calcaire Grossier avec deux critères principaux issus des modélisations numériques réalisées lors de la conception :

- Maintenir une couverture minimale de 3 m sous le plancher du niveau inférieur des carrières ;
- Avoir autant que possible un front d'excavation plein dans le Calcaire Grossier et éviter les fronts même partiels, dans les Argiles Plastiques de l'Yprésien.

Les études de conception ont conclu sur la nécessité de comblement des niveaux de carrières sur une bande de 20 à 30 m de largeur axée sur le tracé du tunnel au préalable de l'excavation afin de limiter les risques de remontée de désordre en surface par déstabilisation des carrières.

La largeur de comblement a été dimensionnée selon des critères en déformation maximale sur le niveau des carrières :

- Comblement systématique à minima d'une largeur de 20 m axée sur le tunnel ;
- Comblement dès que le tassement calculé par modélisation est supérieur à 10 mm en absolu ou 0,7 mm/m en différentiel au niveau du plancher de carrières.

Ces travaux de comblement des carrières font l'objet d'un article dans la revue Espaces Souterrains publiée par l'Aftes lors du dernier congrès (automne 2021). Ils se sont déroulés entre mi-2019 et mi-2020.

La bande de 20 à 30 m de largeur à combler le long du tracé a été découpée en 14 zones de comblement afin de limiter les nuisances aux riverains.

DÉFINITION DE L'AUSCULTATION MISE EN PLACE POUR LE SUIVI DES DÉFORMATIONS DES CARRIÈRES SOUTERRAINES LORS DU PASSAGE DU TBM

Le contexte géotechnique de la L14S est difficile à appréhender par modélisation numérique du fait de sa variété

de formations géologiques et de la présence des carrières.

Le programme d'auscultation a été défini et adapté au contexte géotechnique et urbain du tracé.

AUSCULTATION MISE EN PLACE POUR LA SURVEILLANCE DU CREUSEMENT DU TUNNEL

Tout le long du tracé, une auscultation a été mise en place sur les avoisinants, en surface et en profondeur.

4- Cuvettes de tassement dans la zone 3.

5- Cuvettes de tassement dans la zone 5.

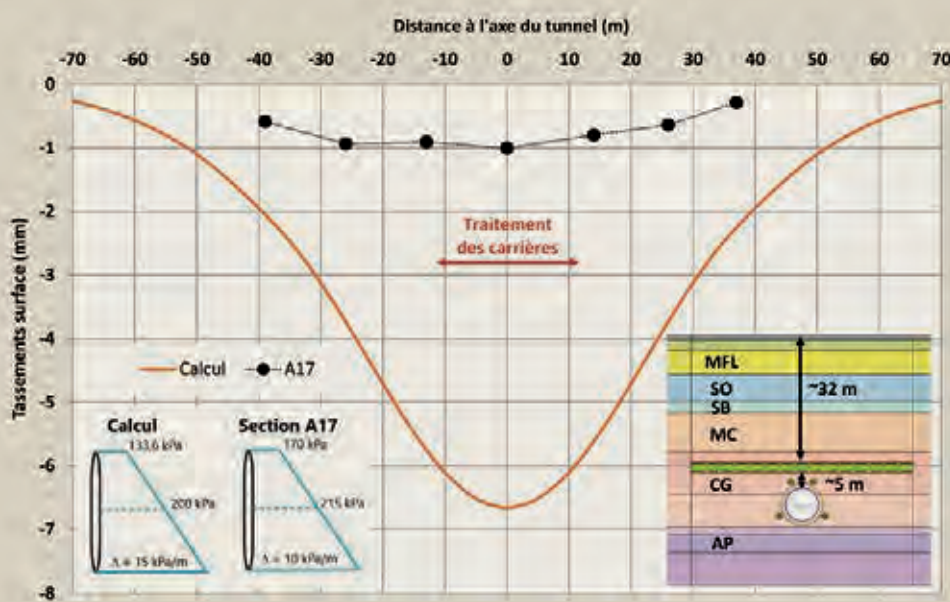
4- Settlement basins in zone 3.

5- Settlement basins in zone 5.

Elle a été définie selon les principes suivants :

- **Auscultation des avoisinants** : dans la zone d'influence géotechnique, des mesures optiques automatiques dans les 3 dimensions ont été réalisées sur l'ensemble des bâtis et ouvrages. L'auscultation est adaptée à la sensibilité aux tassements des structures et vise à mesurer le tassement absolu, le tassement différentiel et l'élongation horizontale.

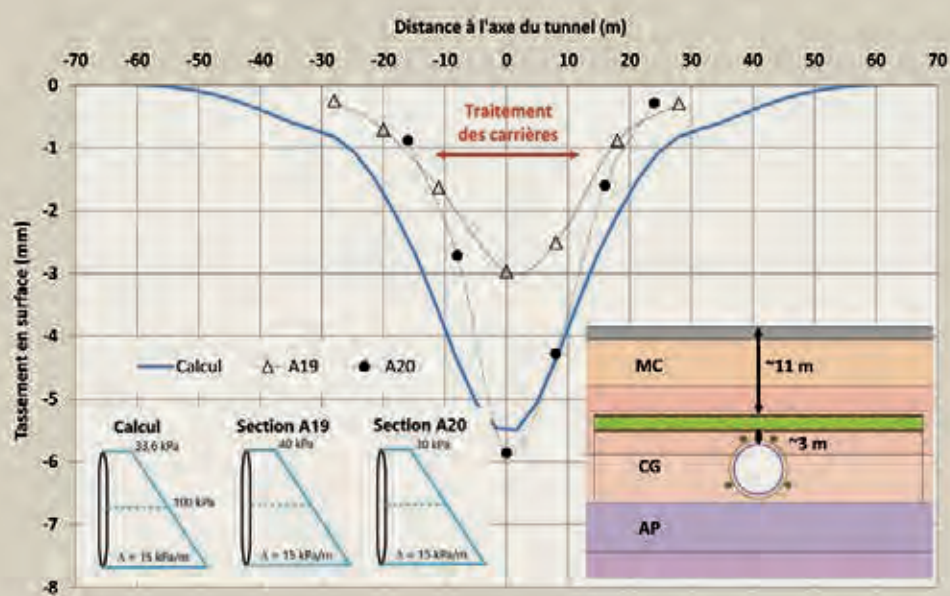
CUVETTES DE TASSEMENT DANS LA ZONE 3



4

© SETEC

CUVETTES DE TASSEMENT DANS LA ZONE 5

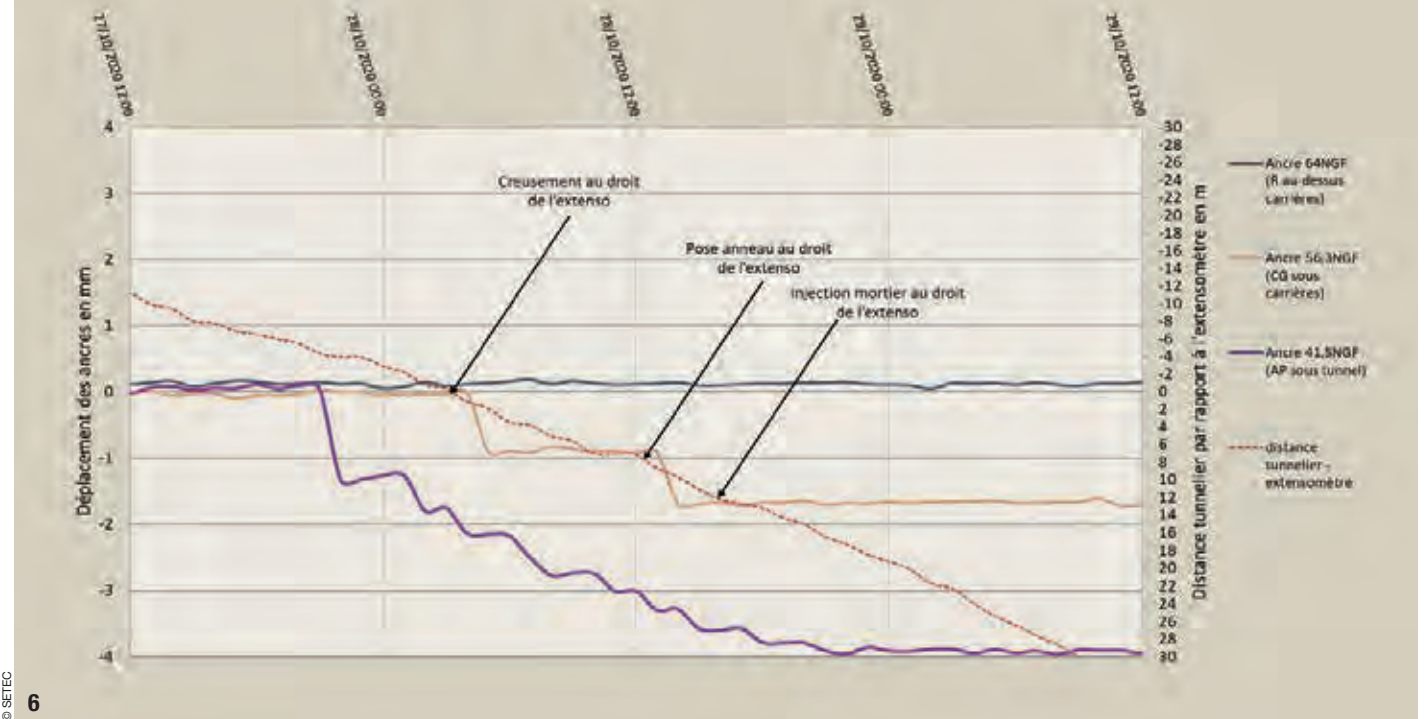


5

© SETEC

MESURES DE L'EXTENSOMÈTRE EN CARRIÈRES C19

Déplacement des ancrs de l'extensomètre C19 (PM3479) en fonction de l'avancement du tunnelier



© SETEC 6

→ **Nivellement de surface** : des mesures topographiques manuelles sont réalisées sur la voirie et dans les espaces disponibles à l'axe du tunnel (permettant le suivi des tassements à l'avancement du tunnelier) et selon des sections perpendiculaires au tracé (afin d'obtenir des cuvettes de tassement).

L'objectif de cette auscultation est double :

- 1- S'assurer que les tassements induits par les travaux restent admissibles par les avoisinants ;
- 2- Appréhender le comportement du terrain à l'avancement et anticiper les tassements à venir pour, si besoin, modifier les paramètres de creusement.

AUSCULTATION MISE EN PLACE POUR LA SURVEILLANCE DU COMPORTEMENT DES CARRIÈRES

En complément, un suivi spécifique a été utilisé dans les zones de passage sous les carrières. L'objectif est de vérifier le respect du critère de déformation imposé en limite de carrière comblée. Pour ce faire des extensomètres automatiques en forage ont été mis en œuvre. Ils ont été positionnés en limite intérieure de la bande comblée le long du tracé du tunnel.

La définition de la position des ancrs a été adaptée en fonction des niveaux des exploitations reconnues lors des forages d'injection (figure 3) afin de mesurer les mouvements au plus près du plancher et du ciel des carrières.

Le principe de positionnement des ancrs est le suivant :

- 2 m au-dessus du ciel de carrière ;
- 0,75 m sous le niveau du plancher le plus profond identifié ;
- 1,5 m sous le radier du tunnel.

PARAMÈTRES DE CREUSEMENT TBM LORS DU PASSAGE SOUS LES CARRIÈRES SOUTERRAINES DU CALCAIRE GROSSIER PRÉSENTATION DU TUNNELIER DU GC02

Le tunnelier utilisé pour le creusement de la L14S est un TBM à pression de terre. Le remplissage de la chambre est variable le long du tracé et la pression de confinement en voûte est assurée par une bulle d'air comprimé

adaptée aux terrains imperméables. Le tunnelier est équipé d'un dispositif d'injection de bentonite qui permet :

- Une injection sous pression dans la chambre de travail pour limiter les pertes de confinement à l'air ;
- Une injection autour de la jupe pour garantir le confinement et limiter les convergences autour du bouclier.

LE SUIVI DES PARAMÈTRES DU TUNNELIER

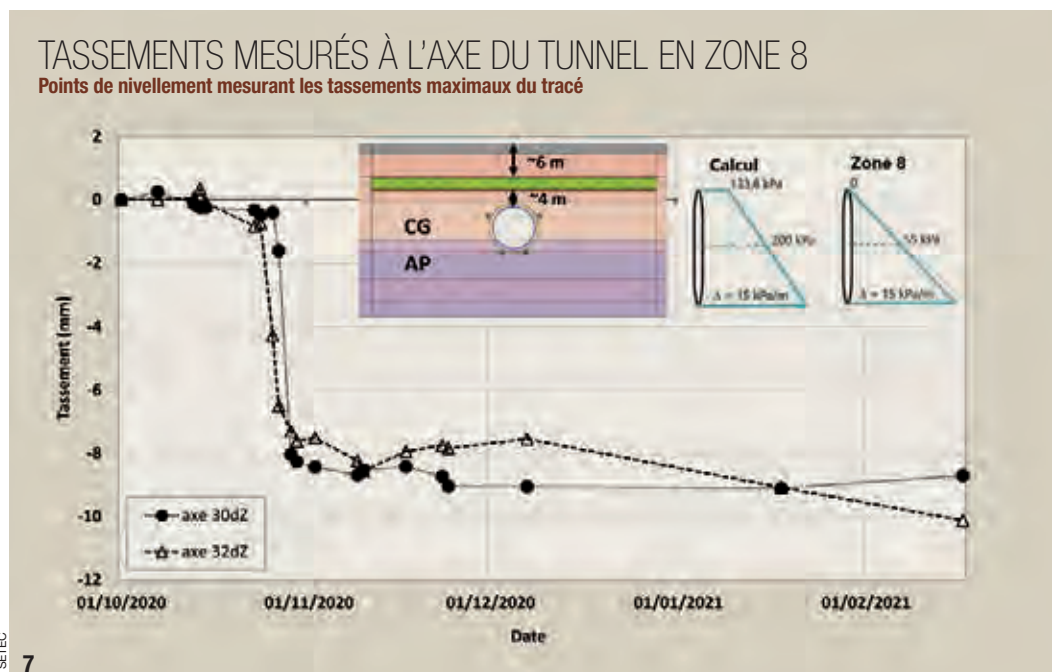
Le tunnelier est équipé de capteurs qui permettent, en les corrélant avec les déformations mesurées sur les avoisinants, un pilotage adapté au jour le jour aux conditions réelles du terrain. Lors du creusement sous les carrières, une attention particulière est portée aux paramètres suivants :

6- Mesures de l'extensomètre en carrières C19.

7- Tassements mesurés à l'axe du tunnel en zone 8 - Points de nivellement mesurant les tassements maximaux du tracé.

6- Extensometer measurements in quarries C19.

7- Settlement measured on the centreline of the tunnel in zone 8 - Levelling points measuring the maximum subsidence on the alignment.



© SETEC 7

- Pression dans la chambre d'abatage : des capteurs positionnés à différents niveaux permettent d'enregistrer les variations des pressions de confinement au front (perte du confinement à l'air par exemple) et d'en déduire le taux de remplissage de la chambre.
- Fontimètre : il s'agit d'un vérin positionné en voûte 2 m derrière la roue de coupe. Les mesures effectuées permettent de mesurer le vide annulaire en voûte. Une elongation non conforme peut être le signe d'une sous-excavation (usure des outils), d'une convergence du terrain ou d'une amorce de fontis.
- Poids des matériaux extraits : permet d'alerter sur une éventuelle sur-excavation qui traduit une déstabilisation au front (éboulement du front, amorce de fontis en voûte).
- Volume et pression d'injection de mortier de bourrage : permet de s'assurer du bon remplissage à l'arrière des anneaux de voussoirs.

