

SOLS ET FONDATIONS. CENTRE COMMERCIAL EN POLOGNE. GEOMIX CENTRALE NUCLEAIRE NOGENT-SUR-SEINE. SECURITE SUR BUTEE DES ECRANS DE SOUTENEMENT. CENTRE THERAPIE PROTON A LONDRES. 3^e TABLIER DU VIADUC DE GUERVILLE - A13. VIADUC ROUTE DU LITTORAL A LA REUNION. PIERRE SECHE AU XXI^e SIECLE. CAVE SAINT JEAN A ROQUEFORT-SUR-SOULZON. ECHANGEUR QUAI D'IVRY A PARIS. PROLONGEMENT LIGNE 14 A SAINT-OUEN. BIOCALCIS®. BILM A ISSY-LES-MOULINEAUX. REGARDS-EN-SEINE A SAINT-CLOUD

N°933 JUIN 2017



LE BILM À ISSY-
LES-MOULINEAUX
© PHOTO THÉÂTRE
SEFI-INTRAFOR



SEFI-INTRAFOR

NOS FONDATIONS AUJOURD'HUI, CE SONT EUX

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

REJOIGNEZ-NOUS POUR LE GRAND PARIS

[FONDATIONS.FAYAT.COM/CARRIERES](https://fondations.fayat.com/cARRIERES)



Directeur de la publication
Bruno Cavagné

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

Comité de rédaction

Sami Bounatirou (Bouygues tp), Erica Calatizzo (Systra), Jean-Bernard Datry (Setec tpi), Philippe Gotteland (Fnfp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fnfp), Laurent Guilbaud (Saipem), Ziad Hajar (Eiffage tp), Florent Imbert (Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis), Véronique Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage tp), Philippe Vion (Vinci Construction Grands Projets), Nastaran Vivan (Artelia), Michel Morgenthaler (Fnfp)

Ont collaboré à ce numéro

Rédaction

Monique Trancart (actualités),
Marc Montagnon

**Service Abonnement et Vente
Com et Com**

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

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

Publicité

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

Directeurs de clientèle

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

Carine Reininger - LD 01 42 21 89 05
c.reininger@rive-media.fr

Site internet : www.revue-travaux.com

Édition déléguée

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

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

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

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

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

LES ANNÉES 50 SOCLE DE LA GÉOTECHNIQUE ACTUELLE



© DR

La géotechnique occupe une place importante dans l'acte de construire. Au-delà des contributions d'illustres anciens, comme évoqué dans un récent éditorial, que doit-elle à ceux qui, en France, après la 2^e guerre mondiale, ont bâti le socle technique et professionnel ayant permis son développement ?

Parmi les disciplines dont procède la géotechnique, la géologie était enseignée dans les universités et les écoles d'ingénieurs, la mécanique et la mécanique des roches également, avec une contribution particulière du laboratoire de l'école polytechnique, la mécanique des sols faisant l'objet d'enseignements relativement confidentiels.

Aussi certains de ceux qui voulaient se former à cette discipline sont partis à l'étranger souvent aux États-Unis, avec Casagrande à l'est, puis Seed à l'ouest. Le cas le plus emblématique est celui de Louis Ménard qui, encore étudiant, y a jeté les bases de sa théorie du pressiomètre.

Dans la fébrilité de la reconstruction, le besoin d'échanger des idées a conduit à l'activation de trois comités techniques : mécanique des sols, mécanique des roches, et géologie de l'ingénieur. Cette séparation des disciplines tient à la nécessité, pour chacune, d'établir une assise technique solide avant de dialoguer entre elles.

En parallèle Louis Ménard a développé sa théorie du pressiomètre. Un certain scepticisme est apparu de la part des tenants de la méthode classique. La théorie pressiométrique, à partir d'essais en place peu coûteux et rapides, permettait de concevoir des fondations fiables, avec toutefois un certain manque dans l'évaluation géologique, palliée, mais pas toujours, par des carottages.

Il a fallu une quinzaine d'années pour que les critiques s'apaisent et que la complémentarité des diverses techniques s'impose, le pressiomètre ne pouvant à lui seul résoudre tous les problèmes.

Louis Parez a développé son pénétromètre statique dans la même période. L'usage de cet outil a été freiné en France par la diversité géologique au contraire du pressiomètre plus « tout terrain ». Cela a néanmoins amorcé le développement d'un outil devenu majeur.

Les supports professionnels de ces développements ont été le CEBTP, le LCPC et ses laboratoires en région et des bureaux d'études tels que Simcisol, Sols essais, Mécasol, Fondasol et Ménard, tous dirigés par des personnalités au caractère bien trempé.

Les entreprises spécialisées, telles que Bachy d'abord puis Solétanche, ont pris leur essor.

Leur développement s'est appuyé sur des projets d'injection, barrages de Génissiat puis de Serre-Ponçon par exemple, sur les pieux forés, répondant à la nécessité de porter des charges lourdes à moindre coût.

Elles ont activement participé à la mise au point des parois moulées, avec des équipements divers, d'abord concurrents, complémentaires en fait.

Cette intense activité a été couronnée, pour la mécanique des sols, par l'organisation du congrès international à Paris en 1961 qui a été un succès technique et financier.

Enfin La rupture du barrage de Malpasset, le 2 décembre 1959, a tragiquement marqué cette période.

Au-delà du drame humain, cet accident a souligné l'impérieuse nécessité d'un dialogue entre géologues et mécaniciens, ce qui n'était pas toujours le cas. Cela a consolidé l'entrée de la géologie dans l'acte de construire. Le comité technique permanent des barrages, créé sous l'impulsion d'ingénieurs éminents et du professeur Barbier de l'université de Grenoble, a formalisé cette prise de conscience.

La nécessité de la reconstruction a permis aux disciplines de la géotechnique de se développer à partir d'un solide socle de connaissances préexistant, débouchant à terme sur des enseignements de qualité. Cela a permis l'émergence et le développement en particulier du pénétromètre, du pressiomètre, des pieux forés, des parois moulées, d'entreprises devenues de renommée mondiale et ouvert le dialogue entre les disciplines, ce qui est l'essence de la géotechnique.

MICHEL LONDEZ
CONSULTANT EN GÉOTECHNIQUE

SOLS & FON DATIONS

INFRASTRUCTURES ET FONDATIONS DU NOUVEAU CENTRE DE THÉÂTRE PRÉTON À LONDRES © BOUYGUES UK





16

ENTRETIEN AVEC VALÉRIE BERNHARDT

TERRASOL :
L'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE
À FORTE VALEUR AJOUTÉE

**22 KAÉNA : VALORISER LE SOL
GRÂCE À LA GÉOTECHNIQUE**



28

**CENTRE COMMERCIAL POSNANIA
À POZNAN EN POLOGNE**

Renforcement de sols sensibles
par Colonnes à Module Contrôlé



37

**RENFORCEMENT DE SOL
PAR GEOMIX**

À la centrale nucléaire
de Nogent-sur-Seine



46

**SÉCURITÉ SUR LA BUTÉE
DES ÉCRANS DE SOUTÈNEMENT**

Quelques cas particuliers



52

**NOUVEAU CENTRE DE THÉRAPIE
PROTON À LONDRES**

Infrastructures et fondations



60

**3° TABLIER AU VIADUC DE GUERVILLE
SUR L'AUTOROUTE A13**

Renforcements de sol et soutènements



68

**VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE
DU LITTORAL**

Les fondations d'un colosse des mers



74

**CONSTRUIRE DES SOUTÈNEMENTS
EN PIERRE SÈCHE AU XXI^e SIÈCLE**



80

**RÉHABILITATION DE LA CAVE
SAINT JEAN**

à Roquefort-sur-Soulzon



86

**RESTRUCTURATION DE L'ÉCHANGEUR
DU QUAI D'IVRY**

sur le boulevard périphérique à Paris



92

**PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14
À SAINT-OUEN - LOT T03**

Une station, 6 ouvrages et autant
de techniques de fondations



100

BIOCALCIS®

Le renforcement des sols par cimentation
biologique



106

LE BILM À ISSY-LES-MOULINEAUX

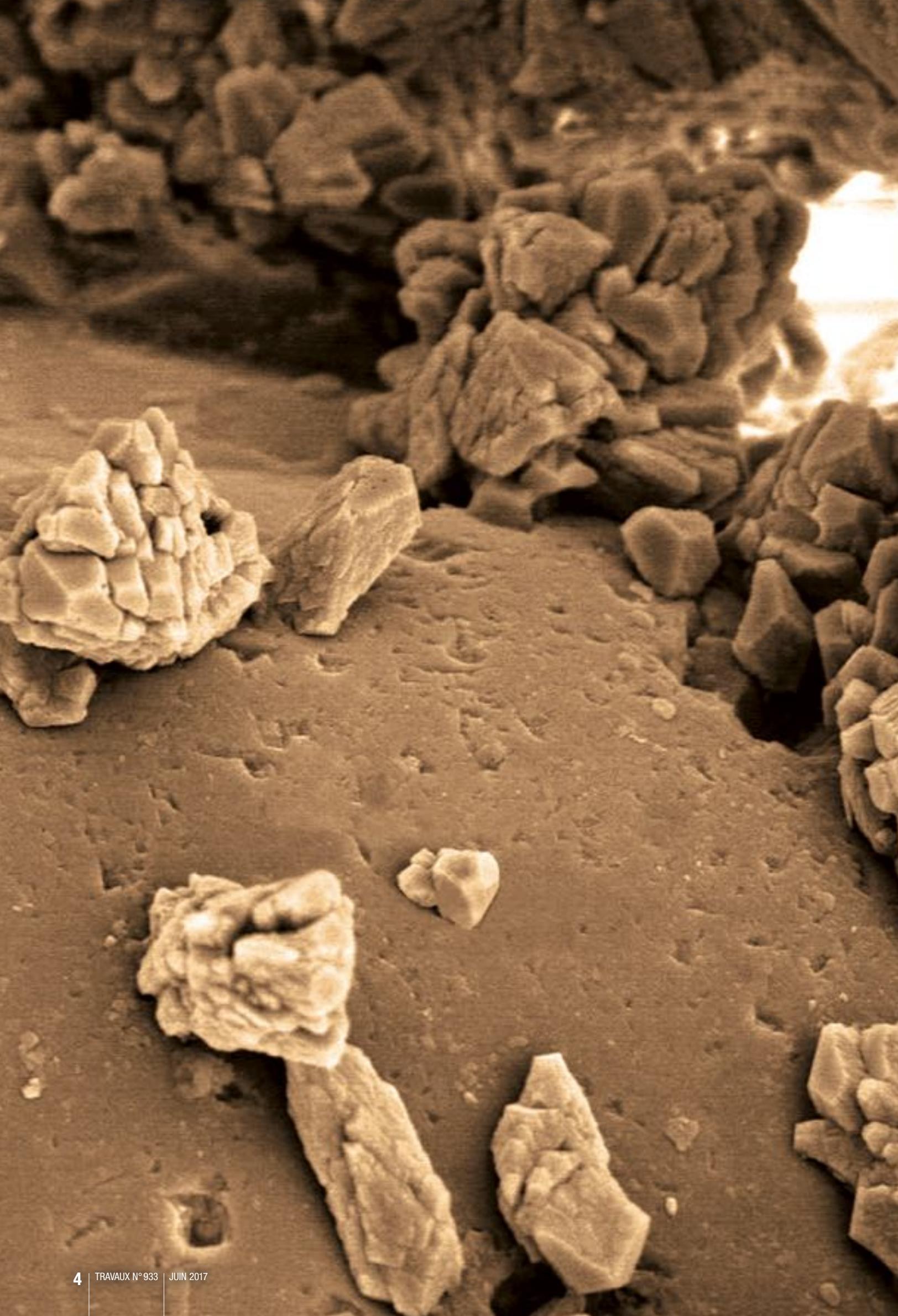
Un bassin caché sous un stade en plein
centre ville



114

REGARDS-EN-SEINE

Un projet à flanc de colline à Saint-Cloud



BRAVES PETITES BACTÉRIES QUI TRAVAILLENT COMME DES MAÇONS

BIOCALCIS® est une application du biomimétisme dans le domaine de la géotechnique, comme d'autres relevant du même principe sont développées dans l'aéronautique, le médical ou la micromécanique. Les services de R&D de Soletanche Bachy ont validé le procédé de consolidation de sols ou de roches poreuses par calcification produite par des bactéries agissant sur une solution calcifiante. Ces petites bêtes constituent une main d'œuvre minuscule, industrielle et non syndiquée. Le fluide injecté a une viscosité voisine de celle de l'eau pure, il pénètre donc sans pression les pores les plus ténus. La résistance obtenue est appréciable et, dans bien des cas, suffisante. La perméabilité du milieu est préservée. Travail rapide et soigné.

(Voir article page 100).



© SOLETANCHE BACHY

FRICHES : LA POLLUTION MIEUX INTÉGRÉE AUX PROJETS



Terres végétales récupérées d'un chantier de parking, stockées en andains en attente de l'aménagement d'un espace public planté, au Carrée de soie (Lyon métropole).

La pollution d'un site industriel à reconvertir est mieux prise en compte et plus tôt. Le projet s'y adapte.

« La pollution des friches est davantage prise en compte dès le stade projet auquel elle est intégrée, constate Patrice Philippe, chef du service friches urbaines et sites pollués de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), intervenant aux journées techniques sur la reconversion des friches polluées qui ont attiré 420 personnes, fin mars⁽¹⁾. Il y a plus d'interface avec les documents d'urbanisme, plus de partenariat entre acteurs. Les friches sont perçues comme opportunité foncière plus que comme contrainte. »

La réutilisation d'anciens terrains industriels n'est cependant pas à l'abri d'un changement d'orientation. En a témoigné la commune du Pont-de-Claix (Isère) contactée en 2012 par les Ets Becker, fabricant de peintures et vernis industriels sur son territoire, et fermés depuis 2009. L'industriel a déjà retiré les réseaux et les cuves de produits chimiques, et stocké les terres associées dans les bâtiments.

L'Établissement public foncier local du Dauphiné⁽²⁾ acquiert les 4,25 hectares, en 2013, et se charge de la remise en état. Il est prévu d'y construire 400-450 logements mais la collectivité doit d'abord s'occuper d'une plateforme chimique, ce qui repousse le projet à 2020-2023.

L'industriel, devant être dégagé de ses obligations vis-à-vis de la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement, il est décidé de dépolluer pour un usage industriel, dans l'immédiat (2014-2015). En attendant 2023, l'EPFL a l'idée, avec Envisol, d'y installer des entreprises qui expérimenteraient des solutions de dépollution en vue d'implanter de l'habitat. Concrétisation en cours.

Dans le marais poitevin (Deux-Sèvres), les 6,5 ha de Mathé, fabricant de contreplaqué, ne seront utilisés ni pour du logement permanent ni pour des activités car la commune du Vanneau-Irleau n'en a

pas besoin. L'Établissement public foncier (État) Poitou-Charentes les acquiert pour la Communauté d'agglomération du Niortais (Can) qui décide d'y ouvrir en 2020, un hébergement écologique touristique - sur pilotis, perché, en bois, etc.

→ Fertiliser les terres excavées

Quand les sols sont pollués et que le site n'attire aucune occupation humaine, la mise en culture est envisagée. À Saint-Cyr-l'École (Yvelines), du maraîchage, hors-sol, est implanté "au-dessus" des 3,5 ha d'une ancienne décharge de déchets de chantier. L'association Le Vivant et la Ville crée les Fermes en ville (démonstrateur). Le terrain, nettoyé et débarrassé des polluants, est recouvert d'un mètre de marnes issues d'une station d'épuration voisine, en travaux.

À Homécourt (Meurthe-et-Moselle), des sols sont recréés et plantés sur les 30 ha de deux cokeries (1922-1980). Ils sont constitués de matériaux délaissés -

boies papetières et sédiments fluviaux - et de compost (projet Lorver).

Lyon métropole va refertiliser des terres par ajout de compost ou de limons, sur une plateforme située au Carré de Soie, 500 ha d'anciennes industries dont 200 "mutables" sur Villeurbanne et Vaux-en-Velin. À l'échelle de l'agglomération, elle établit une cartographie de la fertilité du sol, à partir des grands projets urbains. Ainsi, les terres excavées peuvent-elles être stockées et redistribuées selon leur qualité, les bonnes terres étant réservées aux lieux plantés.

→ Énergie ou bâtiments ?

Autre façon de valoriser une friche polluée : y installer des capteurs photovoltaïques. L'Ademe étudie jusqu'à novembre 2017, le potentiel de terrains délaissés ou artificialisés pour des centrales au sol, de grande puissance. « Le photovoltaïque va se développer et entrer en conflit d'occupation de terrain avec d'autres usages, » pressent Tristan Carrère, du service réseaux énergies renouvelables de l'Ademe. Lille métropole l'envisage sur 5 friches industrielles. En Belgique, la société wallonne Spaque s'apprête à implanter une centrale de 750 kWc sur l'ancien crassier des Nouveaux ateliers mécaniques (ressorts, gazogènes), à Morlanwelz (Hainaut). Elle le recouvre d'un mètre de limons, le draine et épure les eaux. Elle injecte un substrat organique qui dégrade les polluants chlorés. ■

⁽¹⁾ Organisées tous les trois ans par l'Ademe et le ministère de l'Environnement, à Paris. Cf. *Travaux* n°906, juin 2014, page 8 et n°929, décembre 2016, page 12.

⁽²⁾ Structure de portage d'acquisitions foncières créée par Grenoble Alpes Métropole et le département de l'Isère.

TERRES EXCAVÉES : GUIDE REMANIÉ

Le Guide pour la réutilisation hors site des terres excavées va être réédité d'ici à fin 2017. Sorti en 2012, il s'est révélé difficile à appliquer.

La nouvelle version propose une démarche à trois niveaux d'utilisation au lieu d'un seul : sans contrainte mais en couche revêtue ; après vérification du non-impact sur les eaux et la santé ; au cas par cas.

Le guide convient aussi en cas de non pollution. L'utilisation en sous-couches routières est abordée dans un ouvrage du Cerema.



Tracé de l'implantation d'une centrale photovoltaïque sur l'ancien crassier des Nouveaux ateliers mécaniques, en Belgique.

GÉOSYNTHÉTIQUES : UNE RÉPONSE AUX CONTRAINTES ÉCOLOGIQUES



© PAUL GUINARD/SOPREMA

1^{er} prix du concours photos du Comité français des géosynthétiques, catégorie "Aux frontières de la gravité" : géomembrane d'étanchéité avant coulage de la structure en béton d'une station du métro d'Athènes (2003).

Les 11^e rencontres géosynthétiques ont attiré 350 personnes, début mars, à Lille (Nord). « L'ambiance était bonne car les participants - utilisateurs, producteurs, poseurs, bureaux d'études, laboratoires - travaillent ensemble, témoigne Laetitia Van Schoors, présidente du comité scientifique des journées du Comité français des géosynthétiques⁽¹⁾. La première demi-journée était consacrée à la formation de ceux qui entrent dans le métier ou de ceux qui veulent approfondir certains points, avant les conférences. Une cinquantaine de personnes l'ont suivie. » L'unique table ronde a porté sur "Moins disant, mieux disant, quel choix ?". « Elle a donné l'occasion à tous d'exposer leur expérience, indique M^{me} Van Schoors. Un maître d'ouvrage industriel - une sucrerie - a témoigné de l'importance de l'assistance à maîtrise d'ouvrage et d'anticiper le contrôle extérieur de la réalisation. » Trois conférences "invitées" ont mis des acteurs ou sujets à l'honneur. Le comité belge a été convié, vu sa proximité avec Lille. Ce n'est pas son habitude de participer car les géosynthétiques sont plutôt entre les mains des Flamands, de langue néerlandaise. Les Belges ont témoigné d'expériences différentes des nôtres.

→ Bilan de dix sites

Une autre conférence invitée s'est concentrée sur la tenue sur vingt à quarante ans d'ouvrages contenant des géosynthétiques. Jean-Pierre Gourc (LTHE Grenoble) et Philippe Delmas (Cnam, Paris) ont dressé le bilan d'une dizaine de sites anciens en France :

« tout à fait satisfaisant ». Accéder à l'historique n'est pas toujours facile. Ils incitent les ingénieurs à archiver les données, à conserver des échantillons des produits et à suivre les ouvrages. « Avoir un retour sur l'existant reste très important, souligne Laetitia Van Schoors. Les maîtres d'ouvrage veulent une garantie sur l'utilisation de matériaux à base de polymères. »

Enfin, la 3^e conférence invitée portait sur la version 2017 des Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes, fascicule n°10 du CFG (1991). Parmi les enrichissements, citons les parties sur les contrôles et la réception. Signalons aussi le nouveau référentiel de l'Asqual pour la certification des géomembranes.

Les contraintes écologiques ont déterminé le choix d'une partie des autres thèmes : stockage des déchets (6 interventions), sites et sols pollués (8) ou encore digues, canaux, barrages, réservoirs (7).

→ Captation de dépolluants

De nouveaux géosynthétiques, dépolluants, captent les métaux lourds dans les sédiments, les matières en suspension dans les eaux de chantier, etc.

Conférences : www.cfg.asso.fr : publications/les rencontres géosynthétiques. ■

⁽¹⁾ Organisées avec Ponts-Formation-Conseil. Sur les précédentes rencontres ou journées techniques, cf. *Travaux* n°905, avril-mai 2014, page 8 ; n°915, juin 2015, page 6 ; n°924, juin 2016, page 8.

DIMENSIONNEMENT : BIEN UTILISER LES NORMES

Un groupe de travail du Comité français des géosynthétiques (CFG) prépare un guide sur l'utilisation des normes de dimensionnement dans la conception des ouvrages avec géosynthétiques. Ce document s'adresse aux non spécialistes. Il concerne les infrastructures de transport et de traitement des déchets.

Il comprend 6 fascicules. Le premier, sur les choix de la maîtrise d'ouvrage avant conception, sera terminé d'ici fin 2017 puis validé par le CFG. Le deuxième sur le stockage de déchets est prévu pour le 1^{er} semestre 2018. Les 4 autres portent sur les infrastructures routières et ferroviaires, les ouvrages hydrauliques, ceux de génie civil et bâtiment, et enfin ceux le long de rivières, canaux et côtes.

19 PETITES CENTRALES HYDRAULIQUES

L'électricité hydraulique va gagner 27 MW grâce à 19 nouveaux sites en France de petite taille, suite au 1^{er} appel d'offres sur ce thème du ministère de l'Environnement. C'est une contribution modeste à l'objectif d'ajouter 550-750 MW en hydro électricité* d'ici 2023, mais trois appels suivent pour 105 MW au total. Dans la catégorie des 500 kW ou plus, huit sites sont nouveaux. Quatre ont déjà un seuil mais utilisé pour la navigation, l'eau potable, etc. Deux seuils existants auront des puissances de 150 à 500 kW et 4 sont d'anciens moulins (36-150 kW). Ces centrales bénéficieront d'un complément de rémunération sur la vente des kilowattheures (marché de l'énergie). 2^e appel : précadrage environnemental avant le 14 août et clôture fin janvier 2018.

* Puissance électrique hydraulique métropole : 25 482 MW (2016).

BIODIVERSITÉ : ARRÊTÉ COMPENSATION

La composition de la demande d'agrément d'un site naturel de compensation est fixée par l'arrêté du 10 avril (article D163-3, code de l'environnement). Il détaille les précisions à apporter par le maître d'ouvrage pour compenser les atteintes à la biodiversité d'un projet d'aménagement. Le site de compensation sera localisé précisément et les "unités" de compensation, bien définies. L'agrément est délivré par le Conseil national de la protection de la nature.

DIGUES : PLAN ÉTUDE DE DANGERS

Le 1^{er} juillet, entrent en vigueur les dispositions de l'arrêté du 7 avril qui précise "le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages aménagés en vue de prévenir les inondations et les summer-sions" (JO 19 avril). La gestion de ces ouvrages est désormais confiée aux communes et à leurs groupements.

DÉCHETS : VALORISATION EN HAUSSE

Les entreprises de travaux publics ont produit 185,3 millions de tonnes de déchets en 2014 contre 216,3 millions en 2008, selon les chiffres du ministère de l'Environnement, publiés fin mars. Elles ont aussi valorisé ou réutilisé 63 % des déchets inertes produits en 2014 contre 49 %, six ans plus tôt.

L'objectif des 70 % à valoriser en 2020 fixé par la loi de transition énergétique, semble donc réalisable, « à condition que les maîtres d'ouvrage lancent des appels d'offres adaptés et que les plans régionaux de prévention et de gestion des déchets soient suffisamment ambitieux », écrit la Fédération nationale des travaux publics.

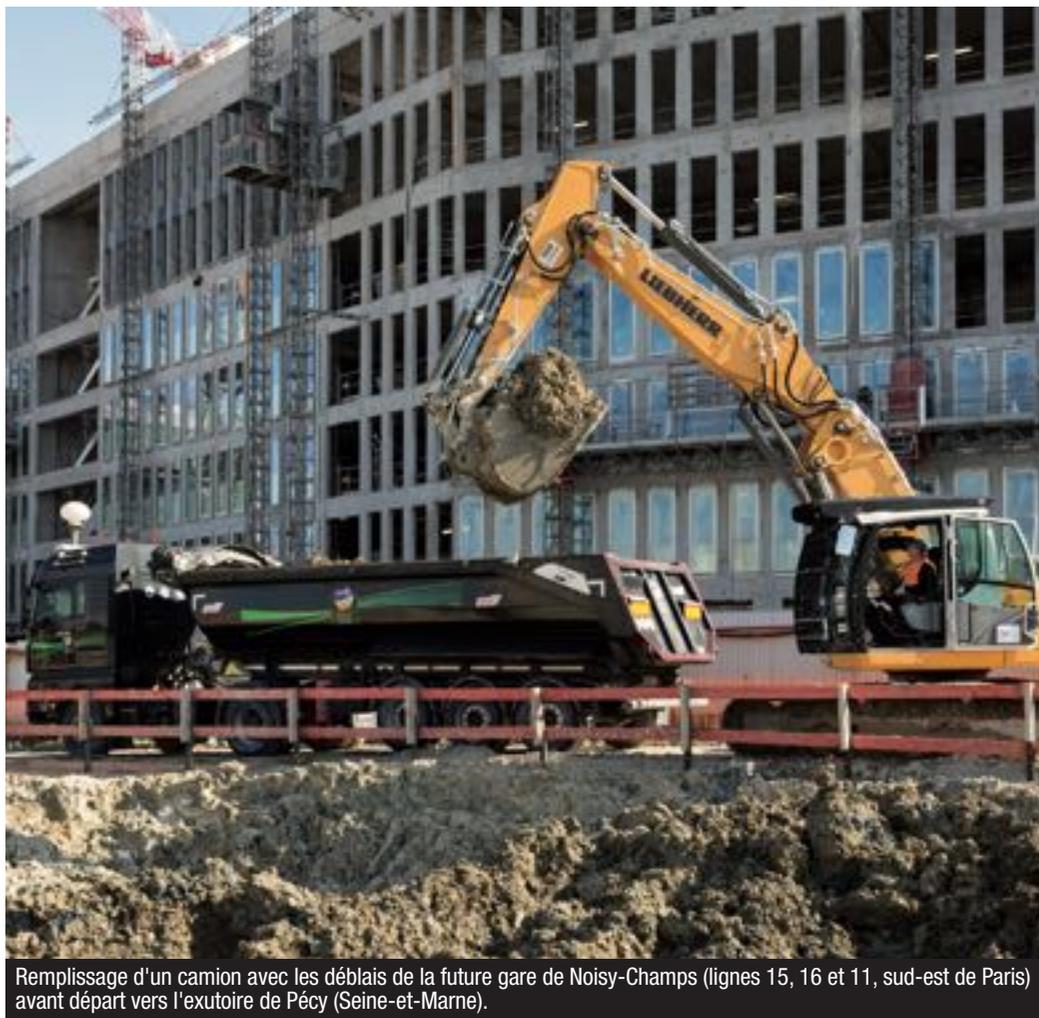


63 % des déchets inertes de chantier ont été valorisés ou réutilisés en 2014.

CANALISATEURS : ACTIVITÉ STABILISÉE

« Frémissement » : c'est ainsi que les Canaliseurs de France qualifient l'évolution de leur activité en 2017 par rapport à 2016, année de stabilisation après deux ans de baisse. Ils réalisent 5,2 milliards d'euros de chiffre d'affaires dont 4,8 en canalisations d'eau potable et d'assainissement, et 406 millions pour le gaz. Ils représentent 14 % de l'activité des travaux publics.

DÉBLAIS GRAND PARIS EXPRESS : CONVERSION DE CARRIÈRES ET INNOVATIONS



Remplissage d'un camion avec les déblais de la future gare de Noisy-Champs (lignes 15, 16 et 11, sud-est de Paris) avant départ vers l'exutoire de Pécy (Seine-et-Marne).

Le comblement de carrières est le premier débouché des déblais du chantier du Grand Paris Express (GPE) évalués à 45 millions de tonnes jusqu'en 2030. La région parisienne comprend de nombreux sites d'extraction de gypse, calcaire, etc., qui nécessitent 60 millions de tonnes de terres pour être réutilisables. Fin mars, la Société du Grand Paris, pilote du GPE, a signé un partenariat avec 31 entreprises qui représentent 200 sites d'accueil de déblais : stockage, réaménagement de carrières, aménagements paysagers, plateformes ou sites intermédiaires de traitement agréés.

Ces entreprises s'engagent, notamment, à utiliser l'outil de traçabilité d'Artémis. Les déblais sont pesés à la sortie du chantier et à l'entrée de l'exutoire, et leur quantité et qualité, suivies en temps réel.

Parallèlement, la SGP avait lancé un appel à projets pour innover dans la gestion des déblais, en octobre 2016.

Les sept projets retenus ont été dévoilés fin mars et sont expérimentés d'ici à octobre.

→ Transport de terres par câble

Cemex et Innofreight réduisent les ruptures de charge et le temps perdu dans le transport de déblais, grâce à des wagons étanches, lavables automatiquement entre deux chargements.

Les caisses sur chariot se retournent pour repartir dans l'autre sens.

Le transfert par câble de déblais, conçue par l'agence d'architecture Space avec Vinci Construction France et Veolia, sert à relier directement un chantier à une péniche ou au train. Les concepteurs étudient l'application de ce principe à des sites du GPE proches d'une voie d'eau ou ferrée.

→ Recomposer des sols

Terbis comble des galeries souterraines avec des terres dépolluées puis traitées, de façon que le sol retrouve la résistance nécessaire à une construction, procédé

présenté avec ETPO, spécialiste de l'injection.

La valorisation de déblais en produits est proposée dans trois projets. Valorhiz transforme des stériles en terre fertile par l'ajout de matières organiques, pour des espaces plantés.

Provadbat, de Séché Éco-Services et Hoffman JB Technologies, recycle des déblais, une fois caractérisés, en parking, sous-couche routière et même, en mobilier urbain.

→ Repérer les pollutions rapidement

Des déblais de chantier seront transformés en briques de terre crue dans le projet de Joly & Loiret et de Wulf, matériau qui reste à certifier.

Enfin, Guintoli a été retenu pour sa méthode de repérage rapide de pollution dans les terres, ce qui minimise les dépôts provisoires près du chantier : recherche documentaire avant excavation, puis analyse chimique et par spectromètre. ■

PLUS DE TRANSPORT FLUVIAL DANS LES GRANDS CHANTIERS



Le chantier de la future plateforme de Dourges (Pas-de-Calais) sert de démonstrateur à l'intégration du fluvial dans les grands chantiers comme le Canal Seine Nord Europe.

© VOIES NAVIGABLES DE FRANCE

Le transport fluvial a beau coûter moins cher que la route, brûler moins de carburant et réduire la circulation, il a du mal à se développer en travaux publics. « Le fluvial arrive trop tard après lancement des appels d'offres pour être compétitif, fait observer Éric Dumortier, responsable prospection sur la fluvialisation des grands chantiers, à la direction territoriale Nord/Pas-de-Calais de Voies navigables de France (VNF). Depuis 2015, nous sensibilisons les maîtres d'ouvrage sur ce point. Nous avons dressé l'inventaire des chantiers à venir près de la voie d'eau dans la région. »

« VNF peut mettre en relation un réseau d'interlocuteurs lors de la préparation des marchés publics de grands travaux et dans l'organisation du chantier, est-il écrit dans le guide sur ce thème. Il est en mesure d'assurer la fonction de support technique et logistique en sorte que l'utilisation de la voie fluviale soit possible qu'il s'agisse de la disponibilité du foncier bord à voie d'eau, d'accessibilité d'un quai (quais provisoires), de disponibilité du réseau ou de sourcer l'offre logistique. »

Parmi les chantiers repérés par VNF, citons l'extension de la plateforme logis-

tique Delta3 à Dourges (Pas-de-Calais) qui se termine en 2019-2020. Elle sert de démonstrateur et pourra inspirer les chantiers du Canal Seine Nord Europe.

→ 1 800 tonnes par péniche

Le site couvre 44 hectares agricoles en zone humide. Des matériaux doivent être apportés pour consolider la zone qui accueillera entrepôts, voiries, quais et espaces verts, ce qui représente 1,26 million de tonnes selon Colas, chargé du remblaiement. Cela représente 42 000 camions de 30 t ou 7 000 péniches de 1 800 t. Au 1^{er} mars, il restait 810 000 t à transporter et épandre.

La part du transport fluvial sera définitivement connue après chantier.

La plateforme se situe à 2,5 km du quai sur la Deûle. Sept tracteurs attelés à des bennes peuvent transporter 1 800 t en sept heures. Une pelleuse décharge les terres apportées, de la péniche vers les bennes. Les matériaux proviennent de différents chantiers situés dans un rayon d'une trentaine de kilomètres.

→ Avantages entreprise

Colas voit dans la voie d'eau plusieurs avantages : planning précis, anticipé, respect des horaires, cadences assurées, décongestion de la route et de l'autoroute A1, et amélioration du bilan carbone. ■

COMPAGNIE DU VENT : 100% ENGIE

Engie a repris la totalité des parts de la Compagnie du Vent dont il possédait déjà 59 % depuis 2007.

La Compagnie du Vent, créée en 1989 par Jean-Michel Germa, exploite 423 MW en éolien et 88 MW en solaire photovoltaïque.

Le fondateur de la société, également président de la Société de participations dans les énergies renouvelables, poursuit son activité en faveur des énergies nouvelles dans le solaire thermique, à travers Sunti, et le stockage d'électricité en mer, avec MGH.



© IMAGESINAIR PRODUCTIONS

Parc d'éoliennes de l'Auxerrois (Yonne).

68 PÔLES D'ÉCHANGES À L'ÉTUDE

La Société du Grand Paris a confié à un groupement piloté par TVK une étude prospective de deux ans sur les grands principes d'aménagement des pôles d'échanges autour des 68 gares du Grand Paris Express. Les études sur ces pôles, financées par la SGP mais pilotées par les collectivités locales, devront être finalisées en 2018-2019.

DATA CENTER EN IRLANDE

Bouygues Énergies & Services livre, entre mai et janvier 2018, six halls d'un centre de données informatiques à Dublin (Irlande). La filiale de Bouygues Construction en gère la conception, construction et mise en service.

Le data center est installé dans un entrepôt existant de 11 000 m² dont un peu moins de la moitié en espace technique sur deux étages.

GUIDE JURIDIQUE

Le report de transport de matériaux de travaux publics de la route vers le fluvial comporte des aspects techniques et juridiques. La direction territoriale Nord/Pas-de-Calais de Voies navigables de France édite un guide pratique pour réussir dans ce domaine.

La brochure de 43 pages, intitulée « intégrer le maillon fluvial dans la logistique des appels d'offres de grands chantiers », a été rédigée par la société d'avocats EY. Elle aborde les étapes dans le détail, fait des recommandations et propose des outils.

Téléchargeable sur <http://www.nordpasdecals.vnf.fr/boite-a-outils-juridiques-a2184.html>.

TRAVAUX SNCF RÉSEAU

Cinq cents personnes et un train-usine œuvrent chaque nuit d'ici à la fin de l'année pour renouveler les voies sur la ligne de train de 55 km entre Moret et Montargis (Seine-et-Marne), au rythme de 1 km par nuit.

Le changement des rails, traverses et ballast, se justifie par le renouvellement normal et par l'arrivée des Regio2N, trains à deux étages, plus larges.

SNCF Réseau Île-de-France est également très occupée avec les futures gares de la ligne 15 du Grand Paris Express. Depuis mai, elle mène, en parallèle, la reconstruction de la gare des Ardoines et la création d'un couloir de correspondance sous la ligne de train vers le futur métro express, à Vitry-sur-Seine (Val-de-Marne).

À cause de la nappe phréatique, les travaux du passage commencent par la réalisation d'une enceinte étanche de mai à août 2017 dans laquelle sera positionné l'ouvrage de 30 m de long et 2 500 t, en mai 2018.

En août, aura lieu le ripage d'une dalle préfabriquée en gare de Clamart (Hauts-de-Seine), et en novembre, la pose de deux tabliers auxiliaires de 27 m en gare de Vert-de-Maisons (Val-de-Marne).



© VALENTINE PEDOUSSAT

Un kilomètre de voie est renouvelé chaque nuit en Seine-et-Marne.

PROTÉGER LES BALEINES DU BRUIT DE CHANTIER

Atténuer le bruit en milieu naturel ouvert est très complexe. Le chantier de la Nouvelle route du Littoral à la Réunion protège les gros mammifères marins des ondes sonores de la fragmentation par explosif non détonant ou d'un brise-roche hydraulique. Le code de l'environnement impose des seuils à ne pas dépasser.

Les baleines, par exemple, communiquent entre elles par des sons qui "voyagent" dans des strates d'eau de mer à une combinaison spécifique de salinité/température/pression, appelés Sofar Channel, selon Thierry Delaunay, responsable Environnement de Grands travaux de l'océan indien (GTOI), entreprise chargée des travaux (groupe Colas) : « Un son, même faible, peut se propager à quelques centaines voire des milliers de kilomètres, précise-t-il. Même en dessous des seuils, les bruits sous-marins participent à la pollution acoustique. »

→ Tuyau percé

La solution a été imaginée et dimensionnée par In Vivo, bureau d'études d'acoustique marine, produite par Etang.ca (Canada), testée en bassin à l'Ensta de

Brest, mise en place par Seanergy et suivie par Click'Research, sous maîtrise d'ouvrage GTOI⁽¹⁾.

Elle comprend un système de production de bulles qui perturbent la propagation du son. Il s'inspire d'un dispositif d'Etang.ca qui, en agitant l'eau, empêche les ports de geler.

Il est constitué d'un tuyau percé lesté pour descendre sur un fond aussi plat que possible, dans lequel est envoyé de l'air comprimé.

→ Moins 15-25 dB

Sur le chantier de la route du littoral qui se termine en 2019-2020, il est utilisé ponctuellement le long des 3,6 km de digues en construction.

Il l'a été pour l'échangeur de la Possession, en 2016.

Les mesures sur site montrent que le bruit est abaissé de 15-25 dB, ce qui correspond au port d'un casque très performant, selon GTOI. Ceci dans les fréquences dangereuses pour les mammifères marins, de 100 à 1 000 Hz. ■

⁽¹⁾ Nommée aux trophées des travaux publics 2016, catégorie Environnement et énergie. Lauréat : Luc Durand, logistique de chantier.



© GRANDS TRAVAUX DE L'OcéAN INDIEN

Barrière de bulles lors d'un tir de fragmentation, sur le chantier d'une digue de la Nouvelle route du littoral de la Réunion.

COUVERTURE TEMPORAIRE DE VOIE FERRÉE



Les portiques supportent un grillage en acier et une géogrid en polymère.

© GTS

Une galerie de protection provisoire a été installée en urgence au-dessus de la voie ferrée Lyon-Chambéry à l'entrée du tunnel de La Colombière sur la commune de Brison-Saint-Innocent (Savoie), suite à une chute de pierres ayant provoqué un accident.

Grâce à elle, la circulation des trains n'a été interrompue que trente-trois heures au lieu de huit semaines. Cette couverture a ensuite permis à GTS de sécuriser la

falaise, en toute sécurité pour le personnel et pour les trains.

Cette solution de GTS a été conçue en collaboration avec SNCF Réseau⁽¹⁾ et nommée aux trophées de travaux publics 2016⁽²⁾.

→ Résistante à 218 kg chutant de 70 m

La galerie pare-pierres de 62 m de long et 20 de haut a été montée parallèlement à la voie. Les portiques ont ensuite été

grutés en place. Ils comportent un toit en grillage métallique doublé d'un filet textile polymère Texinov, capable de résister à la chute de 70 m d'une pierre de 218 kg. Les connexions entre les deux couches sont flottantes de façon à encaisser les chocs sans rupture. ■

⁽¹⁾ Maîtrise d'œuvre : Sage Ingénierie.

⁽²⁾ Catégorie innovations techniques et recherche. Lauréat : Charier, incorporation de chanvre dans plateformes routières.

CESAR_{LCP}
 Logiciel Eléments Finis 2D & 3D
 Géotechnique - Tunnels - Génie Civil

Nouvelle version 6
 adaptée au calcul et à l'analyse
 de vos projets géotechniques

Exemples de nouveautés : HSM - Consolidation
 Ecoulements non saturés - Ancrages frottants...

Téléchargez une version d'évaluation
 sur www.cesar-lcpc.com

itech
 Editeur de logiciels pour le Génie Civil

8 quai Bir-Hakeim 94410 Saint-Maurice
 Tél.: +33 1 49 76 12 59
www.itech-soft.com contact@itech-soft.com

REVÊTEMENT À GRANULATS DE PORCELAINE

L'agglomération de Limoges (Haute-Vienne) expérimente l'incorporation de déchets de porcelaine blanche dans un enrobé, avec Colas, depuis mai-juin 2016. Le revêtement épandu sur 280 m² d'un plateau surélevé, ne s'arrache pas sous l'effet de la circulation au carrefour, observe le pôle infrastructures routières et travaux. L'adhérence est bonne selon les essais du Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) qui a également mesuré sa luminance en mai 2017. La porcelaine vient des usines locales qui trouvent ainsi un débouché aux pièces défectueuses.

→ Diminuer l'éclairage public

Le rendu visuel - poudreuse éparpillée ou pâquerettes sur fond noir - dédie cette solution aux espaces urbains à valoriser et aux carrefours, à éclairer spécifiquement. En effet, la porcelaine blanche réfléchit davantage la lumière sans qu'il soit besoin d'intensifier l'éclairage. L'expérimentation, qui vise à optimiser le

couple revêtement à porcelaine-éclairage à leds, se poursuit à la rentrée sur un tronçon de la zone d'activités nord de Limoges. Il s'agit de vérifier que la consommation de l'éclairage public baisse avec cette solution.

C'est la suite logique des essais avec des granulats clairs, procédé Lumiroute de 2011 mis en œuvre en 2015-2016⁽¹⁾, sur un autre boulevard de la métropole. ■

⁽¹⁾ Malet, Spie Batignolles Énergie et Thorn, avec le réseau technique de l'État et l'Ademe.

BÉTON À CIMENT ET COQUILLES

Le mélange ciment-coquillages semble prometteur en matière de biodiversité et pourrait être employé pour des quais et ouvrages portuaires immergés, selon Mohamed Boutouil, directeur de la recherche à l'École supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction de Caen.

Baptisé Recif*, le projet, conçu en 2013, a débuté par l'étude des propriétés de bétons où 60% des granulats ont été remplacés par des coquilles de pétoncles broyées : béton ordinaire, auto plaçant ou encore à surface rugueuse favorable aux micro-organismes.

En 2015, 12 modules de récifs artificiels ont été immergés au large de Cherbourg (Manche) à la place d'une partie de digue. Suivi jusqu'en 2020.

* Cadre : programme européen de coopération transfrontalière Interreg IV avec l'Angleterre.

CÔNE EN BÉTON

GF Moselle réalise un cône en béton pour apporter la lumière du jour dans le futur centre commercial de Metz (Moselle), à la demande de GTM-Hallé. L'entreprise de Château-Salins préfabrique les éléments en béton armé et les armatures. Le cône mesure 6,20 m de haut, 12,90 m de diamètre en pied et 7,85 m en tête. Le centre commercial, baptisé Muse, ouvre en octobre. Il a été dessiné par Jean-Paul Viguier, architecte. Il est implanté sur 2,8 hectares, accueille près de 1 000 commerces, des logements, une zone de loisirs et un centre de congrès.



© GF MOSELLE

Installation des panneaux du cône de 6,20 m de haut.



Membre du Réseau Congés Intempéries BTP

CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

Nos missions :

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

La CNETP regroupe **7 300 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à près de **260 000 salariés connus**.

Nos coordonnées :

- **Par courrier :**
31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09
- **Par Internet :** www.cnetp.fr
- **Par mail :** sur www.cnetp.fr, lien [nous contacter](#)
- **Par téléphone :**
 - pour les entreprises : 01.70.38.07.70
 - pour les salariés : 01.70.38.07.77
- **Serveur vocal (24h/24) :** 01.70.38.09.00



REVIT 2018

La version 2018 de la plateforme de travail collaborative Revit va sortir.

Elle prend en compte des demandes d'utilisateurs.

Les compatibilités avec des logiciels extérieurs sont plus nombreuses.

Le travail entre architectes, ingénieurs et entrepreneurs, en Bim, est facilité, selon Autodesk qui la propose, par abonnement.

SIG, CAO ET BIM

Gismartware, éditeur de logiciels de systèmes d'informations géographiques (SIG), a repris Mappia, éditrice depuis 2015 de la plateforme sur internet Govalid avec les outils Gosuite.

Govalid fluidifie la gestion des données entre la conception assistée par ordinateur (CAO), le Bim et les SIG.

INSTITUT SUPER SMARTGRID

Spie Batignolles Sud-Est livrera en janvier 2018 un bâtiment cubique destiné à des tests de très fortes puissances électriques pour le Supergrid Institute à Villeurbanne (Rhône). L'institut, créé en 2014, mène des recherches sur les futurs réseaux de transport de l'énergie électrique.

Une charpente métallique stabilise le cube de 25 m de côté et complètement nu. Les travaux ont débuté en janvier. Par ailleurs, la filiale de Spie Batignolles vient de terminer un immeuble sur le même site, avec TCE, entreprise générale. Il s'agit d'un bâtiment vitrine de recherche et développement en transition énergétique. Sur 5560 m², il abrite des bureaux, des plateaux de recherche, des laboratoires et des halls d'assemblage et d'essais de 17 m de haut.

→ 86,6 millions d'euros

Principaux actionnaires du Supergrid Institute : General Electric, la Caisse des dépôts et consignations, Nexans, Alstom Transport, Vettiner et EDF.

Il a obtenu 86,6 millions d'euros de l'Agence nationale de la recherche, la région Auvergne/Rhône-Alpes et la métropole de Lyon.

Les recherches sont confiées notamment aux universités de Paris Sud, Lyon, Grenoble et à Centrale Supélec, Centrale Lyon, Insa Lyon et Grenoble INP. ■



Chantier du 1^{er} immeuble. Un second bâtiment, cubique, sera prêt en 2018.

© SPIE BATIGNOLLES SUD-EST

RENAISSANCE DE LA BIBLIOTHÈQUE HUMANISTE DE SÉLESTAT



La charpente métallique en 3 dimensions contribue à la tenue parasismique du bâtiment. On aperçoit la structure métallique ajoutée dans les bas-côtés.

La halle aux blés de Sélestat (Bas-Rhin) vit sa 2^e transformation. Construite en 1843 comme une église avec nef et bas-côtés, elle devient en 1889 la Bibliothèque humaniste. En 2018, elle rouvre avec un intérieur rénové et une extension, signés Rudy Ricciotti, architecte. La bibliothèque s'étend désormais sur 2800 m², soit 30% de plus qu'avant. Des réserves sont créées en sous-sol⁽¹⁾. Des demi-étages reçoivent les terminaux de traitement d'air.

Le grand public et les chercheurs seront ainsi mieux accueillis, et les collections, mieux présentées.

→ Nouveau squelette de métal

Les travaux de gros œuvre ont eu lieu de mai 2016 à avril 2017. Le sol, évidé sur 4 m, a révélé les vestiges d'un cimetière carolingien. La nappe phréatique se situe à 5,50 m, d'où des protections contre ses remontées. Les fondations ont été reprises par jet grouting sous les façades, pignons et poteaux.

Les dalles ont été démolies ainsi que les contreforts des voûtes latérales. Ont été reconstruits en béton, le plancher du rez-de-chaussée et du 1^{er} étage. Ces transformations et l'augmentation de surface ont entraîné une consolidation de la structure et sa remise aux normes parasismiques (zone 3).

La structure en piliers de grès et poutres métalliques a été doublée de poteaux en métal reliés aux fondations et à une charpente métallique sous toiture (hors charpente du toit). L'exosquelette ainsi formé, assure la stabilité du bâti.

La charpente en 3 dimensions, voulue par l'architecte et fabriquée par BCM, épouse la longueur de la nef, légèrement courbe.

→ Piliers habillés de grès rose

La lumière pénètre dans l'extension de la bibliothèque par une façade en murs-rideaux de verre derrière 25 piliers habillés de grès rose. Les éléments porteurs sont les cages d'escalier et d'ascenseurs, et 25 poteaux en acier raccordés aux dalles. Des cylindres de grès sont enfilés tels des perles sur ces colonnes.

Sur les 13,5 millions d'euros TTC que coûte la restructuration, dont une petite dizaine de travaux, l'État apporte 1,58 million, la Région, 1,5 et le département, 1,5.

La rénovation a été confiée par la Ville à un groupement conception-réalisation mené par Demathieu Bard Construction Est. Maîtrise d'œuvre conception : Rudy Ricciotti, Lamoureux & Ricciotti Ingénierie, Ingerop ; maîtrise d'œuvre exécution : Thales Architectures et OTE ; charpentier métallique structure (sauf poteaux extension) : Baumert Constructions Métalliques. ■



Future Bibliothèque humaniste de Sélestat avec son extension à piliers de grès rose.

UNE MINE DE DOCUMENTS ANCIENS

La restructuration de la Bibliothèque humaniste de Sélestat (Bas-Rhin) vient logiquement après son inscription par l'Unesco au registre de la Mémoire du monde, en 2011.

Le fonds d'origine, 670 volumes, a été légué par Beatus Rhenanus, philosophe et lettré, en juillet 1547. Aujourd'hui, elle rassemble 154 manuscrits dont le *Lectionnaire mérovingien* (VII^e siècle) et la *Bible dite de la Sorbonne* (XIII^e), 1611 imprimés des XV^e et XVI^e et des objets d'art.

CHRYSO CONSOMME DU bioGNL

Chryso, fabricant d'adjuvants et d'additifs pour béton, ciment ou plâtre, utilise du biométhane liquéfié depuis mars. Il avait abandonné le fuel en 2014 au profit du gaz naturel liquéfié, son site de Sermaises-du-Loiret (Loiret) étant éloigné du réseau. Ce bioGNL est produit par la station d'épuration du Siaap à Valenton dans le Val-de-Marne* et distribué en citerne par LNgénération, filiale d'Engie.

* Cf. Travaux n°927, octobre 2016, page 9.



© SUEZ

Citerne de GNL d'origine renouvelable chez l'industriel.

BRUXELLES : MÉTRO AUTOMATIQUE

Le groupement Systra-Geste-Tractabel s'est vu confié la mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage de la transformation du métro de la capitale belge, par le Syndicat des transports intercommunaux de Bruxelles. Il avait déjà travaillé sur la conception du projet. À terme, les lignes de métro 1 et 5 seront automatisées.

Sur six ans, Systra avec ses partenaires sera présent de la conception détaillée jusqu'à la mise en service. Les travaux ont lieu de nuit.

Grâce à la conduite des trains assistée par ordinateur, les rames passent plus souvent et transportent plus de monde à la fois.



© MARCUS LINISTROMISTOCKPHOTOS

Le métro de Bruxelles s'automatise.

(1) Sauf documents précieux stockés en étage.

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 12 AU 14 JUILLET

Ecocity World Summit 2017*Lieu : Melbourne (Australie)*<http://vivapolis-ivd.com>• 28 AOÛT AU 1^{er} SEPTEMBRE**Conférence internationale sur les tunnels et les espaces souterrains***Lieu : Séoul (Corée du Sud)*www.ita-aites.org

• 6 AU 8 SEPTEMBRE

Passerelles*Lieu : Berlin (Allemagne)*www.footbridge2017.com

• 19 SEPTEMBRE

Bimworld Universities*Lieu : La Défense (Grande arche)*www.bim-universities.com

• 19 AU 23 SEPTEMBRE

Symposium Engineering the future*Lieu : Vancouver (Canada)*www.iabse.org

• 25 AU 27 SEPTEMBRE

Énergie et industrie*Lieu : Montrouge (Hauts-de-Seine)*www.colloque-energie-industrie.ademe.fr

• 26 ET 27 SEPTEMBRE

Assises du Port du futur*Lieu : Paris*www.eau-mer-fleuves.cerema.fr

• 2 AU 4 OCTOBRE

BFUP, 3^e symposium international*Lieu : Montpellier (Hérault)*www.rilem.org

• 11 ET 12 OCTOBRE

Renforcement des structures de génie civil (colloque Le Pont)*Lieu : Toulouse*www.afgc.asso.fr

• 24 AU 26 OCTOBRE

Infrastructures souterraines en milieu urbain*Lieu : Wrocław (Pologne)*www.ita-aites.org

• 6 AU 10 NOVEMBRE

Bâtimat*Lieu : Paris (Villepinte)*www.batimat.com

• 13 AU 16 NOVEMBRE

Congrès de l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain*Lieu : Paris*www.afes2017.com/fr/

• 16 NOVEMBRE

Assises nationales de l'éolien terrestre*Lieu : Paris (Maison de la chimie)*www.enr.fr

• 27 AU 29 NOVEMBRE

8^e assises nationales de l'environnement sonore*Lieu : Paris (Cité des sciences et de l'industrie)*www.bruit.fr

FORMATIONS

• 4 AU 6 OCTOBRE

Digues en site portuaire*Lieu : Paris*<http://formation-continue.enpc.fr>

• 2 AU 4 OCTOBRE

Eurocode 2 : calcul des structures en béton, application bâtiment et génie civil*Lieu : Paris*<http://formation-continue.enpc.fr>

• 5 ET 6 OCTOBRE

Entretien et maintenance des plates-formes de tramway*Lieu : Nantes*<http://formation-continue.enpc.fr>

• 19 ET 20 OCTOBRE

Modèles économiques et contractuels au service de la transition énergétique de la ville (avec Efficacity)*Lieu : Paris*<http://formation-continue.enpc.fr>

NOMINATIONS

AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE :

Guillaume Choisy a été nommé directeur général de cette agence de l'eau à la mi-avril, à la place de Laurent Bergeot.

ASSQUAL :

L'Association pour la promotion de la qualité est désormais dirigée par Pierre Lebon à la suite de Robert Biguet.

ASSYSTEM :

Sylvie Houlière Mayca rejoint la division Énergie & Infrastructure du groupe, en tant que vice-présidente Systems. Elle est chargée de la stratégie et du développement de la nouvelle entité "Systèmes critiques de contrôle et de sécurité".

CINOV :

La Cinov Giac, qui regroupe les ingénieurs-conseils et les bureaux d'études spécialisés en acoustique (bâtiment, environnement, industrie, formation et recherche), est désormais présidée par Denis Bozetto qui succède à Éric Gaucher.

COVED :

Stéphane Leterrier a été nommé directeur général de la société de traitement de déchets rachetée par Paprec au groupe Saur.

EIFFAGE CONSTRUCTION :

Olivier Genis remplace Michel Gos-toli à la présidence de la société.

SER :

Alexandre Roesch succède à Damien Mathon à la délégation générale du Syndicat des énergies renouvelables.

FRANCE STRATÉGIE :

Véronique Fouque est secrétaire générale et directrice du développement, postes naguère occupés par Jean Pisani-Ferry.

FFB :

La présidence de la fédération régionale du bâtiment de la petite couronne de Paris (départements 75, 92, 93, 94), dénommée FFB Grand Paris, est entre les mains de Jean-Luc Tuffier, successeur de Patrick Aimon.

GÉOMEMBRANES :

Gilles Bernardeau remplace Jacques Saintot en tant que président de l'Association française des applicateurs de géomembranes.

GÉOSYNTHÉTIQUES :

Nathalie Touze-Foltz a été élue présidente du Comité français des géosynthétiques (CFG). Elle succède à Jean-Pierre Magnan. Yves Durkheim devient 1^{er} vice-président et Sébastien Guenaicheau prend sa place en tant que 2^e vice-président. Benjamin Chevrol entre au bureau du CFG comme trésorier adjoint.

GRAND PARIS :

Frédéric Brédillot intègre le directoire de la Société du Grand Paris. Il occupe la place de Catherine Barrot-Pérenet.

MONT BLANC :

Riccardo Sessa remplace François Drouin à la présidence du conseil de surveillance du Groupement d'intérêt économique européen du tunnel du mont Blanc, association d'ATMB (France) et de SITMB (Italie), concessionnaires du tunnel. Gilles Rakoczy redevient directeur général. Thierry Repentin succède à François Drouin à la présidence du conseil d'administration d'ATMB.

ROUTES :

Dominique Mondé (vice-président du Syndicat des équipements de la route) a été élu président du Comité européen de normalisation des équipements de la route.

PREMIERS PAS EN BIM

Il est parfois profitable de revenir aux bases d'un domaine même si nous le pratiquons déjà. Il peut en être ainsi du Building Information Modeling/Bâtiment et informations modélisés (Bim). Eyrolles et l'Afnor coéditent les *Premiers pas en Bim* alors que 12 ouvrages sur le Bim sont déjà parus depuis 2014

chez le premier. Sous-titré *L'essentiel en 100 pages*, l'ouvrage entend lever les freins à l'utilisation du Bim et propose de « *se rapprocher de la démarche, pas après pas, avec des bases simples qui permettent aux professionnels (...) d'appréhender la globalité du sujet* ». Il distingue dès le départ deux niveaux :

celui du projet et celui de l'entreprise. Largement illustré, ce manuel a été écrit par Annalisa de Maestri, ingénieur-architecte, directrice d'un bureau d'études spécialisé.

www.editions-eyrolles.com
ou www.boutique.afnor.org ■



CRÉER DES FAMILLES D'OBJETS

Voici un ouvrage qui se concentre sur une partie de la démarche Bim (Bâtiment et informations modélisées) : la création de familles d'objets dans l'environnement Revit, plate-forme de travail collaborative Autodesk. Un projet met en scène un ensemble d'objets (murs, fenêtres, dalles, poteaux, équipements,

etc.) qui doivent être reliés physiquement et dans le Bim.

Le livre de 340 pages comporte 17 exercices pratiques, accessibles à tous, débutants ou non, pour créer ses propres familles d'objets.

Trois professionnels le signent. Vincent Bleyenheuft utilise Revit depuis 2007

dans son agence d'architecture. Julien Blachère, ingénieur structures, est Bim manager dans un cabinet d'ingénierie. Christophe Onraet est ingénieur Revit/Bim chez un éditeur de solutions informatiques.

www.editions-eyrolles.com ■



Enka solutions

Géosynthétiques hautes performances pour le génie civil et les travaux publics

Légers, souples et faciles à installer, les produits Enka Solutions accompagnent les projets les plus exigeants partout dans le monde.



 Progress through performance
A Low & Bonar solution

Low & Bonar
12 rue de la Renaissance / 92184 Antony Cedex / T +33 157636740
info@enkasolutions.com / www.enkasolutions.com

TERRASOL L'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE À FORTE VALEUR AJOUTÉE

LA GÉOTECHNIQUE, DISCIPLINE COMPLEXE À LA FRONTIÈRE ENTRE LES SCIENCES NATURALISTES, LES SCIENCES EXACTES ET LES TECHNIQUES DE LA CONSTRUCTION, EST EN CONSTANTE ÉVOLUTION : LES OUTILS D'ANALYSE ET LES PROCÉDÉS DE CONSTRUCTION PROGRESSED POUR RÉPONDRE À DES PROJETS INTÉGRÉS DANS UN ENVIRONNEMENT TOUJOURS PLUS CONTRAIGNANT, AVEC DEUX PRÉOCCUPATIONS GÉOTECHNIQUES PRINCIPALES : GARANTIR LA STABILITÉ DES OUVRAGES BIEN SÛR, MAIS AUSSI OPTIMISER LES PROJETS. **ENTRETIEN AVEC VALÉRIE BERNHARDT, DIRECTRICE GÉNÉRALE DE TERRASOL.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



LEADER RECONNU DANS LE DOMAINE DE L'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE EN FRANCE COMME À L'INTERNATIONAL, TERRASOL (GROUPE SETEC) ACCOMPAGNE SES CLIENTS, QU'ILS SOIENT MAÎTRES D'OUVRAGE, ENTREPRISES, INDUSTRIELS, OU INGÉNIERIES DE GÉNIE CIVIL, EN S'APPUYANT SUR UN SAVOIR-FAIRE SPÉCIFIQUE DÉVELOPPÉ DEPUIS PRÈS DE 40 ANS. CE QUE MET EN ÉVIDENCE VALÉRIE BERNHARDT, DIRECTRICE GÉNÉRALE DE LA SOCIÉTÉ DEPUIS 2013.

Quelles sont les origines de Terrasol ?

Terrasol a été créée en 1979 par le professeur François Schlosser et Alain Guilloux, pour proposer des prestations d'ingénieurs-conseils en géotechnique, essentiellement aux entreprises dans un premier temps.

La société s'est ensuite développée rapidement car elle proposait une approche avancée et appliquée des aspects géotechniques des projets. En 1999, à l'occasion du départ en retraite du professeur Schlosser, Terrasol a intégré le groupe d'ingénierie pluridisciplinaire et indépendant Setec.



1 © MARC MONTAGNON - 2 © CREATIVE COMMONS - 3 © TERRASOL

Terrasol comptait alors une vingtaine d'ingénieurs géotechniciens. Notre croissance s'est ensuite poursuivie régulièrement.

Terrasol aujourd'hui ?

Terrasol réalise un chiffre d'affaires annuel de plus de 8 millions d'euros (8,6 M€ en 2016), avec une équipe de plus de 60 personnes.

Notre activité porte sur les aspects géotechniques de tous types d'ouvrages (ouvrages d'art, travaux souterrains, ouvrages linéaires, bâtiments, ouvrages portuaires...), ainsi bien sûr que sur les thématiques de risques naturels (glissements, cavités, risque sismique, ...).

Nos prestations couvrent selon les cas les études préliminaires, l'assistance à maîtrise d'ouvrage, les synthèses géotechniques, les prestations de maîtrise d'œuvre (études et travaux), l'assistance en phase d'appel d'offres, les études d'exécution, le contrôle externe, ou encore les phases de diagnostic/expertise. 45 % de l'activité se fait

1- Valérie Bernhardt, directrice générale de Terrasol.

2- Viaduc de Millau, déjà un ouvrage emblématique.

3- Massifs de fondations du viaduc de Millau.

4- Pont Mohammed VI au Maroc (viaduc du Bouregreg).

5- Route de la corniche à Brazzaville (Congo Brazzaville).

VALÉRIE BERNHARDT : PARCOURS

Ingénieur de l'École Centrale de Lyon - Option Génie Civil (promotion 1994), Valérie Bernhardt a commencé sa carrière en tant qu'ingénieur d'études au bureau d'études central de l'entreprise Bachy (puis Soletanche Bachy) en 1994, après y avoir fait plusieurs stages. Elle s'intéresse tout particulièrement à la modélisation géotechnique aux éléments finis, et au développement d'outils de calcul.

Après une parenthèse de deux ans consacrée à la création d'une activité de développement de logiciels géotechniques en tant qu'indépendante, elle rejoint en 2000 Terrasol et son tout nouveau « Pôle logiciels » dont elle devient la responsable en 2002. Elle évolue ensuite au sein de Terrasol vers des fonctions plus globales : directrice adjointe en 2008, directrice en 2011, puis directrice générale depuis 2013.

Valérie Bernhardt est également présidente du CFMS (Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique) depuis 2016, et membre élu du Bureau Géotechnique de Syntec Ingénierie.

Son investissement au sein du CFMS a toujours été pour elle « une évidence ». Pour la petite histoire, elle s'est portée volontaire à la fin des années 90 pour créer le premier site internet de ce comité. Elle a par la suite été élue membre de la Commission Technique, puis membre du Conseil et s'est notamment impliquée significativement au sein du Comité d'Organisation du 18^e Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique qui s'est tenu à Paris en 2013 et a rassemblé plus de 2 000 participants.

Le CFMS est très actif dans le domaine scientifique : il organise notamment des séances techniques régulières, la conférence Coulomb annuelle, le prix Kerisel tous les 2 ans, et anime différents groupes de travail ou y participe. Il pilote ou contribue également à différentes actions aux côtés du CFGI, du CFMR et parfois du CFG ou de l'AFPS : JNGG tous les 2 ans, Revue Française de Géotechnique, site internet de la géotechnique française, etc.

Le CFMS se préoccupe actuellement tout particulièrement de la place de la géotechnique dans l'acte de construire et a créé récemment un groupe de travail dédié à la « promotion de la géotechnique », auquel sont associés le Bureau Géotechnique de Syntec Ingénierie et l'USG. Ce groupe a pour double objet de susciter des vocations auprès des jeunes, et de valoriser la géotechnique auprès de l'ensemble des acteurs de la construction, qui connaissent parfois mal cette discipline et ce qu'elle peut apporter aux projets.

auprès de nos clients extérieurs, 40 % au sein du groupe Setec (essentiellement en appui des équipes structures) et, enfin, 15 % environ correspondent

à la vente de logiciels et formations. Par ailleurs, environ 25 % de nos prestations portent sur des projets à l'étranger.

En quoi le modèle de développement de Terrasol est-il particulier ?

Le modèle de Terrasol repose sur trois choix fondateurs qui ont fortement marqué le développement de Terrasol. Tout d'abord, Terrasol a volontairement fait le choix de se consacrer exclusivement aux prestations intellectuelles en géotechnique, sans développer d'activité de sondages ou de laboratoire, ceci afin de conserver une indépendance complète lors de ses prescriptions de reconnaissances. Nous sous-traitons les reconnaissances au cas par cas lorsque ces prestations font partie de nos marchés.

Et surtout, Terrasol a toujours fortement investi dans les développements scientifiques (que ce soit en propre, ou au sein de la Communauté Scientifique), afin de développer des approches novatrices toujours plus fiables et performantes.

L'histoire du logiciel Talren, outil de calcul de la stabilité globale des ouvrages géotechniques, est une bonne illustration de cet investissement : le développement de ce logiciel, en réponse à une demande interne, remonte au début des années 80, et il s'est fait ensuite en parallèle des travaux du Projet National Clouterre, auquel ont participé François Schlosser (en tant que président du projet), Alain Guilloux et Bruno Simon : les projets Clouterre et Talren se sont ainsi enrichis mutuellement.

Le logiciel Talren a suscité rapidement l'intérêt d'entreprises extérieures telles qu'EDF ou Solétanche, ce qui a conduit Terrasol à commercialiser Talren de façon officielle à partir des années 1990 : c'est le 3^e choix fondateur de Terrasol, qui a choisi de diffuser largement ses logiciels de calcul plutôt que de les conserver en interne. ▶

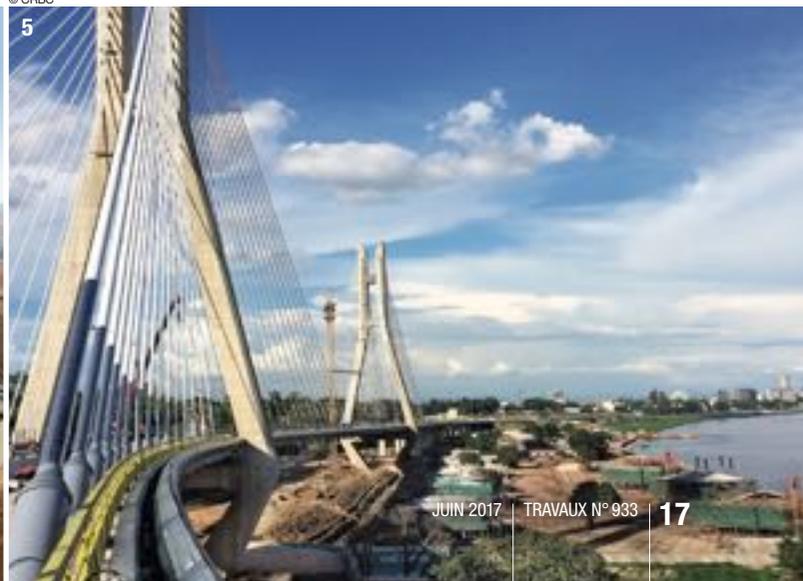
© DIADES

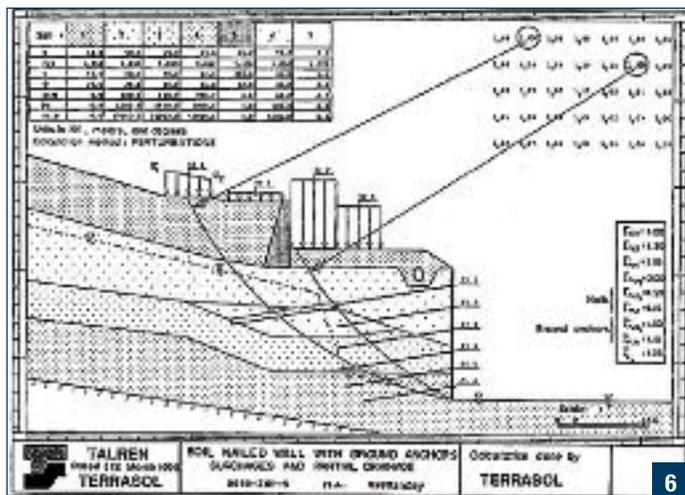
4



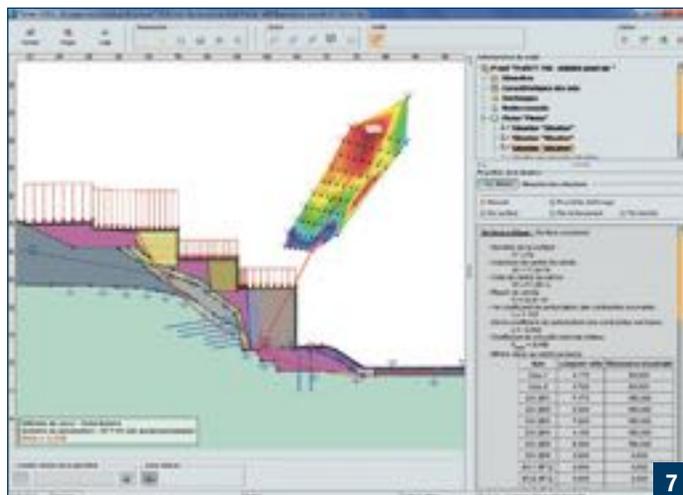
© CRBC

5





© DOC TERRASOL



© DOC TERRASOL

Nous avons ensuite poursuivi notre activité dans le domaine des logiciels de calcul géotechnique et élargi notre catalogue, jusqu'à en faire une activité à part entière de la société. Et ces logiciels évoluent en continu, aussi bien du côté des interfaces utilisateurs (développées au sein du Pôle Logiciels), que des moteurs de calcul (conçus au sein de la Direction Scientifique).

Parmi les très nombreux projets auxquels a participé Terrasol, si vous deviez en citer un seul ?

L'un des ouvrages les plus emblématiques sur lesquels Terrasol a été amenée à intervenir est le viaduc de Millau. Après avoir participé à l'étude des différentes solutions au début des années 1990, puis au concours de concession avec Eiffage, Terrasol a participé, toujours pour le compte d'Eiffage, à la mission de maîtrise d'œuvre assurée par Setec TPI : suivi géotechnique sur chantier des travaux de terrassement et de fondations, et contrôle des notes de calcul sur la stabilité des ouvrages géotechniques.

La grande sensibilité de l'ouvrage aux tassements des fondations a conduit à mettre en œuvre sur ce projet exceptionnel la méthode observationnelle, en complément d'une analyse préalable de l'interaction sol/fondation novatrice pour l'époque. Les mesures ont montré que les mouvements sont restés faibles et admissibles.

Mais bien sûr, on ne peut pas se limiter à citer un seul projet...

D'autres ouvrages d'art ?

Au Maroc, Terrasol est intervenue entre 2008 et 2014 avec les équipes de Setec TPI sur le Pont Mohammed VI, le plus grand pont haubané du continent africain, inauguré le 7 juillet 2016 par le Roi du Maroc : études géotechniques APS et APD, définition et suivi des reconnaissances géotechniques, assistance géotechnique pour l'exécution des travaux, et contrôle extérieur des études d'exécution géotechniques. Autre exemple : sur la route côtière de Brazzaville au Congo, Terrasol a participé au contrôle des ouvrages, dont un pont à haubans, au sein du

groupement Setec TPI/SGI, chargé de la maîtrise d'œuvre du projet.

Terrasol a aussi assuré la mission de contrôle du dimensionnement des fondations du troisième pont sur le Bosphore - 1 400 m de longueur en une seule travée - conçu par T-Ingénierie et Michel Virlogeux.

Citons encore la liaison Hong-Kong - Zhuhai - Macao, qui comporte notamment un viaduc de 9,4 km. Le groupement Bouygues/China Harbour nous

a sollicités pour une assistance au dimensionnement des fondations des trois viaducs élémentaires de l'ouvrage, situé dans le chenal maritime de l'aéroport, en contexte sismique.

Outre ces ouvrages exceptionnels, Terrasol est amenée à étudier les fondations de nombreux ouvrages d'art (courants et non-courants) dans le cadre de projets linéaires tels que les routes et autoroutes, ou les lignes à grande vitesse et voies ferrées classiques : sur ces projets, nous sommes le plus souvent associés à Setec International, qui se charge alors de la géotechnique des sections courantes.

Le cas des ponts-rails en milieu urbain (passages sous voies ferrées existantes) est également intéressant : ces ouvrages présentent souvent une configuration qui peut paraître assez simple de prime abord ; mais leur grande sensibilité aux déplacements, le contexte urbain, et la nécessaire prise en compte du couplage hydro-mécanique rendent souvent ces opérations assez complexes sur le plan géotechnique.

6 & 7- Copie d'écran Talren 1991, issue des Recommandations Clouterre 1991, pour l'histoire, et copie d'écran Talren v5 (2017).

8- Troisième pont sur le Bosphore.

9- Contournement ferroviaire Nîmes - Montpellier.

© ICA IC ICTAS ASTALDI

8



© OC'VIA - YANNICK BROSSARD

9



Et dans le domaine du bâtiment ?

Pour rester sur la thématique des fondations, nous intervenons effectivement souvent sur des projets de tours de grande hauteur, telles que les tours à la Défense ou les tours Entisar et Dubaï Creek Harbour à Dubaï ; sur des projets exceptionnels tels que la Fondation Louis Vuitton à Paris ; sur la réhabilitation ou le réaménagement de bâtiments historiques (par exemple les entrepôts McDonald's ou la Poste du Louvre à Paris) ; ou encore sur des reprises en sous-œuvre plus classiques.

Sur ces projets se posent des problématiques de conception de fondations (voire parfois de réutilisation de fondations existantes), mais aussi d'excavations/soutènements, le plus souvent dans des contextes urbains complexes.

Nous incluons aussi dans notre activité « bâtiment » les installations industrielles, telles que le nouveau pas de tir d'Ariane 6 à Kourou en Guyane, pour lequel nous avons assuré tout récemment les études géotechniques, avec des missions de suivi des travaux sur site.

Les travaux souterrains constituent l'un des grands domaines d'expertise traditionnels de Terrasol. Quelle est votre implication sur le projet du Grand Paris Express ?

Sur ce projet très ambitieux, Terrasol a été présente dès l'origine avec les études en 2008 pour la liaison Arc Express puis les premières études préliminaires de la ligne « rouge ».

Nous intervenons à présent sur presque tous les lots du Grand Paris Express, et sous plusieurs formes : en tant que maître d'œuvre au sein

TERRASOL : UNE ÉQUIPE EXPERTE ET UNE DIRECTION COLLÉGIALE

L'équipe de Terrasol compte aujourd'hui plus de 50 ingénieurs géotechniciens, dont plusieurs experts qui sont pour certains des « anciens » de Terrasol. La réussite de Terrasol tient avant tout à la qualité et à l'implication de ses équipes : le recrutement et la formation sont donc deux priorités de la société.

Le mode de direction de Terrasol, collégial, est lui aussi déterminant : pour diriger la société et définir les orientations stratégiques, Valérie Bernhardt s'appuie sur un comité de direction qui rassemble : Hervé Le Bissonnais (Directeur Général Délégué), Fahd Cuira (Directeur Scientifique), et Jean Drivet (Directeur - Responsable de l'agence Terrasol Rhône-Alpes).

des équipes Setec (lignes 15 Sud-T3, 14 Sud et 15 Ouest), assistant à maîtrise d'ouvrage géotechnique (T1/T5a au nord, et ligne 18), ou encore en phases d'appel d'offres et d'exécution auprès des entreprises. Ces interventions illustrent bien le fait que Terrasol sait s'adapter et prendre différentes casquettes selon les projets.

Après plusieurs années de travail en phases études, nous commençons à

présent à mobiliser des équipes en suivi des travaux, puisque les travaux démarrent actuellement sur certains lots. Au-delà de nos interventions classiques, la Société du Grand Paris nous a également confié, dans le cadre de nos prestations d'AMO géotechnique, une mission de conseil spécifique visant à identifier et caractériser les possibilités de valorisation des déblais produits par le projet, mission sur laquelle nous collaborons avec le LERM (également filiale du groupe Setec). Enfin, Terrasol intervient aussi sur le prolongement Éole entre St-Lazare et La Défense, et sur plusieurs lignes existantes du métro parisien (prolongements, réaménagement de stations, ...).

Quelle est l'implication de Terrasol dans le domaine de l'énergie ?

Nous intervenons par exemple sur de nombreux projets de centrales électriques (tels que celui de Plomin, en Croatie, pour Alstom Power Systems), et de réservoirs de pétrole ou de gaz (citons nos interventions sur le

projet des 3 réservoirs de Dunkerque LNG pour Bouygues TP, et sur le projet Shah Deniz en Azerbaïdjan, pour Entrepose Projets) : nous sommes en général sollicités pour le dimensionnement des fondations ou solutions de renforcement de sol nécessaires pour assurer la stabilité de ces installations. Nous nous mobilisons également dans le domaine nucléaire : nous intervenons par exemple pour le groupement Setec / Tractebel / Egis sur l'EPR de Hinkley Point (Royaume-Uni) pour des analyses d'interaction sol-structure sous sollicitations statiques (raideurs statiques et effets thermo-mécaniques) et sismiques (impédances dynamiques). Et les énergies renouvelables sont, elles aussi, porteuses de thématiques géotechniques : Terrasol s'est ainsi vu confier par Vergnet les études géotechniques du projet Ashegoda Wind Farm en Éthiopie, parc éolien de 84 machines d'une puissance totale de 120 MW.

Nous avons également été sollicités récemment par EDF Énergies Nouvelles pour réaliser une étude approfondie du comportement des fondations gravitaires d'éoliennes offshore. L'objectif de l'étude était d'évaluer la pertinence des approches de dimensionnement usuelles vis-à-vis des problématiques de décollement, de portance et de raideur, en comparaison avec des traitements semi-analytiques (logiciel Foxta) ou numériques aux éléments finis (logiciel Plaxis).

Comment l'implication de Terrasol dans la communauté scientifique se concrétise-t-elle ?

Elle se manifeste tout d'abord au travers de notre participation active aux projets de recherche⁽¹⁾ : CLOUTERRE, FOREVER, MICROTUNNELS, ASIRI, RUFEX, SOLCYP, ARSCOP, etc. ▶

10- Pour EDF Énergies Nouvelles, Terrasol réalise une étude approfondie du comportement des fondations gravitaires d'éoliennes offshore.

11- Début des travaux de la gare Fort d'Issy - Vanves - Clamart du Grand Paris Express (tronçon T3 de la ligne 15).

© EDF EN

10



© TERRASOL

11





12

© LOUIS-MARIE DAUZAT / QUADRATURE INGENIERIE

Prenons l'exemple du projet ASIRI (2005-2011), dont Bruno Simon, notre directeur scientifique à cette époque, a été le directeur technique. Ce projet national a abouti à la rédaction de recommandations (disponibles librement sur Internet), dont un volet important est consacré à la conception, au dimensionnement et aux justifications des ouvrages sur inclusions rigides. Une suite du projet est d'ailleurs actuellement à l'étude.

Cette contribution est significative de la volonté de Terrasol d'être toujours à la pointe de l'innovation afin d'être en mesure de proposer à ses clients des expertises optimisées sur les projets. Si je reprends l'exemple ASIRI, les méthodes de dimensionnement mises au point ont été implémentées dans notre logiciel Foxta. Et tous les utilisateurs de ce logiciel, qu'ils soient internes ou extérieurs, ont pu bénéficier de ces développements.

Autre exemple : nous finançons et co-encadrons actuellement deux thèses CIFRE⁽²⁾ : l'une sur le « Comportement des parois de soutènement dans un

contexte exceptionnel (grande profondeur, formations déformables, environnement sensible) avec application aux gares du projet de Réseau de Transport Public du Grand Paris et comparaison avec les mesures réalisées sur site », avec l'université de Grenoble ; et la seconde sur le « Comportement sismique des fondations : vers l'introduction d'un aspect fréquentiel dans l'outil macroélément » avec l'IFSTTAR Nantes et l'École Centrale de Nantes.

Notre implication dans la communauté scientifique se traduit également par l'engagement de nos ingénieurs et experts auprès des associations professionnelles⁽³⁾ telles que le CFMS, le CFMR, le CFGI, l'AFTES, l'AFPS, ... et des groupes de travail qu'elles animent.

Par ailleurs, nous publions régulièrement dans différentes revues spécialisées et participons plusieurs fois par an à des congrès : nous totalisons en moyenne entre 15 et 20 publications par an ces dernières années.

Enfin, nous sommes également très actifs dans l'enseignement en géo-

technique : École des Ponts ParisTech, Mastère AFTES, Centrale Paris, ENSG, Polytech' Grenoble, ... pour n'en citer que quelques-unes.

La formation constitue donc, elle aussi, l'une des préoccupations de Terrasol ?

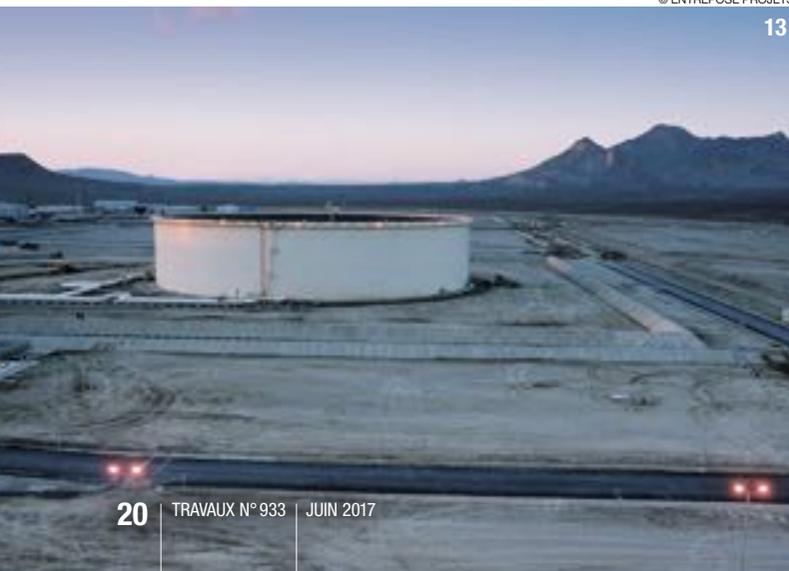
La formation au sens large a toujours fait l'objet d'un investissement fort de la part des équipes de Terrasol. La transmission des savoirs, qu'elle s'adresse aux futurs ingénieurs ou aux ingénieurs déjà en exercice, fait partie de nos priorités. Ainsi de nombreux ingénieurs de Terrasol contribuent aux enseignements des cursus géotechniques de la plupart des écoles que je viens de vous citer, ou encore contribuent à des actions de formation continue.

D'autre part, Terrasol est organisme agréé de formation en France et développe d'année en année sa propre offre de formation inter et intra-entreprises : à la fois géographiquement, en France et à l'étranger (et notamment en Afrique), et sur le plan thématique, avec des formations qui traitent de la modélisation numérique des ouvrages géotechniques, de la détermination des paramètres de calcul ou encore de l'application des Eurocodes, par

12- Fondation Louis Vuitton, à Paris (architecte : Frank Gehry).

13- Extension du terminal pétrolier de Shah Deniz (Azerbaïdjan) - Réservoirs de stockage.

14- Terrasol est intervenue à différents stades sur les deux phases de la LGV Est Européenne. S'agissant du tunnel de Sa-verne (bi-tube de 4 km de longueur), elle a participé au sein des équipes Setec à la mission de maîtrise d'œuvre.



13

© ENTREPOSE PROJETS



14

© RFF

exemple, allant ainsi bien au-delà des aspects liés à l'utilisation des logiciels proprement dite.

Nous avons ainsi formé 300 ingénieurs en 2016 dans le cadre de 30 sessions.

Quels développements en cours ou à venir pouvez-vous évoquer dès maintenant ?

Vous l'avez compris, c'est l'ADN de Terrasol que de chercher sans cesse de nouveaux champs de développement de son offre en ingénierie géotechnique !

J'ai déjà évoqué celui des éoliennes offshore. Nous poursuivons également notre développement dans le domaine de l'interaction sol-structure, en particulier sous sollicitations sismiques. En effet, l'arrivée des Eurocodes et la prise de conscience des enjeux liés au risque sismique font privilégier des modèles de calcul aptes à traiter d'une manière réaliste le comportement dynamique du sol en interaction avec la structure qu'il supporte. Terrasol a développé ces dernières années une pratique confirmée en conception parasismique tenant compte pleinement du caractère dynamique de la sollicitation sismique et des effets favorables (ou défavorables) qui en découlent. Nous avons d'ailleurs un contrat-cadre en cours avec EDF (en partenariat avec Setec TPI) pour la réalisation de prestations d'études en génie parasismique et géotechnique. Autre thématique, les géostructures énergétiques : quoique moins utilisées que chez nos voisins, elles sont amenées à se développer en France. Il s'agit de fondations profondes ou de parois équipées d'échangeurs de chaleur permettant d'assurer le chauffage ou la climatisation des bâtiments. Ces pieux ou parois sont soumis à des variations de température provoquant des tassements ou des soulèvements

ainsi que des sollicitations dans la structure, qu'il convient de prendre en compte lors de la conception des projets.

15- Couverture de l'ouvrage des recommandations ASIRI.

16- Le lot 1 de la ligne B du métro de Rennes inclut 8 km de tunnel, 9 stations et 5 puits. Terrasol est chargée sur ce projet de la mission G3 pour le groupement d'entreprises mandaté par Dodin Campenon Bernard.

17- Session de formation inter-entreprise portant sur les calculs de fondations à l'aide du logiciel Foxta.



© BR 15

Pour accompagner le développement de cette technique, Terrasol a développé un nouveau programme de calcul appelé Thermopie+ permettant la modélisation de l'interaction sol-pieu-structure pour un groupe de pieux géothermiques. Le modèle ainsi développé a fait l'objet de nombreuses applications parmi lesquelles le projet de station d'épuration de Sept-Sorts en France.

Nos équipes ont également beaucoup travaillé sur les analyses probabilistes (ou fiabilistes) et leurs applications en géotechnique.

Et à l'international ?