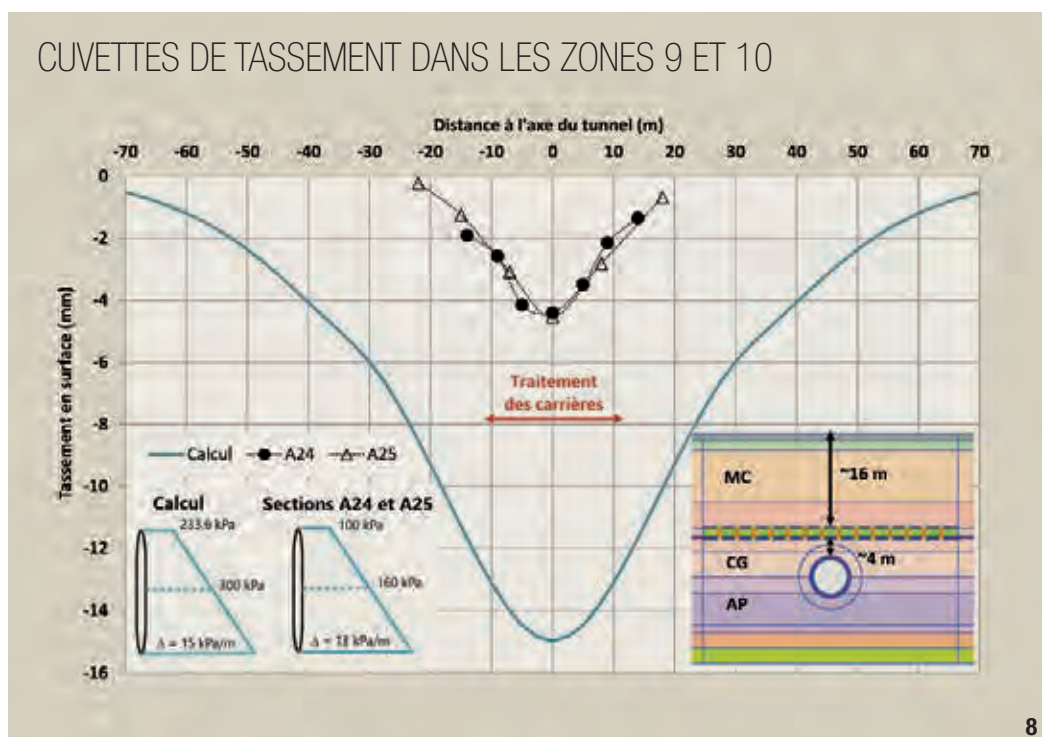
La combinaison de l'évolution de ces différents paramètres enregistrés en continu permet une détection d'une déstabilisation lors du creusement et permet de réagir au plus vite en adaptant le pilotage sans attendre la remontée en surface des déformations. Lors de la période de préparation, des modes de pilotage et un logigramme décisionnel ont été définis entre la maîtrise d'œuvre et l'entreprise afin de réagir au plus vite en cas de survenue de déformations non conformes à celles attendues.

CONSTATS ET ANALYSES DES DÉFORMATIONS ENREGISTRÉES

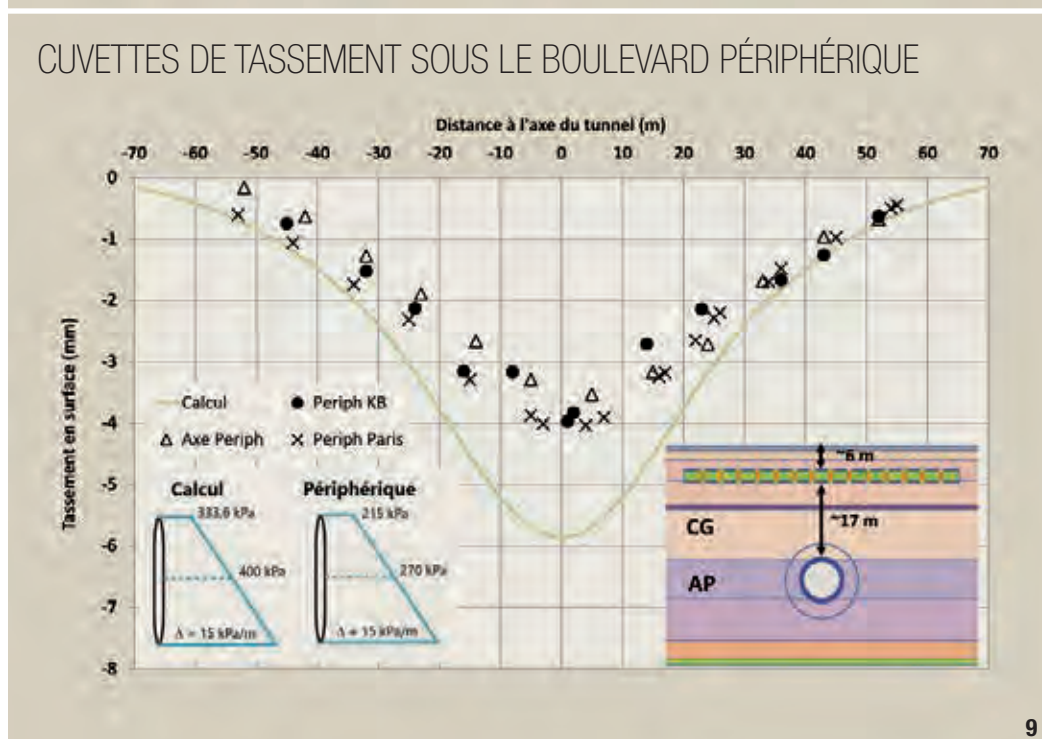
ZONES 1, 2 ET 3 : COUVERTURE IMPORTANTE, FRONT PLEIN EN CALCAIRE EN BON ÉTAT

Il s'agit des premières zones dans le sens de creusement du tunnelier. Elles présentent une grande couverture par rapport à la surface (de l'ordre de 40 m) qui a probablement protégé des altérations le Calcaire Grossier, reconnu en bon état.

Le taux de remplissage de la chambre varie entre 50 et 75 %. Les pressions de consigne sont issues des modélisations numériques. Elles sont appliquées sans difficulté grâce à la bulle d'air comprimée. Elles ont été diminuées après les premiers constats du bon comportement du sol autour du tunnel. Les déformations mesurées en surface ou sur les avoisinants dans la zone sont très faibles (< 1 mm, à la limite de la



8 © SETEC



9 © SETEC

précision de la mesure). Les mesures faites par les instruments en forage ne révèlent pas de déformations en profondeur (figure 4).

ZONES 4, 5 ET 6 : FRONT PLEIN DANS LE CALCAIRE DÉGRADÉ

L'avancement du tunnelier dans ces zones s'est accompagné d'une réduction progressive de la couverture et d'une dégradation du calcaire au front. L'altération et les nombreuses fractures sub-verticales ouvertes ren-

- 8- Cuvettes de tassement dans les zones 9 et 10.
- 9- Cuvettes de tassement sous le boulevard périphérique.

8- Settlement basins in zones 9 and 10.

9- Settlement basins under the ring road.

contrées dans le calcaire en lien avec le contexte structural de l'anticlinal de Meudon se sont traduites par une vigilance forte sur le pilotage du tunnelier pour maintenir la pression de confinement au front. Le taux de remplissage de la chambre a été augmenté jusqu'à 90 % sur ce tronçon pour compenser les pertes de pression d'air en clé. Les tassements restent tout de même faibles, de l'ordre de 4 à 6 mm maximum à l'axe. Ils sont équivalents aux tassements calculés par les modélisa-

tions numériques, à pression au front égale (figure 5).

Les instruments en forage ne montrent pas de déformation particulière en profondeur.

ZONES 7, 8, 9 ET 10 : FRONT MIXTE CALCAIRE/ ARGILES PLASTIQUES

Les zones 7 et 8 présentent un Calcaire Grossier sub-affleurant, sous très peu de couverture. C'est dans cette zone que les tassements maximaux sont observés et atteignent environ 10 mm à l'axe du tunnel. À noter que ces tassements se sont produits pendant un arrêt du tunnelier, les tassements à l'axe mesurés de part et d'autre de l'arrêt sont de l'ordre de 5 mm (figure 7). Les instruments en forage n'enregistrent pas de déformation particulière au passage du tunnelier, excepté l'extensomètre C19 positionné au niveau de la zone 8 à environ 10 m de l'axe du tunnel.

L'ancre la plus profonde (située au niveau du piédroit du tunnel dans les Argiles Plastiques) enregistre un tassement lorsque le front d'excavation se situe à environ 5 m en amont du passage du tunnelier puis se stabilise autour de 4 mm lorsque le front se situe à environ 20 m en aval (durée équivalente de 1 j).

L'ancre intermédiaire située sous le plancher des carrières enregistre un tassement de l'ordre de 1 mm au passage du front puis 2 mm lors de la pose de l'anneau. Le tassement se stabilise immédiatement et bien plus rapidement que la première ancre dans les Argiles Plastiques.

L'ancre supérieure (située au-dessus du ciel de carrière) et le point

de nivellement en surface ne montrent pas en évidence de déformation (figure 6).

Sous les zones 9 et 10, le tracé du tunnel s'approfondit avec un front au niveau de l'interface Calcaires Grossiers/Argiles Plastiques. Des pertes de pression à l'air ont été observées, jusqu'à ce que le front soit composé à environ 30 % d'Argiles Plastiques et 60 % de calcaire en meilleur état (moins fracturé).

Une pression de confinement plus forte est alors appliquée. De plus, des injections de bentonite dans la chambre ont été possibles lors des périodes de pose des anneaux.

Les tassements mesurés dans le secteur sont de l'ordre de 4 à 5 mm maximum à l'axe (figure 8).

ZONE 14 ET BOULEVARD PÉRIPHÉRIQUE : FRONT MAJORITAIREMENT EN ARGILES PLASTIQUES

Il s'agit de la zone la plus proche de Paris, elle présente un intérêt historique pour l'IGC. Les galeries ont été préservées et n'ont pas été comblées. Un comblement à pied d'œuvre des remblais de bourrage a été réalisé (de type injection de collage).

Le front d'excavation se situe à plus de 50 % dans les Argiles Plastiques au début de la zone 14 et entièrement dans les Argiles Plastiques sous le boulevard Périphérique (limite de la zone du tracé concerné par la problématique carrière). Des tassements à l'axe de l'ordre de 4 mm au maximum ont été mesurés, c'est-à-dire autant que pour les zones

précédentes, alors que la pression au front est nettement augmentée.

Ce constat met en évidence le développement des déformations induites par le creusement au tunnelier lorsque le front se situe majoritairement dans les Argiles Plastiques.

Des mesures des fissuromètres installés au niveau des fissures en ciel de carrière dans les galeries visitables de la zone 14 et des constats visuels ont été réalisés avant et après passage du tunnelier. Il n'y a pas eu d'évolution notable des mesures (figure 9).

INFLUENCE DU TYPE DE FRONT D'EXCAVATION SUR LES TASSEMENTS

Les constats issus de l'auscultation sur l'ensemble du tracé du tunnel concerné par le passage du tunnelier sous les anciennes carrières de Calcaires Grossiers nous permettent de retenir les principes suivants :

- Les carrières comblées ont joué pleinement leur rôle de "terrain homogène équivalent" ce qui permet de conclure à l'adéquation du comblement réalisé ;
- Les déformations mesurées en surface et au niveau des carrières sont faibles (entre 0 et 10 mm) ;
- Les tassements mesurés sont fonction de l'état d'altération et de fracturation du Calcaire Grossier, qui indirectement sont liés à la couverture et à la possibilité de maintenir la pression en clé ;
- Conformément aux études, le front plein dans le Calcaire Grossier, même proche du plancher des carrières, génère moins de déformations qu'un front mixte calcaire/argiles déformables. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 4,8 km de tunnel excavé dont 1,6 km sous les niveaux de carrières
- Diamètre du tunnel : 8,83 m excavé / 7,55 m utile
- 53,5 km de forage pour comblement des carrières
- 25500 m³ de coulis injecté pour comblement des carrières
- 22 extensomètres de carrières
- 12 sections d'instrumentation en surface, 3 sections profondes
- 28 points de nivellement à l'axe
- 0 à 10 mm maximum de tassements en surface dans les zones de carrières comblées

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : RATP

MAÎTRISE D'ŒUVRE : groupement Elios : Ingénieries Setec (Mandataire) & Systra

ENTREPRISE : groupement Dodin, Vinci, Spie Batignolles

ÉQUIPEMENT AUSCULTATION : Sixense

ABSTRACT

EXCAVATION BY TBM BENEATH UNDERGROUND QUARRIES OF LUTETIAN LIMESTONE IN PARIS - POST-PROJECT ANALYSIS OF LINE 14 SOUTH

MARIE COBLARD, SETEC TPI - SILVIA DELATTRE LEVIS LEYSER, SETEC TERRASOL - ANNE BERGERE, SETEC TERRASOL - LAURE NGUYEN THE DUNG, DODIN CAMPENON BERNARD

As part of works for the southern extension of Line 14 of the Paris metro, 1.6 km of tunnelling was executed by Earth Pressure Balance TBM beneath former underground limestone quarries, which had been filled in beforehand. Precise and appropriate detailed analysis and monitoring by the contractor and the project manager made it possible to adapt the TBM's operation in real time and control surface subsidence. Post-project analysis of this project led to the conclusion that the quarries' behaviour was satisfactory, even though the damaged and fractured state of the limestone sometimes resulted in operating problems to maintain confinement pressure at the keystone. □

EXCAVACIÓN CON TUNELADORA BAJO LAS CANTERAS SUBTERRÁNEAS DE PIEDRA CALIZA DE PARÍS - CONCLUSIONES DE LA LÍNEA 14 SUR

MARIE COBLARD, SETEC TPI - SILVIA DELATTRE LEVIS LEYSER, SETEC TERRASOL - ANNE BERGERE, SETEC TERRASOL - LAURE NGUYEN THE DUNG, DODIN CAMPENON BERNARD

En el marco de las obras de prolongación hacia el sur de la Línea 14 del metro de París, se han perforado 1,6 km de túnel con una tuneladora a presión de tierra, bajo las antiguas canteras de piedra caliza, previamente rellenadas. La auscultación precisa y adaptada y el seguimiento detallado por parte de la empresa y la dirección de obra han permitido adaptar en tiempo real la conducción de la tuneladoras y controlar los asentamientos en superficie. Las conclusiones extraídas de esta obra revelan un buen comportamiento de las canteras, aunque el estado de alteración y fracturación de la piedra caliza en ocasiones ha generado dificultades de conducción para mantener la presión de confinamiento en clave de arco. □



1

© CNES, CARDETE & HUET

L'INFRASTRUCTURE DE LANCEMENT POUR LA FUSÉE ARIANE 6 À KOUROU

AUTEURS : STEFAN BERNHARD, DIRECTEUR DES ÉTUDES, SETEC TPI (au moment du projet) - CÉCILE BABIN, RESPONSABLE CELLULE PROJETS INDUSTRIELS, SETEC TERRASOL - JULIEN BESNIER, DIRECTEUR SITE, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - FRÉDÉRIC CUFFEL, DIRECTEUR DE PROJET, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - THOMAS THIBERGHEN, DIRECTEUR DE PROJET, EIFFAGE INFRASTRUCTURES

APRÈS AVOIR RÉALISÉ LES TERRASSEMENTS GÉNÉRAUX POUR LE COMPTE DE L'ESA (MAÎTRE D'OUVRAGE) ET DU CNES (MAÎTRE D'ŒUVRE), LE GROUPEMENT EMMENÉ PAR EIFFAGE S'EST VU CONFIER LE MARCHÉ DE CONSTRUCTION DES INFRASTRUCTURES DE L'ENSEMBLE DE LANCEMENT D'ARIANE 6. EN RÉPONSE AUX ENJEUX TECHNIQUES DE LA CONCEPTION ET DE LA CONSTRUCTION DE LA ZONE DU MASSIF DE LANCEMENT DE LA FUTURE FUSÉE ET DE LA LONGRINE DE ROULEMENT DE SON PORTIQUE, LES ÉQUIPES D'EIFFAGE GÉNIE CIVIL, DE SETEC TPI ET DE TERRASOL ONT SU IDENTIFIER ET METTRE EN ŒUVRE LES SOLUTIONS TECHNIQUES NÉCESSAIRES.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

La construction des infrastructures de l'Ensemble de Lancement Ariane n°4 pour la fusée Ariane 6 à Kourou en Guyane a été attribuée le 8 juillet 2016 par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) au groupement Eclair6,

constitué d'Eiffage Génie Civil (mandataire), Eiffage Métal, Seh Engineering, Eiffage Route, Clemessy, Axima et Icop. Ces travaux consistent en la réalisation du pas de tir, composé d'une zone de lancement et d'une zone de préparation, et de ses liaisons vers les autres

1- Vue de la Zone de Lancement.

1- View of the Launch Area.

infrastructures du Centre Spatial guyanais (CSG).

La zone de lancement est constituée d'un massif supportant la table de lancement, incluant une zone Process et une zone Servitudes et deux cameaux pour l'évacuation du souffle au lancement.

Le portique mobile, servant entre autres à l'érection du lanceur et à l'intégration de sa charge utile, roule sur deux longrines dédiées, cheminant à la fois sur le massif de lancement et à l'extérieur pour pouvoir atteindre sa zone de retrait lors des séquences de tir.