D'un point de vue moins technique mais plus stratégique, le développement à l'international est l'un de nos objectifs prioritaires. Nous y réalisons déjà 25 % de notre chiffre d'affaires mais ambitionnons bien sûr d'aller au-delà, ambition en phase avec celle de l'ensemble du groupe Setec qui dispose d'une direction de l'international très dynamique et s'est fixé des objectifs forts.

Historiquement, nous accompagnons les constructeurs français à l'étranger depuis la création de Terrasol.

Les acteurs français dans l'énergie et le secteur parapétrolier nous sollicitent également régulièrement sur des projets partout dans le monde. Et bien sûr, nous intervenons également à l'étranger via le groupe Setec.

Nos zones d'intervention les plus régulières sont le Maghreb, l'Afrique sub-saharienne, l'Europe et le Moyen-Orient, mais nous ne nous fixons pas de frontières !

Parmi nos succès récents, citons par exemple : les études des fondations de 8 réservoirs au Koweït pour Kogas, notre intervention sur l'aéroport des Maldives avec Setec International, les études et le suivi de chantier de la tour CFC à Casablanca pour Bymaro, ou encore le TER de Dakar au Sénégal, projet sur lequel le groupe Setec est présent avec Eiffage et pour lequel nous sommes en charge des études géotechniques des ouvrages.

Pour finir, un mot sur le Maroc, pays dans lequel nous nous sommes installés de manière pérenne, avec une équipe géotechnique locale permanente depuis 2015, et de très belles perspectives ! □

- 1- Projets de recherche :** FOREVER (FOndations REforcées VERTicalement) - ASIRI (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides - RUFEX : - Renforcement et réutilisation des Fondations Existantes - SOLCYP : SOLlicitations CYcliques sur Pieux de fondation - ARSCOP : nouvelles Approches de Reconnaissance des Sols et de Conception des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre.
- 2- CIFRE :** Conventions Industrielles de Formation par la Recherche.
- 3- CFMS :** Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique - **CFMR :** Comité Français de Mécanique des Roches - **CFGI :** Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement - **AFTES :** Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain - **AFPS :** Association Française de Génie Parasismique - **CFG :** Comité Français des Géosynthétiques - **USG :** Union Syndicale Géotechnique - **JNGG :** Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur.

© FRANCIS VIGOUROUX



16

© TERRASOL



17



1
© KAÉNA

KAÉNA VALORISER LE SOL GRÂCE À LA GÉOTECHNIQUE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

LA TERRE EST DÉFORMABLE ET IL EST CRUCIAL, DANS L'ACTE DE CONSTRUIRE, DE CONNAÎTRE L'ÉTAT ET LA NATURE DU SOL AVANT TOUTE CONSTRUCTION. CE À QUOI S'EMPLOIE KAÉNA, UNE PME INDÉPENDANTE BASÉE PRÈS DE GRENOBLE, FONDÉE PAR TROIS INGÉNIEURS GÉOTECHNICIENS PASSIONNÉS PAR LEUR MÉTIER ET QUI CONTRIBUENT, PAR LEUR EXPÉRIENCE ET LEUR MAÎTRISE DES SCIENCES DE LA TERRE ET DES STRUCTURES, À AIDER LES INTERVENANTS D'UN PROJET À PRENDRE LA BONNE DÉCISION, QUELLE QUE SOIT LA NATURE DU SOUS-SOL.

BENJAMIN GARDAVAUD, PRÉSIDENT ET CO-FONDATEUR DE L'ENTREPRISE, RETRACE LEUR BELLE AVENTURE ENTAMÉE VOICI BIENTÔT 10 ANS.

En effet, la société a été créée en 2009 par trois ingénieurs géotechniciens - Laurent Belorgey (Esem Orléans), Philippe Faure (Polytech Grenoble) et Benjamin Gardavaud (Polytech Grenoble) avec l'appui de Michel Petit Maire, président des sociétés SIC Infra et Amap'Sol. Depuis mai 2015, un quatrième associé - Jérôme

Sert (mastère de géologie de l'Université de Grenoble) - a rejoint le comité de direction.

Un retour en arrière de quelques années permet de comprendre le parcours des créateurs.

Entre 1994 et 1997, Benjamin Gardavaud et Laurent Belorgey sont jeunes ingénieurs géotechniciens au sein de

1- Les sondages au pénétromètre constituent l'une des spécialités de Kaëna.

Geoprojets, basée à Meylan, dans l'Isère, et s'imprègnent de la rigueur de son directeur Xavier Caquineau, qui fut l'un des collaborateurs de Louis Ménard, concepteur du pressiomètre.

De son côté, Philippe Faure exerce en tant qu'ingénieur dans un bureau d'études spécialisé dans l'analyse, la



© KAÉNA
2



© KAÉNA
3



4

prévention, la gestion et l'information des risques naturels à Grenoble.

Entre 1996 et 2004, Benjamin Gardavaud et Laurent Belorgey, rejoints par Philippe Faure, participent à la fusion de Geoprojets, Alpes Essais, Sopena, ESF et Nord Essais qui deviennent Solen.

UNE HISTOIRE DE PASSION

Au sein de Solen, entre 2004 et 2009, ils côtoient des experts français dans le domaine des matériaux et de la géotechnique : Gérard Philipponnat, Gabriel Durand, Michel Jacques Griffiths, Moulay Zherouni, Bertrand Hubert et, bien sûr, Xavier Caquineau.

2- Le siège social et le laboratoire de Kaéna à Saint-Vincent-de-Mercuze, près de Grenoble.

3- Benjamin Gardavaud, président et co-fondateur de Kaéna.

4- L'équipe de direction avec, de gauche à droite : Laurent Belorgey, Jérôme Sert, Philippe Faure et Benjamin Gardavaud.

« Notre passage chez Solen a été essentiel dans le développement de notre aventure, précise Benjamin Gardavaud. Nous étions alors jeunes ingénieurs issus de Géoprojets, une entreprise dirigée par Xavier Caquineau, et les quelques années que nous avons passées sous sa direction ont été très formatrices tant sur le plan technique que sur celui des relations humaines ».

En 2004, Solen est rachetée par le groupe Ginger tandis que son agence grenobloise, dirigée par Benjamin Gardavaud, poursuit son développement dans le domaine de la géotechnique, des essais sur sol et béton et de l'environnement.

C'est à cette époque que Jérôme Sert, jeune ingénieur géotechnicien chez Gehygeo, rejoint le groupe tandis que Laurent Belorgey et Philippe poursuivent leur mission.

En 2009, ils quittent Ginger d'un commun accord et créent Kaéna avec le soutien de Michel Petit Maire, accompagnateur sur la fabrication d'un atelier pénétrométrique unique et innovant, l'Amap'Sol, opérationnel depuis 2011. Le début de l'année 2015 voit l'ouverture d'un deuxième établissement Kaéna "Pays de Savoie" à Chavanod (Haute - Savoie), près d'Annecy.

Au sein de la société, Benjamin Gardavaud exerce la fonction de président, Laurent Belorgey celle de responsable du service ingénierie, Philippe Faure, celle de responsable scientifique/veille réglementaire, Jérôme Sert, celle de responsable de l'agence Pays de Savoie.

Kaéna compte désormais 35 personnes et réalise un chiffre d'affaires de 3,3 millions d'euros. Elle est ainsi passée en huit ans de 3 à 35 personnes. L'entreprise est implantée dans le département de l'Isère à Saint-Vincent-de-Mercuze, entre Grenoble et Chambéry, dans la vallée du Grésivaudan, au pied du massif de la Chartreuse et de la chaîne de Belledonne. Elle exerce son activité partout en France mais assure des missions de chantier en Suisse et en Algérie, exclusivement dans le domaine de la géotechnique.

« Kaéna est un bureau d'études indépendant et autonome avec trois grands services, indique son président : l'ingénierie pour toutes les missions, les sondages avec nos propres ateliers, notre laboratoire d'identification et de mécanique des sols et roches ».

À tous les niveaux de ses interventions, l'entreprise est très attachée à son autonomie qui lui permet de contrôler du début à la fin la chaîne de gestion des études.

Au travers de son président, de ses associés et de l'ensemble de son personnel, elle se caractérise également par l'objectif de valoriser et défendre la place des géotechniciens dans l'acte de construire, consolider son savoir-faire dans les investigations en milieu difficile et devenir incontournable dans le domaine des sondages pénétrométriques, tout en garantissant la sécurité de ses collaborateurs et une forte optimisation des solutions à ses clients. Elle est membre de l'Union Syndicale Géotechnique (USG) et du Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS).



5

© KAENA



6



7

© KAENA

60% DANS LE BÂTIMENT

Le bâtiment sous toutes ses formes représente l'essentiel de son domaine d'activité : immeubles de logements, lotissements, villas, bureaux, bâtiments industriels, locaux frigorifiques, salles blanches, sites chimiques ou écologiquement sensibles.

Kaena est également présente dans le secteur des ouvrages routiers linéaires - voirie, élargissement de routes et d'autoroutes, chemins d'accès - ainsi que prospection de carrières ou infrastructures en montagne tels que pylônes de télésièges et télécabines, aména-

gements de pistes de ski, diagnostics des ouvrages hydro-électriques, massifs d'implantation, conduites forcées, ponts et réservoirs.

« Cette activité se répartit à 60% dans le domaine du bâtiment proprement dit, précise Benjamin Gardavaud, 30% dans les ouvrages routiers et 10% dans la prospection de sites. Nous faisons ce que l'on peut qualifier de "géotechnique de proximité". Il s'agit d'études très ponctuelles, la plupart du temps pour des clients récurrents qui nous connaissent et nous font confiance pour leurs projets futurs ».

5- Le pénétromètre statique Amap'Sol, un matériel qui demeure unique en son genre en Europe, est installé sur un camion de 26 t.

6- L'Amap'Sol est entièrement équipé en laboratoire/bureau.

7- Le système d'acquisition de données de l'Amap'Sol.

Pour traiter les problèmes le plus souvent très originaux que constituent les travaux en montagne, l'entreprise a constitué des équipes spécialisées qui disposent de matériels conçus pour les endroits souvent très difficiles d'accès. Ces matériels sont héliportables afin d'être acheminés dans les meilleures conditions possibles de sécurité sur des sites souvent inaccessibles par les voiries existantes.

Certaines foreuses, en particulier, peuvent être démontées en éléments de 700 kg et remontées très rapidement sur site.



8



9



10

© KAÉNA

8- Kaéna est spécialisée dans les investigations en milieu difficile, notamment en montagne, grâce à des matériels hélicoptables.

9- Chantier de sondages en montagne à l'aide d'un matériel hélicoptable.

10- Le pénétromètre FD 55 est une machine démontable afin d'être hélicoptée.

11- La presqu'île de Kaéna, sur l'île d'Oahu, à Hawaï.



© GOOGLE

11

Kaena Point

KAÉNA, POURQUOI ?

Le nom de Kaéna correspond à une période paléomagnétique. En effet, c'est sur la presqu'île de Kaena Point, sur l'île d'Oahu à Hawaï, que l'on a découvert une inversion des pôles magnétiques Sud et Nord, il y a trois millions d'années.

S'il est symbolique de l'activité de Kaéna, le nom a également été retenu pour sa sonorité, son côté « fun et original » et sa facilité d'être transposé dans la plupart des langues étrangères.

Chaque atelier est différent afin de s'adapter à toutes les contraintes géologiques et à toutes les conditions d'intervention : quatre ateliers pénétrométriques et quatre ateliers de forage. Au siège de Saint-Vincent-de-Mercuze,

un laboratoire de traitement et de stockage de 180 m² et un matériel d'essai in situ assurent essentiellement le contrôle de terrassement.

UN PARC TOUT-TERRAIN

Deux des quatre ateliers de forage sont adaptés aux sondages en milieu difficile. Ils permettent de réaliser des forages carottés de 116 à 130 mm de diamètre jusqu'à 30 m de profondeur tandis que les deux ateliers "classiques" sur chenilles autorisent des forages jusqu'à 100 m de profondeur. Pour ces travaux, Kaéna s'appuie sur ce qui constitue sa spécialité. Benjamin Gardavaud insiste sur le fait que le nom de Kaéna est indissociable des mesures pénétrométriques héritées du savoir-faire Géoprojets et du pénétromètre Andina. Cette culture a conditionné la constitution du parc de matériel pénétrométrique qui va du modèle le plus léger au plus lourd existant sur le marché. Elle a amené l'entreprise à concevoir et fabriquer un matériel qui demeure unique en son genre en Europe : le pénétromètre statique Amap'Sol. ▷



12



13

© KAÉNA

Il est installé sur un camion de 26 t entièrement équipé en laboratoire/bureau pour traiter immédiatement les résultats des mesures et a une capacité d'enfoncement de 220 kN.

L'Amap'Sol permet de réaliser trois types de travaux :

→ Sondages au pénétromètre statique (norme NF P94-113) et au piézocône (norme NF P94-119) avec mesure de qc, ft, U.

→ Pose de piézomètre métallique 49/50 mm par fonçage.

→ Fonçage de la sonde DMT et SDMT (dilatromètre plat Marchetti).

La pointe mécanique est de type Andina (grosse sonde de 80 mm de diamètre avec mesure de ft sur manchon) télescopable avec une pointe de 39 mm de diamètre. Le passage en vibropercussion est assuré par un marteau Montabert intégré dans le cas d'un refus en statique, puis reprise en mode statique. La grande amplitude des mesures avec la pointe mécanique est très bien adaptée dans les sols hétérogènes en nature et en résistance.

Le contrôle et l'acquisition numériques sont assurés en direct sur le système DIALOG avec transmission des mesures par GSM.

« Avec ce camion, poursuit Benjamin Gardavaud, nous avons établi un record en descendant à 92 m de profondeur dans les alluvions du Drac et de l'Isère dans le cadre du projet de ligne E du tramway de Grenoble ».

L'objectif des créateurs de Kaéna était de disposer très rapidement d'un outil innovant pour faire la différence vis-à-vis de la concurrence.

UNE QUASI-EXCLUSIVITÉ EN FRANCE : LE DMT

Autre particularité de la société Kaéna :

elle est quasiment le leader français quant à l'utilisation du dilatromètre plat Marchetti (DMT).

« Cet appareil est très utilisé dans les pays anglo-saxons, précise Benjamin Gardavaud, aux États-Unis, en Grande Bretagne, en Australie, mais complètement méconnu en France où nous sommes confrontés à une culture pressiométrique discutable alors que le DMT permet d'obtenir des résultats géomécaniques très précis dans les sols fins tels que sables, argiles, et limons ».

Qu'il s'agisse de la gamme de pressiomètres, de l'Ampasol ou du dilatromètre plat Marchetti, tous ces appareils sont

12- L'un des pénétromètres classiques sur chenilles au travail dans un terrain escarpé.

13- Un pénétromètre léger, démontable et facilement transportable.

dotés de systèmes d'acquisition semi-automatiques des essais ainsi que de visualisation en direct et envoi par GSM des résultats.

LE DILATOMÈTRE PLAT MARCHETTI EN BREF

Le dilatromètre plat Marchetti a été développé à la fin des années 70. Il consiste essentiellement en une lame équipée d'une membrane de 6 cm de diamètre sur une face. De l'air comprimé peut agir à la face intérieure de la membrane.

On commence par enfoncer la lame à vitesse constante de 2 cm/s puis, tous les 10 à 20 cm, on arrête la pénétration et on procède à un essai.

Celui-ci consiste à mesurer :

- La pression de décollage de la membrane p_0
- La pression de déplacement de 1 mm p_1

Le dilatromètre plat Marchetti DMT constitue un essai in-situ permettant d'approcher la valeur du module œdométrique nécessaire aux calculs approfondis des tassements par exemple. Celui-ci permet également de déterminer la cohésion non drainée dans les sols cohérents, l'angle de frottement interne dans les sols pulvérulents, l'état de consolidation.

Cette sonde peut être associée à une sonde sismique SDMT, permettant en alternative aux essais Cross Hole de déterminer la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le sol (ondes de cisaillement Vs et les ondes de compression Vp) liées avec le module de cisaillement G0. Bertrand Dumolard, de la société GS issime et spécialiste français du DMT, est le partenaire technique de Kaéna sur cet outil.

DES RÉALISATIONS DIVERSIFIÉES

Nombreux sont les projets auxquels a contribué Kaéna qui constituent son terrain privilégié d'action :

- Télécabine Saulire Express à Méribel (Savoie) ;
- Antenne astromomique du Pic de Bure (Hautes-Alpes) ;
- Bâtiments de logements très enterrés à Grenoble (Isère) ;
- Tunnel du Chambon dans la vallée de la Romanche (Isère) ;
- Projet Floyd à Genève, nouveau siège mondial de JTI (Suisse) ;
- Aéroport international de Genève (Suisse) ;
- Autoroute A 304 à Charleville - Mézières (Ardennes) ;
- déviation du Teil à Le Teil (Ardèche) ;
- Élargissement de l'autoroute A 71 à Vierzon (Cher) ;
- Élargissement de l'autoroute A 10 à Tours (Indre-et-Loire).

« Dans les milieux professionnels de la construction, précise Benjamin Gardavaud, le bien-fondé des études géotechniques n'est plus à démontrer. Il fait partie intégrante de la chaîne de construction ».

« Il permet de trouver des solutions adaptées dans l'optimisation financière et technique d'un projet pour peu que l'on fasse appel à lui dès le stade des études préliminaires, pour définir le projet avec l'architecte et l'ingénieur béton avant de le proposer ».

« POP » DANS LA TÊTE

Les engagements de Kaéna peuvent être synthétisés en trois mots : Prévenir, Optimiser, Pérenniser.

- Prévenir le client des aléas et des risques associés ;
- Optimiser en proposant une ingé-



14- Réception des carottes dans le laboratoire.

15- Le laboratoire de traitement et de stockage de 180 m² de Saint-Vincent-de-Mercuze.

16- Mesures à l'aide d'une presse CBR.

17- Géologue en analyse d'un matériau calcaire.

18- Les campagnes d'investigation sont menées en toute saison, y compris dans la neige.



QUELQUES CHIFFRES CLÉS

205 km de sondages géotechniques cumulés

92 m : record de profondeur d'un sondage au pénétromètre

6 000 devis

4 000 études

150 t d'échantillons traités en laboratoire

nière d'expérience dans le but de minimiser le coût financier des ouvrages géotechniques ;

→ Pérenniser l'ouvrage avec des solutions durables et non évolutives dans le temps.

Cette démarche « POP », comme se plaît à la qualifier avec humour Benjamin Gardavaud, est conduite avec un souci de tous les jours de la sécurité des équipes sur le terrain, de la qualité des études proposées et de la rentabilité, garante de la survie de l'entreprise, chacune d'elles n'étant jamais privilégiée au détriment des deux autres.

« En fait, conclut-il, avant même son acquisition, il faudrait tout connaître de la géologie d'un terrain à construire, et c'est encore plus vrai en montagne. Avec l'étude géotechnique, concepteurs d'un projet et entreprises chargées de sa réalisation savent quel type de fondation ou de soutènement choisir pour la future construction ».

L'impasse géotechnique peut s'avérer lourde de conséquence, y compris lors de la réalisation de bâtiments de petite dimension, voire de maisons individuelles, surtout si l'on prend en compte le fait qu'elle ne représente que 0,5 à 1 % du montant global d'une construction.

Une économie qui peut coûter très cher. □



1

© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE

CENTRE COMMERCIAL POSNANIA À POZNAN EN POLOGNE - RENFORCEMENT DE SOLS SENSIBLES PAR COLONNES À MODULE CONTRÔLÉ

AUTEURS : OLIVIER PAL, DIRECTEUR DU BET GÉOTECHNIQUE, EIFFAGE CONSTRUCTION - JÉRÔME RACINAIS, DIRECTEUR DE L'INGÉNIEURIE, MENARD

LE CENTRE COMMERCIAL POSNANIA A OUVERT SES PORTES À POZNAN (POLOGNE) LE 19 OCTOBRE 2016. CONSTRUIT SUR UNE EMPRISE AU SOL DE 80 000 M² ET ARTICULÉ SUR PLUSIEURS ÉTAGES, LE COMPLEXE AU DESIGN NOVATEUR DÉVELOPPE 320 000 M² DE SURFACE DE PLANCHER, CE QUI EN FAIT L'UN DES PLUS GRANDS CENTRES COMMERCIAUX D'EUROPE CENTRALE. LE PROJET A ÉTÉ CONFIE À EIFFAGE CONSTRUCTION FIN DÉCEMBRE 2013 POUR UN MONTANT DE 140 MILLIONS D'EUROS. L'ENTREPRISE MENARD EST INTERVENUE DE JUIN 2014 À NOVEMBRE 2014 POUR RÉALISER LES TRAVAUX DE RENFORCEMENT DE SOL PAR INCLUSIONS RIGIDES SOUS LES FONDATIONS SUPERFICIELLES DU BÂTIMENT, QUI EST UNE ALTERNATIVE TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE À LA SOLUTION « RADIER GÉNÉRALISÉ » INITIALEMENT ENVISAGÉE.

LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE, GÉOTECHNIQUE ET HYDRO-GÉOLOGIQUE

La structure géologique de la Pologne résulte de la collision des continents européens et africains durant les soixante derniers millions d'années, d'une part, et de l'effet du Quaternaire au nord de l'Europe, d'autre part, ces deux phénomènes ayant conduit à la

formation des Sudètes et des Carpates. Les plaines du nord de la Pologne sont des moraines, (ce qui permet aux scientifiques de dire qu'il y avait par le passé des glaciers dans cette zone du globe, notamment lors de la glaciation de Würm), qui comportent des sols essentiellement composés de sables ou de loams (sables-argilo-limoneux), tandis qu'au sud, les vallées creusées

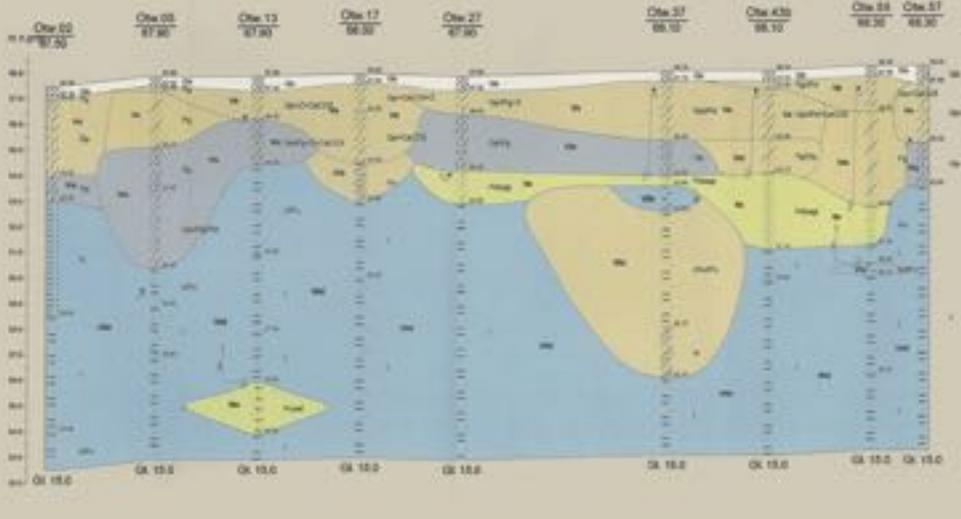
pendant l'ère glaciaire contiennent souvent du loess.

Les plateaux de la région Cracovie-Częstochowa, qui forment d'ailleurs l'un des plus anciens massifs de la planète, les Piénines, et les Tatras occidentales sont constitués de calcaire, tandis que les Hautes Tatras, les Beskides, et les Monts des Géants sont principalement composés de granite et de basalte.

1- Vue du centre commercial Posnania.

1- View of Posnania shopping centre.

COUPE GÉOTECHNIQUE TYPE ÉTABLIE AU STADE DE L'AVANT-PROJET en 2008



© EIFFAGE
2

LA GENÈSE DU MODE DE FONDATION

LA CAMPAGNE DE SOL INITIALE

La campagne de sol initiale, relative au projet Posnania, date de juillet 2008. Elle rassemble 59 forages de reconnaissance, 10 sondages au pénétromètre dynamique, 10 sondages au pénétromètre statique (CPT) et quelques essais de laboratoire.

En raison du mode de formation des matériaux, les horizons de surface sont caractérisés par une succession de lentilles entrecroisées composées d'alluvions fines (sables, limons et argiles) qui génère inéluctablement des variations de faciès rapides et importantes tant en épaisseur qu'en extension. Ces lentilles de surface surmontent

2- Coupe géotechnique type établie au stade de l'avant-projet en 2008.

3- Venue d'eau ponctuelle au sein des horizons de surface.

2- Typical geotechnical section established at the preliminary design stage in 2008.

3- Localised ingress of water in the surface horizons.

un substratum argileux. C'est ce que montrent les coupes géotechniques disponibles au stade de l'avant-projet (figure 2).

Les paramètres de sol dimensionnants des différents matériaux, en particulier le module de déformation et la résistance au cisaillement non drainée, sont estimés dans le rapport de sol initial soit sur la base de corrélations par rapport aux essais in-situ et/ou de laboratoire, soit à partir de la littérature.

ANALYSE DE LA FAISABILITÉ DE LA SOLUTION « RADIER GÉNÉRALISÉ »

Le centre commercial comporte un sous-sol qui couvre toute son emprise, dont la base est située à 4,0 m de pro-

fondeur par rapport au terrain naturel. La structure du centre commercial consiste en une trame de poteaux de 8,0 m x 8,0 m. Les charges verticales par appui sont hétérogènes ; elles varient de 130 t à 1 320 t à l'ELS. Le mode de fondation retenu initialement est un radier de 60 cm d'épaisseur reportant les charges à 4,0 m de profondeur. Ce mode de fondation est classique en Europe de l'Est. Néanmoins, sa faisabilité est rapidement remise en cause pour trois raisons principales. Tout d'abord, les premiers calculs montrent qu'il est difficile de respecter le critère de tassement différentiel (1/500) compte-tenu de l'hétérogénéité des charges et du sol. Ensuite, le caractère gonflant des argiles nécessite de créer un vide sous le radier. Enfin, le coût de la solution n'est pas compatible avec le budget du projet.

ÉTUDE DE SOL COMPLÉMENTAIRE

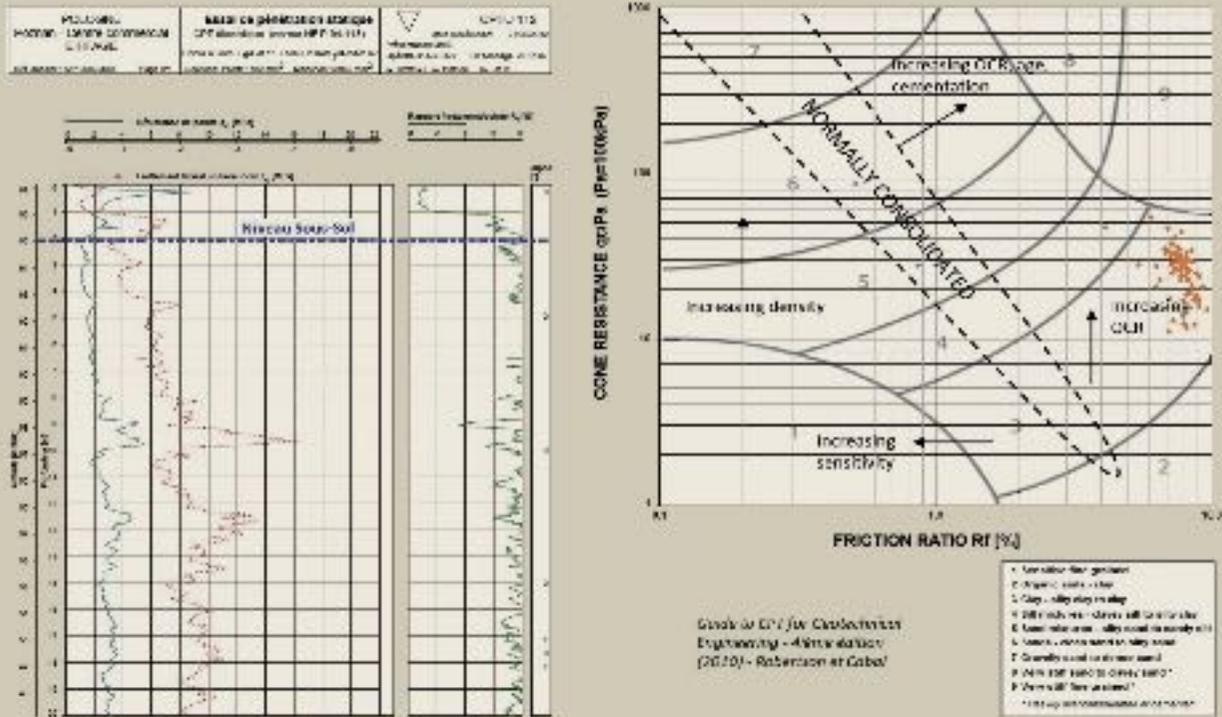
Eiffage Construction décide donc d'investir dans une campagne de sol complémentaire, beaucoup plus ciblée que la campagne initiale, dans le but de mieux caractériser les matériaux en place. Dès qu'il a été possible d'accéder au site pour compléter les investigations géotechniques initiales, les sondages carottés ont confirmé la nature et l'hétérogénéité des sols en place avec une spécificité pour le substratum constitué d'un matériau argileux a priori fortement surconsolidé (cf. glaciations du Würm). La campagne de reconnaissances complémentaires a permis de définir la position du toit de ce substratum et au passage d'identifier les nombreuses nappes perchées dont certaines de type « nappe captive » piégées au sein de lentilles sableuses enchâssées au sein de niveaux imperméables (figure 3). Quant à l'identification du substratum argileux, les différents essais menés sur site (in-situ et de laboratoire) ont permis de caractériser un matériau plastique à très plastique, fortement surconsolidé, très hétérogène en surface devenant plus homogène avec la profondeur. Quelques analyses de ces essais méritent d'être illustrées :

- L'exploitation des essais de pénétration statique (CPT) à partir du diagramme de Robertson montre que le substratum argileux est surconsolidé (figure 4) ;
- Les essais triaxiaux ont permis de mesurer les paramètres de résistance intrinsèques, caractéristiques d'une argile plastique à très plastique surconsolidée (figure 5) ;



© EIFFAGE
3

ANALYSE DU CPTu112 À L'AIDE DU DIAGRAMME DE ROBERTSON (2010)



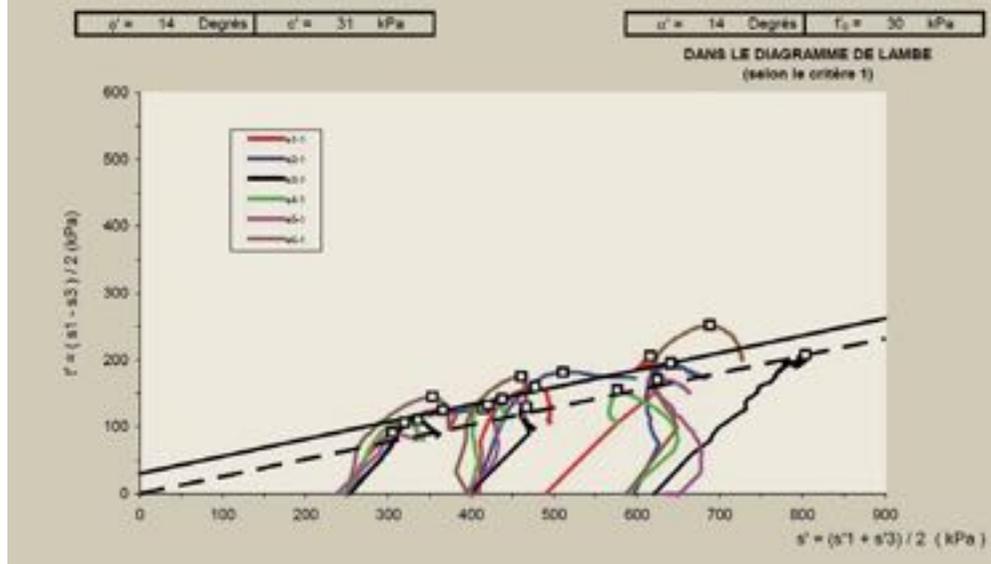
4

© MENARD

- Le rapport de surconsolidation OCR mesuré à l'œdomètre varie de 3,3 à 7,0 (figure 6) ;
- Les corrélations usuelles à partir des essais de pénétration statique (CPT) et des essais au dilatomètre Marchetti (DMT) conduisent à des rapports de surconsolidation OCR de l'ordre de 4 à 5 (figure 6), confirmant que le sol a, dans son passé, été soumis à un état de contraintes 4 à 5 fois plus important que celui qui règne au moment de l'investigation.

Les différents essais d'identification classiques réalisés sur les matériaux supports de fondation ont, d'autre part, rapidement mis en évidence un potentiel de gonflement important. Afin d'identifier clairement ce risque qui, aux dires des ingénieurs polonais ayant participé à des ouvrages similaires au voisinage de ce projet, a été source de nombreux déboires, il a été réalisé plusieurs essais de type Huder Amberg. Ces essais spécifiques (figure 7) ont été programmés en cohérence avec l'état de préconsolidation des matériaux, puis avec les phases de déchargement liées aux terrassements et enfin avec le rechargement par le biais soit de la solution de type « radier généralisé », soit de la solution de type semelles superficielles sur renforcement de sol.

ESSAI TRIAXIAL CU+u



5

© EIFFAGE

ADAPTATION DU PROJET DE FONDATION À LA NATURE DU SUBSTRATUM RENCONTRÉ

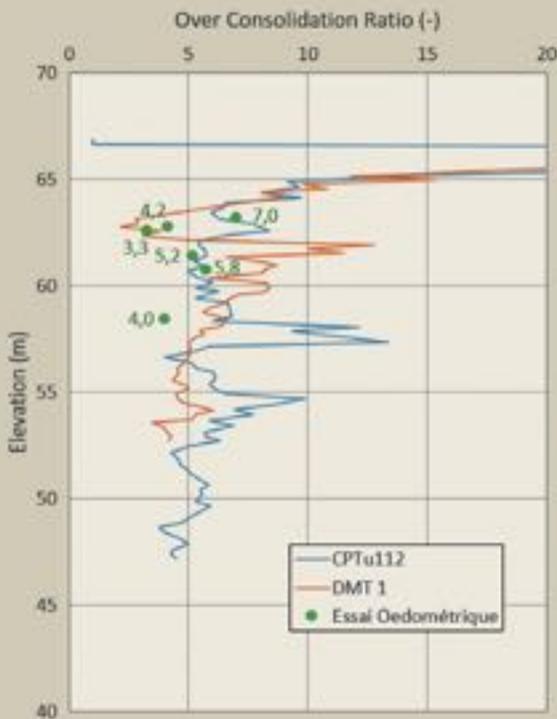
C'est finalement une solution de type fondations superficielles travaillant à 5 bars sur sol renforcé qui a été retenue. Le taux de travail des semelles (5 bars) a été choisi de manière à rester en-deçà de la contrainte de préconsolidation de l'argile. Dans un premier temps, c'est un renforcement de sol par DSM (Deep Soil Mixing) qui

4- Analyse du CPTu112 à l'aide du diagramme de Robertson (2010).
5- Essai triaxial CU+u.

4- CPTu112 analysis using Robertson's diagram (2010).
5- CU+u triaxial test.

a été anticipé. En conservant le même concept, la société Menard a privilégié, pour des raisons de délai et de coût, un renforcement de sol par Colonnes à Module Contrôlé (CMC), qui sont des inclusions rigides en mortier ou béton réalisées par une tarière à refoulement. L'adaptation de la solution de base consistant en un radier généralisé sur une surface de 8 ha par un système de fondations superficielles fondées sur un sol renforcé (figures 8 et 9) a permis :

DÉTERMINATION DU RAPPORT DE SURCONSOLIDATION À PARTIR DES ESSAIS CEDOMÉTRIQUES, CPT ET DMT



- D'apporter une réponse satisfaisante eu égard aux contraintes de délais et d'enveloppe budgétaire ;
- D'introduire et de valoriser une solution technique bien connue des ingénieurs polonais mais peu utilisée jusqu'à présent dans cette région ;

6- Détermination du rapport de surconsolidation à partir des essais œdométriques, CPT et DMT.

7- Essai Huder Amberg sur les matériaux support de fondation.

6- Determination of the overconsolidation ratio based on oedometric tests, CPT and DMT.

7- Huder Amberg test on foundation support materials.

- De pouvoir s'adapter aux spécificités de la descente de charge et de la réalité du sol support de fondation ;
- De s'affranchir en grande partie de l'hétérogénéité du sol support et en particulier du risque de retrait gonflement ;
- De gérer au mieux les variations hydriques par la mise en œuvre d'un dispositif de drainage efficace et ce de façon beaucoup plus aisée que sous un radier ne serait-ce que pour des questions d'entretien ;
- De gérer de façon pratique les éventuelles sous-pressions emprisonnées dans les niveaux plus sableux ;
- De gérer de façon optimale les réseaux sous radier ;
- De permettre une optimisation du phasage chantier vis-à-vis des aléas climatiques.

LE CHANTIER

DIMENSIONNEMENT DES CMC SUR LA BASE D'ESSAIS DE CHARGEMENT PRÉALABLES

Fait assez rare pour être souligné, une zone d'essais a été permise avant le démarrage des travaux.

Souvent inenvisageable pour des chantiers de taille modeste, pour des raisons de coût et de délai supplémentaires, la potentielle optimisation de la solution de renforcement de sol a suscité ici l'intérêt du constructeur, compte-tenu de l'envergure exceptionnelle du projet.

Des Colonnes à Module Contrôlé, de différents diamètres (400 mm ou 360 mm), réalisées à partir d'un béton C16/20, ont été descendues jusqu'à l'élévation +58.00, soit environ 7,0 m sous le niveau fini du sous-sol.

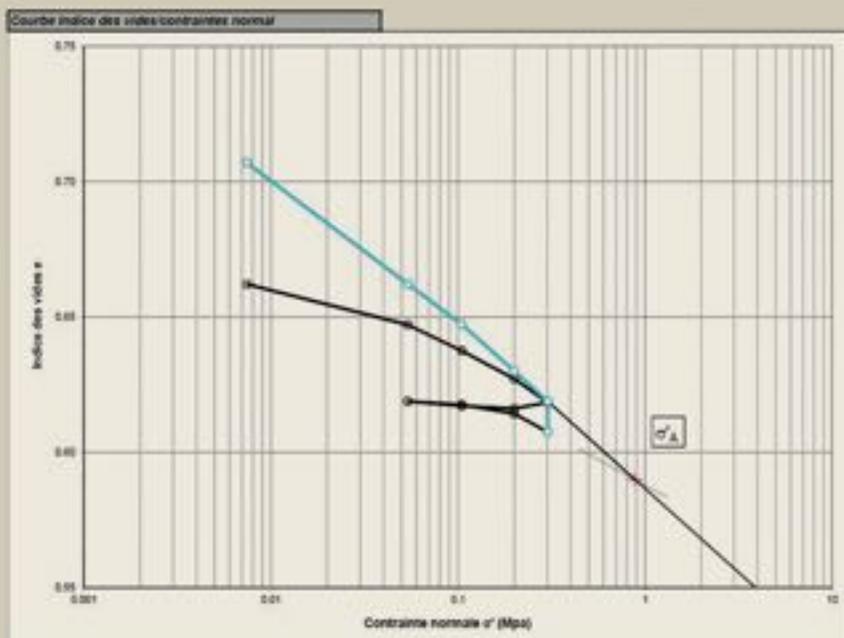
Les CMC traversent ainsi les alluvions fines de surface et la frange supérieure du substratum argileux, caractérisée par des résistances de pointe au CPT plus hétérogènes et plus faibles (1,2 à 1,5 MPa) qu'en profondeur. Ces colonnes d'essais ont été soumises soit à des essais de chargement statique isolé en compression (figure 10), soit à des essais d'arrachement, tous menés jusqu'à la rupture.

Une CMC soumise à un effort normal de compression travaille à la fois en frottement et en pointe et il est bien difficile d'estimer la contribution de chaque phénomène.

Alors qu'une CMC soumise à un effort d'arrachement ne travaille qu'en frottement.

ESSAI HUDER AMBERG SUR LES MATÉRIAUX SUPPORT DE FONDATION

Informations générales	Informations sur l'échantillon	Sendage n°
Dossier n° : 12P-0063a00	Mode de prélèvement : SC	SC103
Chantier : POLOGNE	Date de prélèvement : -	Profondeur : 5.00-6.00m
Centre Commercial	Mode de conservation : E1	Date d'essai : 24/09/12
Poznan	Numéro d'identification : 12P1531	Ømax (mm) : -
Ouvrage : -	Date de réception : 12/09/12	
Client : EIFFAGE CONSTRUCTION	Description : Argile très ferme bariolée verte à bleu-grise	





8

© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE

La combinaison de ces deux types d'essais présente donc l'intérêt d'estimer dans un premier temps les paramètres mécaniques associés au comportement en frottement (grâce à l'essai d'arrachement) puis dans un second temps, par déduction, d'estimer les paramètres mécaniques associés au comportement en pointe (grâce à l'essai de chargement en compression). Au total, 8 essais ont été réalisés préalablement au démarrage du chantier. Ils ont permis de valider la variante CMC (par rapport à la solution de renforcement par Deep Soil Mixing), de valider la profondeur, de mesurer précisément la charge limite et la charge de fluage et d'optimiser le diamètre puisque ce sont finalement des CMC de diamètre 360 mm qui ont été réalisées.

Ils ont également permis de caler les paramètres des modèles aux éléments finis réalisés avec le logiciel Plaxis 2D et Plaxis 3D. Les sols ont été représentés par une loi Hardening Soil Model (HSM) qui requiert la définition des modules de déformation et des paramètres de résistance au cisaillement. Une fois calibrés sur les résultats des essais préalables, les paramètres de la loi HSM ont été introduits dans des modèles 3D qui ont permis de dimensionner le nombre de CMC à réaliser sous chaque semelle isolée.

Ainsi, en fonction des charges appliquées sur les semelles (de 130 t pour les moins chargées à 1320 t à l'ELS

pour les plus chargées), de 2 à 16 CMC de diamètre 360 mm ont été réalisées (figure 11). Les semelles, dimensionnées en moyenne à 5 bars à l'ELS, reposent directement sur les CMC sans connexion structurelle ni matelas de répartition intercalé. Les calculs 3D aux éléments finis (figure 12) ont prédit des tassements de l'ordre de 20 à 50 mm, garantissant un tassement différentiel inférieur à 1/500 entre appuis distants

8- Vue générale du dispositif.

9- Longrine support et tranchée réseaux.

8- General view of the system.

9- Longitudinal support member and utilities trench.

de 8 m. L'effort normal de compression maximal dans les CMC est de l'ordre de 600 à 750 kN à l'ELS, inférieur ou égal à la charge de fluage mise en évidence lors des essais préalables.

UN POINT SUR LES CHIFFRES CLÉS

Au total, 7 932 CMC de diamètre 360 mm ont été réalisées en 6 mois par 2 ateliers en simple poste, de début juin



9

© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE

2014 à fin novembre 2014, pour un linéaire total de 49732 m (figure 13). Si la longueur moyenne des CMC est de 6,25 m, elle varie légèrement et est adaptée d'une zone à une autre du bâtiment en fonction du profil de sol rencontré. Les CMC ont été arasées en sous-face de semelle, avant la prise du béton (figure 14). Les 1 400 semelles superficielles reposent ainsi sur un sol renforcé par CMC.

CONTRÔLE DES TRAVAUX

De nombreux contrôles ont été réalisés pour vérifier la conformité des travaux de renforcement de sol. Le diamètre des CMC a été contrôlé ponctuellement par dégarnissage, l'implantation et l'altimétrie des CMC ont été vérifiées systématiquement. Les paramètres d'exécution des CMC ont été enregistrés en continu pour chaque inclusion rigide : il s'agit de la vitesse d'avance, de l'ef-

fort d'appui, du couple de rotation et de la vitesse de rotation lors du forage ; de la vitesse de remontée, du volume et de la pression de bétonnage lors de la remontée. Enfin, des essais de chargement statique en compression ont été réalisés, à la fréquence d'un essai pour 1 000 CMC.

Il convient de noter qu'il n'existe pas en Pologne de référentiel technique spécifiquement dédié à la conception, au

dimensionnement, à l'exécution et au contrôle des inclusions rigides. Même s'il n'est pas appliqué à la lettre, le guide français ASIRI « Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols par inclusions rigides » constitue tout de même en Pologne un ouvrage de référence dont la philosophie est respectée.

BILAN TECHNIQUE ÉCONOMIQUE

MESURE DES TASSEMENTS POST-CONSTRUCTION

Des mesures de tassement ont débuté avec la construction du bâtiment et ont confirmé les prédictions.

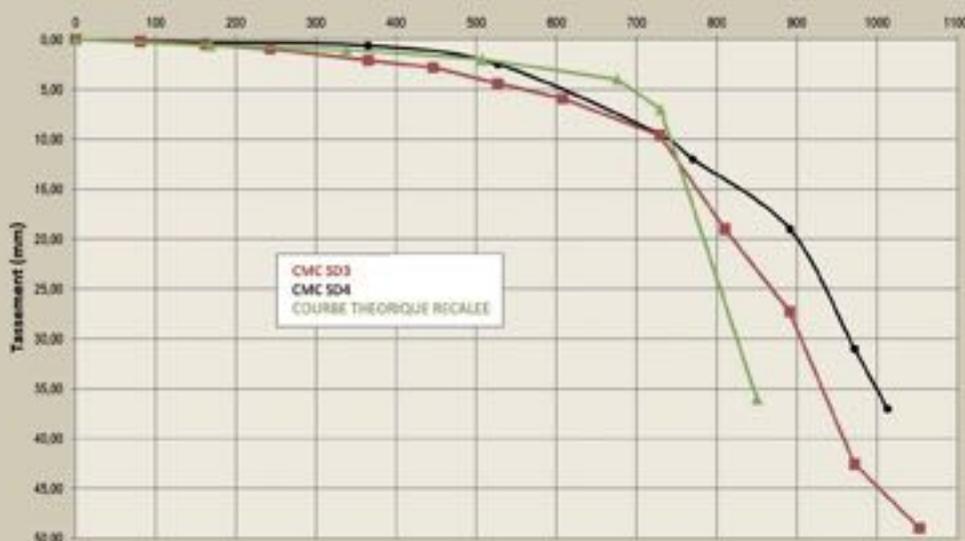
La réalisation de fondations superficielles sur sol renforcé a donc permis de satisfaire le critère de tassement différentiel (1/500) en limitant le tassement absolu en tout point à 50 mm. Elle a aussi permis de s'affranchir plus simplement du risque lié au gonflement des argiles. La solution retenue est donc techniquement plus adaptée aux contraintes du projet (importance et hétérogénéité des charges, épaisse couche d'argile) que la solution initiale consistant en un radier général de 60 cm.

INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DE LA SOLUTION ALTERNATIVE

Elle a également l'avantage de présenter un intérêt économique et environnemental puisqu'elle a permis de réduire significativement la quantité de béton nécessaire. Un rapide calcul le montre aisément. ▶

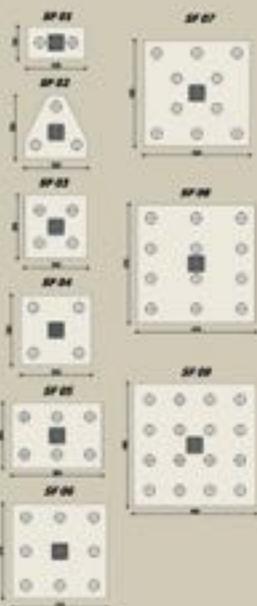
RÉSULTATS DES ESSAIS DE CHARGEMENT PRÉALABLES

Effort vertical en tête de CMC (kN)



© MENARD
10

TYPE ET TAILLE DES SEMELLES, CHARGES APPLIQUÉES ET NOMBRE DE CMC SOUS CHAQUE TYPE DE SEMELLE



Type de semelle	ELS/ELU	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	SigmaZ (bars)	Nombre de CMC
SF - 01	ELU	12	-5	1 694	5,67	2
	ELS	8	1	1 332	4,45	
SF - 02	ELU	-186	-4	1 824	5,61	3
	ELS	-158	-3	1 534	4,72	
SF - 03	ELU	77	-1	3 795	6,07	4
	ELS	68	-5	3 112	4,98	
SF - 04	ELU	86	-1	5 013	7,16	5
	ELS	82	2	4 051	5,79	
SF - 05	ELU	-2	92	6 094	6,51	6
	ELS	-1,6	74,2	5 080	5,43	
SF - 06	ELU	-6	29	9 320	6,63	9
	ELS	-10	31	7 300	5,19	
SF - 07	ELU	153	166	10 764	6,10	10
	ELS	155	154	8 469	4,80	
SF - 08	ELU	502	-423	11 667	5,28	12
	ELS	475	-353	9 499	4,30	
SF - 09	ELU	0	237	14 955	6,23	16
	ELS	0	174	13 184	5,49	

© MENARD
11

10- Résultats des essais de chargement préalable.

11- Type et taille des semelles, charges appliquées et nombre de CMC sous chaque type de semelle.

10- Results of preliminary loading tests.

11- Type and size of foundation slabs, loads applied and number of CMCs under each type of slab.

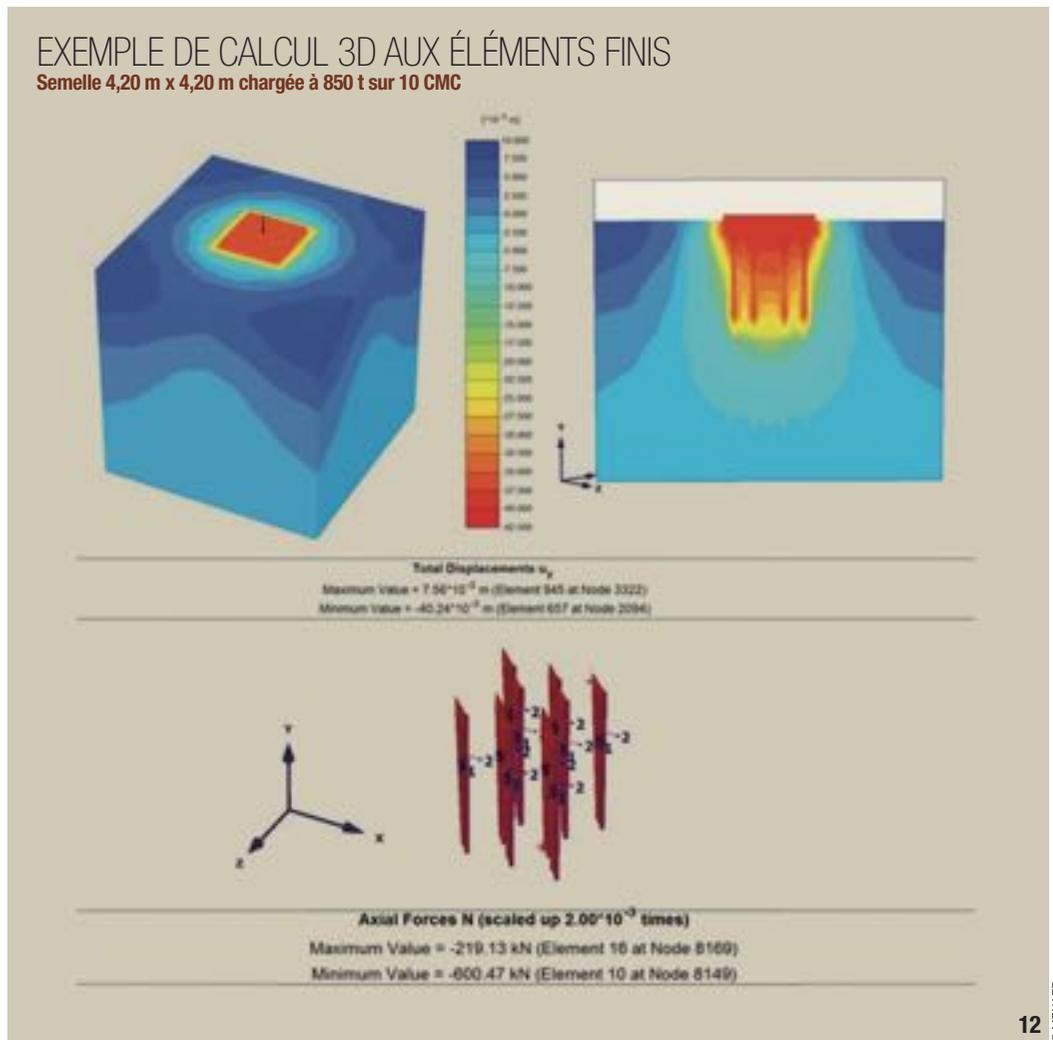
Dans la solution initiale, le volume de béton correspond au volume du radier, soit $80\,000\text{ m}^2 \times 0,60\text{ m} = 48\,000\text{ m}^3$. La réalisation de fondations superficielles permet d'économiser 2/3 de ce volume de béton. Le volume de béton nécessaire pour les appuis de structure s'élève donc à $16\,000\text{ m}^3$, volume auquel il faut ajouter les $49\,732\text{ m}^3$ de CMC $\varnothing 360$. La solution mise en œuvre a ainsi nécessité $21\,000\text{ m}^3$ de béton.

12- Exemple de calcul 3D aux éléments finis - Semelle 4,20 m x 4,20 m chargée à 850 t sur 10 CMC.

13- Vue d'un atelier de CMC lors des travaux de renforcement de sol.

12- Example of 3D finite element calculation - Foundation slab 4.20 m x 4.20 m loaded with 850 tonnes on 10 CMCs.

13- View of CMC equipment during soil reinforcement works.



12

© MENARD



13

© PHOTO THEQUE MENARD



L'économie est de 27 000 m³. Le prix du béton au m³ est bien sûr dépendant du taux de ferrailage.

Dans le cas d'un radier, il est en Pologne de l'ordre de 80 à 100 €/m³ au droit des poteaux alors qu'il ne dépasse pas 50 à 60 €/m³ en partie courante.

L'économie apportée au projet avoisinerait ainsi 27 000 m³ x 50 €/m³ = 1 350 000 €. Ramenée au m², l'économie est de 17 €.

14- Vue aérienne des arases des CMC.

14- Aerial view of CMC levelling.

CONCLUSIONS

L'intérêt économique de la solution « fondations superficielles sur sol renforcé par CMC » est significatif. L'optimisation du système de fondations a été rendue possible par deux démarches essentielles : l'enrichissement des données géotechniques (campagne de sol complémentaire adaptée au site et aux principes d'interaction sol-structure mis en jeu) qui a permis de définir le concept « semelles sur sol renforcé » et la réalisation d'essais de chargement statique préalables qui ont permis la validation et l'optimisation du renforcement de sol. Ces démarches ont bien sûr un coût ; elles nécessitent également un délai complémentaire, mais elles sont indispensables dans la perspective de définir une solution optimale et pérenne en pareille situation. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

COÛT TOTAL DE L'OPÉRATION : 300 millions d'euros

COÛT DU GROS-ŒUVRE : 140 millions d'euros

DURÉE TOTALE DU CHANTIER : 27 mois (printemps 2014 - été 2016)

EMPRISE AU SOL : 80 000 m²

SURFACE DE PLANCHER : 320 000 m²

SEMELLES SUPERFICIELLES : 1 400 unités

COLONNES À MODULE CONTRÔLÉ Ø 360 MM : 7 932 unités

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Apsys (France)

CABINET D'ARCHITECTES : Rtkl (Angleterre)

BUREAU D'ÉTUDES : Beg Ingenierie Polska (Pologne)

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Eiffage Construction Grands Projets Pologne

ENTREPRISE D'AMÉLIORATION DE SOL : Menard Polska (Pologne)

ABSTRACT

POSNANIA SHOPPING CENTRE IN POZNAN, POLAND - REINFORCEMENT OF SENSITIVE SOILS WITH CONTROLLED MODULUS COLUMNS

OLIVIER PAL, EIFFAGE - JÉRÔME RACINAIS, MENARD

The Posnania shopping centre opened in Poznan (Poland) on 19 October 2016. Built on a land area of 80,000 m² and organised on several storeys, the complex, of innovative design, has a total floor space of 320,000 m², which makes it one of the biggest shopping centres in Central Europe. The complexity of the structure and the soil singularity revealed after a specific test campaign led Eiffage Construction to replace the initial foundation technique of the 'overall foundation raft' type with a soil reinforcement method. Detailed characterisation of the soils in place combined with loading tests on Controlled Modulus Columns made it possible to exploit soil-structure interactions to a maximum to meet cost and deadline requirements on this major project. □

CENTRO COMERCIAL POSNANIA EN POZNAN, POLONIA - REFUERZO DE LOS SUELOS SENSIBLES POR COLUMNAS CON MÓDULO CONTROLADO

OLIVIER PAL, EIFFAGE - JÉRÔME RACINAIS, MENARD

El centro comercial Posnania abrió sus puertas en Poznan (Polonia) el 19 de octubre de 2016. Construido sobre una superficie de 80.000 m² y articulado en varios pisos, este complejo de innovador diseño ocupa 320.000 m² de superficie total, lo que lo convierte en uno de los mayores centros comerciales de Europa central. La complejidad de la obra y la singularidad de los suelos, descubierta tras una campaña de ensayos específicos, llevaron a Eiffage Construction a sustituir el principio inicial de cimentación de tipo "losa de cimentación generalizada" por un refuerzo del suelo. Una caracterización fina de los suelos existentes, combinada con pruebas de carga sobre columnas con módulo controlado, permitió aprovechar al máximo la interacción suelo-estructura para respetar los costes y los plazos de esta operación de gran envergadura. □

Vivre le progrès.



Les pelles sur chenilles Liebherr

- Rentabilité maximale grâce à des technologies d'avenir
- Des machines développées dans l'optique d'une productivité maximale
- Composants de qualité fabriqués dans les usines du groupe
- Poste de travail ergonomique confortable pour une productivité haute et constante

Liebherr-France SAS
2, Avenue Joseph Rey, B.P. 90287
68005 Colmar Cedex
Tel. : +33 3 89 21 30 30
E-mail : info.lfr@liebherr.com
www.facebook.com/LiebherrConstruction
www.liebherr.com

LIEBHERR



1
© SOLETANCHE BACHY

RENFORCEMENT DE SOL PAR GEOMIX À LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE NOGENT-SUR-SEINE

AUTEURS : SANDRINE COMBA, SERVICE GÉOLOGIE GÉOTECHNIQUE, EDF DIPNN CEIDRE TEGG - MATTHIEU JACQUET, SERVICE GÉOLOGIE GÉOTECHNIQUE, EDF DIPNN CEIDRE TEGG - IBRAHIM ASRI, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - ALAIN MENORET, CHEF DU DÉPARTEMENT GÉOTECHNIQUE, GEOS INGENIEURS CONSEILS (GROUPE INGEROP) - STÉPHANE MONLEAU, DIRECTEUR COMMERCIAL, SOLETANCHE BACHY FRANCE

SUR LE SITE DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE NOGENT-SUR-SEINE, EDF A FAIT RÉALISER UN RENFORCEMENT DES SOLS DE FONDATION SOUS LE FUTUR BÂTIMENT DIESEL ULTIME SECOURS (DUS) DE LA TRANCHE NUMÉRO 2, AU TITRE DU RETOUR D'EXPÉRIENCE DE FUKUSHIMA. CE RENFORCEMENT A CONSISTÉ EN UN COMPARTIMENTAGE DU SOL DE FONDATION AVEC DES VOILES OBTENUS PAR LE MÉLANGE DU SOL EN PLACE AVEC UN COULIS DE CIMENT (TECHNIQUE DU GEOMIX INSPIRÉE DE L'HYDROFRAISE) VISANT À RÉDUIRE LES TASSEMENTS DIFFÉRENTIELS POUR QU'ILS RESTENT ADMISSIBLES VIS-À-VIS DES CONTRAINTES DU PROJET DUS, ET À APPORTER DES MARGES DE DIMENSIONNEMENT SUPPLÉMENTAIRES NOTAMMENT SOUS SITUATIONS SISMIQUES.

CONTEXTE DU PROJET DUS

Faisant suite à l'accident de Fukushima, EDF a engagé la conception et la construction de nouveaux bâtiments sur ses CNPE, dont les bâtiments Diesels d'Ultime secours, dits « bâtiments DUS ». Ceux-ci visent à garantir

la sûreté des installations face à des événements agresseurs extrêmes, au-delà du dimensionnement usuel, en pérennisant l'alimentation électrique des tranches nucléaires en cas de défaillance des autres sources. Un bâtiment DUS doit être construit

1- Vue d'ensemble du chantier.

1- General view of the project.

pour chaque tranche (1 300 MW) du CNPE de Nogent-sur-Seine. Les bâtiments se présentent sous la forme de bâtiments étroits et relativement élancés (H = 22 m), fondés sur radier général (15 m x 24,1 m), sans plots parasismiques (figure 2). ▷

Les deux bâtiments sont implantés sur deux emplacements différents. L'article s'intéresse au bâtiment DUS de la tranche numéro 2.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE SOUS LES DUS

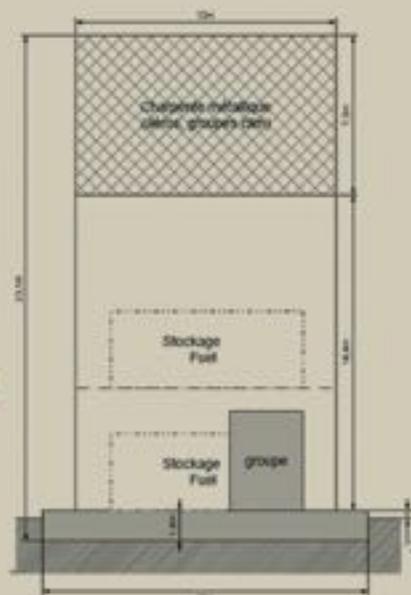
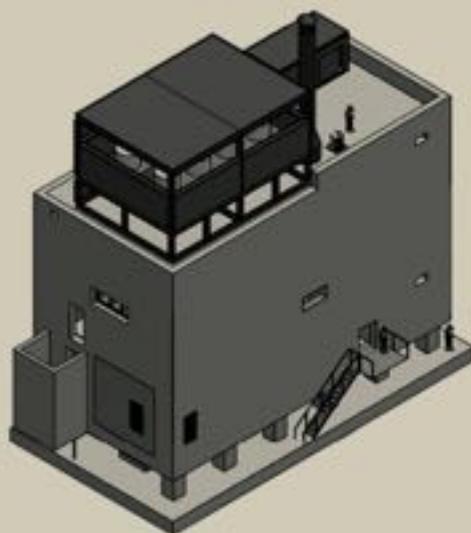
La campagne d'investigation géotechnique a porté sur la zone d'implantation du DUS 2 ainsi que sur les liaisons VRD (Voirie et Réseau Divers) entre le DUS et l'îlot nucléaire. Cette campagne, venant compléter les données historiques du site, était composée d'un sondage carotté (-30 m/Plateforme du site(PF)), 3 sondages pressiométriques (-15, -20, -30 m/PF) et 5 sondages SPT (-8,3 m à -15 m/PF du site). En complément, 2 sondages SPT (-15 m/PF) et 7 sondages CPT (-15 m/PF) ont été réalisés sur le tracé des VRD. Enfin, des essais de laboratoire (identifications des sols et essais mécaniques) ont complété la campagne.

La campagne d'investigation a permis d'affiner la stratigraphie présumée sur la zone et de caractériser les différents horizons géotechniques mis à jour.

Les couches suivantes sont rencontrées à partir de la plateforme (68,2 NGFN) (figure 3) :

- Des remblais constitués d'alluvions sablo-graveleuses propres de la Seine avec un peu de fines, de compacité généralement dense, localement lâche voire très lâche. Sur l'emprise du DUS 2, l'épaisseur de la couche de remblai est comprise entre 5,5 et 6,5 m avec une valeur moyenne de 5,7 m.
- Les alluvions modernes (limons de crue) constituées d'un mélange de sable et de limon avec trace d'argile de compacité généralement lâche. Sur l'emprise du DUS 2, l'épaisseur de la couche d'alluvions modernes est comprise entre 0,3 et 0,45 m avec une valeur moyenne de 0,4 m.
- Les alluvions anciennes constituées d'un mélange de graves sableuses avec un peu de fines, de compacité généralement dense à très dense, localement moyenne. Sur l'emprise du DUS 2, l'épaisseur de la couche d'alluvions anciennes est comprise entre 3,6 et 5,0 m avec une valeur moyenne de 4,1 m.
- Le contact alluvions-craie constitué d'un mélange d'alluvions et de débris crayeux de granulométrie hétérogène, tantôt à dominance sableuse, tantôt à dominance limoneuse, de compacité moyenne ou de consistance raide. Sur l'emprise

ILLUSTRATION DU BÂTIMENT DUS (à gauche sur appui parasismique ; à droite sur radier élargi)



2 © EDF

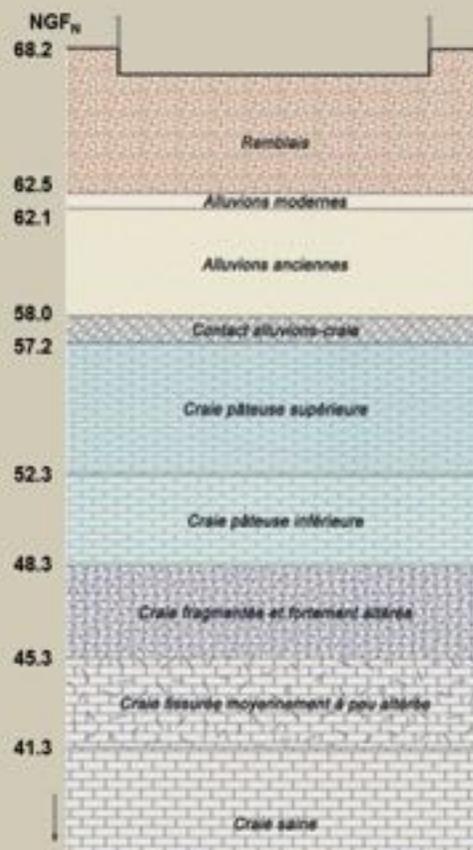
2- Illustration du bâtiment DUS (à gauche sur appui parasismique ; à droite sur radier élargi). 3- Coupe stratigraphique sous le DUS 2.

2- Illustration of the backup diesel building (left-hand on earthquake-resistant support; right-hand on enlarged foundation raft). 3- Stratigraphic cross section under backup diesel building 2.

du DUS 2, l'épaisseur du contact alluvions-craie est comprise entre 0,5 et 1,00 m, avec une valeur moyenne de 0,8 m.

- La craie, dans ses faciès successifs en fonction du degré d'altération : craie pâteuse supérieure, craie pâteuse inférieure, craie fragmentée fortement altérée, craie fissurée peu altérée, craie saine. Le toit de la craie pâteuse supérieure est rencontré à une profondeur de 11 m sous le niveau de la plate-forme, celui de la craie saine à une profondeur de 27 m.

COUPE STRATIGRAPHIQUE SOUS LE DUS 2



3 © EDF



4
© EDF

4- Vue sur les tambours rotatifs et sur la buse d'injection du liant (coulis) au centre.

5- Le terrain est détruit lors de la perforation (descente) du CSM. Le coulis de ciment est injecté et mélangé au terrain en place à la descente et remontée de l'outil.

4- View of rotating drums and binder (grout) injection nozzle in the centre.

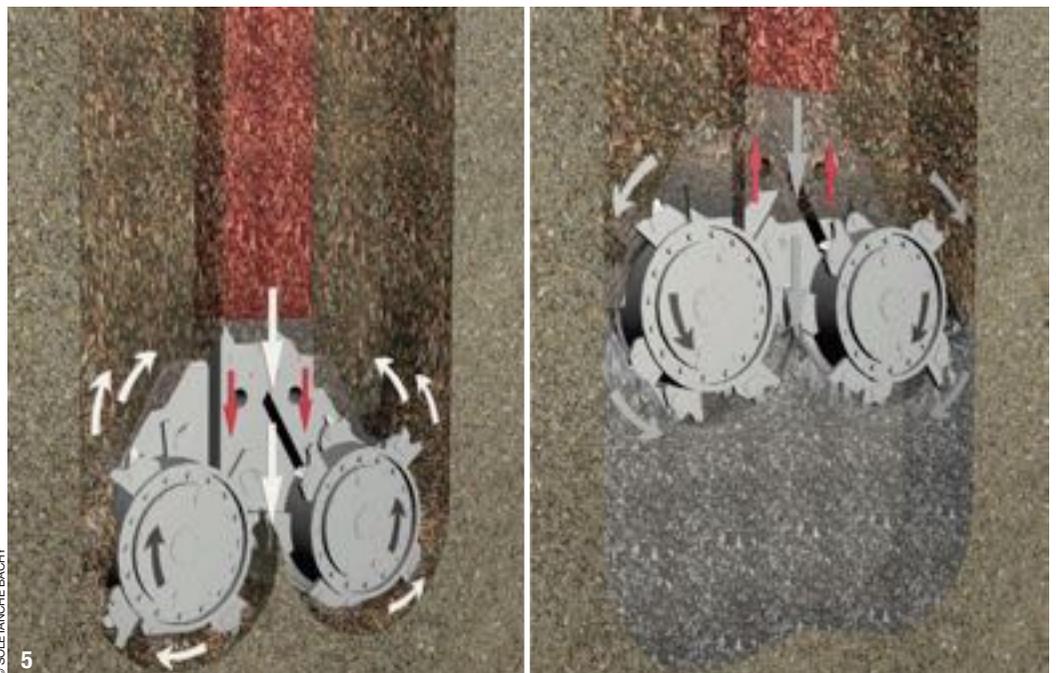
5- The ground is destructured during drilling (lowering) of the CSM device. The cement grout is injected and mixed with the ground in situ when lowering and raising the tool.

Les niveaux d'eau évalués dans les terrains, en accord avec l'ETC-C 2012 (European Pressurised Reactor Technical for Civilworks (code AFCEN)) pour le Niveau Médian Permanent ($G_{k, w}$) et le Niveau Variable Fréquent ($Q_{k, wief}$) sont situés respectivement à -4,2 m/PF et 3,7 m/PF.

ÉLÉMENTS DE CHOIX POUR LE RENFORCEMENT DE SOL : PROCÉDÉ GEOMIX

Au regard des hypothèses de dimensionnement, des contraintes du projet DUS et du modèle géotechnique établi sur la zone, les études de pré-dimensionnement ont préconisé le principe

d'un renforcement de sol afin de s'affranchir de tout risque de liquéfaction et de se prémunir de possibles tassements différentiels supérieurs à ceux admis par le projet DUS, tout en apportant des marges de dimensionnement supplémentaires notamment sous situations sismiques. ▷



© SOLETANCHE BACHY
5

6- Modèle en éléments finis (Z-Soil) du système de fondation.

7- Plan d'exécution du renforcement de sol par Geomix.

6- Finite element model (Z-Soil) of the foundation system.

7- Working drawing of soil reinforcement with Geomix.

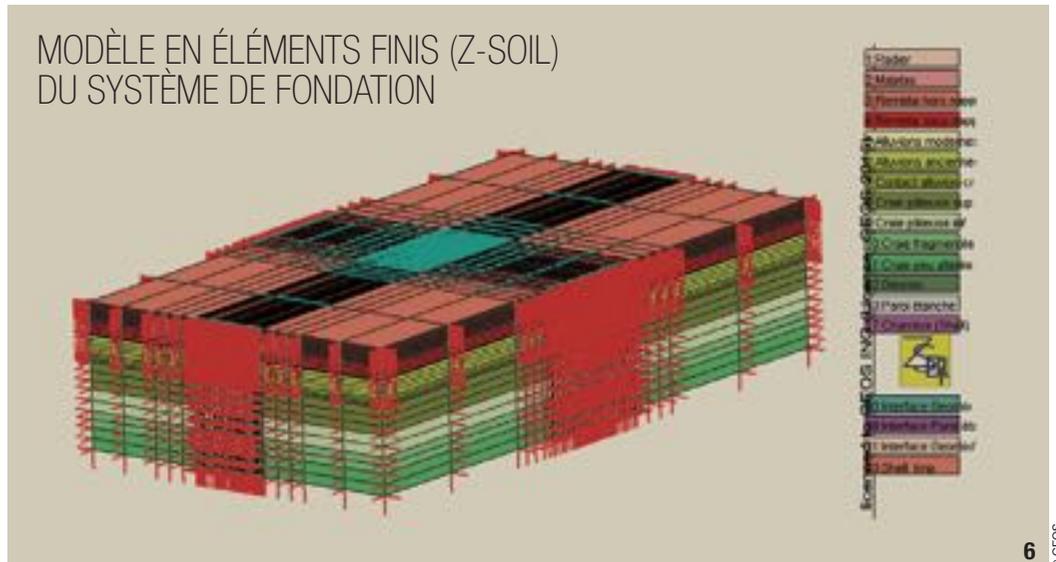
L'entreprise Soletanche Bachy a répondu à l'appel d'offre en proposant la technique du Geomix.

Cette méthode consiste à confiner le sol en place par la réalisation d'un maillage de panneaux perpendiculaires (constitués par le mélange du sol en place avec un coulis de ciment) de forte inertie (réalisation d'un caissonnage) qui apporte une forte rigidité au cisaillement sous sollicitations horizontales et permet d'homogénéiser la raideur du sol verticalement.

Les niveaux de distorsion atteints dans le sol confiné sont réduits, diminuant ainsi la génération de pression interstitielle à l'origine du phénomène de liquéfaction. De plus, même si localement des phénomènes de liquéfaction venaient à se produire, l'horizon liquéfié se limiterait à l'emprise du caisson de sol. En outre, les voiles du dispositif reprennent une partie des charges transmises par le radier, et par leur rigidité contribuent à homogénéiser le massif de sol et ainsi réduire les tassements différentiels. Le renforcement de sol est complété d'un matelas de répartition (remblai sablo-graveleux), assurant l'interface entre le sommet des voiles de Geomix et la sous-face du radier du bâtiment DUS.

Cette technique de renforcement permet également de s'adapter à l'hétérogénéité des terrains et aux contraintes de la zone de travaux (proximité de réseaux et du bâtiment réacteur). Elle évite les lourdes manutentions, l'évacuation de grandes quantités de déblais, et diminue la consommation de ressources naturelles (peu d'apport de béton ou de matériau extérieur (ciment-bentonite)). La technique ne nécessite généralement pas la construction préalable de murettes guides. Comme les parois traditionnelles, la paroi Geomix

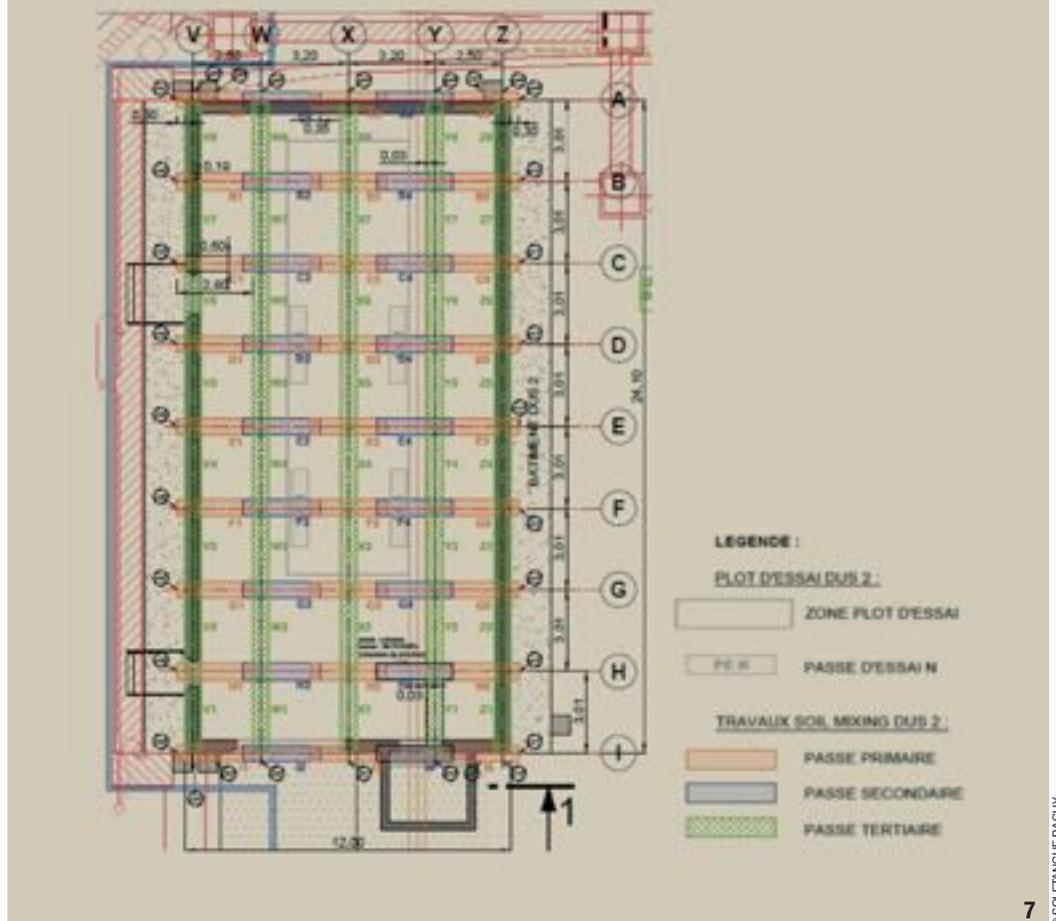
MODÈLE EN ÉLÉMENTS FINIS (Z-SOIL) DU SYSTÈME DE FONDATION



6

© GEOS

PLAN D'EXÉCUTION DU RENFORCEMENT DE SOL PAR GEOMIX



7

© SOLETANCHE BACHY

est constituée de panneaux juxtaposés primaires et secondaires. Ce procédé est le résultat de l'alliance des techniques de *soil mixing* et de la technologie Hydrofraise. Le procédé présente ainsi la robustesse et l'expérience de l'Hydrofraise avec l'ingéniosité du *soil mixing* (mélanger le sol

en place à un coulis bentonite/ciment). Un nouvel outil a été développé : le CSM (Cutter Soil Mixing), constitué de moteurs hydrauliques sur lesquels sont montés deux paires de tambours rotatifs (figure 4) qui assurent le forage et le malaxage sol/ciment (figure 5). Cet équipement est compatible avec

de nombreux types de porteurs, ce qui apporte une grande souplesse d'utilisation. Le marché a ainsi été confié à l'entreprise Soletanche Bachy France, incluant les études de conception et de dimensionnement définitif du renforcement (y compris le matelas de répartition).

DIMENSIONNEMENT DU RENFORCEMENT DU SOL

Les études portées par l'entreprise Soletanche Bachy France ont été confiées à Geos Ingénieurs Conseils. Elles avaient pour objectif de dimensionner le système de renforcement de sol par Geomix afin de garantir des tassements différentiels du bâtiment DUS à moins de 0,3 mm/m (contrainte du projet DUS), de démontrer la non liquéfaction sous niveau de Séisme

Noyau Dur (SND) avec un niveau de nappe $Q_{k,w,EF}$, d'estimer les tassements sismo-induits, et enfin de démontrer la préservation de l'intégrité et de la perméabilité de l'enceinte géotechnique principale⁽¹⁾. Ce dernier point a fait l'objet d'une attention particulière car le positionnement et la profondeur requis pour le dispositif de renforcement de sol imposaient que celui-ci traverse l'enceinte géotechnique principale en plusieurs points. Les études d'exécution

réalisées pour justifier le renforcement de sol par compartimentage en voiles de Geomix ont montré que :

→ Déconvolution des accélérogrammes sur colonne de sol par méthode linéaire équivalent (logiciel SHAKE 2000) : le calcul de déconvolution par méthode linéaire équivalent des accélérogrammes calés sur le spectre EUR dans une colonne de sol représentative de la stratigraphie sous DUS 2 respecte le critère en

distorsion fixé par le guide ASN 2/01. Les modules dynamiques dégradés par linéaire équivalent sont ainsi compatibles avec les distorsions induites par le séisme. Les modules dynamiques dégradés sont justifiés pour être utilisés dans les calculs de tassements aux éléments finis.

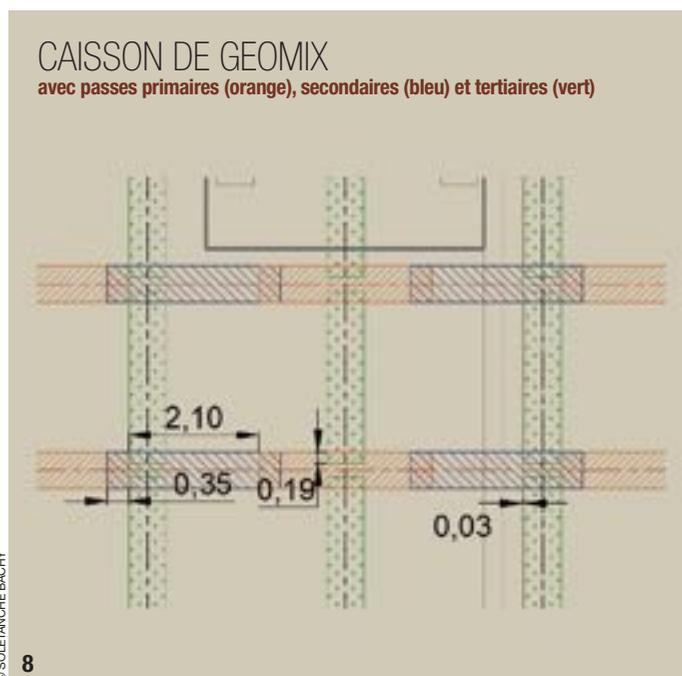
→ Réponse du système de fondation (logiciel Z-Soil) : le calcul de la réponse du système de fondation vise à l'évaluation des tassements sous sollicitations statiques, ELSq, et ELU sismique. Ces réponses sont évaluées par une modélisation aux éléments finis en trois dimensions avec le logiciel Z-Soil. Une vue du modèle aux éléments finis est donnée sur la figure 6 (seul le radier du DUS est représenté). L'évaluation des tassements sous sollicitations sismiques est obtenue par une analyse pseudo-statique : le caractère dynamique de la sollicitation est pris en compte par les torseurs des efforts appliqués et par l'adaptation des modules d'élasticité des sols aux distorsions induites par le séisme. Pour les cas de charges statiques, les études ont intégré une hétérogénéité en grand des remblais. Pour cela, un zonage des remblais a été adopté. Sur la base des informations disponibles, deux zones de remblai sont considérées ; elles sont séparées par l'axe transversal de l'ouvrage. ▶

8- Caisson de Geomix avec passes primaires (orange), secondaires (bleu) et tertiaires (vert).

9- Enregistrement et suivi en temps réel des paramètres de foration - injection ainsi que les contrôles inclinométriques.

8- Geomix caisson with primary (orange), secondary (blue) and tertiary (green) passes.

9- Real-time recording and monitoring of drilling and injection parameters, and clinometric checks.



© SOLETANCHE BACHY

8

ENREGISTREMENT ET SUIVI EN TEMPS RÉEL DES PARAMÈTRES DE FORATION - INJECTION AINSI QUE LES CONTRÔLES INCLINOMÉTRIQUES



RAPPORT C.S.M.
f(profondeur).

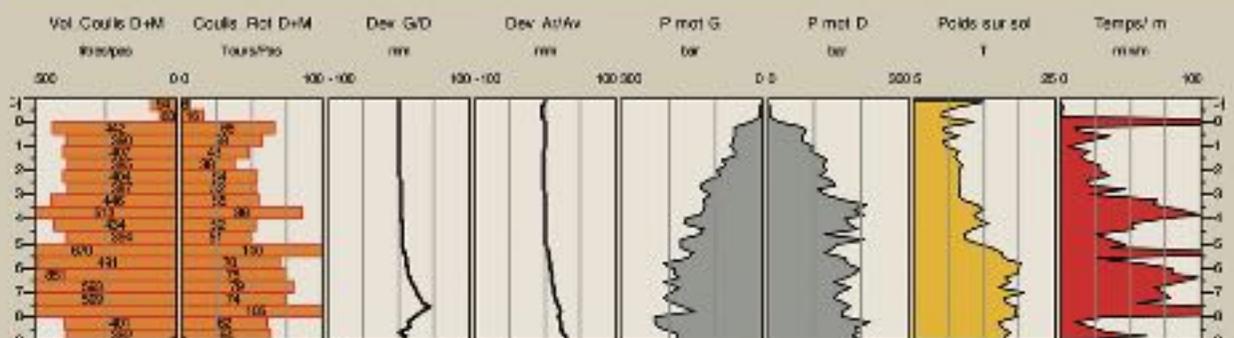
GEOMIX
Enregistrement des paramètres

Volume Total Bentonite (litres)	0
Volume Total Coulis (litres)	6657
Largeur (mm)	2800 mm
Epaisseur (mm)	500 mm
Profondeur finale (m)	9,00
Temps de perçage (min)	60,00
Temps d'injection (min)	11,00

DATE : 08/08/2016

NOGENT SUR SEINE

Panneau
E3



© SOLETANCHE BACHY

9

Le module d'élasticité attribué à la zone Sud du remblai est le module moyen de la formation, soit 72 MPa. Le module d'élasticité attribué à la zone Nord du remblai est réduit par un facteur de 3 et est égal à 24 MPa. Il est proche de la valeur ponctuelle minimum du module d'élasticité des remblais estimée à 27 MPa. Cette façon d'appréhender l'influence de l'hétérogénéité des remblais est considérée sécuritaire, tant dans la radicalité du zonage que dans la différenciation des modules d'élasticité du remblai dans les deux zones. Les tassements du radier calculés sous sollicitations statiques dans l'hypothèse d'un remblai hétérogène varient entre 3,9 et 4,6 cm. Pour tous les cas de chargements, le critère de tassement différentiel admissible fixé par le projet DUS a été respecté.

- Le risque de liquéfaction est écarté et le facteur de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction est suffisant pour prévenir des tassements différés post-séisme.
- L'état initial de l'enceinte géotechnique (intégrité et perméabilité) est conservé après les travaux de renforcement de sol. De plus, en phase travaux, l'exécution du traitement de sol ne peut perturber le comportement hydraulique souterrain et garantit une perméabilité suffisante à long terme.