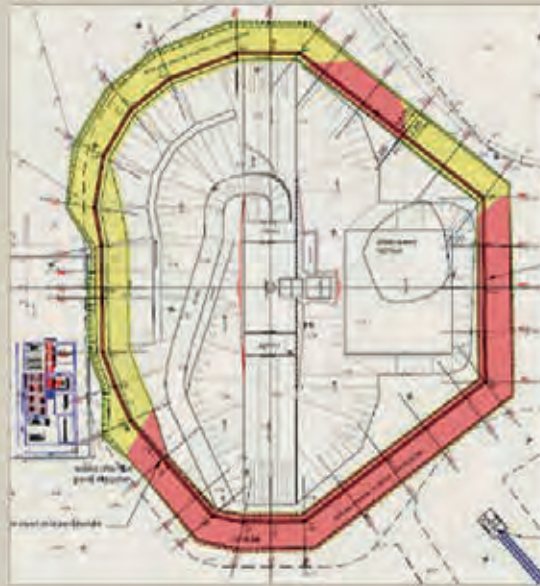
La zone de lancement comporte également un château d'eau ainsi qu'une station de traitement des eaux.

Les zones de stockage d'oxygène liquide (LOX) et d'hydrogène liquide (LH2) sont reliées à la zone Massif par des galeries enterrées. Les mâts d'éclairage, de protection foudre, le mât ombilical (mât érigé sur l'aire de lancement qui supporte les câbles et les alimentations nécessaires aux systèmes de contrôle et aux commandes de la fusée pendant la période qui précède le décollage) ainsi que les shelters optiques complètent l'équipement principal de la zone de lancement (figure 1).

La zone de préparation comprend notamment le Bâtiment Assemblage Lanceur (BAL), la Centrale Eau Chaude/Eau Glacée, le Poste de répartition HT et le bâtiment dédié aux systèmes eau (eau brute, eau potable, incendie).

Setec tpi et Terrasol sont sous-traitants d'Eiffage Génie Civil pour les études géotechniques de l'ensemble (mission G3) ainsi que l'établissement des études d'exécution du Génie civil des ouvrages au cœur de l'infrastructure de lancement : ensemble massif carreaux et longrines du portique.

PÉRIMÈTRE DE LA PAROI AU COULIS



2

© CNES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

- 2- Périmètre de la paroi au coulis.
- 3- Réalisation de la paroi au coulis.

- 2- Perimeter of the grout wall.
- 3- Execution of the grout wall.

LA PAROI AU COULIS

La localisation de la Guyane près de l'équateur facilite les lancements, mais apporte pour spécificité de devoir réaliser les ouvrages dans des formations de sols tropicaux. On y retrouve en effet la décomposition typique en sols résiduels du socle de la Guyane.

Les sols résiduels, à la différence des sols transportés, sont issus de la décomposition de la roche en place due aux conditions climatiques, où les températures élevées et les précipitations abondantes sont propices à une altération chimique intensive. À noter que sur l'ensemble de lancement, le toit de la colonne de décomposition classique a été décapité selon une coupe sub-horizontale à environ 5-6 m sous le terrain naturel. Les premiers mètres sont remplacés par des dépôts marins de la série de Coswine (sables et argiles bariolées), de dépôts éoliens sableux et de dépôts limoneux déposés en variation spatiale et latérale, témoignage des transgressions et régressions maritimes au quaternaire. Ces dépôts récents, dont l'état de consolidation est très variable, reposent sur les altérations rencontrées sous la forme de décompositions rocheuses multicolores souvent micacées, surmontant le socle ancien formé de roches plutoniques ou métamorphiques grenues (granite, dolérite, quartz, etc.).

Les structures supportant la table de lancement du pas de tir ; le massif et les carreaux principalement, sont enterrées et fondées plus de trente mètres sous le niveau fini. Cela facilite le positionnement du lanceur et amortit les vibrations lors du décollage.

Afin de mettre en œuvre les carreaux, il faut tout d'abord excaver les terrains en place. ▷



3

© CNES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

L'avantage des sols tropicaux c'est qu'ils sont très propices aux terrassements, grâce à leurs propriétés géomécaniques à la fois frottantes et cohérentes. Partant de ce constat, une solution plus légère que la solution de base, consistant en la réalisation de colonnes sécantes en jet-grouting, a été envisagée. Une solution de paroi au coulis de 21 541 m² de surface avec jupe injectée a été proposée avec un terrassement en grande masse.

La paroi au coulis n'a été conçue que pour son rôle d'étanchéité, protégeant des venues d'eau de la nappe excédant le terrain naturel en saison des pluies. Les pentes du terrassement en grande masse ont donc dû respecter les lois de la stabilité des pentes (pentes au 2H/1V et des risbermes de 3 m de largeur en crête tous les 9 m de profondeur).

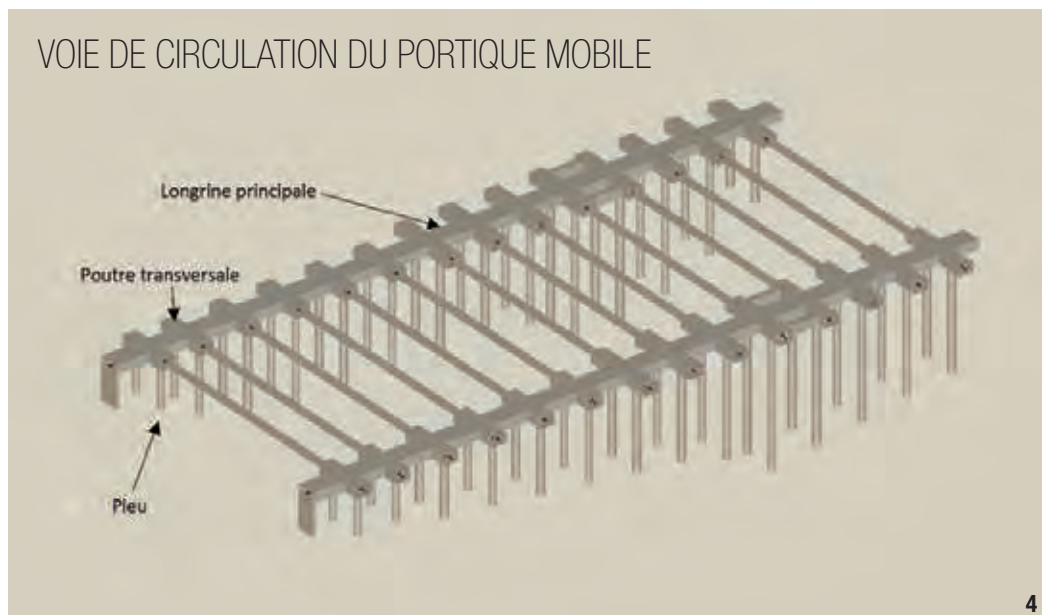
La jupe injectée, d'une dizaine de mètres de hauteur, a non seulement permis de finaliser l'étanchéité de la paroi, mais également de compenser les variations du toit du rocher et combler les niveaux moins altérés précédant le rocher sain. Le socle rocheux a été atteint à 19 m de profondeur au sud de la fouille et entre 5 et 13 m de profondeur au nord. Le long du linéaire, peu de variations brutales du toit du rocher ont été rencontrées, à l'inverse des variations de plus grande longueur d'onde qui ont bien été observées.

La fouille elle-même a été réalisée dans un faciès mixte ; sol meuble / sol rocheux. Toujours en raison de la crainte des variations brutales du toit du socle rocheux, un grand nombre de précautions ont été prises en amont, puis au moment où les terrassements ont atteint la jonction présumée entre les sols meubles et les sols rocheux. En effet, un approfondissement local non reconnu du socle rocheux risquait de provoquer des instabilités en pied de talus.

De plus, la paroi de protection contre les arrivées d'eau empêchait toute reprise de talutage en cas de problème d'instabilité.

Le fond de fouille rocheux respecte quant à lui des pentes au 2H/5V et a dû être excavé par minage. L'ensemble des terrassements a été réalisé en 5 mois, pendant la saison sèche et s'est achevé, comme prévu, avant la saison des pluies. Les talus ont été protégés des pluies tropicales par des membranes en polyéthylène (figures 1, 2 et 3).

VOIE DE CIRCULATION DU PORTIQUE MOBILE



4

© CNES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

LE DIMENSIONNEMENT DE LA VOIE DU PORTIQUE MOBILE

La zone de préparation du mât comporte les voies de portique mobile et elle est constituée de deux longrines de roulement en béton armé, de section rectangulaire de 3,00 m de large pour 1,50 m de haut. Les longrines de roulement comportent tous les 7,50 m une traverse "en arêtes de poisson" d'une largeur de 2,20 m. Un pieu en béton armé de 1,00 m de diamètre est placé à

4- Voie de circulation du portique mobile.

5- Déblai du massif.

4- Track for the moving portal structure.

5- Foundation excavation.

chaque extrémité de traverse (figure 4). La décision d'excentrer les appuis latéralement à la longrine de roulement via les arêtes de poisson est issue d'un processus d'optimisation de la conception qui vise à réutiliser les points d'appuis provisoires nécessaires aux phases de montage du portique mobile pour les appuis définitifs de la longrine.

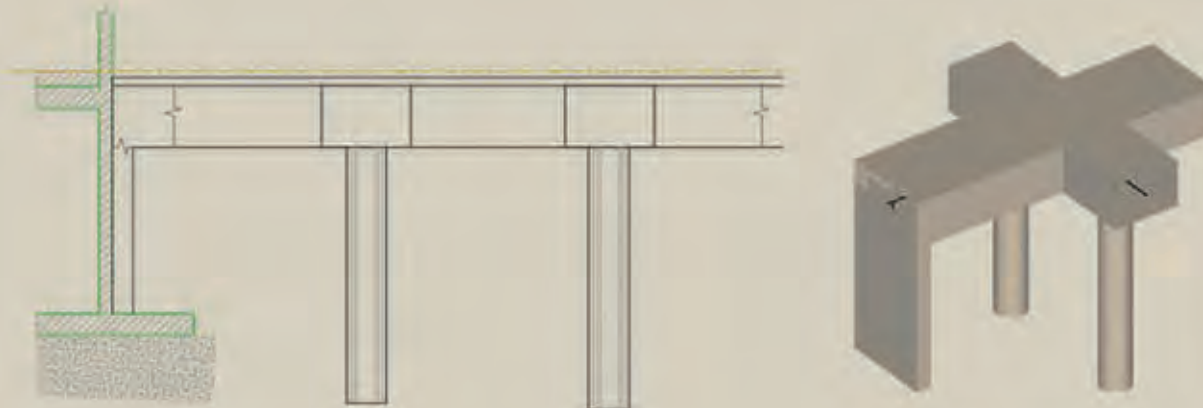
La limitation de la déformation de la longrine sous mode opératoire du portique mobile est un point décisif pour la conception de la longrine. Le pro-



5

© CNES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

JOINT EN DIAPASON



© CNES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL, SETEC TPI

6

gramme du portique mobile demande de limiter la déformation à la verticale et en plan. La déformation horizontale limite à la fois la déformation propre de la longrine sous charges horizontales des trains de roulement (marche en crapaud), mais on doit également limiter l'écartement des voies entre-elles. Le choix de placer les pieux non pas directement sous la longrine, mais en décalage latéral, augmente la rigidité de la longrine dans le sens latéral. L'effet portique des pieux seuls est cependant insuffisant pour garantir le non-écartement des voies de roulement à plus long terme. C'est pourquoi on a dimensionné un système de tirants avec des profilés HEB qui lie les deux voies de roulement.

La déformabilité verticale tient compte des raccourcissements élastiques des pieux. Les pieux ont une longueur variable allant de 8 à 20 m. Cette différence est due au changement du niveau du toit rocheux dans lequel s'ancrent les pieux. Les raideurs élastiques de ces pieux de longueurs différentes changent en conséquence, mais il s'est avéré que ce changement de raideur est acceptable pour les critères de déformation verticale car les longueurs des pieux changent assez progressivement et non pas brusquement.

Ce sont en effet des changements brusques de raideur qui posent des difficultés, comme c'était le cas pour le passage entre la zone en longrine et la voie de roulement intégrée sur le toit du bâtiment servitudes. En cours de fonctionnement, le portique mobile se déplace entre sa zone de repos au droit des longrines par-dessus le toit du bâtiment servitudes jusqu'au bâtiment process de la zone de lancement. Le toit rocheux au droit du bâtiment ser-

6- Joint en diapason.
7- Clouage d'un massif d'appui.

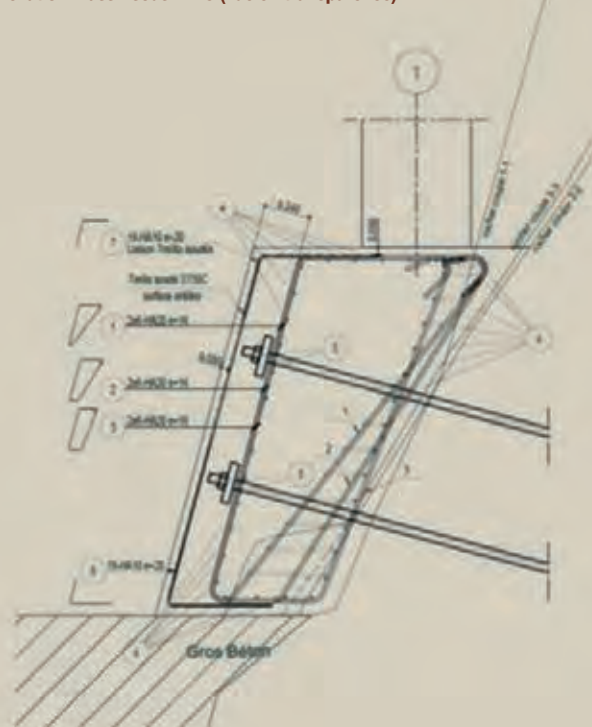
6- Tuning fork shaped joint.
7- Nailing a bearing foundation block.

vitudes est peu profond. Le bâtiment est directement fondé sur un radier coulé sur ce toit rocheux. La longrine de roulement est séparée de sa section au-dessus du bâtiment par un joint structurel pour limiter les longueurs dilatables. La différence de raideur entre ce bâtiment et la longrine de roulement est très importante. Il a donc été nécessaire de porter une attention particulière à la conception de la jonction entre la longrine et le bâtiment servitudes (figure 5).

Pour le bon fonctionnement du portique et pour garantir l'intégrité du long rail soudé, il a été nécessaire de limiter à la fois le déplacement vertical différentiel de part et d'autre du joint mais également de limiter les rotations angulaires entre les deux structures. Face à ces contraintes, notre conception a abouti à une solution simple mais ingénieuse : Un joint en diapason avec une semelle commune entre le bâtiment et le premier appui de la longrine assure une liaison en continuité, assez souple longitudinalement et suffisamment rigide dans le sens vertical (figure 6).

CLOUAGE D'UN MASSIF D'APPUI

Élévation massif sous PT29 (vue en transparence)



7

© CNES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL, SETEC TPI

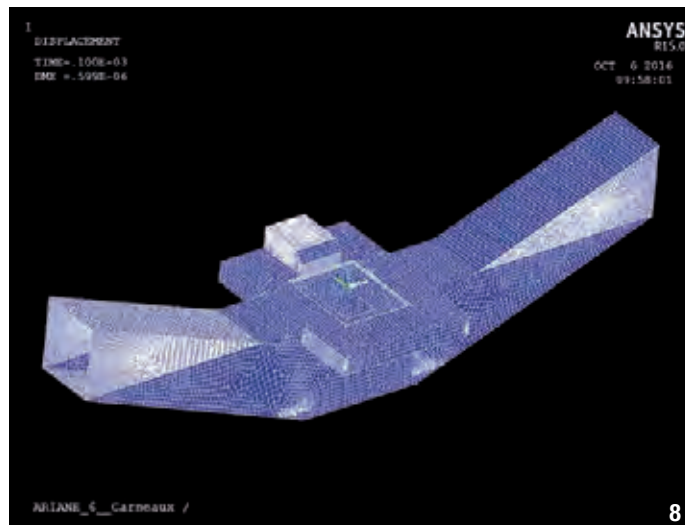
LES ASPECTS GÉOTECHNIQUES DE LA ZONE DU PORTIQUE MOBILE

Comme évoqué précédemment, les sols meubles sont issus de l'altération, majoritairement granitique au droit d'ELA4, et la position du toit du substratum rocheux est variable. Le processus d'altération diminue avec la profondeur et des niveaux présentant des blocs résiduels de taille croissante contenus dans une matrice limono-sableuse apparaissent en approchant du rocher dit sain. Des blocs de taille significative, appelés boulders, pouvaient également être présents. Compte-tenu des exigences en termes de tassements sous le portique mobile, il a été décidé d'opter pour des pieux Ø 1000 mm forés tubés, avec viroles récupérées, dans les sols meubles et forés simples ancrés au rocher sur 50 cm minimum dans le rocher sain. Lors de l'exécution, la verticalité et l'ancrage de ces pieux étaient des critères primordiaux pour respecter les exigences de conception. Or celles-ci étaient mises au défi par la présence éventuelle de boulders, risquant de faire dévier l'outil de forage, ▷

et la détermination du niveau sain pour réussir l'ancrage dans un niveau ne risquant pas de provoquer des tassements excessifs durant la vie de l'ouvrage. La présence éventuelle des boulders avait fait l'objet de reconnaissances géophysiques (sismique réfraction et panneaux électriques). Ces reconnaissances avaient été confortées par quelques reconnaissances géotechniques, auxquelles se sont ajoutées les reconnaissances géotechniques de niveau G3, ainsi qu'une campagne spécifique. L'interprétation de l'ensemble des résultats a permis d'établir un risque très faible de boulder (qui s'est avéré en exécution puisqu'aucun boulder n'a été rencontré) ainsi qu'un modèle géotechnique pour le classement des niveaux d'altération du rocher. Enfin, Icop a déployé une machine de pieux puissante permettant le carottage de grand diamètre en fond de pieu pour vérifier l'ancrage dans le rocher sain et la réalisation dans des matériaux très abrasifs et très durs. Les 56 pieux de longueurs variables entre 8 et 20 m supportant les rails du portique mobile ont finalement été ancrés avec une précision de 1 m près par rapport au prévisionnel de longueur de chaque pieu.