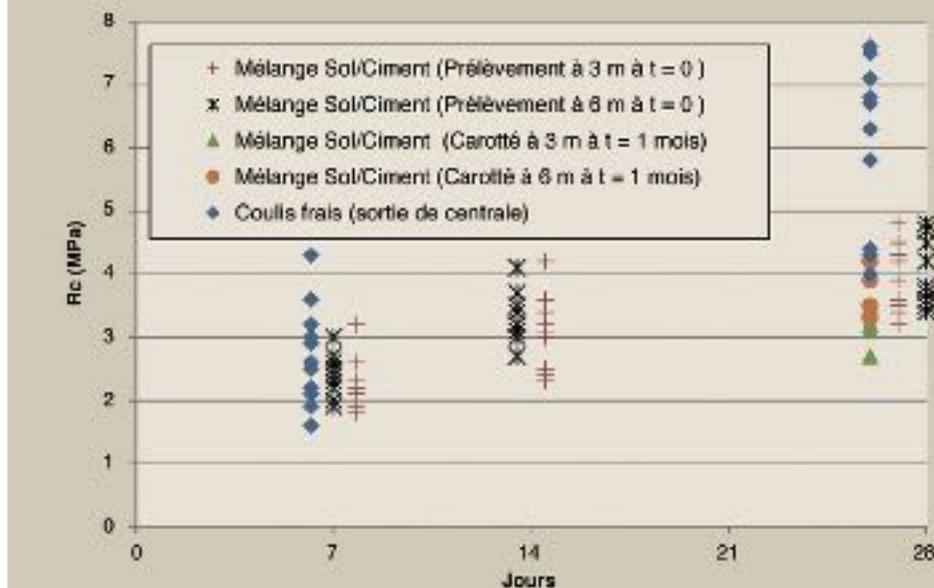
EXÉCUTION DES TRAVAUX DE GEOMIX

Les travaux de Geomix se sont déroulés en trois étapes bien distinctes :

1- Plot d'essai (23/03/2016 au 01/04/2016)

La réalisation d'un plot d'essai est requise préalablement à tous travaux de renforcement de sol sous les ouvrages nucléaires. C'est une exigence de l'ETC-C, le code de dimensionnement requis par EDF pour les ouvrages de génie civil classés comme importants pour la sûreté. Sur le site de Nogent-sur-Seine, il a consisté en la réalisation de 4 panneaux indépendants de Geomix de profondeurs différentes (9 et 20 m) avec trois formulations de coulis différentes (quantités de ciment et de bentonite différentes). Les objectifs du plot d'essai étaient de démontrer la faisabilité de la technique avec les terrains de Nogent-sur-Seine et la bonne atteinte des performances exigées. Il a également permis de trouver et de valider la meilleure combinaison possible

SYNTHÈSE DES ESSAIS DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES ÉPROUVETTES CONSTITUÉS DE COULIS FRAIS ET DE MÉLANGE SOL / COULIS



entre les paramètres de forage (indice de malaxage, etc.), la composition du coulis et le sol en place. De plus, des essais de convenance sur la centrale de chantier ont permis de caractériser la viscosité, la densité et la résistance du coulis frais.

2- Phase production (21/07/2016 au 26/08/2016)

Après validation du plot d'essai, la phase industrielle de réalisation des panneaux de Geomix a permis de réaliser 85 panneaux en 6 semaines, soit un linéaire total de 772 m. L'ordre de réalisation des différents panneaux du caissonnage a été conditionné par la préservation de l'intégrité de l'enceinte géotechnique. Le plan d'exécution du caissonnage est présenté en figure 7. Pour chaque ligne, les panneaux de Geomix sont réalisés par alternance de passes primaires et secondaires, comme cela est représenté en figure 8.

La continuité entre passes est assurée par un remordu de 35 cm. Les caissons sont fermés par des passes tertiaires, également réalisées avec un remordu. Pour guider l'outil, une prétranchée est réalisée en surface suivant le tracé des voiles. Elle permet également de collecter le sur-volume de déblais afin de conserver propre la plateforme de travail.

Les contrôles mis en œuvre lors du plot d'essai ont été reconduits lors de

10- Synthèse des essais de résistance à la compression des échantillons constitués de coulis frais et de mélange sol / coulis.

10- Summary of compressive strength tests on test specimens consisting of fresh grout and a soil/grout mixture.

la phase de production des panneaux. Ils sont détaillés ci-dessous en précisant la fréquence de contrôle :

- Enregistrement des paramètres de foration-injection et contrôles inclinométriques : systématiques pour tous les panneaux ; le système de supervision (figure 9) contrôle simultanément et en temps réel les 2 paramètres clés du procédé : l'homogénéité du mélange sol-liant et la quantité de liant injectée dans le volume de sol traité tout en permettant la navigation dans le sol pour s'assurer de la verticalité de l'ouvrage réalisé. L'informatique embarquée permet la supervision

et le pilotage de l'outil depuis la cabine.

- Essais sur coulis frais en sortie de centrale : mesure de la densité et la viscosité du coulis frais avec une fréquence minimale de deux fois par poste ; prélèvement deux fois par semaine de 6 échantillons de coulis frais. Des essais de résistance à la compression sont réalisés à 7 jours (trois échantillons) et à 28 jours (trois échantillons).
- Essais sur le mélange sol-coulis :
 - Prélèvements deux fois par semaine du mélange sol - coulis au cœur d'un panneau fraîchement réalisé. Des essais de résistance à la compression sont réalisés à 7 jours (trois échantillons), à 14 jours (trois échantillons) et à 28 jours (trois échantillons) ;
 - Deux carottages verticaux sur deux panneaux (H2 et B3) à t = 1 mois après la réalisation du panneau. Ce délai permet d'assurer la prise du coulis. Trois échantillons sont écrasés (essai de résistance à la compression) à 7 jours et à 28 jours pour les profondeurs de 3 et 6 m.

De plus, pendant les travaux, un système de surveillance automatisé a été mis en place pour l'auscultation des bâtiments sensibles avoisinants. Le programme de surveillance mis en place a ainsi montré :



© CHANTIER
11



© CHANTIER
12

11 - Vue sur les voiles de soil mixing.

12- Réception du fond de fouille après récépage.

11 - View of soil mixing shear walls.

12- Acceptance inspection of bottom of cut after cutting-off.

- Au total, 309 éprouvettes ont été écrasées durant le chantier, soit 103 essais de résistance à la compression. Les résistances à la compression mesurées à 28 jours sur toutes les éprouvettes de coulis ou de mélange sol-coulis sont conformes aux exigences (supérieures aux 2 MPa requis) (figure 10).
- La valeur moyenne de résistance à la compression à 28 jours pour les éprouvettes constituées de mélange sol-coulis est de 3,8 MPa (moyenne établie sur les 102 éprouvettes de *soil mixing* réalisées au cours du chantier et du plot d'essai (soit prélevée, soit carottée)) avec un écart type de 0,6 MPa. Il a été observé une bonne homogénéité dans les résultats des éprouvettes de *soil mixing* tant en profondeur que sur les différents panneaux.

Des blocs rocheux ont été rencontrés de façon sporadique pendant les travaux, ce qui a pu causer quelques dégâts sur l'outil de forage qui est en fait adapté pour travailler dans des sols meubles.

3- Réalisation du matelas de répartition (du 05/09/2016 au 21/09/2016)

La mise en œuvre d'un matelas de répartition d'un mètre d'épaisseur sur l'ensemble de la zone DUS termine le dispositif.

Le matelas de répartition joue un rôle mécanique (il réduit les sollicitations dans les panneaux) et permet de livrer une plateforme pour l'intervention du lot génie civil. Les objectifs de réalisation fixés étaient d'atteindre un niveau de compactage q_3 , un module $EV2 \geq 80$ MPa pour toutes les couches de remblais constitutives du matelas et un rapport $EV2/EV1 < 2,5$ sur la couche finale.

Le recépage préalable à la mise en place du matelas de répartition permet de contrôler de visu l'intégrité générale des panneaux, la qualité du mortier de sol en place, et surtout d'avoir une vue générale de la configuration des caissons (figures 11 et 12).

Une planche d'essai de remblaiement avait été imposée par le cahier des charges. L'objectif de la planche d'essai est de déterminer les paramètres de compactage à respecter pour atteindre les critères de réception du matelas de répartition.

Les contrôles suivants ont été réalisés lors de la mise en place du matelas de répartition :

- Vérification des caractéristiques des matériaux approvisionnés (de classe D3) : une analyse granulométrique, un essai Los Angeles et un essai micro-Deval sur les matériaux de la première couche et de la couche finale.
- Vérification de la bonne mise en œuvre : sur chaque couche intermédiaire, deux essais à la dynaplaque ont été effectués (figure 13). Sur la couche finale, trois essais à la plaque et un essai au pénétromètre dynamique ont été effectués. Enfin le critère de compacité Q/S a été contrôlé en continu pour chaque couche (inférieur à 0,07).

L'atteinte des requis a permis la réception de la plateforme (figure 14). Tous les résultats d'essais à la dynaplaque et à la plaque ont montré un $EV2$ supérieur à 80 MPa. Le module moyen $EV2$ de la couche finale est de 126 MPa avec un écart type de 10 MPa.



13



14

© CHANTIER

CONCLUSION

La technique de renforcement de sol par Geomix mise en œuvre en fondation du bâtiment DUS de la tranche 2 du CNPE de Nogent-sur-Seine a donné satisfaction du point de vue des requis de dimensionnement et d'exécution liées à la sûreté nucléaire des ouvrages concernés. L'objectif premier de réduction des tassements différentiels est atteint, tout en apportant des marges de dimensionnement vis-à-vis d'autres

états limites géotechniques (en particulier en situation sismique pour le risque de liquéfaction).

Le mode d'exécution et le rigoureux programme de surveillance (plots d'essais et contrôles en phase de production) permettent de garantir la performance exigée du renforcement de sol, à la fois sur la qualité intrinsèque du matériau (résistance et perméabilité) et sur le comportement global du renforcement de sol.

13- Essai à la dynaplaque sur le fond de fouille.

14- Réception de la plateforme finale.

13- Dynaplaque test on bottom of cut.

14- Acceptance inspection of final platform.

In fine, le choix du mode de renforcement et le programme de surveillance établi en phase Études et Chantier entre l'ingénierie EDF et l'entreprise exécutante Soletanche Bachy France ont permis de répondre aux exigences liées à la sûreté nucléaire des ouvrages concernés. □

1- L'enceinte géotechnique (paroi moulée bentonite/ciment) du site de Nogent-sur-Seine a été réalisée à la construction de la centrale afin de mettre hors d'eau des fouilles. Elle ceinture les îlots nucléaires et vient s'ancrer dans la craie saine.

PRINCIPALES QUANTITÉS

NOMBRE DE VOILES DE GEOMIX : 85 u

PROFONDEUR DE TRAITEMENT : 9 m

CIMENT : 332 t

ÉPAISSEUR DU MATELAS DE RÉPARTITION : 1 m

MATÉRIAU DE MATELAS DE RÉPARTITION : 795 t

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : EDF - CNPE de Nogent-sur-Seine

MAÎTRE D'ŒUVRE : EDF - DIPDE (ex CIPN)

MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉOTECHNIQUE : EDF CEIDRE TEGG (Aix-en-Provence)

ENTREPRISE TITULAIRE DU LOT RENFORCEMENT DE SOLS : Soletanche Bachy France

BUREAU D'ÉTUDES : Geos Ingénieurs Conseils SA

ABSTRACT

SOIL REINFORCEMENT BY GEOMIX AT NOGENT-SUR-SEINE NUCLEAR POWER STATION

SANDRINE COMBA, EDF DIPNN CEIDRE TEGG - MATTHIEU JACQUET, EDF DIPNN CEIDRE TEGG - IBRAHIM ASRI, SOLETANCHE BACHY - ALAIN MENOIRET, GEOS INGENIEURS CONSEILS (GROUPE INGEROP) - STÉPHANE MONLEAU, SOLETANCHE BACHY

The soil mixing technique used in the Nogent-sur-Seine nuclear power station was very well suited to the geology of the site, namely backfill and alluvia. 85 Geomix shear walls were executed according to an orthogonal grid configuration, with a load distributing mattress covering the gridding, in order to eliminate the risk of soil liquefaction and reduce static and seismic-induced subsidence. This is to secure the superstructure formed by the emergency diesel generating set. The project underwent numerous quality controls establishing a substantial capital of experience feedback on this technique, effective but little used in France. □

REFUERZO DEL SUELO POR GEOMIX EN LA CENTRAL NUCLEAR DE NOGENT-SUR-SEINE

SANDRINE COMBA, EDF DIPNN CEIDRE TEGG - MATTHIEU JACQUET, EDF DIPNN CEIDRE TEGG - IBRAHIM ASRI, SOLETANCHE BACHY - ALAIN MENOIRET, GEOS INGENIEURS CONSEILS (GROUPE INGEROP) - STÉPHANE MONLEAU, SOLETANCHE BACHY

La técnica de soil mixing utilizada en la central nuclear de producción de electricidad de Nogent-sur-Seine se adaptó muy bien a la geología del emplazamiento, a saber, terraplén y aluviones. La realización de 85 membranas de Geomix basadas en una malla ortogonal, con un colchón de distribución que recubre la cuadrícula, refleja la voluntad de eliminar el riesgo de licuefacción del suelo y reducir los asentamientos estáticos y sísmo-inducidos. Todo ello para proteger la superestructura que soporta el motor diésel de alimentación de emergencia. El proyecto ha sido objeto de numerosos controles de calidad, que han aportado una valiosa información sobre esta técnica, eficaz pero poco utilizada en Francia. □

Depuis sa création en 2014, Eiffage Fondations a imprimé sa marque dans le monde des fondations.

Ses équipes accompagnent, que ce soit en France ou en dehors des limites de l'Hexagone, le développement du Groupe sur tous les grands projets complexes d'infrastructures, en ciblant deux grandes familles de travaux. La première regroupe les opérations de soutènement. La seconde, porte sur les améliorations de sol.



Fort d'une ingénierie intégrée, d'équipes expérimentées, et de matériels de pointe récemment acquis, Eiffage Fondations s'est vu confier plusieurs marchés de fondations profondes au sein de projets majeurs d'infrastructures urbaines.



1
© CÉDRIC HELSLY

SÉCURITÉ SUR LA BUTÉE DES ÉCRANS DE SOUTÈNEMENT : QUELQUES CAS PARTICULIERS

AUTEUR : NICOLAS UTTER, DIRECTEUR DES ÉTUDES, SOLETANCHE BACHY FRANCE

LA DÉTERMINATION DE LA FICHE NÉCESSAIRE POUR GARANTIR L'ÉQUILIBRE HORIZONTAL EST TRÈS SOUVENT UN ÉLÉMENT FONDAMENTAL DE LA CONCEPTION D'UN ÉCRAN DE SOUTÈNEMENT. NOUS ÉTUDIONS QUATRE CONFIGURATIONS PARTICULIÈRES POUR LESQUELLES L'INGÉNIEUR DOIT S'INTERROGER SUR LE SENS DES JUSTIFICATIONS AFIN DE PROPOSER L'OUVRAGE LE PLUS ÉCONOMIQUE, CONFORME AUX RÈGLES DE L'ART ET RÉPONDANT AUX EXIGENCES RÉGLEMENTAIRES.

INTRODUCTION

Les écrans de soutènement comptent parmi les ouvrages géotechniques les plus audacieux, les hauteurs soutenues pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres (figure 1).

Il a pourtant fallu attendre l'apparition des Eurocodes et leur transposition en France pour que leur conception soit normalisée.

Le concepteur d'un écran de soutènement doit s'assurer de :

→ La sécurité des biens et des per-

sonnes. Il s'agit d'identifier, et d'éviter, tous les modes de ruine envisageables, soit du sol, soit de l'écran, soit de ses appuis ; on doit vérifier qu'on ne dépasse aucun État Limite Ultime (ELU).

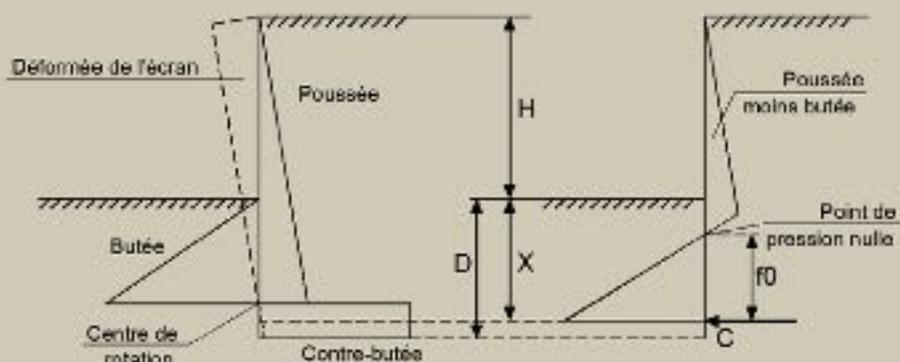
→ La durabilité et la fonctionnalité de l'écran et de son environnement, objets des vérifications vis-à-vis des États Limites de Service (ELS). Par exemple, la prise en compte du fluage du sol, ou la maîtrise de la fissuration du béton armé.

**1- Grande fouille :
tour Odéon
à Monaco.**

**1- Major excavation:
Odéon tower
in Monaco.**

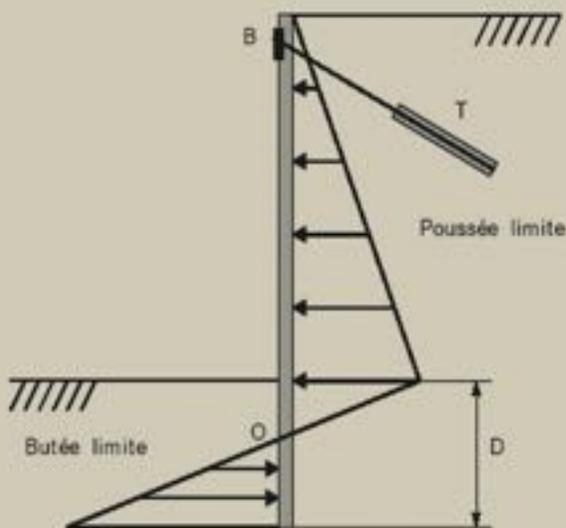
Nous nous intéressons ici à un mode de rupture particulier : la ruine de l'écran par défaut de butée. C'est en effet très souvent ce critère qui va déterminer la fiche nécessaire pour assurer l'équilibre horizontal. Après un bref rappel du contexte réglementaire et des méthodes de justification de la fiche vis-à-vis d'un défaut de butée dont dispose le concepteur, nous nous pencherons sur quatre cas, relativement fréquents, pour lesquels l'approche de la sécurité peut paraître délicate.

ÉCRAN EN CONSOLE



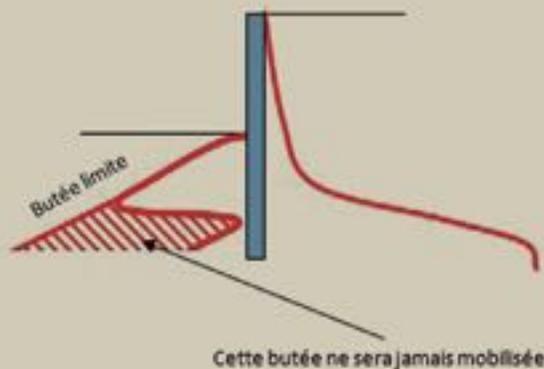
2

ÉCRAN AVEC UN LIT D'APPUI



3

BUTÉE MOBILISABLE D'UN ÉCRAN EN CONSOLE



4

L'APPROCHE DE LA SÉCURITÉ VIS-À-VIS D'UN DÉFAUT DE BUTÉE

La norme 94-282 envisage deux types d'approche. Dans tous les cas, la sécurité globale requise vis-à-vis de la ruine par défaut de butée est égale à :

- 1,5 pour les phases ou ouvrages provisoires, sauf dans certains cas particuliers ;
- 1,9 pour les phases permanentes.

APPROCHE « MEL »

L'utilisation de cette approche (Méthode de l'Équilibre Limite) suppose que le massif de sol en interaction avec l'écran est en état de poussée active ou passive. C'est en quelque sorte l'appellation moderne du calcul « à la rupture » ou « avec comportement rigide-plastique du sol ».

Cette méthode n'est valable que pour les écrans isostatiques, c'est-à-dire les écrans en console (figure 2) ou ceux ne bénéficiant que d'un appui (figure 3). L'éloignement vis-à-vis de la rupture est pris en compte en divisant les paramètres de butée K_{py} , K_{pq} et K_{pc} par le coefficient de sécurité globale requis. L'application du principe fondamental de la Statique conduit à une équation du 3^e degré, dont on tire la fiche minimale nécessaire à la stabilité horizontale, et la réaction dans l'éventuel appui de l'écran.

APPROCHE « MISS »

Cette approche prend en compte la relation entre les pressions exercées par le sol et la déformation de l'ensemble sol-écran, d'où son nom : « Méthode avec Interaction Sol Structure ».

Sont visés ici :

- La méthode dite « au coefficient de réaction » ;
 - Les calculs aux Éléments Finis.
- Notons qu'à de rares exceptions près (par exemple interaction entre ouvrages, estimation fine de tassements), la méthode au coefficient de réaction est parfaitement adaptée pour la justification de la grande majorité des écrans de soutènement.

L'approche de la sécurité sur la butée peut être faite de différentes façons :

- En vérifiant que le rapport (butée mobilisable)/(butée mobilisée) est supérieur à la valeur requise (1,5 ou 1,9) ;
- En divisant les paramètres de butée par cette même valeur et en vérifiant que le rapport (butée mobilisable)/(butée mobilisée) est supérieur à 1.

2- Écran en console.

3- Écran avec un lit d'appui.

4- Butée mobilisable d'un écran en console.

2- Cantilevered screen.

3- Screen with a supporting bed.

4- Moveable anchor of a cantilevered screen.

CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

En France, la justification doit être menée, depuis mars 2009, selon la norme NFP 94-282 : « Calculs géotechniques - ouvrages de soutènement - Écrans ».

Cette norme constitue l'annexe nationale française de l'Eurocode 7 relative aux écrans de soutènement.

Elle constitue, avec son amendement du 07 février 2015, un ensemble indissociable.

Toutes les références d'articles citées ci-après sont celles de la norme 94-282.

Bien que cela ne soit pas l'objet du présent article, il est important de rappeler que :

- L'exécution des écrans de soutènement doit être conforme aux prescriptions de la norme européenne NF EN 1538 ;
- L'annexe nationale française de l'Eurocode 2 renvoie à la norme sur le calcul des écrans de soutènement à chaque fois que cela est nécessaire.

L'approche MISS est adaptée aux écrans isostatiques et hyperstatiques. Il est néanmoins fondamental de rappeler que seule l'approche MEL de la sécurité est pertinente pour la détermination de la fiche des écrans en console.

En effet, toute tentative d'approche de la sécurité dans ce cas par un calcul MISS est absurde, puisqu'une grande partie de la « butée mobilisable » calculée par n'importe quel logiciel vient d'une zone où le sol est en contre-butée : on prend alors en compte une butée mobilisable qui ne peut jamais l'être, et le coefficient de sécurité (butée mobilisable)/(butée mobilisée) est toujours supérieur à 1 (figure 4).

QUELQUES CAS PARTICULIERS

La norme 94-282 ne demande pas une sécurité sur la butée, ou, du moins, ce n'est pas aussi simple : il faut pour chaque situation identifier le mécanisme pertinent et produire la justification adéquate. Une lecture étriquée de la norme ne permet pas de traiter convenablement les cas présentés ci-après.

ÉCRAN BUTÉ PAR UN RADIER EN PHASE DÉFINITIVE

Position du problème

Comme indiqué plus haut, on cherche une « sécurité sur la butée » de 1,9, cette valeur pouvant être réduite à 1,5 pour les ouvrages ou phases provisoires.

Or dans la majorité des cas, les caractéristiques de cisaillement des sols sont meilleures pour les phases « Tra-



5 © CEDRIC HELSLEY

vaux » que pour les phases « Service ». Dans une démarche logique, on cherche d'abord la fiche nécessaire pour avoir une sécurité sur la butée égale à 1,5 pour les phases « Tra-

- Soit en modèle MEL ;
- Soit en tâtonnant en MISS (typiquement un calcul au coefficient de réaction).

On constate alors qu'il est nécessaire de rallonger la fiche, souvent de façon très importante en phase « Service » pour obtenir un rapport butée mobilisable/butée mobilisée supérieur à 1,9, ce qui heurte à juste titre le bon sens dès lors que l'on bénéficie de la résistance d'un radier (figure 5). Pour avoir une approche correcte du problème,

5- Exemple de paroi avec plusieurs appuis : tramway T6 à Viroflay.

6- Basculement autour du radier.

7- Rupture d'un écran avec appuis multiples.

5- Example of wall with several supports: T6 tramway in Viroflay.

6- Tilting around the foundation raft.

7- Breakage of a screen with multiple supports.

il convient donc de prendre en compte la « réserve de sécurité » que représente la résistance du radier.

Démarche de justification

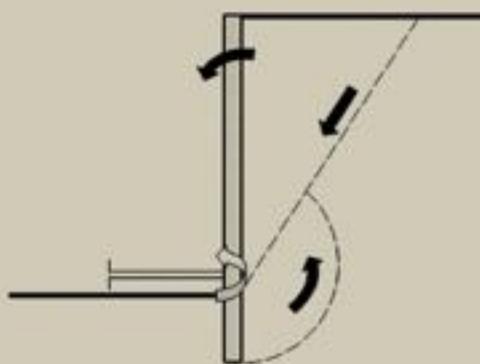
Le chapitre 4.2.2(1) de la norme 94-282 identifie parfaitement le « basculement autour d'un appui en pied » (figure 6).

Il va de soi que, même en la présence d'autres appuis, cette vérification garde toute sa pertinence comme le montre la figure 7.

Le chapitre 9.2(1), qui indique comment vérifier que la butée mobilisable est acceptable en MISS, est complété par la note 5 du 9.1(2) :

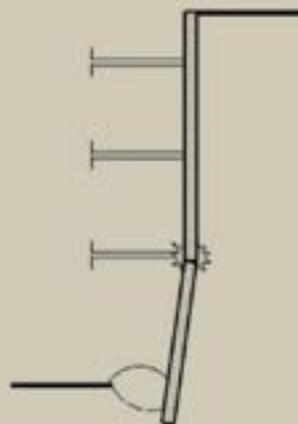
« Il est admis, quel que soit le modèle de calcul retenu, de déterminer la valeur de calcul de la butée mobilisée

BASCULEMENT AUTOUR DU RADIER



6

RUPTURE D'UN ÉCRAN AVEC APPUIS MULTIPLES



7

en appliquant un coefficient de sécurité global sur la seule butée du terrain ou sur le coefficient de butée au lieu de découpler les coefficients partiels sur les actions et sur les résistances ».

On peut donc légitimement vérifier la butée en appliquant un abattement sur la butée dans un modèle MISS, en procédant comme suit.

Il suffit de créer, dans le calcul MISS, une phase ELU qui correspond à la vérification du « non basculement autour du radier », en divisant les paramètres de butée K_{py} , K_{pq} et K_{pc} par la sécurité globale requise, soit 1,9.

Pour cette phase :

→ Les sollicitations - effort tranchant, moment fléchissant dans l'écran, réactions dans ses appuis - sont des sollicitations type ELU et doivent être utilisées comme telles pour les justifications structurales ;

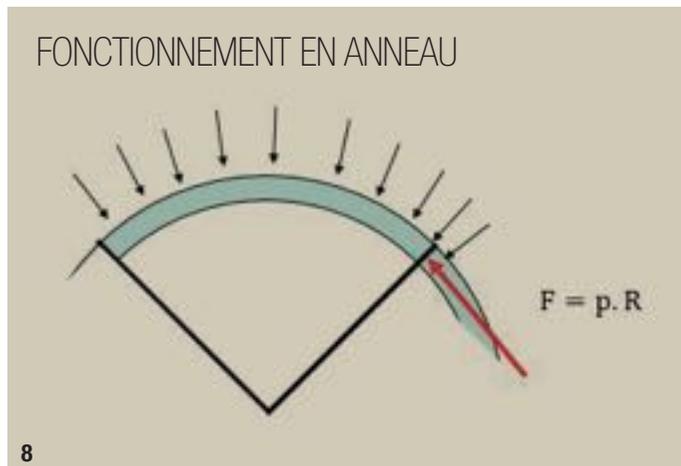
→ Il ne faut bien évidemment pas tenir compte des déformées éventuellement affichées puisque, encore une fois, il s'agit d'un ELU ;

→ L'éventuel défaut de butée se manifesterait par une non-convergence du calcul. Il est donc inutile et hors de propos de se préoccuper dans cette vérification du coefficient (butée mobilisable)/(butée mobilisée).

Remarques :

On pourrait objecter que la norme n'évoque pas à proprement parler la résistance du radier, mais il est implicite que le radier doit résister aux efforts ELU déduits du calcul avec butée réduite ; c'est d'ailleurs explicite au chapitre 10.2(2), qui indique :

« Lorsque l'effet des actions est déduit d'un modèle de calcul de type MEL



8- Fonctionnement en anneau.

9- Exemple de fouille circulaire de faible diamètre : puits de reconnaissance de la ligne 15 du Grand Paris Express à Boulogne-Billancourt.

8- Ring working.

9- Example of small-diameter circular excavation: reconnaissance shaft of line 15 of the 'Grand Paris Express' in Boulogne-Billancourt.

dans lequel les facteurs partiels de sécurité sont directement appliqués aux actions et/ou aux résistances, il doit être vérifié que la structure est capable de résister à l'effet des actions (moment, effort tranchant, etc.) qui en découle. »

Notons que dans ce paragraphe, « calcul de type MEL » veut dire « calcul avec butée réduite ».

Cette approche converge par ailleurs avec celle que l'on peut utiliser pour trouver la fiche strictement nécessaire :

→ On abat K_{py} , K_{pq} et K_{pc} de la sécurité recherchée ;

→ On tâtonne en MISS pour avoir un rapport (butée mobilisable)/(butée mobilisée) égal à 1.

Une autre méthode consisterait à calculer le rapport (butée mobilisable + résistance ELU du radier) / (butée mobilisée + effort ELS dans le radier) au lieu de (butée mobilisable)/(butée mobilisée) et s'assurer qu'il est supérieur à 1,9.

Elle est plus difficile à raccorder à la norme 94-282 ; toutefois, cela peut être considéré comme la démonstration que la stabilité du pied est assurée grâce au radier, lequel permet donc d'empêcher le mécanisme rotationnel de la figure 4.2.2.1.c.

ÉCRAN EN CONSOLE AVEC FICHE SURABONDANTE

Position du problème

Rappelons tout d'abord que la seule approche valable de la sécurité sur la butée est l'approche MEL.

Il peut arriver que l'on décide de mettre en œuvre une fiche plus importante que celle nécessaire vis-à-vis de la butée, pour des questions de déformations, de portance, ...

On serait donc amené dans ce cas à devoir mettre en œuvre une structure (armatures dans une paroi moulée par exemple) permettant d'équilibrer les sollicitations ELU du calcul MEL, ce qui n'a pas de sens, puisqu'on a doté l'écran d'une fiche bien plus importante, qui va donc leur interdire de se développer.

La difficulté vient du fait que la norme 94-282, (§ 8.4.2.2) indique :

« (2) On doit vérifier la fiche minimale des écrans en console vis-à-vis de l'état-limite ultime de défaut de butée, à partir du modèle de calcul MEL.

(3) On doit vérifier la résistance de la structure d'un écran (incluant les appuis) vis-à-vis des effets des actions (moments, efforts tranchants, traction, compression, etc.) les plus défavorables, déduits d'un modèle de calcul MISS et du modèle de calcul MEL lorsque celui-ci est utilisé pour vérifier l'état-limite ultime de défaut de butée ».

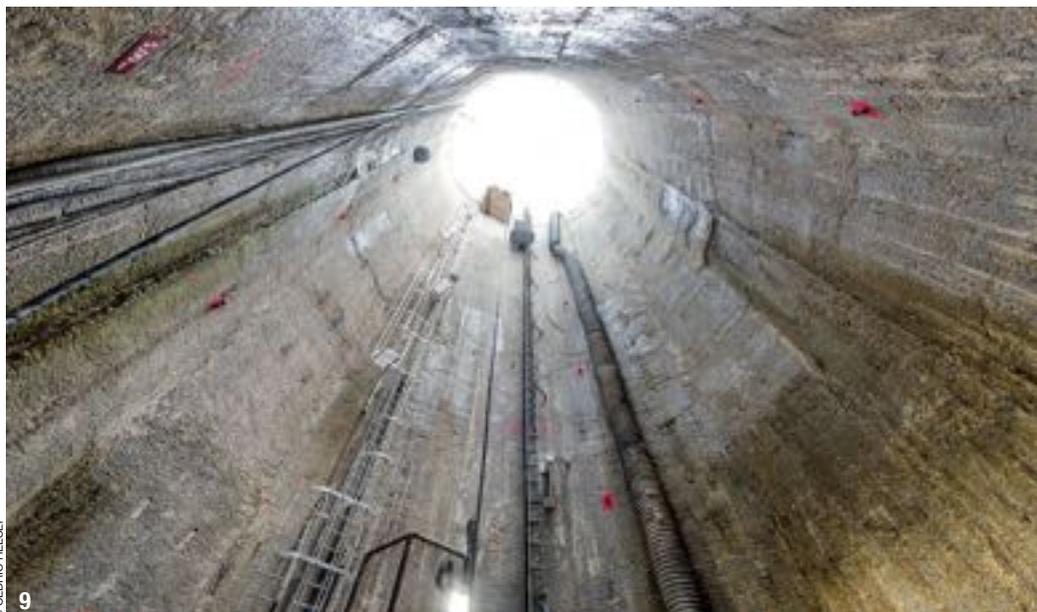
Nous voilà devant un exemple de situation où il faut impérativement se ramener à la physique des phénomènes qui sont à la source de la rédaction de la norme 94-282.

Démarche de justification

Comme on vient de le voir, on ne peut « échapper » au calcul MEL pour la justification de la structure de l'écran. On peut néanmoins mener au cas par cas la démarche de justification suivante :

→ Chercher la fiche selon MEL pour avoir la sécurité requise (étape obligatoire quoi qu'il en soit) : on obtient un moment ELU M_1 ;

→ Effectuer un calcul MISS avec cette fiche, en dégradant les paramètres de butée : on obtient un moment ELU M_2 supérieur égal au précédent (ou sans dégrader la butée, et en multipliant le moment par 1,35). ▷





10
© DR

On peut faire la simulation pour différentes sécurités recherchées, et l'on montrera qu'on obtient les mêmes conclusions.

On choisit ensuite une fiche plus importante.

On sait alors :

- Qu'on est en sécurité excédentaire vis-à-vis du défaut de butée ;
- Que considérer le moment ELU calculé à partir de MISS est du côté de la sécurité, comme établi ci-dessus.

PAROI CIRCULAIRE

Principe de fonctionnement ; position du problème

Une partie de la poussée des terres et de l'eau s'exerçant sur un écran circulaire se traduit par une réaction annulaire de compression (figure 8).

Pour un anneau de très faible diamètre (figure 9), la quasi-totalité de la poussée comprime l'anneau. La mobilisation de la butée ne contribue pas du tout à l'équilibre horizontal : la fiche de l'écran est, de ce point de vue, totalement superflue. Elle peut, en revanche, être nécessaire pour répondre à des considérations :

- De portance ;
- De rabattement et de limitation du débit associé ;
- D'équilibre du fond de fouille (renard solide).

Ces trois points ne sont pas abordés ici. Pour un anneau de très grand diamètre au contraire, la mobilisation de la butée peut être nécessaire ; en effet, le fon-

ctionnement de la paroi en flexion verticale n'est pas négligeable (figure 10). On doit alors se poser la question de la sécurité sur la butée.

Démarche de justification

L'annexe B de la norme 94-282 indique :

- B.2.5(1) « Le comportement d'une paroi moulée circulaire peut être assimilé à celui d'un écran continu plan uniforme bénéficiant d'un

appui continu élastique constitué d'anneaux horizontaux » ;

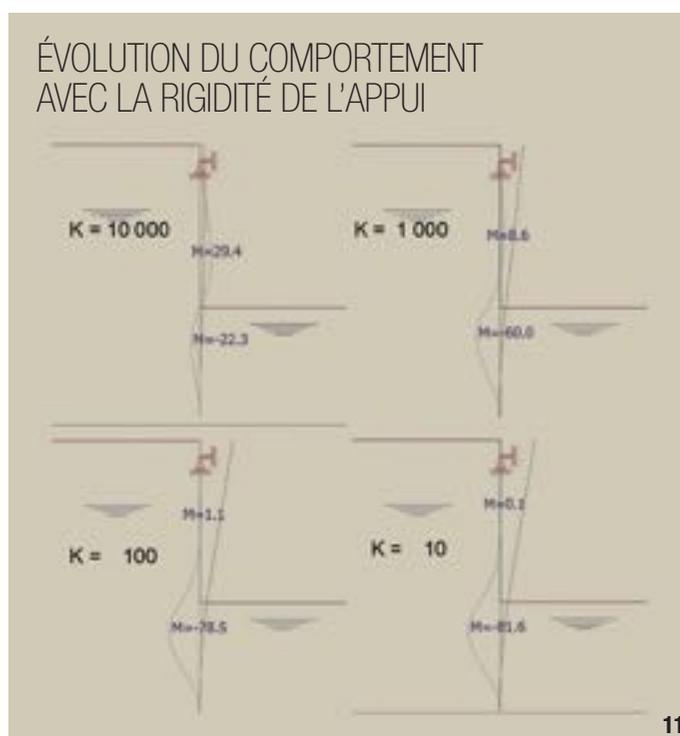
- B.3.5(1) « Pour vérifier la stabilité et la résistance d'une paroi moulée circulaire, les dispositions applicables à un écran continu plan uniforme sont celles à prendre en compte ».

La première note reflète la modélisation du fonctionnement en anneau : on appuie dans le modèle l'écran de

soutènement sur un sol fictif de raideur égale à sa raideur cylindrique.

La deuxième note dit grosso modo qu'il convient de se rapprocher du calcul des écrans continus plans.

Ces deux notes nous ramènent au mode de rupture indiqué en 4.2.1 c., dans lequel les planchers seraient infiniment rapprochés, et présents également sous le fond de fouille (figure 7). On peut donc tout à fait légitimement, et conformément à la norme 94-282, utiliser le mode de justification présenté ci-dessus ; on crée pour cela une phase de vérification de la butée, en divisant les paramètres de butée K_{py} , K_{pq} et K_{pc} par la sécurité globale requise :



10- Exemple de fouille circulaire de grand diamètre : réservoir GNL à Zeebrugge.
11- Évolution du comportement avec la rigidité de l'appui.

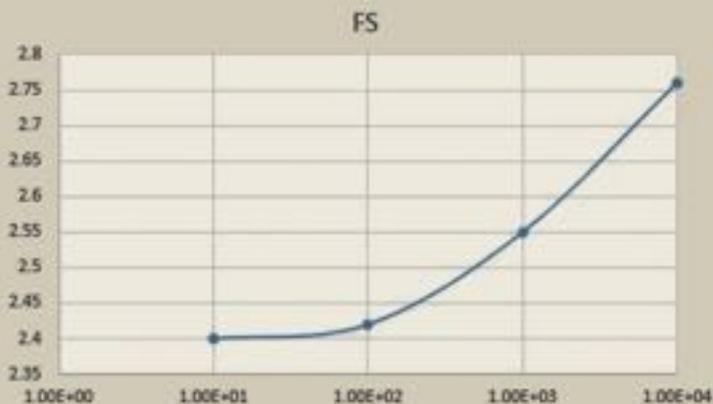
10- Example of large-diameter circular excavation: LNG tank in Zeebrugge.
11- Change in behaviour with the rigidity of the support.

LE MÊME ÉCRAN EN CONSOLE



12

ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE SÉCURITÉ AVEC LA RIGIDITÉ DE L'APPUI



13

- Les sollicitations : effort tranchant, moment fléchissant dans l'écran, réactions dans ses appuis sont des sollicitations type ELU et doivent être utilisées comme telles pour les justifications structurales (autrement dit, sans les majorer par 1,35) ;
- Il ne faut bien évidemment pas tenir compte des déformées éventuellement affichées, puisque, encore une fois, il s'agit d'un ELU ;
- Il est bien sûr inutile et hors de propos de se préoccuper dans cette vérification du coefficient (butée mobilisable)/(butée mobilisée).

Remarque : on constate bien sûr que le passage à la limite (rayon infini = écran en console) conduit à une incohérence, car il faut alors avoir une approche MEL de la sécurité. On fait confiance au sens de l'ingénieur pour traiter convenablement ces cas-là.

ÉCRAN MAINTENU PAR UN LIT D'APPUI TRÈS SOUPLE

Position du problème

La rupture par défaut de butée se manifeste de deux façons pour les écrans isostatiques :

- Cas 1 : écran en console - l'équilibre correspondant au mécanisme de ruine s'écrit formellement :

12- Le même écran en console.

13- Évolution du coefficient de sécurité avec la rigidité de l'appui.

12- The same screen cantilevered.

13- Change in safety factor with the rigidity of the support.

Poussée + Contrebutée = Butée.
Le calcul par MEL de la fiche est, comme on l'a vu, impératif.

- Cas 2 : écran avec un appui - cet équilibre devient alors :
Poussée = Butée + Réaction d'appui.

Le calcul de la fiche peut se faire par MEL ou MISS.

Lorsque la raideur de l'appui tend vers zéro, on va du cas 2 au cas 1.

On le voit sur le cas élémentaire ci-dessous, en faisant passer la raideur de l'appui de 10 000 à 10 (figure 11).

Dans cet exemple, la fiche retenue correspond, pour la paroi en console, à une sécurité de 1,5.

Il faut donc, pour les appuis très souples, se poser la question de la pertinence de l'approche de la sécurité par le rapport (butée mobilisable)/(butée mobilisée) calculé en MISS.

Toute la finesse réside dans l'appréciation du caractère « très » souple de l'appui.

Il apparaît clairement qu'au fur et à mesure que la rigidité de l'appui diminue, le comportement se rapproche de celui du même écran en console (figure 12).

Enfin, il est instructif d'étudier comment évolue le coefficient de sécurité (butée mobilisable)/(butée mobilisée) en fonction de la raideur de l'appui (figure 13). On fait les constatations suivantes :

- Comme attendu, le coefficient tend vers une limite incorrecte lorsque la raideur d'appui tend vers zéro, puisque cet écran en console dispose d'une sécurité de 1,5 et non de 2,4 (cf. § 3.2 ci-dessus).

→ On ne peut pas, même sur un cas élémentaire comme celui-là, se donner un critère objectif pour décider si l'approche MISS de la sécurité est insuffisante.

Démarche de justification

Il est donc impossible de faire d'autres recommandations que de s'en remettre au sens de l'ingénieur : dès que l'on prend en compte un appui dans les calculs, on doit s'interroger sur la pertinence de ce choix ; fait-on confiance à cet appui pour remplir son rôle ?

CONCLUSION

Le concepteur d'écran de soutènement doit toujours s'interroger sur le mode de ruine et les phénomènes physiques en jeu ; cette démarche est indispensable à l'ingénieur.

La norme française de justification des écrans de soutènement offre, soit explicitement, soit implicitement, les possibilités de quantifier de façon correcte et économique l'éloignement de l'état limite ultime de ruine par défaut de butée, quelle que soit la typologie de l'écran étudié.

« L'augmentation croissante de la science de l'ingénieur n'a pas réduit le besoin de discernement de l'ingénieur. »

R.Peck. □

ABSTRACT

SAFETY OF PASSIVE EARTH PRESSURE ON RETAINING SCREENS: SOME SPECIFIC CASES

NICOLAS UTTER, SOLETANCHE BACHY

When determining the data sheet for a retaining screen, the designer must raise questions concerning the physical phenomena involved. After a brief reminder of the regulatory environment and of concepts useful for design (limit equilibrium method and method with soil-structure interaction), four cases are presented for which the interpretation of the existing standards may prove tricky: screen held back by a foundation raft, cantilevered screen with excessive embedded length, circular wall, and screen maintained by a very flexible support. It is shown that it is always possible, by returning to the spirit of the legislation, to provide all the required justifications. □

SEGURIDAD DE EPUJE PASIVO DE LAS PANTALLAS DE CONTENCIÓN: ALGUNOS CASOS PARTICULARES

NICOLAS UTTER, SOLETANCHE BACHY

La determinación de la longitud de clava de una pantalla de contención debe llevar al diseñador a preguntarse qué fenómenos físicos entran en juego. Tras un breve recordatorio del contexto normativo y de los conceptos útiles para el diseño (método del equilibrio limitado y método con interacción suelo-estructura), existen cuatro casos en que la interpretación de las normas en vigor puede resultar delicada: pantalla apoyada en una losa de cimentación, pantalla en consola con longitud de clava superabundante, pantalla circular, pantalla mantenida por un apoyo muy flexible. Se demuestra que siempre es posible aportar todas las justificaciones solicitadas recuperando el espíritu de los textos. □



© BOUYGUES UK-SCOTT TALLON WALKER

INFRASTRUCTURES ET FONDATIONS DU NOUVEAU CENTRE DE THÉRAPIE PROTON À LONDRES

AUTEUR : AURÉLIEN COMMARE, CHEF DE GROUPE MÉTHODES, BOUYGUES TP

LA PHASE 4 DU UNIVERSITY COLLEGE LONDON HOSPITAL, SITUÉE AU CŒUR DE LONDRES, CONSISTE EN UN BÂTIMENT DE 6 ÉTAGES AU-DESSUS D'UN SOUS-SOL DE 5 NIVEAUX COMPORTANT UN CENTRE DE TRAITEMENT DES CANCERS PAR PROTONTHÉRAPIE. LA FOUILLE REQUISE, DONT LE CONTOUR S'ADAPTE À L'ESPACE DISPONIBLE DANS CE MILIEU URBAIN TRÈS CONGESTIONNÉ, S'ÉTEND SUR UNE SURFACE DE 3600 M², POUR UNE PROFONDEUR ALLANT DE 22 M À 26 M. LA FOUILLE EST À L'ABRI D'UNE PAROI MOULÉE SUPPORTÉE PAR TROIS NIVEAUX DE BUTONS. DES PIEUX FORÉS CONSTITUENT LA FONDATION DU RADIER DE L'OUVRAGE.