CLOUAGE DE BLOCS

L'ouverture du fond de fouille et du déblai Nord s'est faite à l'explosif dans le massif rocheux. Les sondages carottés disponibles, même en grand diamètre, ne mettaient pas en évidence un massif rocheux très fracturé. Cependant, des sondages ponctuels ne peuvent suffire et seule l'ouverture d'au moins deux pans pouvait permettre d'observer l'état de fracturation réel du massif.



© CNES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL, SETEC TPI

En effet, après l'ouverture, des confortements provisoires ont dû être mis en œuvre pour sécuriser la fouille compte-tenu de la menace de chute de plusieurs blocs. Sur ces mêmes déblais rocheux devaient reposer les fondations, au rocher, du massif servitude. Après étude de la position des futurs appuis des fondations et compte-tenu des charges très importantes apportées, il s'est avéré indispensable de clouer le déblai sous chacun des futurs appuis (par des dizaines de clous dont le diamètre varie de 40 à 63,5 mm) afin d'éviter tout décrochement de blocs qui provoquerait, d'une part, des tassements inadmissibles pour le massif servitude et, d'autre part, une poussée inadmissible sur les voiles du massif constitutif du pas de tir. En plus du clouage du massif rocheux, certains poteaux du bâtiment process "tombaient" par leur implantation "à cheval" dans une zone de pente rocheuse ou à proximité d'une pente.

8- Modélisation numérique de l'ouvrage.

9- Modélisation 3D des armatures.

8- Digital model of the structure.

9- 3D model of the rebars.

Afin de limiter le déroctage, il a été imaginé de créer un massif en béton armé, cloué au massif rocheux qui sert d'appui aux poteaux.

Un nettoyage de la zone de contact, précédé par un forage des clous passifs (\varnothing 63,5 mm, fe 555 MPa), a été entrepris avant de mettre en place un ferrailage sur mesure, basé sur des relevés topographiques de la pente rocheuse (figure 7).

COMPORTEMENT SOL STRUCTURE AVEC L'EFFORT DYNAMIQUE DANS LE CARNEAU

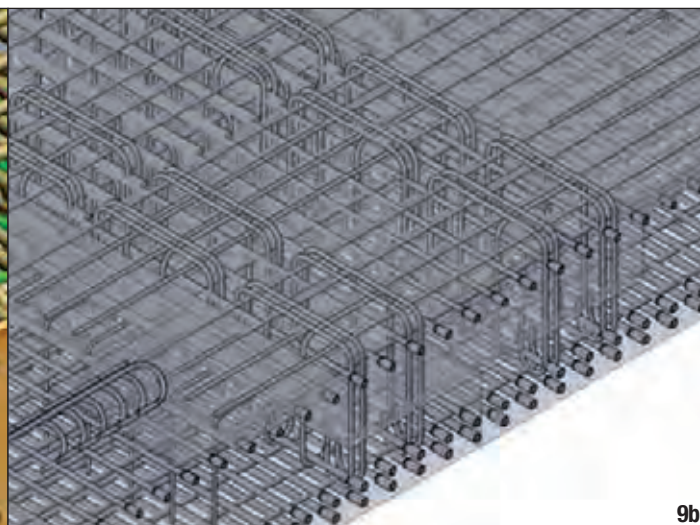
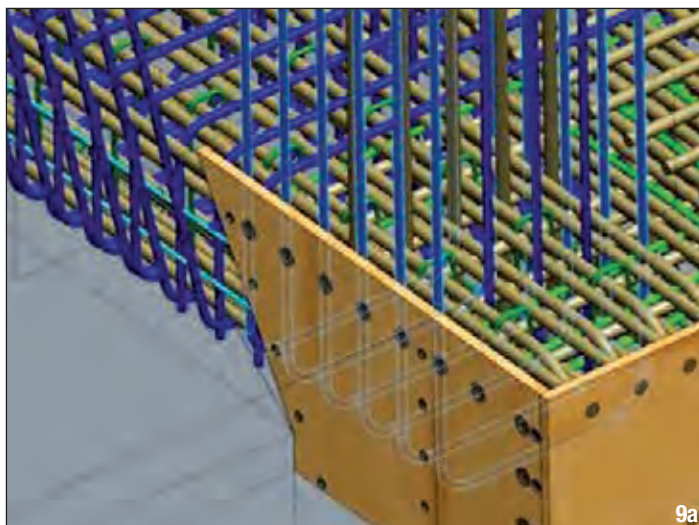
Le massif et les carneaux sont des structures constitutives majeures du pas de tir. Le massif est fondé superficiellement au rocher, alors que les carneaux, qui démarrent en pied du massif à plus de trente mètres sous le niveau fini, émergent complètement afin de laisser échapper les gaz. Les carneaux sont également fondés superficiellement, mais ils reposent à la fois sur le rocher et les sols meubles.

Un modèle géotechnique des sols support a été établi à l'aide de l'ensemble des reconnaissances au droit de ces ouvrages (CPT, sondages carottés avec essais en laboratoire, cross-holes, essai de pompage, etc.).

Des lois de comportement de type Hardening Soil Model ont été retenues et les modules ont été calés aux déformations attendues. Enfin des modèles de calcul aux éléments finis en 2D modélisant le massif et les carneaux ont été réalisés.

Les modèles aux éléments finis ont repris finement l'ensemble du phasage de construction, en effet, les phases de déchargement lors des terrassements profonds et de chargement ou rechargement lors de la pose des structures est très important afin de bien approcher les déformations des ouvrages.

En plus de fournir le comportement et les tassements de l'ouvrage, les modèles ont permis d'alimenter les modèles structuraux en raideurs de sol équivalentes Au final, l'ouvrage s'est comporté comme prévu par les études et rencontré les tassements attendus.



© CNES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL, SAMT

CALCUL DE LA STRUCTURE SOUS ONDE DE CHOC

DESCRIPTION GÉOMÉTRIQUE DES CARNEAUX

Les carneaux consistent en deux galeries latérales inclinées d'environ 75 m de longueur développée, 17 m de largeur, 20 m de hauteur chacune et d'une zone centrale d'environ 40 m de longueur, 16 m de largeur et 30 m de hauteur.

La section type des carneaux est constituée d'une dalle supérieure de 1,2 m d'épaisseur avec 10 cm de béton sacrificiel pour résister à l'abrasion des gaz, d'un radier de 0,85 m d'épaisseur, et des voiles verticaux de 1,2 m d'épaisseur. En partie centrale, le radier de 1 m d'épaisseur est surmonté d'une dalle de 0,85 m soutenue par des voiles intermédiaires de 0,60 m. Les voiles principaux de la partie centrale ont une épaisseur de 1,2 m. Dans la partie centrale, le déflecteur repose sur la dalle de 0,85 m d'épaisseur permettant ainsi de modifier la trajectoire des jets du lanceur.

Afin d'évaluer le comportement de la structure des carneaux sous l'onde de choc créée par l'allumage des propulseurs au décollage de la fusée nous avons procédé à un calcul dynamique transitoire "à pas de temps".

Les données d'entrée pour l'étude nous ont été fournies par le CNES sous forme de multiples points de pression sur un maillage comprenant les quatre faces intérieures des carneaux, avec un pas de temps de 1/1000 de seconde.

La distribution spatio-temporelle de ces pressions de l'onde de choc correspond aux résultats de calculs menés par les équipes d'ArianeGroup, côté bord. Le travail consistait à compresser ces données, c'est-à-dire de moyenniser les pressions sur chaque tranche (tous les 0,5 m) et chaque face des carneaux, de modéliser la structure en béton

armé et d'injecter ces points de pression comme charges variables dans le modèle dynamique temporel aux éléments finis. La durée de la simulation vibratoire est de 3 secondes.

Elle comprend l'application des pressions de l'onde de choc sur les parois (l'aller-retour de l'onde de choc d'environ 0,65 s) et une durée d'environ deux secondes pour simuler la vibration libre de la structure.

L'appui sur le sol a été modélisé par des ressorts élastiques. En effet la zone centrale basse des carneaux a été appuyé sur des ressorts très raides correspondant au coulage du béton du radier directement sur le rocher sain. Un des principaux objectifs de l'étude a été d'étudier le comportement dynamique des extrémités des carneaux qui, à leur tour, reposent sur des couches de sol plus superficielles et moins raides.

En d'autres termes il fallait s'assurer que l'onde de choc ne provoque pas "un battement des ailes" des extrémités des carneaux. L'ensemble des calculs, statiques et dynamiques, ont été effectués en attribuant des raideurs géotechniques en fourchette.

Un deuxième point de vigilance a été le comportement vibratoire des appuis de la table de lancement. Une mise en résonance de la table avec la structure des carneaux a pu être exclu.

La mise en œuvre du calcul n'a pas été habituelle. En particulier l'analyse, menée avec le logiciel Ansys, a dû tenir compte de la "disparition de la masse" qui se produit quand la fusée décolle à 0,25 s de l'allumage. C'est-à-dire que nous avons simulé dans le calcul, via un chargement dit "Dirac" à $t = 0,25$ s la suppression d'une masse ponctuelle de 1 300 t (figure 8).

Le calcul dynamique a été couplé avec le logiciel interne Armatec de Setec tpi afin de calculer automatiquement la quantité d'armatures nécessaire pour satisfaire les cas de chargement dynamique. Dans un deuxième temps cette quantité d'armatures a été comparée à la quantité d'armatures issue d'un calcul séparé qui prenait en compte l'ensemble des cas statiques. La comparaison des différentes cartographies de ferrailage nous a permis d'identifier et de circonscrire les zones de vigilance, c'est à dire des zones où le calcul dynamique s'est avéré dimensionnant. Le ferrailage étant particulièrement complexe, d'une part à cause de la très forte densité d'armatures nécessaires et d'autre part à cause des contraintes de mises en œuvre liées aux préfabriques de cages pour le respect des cadences de mise en œuvre, il a fallu concevoir en détail ce ferrailage par un système de plans de fabrication par panneaux entiers. Un modèle 3D du ferrailage a été développé par le sous-traitant armaturier Samt depuis les éléments de Setec tpi pour permettre cet exercice et gérer les interférences entre cages (figure 9).

CONCLUSION

La construction des infrastructures de l'ELA4 pour Ariane 6 s'est avérée être une expérience particulièrement riche et intense pour l'ensemble de ses acteurs. Il s'agit d'un projet multidisciplinaire complexe par ses dimensions, sa technicité et son contexte de réalisation. Les différents intervenants, qu'il s'agisse d'études ou de travaux, ont su apporter leur expertise et leur savoir-faire dans l'objectif de contribuer à la réussite commune de ce projet emblématique. Au-delà de l'aventure humaine, bien sûr prépondérante, il y a également un défi technique majeur que l'ensemble des équipes a su relever. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

TERRASSEMENT MEUBLE : 170 000 m³

TERRASSEMENT ROCHEUX : 30 000 m³

BÉTON : 40 000 m³

CHARPENTE MÉTALLIQUE : 6 000 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : ESA

CONTRACTANT PRINCIPAL : CNES

ARCHITECTES : Cardete & Huet

GROUPEMENT ECLAIR6 : Eiffage Génie Civil (mandataire) / Eiffage Route / Clemessy / Eiffage Métal / Seh Engineering / Axima / Icop

BUREAU D'ÉTUDE D'EXÉCUTION MASSIF ET VOIES ROULEMENT DU PORTIQUE : Setec tpi

BUREAU D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES : Terrasol

BUREAU D'ÉTUDE CONTRÔLE EXTERNE MASSIF : Biep

BUREAUX DE CONTRÔLE : Socotec et Apave

BUREAU GÉOTECHNIQUE G4 : Geotec Guyane

ABSTRACT

LAUNCHING INFRASTRUCTURE FOR THE ARIANE 6 ROCKET AT KOUROU

STEFAN BERNHARD, SETEC TPI - CÉCILE BABIN, SETEC TERRASOL - JULIEN BESNIER, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - FRÉDÉRIC CUFFEL, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - THOMAS THIBERGHEN, EIFFAGE INFRASTRUCTURES

The consortium led by Eiffage was awarded a contract by the Centre National des Études Spatiales (CNES) for infrastructure construction for the Ariane 6 launch system. This major project proved complex, due to its schedule, its multidisciplinary nature and the technical challenges inherent in this exceptional project. The technical challenge represented by the design and construction of the launching foundation block for the future rocket and the track for its portal structure was met by the teams of Eiffage Génie Civil and Setec tpi and Setec Terrasol. □

LA INFRAESTRUCTURA DE LANZAMIENTO DEL COHETE ARIANE 6 EN KOUROU

STEFAN BERNHARD, SETEC TPI - CÉCILE BABIN, SETEC TERRASOL - JULIEN BESNIER, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - FRÉDÉRIC CUFFEL, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - THOMAS THIBERGHEN, EIFFAGE INFRASTRUCTURES

El consorcio liderado por Eiffage ha obtenido el contrato de construcción de las infraestructuras de la unidad de lanzamiento del Ariane 6, otorgado por el Centro Nacional francés de Estudios Espaciales (CNES). Este importante proyecto presenta unas complejidades de planificación, multidisciplinariedad y técnicas inherentes a la excepcionalidad de una obra de este tipo. Los equipos de Eiffage Génie Civil y de Setec tpi y Setec Terrasol han aceptado el desafío técnico que representa el diseño y la construcción de la torre de lanzamiento del futuro cohete y la vía de rodadura de su pórtico. □



RÉGÉNÉRATION ET MODERNISATION DE LA LIGNE FERROVIAIRE DES HORLOGERS

AUTEURS : STÉPHANE CURTIL, DIRECTEUR GÉNÉRAL, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - LUCAS MAGNO ROCHA BOTELHO, INGÉNIEUR, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

INSCRITE DANS UNE TOPOGRAPHIE DE MONTAGNE, LA LIGNE FERROVIAIRE RÉGIONALE TER N°872000, CONNUE SOUS LE NOM "LIGNE DES HORLOGERS", DESSERT LES DEUX GRANDES CAPITALES DE L'HORLOGERIE : BESANÇON EN FRANCE ET LA CHAUX-DE-FONDS EN SUISSE. LA SÉCURISATION DU PREMIER TRONÇON DE LA LIGNE VIS-À-VIS DES RISQUES GRAVITAIRES (CHUTE DE BLOCS EN VERSANT MAIS ÉGALEMENT EN TUNNEL NON REVÊTU) A ÉTÉ ENGAGÉE EN MARS 2021 SIMULTANÉMENT AUX TRAVAUX DE RÉGÉNÉRATION VOIE-BALLAST ET DE MODERNISATION DES ÉQUIPEMENTS.

MODERNISATION DE LA LIGNE DES HORLOGERS : UN CHANTIER D'ENVERGURE AJUSTÉ COMME UNE MONTRE SUISSE

LE PROJET

La modernisation de la Ligne des Horlogers fait partie des priorités partagées entre l'État et la Région Bourgogne-Franche-Comté en raison de son potentiel de transfert modal pour les territoires ainsi que son caractère transfrontalier. Les travaux de régénération et de modernisation sont réalisés avec une coupure complète de la ligne. Ils prévoient principalement la régénération voie/ballast, la mise

1- Purge manuelle de la tranchée rocheuse.