LE PROJET

Le National Health Service (NHS) anglais a décidé de se doter d'un nouvel outil pour le traitement des cancers : la thérapie par rayonnement de protons. Cette technologie permet, contrairement à la traditionnelle radiothérapie utilisant un rayonnement d'électrons, de cibler précisément les cellules malades

sans affecter les tissus sains autour. De tels centres existent déjà à travers le monde, notamment deux en France, et leur construction tend à se multiplier. En effet, les avantages par rapport à la radiothérapie sont considérables, notamment en ce qui concerne le traitement des tumeurs cérébrales ou bien celui des enfants. Le Royaume-Uni et

**1- Vue d'artiste
du projet.**

**1- Artist's view
of the project.**

plus particulièrement l'Angleterre et son NHS, mène ainsi de front la construction de ses deux premiers centres de Proton Beam Therapy (PBT), l'un à Manchester et le second à Londres, au sein du University College London Hospital (UCLH), situé dans le borough de Camden au cœur de la capitale britannique (figure 1).



© BOUYGUES UK-SCOTT TALLON WALKER

2

Ce projet a été confié en conception et réalisation à Bouygues UK, en partenariat avec Bouygues Travaux Publics. L'architecture est conçue par le cabinet Scott Tallon Walker, et la structure par Campbell Reith. Les fondations, pieux et parois moulées, sont sous-traitées à Fayat Piling, alors que les travaux préparatoires, l'excavation et notamment le butonnage sont confiés à McGee.

2- Section simplifiée du projet.
3- Section sur l'infrastructure.

2- Simplified cross section of the project.
3- Cross section on infrastructure.

Seules la fourniture et l'installation des équipements médicaux restent dans le giron du client, qui a choisi un fournisseur américain, Varian Medical Systems, leader dans ce domaine. La phase 4 de UCLH se singularise par trois aspects. Premièrement, en raison de la contrainte d'urbanisme sur la hauteur maximale des bâtiments dans ce quar-



© BOUYGUES UK-SCOTT TALLON WALKER

3

tier de Londres, le NHS a décidé d'aller chercher en sous-sol l'espace nécessaire aux zones de traitement (figure 2), alors que la plupart des autres centres de protonthérapie ont leur zone de traitement au rez-de-chaussée. Deuxièmement, les architectes ont dû utiliser toute la surface au sol disponible. En conséquence, la forme de la fouille requise pour le sous-sol épouse les limites de propriété et n'a rien de rationnel. Et troisièmement, ce centre de protonthérapie se situe en plein cœur du centre de Londres alors que les autres centres de traitement sont généralement construits en périphérie des villes. Ces trois aspects s'ajoutent ainsi à la complexité, tant en termes de conception que de construction, inhérente aux centres de protonthérapie. Le projet s'étend sur 4 000 m² au sol. L'infrastructure comporte 5 niveaux, jusqu'à 24 m de profondeur (26 m pour la fouille), la zone de traitement se situant dans les 3 derniers niveaux (figure 3). Le sous-sol inclut aussi des blocs opératoires, des scanners et IRM, ainsi que les locaux techniques. La superstructure comporte, quant à elle, un rez-de-chaussée et 6 étages, et accueille en majorité des chambres pour les patients. Le tout représente 37 900 m² d'ouvrage.

L'un des jalons majeur du projet, outre la livraison finale prévue en 2020, est la livraison partielle à Varian Medical Systems des zones de traitement pour l'installation des équipements, notamment un accélérateur de particules de 80 t, et de 4 bras isocentriques, un par salle de traitement, livrés en pièce détachées allant jusqu'à 30 t (figure 4).

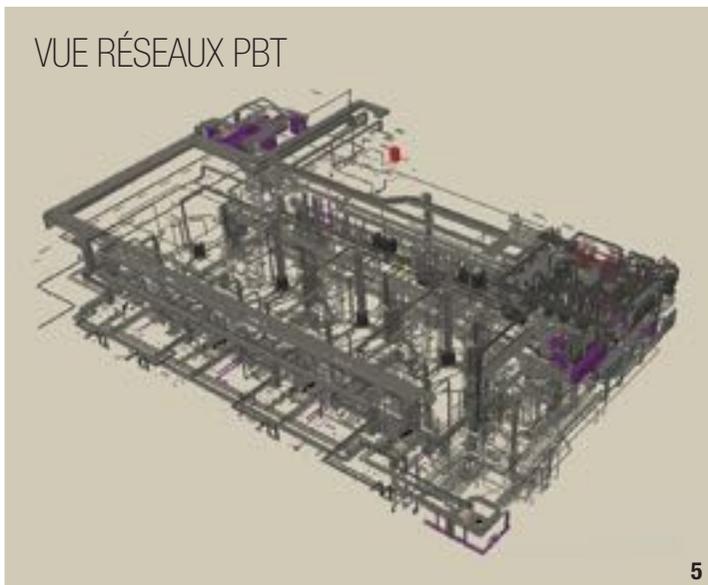
CONTEXTE DU PROJET

Le nouveau centre se situe au cœur du quartier Fitzrovia, au milieu des bâtiments de l'université UCL et du complexe hospitalier UCLH. Il est entouré au nord et à l'est par des rues, au sud et à l'ouest par des bâtiments en brique des années 30, comportant un à deux niveaux de sous-sol et jusqu'à sept étages. Le côté Ouest du projet est aussi longé par la très active avenue Tottenham Court Road, et deux tunnels de la ligne de métro de la Northern Line, à dix mètres de la fouille.

Les rues adjacentes comportent aussi les habituels réseaux et notamment des égouts en brique, toujours actifs, datant du XIX^e siècle. La conception du projet, et particulièrement du soutènement de la fouille, a dû prendre en compte les contraintes liées aux particularités de cet environnement.



© VARIAN MEDICAL SYSTEMS



© BOUYGUES UK-CCRD

Le démarrage des travaux a requis l'aval de toutes les parties concernées, qui comprennent l'administration locale pour l'impact sur la voirie, l'exploitant du métro, celui de l'assainissement et les représentants de chaque bâtiment mitoyen.

La nature de l'ouvrage en lui-même apporte son lot de contraintes. Les équipements composant le système de protonthérapie sont très sensibles et requièrent des tolérances strictes, notamment en ce qui concerne le tassement différentiel du radier sur lequel ils reposent. Ce tassement doit être limité à 2 mm par longueur de 10 m et par an. Une autre problématique, habi-

tuelle dans le domaine du nucléaire, est la radioprotection. Cette radioprotection est assurée par des épaisseurs de mur et de dalle en béton, variant de 1,80 m à 4 m. La densité du béton doit être maîtrisée. Là où l'épaisseur de béton n'est pas suffisante, des plaques en acier seront installées, sur des épaisseurs allant jusqu'à 1,40 m. De plus, ces structures assurant la radioprotection comportent de nombreuses conduites noyées, 7 km en cumulé, requises par le process (figure 5).

L'alignement de ces conduites respecte des règles imposées par la radioprotection en termes d'espacement et de nombre de coudes, ce qui résulte en

4- Installation des équipements sur un projet similaire.

5- Vue réseaux PBT.

6- Coupe géologique.

7- Faille géologique.

4- Installation of equipment on a similar project.

5- View of PBT utilities.

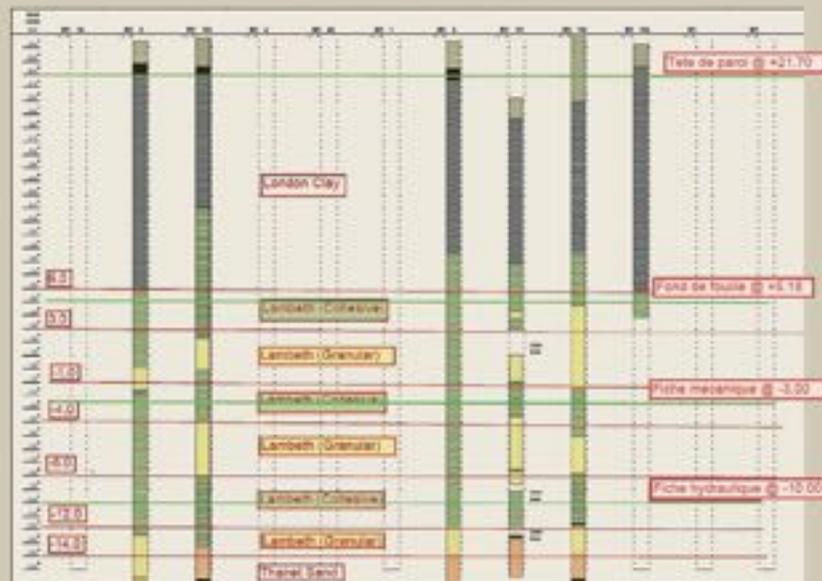
6- Geological cross section.

7- Geological fault.

un ensemble hyper-contraint. Enfin, l'installation se trouvant en-dessous de la nappe phréatique, le cahier des charges impose d'avoir deux barrières d'étanchéité sur l'ensemble de l'infrastructure. Au niveau du radier, ces deux barrières sont obtenues par une membrane adhérente et une maîtrise de la fissuration du radier à 0,2 mm.

À l'emplacement du nouvel ouvrage se trouvait un ancien bâtiment hospitalier en brique datant des années 30, ainsi que de son extension en béton armé sur pieux commencée dans les années 2000 mais jamais achevée. Certains de ces pieux se trouvaient sur l'alignement de la paroi moulée et ont nécessité un

COUPE GÉOLOGIQUE



6

© BOUYGUES UK-A² STUDIO



7

© BOUYGUES UK

TABLEAU 1 : PROFIL DU SOL IDÉALISÉ

Strata	From (m AOD)	To (m AOD)	Thickness (m)
Made Ground	GL	22.50	2.00
River Terrace Deposits	22.50	22.00	0.50
London Clay	22.00	8.50	13.50
Reading Formation (cohesive)	8.50	-7.00	15.50
Reading Formation (granular)	-7.00	-11.00	4.00
Upnor Formation	-11.00	-13.50	2.50
Thanet Sand	-13.50	-17.00	3.50
Chalk	-17.00	<-29.47	>13.00

TABLEAU 2 : PARAMÈTRES DE SOL

Strata (Unit)	Top of Stratum (mOD)	Unit weight (kN/m ³)	ϕ'_{cv} (°)	ϕ'_{cv} (°)	K_s	Undrained Cohesion c_u (kPa)	Undrained Young's Modulus E_u (kPa)	Drained Young's Modulus E' (kPa)
Made Ground	27.43	19	30	28	0.5	-	-	10,000
London Clay	22.00	20	25	22	1.0	60 + 7.7z	60,000 + 7,700z	46,000 + 8,160z
Lambeth Group Granular-Upper	3.00*	20	37	34	1.0	-	-	200,000
Lambeth Group Cohesive	-1.00*	20	28	23	1.0	200	200,000	180,000
Lambeth Group Granular	-4.00	21	40	34	1.0	-	-	200,000
Lambeth Group Cohesive	-6.00	20	28	23	1.0	200	200,000	180,000
Lambeth Group Granular	-12.00	21	40	34	1.0	-	-	200,000
Thanet Sand	-14.00	21	39	30	1.0	-	-	300,000
Chalk	-18.00	20	39	30	1.0	-	-	200,000

© BOUYGUES UK-CAMPBELL REITH

© BOUYGUES UK-FAVAT PILING-BYRNE LOOBY

retrait préalable au forage des panneaux et, a fortiori, de l'excavation principale. Le reste de la parcelle était occupé par un vieux cinéma dont il ne reste que les fondations superficielles, ainsi que des caves le long des rues. La première opération a donc consisté à démolir l'existant, ainsi que de purger autant que possible le terrain des obstructions superficielles. Le nivellement du terrain pour la mise en place de la plateforme de travail a nécessité la construction d'une paroi berlinoise temporaire le long des rues avoisinantes, et la reprise en sous-œuvre des murs mitoyens afin d'approfondir leurs fondations.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Des études de sol ont été conduites en 2013. Celles-ci incluaient quatre carotages de 20 m à 50 m de profondeur. D'autres inspections superficielles ont aussi été conduites, notamment sur les fondations des mitoyens. Les résultats de ces études combinées à des études antérieures sont récapitulés dans le profil de sol idéalisé (tableau 1 et figure 6). Ce profil montre que, sous des couches superficielles de matériaux importés et sédimentaires, la géologie du terrain comprend particulièrement une couche argileuse dite du London Clay, une succession

de couches cohésives et granulaires (Lambeth Group, incluant la Reading Formation), au-dessus des Thanet Sand et de la Craie, qui constitue le réservoir d'eau potable de Londres. Ces études ont permis aussi de confirmer la présence d'une faille géologique au niveau du London Clay et de la Reading Formation, déjà connue grâce aux données historiques. Cette remontée du Lambeth Group sur le London Clay a été ensuite clairement identifiée lors de l'excavation (figure 7). Des piézomètres installés à différentes profondeurs dans les couches sous-jacentes n'ont pas mis en évidence

de courants souterrains. Un niveau hydrostatique à l'équilibre a été estimé à +21 m AOD, c'est-à-dire 6 m en dessous du niveau 0 du projet. Les paramètres de sol retenus pour les calculs géotechniques sont, quant à eux, présentés sur le tableau 2.

CONCEPTION ET MÉTHODES ENVISAGÉES

Les critères de conception pour les fondations et la fouille du projet ont donc intégré ces paramètres et notamment la pression hydrostatique sur le radier (de 16 m à 20 m de colonne d'eau) ainsi que l'effet de gonflement des argiles. Le gonflement des argiles, quand il est gêné, développe une pression qui a été estimée entre 110 kPa et 135 kPa suivant la séquence d'excavation et de construction. En conséquence, la conception du radier considère une pression verticale ascendante sur la sous-face du radier, qui nécessite que ce radier soit retenu par 155 pieux de diamètre 800 mm, travaillant en traction. Les études du radier considèrent aussi le cas où la pression hydrostatique disparaîtrait, faisant cette fois travailler les pieux en compression, avec l'aide de la capacité portante de la formation. Une variante en barrettes a été étudiée mais n'a pas été retenue, car la non-uniformité de la sous-face du radier empêchait d'optimiser la disposition de ces barrettes. La rétention de la fouille a aussi dû prendre en compte les surcharges liées aux avoisinants, comprenant des bâtiments en brique et deux rues sujettes au trafic de véhicules. Le *concept design* proposait l'utilisation de pieux sécants. Il a été tout de suite varianté en paroi moulée. En effet, Bouygues a considéré que, pour une telle profondeur de fouille (jusqu'à 22 m au pied de la paroi), la paroi moulée offrait un meilleur contrôle de verticalité, ainsi qu'un meilleur alignement et une meilleure rigidité de la boîte. Aussi, la paroi moulée, munie de bandes d'arrêt d'eau entre panneaux, est considérée comme une barrière d'étanchéité, contrairement aux pieux sécants qui nécessitent l'application en deuxième phase d'un béton étanche. L'annulation de cette épaisseur de béton additionnelle a permis de relâcher la tolérance sur la verticalité sur la paroi, fixée à 1 sur 200 dans le cas des pieux sécants, à 1 sur 100, grâce au gain relatif d'espace intérieur. Épaisse de 1 m et profonde de 33 m à 36,50 m, la paroi moulée s'étend sur les 315 m du périmètre du projet. ▷

Elle est divisée en 78 panneaux, dont la longueur standard est 3,40 m. Cette longueur a été fixée en fonction de la capacité journalière de bétonnage. La paroi se fiche dans la dernière couche cohésive (Upnor Formation) au-dessus des couches en continuité hydraulique du bassin londonien, afin de fournir une relative étanchéité à la boîte (figure 6). Les études ont divisé le périmètre en 12 sections de calcul, chacune vérifiée selon 12 à 15 phases de construction, dans les deux combinaisons de l'approche de calcul 1 de l'Eurocode 7, approche recommandée par l'annexe nationale britannique. Les calculs ont été réalisés selon le programme FREW sur les 12 sections. Les résultats obtenus ont été corroborés par deux sections aux éléments finis sur PLAXIS. La fiche mécanique, et donc ferrailée, de la paroi est quant à elle de 8 m.

Si les planchers finaux de l'infrastructure constituent les supports permanents de la paroi, il a fallu développer les supports temporaires. Les tirants d'ancrage se révélaient impossible car empiétant sur les voisins. Ainsi, un principe de butonnage sur 3 niveaux espacés de 8 m sur la hauteur de la paroi a été adopté pour lancer la conception de la paroi. La conception du butonnage a suivi la première itération de calcul de la paroi une fois que les charges sur butons ont été connues. La conception du butonnage a dû composer avec plusieurs difficultés. D'abord les dimensions de la fouille : 65 m de long et 50 m de large dans la partie centrale. Aussi, la forme aléatoire de la fouille empêchait tout positionnement rationnel des butons. Pour traiter les problèmes engendrés par la dimension de la fouille, des nœuds en béton, reliés par des poteaux préfondés métalliques plongés dans des pieux, ont été positionnés pour réduire les longueurs de flambement. Les butons ont été conçus sous la forme de sections tubulaires en acier allant jusqu'à 1 420 mm de diamètre (figure 8). La nature asymétrique des avoisinants en termes de surcharge résulte en des efforts sur butons non équilibrés, ce qui a nécessité plusieurs itérations avec les études la paroi pour la prise en compte de ces déséquilibres.

La méthode retenue pour l'excavation et la construction, et prise en compte dans la conception des ouvrages participant au soutènement, est la méthode classique du *bottom-up*. L'excavation a lieu progressivement, entrecoupée par l'installation des niveaux de butonnage. Puis la construction des structures

finales depuis le bas permet la dépose successive des niveaux de butons en remontant. La méthode dite de *top-down*, notamment envisagée par les représentants de la maîtrise d'ouvrage en phase d'appel d'offres, se révélait très difficile à exécuter, d'une part à cause de l'agencement de la structure interne, loin d'être une structure en poteau-dalle typique propice aux excavations en *top-down*, mais aussi parce que la profondeur de la fouille rend très difficile l'installation des poteaux préfabriqués sur toute la hauteur dans les tolérances acceptables pour l'ouvrage final.

Au début du processus de conception, une simulation des mouvements de terrain et de l'impact prévisible sur les voisins (mitoyens, métro, égouts) a

été conduite en fonction des premières hypothèses disponibles (figure 9). Cette simulation a donné des résultats qui ont été jugés acceptables par les parties concernées. Ces résultats se sont donc commués en critères de conception, notamment pour la flèche de la paroi, pour les calculs détaillés, et servent de référence pour le monitoring.

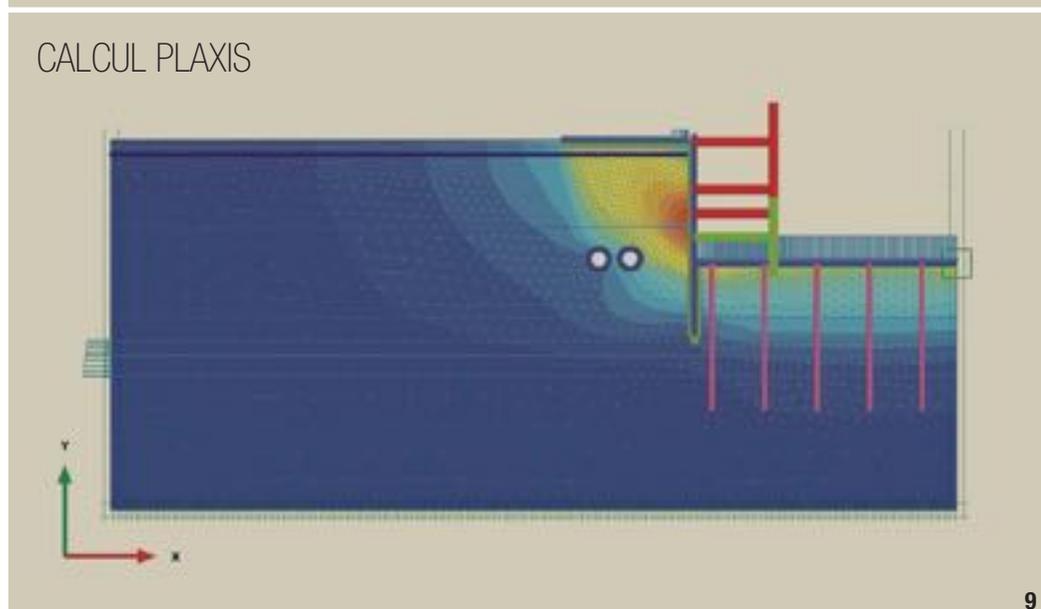
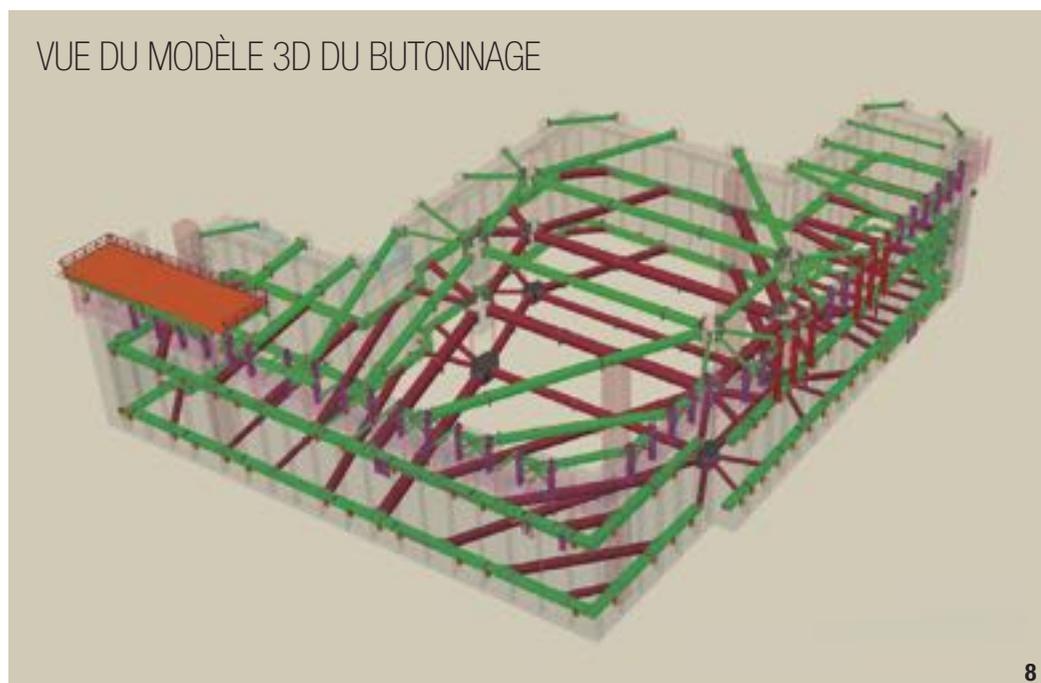
ASPECT TRAVAUX

Il a été décidé de réaliser les 155 pieux en amont sur la même plateforme de travail que pour la paroi moulée, et donc 18 m à 22 m plus haut que la tête de pieu théorique, afin de ne pas avoir à mobiliser d'atelier pieux au fond de la fouille.

Les pieux sont forés sous boue bentonitique avec l'utilisation d'une chemise en acier de 7 m pour la partie haute du forage. Du fait de la superposition avec les travaux préparatoires, un seul atelier de pieux a été utilisé. La centrale à bentonite a d'abord été dimensionnée et installée pour cet atelier de pieux, puis agrandie et relocalisée au centre du chantier pour passer à la phase paroi moulée.

8- Vue du modèle 3D du butonnage.
9- Calcul Plaxis.

8- View of staying 3D model.
9- Plaxis computation.





10

© BOUYGUES UK

La paroi moulée a été réalisée d'abord avec un atelier, puis de deux ateliers lorsque la phase pieux a été achevée (figure 10). Chaque atelier était constitué d'une grue Liebherr 855, munie d'une benne d'excavation de 2,80 m ou de 3,40 m en fonction du panneau (figure 11), et d'une grue treillis de service de 110 t pour les levages des coffrages de joint, des cages d'armature (figure 12) et des tubes plongeurs pour le coulage du béton. Le panneau type de 3,40 m représente un volume 100 m³.

Les panneaux de coin utilisés comme panneaux primaires représentaient des

10- Vue générale du chantier en phase paroi moulée.

11- Forage paroi moulée.

12- Installation de cage.

10- General view of the project in diaphragm wall phase.

11- Diaphragm wall drilling.

12- Installation of reinforcing cage.

quantités allant jusqu'à 300 m³, ce qui a nécessité des autorisations d'extension des horaires de travail par les autorités locales.

Il est à noter que c'est une des deux grues excavatrices qui a été utilisée pour le retrait préalable des pieux sur le tracé de la paroi. La benne a pu creuser et concasser les pieux concernés sur leur profondeur au moyen d'une seule tranchée par pieu, alors que plusieurs avait été envisagées en phase de préparation. Chaque tranchée a été ensuite remblayée à l'aide d'un mélange de béton de centraliste, et de bentonite utilisée pour la stabilité, le tout étant

mixé dans les toupies livrant le béton. Cette solution a été adoptée afin de fournir un remblai auto-compactant et donc stable, mais toutefois fluide pour la mise en place, moins dur que du béton en prévision de l'excavation de la paroi, et plus économique pour les 700 m³ requis.

Les 78 panneaux sont chapeautés par une poutre de couronnement qui constitue aussi la poutre de répartition pour le premier niveau de butonnage. Les deux autres niveaux s'appuient sur une lierne périmétrique constitué d'un double HEB 1000. L'ensemble du butonnage représente une quantité de 1 850 t d'acier. Les butons disposés sur les plus grande travées de la boîte sont précontraints à l'aide de vérins plats hydrauliques.

Afin de permettre l'excavation, la nappe à l'intérieur de la boîte créée par la paroi moulée est rabattue à l'aide de 8 pompes dans des puits répartis sur l'étendue du projet. Les déblais sont évacués à hauteur de 150 chargements de 20 t par jour en première phase d'excavation, pour descendre à 120 chargements par jour au fur et à mesure que le fond de fouille s'abaisse, ce qui ralentit le cycle (figure 13).

Le dispositif de suivi mis en place concerne d'abord l'existant.

Les mitoyens sont contrôlés hebdomadairement à l'aide de prismes disposés sur leurs façades, dont les mouvements sont convertis en déformations qui renseignent une catégorie de dommages selon le CIRIA 580, la catégorie 1 (sur 5) étant la limite à ne pas dépasser. ▽



11

© BOUYGUES UK



12

Le tunnel et les rails du métro sont contrôlés tous les 5 m sur une longueur totale de 40 m, à une fréquence dépendant de la phase des travaux en cours. Du fait de l'état initial de l'équipement, les mouvements acceptables sont restreints (11 mm pour la distorsion).

Le dispositif de suivi se concentre aussi sur la surveillance du soutènement, avec 9 inclinomètres sur la paroi, contrôlés eux aussi hebdomadairement et qui permettent de vérifier que la flèche de la paroi respecte les prédictions à chaque étape de l'excavation.

Enfin, les butons principaux sont équipés de jauges de déformations afin de détecter toute anomalie de chargement. □

13- Vue du chantier en phase excavation.

13- View of the project in excavation phase.



© BOUYGUES UK

PRINCIPALES QUANTITÉS

SITE : 3900 m², périmètre 315 m

FOUILLE : 80000 m³, profondeur 28 m (max)

PAROI MOULÉE : 33 m de profondeur, 1 m d'épaisseur, 78 panneaux, 11 000 m³ de béton, 900 t d'acier

BUTONNAGE : 1 850 t de structure acier

PIEUX : 155 pieux forés de Ø 800 mm

RADIER : 2 m à 5,83 m d'épaisseur, 10 959 m³ de béton, 1 990 t d'acier

STRUCTURE : 21 995 m³ de béton, 4 380 t d'acier, 665 t de structure métallique, 509 t de plaques d'acier

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : UCLH Trust

MAÎTRE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉ : Aecom

CONSTRUCTEUR - CONCEPTION/RÉALISATION : Groupement Bouygues UK - Bouygues Travaux Publics

ARCHITECTE : Scott Tallon Walker

BUREAU D'ÉTUDES STRUCTURE : Campbell Reith

FONDATIONS : Fayat Piling

TRAVAUX PRÉPARATOIRES, BUTONNAGE ET TERRASSEMENT : McGee

ABSTRACT

INFRASTRUCTURE AND FOUNDATIONS OF THE NEW PROTON THERAPY CENTRE IN LONDON

AURÉLIEN COMMARE, BOUYGUES TP

The UCLH proton therapy centre project, located in the London borough of Camden, comprises a six-storey building and a five-level basement. The project is carried out under a Design and Build contract by Bouygues UK in partnership with Bouygues TP. The foundation works are subcontracted to Fayat Piling, while excavation and shoring are awarded to McGee. A perimeter diaphragm wall supported by three levels of stays will allow construction of the basement receiving cancer treatment areas. The foundation raft, supported by 155 bored piles, will serve as a base for heavy and very sensitive medical equipment, and the anti-radiation structures that it requires. Complete monitoring of the structures and neighbouring area has been organised to ensure control of geotechnical risks during all the project construction phases. □

INFRAESTRUCTURAS Y CIMIENTOS DEL NUEVO CENTRO DE TERAPIA DE PROTONES EN LONDRES

AURÉLIEN COMMARE, BOUYGUES TP

La obra del centro de terapia de protones de UCLH, situado en el distrito de Camden, en Londres, consta de un edificio de 6 plantas y un sótano de 5 niveles. Bouygues UK, en colaboración con Bouygues TP, se encarga del diseño y la realización de la obra. Los trabajos de cimentación se han subcontractado a Fayat Piling, mientras que la excavación y el hormigonado se han confiado a McGee. Una pantalla de hormigón perimetral, sostenida por 3 niveles de apuntalamientos, permitirá la construcción del sótano, que albergará zonas de tratamiento del cáncer. La losa de cimentación, sostenida por 155 pilotes hormigonados, servirá de base para los equipos médicos pesados y muy sensibles, así como para las estructuras anti-radiación que precisan. La instalación de un sistema de vigilancia completa de la obra y las zonas vecinas permitirá controlar los riesgos geotécnicos durante todas las fases de construcción del proyecto. □

ArcelorMittal Palplanches

Solutions complètes pour vos projets de fondations spéciales
palplanches.arcelormittal.com



ArcelorMittal



ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l.
Palplanches
66, rue de Luxembourg
L-4221 Esch/Alzette | Luxembourg
T +352 5313 3105
T +33 (0)3 82 59 11 20
palplanches@arcelormittal.com



3^e TABLIER AU VIADUC DE GUERVILLE SUR L'AUTOROUTE A13 : RENFORCEMENTS DE SOL ET SOUTÈNEMENTS

AUTEURS : GREGORY VILLAIN, RESPONSABLE TRAVAUX, BOUYGUES TPRF - PIERRE JACQUOT, RESPONSABLE TERRASSEMENTS, BOUYGUES TP - ANGÉLIQUE FIESCHI, GÉOTECHNICIENNE, DIRECTION TECHNIQUE BOUYGUES TP - BASTIEN POTHIER, RESPONSABLE D'EXPLOITATION VSoL®

DANS LE CADRE DU PROJET DE CONSTRUCTION DU 3^e TABLIER AU VIADUC DE GUERVILLE (YVELINES) SUR LE RÉSEAU AUTOROUTIER SAPN - A13, LA RÉALISATION DES DEUX RAMPES D'ACCÈS POSE D'IMPORTANTES CONTRAINTES TECHNIQUES ET DE PLANNING. LA PREMIÈRE, CONSTITUÉE D'UN REMLAI D'UNE HAUTEUR SUPÉRIEURE À 10 M, EST SITUÉE EN CONTEXTE DE TERRAIN COMPRESSIBLE À PROXIMITÉ DE VOIES SNCF ET DE L'AUTOROUTE A13. LA SECONDE PRÉSENTE DES CONTRAINTES D'EMPRISE NÉCESSITANT DES SOUTÈNEMENTS ET UN PHASAGE COMPLEXE.

CARACTÉRISTIQUES DE L'OUVRAGE

Le 3^e tablier au viaduc de Guerville, dont la livraison est prévue pour 2020, assurera le franchissement par l'autoroute A13 (sens Province-Paris) de la Route Départementale n°113 et de la ligne ferroviaire reliant Paris St-Lazare au Havre (figure 1).

Ce chantier est réalisé dans le cadre du plan de relance autoroutier du groupe Sanef.

L'ouvrage dégage une hauteur libre minimum sous le tablier de près de 8 m au droit des 3 voies ferrées existantes

et se situe plusieurs mètres au-dessus des deux tabliers existants (figures 2 et 3). Un mur de soutènement en amont du viaduc, réalisé en remblai renforcé de type VSoL®, permet de soutenir la nouvelle chaussée vis-à-vis de l'A13 existante (accès à la culée C0 figure 4), tandis qu'un remblai de grande hauteur permet d'assurer le raccordement en aval (remblai d'accès à la culée C5).

L'ouvrage est un pont mixte à cinq travées, dont une de 116,5 m, pour une longueur totale de 360 m. La largeur totale droite du tablier est de 16,50 m.

1- Photo aérienne du projet.

1- Aerial photo of the project.

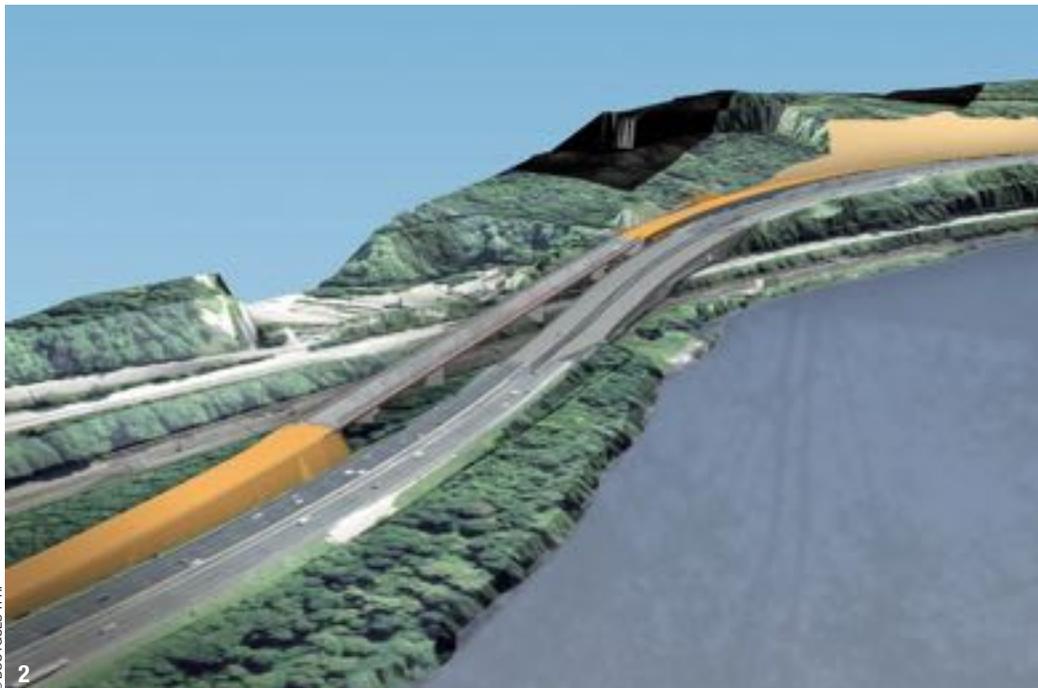
Il repose sur des fondations de différents types :

- Fondation superficielle pour la culée C0 ;
- Fondations profondes pour les piles P1, P2, P3, P4 et la culée C5.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

D'après la carte géologique de Guerville au 1/50 000^e établie par le BRGM, le projet se situe à l'ouest, dans la formation crayeuse d'âge Campanien et à l'est sur les alluvions de la Seine. Leur épaisseur augmente lorsqu'on se rapproche du fleuve.

Le mur de soutènement à l'ouest du viaduc, à proximité de la culée C0 est fondé en déblai sur le substratum crayeux ou sur des matériaux de comblement de carrière. Ces derniers présentent une épaisseur importante



2

© BOUYGUES TPFF



3

© BOUYGUES TPFF



4

© DRONEPRESS - PHOTOTHÈQUE SANEF

2- Vue d'ensemble en 3D.

3- Vue du viaduc en 3D.

4- Photo de travaux de terrassement en amont de la culée C0.

2- 3D overall view.

3- 3D view of the viaduct.

4- Photo of earthworks upstream of abutment C0.

(jusqu'à 20 m) et ont fait l'objet d'une campagne géotechnique particulière afin de caractériser au mieux leur état de compacité.

La culée C5 du viaduc et son remblai d'accès situés à l'est sont concernés par une épaisseur importante d'alluvions. On retrouve les craies campaniennes à partir de 9 m à 10,5 m de profondeur par rapport au Terrain Naturel.

Les reconnaissances géotechniques ont permis de mettre en évidence les remblais de l'autoroute A13 sur une épaisseur variable, de caractériser les alluvions récentes composées d'argiles plus ou moins sableuses de compacité très faible et compressibles et les alluvions anciennes sableuses et argilo-graveleuses présentant des passages argileux de faible compacité. Le substratum crayeux a, quant à lui, été subdivisé en trois faciès : une craie de faible densité en surface, une craie de transition et une craie compacte en profondeur (figure 5).

De plus, le projet se situe en zone inondable en raison de sa proximité avec la Seine, avec un niveau de nappe PHEC situé à la cote 21,40 m NGF, soit à environ 1 m au-dessus du niveau du TN.

REMBLAI D'ACCÈS À LA CULÉE C5 SUR SOL COMPRESSIBLE

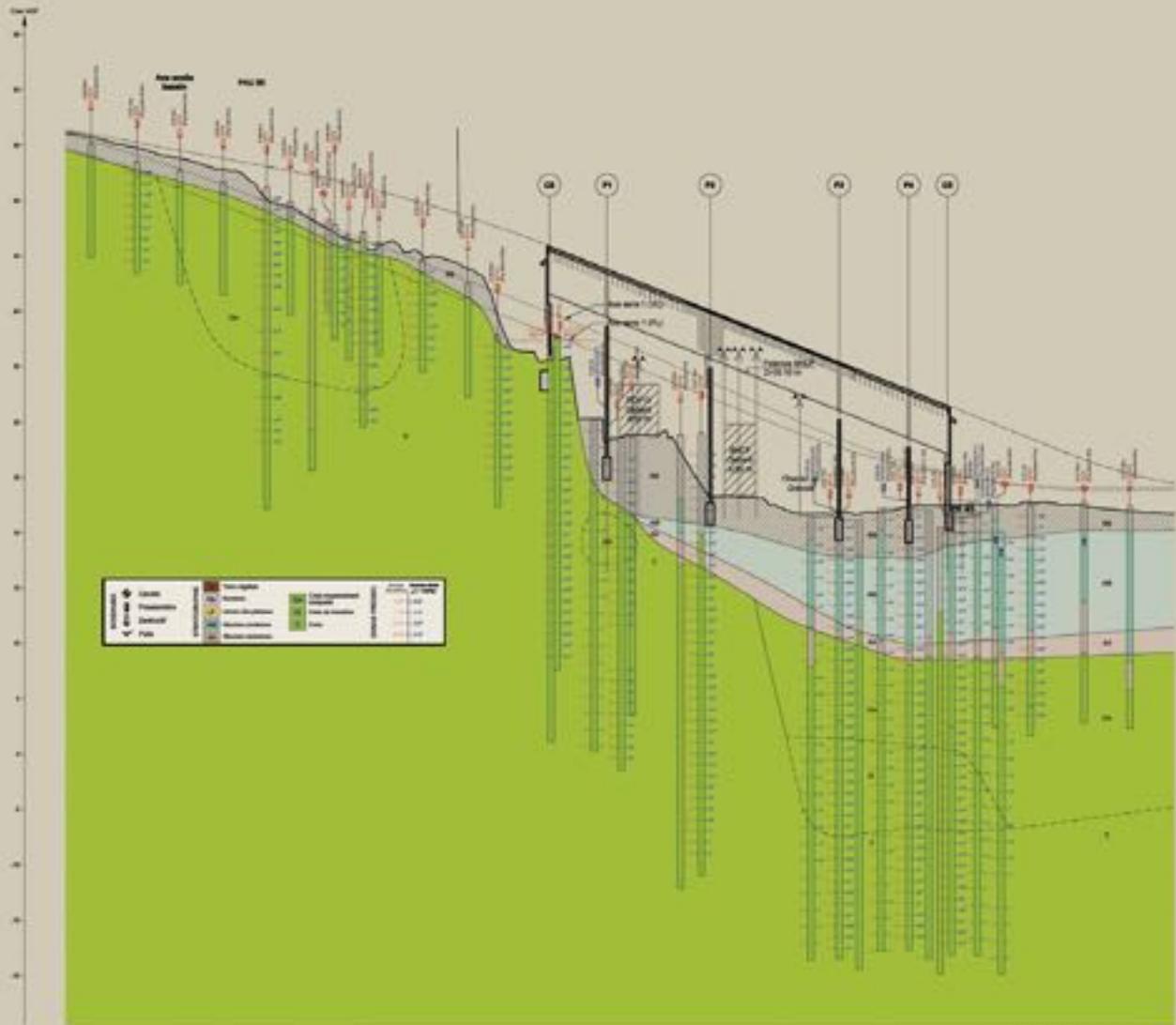
Le remblai d'accès à la culée C5 s'étend sur 430 m de long et présente une hauteur maximale de 10 m. Il sera mis en œuvre en épaulement sur le remblai existant de l'A13 et présentera une pente de talus de 3H/2V.

La distance minimale qui sépare son pied de talus des voies SNCF est de 12 m au sud et, de l'autre côté, il se situe à quelques mètres des voies existantes de l'autoroute A13.

Les tolérances de déplacements admissibles pour les voies SNCF sont les plus contraignantes avec des déplacements verticaux et horizontaux limités à 8 mm. Les alluvions récentes étant compressibles, elles subiront, sans dispositions particulières, sous la charge que représente le remblai d'accès à la culée C5, un tassement primaire de l'ordre d'une quarantaine de centimètres. De tels tassements produiraient des déplacements bien supérieurs aux tolérances.

En phase projet, cette problématique identifiée par le maître d'œuvre (Arcadis) conduisait à la mise en place d'un renforcement de l'assise de remblai par inclusions rigides, par injection gravitaire et refoulement (longueur ▷

EXTRAIT DE LA MAQUETTE GÉOTECHNIQUE DU PROJET



5

© TERRASOL

5- Extrait de la maquette géotechnique du projet.