2- Exemple de masse instable le long de la voie ferrée.

1- Manual removal of rock trench.

2- Example of unstable mass along the railway track.

en œuvre de nouveaux équipements de signalisation et des travaux de réduction des risques liés à la chute de blocs, permettant d'améliorer la performance nominale de la ligne par l'augmentation de la fréquence des trains et de leur vitesse. Ces travaux sont divisés en deux phases : la première en 2021 et la deuxième programmée en 2024.

En tant que maître d'ouvrage, SNCF Réseau a confié la maîtrise d'œuvre à Ingérop et Geos Ingénieurs Conseils et la réalisation des travaux à un groupement composé de Eiffage (mandataire), Ftta et Aevia. Colas Rail intervient dans la modernisation de la voie ferrée.

Après avoir conduit les études de conception géotechnique, Geos Ingénieurs Conseils assure la supervision géotechnique des études et de l'exécution du chantier au sein de la maîtrise d'œuvre, aux côtés d'Ingérop.

ÉTAT DES LIEUX

L'inspection détaillée des 58 km de la ligne par SNCF Réseau avait révélé l'existence de points singuliers et dégradations pouvant réduire le niveau de sécurité des ouvrages, tels que :

- Des pièges à cailloux en limite de capacité ;
- Des états de dégradation avancée de murs de soutènements en pierres, quelques-uns présentant des instabilités et des déformations très excessives ;
- Des zones d'aléas élevés de chute de pierres, blocs et masses sur la voie ferrée le long de plusieurs tranchées rocheuses et versants (figure 2). Des épisodes de chute de blocs sur les voies se sont produits à plusieurs reprises ces dernières années, pour des volumes faibles à moyens, laissant craindre une aggravation des risques ;
- Différentes instabilités présentes dans les tunnels au rocher et en maçonnerie : zone avec "son creux" caractérisant un début de décollement de masse rocheuse ou de vieillissement de maçonnerie, zone décomprimée (voir vides derrière les maçonneries), zone avec arrivée d'eau en tunnel, etc.



TRAVAUX DE CONFORTEMENT ET CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

Les travaux dans le domaine géotechnique concernent les ouvrages en terre, les parois rocheuses et les tunnels.

Les techniques de travaux spéciaux géotechniques sont adaptées aux différents sites et aux différents contextes techniques identifiés en phase de diagnostic. Ainsi, la phase de conception prévoyait les techniques suivantes dont certaines ont fait l'objet d'adaptations dans le cadre des missions géotechniques G3 (études d'exécution) et G4 (supervision de l'exécution) :

- Purges manuelles et micro-minage de blocs instables ;
- Mise en place de grillages pendus et plaqués ;
- Mise en place d'écrans pare-blocs lorsque les aléas de départ ne pouvaient être réduits ;
- Mise en place de parement en béton projeté associé à des ancrages passifs ;
- Réalisation de parois clouées ;
- Confortement ponctuel des masses rocheuses instables par clouage, câblage et emmaillotage ;
- Réalésage des tunnels pour en augmenter le gabarit avec confortement par coque en béton armé ou béton fibré projeté.



3 © GECS INGÉNIEURS CONSEILS

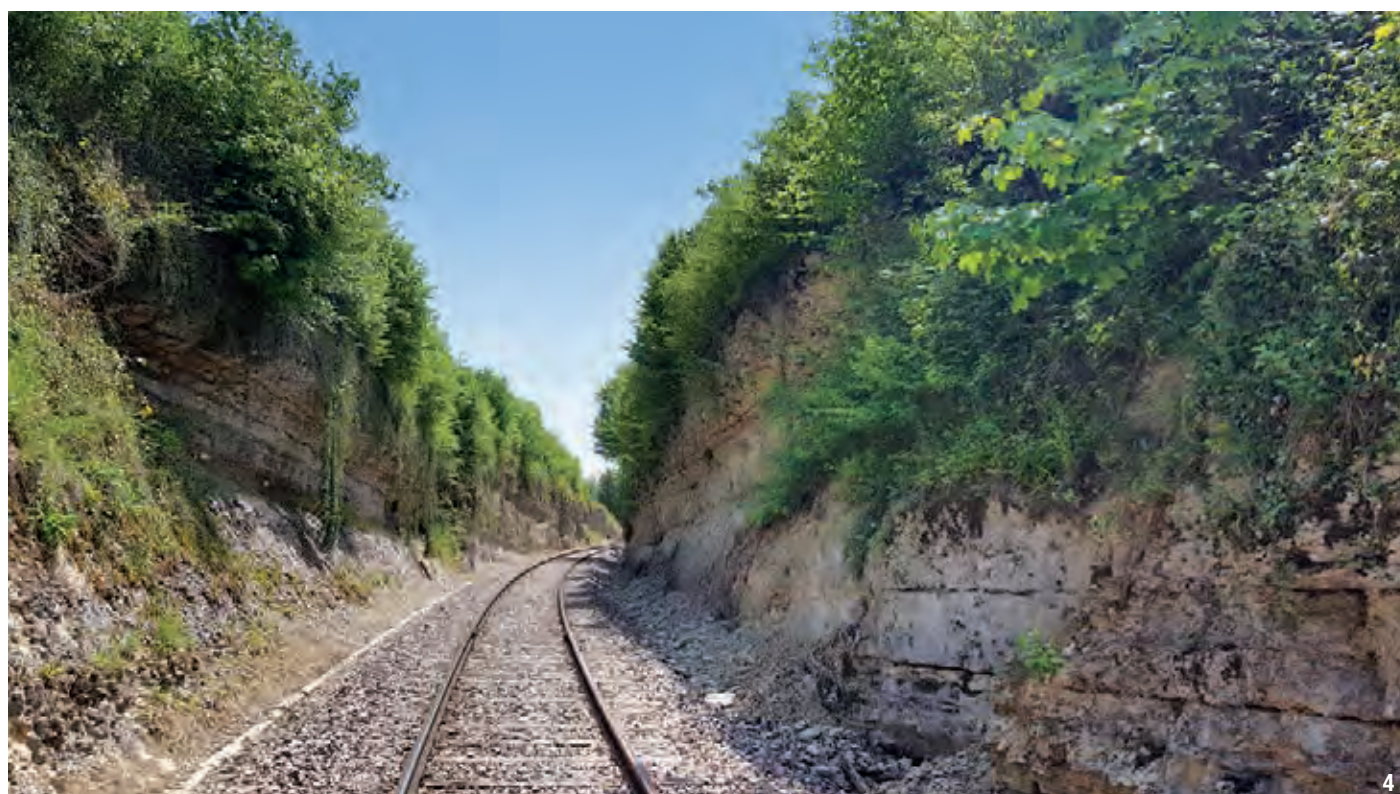
CONCEPTION EN PHASES AVANT-PROJET ET PROJET

Une partie des travaux à réaliser a été définie à dire d'expert après examen et relevé des contextes géologiques, géotechniques et structuraux des versants, falaises et talus rocheux.

Pour le dimensionnement des ouvrages les plus complexes, la réalisation de visites de terrain et les échanges avec les experts de SNCF Réseau ont permis de confronter les avis afin d'établir des hypothèses de conception fiables pour les études d'avant-projet, puis de projet. Dans les zones de la voie soumises aux plus forts aléas de chute de blocs rocheux, Geos a conduit des études structurales et relevés géologiques identifiant les principales masses rocheuses instables. Les analyses trajectographiques ont ensuite permis la définition des aléas de propagation

**3- Grillage pendu.
4- Végétation en partie supérieure présentant des espèces dites "parapluies".**

**3- Hanging wire netting.
4- Vegetation in the higher part showing so-called "umbrella" species.**



4 © GECS INGÉNIEURS CONSEILS

dans les versants et les dimensionnements de travaux de parades passives. Dans certaines zones de talus et versants, la couverture de végétation ne permettait pas la réalisation d'un diagnostic totalement fiable de telle sorte qu'il était prévu des compléments de diagnostics géotechniques en phase de préparation des travaux et des adaptations locales du périmètre des interventions de sécurisation.

RÉALISATION DES TRAVAUX

Sur l'ensemble des 58 km, plusieurs zones de confortement ont été définies grâce aux conclusions des inspections historiques de SNCF Réseau, complétées par les diagnostics géotechniques ponctuels de Geos.

Avant toute intervention lourde sur les talus et versants, une mise en sécurité préalable a été systématiquement réalisée par purge manuelle des blocs instables.

PURGES

Des purges systématiques de mise en sécurité des versants et talus rocheux sont conduites avant la réalisation des travaux de confortement. Il s'agit d'une première action d'amélioration des conditions de la stabilité du site, permettant en même temps un diagnostic plus détaillé des conditions locales de fracturation du massif rocheux et une adaptation des travaux envisagés en conception.

La purge consistait à détacher les éléments instables qui peuvent se décrocher facilement manuellement ou à l'aide de pinces à purger (figure 1). Malgré la simplicité de la technique, il s'agit



5 © GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

5- Forage pour mise en place des ancrages.

6- Gabions en tête de tunnel de Tounay.

5- Drilling for placing anchors.

6- Gabions at the Tounay tunnel portal.

d'une méthode de confortement primaire importante et efficace puisqu'elle permet de réduire très fortement les risques liés à l'altération météorique de surface du massif rocheux fracturé. Pour les volumes rocheux instables plus importants ne pouvant être mobilisés manuellement et pour lesquels un

confortement actif s'avère très onéreux, il a été réalisé des opérations de fragmentation par micro-minage. Cette technique permet de fragmenter la masse, limitant ainsi à la fois les distances de propagation dans les versants et les risques de dégâts à l'aval. Ces travaux ont principalement été mis en œuvre au niveau du versant de l'Essart, où la zone de départ est située en partie sommitale du versant à forte pente formant des couloirs d'accélération exposant à la fois la voie SNCF et la route départementale D461 qui conduit à la frontière Suisse.

GRILLAGES

La mise en place de grillage sur le talus de déblai protège les infrastructures situées à l'aval contre les chutes de pierre. La définition des zones à traiter avec un grillage plaqué ou pendu se

fait par analyse multicritère intégrant : l'état d'altération du massif rocheux en surface, la distance vis-à-vis de la voie et la présence d'autres types de protections passives tels que piège à cailloux. Dans le cas d'un grillage pendu, les instabilités rocheuses de taille réduite descendent vers le bas de la paroi rocheuse en restant entre la paroi et le grillage (figure 3) : ce système n'a pas de vocation confortative. Les instabilités qui dépassent la capacité des grillages sont traitées préalablement par purges et confortements ponctuels. Cette technique a été développée entre autres sur les sites de Près-Vuillins et de Remonot. Le grillage plaqué, quant à lui, est un système de protection actif qui confine le massif rocheux fracturé et évite la chute de pierres et blocs de tailles moyennes (< 500 litres). Le grillage est fixé sur des ancrages réalisés en tête, en pied mais également dans la paroi rocheuse. Cette technique a été développée par exemple sur les sites de Lachenoy et de Villers-le-Lac.

L'ensemble des ancrages est défini sur la base d'un plan de principe, à l'aide d'une représentation simplifiée de la géométrie de la paroi selon des mailles et longueurs adaptées au contexte géométrique et structural : ancrages en tête de 4 m espacés de 3 m, ancrages en pied de 2 m espacés de 4 m et ancrages de placage de 3 m selon une densité de 9 à 12 m².

Les implantations théoriques des ancrages sont ensuite adaptées sur site aux conditions réellement rencontrées. Les plans d'exécution sont mis à jour après validation par la mission géotechnique G4.

Aux adaptations liées au contexte structural local s'ajoutent les contraintes environnementales, notamment pour le confortement des tranchées rocheuses telles que :

→ La présence d'anciens nids de grands corbeaux dans la tranchée d'Orchamps Vennes. Les écologues mobilisés concluent que ces nids peuvent éventuellement servir pour d'autres espèces, ainsi une méthodologie d'adaptation du grillage a donc été proposée.

→ La découverte au sommet de la tranchée rocheuse d'Epenoy d'une espèce dite "parapluie", protégée (figure 4), qui a imposé l'adaptation des travaux avec remplacement du retalutage par un confortement par grillage plaqué (ancrages limités à 2 m pour ne pas fragiliser la roche et créer une ligne de prédécoupage) précédé de purges manuelles. ▷



6 © GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

VOILES EN BÉTON PROJETÉ ET ANCRAGES

Le confortement de quelques murs anciens en pierres sèches et pierres appareillées a été réalisé avec un parement en béton projeté ancré et armé de treillis soudés. Des barbacanes drainent ces ouvrages. Ce type de confortement peut être observé sur le mur au PK 411+345 (figure 5), dans le site de l'Hôpital du Grosbois ainsi que sur le mur au PK 410+909. Certains murs fortement déformés ont été cloués avec des croix de Saint-André en surface.

PAROIS CLOUÉES

Les murs présentant des signes de vieillissement important et des instabilités, constituant un risque significatif pour la voie ferrée et son voisinage, ont été confortés par clouage associé à un nouveau parement. Il s'agit principalement :

→ Du mur au PK 410+831, surplombant la RD 571, qui présente des bombements sur deux zones distinctes, pour des surfaces localisées d'environ 5 m² au niveau desquelles les moellons ne sont retenus que par des grillages. Aucun système de drainage n'existait sur l'ouvrage.



© GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

7- Écran pare-blocs à Lachenoy.

8- Réalisation des forages pour confortement actif dans le versant de l'Essart.

9- Confortement actif par la mise en place de 10xHA40.

7- Rock fall protection barrier at Lachenoy.

8- Execution of drill holes for active consolidation in the Essart slope.

9- Active consolidation by placing 10xHA40.

→ Des murs formant la tête du tunnel de Tounay (côté Besançon), pour lesquels un confortement par gabions avait été effectué en urgence par SNCF Réseau pour essayer de stopper le mouvement (figure 6).

Cette technique garantit la stabilité et la sécurité à long terme des ouvrages sans maintenance future.

Afin de limiter les effets destructurant des vibrations de forage sur les

ouvrages déjà fragiles, le confortement débute par la réalisation d'une première couche en béton projeté de confinement avant la réalisation des ancrages.

ÉCRANS PARE-BLOCS

Dans les zones où la topographie à l'amont de la voie ferrée présente à la fois des falaises naturelles avec production importante de blocs et des couloirs d'accélération, des modélisa-

tions de trajectographies de blocs ont été conduites pour quantifier les risques et évaluer l'aléa de propagation et les énergies résiduelles des blocs.

Les analyses numériques prennent en compte, entre autres, différents profils géométriques de couloir, les natures de sol pour la définition des coefficients de rebond, la densité de la végétation et l'éloignement de la voie ferrée. Avec un volume de départ de blocs com-



© GEOS INGÉNIEURS CONSEILS



© GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

10- Mise en place de treillis soudés et bandes drainantes avant béton projeté.

10- Positioning welded mesh and drainage strips before shotcreting.

pris entre 1 et 2 m³, plus de 200 000 simulations de départs possibles sont étudiées.

Selon l'aléa résultant, des parades passives de sécurisation de type écrans pare-blocs sont préconisées pour ramener l'aléa résultant à un niveau faible. Ces ouvrages sont présents sur les sites de Remonot et de Lachenoy (figure 7) et sur le versant de l'Essart : il s'agit de filets (avec ou sans dissipateurs) associés à des ancrages scellés dans la roche et dimensionnés à l'ELU en situation accidentelle conformément à la norme NF P 94-262.

CONFORTEMENT PONCTUEL

Sur certains sites faisant l'objet de travaux de réduction des risques rocheux, on a identifié quelques masses rocheuses de plusieurs dizaines de mètres cubes avec un niveau de sécurité non satisfaisant. Lorsque leur géométrie, leur structure ou leur position dans le versant n'étaient pas compatibles avec un minage en masse, elles ont été traitées par confortement ponctuels associant principalement des ancrages et des câbles provisoires et/ou définitifs. Des confortements ponctuels non prévus initialement ont été également engagés à l'avancement des travaux lorsque des masses instables ont été identifiées lors des travaux de purge et de débroussaillage.