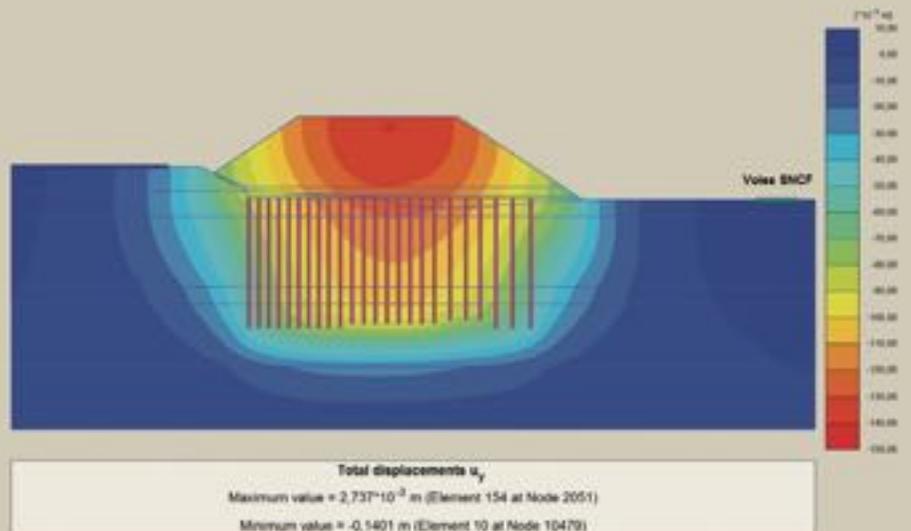
6- Résultat de calcul Plaxis.

5- Extract from the project geotechnical mock-up.

6- Plaxis computation result.

moyenne de 17,6 m) et d'un rideau de palplanches situé en rive sur un linéaire de 60 m et une profondeur de 18 m. Le diamètre des inclusions prévu était de 42 cm et elles étaient disposées suivant un maillage variant de 2 m x 2 m à 3 m x 3 m.

RÉSULTAT DE CALCUL PLAXIS



6

© MENARD



7

© DRONEPRESS - PHOTOTHÉQUE SANEF



8

7- Photo aérienne des travaux de préparation de l'assise de remblai.

8- Réalisation des CMC™.

7- Aerial photo of embankment base preparation work.

8- Execution of CMCs™.

MODÉLISATION AUX ÉLÉMENTS FINIS

Compte tenu des enjeux, le groupement a mené, à la suite des reconnaissances géotechniques complémentaires, une modélisation 3D du sol aux éléments finis sous Plaxis (prestation Terrasol).

L'objectif était d'évaluer précisément les déplacements impactant les voies SNCF et l'autoroute A13 sous la sollicitation du remblai de la culée C5 (figure 6).

À l'issue de cette étude, une solution de renforcement de l'assise du remblai

par des inclusions rigides a été confirmée mais le rideau de palplanche a été remplacé par la mise en place en rive d'inclusions armées.

Finalement, une solution de renforcement à l'aide d'inclusions rigides de type Colonnes à Module Contrôlé

(CMC™) a été retenue (figures 7 et 8).

Cette technique a permis, moyennant un maillage plus dense, de supprimer les inclusions armées prévues en rive. Ces inclusions, mise en œuvre par l'entreprise Menard, sont ancrées de 50 cm à 300 cm de profondeur dans la Craie selon les profils.

Des sondages supplémentaires au pénétromètre statique ont été réalisés afin de caler précisément le niveau d'ancrage des inclusions.

Cette solution avait pour objectif de réduire les tassements primaires dus au poids du remblai à 14 cm environ. La mise en œuvre des inclusions de rives situées sous le talus de remblai a permis de confiner les déformations sous l'emprise du remblai et de limiter les déformations sous les voies SNCF.

Les résultats des calculs et les maillages de renforcement sont présentés figure 9. ▶

LES INVESTIGATIONS GÉOTECHNIQUES

Au total, pour la culée C5, son remblai d'accès et le mur de soutènement, 47 sondages de 40 m de profondeur maximale ont été réalisés en phase étude et exécution. Ces sondages comportaient 3 sondages carottés avec prise d'échantillons intacts pour identifier les sols et caractériser les horizons compressibles.

Des sondages destructifs (16), pressiométriques (13) et au pénétromètre statique CPT (15) ont également été effectués pour estimer les tassements, évaluer la profondeur d'ancrage des inclusions rigides et l'état de compacité des remblais de comblement de carrière. Cela correspond à 1 sondage/13,4 m pour le remblai d'accès et 1 sondage/24 m de mur de soutènement.

INCLUSIONS

Pour ce projet, il a été réalisé près de 1 400 inclusions rigides de 14 m de profondeur moyenne.

De 36 cm de diamètre, les CMC™ étaient constituées d'un mortier C16/20. Elles sont réalisées par refoulement, ce qui implique l'absence de déblais de forage.

La durée du chantier de renforcement a été de 8 semaines, contre 6 prévues initialement, en raison des intempéries (période hivernale). En pointe, ce sont près de 1 000 m d'inclusions rigides qui ont été réalisées chaque jour soit environ 75 unités.

La surface de traitement est de 6 000 m² pour une assise de remblai totale d'environ 9 500 m².

TABLEAU DE SYNTHÈSE DES CALCULS DE RENFORCEMENT

	Hauteur de remblai	maillage	Tassements instantanés sous le remblai	Tassements résiduels sous le remblai	Déplacements sous l'A13	Déplacements sous la voie SNCF	σ_{col} max (MPa)	σ_{col} adm (MPa)
PT 69 culée C5	10 m	1.4 x 1.8 m à 2.2 x 2.3 m	14 cm	8 mm	29.6 mm	vertical=3 mm horizontal=8 mm	4.20	4.97
PT 70	10 m	1.6 x 2m à 2 x 2.6 m	14 cm	10 mm	29.7 mm	vertical=3 mm horizontal=8 mm	4.4	
PT 71A	8 m	1.45 x 2.2 m à 2.2 x 2.7 m	13 cm	10 mm	29.8 mm	vertical=2 mm horizontal=6 mm	4.4	
PT 73	7 m	2.3 x 2.3 m à 3 x 2.9 m	13 cm	13 mm	28.5 mm	vertical=2 mm horizontal=5 mm	4.1	
PT 75	5 m	2.5 x 3 m	10 cm	15 mm	19 mm	vertical=1 mm horizontal=3 mm	3.4	

9 © MENARD

INTERACTION SOL/STRUCTURE

Cette solution autorisant un tassement primaire des sols sous le poids du remblai a impliqué un renforcement des pieux de la culée C5.

Ces pieux, exécutés préalablement au remblai, ont pris en compte, dans leur dimensionnement, des frottements négatifs et des sollicitations latérales générées par le tassement des sols sous le poids du remblai (figure 10).

installées sur les voies en amont des travaux permet de contrôler le respect des valeurs définies dans la NPSF. Des tassomètres sont également prévus sous le remblai afin de suivre les déplacements engendrés lors de l'édification du remblai d'accès à la culée C5.

REMBLAI D'ACCÈS À LA CULÉE C0 EN VSol®

Un des principaux enjeux du chantier était de créer une structure de soutènement en deux phases :

RÉSULTAT DES CALCULS DES FROTTEMENTS NÉGATIFS DANS LES PIEUX

Type de pieu	Frottement négatif (kN)		
	Pieux intérieurs	Pieux extérieur	Pieux d'angle
Foré tubé	375	1165	2350
Foré	380	1193	2414
Chemisé bitume	316	322	329

10 © TERRASOL

CONTRÔLE DU DÉPLACEMENT DES VOIES SNCF

Un suivi de cibles topographiques

9- Tableau de synthèse des calculs de renforcement.

10- Résultat des calculs des frottements négatifs dans les pieux.

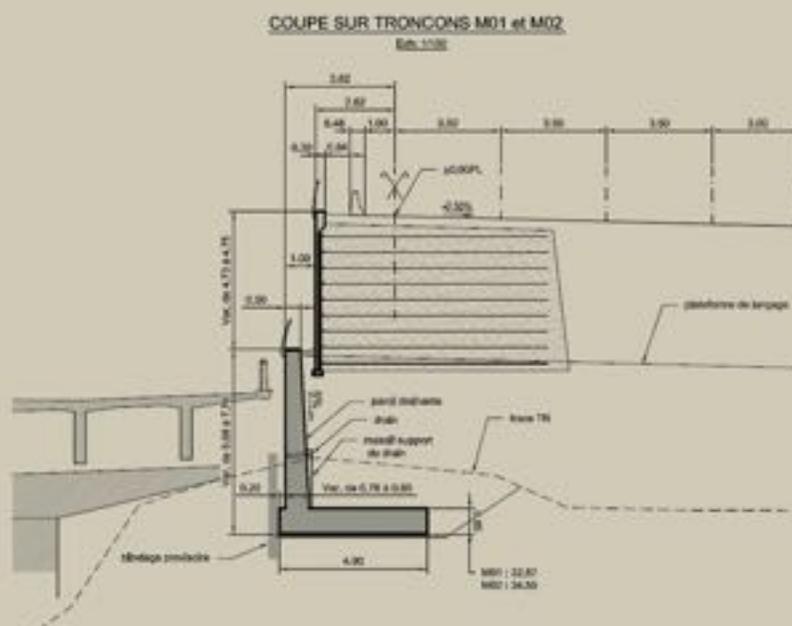
11- Coupe du marché du mur de soutènement.

9- Summary table of reinforcement calculations.

10- Result of computation of negative friction in piles.

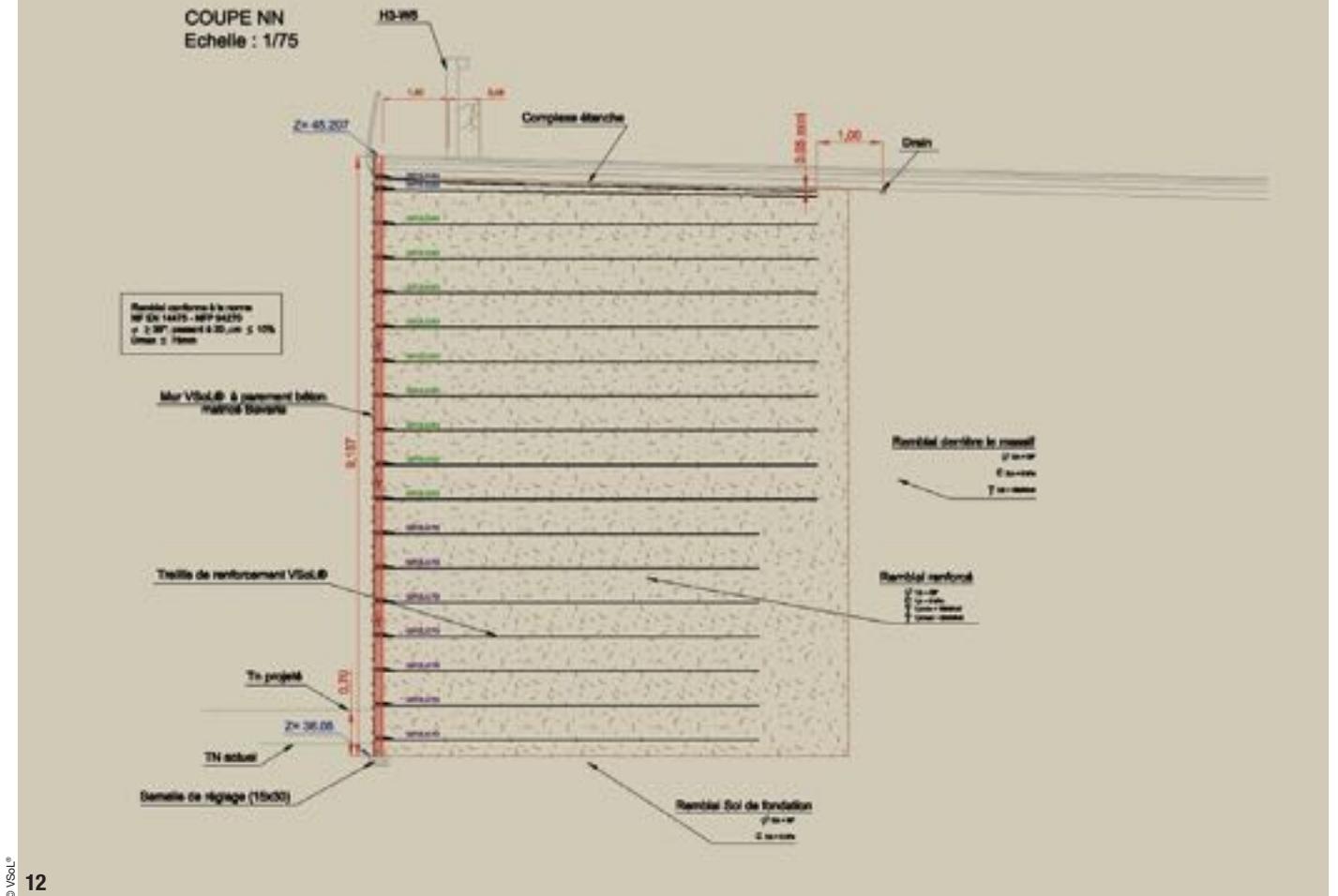
11- Cross section of the retaining wall contract.

COUPE DU MARCHÉ DU MUR DE SOUTÈNEMENT



11 © SAPIN - SANEF - ARCADIS

COUPE D'EXÉCUTION DU MUR DE SOUTÈNEMENT EN REMBLAI RENFORCÉ VSoL®



© VSoL® 12

12- Coupe d'exécution du mur de soutènement en remblai renforcé VSoL®.

13- Photo d'une écaille VSoL® (matrice de coffrage Bavaria).

12- Cross section of execution of the retaining wall in VSoL® reinforced fill.

13- Photo of a VSoL® scale (Bavaria formwork matrix).



© VSoL® 13

→ La première, la plus urgente, pour soutenir la plateforme de lançage de la charpente métallique de l'ouvrage (hauteur jusqu'à 7 m) afin de respecter la coupure de la ligne SNCF (Paris-Normandie) ;
 → La seconde pour supporter la chaus-

sée de l'autoroute A13 avant l'arrivée sur le tablier (hauteur jusqu'à 5 m). La solution de base prévoyait l'association d'un mur de soutènement en béton en première phase puis un remblai renforcé en partie supérieure (voir coupe figure 11).

Cette solution présentait toute une série de risques et notamment pour les fondations de murs rigides dans des craies en éboulis nécessitant localement des purges importantes difficilement réalisables en bordure de l'autoroute A13 (120 000 véhicules/jour).

L'adaptation proposée par le groupe Bouygues Travaux Publics consiste en la réalisation d'un mur en remblai renforcé VSoL® sur toute la hauteur de soutènement (figure 12). Cette solution présente de nombreux avantages :

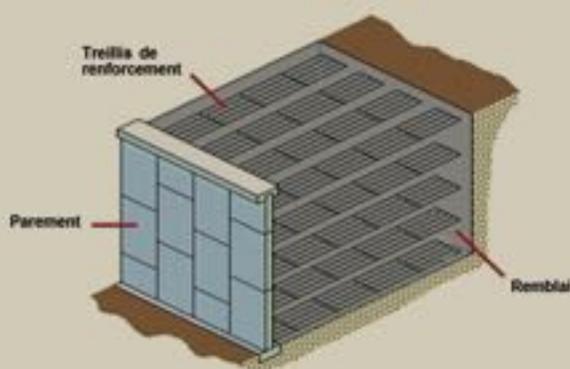
VSoL® - DES MURS DE SOUTÈNEMENT ADAPTÉS EN TOUTES CIRCONSTANCES

Le système VSoL® est un système de mur de soutènement économique et performant, qui a prouvé son excellence dans une multitude de situations, du simple mur de soutènement jusqu'aux culées de pont et aux ouvrages miniers (figure 14).

Depuis sa mise au point au début des années 80, VSoL® a été utilisé dans un large éventail de projets d'infrastructure dans le monde entier pour fournir des solutions de soutènement tout à la fois économiques et esthétiques. Le système de mur VSoL® combine des éléments de renforcement constitués de treillis soudés ou de bandes polymères. Installées à l'intérieur d'un remblai compacté ces armatures confèrent une cohérence au massif ainsi constitué et reprennent les efforts externes et internes appliqués.

Particulièrement performant, le système de mur VSoL® est par ailleurs à la fois très économique, facile et rapide à installer, avec seulement trois types de composants. L'utilisation d'éléments de parement préfabriqués en usine, combinée à une mise en œuvre rapide, se traduit par une finition de qualité, associée à une économie pouvant atteindre 50 % par rapport aux systèmes de murs traditionnels.

SCHÉMA DE PRINCIPE DU PROCÉDÉ VSoL®



14

© VSoL®

- Réutilisation des matériaux du site ;
- Reprise des efforts générés par les massifs de lançage de la charpente ;
- Diminution des quantités de béton de la phase 1 ;
- Amélioration des délais de réalisation ;
- Économie générale du projet ;
- Uniformisation du rendu architecturale esthétique.

Le remblai renforcé VSoL® peut parfaitement être réalisé en deux phases successives.

Le calcul est alors réalisé pour les deux niveaux de remblai ainsi que pour tous les cas de charge y compris ceux résultant des massifs de fondation de la rampe de lancement du viaduc.

L'équipe d'architectes a proposé une finition sous la forme de matrice de coffrage de type Bavaria (figure 13). En effet, le procédé VSoL® permet d'intégrer tout type d'architecture de parement.

Cette adaptation a permis au groupement d'entreprise de proposer au maître d'ouvrage une économie substantielle. □

14- Schéma de principe du procédé VSoL®.

14- Schematic diagram of the VSoL® process.

PRINCIPALES QUANTITÉS

- LINÉAIRE TOTAL DU PROJET : 2 000 m**
- LONGUEUR DU TABLIER DU VIADUC : 360 m**
- QUANTITÉ DE BÉTON POUR LE VIADUC : 5 000 m³**
- POIDS DE LA CHARPENTE : 2 500 t**
- SURFACE DE TRAITEMENT PAR INCLUSIONS: 6 000 m²**
- NOMBRE D'INCLUSIONS DE TYPE CMC : 1 400 u**
- LONGUEUR DU MUR DE SOUTÈNEMENT : 360 m**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRISE D'OUVRAGE : SAPN - Direction de la construction (SANEF)**
- MAÎTRISE D'ŒUVRE : Arcadis - Strates Architecture - Agence L'Anton & Associé**
- BUREAU D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE EXTERNE : Terrasol**
- ENTREPRISES : Bouygues Régions France - Bouygues Travaux Publics - Vsbc - Colas**

ABSTRACT

THIRD DECK ON GUERVILLE VIADUCT OVER THE A13 MOTORWAY: SOIL REINFORCEMENTS AND RETAINING STRUCTURES

GREGORY VILLAIN, BOUYGUES TPRF - PIERRE JACQUOT, BOUYGUES TP - ANGÉLIQUE FIESCHI, BOUYGUES TP - BASTIEN POTHIER, VSoL®

During construction of the third deck on the Guerville viaduct (Yvelines) over the A13 motorway, due to the existence of compressible Seine alluvia under the base of the access embankment to abutment C5, 10 metres high, and the nearby rail and road infrastructure, soil reinforcement by rigid inclusions had to be performed. Following further investigations and after producing finite element models, the solution of soil reinforcement by rigid inclusions was chosen in order to comply with the 8 mm acceptable displacement criteria under railway tracks located 12 m from the foot of the embankment. A retaining structure in VSoL® reinforced fill executed to support access to abutment C0 for the new viaduct was proposed by the consortium to respond as well as possible to the project's foundation, occupied land and scheduling requirements. □

TERCER TABLERO DEL VIADUCTO DE GUERVILLE SOBRE LA AUTOPISTA A13: REFUERZO DEL SUELO Y SOSTENIMENTOS

GREGORY VILLAIN, BOUYGUES TPRF - PIERRE JACQUOT, BOUYGUES TP - ANGÉLIQUE FIESCHI, BOUYGUES TP - BASTIEN POTHIER, VSoL®

En el marco de la construcción del tercer tablero del viaducto de Guerville (Yvelines) sobre la autopista A13, la presencia de aluviones comprimibles del Sena bajo la base del terraplén de acceso al estribo C5 de 10 m de altura y la proximidad de infraestructuras ferroviarias y viales han requerido la instalación de un refuerzo del suelo mediante inclusiones rígidas. Tras unas investigaciones adicionales y después de elaborar modelos con elementos finitos, se ha optado por la solución de refuerzo del suelo por inclusiones rígidas para respetar los criterios de desplazamiento admisible de 8 mm bajo las vías de SNCF situadas a 12 m del pie de terraplén. El consorcio ha propuesto un sostenimiento en terraplén reforzado VSoL® para sostener el acceso al estribo C0 del nuevo viaducto, de manera a responder mejor a las exigencias de cimentación, superficie y planificación del proyecto. □

SMA



**Ensemble,
allons plus loin !**

L'assureur de toutes les entreprises,
des professionnels, des dirigeants,
de leurs salariés et de leurs proches.

Retrouvez tous nos produits d'assurance sur groupe-sma.fr




SMABTP
S'EN FAIRE L'AVANTAGE AVEC ASSURANCE

SMA VIE

SMA
ASSURANCES

SMA
COURTAGE

SMA VIE
COURTAGE



© EGIS / LAVIGNE CHÉRON

VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL : LES FONDATIONS D'UN COLOSSE DES MERS

AUTEURS : GUILLAUME DANAN, CHEF DE PROJET VIADUC, EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT - RÉMY MATTRAS, RESPONSABLE GÉOTECHNIQUE, EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT - EMMANUEL MAUNIER, INGÉNIEUR TRAVAUX, EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT - CHRISTOPHE OUTTERYCK, DIRECTEUR DE PROJET ADJOINT, EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT

IMPLANTÉ ENTRE FALAISE ET OCÉAN, LE PROJET DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL, D'UNE LONGUEUR DE 12 KM, A ÉTÉ CONÇU PAR LA SOCIÉTÉ EGIS POUR S'ADAPTER AUX CONTRAINTES NATURELLES DU SITE : ÉBOULEMENTS DE FALAISE ET HOULES CYCLONIQUES. IL COMPORTE UN VIADUC DE 5 400 M PLACÉ HORS D'ATTEINTE DES PLUS IMPORTANTS EFFONDREMENTS ET QUI SERA LE PLUS LONG VIADUC EN MER DE FRANCE. LES FONDATIONS DE CE VIADUC ONT DÛ ÊTRE ADAPTÉES AUX CONDITIONS GÉOTECHNIQUES DU SITE, EN INTÉGRANT POUR LA PHASE DE TRAVAUX LES CONTRAINTES MARITIMES EXTRÊMES DE LA CÔTE NORD DE L'ÎLE.

PRÉSENTATION

PRÉSENTATION DE L'OPÉRATION

L'opération concerne la réalisation d'une nouvelle liaison sécurisée entre Saint-Denis et La-Possession, en remplacement de l'actuelle Route du Littoral soumise aux aléas climatiques (houles australes et cycloniques) et physiques

de la falaise (éboulements et chutes de pierres) (figure 1). Cette dernière, mise en service en 1976 dans sa configuration actuelle à 2x2 voies, constitue la seule liaison rapide entre la capitale économique de l'île et Le-Port. Calée entre mer et falaise sur tout son linéaire, soit environ 13 km, elle supporte un

1 - Photomontage du viaduc en mer.

1 - Photomontage of the offshore viaduct.

trafic de plus de 55 000 véhicules/jour. Cofinancé par l'État français, l'Union Européenne et la Région Réunion, le projet a été lancé en octobre 2010 dans le cadre du Protocole État-Région pour le développement économique de l'île, l'aménagement durable de son territoire et la création d'emplois sur place.



© BRGM

2



© LPROVOST

3

La Région Réunion, maître d'ouvrage de l'opération, en a confié la maîtrise d'œuvre complète à Egis.

Intérêt général majeur du projet

L'actuelle Route du Littoral est soumise à d'importants aléas naturels : chutes de blocs, effondrements en masse et submersion par la houle (figures 2 et 3). La sécurité des usagers s'avère largement insuffisante, notamment du fait des risques liés à la falaise : vingt-deux décès et plus d'une soixantaine de blessés sont à déplorer depuis 1976

et deux effondrements majeurs sont recensés en 30 ans (en 1980 et 2006) qui ont recouvert complètement la route sur une centaine de mètres.

La sécurité de l'itinéraire constitue donc l'objectif principal du maître d'ouvrage. Concernant l'intérêt économique du projet, la Route du Littoral constitue un axe stratégique et vital pour le développement économique de l'île.

Les fermetures ou basculement répétés de la route actuelle lors des épisodes climatiques sont donc particulièrement

contraignants pour l'économie de l'île.

Présentation de la solution retenue

La solution d'aménagement est un projet maritime mixte alternant digue et viaduc de la manière suivante, de Saint-Denis (à l'est) vers La-Possession (à l'ouest) :

- La réalisation d'une digue de 1 400 m de longueur environ ;
- La réalisation d'un viaduc d'une longueur de 5 400 m environ ;
- La réalisation d'une digue de longueur 5 150 m environ.

Le profil en long des voies de circulation est calé au-dessus de la cote +13 m NGR pour être hors d'atteinte de la houle, et monte jusqu'à +30 m NGR sur la zone de viaduc. Le fond marin se trouve entre -5 et -10 m NGR.

Le projet comprend également un échangeur à chaque extrémité : à Saint-Denis et à La-Possession, ainsi que la desserte de la Grande-Chaloupe en partie centrale, qui nécessite la construction d'un viaduc de 240 m de longueur (figure 4). ▷

2- Franchissements de la route par la houle lors des épisodes cycloniques.

3- Éboulements fréquents qui menacent la route actuelle.

4- Localisation du projet.

2- Road crossing by the swell during cyclonic spells.

3- Frequent rock slides which threaten the existing road.

4- Project location.



© EGIS

4

Le profil en travers fonctionnel comprend sur la largeur de tablier de 29 m : une 2x2 voies routières, un transport collectif de type routier (bus) sur voies dédiées, et une piste bidirectionnelle dédiée aux modes doux (piétons et cyclistes).

Une évolution future avec transport collectif en site propre (TCSP) est également prévue.

SECTION EN VIADUC

Étant donnée la grande longueur de l'ouvrage, celui-ci est divisé en 7 tronçons indépendants d'environ 770 m chacun. Chaque tronçon comprend un appui fixe situé au centre, les autres piles étant équipées d'appareils d'appui libres longitudinalement permettant les mouvements de tablier occasionnés par le retrait, le fluage et les dilatations thermiques.

Les extrémités des tronçons voisins de tablier reposent sur des piles-culées, qui permettent les déformations longitudinales du tablier.

La portée principale est de 120 m et la longueur des travées de rive de 84,64 m, le tablier a une hauteur variable de 7,30 m sur pile à 3,80 m à mi-travée, pour une largeur de 28,90 m.

Les piles ont une hauteur comprise entre 23,5 et 37 m, elles sont creuses et sont préfabriquées en 2 éléments. Les fondations superficielles des piles sont constituées de semelles cylindriques de 20 m de diamètre pour les piles courantes et 23 m de diamètre pour les piles fixes et les piles-culées. Les culées situées à chaque extrémité du viaduc sont fondées sur pieux traversant les musoirs de digue et ancrés dans le substratum rocheux.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET CONCEPTION DES FONDATIONS EN PHASE ÉTUDES

L'île de la Réunion est d'origine volcanique, elle est sortie de mer il y a environ 2 millions d'années lors des éruptions successives de son volcan principal, le Piton des Neiges, qui culmine à ce jour à plus de 3000 m d'altitude.

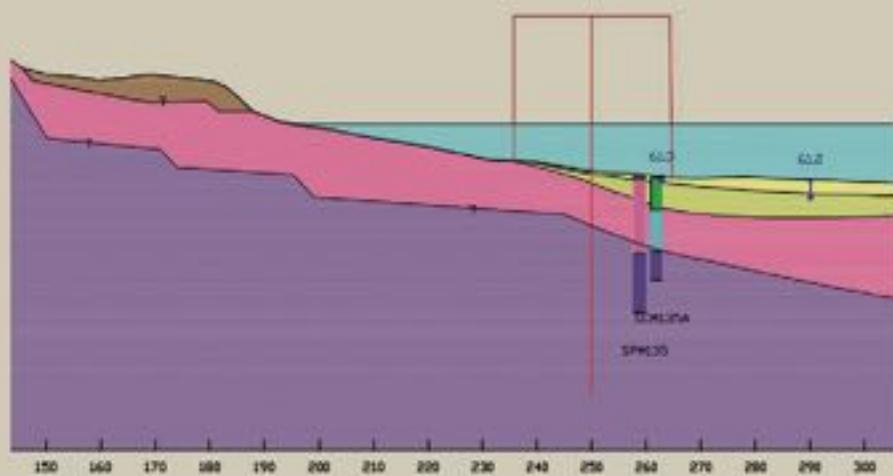
Le cône volcanique du Piton des Neiges plonge dans l'Océan Indien

avec une pente régulière et se termine à l'extrémité Nord-Ouest de l'île par une falaise instable de 100 à 200 m de hauteur, composée de coulées basaltiques intercalées de scories et de niveaux de paléosols, par nature friables.

Cette hétérogénéité est à l'origine des nombreuses instabilités rocheuses et éboulements qui menacent la route actuelle lors des épisodes pluvieux importants.

Le projet est situé en pied de cette falaise, en mer, et dans la zone d'érosion soumise aux houles australes. On retrouve dans l'axe du projet des sols hétérogènes composés de blocs, galets et sables, de compacité et d'épaisseur variables (5 à 20 m en général), recouverts en surface d'une couche de sables lâches de 2 à 5 m d'épaisseur moyenne, régulièrement remaniés par la houle (figure 5). Les reconnaissances géotechniques

EXEMPLE DE PROFIL EN TRAVERS GÉOLOGIQUE ÉTABLI EN PHASE ÉTUDE



5

© EGIS

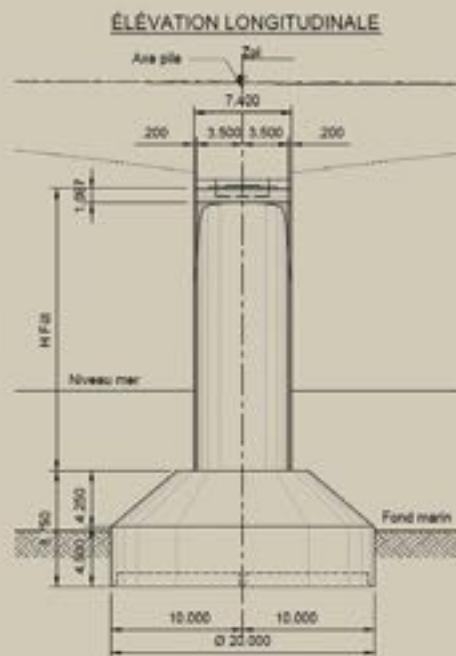
5- Exemple de profil en travers géologique établi en phase étude.

6- Deux types de fondations : fondation sur semelle et fondation sur pieux.

5- Example of geological cross section established in the design phase.

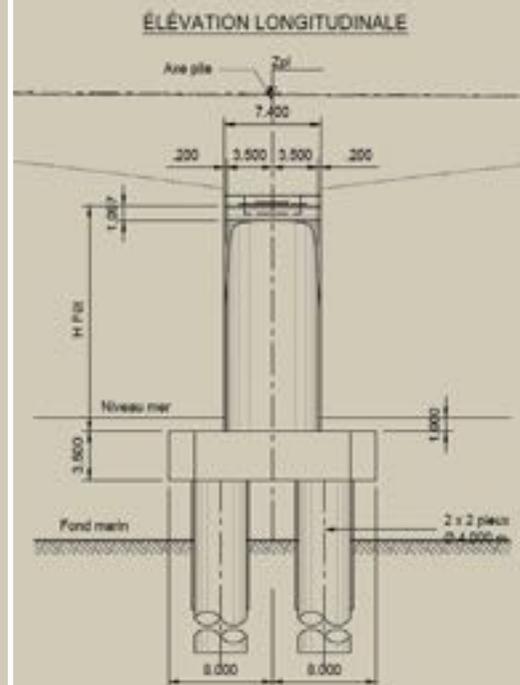
6- Two types of foundations: foundation on foundation slab and foundation on piles.

FONDATION SUR SEMELLE



6a

FONDATION SUR PIEUX



6b

© EGIS

de la zone du viaduc ont été lancées lors des études d'APS au début des années 2000, elles ont nécessité des moyens spécifiques et se sont étalées sur plusieurs années : environ 40 sondages géotechniques carottés ou pressiométriques de 20 à 40 m de profondeur réalisés en mer à l'aide d'une plateforme jack up, et 20 km de reconnaissances géophysiques par sismique réfraction selon la technique de flûte traînée.

Du fait des moyens importants à mobiliser et de la durée des reconnaissances géotechniques en mer, il a été fait le choix de ne pas réaliser de campagne géotechnique complémentaire lors des études : les études AVP/PRO ont donc été menées sur la base des mêmes reconnaissances d'APS.

Pour la conception géotechnique de l'ouvrage, Egis a favorisé une approche géologique (couches superposées de sols de granulométrie et de compacité globalement croissantes avec la profondeur), en attribuant à chaque couche des caractéristiques mécaniques pu-



© EGIS

7- Essais hydrauliques sur modèle réduit en bassin à houle.

8- Atelier de terrassement en mer.

7- Hydraulic tests on scale model in wave basin.

8- Offshore earthworks equipment.

dentés pour le prédimensionnement des futures fondations : les ordres de grandeur de valeurs pressiométriques moyennes sont donnés ci-dessous par type de sol :

- Pour les sables lâches de surface : $E_m \# 5 \text{ MPa} / p_l \# 0,5 \text{ MPa}$;
- Pour les sables et galets compacts à partir de 3 à 6 m de profondeur : $E_m \# 25 \text{ MPa} / p_l = 2,5 \text{ MPa}$;
- Pour les niveaux à blocs et galets compacts plus profonds : $E_m \# 35 \text{ MPa} / p_l \# 4 \text{ MPa}$;

→ Au-delà de 10 à 25 m de profondeur, et localement affleurant : substratum basaltique compact $E_m > 100 \text{ MPa} / p_l > 5 \text{ MPa}$.

Les caractéristiques des sols en place ont ainsi permis de prévoir un procédé de fondation sur semelle enfouie sous le fond marin pour la plupart des 48 appuis courants.

Les descentes de charges importantes au droit de chaque appui (charge verticale en service de l'ordre de 10 000 à 15 000 t par appui, et chargement externes de houle, choc de bateau ou séisme) induisent toutefois des niveaux de contrainte élevés sur le sol de fondation, avec des contraintes de référence de plus de 1 MPa en ELU, et 700 kPa en ELS, et donc la recherche d'un horizon porteur suffisamment résistant : pression limite pressiométrique de l'ordre de 2 à 2,5 MPa, associée à une rigidité suffisante.

Les appuis implantés dans des zones identifiées à risque (pointe rocheuse ou forte incertitude), ou présentant de fortes épaisseurs de sables lâches en surface, ▷



© EGIS



9

© EGIS

ainsi que les piles soumises à des chargements particuliers (piles fixes et piles culées) ont alors fait l'objet d'une conception particulière : utilisation de techniques de fondations profondes sur mégapieux de 4 m de diamètre, ancrées dans le substratum basaltique, ou bien renforcement de sols. À l'issue de l'étape de conception initiale, le PRO prévoyait ainsi pour le viaduc environ 40 % d'appuis fondés sur pieux et 60 % sur semelles superficielles ancrées sous le fond marin (figures 6a et 6b). Le système de fondation est dans les deux cas complété par une protection anti-affouillement en enrochements, qui a été dimensionnée et testée sur modèle physique en cuve à houle (figure 7).

Les semelles de fondation reposent sur une assise granulaire afin de permettre d'avoir un fond de fouille horizontal réglé et un matelas homogène. Une injection de mortier liquide (*grout*) entre la sous-face de la semelle et le dessus de l'assise granulaire permet d'obtenir un contact parfait entre les deux.

SOLUTION DE L'ENTREPRISE

Le groupement d'entreprises Vinci Construction Grands Projets / Bouygues

Travaux Publics / Dodin Campenon Bernard / Demathieu Bard a été attributaire du marché de travaux du viaduc en mer de 5 400 m fin 2013, sur la base d'une solution variée qui concernait en particulier le mode de fondation des appuis :

- Les 48 piles du viaduc sont fondées sur semelle superficielle ;
- Le diamètre des semelles est de 20 m pour les appuis courants, et 23 m pour les appuis fixes et piles-culées, qui sont soumis à des charges particulières ;
- En cas de contexte géotechnique défavorable, une adaptation locale du mode de fondation est possible : approfondissement du niveau de fondation, augmentation du diamètre de la semelle (dans la limite de 23 m), ou amélioration du sol en place par technique de vibrocompactage.

Les deux culées restent, pour leur part, fondées sur pieux traversant la digue et ancrés dans le substratum basaltique. Dans le cadre de son marché de travaux, le groupement d'entreprises a réalisé une campagne de sondages géotechniques complète en vue de confirmer pour chaque appui le dimen-

9- Préfabrication des embases de pile, de diamètre 20 ou 23 m.

9- Préfabrication of pier bases, of diameter 20 or 23 m.

sionnement des fondations : réalisation au droit de chaque appui de 1 sondage carotté, 1 sondage pressiométrique, 5 pénétromètres statiques, ainsi qu'une reconnaissance globale de la zone par géophysique (sismique réflexion). Cette campagne complète, menée sous la supervision du maître d'œuvre, a permis la définition précise d'un modèle géotechnique au droit de chaque appui, ainsi que le dimensionnement de la fondation et des éventuelles adaptations locales.

LES TRAVAUX : ADAPTATION AUX CONDITIONS DU SITE

Les travaux sont effectués dans des conditions naturelles défavorables du fait de leur situation en pleine mer, sur la côte Nord de l'île qui est particuliè-

rement exposée aux houles. Le planning du chantier doit donc intégrer des périodes d'arrêt des travaux en mer en fonction des conditions de houle, et des caractéristiques des matériels utilisés. Par ailleurs, le projet se situe en mer avec des enjeux environnementaux essentiels, présence de mammifères marins (baleines à bosse, dauphins), coraux, avifaune endémique. La protection du milieu naturel est donc un souci quotidien de l'ensemble des intervenants. Cela se traduit lors des travaux par la mise en place de nombreuses dispositions veillant au respect de la faune et de la flore locales : limitation et suivi en permanence des critères de bruit sous-marin vis-à-vis des mammifères marins, des émissions de matières en suspension dans l'eau lors des terrassements, limitation des éclairages en périodes de nidifications des espèces endémiques, monitoring visuel depuis un ULM avant le démarrage des activités dites bruyantes sous l'eau, etc. Sur la base des conclusions de l'étude géotechnique par appui, les travaux de fondation sont réalisés par le groupement et ses sous-traitants spécialisés. Les terrassements des fouilles sont réalisés à l'aide d'un ponton *dipper*.

Cet outil spécifique, constitué d'une pelle Liebherr de 400 t équipée d'un godet de 12 m³, permet de descendre les fouilles jusqu'aux profondeurs maximales de 15 à 16 m sous le niveau de l'océan, soit 5 à 7 m en moyenne sous le fond marin, avec des pentes de 3H/1V (figure 8).

11 piles sur 48 nécessitent une amélioration du sol de fondation par vibrocompactage.

La qualité de l'amélioration est contrôlée sur chaque appui par la réalisation de sondages CPTu effectués à l'aide d'un bâti CPT immergé présent en permanence sur le ponton.

Afin de limiter les aléas liés aux conditions maritimes, les éléments constitutifs du viaduc sont en totalité préfabriqués à terre, puis assemblés en mer lors de leur mise en œuvre (figure 9). Les embases des piles reposent entre 12 et 15 m sous le niveau de la mer, soit entre 3 et 8 m sous le fond de l'océan.

L'embase est adaptée pour chaque appui en fonction des conclusions de l'étude de sol : ajustement du diamètre de la semelle et de la longueur du fût pour respecter le niveau de fondation prescrit. Chacune des 48 embases représente ainsi un poids de 4000 à



10
© EGIS

10- Mise en place des piles en mer par la barge Zourite.

10- Placing piers at sea with the Zourite barge.

4 800 t qui doit être transporté et posé en mer, à l'aide de la barge Zourite spécifiquement conçue à cet effet (figure 10).

CONCLUSION

La question de la sécurisation de la Route du Littoral est ancienne et récurrente. Elle est intrinsèquement liée à la conception et à l'aménagement initial de la route située en pied de falaise. La réalisation d'un nouvel ouvrage hors d'atteinte des plus importants effondrements et des plus fortes houles s'impose.

Le tracé maritime retenu comporte des sections en digue dans les zones où des échangeurs sont à réaliser et où les fonds marins sont peu profonds et des sections en viaduc dans les zones

de plus grande profondeur des fonds marins.

Plongé dans plus de 10 m de profondeur d'eau, le viaduc sera le plus grand pont en mer de France.

Le tablier est en béton précontraint construit par encorbellements successifs et présente une largeur de 29 m adaptable à l'évolution future des modes de transport collectifs.

Les fondations et les appuis sont conçus pour assurer une stabilité garantie dans le temps et sous chocs de bateaux jaugeant jusqu'à 300 tonnes.

Les travaux du viaduc en mer de 5 400 m, attribués au Groupement d'entreprises Vinci Construction Grands Projets / Bouygues Travaux Publics / Dodin Campenon Bernard / Demathieu Bard, ont débuté en 2014 et se poursuivront jusqu'en 2019 avec une mise en service programmée en 2020.

La conception et la réalisation des fondations en mer ont nécessité la mise en place de moyens spécifiques en termes de reconnaissances géotechniques et de techniques de travaux (terrassements en mer, vibrocompactage), dans un milieu naturel qui impose des conditions particulièrement défavorables (houle, chantier en pleine mer). □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PROFIL GÉOPHYSIQUE - FLÛTE TRAÎNÉE : 30 000 m

SONDAGES GÉOTECHNIQUES (CAROTTÉS OU PRESSIOMÉTRIQUES) : 3 000 m

BÉTON : 250 000 m³

ACIERS PASSIFS : 38 000 t

ACIERS DE PRÉCONTRAÎNTE : 9 000 t

AMÉLIORATION DE SOL : 12 000 m²

TERRASSEMENT EN DÉBLAI : 530 000 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Région Réunion

MAÎTRE D'ŒUVRE : Egis

GROUPEMENT D'ENTREPRISES DU MARCHÉ VIADUC : Vinci Construction Grands Projets / Bouygues Travaux Publics / Dodin Campenon-Bernard / Demathieu Bard

SOUS TRAITANT GÉOPHYSIQUE : Fugro

SOUS TRAITANT SONDAGES : Forintech / Negri

SOUS TRAITANT TERRASSEMENTS : Sdi

SOUS TRAITANT AMÉLIORATION DE SOL : Keller Fondations Spéciales

ABSTRACT

VIADUCT ON THE NEW COASTAL ROAD: FOUNDATIONS OF A GIANT OF THE SEAS

G. DANAN, EGIS - RÉMY MATTRAS, EGIS - E. MAUNIER, EGIS - C. OUTTERYCK, EGIS

RN1 (the coastal road), which links the north and west of Reunion Island, is constantly threatened by the elements: cyclonic swells and cliff rock slides. Each complete or partial cutoff considerably slows down activity on the island. The design of a new project unattainable by the biggest land collapses and the largest swells was awarded by the Reunion Region to Egis, which is also performing overall project management. In the centre of this new 12 km offshore route, the viaduct is 5,400 metres long and has 49 spans. The foundation works for each of the 50 supports began in 2014 and will continue until 2019, with commissioning scheduled for 2020. □

VIADUCTO DE LA NUEVA CARRETERA DEL LITORAL: LOS CIMIENTOS DE UN COLOSO DE LOS MARES

G. DANAN, EGIS - RÉMY MATTRAS, EGIS - E. MAUNIER, EGIS - C. OUTTERYCK, EGIS

La RN1 (o Carretera del Litoral), que une el norte y el oeste de la isla de la Reunión, está permanentemente amenazada por varios elementos: oleajes ciclónicos y corrimientos de acantilados. Cada episodio de corte total o parcial ralentiza considerablemente la actividad de la isla. La región de la Reunión ha encargado el diseño de una nueva construcción fuera del alcance de los mayores corrimientos y las más fuertes marejadas a la sociedad Egis, que también se encargará de la dirección global de la operación. En el centro de este nuevo trazado de 12 km en el mar, el viaducto tiene una longitud de 5.400 m y cuenta con 49 luces. Las obras de cimentación de cada uno de los 50 apoyos comenzaron en 2014 y proseguirán hasta 2019, con una puesta en servicio programada para 2020. □



1
© HONG HANH LE

CONSTRUIRE DES SOUTÈNEMENTS EN PIERRE SÈCHE AU XXI^e SIÈCLE

AUTEUR : ANNE-SOPHIE COLAS, INGÉNIEUR-CHERCHEUR, DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, LABORATOIRE SÉCURITÉ ET DURABILITÉ DES OUVRAGES D'ART, IFSTTAR.