10 © GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : SNCF Réseau
MAÎTRE D'ŒUVRE : Ingérop - Geos Ingénieurs Conseils
ENTREPRISE : Eiffage / Ftta / Aevia / Colas Rail
MISSION G3 : ÉTUDES GÉOTECHNIQUES D'EXÉCUTION : Arias Montagne / Lombardi
MISSION G4 : SUPERVISION GÉOTECHNIQUE DE L'EXÉCUTION : Geos Ingénieurs Conseils

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 55,5 M€ cofinancés par l'État et la Région Bourgogne-Franche-Comté
- 1,5 M€ pour rendre accessibles à tous les gares de Morteau et Valdahon
- 5 M€ pour moderniser la signalisation
- 35 km de voies renouvelées
- 11 tranchées rocheuses sécurisées par grillages
- 3 murs de soutènement confortés par clouage et parement
- 3 tunnels confortés par clouage et coque en béton projeté
- 22 entreprises contribuant au chantier

Ce mode de confortement est visible sur plusieurs zones de travaux, mais est particulièrement présent dans les derniers kilomètres de la ligne avant la frontière suisse, sur le Versant de Lachenoy et sur celui de l'Essart (figures 8 et 9).

Sur certains sites, cette technique a été aussi associée à des écrans pare-blocs : l'objectif étant à la fois de limiter les énergies à prendre en compte dans le dimensionnement des écrans et de réduire la fréquence des événements, espaçant ainsi les opérations d'entretien.

TUNNELS

Les travaux de régénération en tunnels se sont concentrés sur les tunnels des Remonot (279 m) et de Lachenoy (406 m). Le programme des travaux prévoit principalement :

- Le rescindement par fraisage de certaines parties sur des épaisseurs pouvant aller jusqu'à 20 cm dans les zones non revêtues afin d'augmenter le gabarit ;
- La mise en place d'une coque en béton projeté armé ou fibré de 10 cm d'épaisseur (figure 10), d'auréoles d'ancrages HA25 selon une maille de 4 m² et d'un système de drainage par bandes drainantes.

En cours de travaux dans le tunnel de Lachenoy, il a été identifié une cloche de fontis de hauteur variable de plusieurs dizaines de m³. Son comblement a été effectué avec une résine expansive associée à la mise en place d'ancrages passifs.

L'environnement écologique des tunnels a conduit à adapter le planning et les méthodologies des travaux pour prendre en compte la présence de chauves-souris en hibernation notamment pour les interventions dans le tunnel de Remonot, avec une dérogation pour réalisation des confortements. □

ABSTRACT

RENOVATION AND MODERNISATION OF THE HORLOGERS RAILWAY LINE

STÉPHANE CURTIL, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - LUCAS MAGNO ROCHA BOTELHO, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

Eight months to perform the renovation and modernisation works on the "Horlogers" cross-border railway line between France and Switzerland, that was the challenge met to improve its safety and performance and thereby help meet the objective shared by SNCF Réseau, central government and the Region of encouraging the transfer of traffic to the railways. At the same time, work to change tracks and ballast and modernise equipment, and special geotechnical work was a feature of the project, including rock removal and micro-blasting, consolidation of rock masses, passive security measures using rock fall protection barriers, soil-nailed walls to strengthen the retaining structures, and shotcrete shells in tunnels. □

REGENERACIÓN Y MODERNIZACIÓN DE LA LÍNEA FERROVIARIA DE LOS HORLOGERS

STÉPHANE CURTIL, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - LUCAS MAGNO ROCHA BOTELHO, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

Ocho meses para realizar las obras de regeneración y modernización de la línea ferroviaria transfronteriza de los Horlogers: este el desafío asumido para mejorar la seguridad y las prestaciones de la línea, y contribuir así al objetivo común de SNCF Réseau, el Estado y la región de favorecer la reorientación del tráfico hacia el tren. Paralelamente, se ha decidido llevar a cabo obras de cambio de vías y balasto, modernización de los equipos y obras especiales, con purgas y micro-minados, estabilizaciones de macizos rocosos, actuaciones pasivas mediante pantallas parabloques, pantallas clavadas de refuerzo de los elementos de contención y revestimientos en hormigón proyectado en el túnel. □



NOUVEAU CENTRE HOSPITALIER PRINCESSE GRACE À MONACO - FIN DES TRAVAUX DE FONDATIONS SPÉCIALES

AUTEUR : SAMIA MOUNIR, INGÉNIEUR TRAVAUX, SEFI-INTRAFOR

EN PLEIN CŒUR DE MONACO, LE CENTRE HOSPITALIER PRINCESSE GRACE (CHPG) EST EN PLEINE TRANSFORMATION. AFIN DE CONSERVER SON NIVEAU D'EXCELLENCE ET DE RÉPONDRE AUX BESOINS DE LA POPULATION MONÉGASQUE COMME DU BASSIN DE PROXIMITÉ, LA PRINCIPAUTÉ A ENTREPRIS LA CONSTRUCTION UN NOUVEAU COMPLEXE HOSPITALIER PLUS MODERNE ET PLUS GRAND SUR LE SITE ACTUEL. LE PHASAGE DES TRAVAUX A ÉTÉ PENSÉ DE MANIÈRE À POURSUIVRE L'ACTIVITÉ DE SOINS AU CHPG. POUR SEFI-INTRAFOR, IL S'AGIT D'UN CHANTIER EN 3 ÉTAPES - 2016, 2017 ET 2021 - POUR RÉALISER LES PAROIS MOULÉES PÉRIPHÉRIQUES ET LES BARRETTES DE FONDATION DES FUTURS BÂTIMENTS ET LEUR PARKING. LA TROISIÈME INTERVENTION S'EST ACHEVÉE EN AOÛT 2021.

1- Levage de la cage en vue du liaisonnement par barres HA.
2- Situation chantier en aval du CHPG.

1- Lifting the rebar cage for connection by HA bars.
2- Project location downstream of the CHPG.

CONTEXTE GÉNÉRAL

Le projet prévoit la construction d'un nouveau complexe hospitalier sur 10 niveaux et 6 niveaux de parking. Le niveau rez-de-chaussée RC du projet est calé à la cote 81,30 m NGM tandis que le dernier niveau de sous-sol H est à la cote 44,97 m NGM, soit à environ 9 m de profondeur par rapport au niveau actuel de l'accès chantier par l'avenue Pasteur-Bas. Le projet est situé à proximité du tunnel Evos en cours de creusement à l'explosif, et d'ouvrages existants, en particulier le cimetière de Monaco et l'Athanée, l'ensemble résidentiel des Tamaris, le tunnel descendant Albert II et l'actuel hôpital mitoyen. Le quartier



2
© FRÉDÉRIC CADET

est très fréquenté de par la présence de l'hôpital et du cimetière, avec une circulation importante de piétons, bus et automobiles.

Les travaux ne doivent perturber ni les riverains ni les patients de l'actuel hôpital en service. Des capteurs acoustiques sont posés sur les bâtiments alentour afin de s'assurer que les nuisances ne dépassent pas les seuils autorisés selon des tranches horaires définies. Des restrictions plus sévères étaient appliquées pour les samedis et les jours fériés monégasques.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Le NCHPG est situé à flanc de colline, en aval de l'actuel CHPG (figure 2). Cette implantation particulière a nécessité des fondations sur-mesure, calquée sur la géologie non linéaire rencontrée.

La carte isohypse du toit du substratum (figure 3), issue de la mission G5 réalisée par Fondasol, illustre bien ce besoin, encore plus marqué sur la paroi moulée Nord (dit "ouvrage 14"), qui présente de nombreux points singuliers (figure 4). Les couches de terrain ont des épaisseurs variables, certaines couches pouvant être absentes d'un panneau à l'autre (c'est le cas des brèches).

3- Carte isohypse du toit du substratum.

4- Schématisation sondages et coupe géotechnique G-G' (à l'extrême est du projet).

3- Isohypse map of the substratum roof.

4- Schematic representation of test boring and geotechnical section G-G' (at the extreme east of the project).

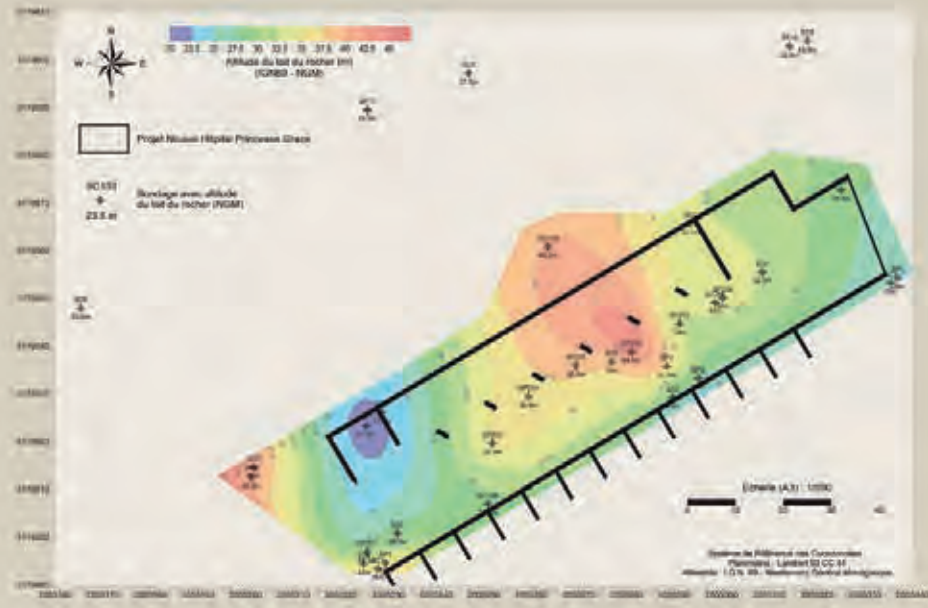
Des campagnes de reconnaissances (Sols Essais, Fondasol) ont visé à déterminer la position, la nature et la continuité du substratum, et par la même occasion, la position affinée de la couche d'ancrage des fondations et parois moulées (marno-Calcaire (5)). Les sondages réalisés lors de ces investigations ont permis de mettre en évidence le contexte géologique suivant, depuis le niveau du terrain naturel :

- **Remblais** (1) ;
- **Éboulis** (2A et 2B) : hétérogénéité très marquée, avec des variations rapides latérales de faciès (faciès argileux pour éboulis argileux et faciès caillouteux pour éboulis à blocs, avec des masses calcaires de très forte taille présentant une compacité, une dureté et une abrasivité très marquées) ;
- **Brèches** (3) : de pente ou tectoniques de contact (plus ou moins cimentées, d'origine marno-calcaire ou calcaire) ;
- **Marnes et marno-calcaires altérés** (4) : altération des marnes et formations d'âge Miocène (sables et argiles marnieuses à inclusions de bancs sableux) ;
- **Marno-calcaire** (5) : argiles et marnes de couleur noirâtre et marno-calcaires d'âge Crétacé ;
- **Calcaire** (6) d'âge Jurassique ;

À noter que la plateforme principale pour la paroi moulée Nord étant située à 61,35 m NGM, la formation remblais n'a pas été rencontrée pendant les travaux de forage.

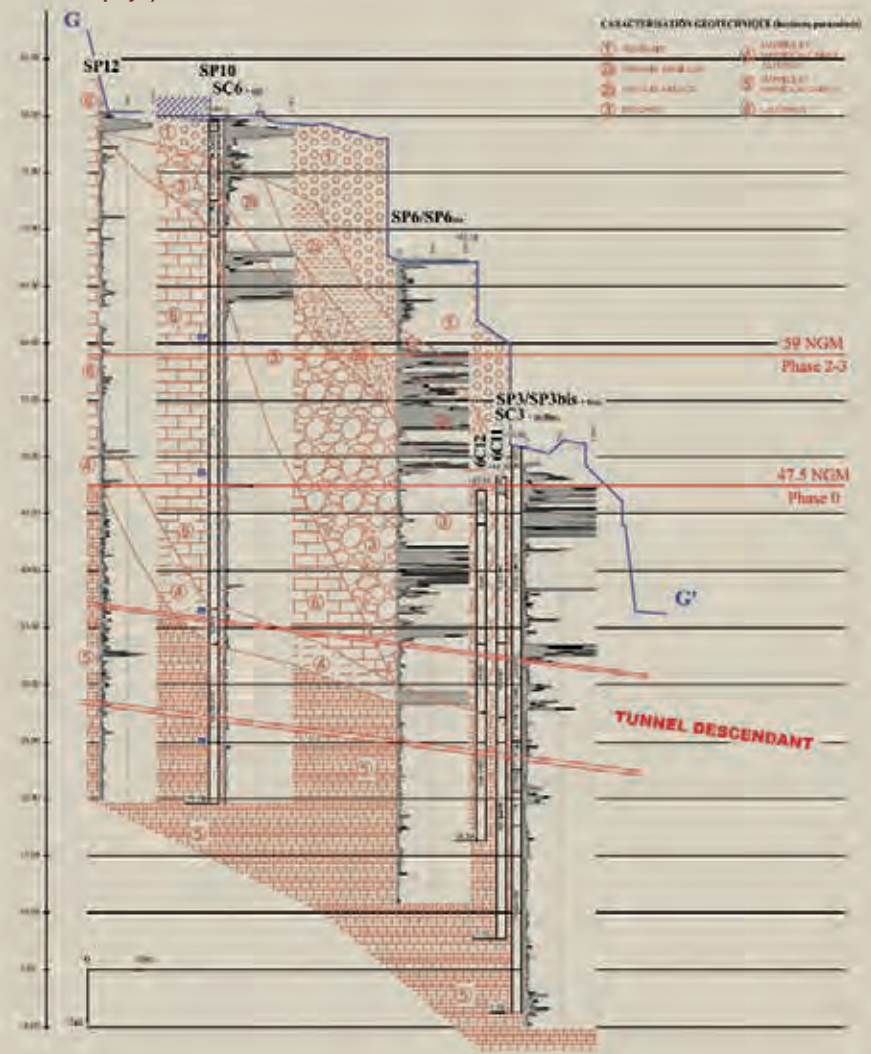
D'après les mesures des piézomètres et des capteurs de pressions interstitielles, il semblerait que la nappe phréatique se situe sensiblement au toit du substratum ou au sein de ce dernier (le substratum étant constitué des couches 4, 5 et 6).

CARTE ISOHYPSE DU TOIT DU SUBSTRATUM



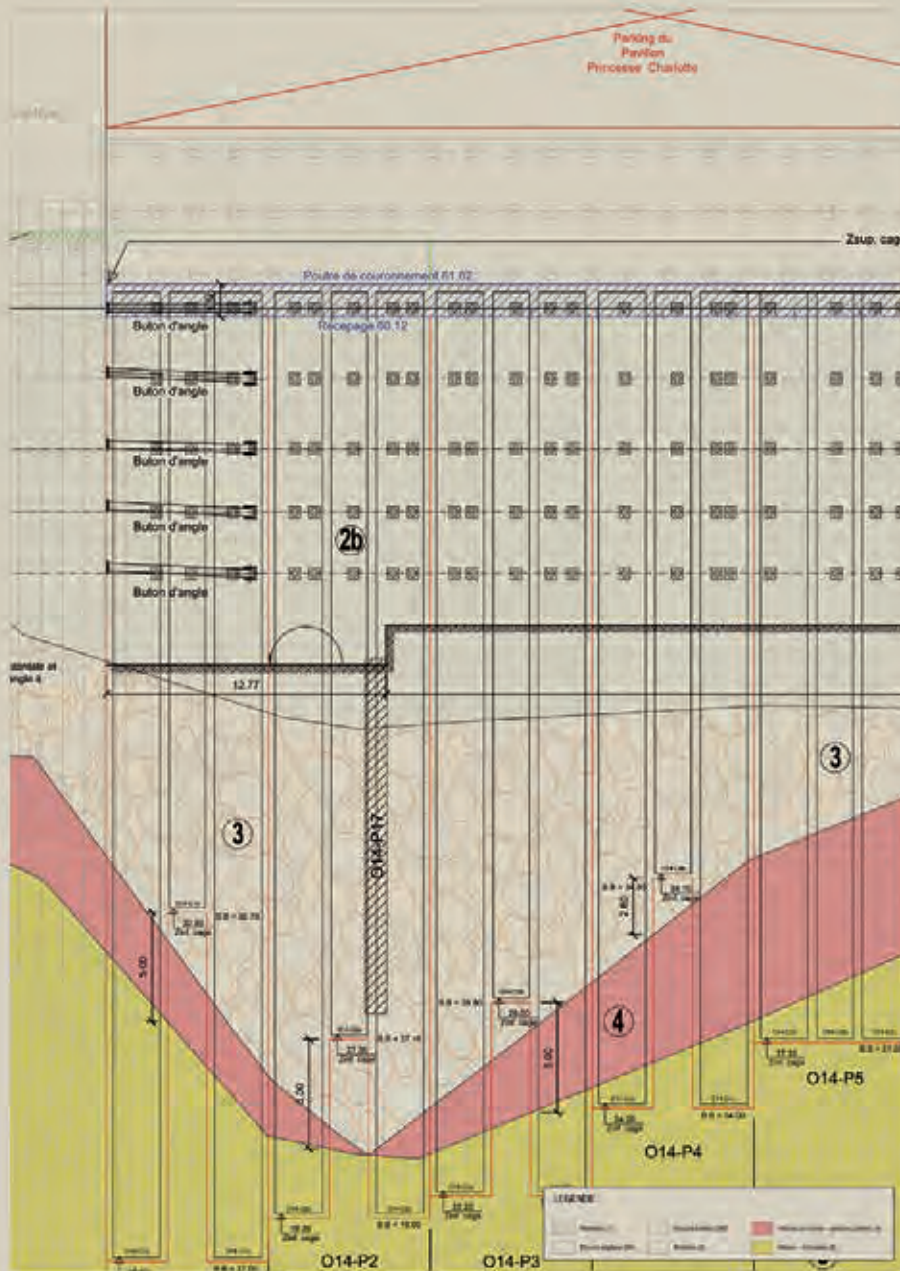
3 © FONDASOL

SCHÉMATISATION SONDRAGES ET COUPE GÉOTECHNIQUE G-G' (à l'extrême est du projet)



4 © SOLS ESSAIS

EXTRAIT PLAN ÉLEVATION SUR PANNEAU O14-P1 À O14-P5



5- Extrait plan élévation sur panneau O14-P1 à O14-P5.

6- Plan de plateformes.

5- Excerpt from elevation plan on panel O14-P1 to O14-P5.

6- Drawing of platforms.

Il existerait donc de manière schématique :

- Des écoulements perchés dans la masse d'éboulis ;
- Des écoulements au toit du substratum formant la nappe de versant ;
- Des écoulements au sein du substratum ;
- Des alimentations parasites provenant de vidanges de siphons karstiques ou via des zones de failles ou de contacts géologiques.

Ce contexte hydrologique est pris en compte par la réalisation de panneaux en "jambes de pantalon" (figure 5) : le merlon central est arrêté plus haut que les passes latérales fichées elles dans le substratum marno-calcaire. Des "lucarnes" sont ainsi créées dans des horizons de plus forte perméabilité, ce qui permet la continuité des écoulements des eaux d'infiltration dans le massif (transparence hydraulique).

LES TRAVAUX RÉALISÉS PAR SEFI-INTRAFOR EN 2021

Conformément aux préconisations du bureau d'études géotechniques et du bureau d'études de calculs, Sefi-Intrafor a réalisé une paroi moulée d'épaisseur 1,0 m sur le linéaire Nord, ainsi que des couteaux latéraux et des barrettes unitaires de fondations. Chaque panneau est armé de 3 cages d'armatures liaisonnées entre elles tel que prévu par le modèle de calculs. Ces parois moulées et barrettes ont une fonction de soutènement des terres et de structure porteuse en reportant les charges dans le marno-calcaire sain, constituant la couche d'ancrage. Compte-tenu de la géologie non linéaire, les parois moulées sont fichées à des profondeurs variant de 31,25 m à 47,10 m, soit à des cotes variant de 29,67 à 16,90 m NGM (pour un fond de fouille situé au plus bas à 44,22 m NGM). La topographie du site et le phasage du projet ne permettant pas de réaliser les travaux depuis une plateforme unique, ▷

PLAN DE PLATEFORMES



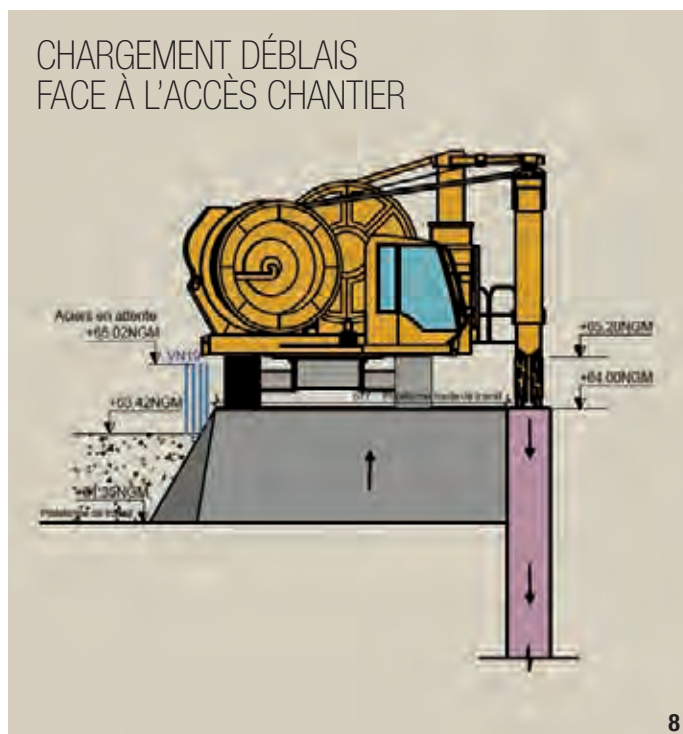
6



7 © PASCAL CHEDEVILLE

le chantier était organisé schématiquement comme suit, en tenant également compte de la présence de butons provisoires (figure 6) :

- Une emprise Sud comprenant la centrale de fabrication et le stockage de la boue bentonitique (13 silos de 60 m³ de boue liquide et 1 silo de 40 m³ de bentonite vrac). Cette emprise est découpée en 4 zones successives pour suivre un dénivelé d'environ 2,5 m sur le linéaire.
- Une emprise Sud-est pour la centrale cutter et sa fosse à déblais située à proximité de l'unique accès chantier au sud (figure 7).
- Une rampe reliant l'accès chantier sud à la plateforme principale Nord située environ 7 m plus haut. Cette rampe, d'une pente allant jusqu'à 23%, constituait notamment l'accès des toupies lors des bétonnages de parois moulées.
- Une plateforme travaux principale Nord d'environ 90 m de long par 17 m de large.
- Une plateforme travaux secondaire Nord-ouest d'environ 15 m de long par 7 m de large, située 3 m plus haut que la plateforme principale. Cette plateforme provisoire surélevée servait à la réalisation de 2 panneaux de parois moulées en échappant à des armatures



8 © SAMIA MOUNIR

en attente d'un voile coulé dans une phase de travaux précédente (figure 8). Elle est démontée à la fin du bétonnage des 2 panneaux pour allonger la plateforme travaux principale et permettre la suite des travaux de génie-civil par Satri (figure 9).

Le phasage des travaux a été défini en amont pour répondre au mieux aux contraintes suivantes :

- Chacun des panneaux à réaliser est unique du fait de la géologie rencontrée (les profondeurs des passes sont quasiment toutes différentes) et des descentes de charges appli-

7- Plateforme surélevée.
8- Chargement déblais face à l'accès chantier.

7- Elevated platform.
8- Loading excavated material opposite the worksite access.

quées (la note de calculs donne des sections d'acier différentes d'un panneau à l'autre, y compris pour le liaisonnement des cages entre elles). Cela signifie qu'aucune cage n'est identique, ce qui rend particulièrement difficile la modification de dernière minute de l'ordre de réalisation des panneaux, ou vraiment à la marge.

- L'emprise étant exigüe, il ne sera pas possible de stocker les armatures de plusieurs panneaux sur site (entre 9 et 13 éléments au total par panneau courant). L'accès chantier est par ailleurs unique et partagé entre les différents acteurs du chantier.
- Il est demandé par la maîtrise d'œuvre d'éviter l'ouverture simultanée de deux panneaux au droit de la paroi tirantée située contre la paroi moulée (moitié ouest), afin de



© JIMMY VELLAR
9

préserver son intégrité et de limiter les mouvements sur le parking de l'hôpital existant.

- La plateforme secondaire doit être libérée au plus tôt pour les travaux de génie civil de Satri.
- La zone doit être libérée au plus tôt pour démarrer la coactivité avec les travaux de pieux (figure 10).
- Pour optimiser la durée globale des parois moulées, les différents ateliers doivent travailler en même temps sur la plateforme en se gênant le moins possible, en tenant compte du cas particulier des barrettes situées dans la zone de croisement théorique des engins (figure 11).

Sefi-Intrafor s'installe sur le site du projet début mars 2021 pour démarrer les travaux d'injections, la réalisation des murettes-guides et l'installation des ateliers de parois, en coactivité avec la fin des travaux de paroi tirantée et de terrassement (figure 12). ▷

9- Vue plate-forme globale.

10- Bétonnage pieu à la pompe à béton au-dessus du forage de paroi moulée.

11- Forage barrette au milieu de la plateforme.

9- Overall platform view.

10- Pile concreting by concrete pump above the diaphragm wall drilling.

11- Barrette drilling in the middle of the platform.



10
© SAMIA MOUNIR



11
© SAMIA MOUNIR



12

© SAMIA MOUNIR

Ces injections avaient pour but de prévenir les risques de perte de fluide lors du forage des parois moulées et des barrettes.

Lors de ces injections préalables, des pertes ont été constatées à l'interface éboulis/brèches (environ 17-18 m de profondeur) et ont pu être traitées de manière satisfaisante à l'aide d'un coulis bentonite-ciment injecté en gravitaire puis sous pression. Sur le panneau P14 situé à l'extrême-est de la paroi moulée Nord, des pertes plus superficielles (à partir de 5 m) mais néanmoins importantes au sein des éboulis à blocs ont été rencontrées et traitées de la même façon. Il s'est avéré que ce panneau est situé dans une zone de faille car, lors de son forage, la boue s'est écoulée brutalement dans le tunnel Evos situé en contrebas, jusqu'à se stabiliser à -5 m de la plateforme.

Le coulis injecté s'était bien imprégné entre les blocs mais, lors du forage au cutter, il est arrivé que certains d'entre eux se coincent dans les roues et soient extraits d'un seul tenant (figure 13), rouvrant alors une communication.

Cet incident a nécessité la fermeture du panneau à plusieurs reprises avec des matériaux tels que mortier, gravement et béton, sans parvenir à maîtriser définitivement l'écoulement avant le bétonnage total du panneau.

Le 8 avril, le premier coup de benne est donné alors que les travaux d'injections préalables, les murettes guides et la



13

© SAMIA MOUNIR

préparation de la plateforme en 40/80 se poursuit. Le premier bétonnage a lieu le 21 avril (figure 14). Pour ces travaux, l'atelier de paroi moulée a consisté en :

- Une grue treillis (Liebherr HS855 HS) équipée d'une benne lourde Stein pour les préforages ;
- Une grue treillis de manutention (Liebherr HS855 HD) équipée de

12- Coactivité murettes guides, injections préalables et paroi tirantée.

13- Bloc coincé dans roues du cutter.

12- Concurrent work on guide walls, preliminary injection and metal-tied wall.

13- Block trapped in cutter wheels.

32 m de flèche dimensionnée notamment pour le levage des cages en vue de leur liaisonnement (figure 1) et la manutention des palplanches équipées d'un joint WS (figure 15) ;

- Un mini-cutter MT130 + MBC30 aux dimensions compactes (6 m de haut ; 10,3 m de long et 6,70 m de large) adaptées à l'exiguïté de l'emprise. Ce dernier est alimenté par un powerpack pouvant être fixé à l'arrière ou latéralement à gauche, utile notamment sur la plateforme secondaire de faible largeur. Son fonctionnement silencieux est apprécié en milieu urbain, a fortiori à proximité de l'hôpital. Le mini-cutter se mettait en place dès la couche d'éboulis à blocs et forait jusqu'à la cote finale, puis effectuait la substitution en vue de l'équipement du panneau.



14

© SAMIA MOUNIR



15

© SAMIA MOUNIR

14- Premier bétonnage.
15- Vue sur joint waterstop.

14- First concreting.
15- View of waterstop joint.

Les 17 panneaux de parois moulées, d'une longueur de 7,38 m en section courante, et 6 barrettes unitaires ont été exécutées entre le 8 avril et le 19 août 2021, suivant une cadence d'un à deux panneaux par semaine (toutes dimensions confondues).

Le plus gros panneau coulé représentait 350 m³ de béton, la cage la plus lourde pesait 37 t. Des points de

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROIS MOULÉES ET BARRETTES (2021) :

- Épaisseur : 1,0 m
- Profondeur : variable de 17,8 m à 47,1 m (panneaux en "jambes de pantalon")
- Surface réalisée : 4 960 m²
- Volume béton : 4 675 m³
- Volume de terres excavé et évacué : 4 960 m³ en filière ISDI
- Armatures : 460 t

MONTANT GLOBAL DU MARCHÉ FONDATIONS

(interventions 2016, 2017 et 2021) : 12,5 millions d'€ HT

PRINCIPAUX INTERVENANTS

ENTREPRISE TITULAIRE DU MARCHÉ MLO1 (Phase 0 : Terrassement - Gros œuvre - Aménagements extérieurs) : Satri SAM

SOUS-TRAITANT PAROIS MOULÉES ET BARRETTES : Sefi-Intrafor

contrôle ont été mis en œuvre à chaque phase de production.

Les essais d'écrasement d'éprouvettes béton ont été réalisés par Ginger Cebtp, les essais soniques par Esiris. L'ensemble des résultats atteste de l'homogénéité du béton dans les panneaux et la conformité de la résistance attendue du béton fourni par Emt.

Pour tenir le planning serré imposé, les travaux ont été organisés en 2 postes de 7h à 21h, puis de 6h à 22h à partir de mi-juin, en conservant une activité à la journée tous les samedis et jours fériés autorisés sur toute la durée du chantier. Ils se sont achevés fin août 2021.

Supervisé par Frédéric Cadet, Samia Mounir, Serge Festoc et Smain Boudjemaï, le chantier a mobilisé une trentaine de personnes au plus fort de l'activité. □

ABSTRACT

NEW PRINCESS GRACE HOSPITAL CENTRE IN MONACO - COMPLETION OF SPECIAL FOUNDATION WORKS

SAMIA MOUNIR, SEFI-INTRAFOR

The latest work by Sefi-Intrafor on the project for the new Princess Grace Hospital Centre (CHPG) in Monaco involved execution of the northern part of the diaphragm walls and deep foundations (barrettes). This work took place after the deviation of traffic from Avenue Pasteur-Haut to the southern road bridge supported on deep foundations executed in 2017. This operation closes, in particular, the "box" formed by the enclosure of the future car park for the new CHPG. The work took place in a constrained environment: singular geology, excavation at the base of the existing hospital building, cramped available space and single access, concurrent work with the metal-tied wall retention, civil engineering, piling and earthworks teams. □

NUEVO CENTRO HOSPITALARIO PRINCESSE GRACE, EN MÓNACO - FINAL DE LAS OBRAS DE CIMENTACIÓN ESPECIAL

SAMIA MOUNIR, SEFI-INTRAFOR

La última intervención de Sefi-Intrafor en el proyecto del nuevo Centro Hospitalario Princesse Grace (CHPG), en Mónaco, consistió en la realización de la parte norte de las pantallas de hormigón y de los pilotes flotantes de cimentación. Estas obras se han llevado a cabo tras transferir la circulación de la avenida Pasteur-Haut a la obra de fábrica, sustentada sobre los pilotes flotantes de la parte sur, realizados en 2017. Esta operación permite principalmente cerrar la "caja" que constituye el recinto del futuro parking del nuevo CHPG. El entorno de las obras presentaba numerosas limitaciones (geología singular, excavación al pie del edificio existente del hospital, superficie de terreno exigua y acceso único), en el que han actuado conjuntamente los equipos de contención de la pantalla atirantada, ingeniería civil, pilotes y movimiento de tierras. □



1
© NGE

LE TALUS D'ÉTREMBIÈRES - A40 ANNEMASSE - GENÈVE : CONFORTEMENT PAR PIEUX D'UN REMBLAI AUTOROUTIER INSTABLE

AUTEURS : DINO MAHMUTOVIC, CHEF DE PROJET, EGIS - ROBIN PRUNEL, DIRECTEUR D'AGENCE, NGE FONDATIONS - MARC ORLANDINI, CHEF DE PROJETS INVESTISSEMENT, ATMB

LE CONFORTEMENT DU TALUS D'ÉTREMBIÈRES A NÉCESSITÉ LA RÉALISATION DE DEUX FILES DE PIEUX PROFONDS EN BÉTON ARMÉ DE DIAMÈTRE 1 000 mm, SOIT AU TOTAL 76 UNITÉS DANS UN CONTEXTE DIFFICILE, SUR UN SITE EXIGÜ, ENCLAVÉ ENTRE UNE LIGNE ÉLECTRIQUE HAUTE TENSION ET L'AXE AUTOROUTIER TRÈS FRÉQUENTÉ ANNEMASSE-GENÈVE. LES PIEUX ONT ÉTÉ RÉALISÉS AU KELLY AVEC TUBAGE L'AVANCEMENT. UNE APPROCHE CALCULATOIRE COMPLEXE A ÉTÉ APPLIQUÉE POUR LA JUSTIFICATION DE LA STABILITÉ AU SÉISME AVEC UN RAISONNEMENT EN DÉPLACEMENTS BASÉ SUR LA PRISE EN COMPTE D'ACCÉLÉROGRAMMES DE RÉFÉRENCE.

LE TALUS D'ÉTREMBIÈRES

Le remblai du verrou d'Étrembières est situé sur l'autoroute A40 sur l'axe Genève - Annemasse sous exploitation Atbm (Autoroutes et tunnel du Mont Blanc).

Ce remblai a été construit en 1972 et avait fait l'objet à l'époque de sa construction d'un glissement de terrain qui avait nécessité la modification

du projet initial avec la mise en place de solutions drainantes (tranchée drainante, drains, regards de visite) associées à un dispositif de surveillance de la piézométrie.

Une réactivation du glissement a été constatée au début des années 2000 aboutissant en 2008 à la réalisation de drains sub-horizontaux à la base du remblai. Cette solution s'étant avérée

1- Illustration de la proximité de l'autoroute et de la ligne haute tension.

1- Illustration of the proximity of the motorway and the high-voltage line.

insuffisante, des travaux de confortement plus importants consistant en la réalisation de 76 pieux en béton armé de diamètre 1 000 mm, disposés sur deux files, ont finalement été effectués en 2020. Cette solution technique avait pour objectif de stabiliser durablement le talus, mais également de pouvoir assurer sa pérennité en cas de séisme.



2- Vue aérienne du chantier.

3- Lithologie du talus d'Étrembières.

4- Exemple du calcul du déplacement du pieux par intégration de l'accélérogramme sismique.

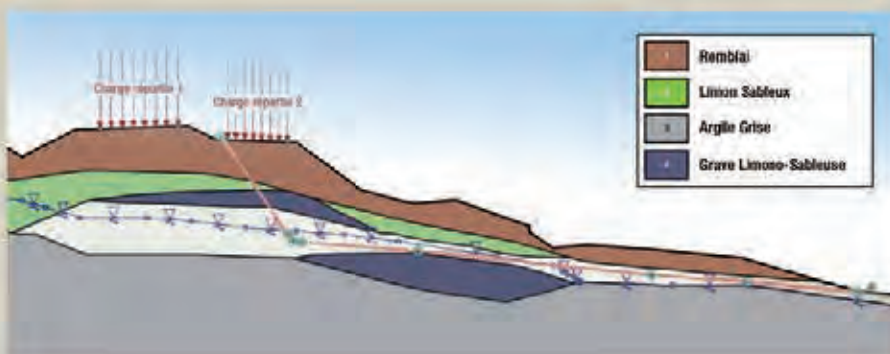
2- Aerial view of the site.

3- Lithology of the Étrembières embankment.

4- Example of pile displacement calculation by allowing for the seismic time history.

© NGE

LITHOLOGIE DU TALUS D'ÉTREMBIÈRES



© EGIS

EXEMPLE DU CALCUL DU DÉPLACEMENT DU PIEUX PAR INTÉGRATION DE L'ACCÉLÉROGRAMME SISMIQUE



© EGIS

D'un point de vue géométrique, le talus présente une dénivellation d'une quinzaine de mètres avec une risberme de 5 à 7 m de largeur à mi-hauteur. La présence d'une ligne haute tension est également à signaler à proximité immédiate du talus, ce qui implique des contraintes fortes sur les méthodes d'exécution.

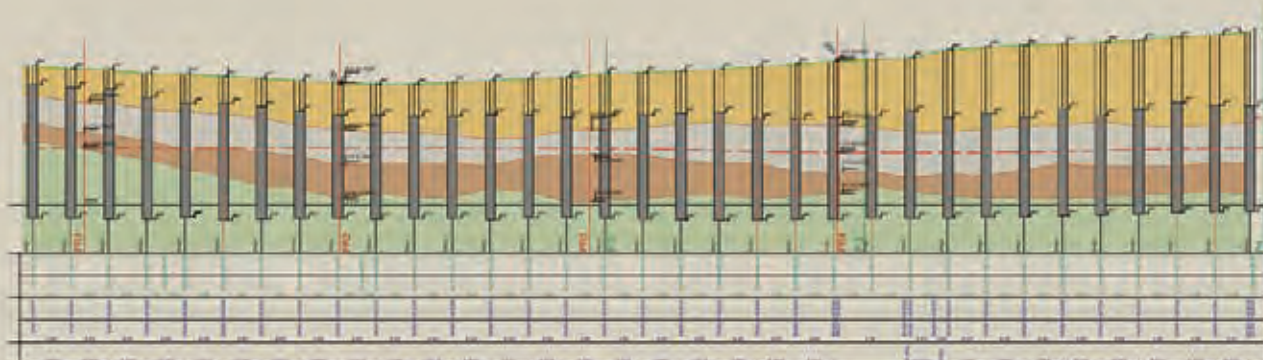
LE GLISSEMENT DE TERRAIN

Le contexte géologique du site consiste en un substratum molassique (grès et marnes) surmonté par des dépôts glaciaires plus ou moins éboulés représentés par un enchevêtrement de terrains de couverture hétérogènes (argiles, limons, sables et graves) (figure 3). Le glissement se situe principalement au niveau d'un faciès argileux cisailé ayant des caractéristiques résiduelles. La surface de glissement est plutôt plane à l'intérieur de cette formation argileuse qui agit comme une couche "savon" sous l'effet des surpressions interstitielles qui s'appliquent sous cette dernière. Le talus fait l'objet d'une surveillance régulière depuis plusieurs années par le biais d'une dizaine d'inclinomètres et piézomètres, permettant ainsi d'identifier avec précision le mécanisme de glissement.

LA CONCEPTION

Le principal enjeu de la conception de confortement est la prise en compte du séisme, qui est dimensionnant face aux sollicitations statiques. En effet, Étrembières se situe dans une zone sismique de niveau 4. ▷

VUE EN ÉLÉVATION AU NIVEAU DE LA FILE HAUTE DE PIEUX



5 © NGE

5- Vue en élévation au niveau de la file haute de pieux.

6- Vue aérienne de l'atelier de réalisation des pieux.

7- Pieux en cours d'excavation avec tubage à l'avancement.

5- Elevation view at the level of the top row of piles.

6- Aerial view of the pile construction unit.

7- Piles undergoing excavation with tubing as work progresses.



6 © NGE

Une conception classique au coefficient de sécurité aurait engendré une solution trop coûteuse et difficilement réalisable compte-tenu de la configuration géométrique très exigüe du site et de sa proximité avec la ligne électrique haute tension. Afin d'optimiser la conception, une méthode de dimensionnement en déplacement a été retenue par l'équipe de maîtrise d'œuvre, avec un calcul selon la méthode de Newmark (intégration de l'accélération du séisme pour calculer un déplacement).

Les étapes de calcul sont les suivantes :
 → Rétrocalcul en statique de la stabilité du talus afin de déterminer les paramètres de résistance au cisaillement de la couche d'argile responsable du glissement, en considérant un état d'équilibre actuel à la limite de la rupture.



7 © NGE



8

© NGE

- Génération d'accélérogrammes vraisemblables au niveau du rocher, sur la base de séismes historiques dans la région.
- Déconvolution du signal afin d'obtenir l'accélération au niveau de la surface de glissement, avec prise en compte de l'amplification du signal au travers des différentes couches de sol. Ce calcul est rendu possible grâce à la détermination des paramètres dynamiques des sols en place avec l'utilisation des données géophysiques réalisées dans le cadre du projet (essai Down Hole).

- Estimation de la résistance au cisaillement mobilisée au sein d'un élément vertical de confortement pour différentes valeurs de déplacements, et vérification de la compatibilité avec la résistance structurelle des pieux.
- Calcul de stabilité selon une approche pseudo-statique dans le but de déterminer l'accélération horizontale critique provoquant une instabilité de talus (accélération verticale considérée comme nulle). Test avec différentes valeurs de résistance au cisaillement et donc

- différents déplacements. Détermination d'une fonction "accélération seuil en fonction du déplacement".
- Intégration des accélérogrammes sismiques au niveau de la surface de glissement (figure 4), en prenant en compte uniquement les accélérations dépassant le seuil critique et en recalant les seuils après chaque déplacement (utilisation de la fonction accélération seuil en fonction du déplacement).
- Vérification de la compatibilité des déplacements obtenus avec les contraintes d'exploitation du site.

LA RÉALISATION DES PIEUX

La solution retenue consiste en la mise en œuvre de deux files de pieux en béton armé de diamètre 1000 mm et de longueur 12 à 17 m : 33 unités en file haute (figure 5) et 43 unités en file basse soit un total de 76 pieux.

Les contraintes relatives à ce chantier de fondations sont multiples (figures 1, 6, 7 et 8) :

- La présence d'une ligne haute tension à proximité immédiate de la première ligne de pieux a nécessité un calage très précis de l'implantation de la file basse, avec la réali- ▷

8- Réalisation des pieux sur la file basse du talus.

9- Boîtier d'acquisition de l'instrumentation par fibre optique au-dessus d'un pieu.

10- Piézomètre mis en place à l'issue du projet.

8- Execution of piles on the bottom row on the embankment.

9- Acquisition module of the optical-fibre instrumentation above a pile.

10- Piezometer installed at the end of the project.



9
© EGIS



10
© EGIS

sation d'un épaulement en remblai pour permettre l'accès et la réalisation des travaux avec un léger engagement dans le pied de talus. Une étude spécifique des cinématiques de forage a également été proposée pour la réalisation des pieux (rotation limitée des engins), afin de garantir un strict respect des contraintes de sécurité fixées par RTE.

- La prise en compte des conditions météorologiques, avec l'interdiction de travailler au-delà de 40 km/h de vent. Cette contrainte a été proposée aux équipes RTE dans le but de pouvoir limiter l'amplitude de la zone de sécurité vis-à-vis du positionnement des engins de chantier par rapport aux lignes : la distance totale de 5 m réglementaire +7 m de balancement théorique maximal des câbles a pu être réduite à un déport total minimal de 6,5 m par rapport à l'extrados du faisceau de lignes le plus proche.
- Le réaménagement sur plusieurs kilomètres de la piste menant au chantier, afin de la rendre carrossable pour l'accès des matériels lourds.
- Le déboisement du talus dans le but de travailler en toute sécurité et d'optimiser les emprises disponibles.
- Le reprofilage de la risberme centrale, trop étroite et trop pentue dans sa configuration initiale, afin de pouvoir réaliser les pieux dans de bonnes conditions.

Concernant la méthodologie d'exécution des pieux, ces derniers ont été réalisés avec une technique de forage



11 - Mise en place de la fibre optique sur une cage d'armature d'un pieu.

11 - Positioning the optical fibre on a pile rebar cage.

au kelly, mise en œuvre à l'abri d'un tubage métallique provisoire descendu dans le terrain par entraînement en rotation à l'avancement de l'excavation. Les couches alluvionnaires ont été forées avec un outil de type tarière, puis l'ancrage de plusieurs mètres dans le substratum très compact a été réalisé au carottier. Les cages d'armatures ont été équipées et mises en œuvre dans

le forage en un seul élément à l'aide d'une grue de manutention positionnée sur la risberme centrale.

Le bétonnage a ensuite été réalisé par l'intermédiaire d'une colonne descendue à l'intérieur de la cage d'armatures jusqu'en pied de pieu et équipée d'un entonnoir en tête. L'accès des camions toupies a pu être organisé directement à pied d'œuvre sur la plateforme de forage, dont la géométrie et les rampes d'accès ont préalablement été aménagées à cet effet.

LE SUIVI DE L'OUVRAGE

Dans le cadre du suivi de l'ouvrage, divers dispositifs d'auscultations ont été mis en place (figures 9 à 11) : nouveaux inclinomètres dans le talus et dans les pieux, nouveaux piézomètres, suivi topographique ainsi que des dispositifs de fibre optique directement attachés aux cages d'armatures avant coulage du béton. Cette dernière auscultation, mise en place par Egis, a l'avantage de mesurer la déformation de part et d'autre du pieu permettant ainsi de pouvoir identifier spatialement les sollicitations à l'intérieur de ce dernier au cours du temps. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PIEUX : 76 u Ø 1 000 mm
LINÉAIRE DE PIEUX : 1 000 m
BÉTON : 800 m³
ARMATURES : 150 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Atbm
MAÎTRISE D'ŒUVRE : Egis
ENTREPRISE MANDATAIRE : Nge Fondations
PARTENAIRE TERRASSEMENTS : Guintoli (groupe Nge)
PARTENAIRE AUSCULTATIONS & SUIVI : Kaena / Geodi

ABSTRACT

THE EMBANKMENT OF ÉTREMBIÈRES - A40 MOTORWAY ANNEMASSE-GENEVA: CONSOLIDATION OF AN UNSTABLE MOTORWAY EMBANKMENT BY PILING

DINO MAHMUTOVIC, EGIS - ROBIN PRUNEL, NGE FONDATIONS - MARC ORLANDINI, ATMB

The embankment of Étrembières is located on the A40 motorway on the Geneva-Annemasse route heavily trafficked by those who live near the border and tourists. Since its completion in 1972, this embankment has undergone various consolidation solutions (drainage trenches and subhorizontal drains) which have not been sufficient to ensure its permanent stability. The monitoring system, consisting of numerous piezometers and inclinometers, has made it possible to understand precisely the slippage mechanism, which is mainly due to the presence of a clayey "soap" layer, so as to design a consolidation solution that is effective and durable in the service phase and under seismic stress. A complex calculation approach was applied to verify the seismic stability with a displacement analysis based on the consideration of reference time histories. Two rows of deep reinforced concrete piles 1,000 mm in diameter, totalling 76 units, were executed by Kelly bar with temporary tubing as work progressed, on a very cramped site. □

EL TERRAPLÉN DE ÉTREMBIÈRES - A40 ANNEMASSE-GINEBRA: CONTENCIÓN POR PILOTES DE UN TERRAPLÉN DE AUTOPISTA INESTABLE

DINO MAHMUTOVIC, EGIS - ROBIN PRUNEL, NGE FONDATIONS - MARC ORLANDINI, ATMB

El terraplén de Étrembières está situado en la autopista A40 del eje Ginebra-Annemasse, muy frecuentado por turistas y residentes fronterizos. Desde su realización en 1972, este terraplén ha sido objeto de distintas soluciones de contención (zanjas drenantes y drenajes subhorizontales), que no han bastado para garantizar su estabilidad definitiva. El sistema de seguimiento, compuesto de numerosos piezómetros e inclinómetros, ha permitido comprender con precisión el mecanismo de deslizamiento, principalmente debido a la presencia de una capa arcillosa "resbaladiza", para diseñar una solución de contención eficaz y perenne en fase de servicio y en caso de sismo. Se ha aplicado un complejo procedimiento de cálculo para justificar la estabilidad sísmica, con un razonamiento en desplazamientos basado en acelerogramas de referencia. Se han instalado dos filas de pilotes profundos de hormigón armado de 1.000 mm de diámetro, con un total de 76 unidades, mediante una Kelly con entubación provisional al ritmo de avance, en un emplazamiento muy exiguo. □

SANTÉ • PRÉVOYANCE • ASSURANCES • ÉPARGNE • RETRAITE • VACANCES

NOUS AVANÇONS SUR LA MÊME ROUTE QUE LES TRAVAUX PUBLICS

Nous connaissons bien votre métier et tous ses risques. Nous les couvrons avec des garanties adaptées pour mieux vous protéger, mieux vous assurer et vous soutenir en cas de besoin. Et comme nous faisons aussi partie de la famille du BTP, nous ferons toujours route commune.



PRO BTP
GROUPE
www.probtp.com



Bassin Austerlitz : bassin de stockage et de restitution de l'eau, Paris, France.

Première en France - Utilisation d'une Hydrofraise équipée de son power pack électrique pour la réalisation des parois moulées

Intervenant partout dans le monde pour le compte de clients publics ou privés, Soletanche Bachy s'attache à proposer les meilleures solutions techniques et contractuelles.

Elle apporte aussi bien des compétences polyvalentes d'ensemblier dans le cadre de grands projets d'infrastructures, que celles de spécialiste maîtrisant l'ensemble des procédés de géotechnique, de fondations spéciales, de travaux souterrains, d'amélioration et de dépollution des sols.

www.soletanche-bachy.com

Soletanche Bachy

Construction sur du solide

Photo: E. L. / A. / P. / S.