RECONNUS POUR LEUR DURABILITÉ ET LEUR ESTHÉTIQUE, LES MURS DE SOUTÈNEMENT EN PIERRE SÈCHE JALONNENT LES ROUTES DE NOMBREUSES RÉGIONS FRANÇAISES. SI LA TECHNIQUE A ÉTÉ ABANDONNÉE AU DÉBUT DU XX^e SIÈCLE, ELLE CONNAÎT AUJOURD'HUI UN REGAIN D'INTÉRÊT DEVANT LA REDÉCOUVERTE DE SES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET ÉCOLOGIQUES. NI PASSÉISTE, NI DÉCORATIVE, LA PIERRE SÈCHE POURRAIT RÉINTÉGRER LE CATALOGUE DES CONSTRUCTIONS CONTEMPORAINES EN PROPOSANT UNE SOLUTION RÉSOLUMENT MODERNE, EN PHASE AVEC LES PRÉCEPTES DE L'ÉCO-CONCEPTION.

INTRODUCTION

La pierre sèche désigne la technique de construction qui consiste à assembler sans aucun liant des blocs bruts ou ébauchés. Elle façonne le paysage de nombreuses régions du monde où l'approvisionnement en pierres est abondant et l'aménagement des terres difficile (figure 2).

1- Mur de soutènement en pierre sèche construit en 2012 à Felletin en Creuse.

2- L'art de la construction à sec.

1- Drystone retaining wall built in 2012 at Felletin in the Creuse region.

2- The art of dry construction.



2

© ANNE-SOPHIE COLAS, IFSTTAR

Cette technique a été massivement utilisée au XIX^e siècle en France, comme dans de nombreux pays d'Europe, pour l'aménagement du territoire dans le domaine de l'agriculture, de l'hydraulique ou des infrastructures de transport. Au début du XX^e siècle, elle a été progressivement remplacée par de nouvelles techniques moins coûteuses en termes de production et de mise en œuvre (béton armé, précontraint, structures métalliques...) et le savoir-faire de la construction à sec s'est perdu à mesure que son emploi

dans les travaux publics diminuait. Si l'intérêt pour cette technique renaît aujourd'hui, c'est que les ouvrages en pierre sèche constituent une part importante des ouvrages existants et que leur gestion est un enjeu prégnant pour les maîtres d'ouvrage. Ils représentent ainsi plus de 20 % des ouvrages de soutènement le long du réseau routier national (figure 3) et sont surreprésentés (plus de 40 %, voir figure 4) parmi les ouvrages classés 3 ou 3U par la méthode IQOA⁽⁸⁾. Ces statistiques s'expliquent par le vieillissement

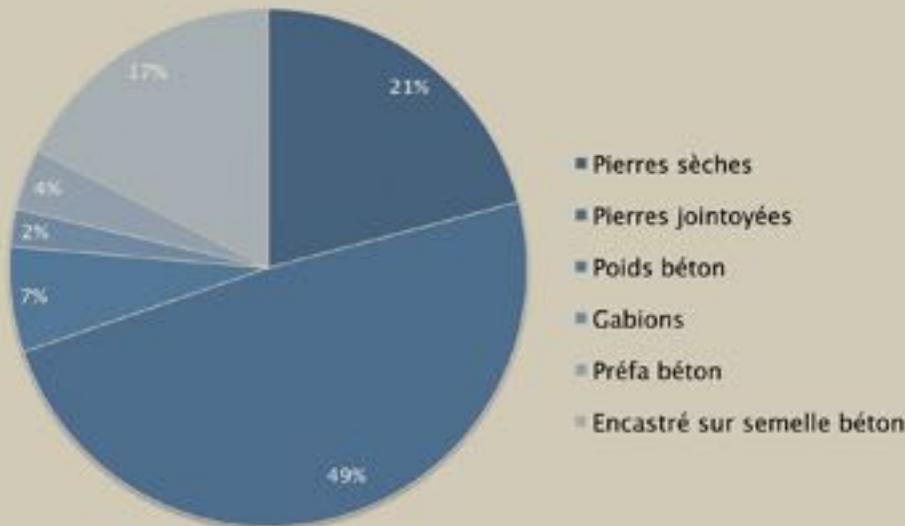
du patrimoine mais aussi par une méconnaissance de ces ouvrages qui peut conduire à des évaluations trop sécuritaires. Les maîtres d'ouvrage se retrouvent ainsi confrontés à des difficultés pour poser un diagnostic fiable et donc pour définir les priorités d'intervention à l'échelle de leur patrimoine. Mais le regain d'intérêt pour la pierre sèche peut aussi s'expliquer par la redécouverte d'une technique locale, sobre en énergie et donc performante dans le cadre du développement durable. La construction à sec présente

en outre des qualités de drainage qui en font un excellent matériau pour le soutènement routier. L'absence de liant et la présence de pierres de tout calibre constituent en effet un filtre naturel qui permet de réguler l'écoulement des eaux sur toute la structure et ainsi de diminuer les effets de la pression hydrostatique. Les constructions en pierre sèche présentent également une souplesse qui leur permet de se déformer fortement sans rompre et, lorsqu'elles viennent à céder, ce n'est généralement que sur une faible portion. Elle offre ainsi une solution intéressante pour un gestionnaire désireux d'investir dans une structure robuste, durable et ancrée dans son territoire.

L'ÉTAT DES RECHERCHES SUR LE COMPORTEMENT DES MURS EN PIERRE SÈCHE

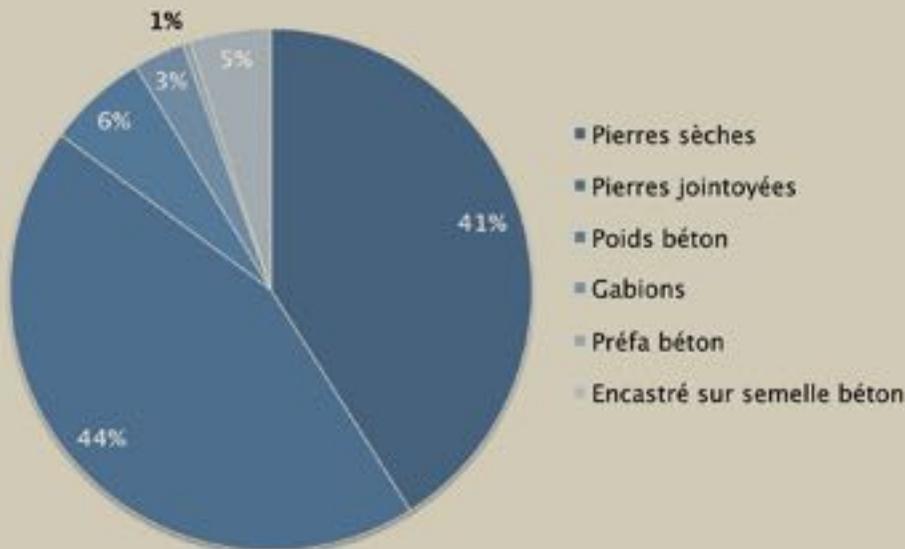
L'expansion de la pierre sèche se heurte toutefois au manque de cadre scientifique, normatif et assurantiel. Depuis la fin des années 90, des programmes de recherches ont été initiés par l'ENTPE, rejoints ensuite par l'ENPC puis l'Ifsttar, afin de mieux comprendre le comportement des murs de soutènement en pierre sèche. Ce sujet représente un vrai défi pour la modélisation. La pierre sèche est composée de pierres brutes ou ébauchées, de tout calibre, qui sont ensuite assemblées grâce au savoir-faire du maçon, rendant à l'ensemble de la construction un aspect régulier ; elle se place ainsi à la frontière entre les matériaux aléatoires et périodiques. De plus, le type de pierre et l'appareillage utilisés sont très variés, reflet du caractère vernaculaire de la technique. ▷

RÉPARTITION DES MURS DE SOUTÈNEMENT DU RÉSEAU ROUTIER NATIONAL PAR TYPES



3

RÉPARTITION DES MURS DE SOUTÈNEMENT 3 ET 3U DU RÉSEAU ROUTIER NATIONAL PAR TYPES



4

3- Répartition des murs de soutènement du réseau routier national par types.

4- Répartition des murs de soutènement 3 et 3U du réseau routier national par types.

3- Breakdown of retaining walls on the national road network by type.

4- Breakdown of 3 and 3U retaining walls on the national road network by type.

Étant entendu qu'il n'est pas envisageable de reproduire la forte hétérogénéité de la pierre sèche dans une modélisation, le modèle exposé ici représente la pierre sèche comme un ensemble de blocs réguliers assemblés en quinconce. Si cette hypothèse éloigne de la réalité, elle est nécessaire pour mener des calculs simples et rapides.

Les calculs sont conduits sous le formalisme du calcul à la rupture, qui permet, connaissant la géométrie, le mode de chargement et le critère de résistance du matériau constitutif de prédire la charge limite supportable par la structure.

Cette méthode a permis d'établir une formule analytique permettant le calcul d'un mur de soutènement en pierre sèche à partir de :

- La géométrie du mur (hauteur, largeur et fruit des parements) ;
- Le poids propre du mur et du sol (vides compris) ;
- La cohésion et l'angle de frottement du sol ainsi que l'angle de frottement des blocs de pierre.

Ce modèle analytique a été validé sur trois campagnes expérimentales :

- En 2002-2003, dans le cadre de la thèse de Boris Villemus^[11], par des essais sous chargement hydrostatique pour mieux comprendre le comportement du mur seul (figure 5) ;
- En 2007-2008, dans le cadre de la thèse d'Anne-Sophie Colas^[3], par des essais sous chargement de gravier pour mieux comprendre le comportement du mur de soutènement (figure 6) ;
- En 2011-2013, dans le cadre de la thèse d'Hong Hanh Le^[4], par des essais sous chargement ponctuel, pour mieux comprendre le comportement du mur sous charge d'exploitation (figure 7).

Des murs en pierre sèche de 2 à 4 m de hauteur ont ainsi été construits dans le Vaucluse et en Lozère par des artisans maçons professionnels issus des associations *Murailleurs de Provence et Artisans bâtisseurs en pierre sèche* (ABPS) et testés jusqu'à la rupture. Ces essais ont permis de démontrer la pertinence du modèle développé et ont ainsi ouvert la voie à son application pour les prescriptions de dimensionnement de murs neufs en maçonnerie. Ils ont aussi permis d'obtenir des ordres de grandeur sur les caractéristiques physiques de ces ouvrages (pourcentage de vide, angle de frottement), nécessaires aux calculs.



© JEAN-CLAUDE MOREL, UNIV COVENTRY

5

Pour pérenniser cette activité expérimentale, une plate-forme d'essai (figure 8) a été aménagée sur le site de l'École de la pierre sèche à Ventalon-en-Cévennes (Lozère). Cette plate-forme, construite dans le cadre du projet Laubamac du contrat plan interrégional du Massif Central, permettra de disposer d'un espace dédié à l'expérimentation sur des murs en pierre sèche à l'échelle 1. La première campagne d'essai sera réalisée dans le cadre de la thèse de Benjamin Terrade^[10].

RÈGLES PROFESSIONNELLES DE LA PIERRE SÈCHE ET CQP

Sur la base du modèle développé, des abaques de dimensionnement de murs de soutènement en pierre sèche ont été réalisés.

Une première version a été intégrée au *Guide de bonnes pratiques des murs de soutènement en pierre sèche*^[2], paru en 2008.

Ce guide est le premier ouvrage national de référence technique pour la construction de murs de soutènement.

5- Préparation de l'essai sur un mur de schiste de 4 m de hauteur chargé par pression hydrostatique dans le cadre de la thèse de Boris Villemus en 2003.

6- Chute d'un mur en calcaire de 2,5 m de hauteur chargé par un remblai de gravier dans le cadre de la thèse d'Anne-Sophie Colas en 2008.



6

© BRUNO DURAND, ABPS

5- Test preparation on a schist wall 4 metres high loaded by hydrostatic pressure as part of Boris Villemus' 2003 thesis.

6- Fall of a limestone wall 2.5 m high loaded by gravel backfill as part of Anne-Sophie Colas' thesis in 2008.



© JOACHIM BLANC-GONNET, ENTPE

7

7- Essai sur un mur en calcaire de 2,3 m de hauteur chargé par une force ponctuelle exercée sur le remblai dans le cadre de la thèse d'Hong Hanh Le.

8- Plateforme expérimentale de l'École de la pierre sèche à Ventalon-en-Cévennes en Lozère.

7- Test on a limestone wall 2.3 m high loaded by a localised force exerted on the backfill as part of Hong Hanh Le's thesis.

8- Experimental platform of the drystone school at Ventalon-en-Cévennes, Lozère region.

Il expose les principes de construction à sec et propose une aide au dimensionnement grâce aux abaques. Une nouvelle version des abaques, basée sur les développements du modèle, sera intégrée dans les règles professionnelles *Techniques de construction des murs en pierre sèche*^[1].

Ces règles professionnelles ont été validées, avec suivi d'un retour d'expérience, par la Commission prévention produits mis en œuvre de l'Agence qualité construction en 2016. L'édition de règles professionnelles permet de formaliser le cadre de la construction en pierre sèche et peut constituer une première étape vers un DTU.

Le savoir-faire de la construction en pierre sèche est par ailleurs reconnu et validé par deux certificats de qualification professionnelle (CQP) *Ouvrier professionnel en pierre sèche et Compagnon professionnel en pierre sèche* de la branche du bâtiment et des travaux publics.

ANALYSE DE CYCLE DE VIE

C'est dans ce contexte qu'en 2012, la mairie de Felletin (Creuse) a choisi de construire un mur de soutènement neuf en granite maçonné à sec pour soutenir la route communale de la Croix de Moreau (figure 1).

Le recours à la pierre sèche dans la construction de ce mur confère à ce chantier un caractère exceptionnel.

Le choix de cette technique s'est pourtant imposé puisqu'elle satisfaisait pleinement aux exigences et aux opportunités du chantier : proposer une solution esthétique dans cette cité du bâtiment et des savoir-faire, tout en réutilisant des pierres issues de la déconstruction d'un bâtiment à proximité (figures 9).

La construction du mur a mobilisé entre 9 et 14 artisans et ouvriers (figures 10). ▷



© CATHIE O'NEILL, ABPS

8



9

© JOACHIM BLANC-GONNET, ENTPE

9- Stockage des pierres de granite issues de la démolition de bâtiment et réutilisées dans la construction du mur de Felletin en Creuse.

10- Construction du mur en pierre sèche de Felletin en Creuse.

9- Storage of granite stones from building demolition recycled for construction of the Felletin wall in the Creuse region.

10- Construction of the Felletin dry stone wall in the Creuse region.

Le mur s'étend sur 50 m de longueur et 3 m de hauteur.

Le coût total des travaux, terrassement et réfection de la chaussée compris, s'élève à 125 000 €, dont 70 % ont été financés par des subventions de l'État, de la région et du département. Ce chantier a été l'occasion d'appro-

fondir les connaissances sur la pierre sèche puisqu'il a fourni les données nécessaires à une analyse de cycle de vie de vie (ACV). L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée [5], [6], [7] qui permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service.

Les impacts environnementaux et les consommations de ressources associés aux travaux ont été évalués et comparés à ceux de deux solutions alternatives^[9] : un mur en béton armé encastré sur semelle et mur poids en béton (figure 11). La structure en pierre sèche présente les valeurs les

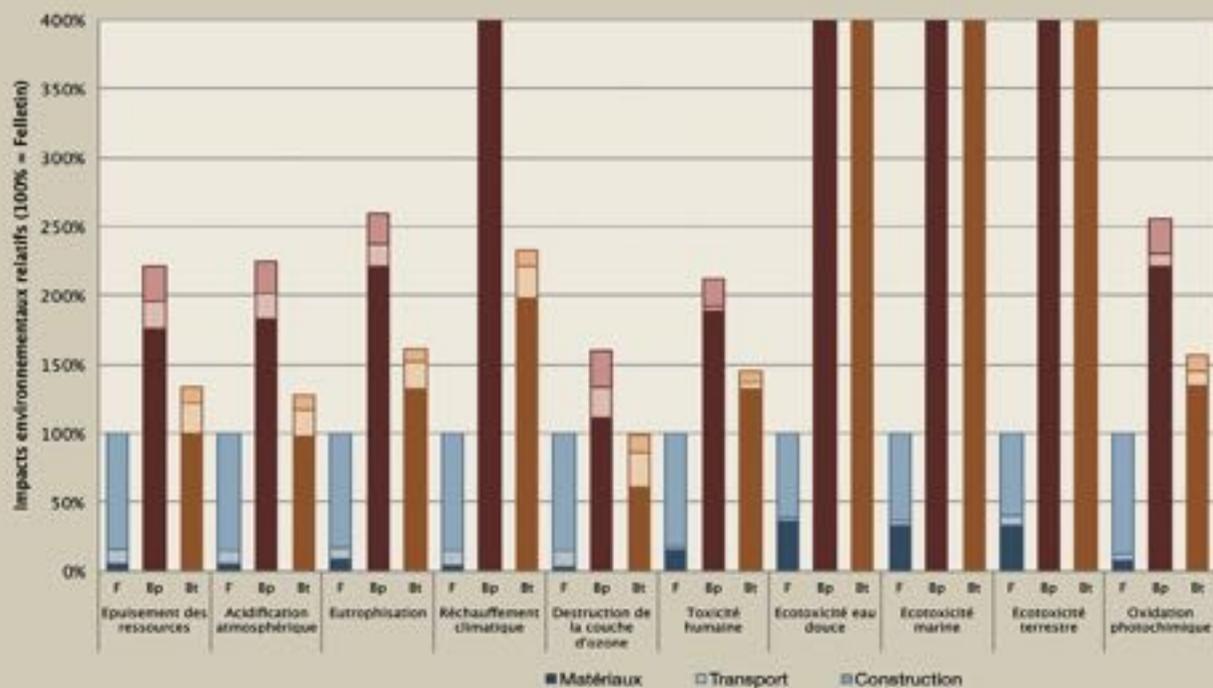
plus faibles sur l'ensemble des impacts calculés, et plus particulièrement sur le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources, indicateurs essentiels dans le cadre des études d'infrastructures.

On peut remarquer en outre que c'est la part de la phase de construction



10

© JOACHIM BLANC-GONNET, ENTPE



qui est largement prépondérante sur les autres phases. Cette répartition est caractéristique du projet puisque la phase de production des matériaux est généralement dominante dans les projets de génie civil, comme l'illustrent les résultats des deux solutions de mur en béton. La contribution relative de la production des matériaux est très faible, en raison de la réutilisation de pierres, ne nécessitant ainsi aucune extraction nouvelle.

VERS DE NOUVEAUX OUVRAGES EN PIERRE SÈCHE

La pierre sèche propose donc une solution sobre, efficace et esthétique, particulièrement adaptée aux objectifs définis par la loi de transition énergétique, tant sur le réemploi optimal des produits de construction que sur la

11- Impacts environnementaux de la construction du mur en pierre sèche de Felletin en Creuse et comparaison avec deux solutions alternatives : mur poids béton et mur encasté sur semelle en béton armé.

11- Environmental impacts of construction of the Felletin dry stone wall in the Creuse region and comparison with two alternative solutions: concrete gravity wall and wall embedded on reinforced concrete foundation slab.

promotion d'une écologie territoriale. Ces dernières années ont vu se développer conjointement la professionnalisation de la construction, via la création du système de qualification, et le développement de modèles de calcul dédiés, reconnus par l'adoption de règles professionnelles.

La pierre sèche dispose donc de tous les outils pour faire son entrée de plain-pied dans le XXI^e siècle ; elle doit maintenant réussir son passage du savoir-faire au faire savoir. □

RÉFÉRENCES

- [1] Abps, Entpe, Enpc, Ifsttar. Technique de construction des murs en pierre sèche. Règles professionnelles, à paraître.
- [2] Capeb. Guide des bonnes pratiques de construction de murs de soutènement en pierre sèche. Entpe, Vaux-en-Wein, 2008.
- [3] A.-S. Colas. Mécanique des murs de soutènement en pierre sèche : modélisation par le calcul à la rupture

et expérimentation échelle 1. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon-Entpe, 2009.

- [4] H. H. Le. Stabilité des murs de soutènement routiers en pierre sèche : modélisation 3D par le calcul à la rupture et expérimentation échelle 1. Thèse de doctorat, Entpe, 2013.
- [5] NF EN ISO 14040. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. Afnor, Saint-Denis La Plaine, 2006.
- [6] NF EN ISO 14044. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices. Afnor, Saint-Denis La Plaine, 2006.
- [7] NF EN 15804. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction. Afnor, Saint-Denis La Plaine, 2014.
- [8] Setra. IQOA murs - Campagne d'évaluation 2010 - Dossier national. Sétra, Bagneux, 2011.
- [9] Y. Tardivel, A.-S. Colas. Réalisation d'un mur de soutènement routier en pierres de granit issues de la déconstruction de bâtiments d'habitation à Felletin (23). GC'15, Cachan, 18-19 mars 2015.
- [10] B. Terrade. Évaluation structurale des murs en maçonnerie. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2017.
- [11] B. Villemus. Étude des murs de soutènement en maçonnerie de pierres sèches. Thèse de doctorat, INSA de Lyon-Entpe, 2004.

ABSTRACT

CONSTRUCTING DRystone RETAINING STRUCTURES IN THE 21ST CENTURY

ANNE-SOPHIE COLAS, IFSTTAR

Drystone retaining walls exist in numerous regions in France and throughout the world. Once abandoned, in recent years they have aroused renewed interest due to the rediscovery of their mechanical and ecological properties. Research programmes have given a better understanding of the mechanical functioning of these structures and highlighted their ecological properties. Accordingly, dry stone could be included in the contemporary construction catalogue again by proposing a thoroughly modern solution, in line with eco-design precepts. □

CONSTRUIR MUROS DE CONTENCIÓN DE PIEDRA SECA EN EL SIGLO XXI

ANNE-SOPHIE COLAS, IFSTTAR

Existen muros de contención de piedra seca en numerosas regiones de Francia, así como en el resto del mundo. Descartados durante un tiempo, desde hace algunos años suscitan un renovado interés ante el redescubrimiento de sus prestaciones mecánicas y ecológicas. Algunos programas de investigación han permitido comprender mejor el funcionamiento mecánico de estas construcciones y han puesto de manifiesto sus ventajas ecológicas. Así, la piedra seca podría reintegrarse en el catálogo de construcciones contemporáneas, en tanto que ofrece una solución decididamente moderna, en línea con los preceptos del eco-diseño. □

RÉHABILITATION DE LA CAVE SAINT JEAN À ROQUEFORT-SUR-SOULZON

AUTEUR : LAURENT VIGUIER, CHEF DE SECTEUR, GTS OCCITANIE

UNE SOLUTION TECHNIQUE SUR-MESURE APPORTÉE PAR GTS A PERMIS DE CONSERVER LA CAVE SAINT JEAN À ROQUEFORT-SUR-SOULZON EN AVEYRON FORTEMENT ENDOMMAGÉE SUITE À UN IMPORTANT GLISSEMENT DE LA CHAUSSÉE. DANS CE CONTEXTE, LA SOCIÉTÉ ROQUEFORT (FROMAGE ROQUEFORT) A FAIT APPEL À GTS POUR L'ÉTUDE DE MISE EN SÉCURITÉ DES CINQ NIVEAUX DE SOUS-SOL AFIN DE PROCÉDER PAR LA SUITE AUX TRAVAUX DE RÉHABILITATION. GRÂCE À SON SAVOIR-FAIRE MULTITECHNIQUE, L'ENTREPRISE GÉOTECHNIQUE A RÉALISÉ CES TRAVAUX EN URGENCE EN CONSERVANT L'ASPECT D'ORIGINE DE LA CAVE.

FACE À L'EFFONDREMENT D'UNE CAVE

Vendredi 1^{er} juillet 2016, à l'heure du déjeuner, cinq étages de la cave Saint Jean à Roquefort-sur-Soulzon (12), appartenant à la société des caves Roquefort se sont effondrés.

Une grande partie de la chaussée s'est alors décrochée suite à cet effondrement (figure 1).

Depuis, la route départementale, principale artère de la commune, est fermée à la circulation.

SÉCURISATION EN URGENCE

Dans ce contexte, le maître d'ouvrage a fait de suite appel à Gts pour l'étude de mise en sécurité du site afin de procéder par la suite aux travaux de réhabilitation des caves. Il s'agit d'un projet en conception-réalisation.

C'est ainsi qu'après plusieurs visites du site entre le 13/07/2016 et le 20/07/2016, et une phase études de conception qui s'est achevée le 26/07/2016, une première approche technique et financière a été présentée au client le 29/07/2016.

À cette même date, était lancée la mise en place d'un dispositif de suivi de la façade du bâtiment concerné (cibles et borne de centrage) avec une préconisation de relevé à fréquence hebdomadaire, voire deux fois par semaine.

Cette approche prenait en compte deux possibilités avec, d'une part, le confortement et la réparation de la cave Saint Jean sans toucher au bâtiment existant et, d'autre part, la démolition de tout le bâtiment préalablement à la reconstruction de la cave.



1 © GTS

VERS UNE SOLUTION SUR-MESURE

L'apport technique et la valeur ajoutée liée à la culture multimétier de Gts a permis de trouver une solution, préservant le patrimoine immobilier de l'existant en ne démolissant pas le bâtiment mais en pérennisant les installations locales en remettant la cave Saint Jean dans son aspect originel.

Une fois le principe retenu par le client de ne pas démolir le bâtiment et de reconstruire tout en préservant l'exis-

1- Vue de la chaussée au-dessus de la cave Saint Jean.

1- View of the pavement above the Saint Jean cellar.

tant, s'est ouverte une période de mise au point technique et de validation du phasage par les différents donneurs d'ordres et notamment les groupes d'experts auprès des assurances.

Gts reçoit la commande définitive des travaux la 3^e semaine d'août 2016, soit moins de deux mois après l'accident.

On notera, là, l'efficacité du principe de conception-réalisation, dans une procédure dite à caractère d'urgence et sur des ouvrages dits à haute technicité.

UNE ÉTUDE COUSUE MAIN

Sur ce site très touristique, l'intervention a été délicate pour plusieurs raisons. Les phases d'intervention ont été soigneusement préparées en tenant compte de l'exiguïté autour du bâtiment et à l'intérieur de celui-ci, qu'il a fallu sécuriser avant toute intervention humaine. L'équipe du chantier a pu installer sa base en plein cœur de la ville à proximité de la zone à traiter.

LES CONTRAINTES DU SITE

Roquefort-sur-Soulzon est située sur une zone d'éboulis en contrebas du massif calcaire du Combalou (782 m d'altitude). C'est l'effondrement du versant Nord de ce massif qui est à l'origine des premières grottes naturelles qui ont été utilisées pour le stockage des fromages. Ces dernières étaient parfaitement ventilées par des fleurines, failles naturelles, créées également par

l'effondrement et assurant ainsi une « climatisation » naturelle du lieu de conservation des fromages.

Elles ont, dans le temps, été aménagées en maçonnerie de pierre pour servir par la suite d'assises à des bâtiments à usage de bureaux ou d'habitations.

Roquefort-sur-Soulzon offre donc cette particularité d'être une commune avec des rues exiguës sous lesquelles se

trouve un réseau souterrain de caves et de galeries de liaison maillant l'ensemble de la commune.

Ajouté à cela, pour compléter l'inventaire des contraintes, c'est une destination touristique et un site de production mondialement connus.

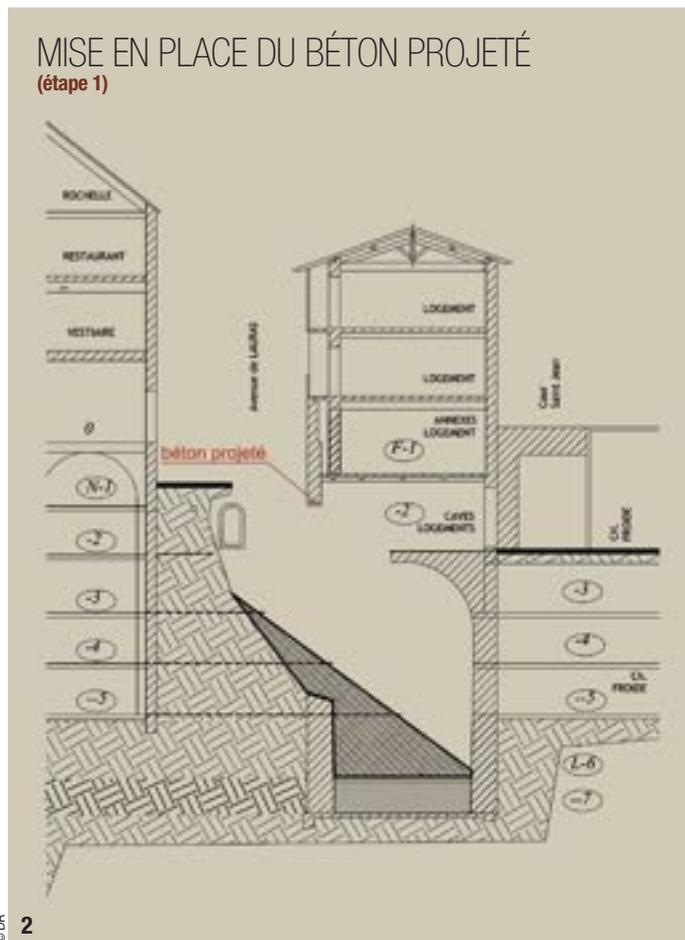
LES CONTRAINTES LIÉES AU BÂTIMENT

Les fondations du bâtiment (R+3) ayant été fortement endommagées, toute intervention humaine à proximité du bâtiment ou dans celui-ci était exclue. Il s'agissait, dans un premier temps, de sécuriser le bâtiment afin que le personnel sur site travaille en toute sécurité. Une surveillance du bâtiment selon la méthode observationnelle est réalisée 2 fois par semaine.

SOLUTION TECHNIQUE OSÉE MAIS PARFAITEMENT ADAPTÉE

La solution technique proposée par Gts, tenant compte de l'ensemble de ces contraintes était dans un premier temps de sécuriser le site en projetant à l'aide d'un robot de projection fixée sur une pelle à chenille équipée d'un long bras, un béton projeté type C30/37 pour bloquer notamment les maçonneries qui s'étaient déliées du fait de l'effondrement. Cela permettait aussi d'assurer plus globalement une cohésion des zones de maçonnerie mises à nues (figures 2, 3 et 4).

MISE EN PLACE DU BÉTON PROJETÉ (étape 1)



2- Mise en place du béton projeté (étape 1).

3 & 4- Toute intervention humaine étant exclue, c'est le robot de béton projeté conçu par Gts qui a été utilisé dans la cave.

2- Shotcrete placing (stage 1).

3 & 4- Since any human operation is ruled out, it is the shotcreting robot designed by Gts that was used in the cellar.

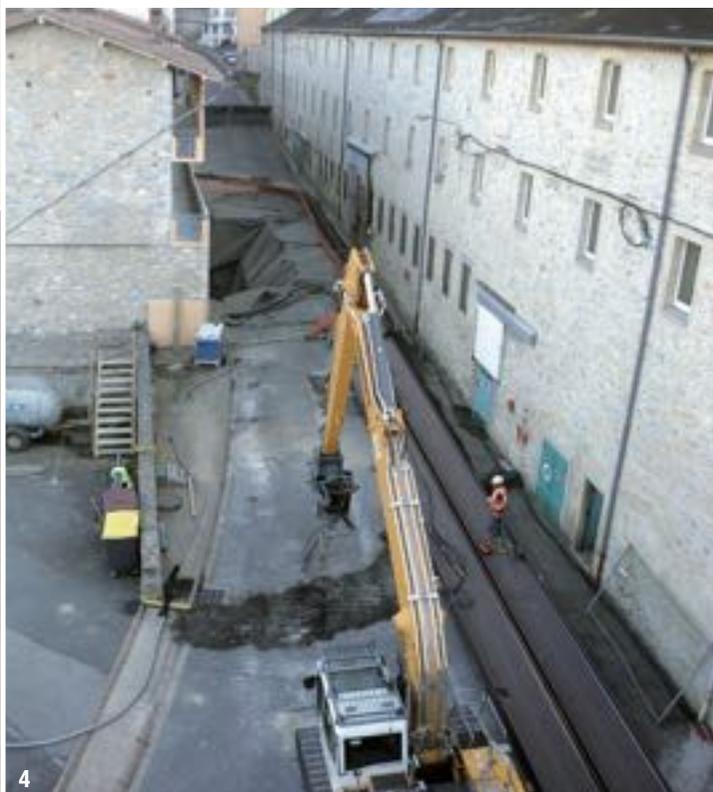
© DR

2



3

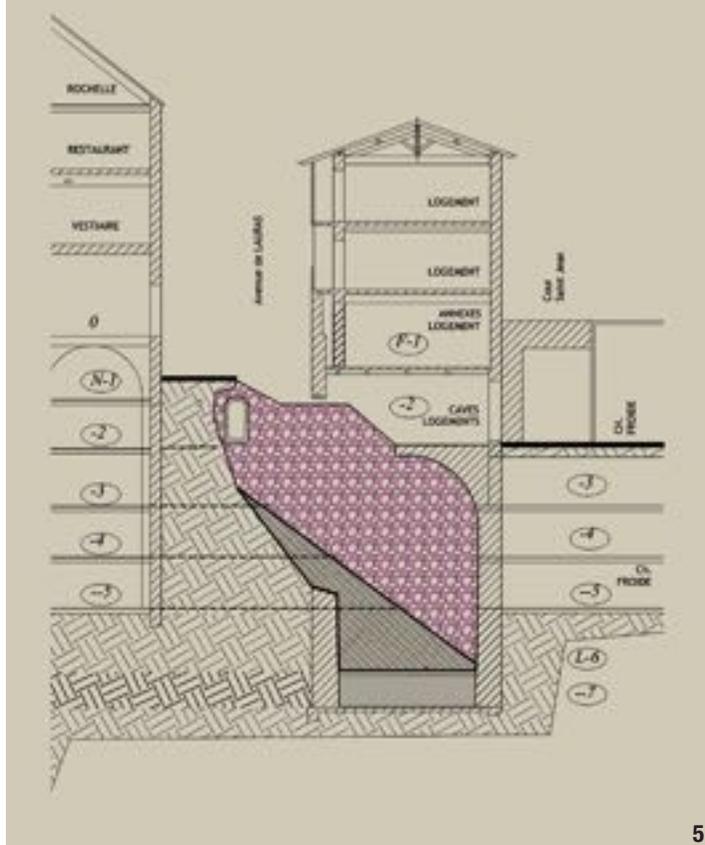
© GTS



4

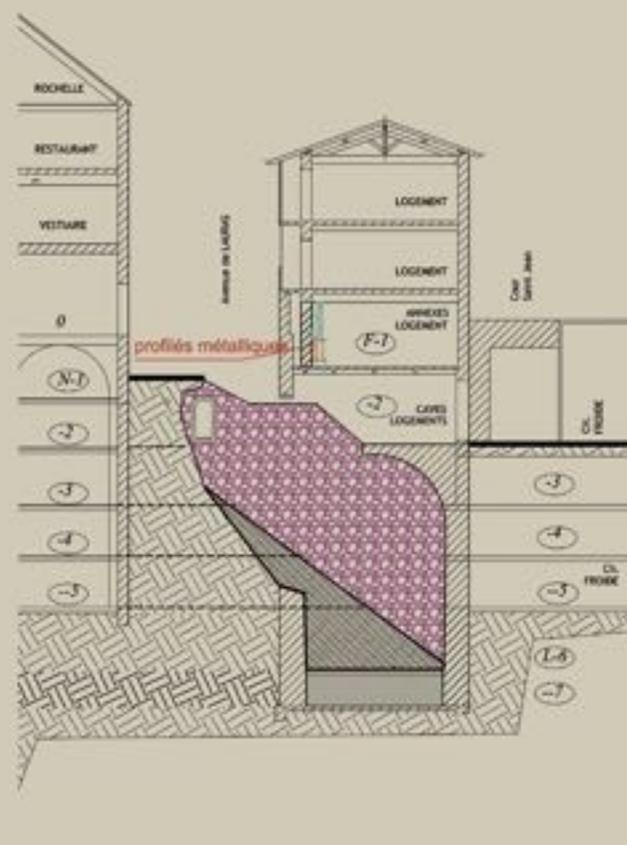
© GTS

COMBLEMENT DE LA CAVE AVEC DU GRAVIER (étape 2)



5

MISE EN PLACE DES PROFILS MÉTALLIQUES TYPE HEA 1000



6

Par la suite, et avant toute opération dans le bâtiment, l'ensemble du volume restant de la cave Saint Jean a été comblé avec de la gravette 6/10, qui a été transportée à l'intérieur par convoyeur et par le robot de projection pour aller claver le matériau sous les voûtes de la cave (figure 5).

Cette première phase de travaux permettait ainsi de stabiliser provisoirement le bâtiment afin de pouvoir envisager des travaux sur la structure de ce dernier, en toute sécurité pour les compagnons et pour les tiers.

Pour le confortement du bâtiment R+3, lui-même, les ingénieurs d'études de Gts ont envisagé d'avoir recours à des techniques « d'ouvragiste » utilisées pour lancer les travées sur les ouvrages d'art.

Le principe constructif pour reprendre les charges de la façade et éviter ainsi tout risque ultérieur d'effondrement, était de mettre en place, à l'intérieur du bâtiment, deux poutres en HEA 1000 d'une portée équivalente à la longueur du bâtiment (24 m) et ce afin qu'elles prennent appui sur des culées provisoires reconstituées sur les pignons du bâtiment. Pour cela, des ouvertures

5- Comblement de la cave avec du gravier (étape 2).

6- Mise en place des profilés métalliques type HEA 1000.

7- Phase délicate du lancement des poutres.

5- Filling the cellar with fine gravel (stage 2).

6- Placing HEA 1000 type steel sections in position.

7- Tricky phase of beam launching.

adaptées ont été créés sur les pignons et un outillage spécifique pour le lancement des poutres a été positionné en extérieur. Les poutres ont été équipées d'un avant- bec et ont été lancées depuis les tours et appuis glissants



7



© S. FERNANDEZ
8

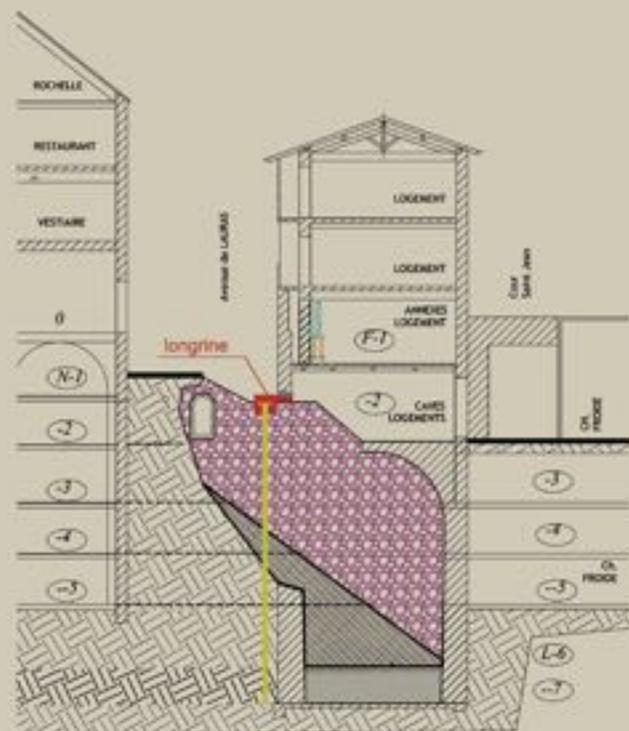


9
© GTS



© GTS
10

RÉALISATION, POUR LA REPRIS EN SOUS-CŒUVRE DE LA FAÇADE, D'UN RIDEAU DE MICROPIEUX DE 20 M DE PROFONDEUR ET D'UNE POUTRE DE TÊTE DES MICROPIEUX



© DR
11

8- Recours à des techniques du génie civil pour le lançage des poutres sur la longueur du bâtiment, soit 24 m.

9- Vérins et étais positionnés sur les deux poutres pour la reprise de charge du bâtiment.

10- Réalisation des micropieux en site exigu.

11- Réalisation, pour la reprise en sous-cœuvre de la façade, d'un rideau de micropieux de 20 m de profondeur et d'une poutre de tête des micropieux.

8- Use of civil engineering techniques for launching beams over the length of the building, i.e. 24 m.

9- Jacks and props positioned on the two beams for absorbing the building's load.

10- Execution of micropiles on a cramped site.

11- For underpinning of the facade, execution of a micropile curtain 20 metres deep, and a micropile capping beam.

situés à l'extérieur à l'aide d'une grue de 160 t et d'un treuil hydraulique thermique (figures 6, 7 et 8).

Une fois ces poutres mises en place et bloquées, une série de vérins et d'étais a été positionnée sur ces dernières pour assurer la reprise de charge de la façade (figure 9). Une précontrainte de quelques millimètres a été donnée aux deux poutres pour éviter des déplacements lors de la mise en charge. Le phasage des travaux de reconstruction développé par la suite pouvait ainsi se dérouler en toute sécurité, tenant compte de toute manière d'une continuité de la surveillance du bâtiment par méthode observationnelle.

PHASE TRAVAUX POUR LA RECONSTRUCTION DE LA CAVE SAINT JEAN

Une fois le bâtiment mis en sécurité, l'équipe du chantier a mis en œuvre un phasage très précis faisant appel aux techniques de confortement, de soutènement et d'injection. Toujours dans un souci de conserver l'aspect d'origine de la cave, l'entreprise géotechnique a su adapter les méthodes, le matériel et les machines comme le robot de projection, conçu en interne, l'aspiratrice du gravier, le lorry pour la manutention, etc.

LES DIFFÉRENTES PHASES TRAVAUX

1- Réalisation d'un rideau de micropieux en méthode Odex avec tubage perdu, de 20 m de profondeur, et de diamètre 250 mm, tous les 40 cm (foreuse Gts de 20 t). Le but de ce rideau de micropieux, ainsi réalisé, est de permettre une excavation sécurisée coté intérieur du bâtiment pour travailler en mode berlinoise et descendre passe par passe les niveaux inférieurs du bâtiment et de la cave Saint Jean (figure 10).



12 © GTS

12- L'aspiratrice à graviers est située sur la route, une ouverture a été laissée pour passer la gaine.

13- Le mur et la voûte de la cave sont reconstitués lors du terrassement aux niveaux -5 et -7.

12- The gravel suction device is located on the road, and an opening has been left for passing the duct.

13- The cellar wall and roof are restored during earthworks at levels -5 and -7.

2- Réalisation d'une poutre de tête des micropieux pour la reprise en sous-œuvre de la façade du bâtiment avec liaison structurelle des micropieux et de la maçonnerie existante par la mise en place de racinaux en HEM 140 (figure 11).

3- L'excavation du gravier à l'intérieur s'est déroulée par passes grâce à une aspiratrice située sur la route départementale. Une ouverture avait été laissée pour faire rentrer la gaine d'aspiration. Cette phase s'est déroulée en descendant la berlinoise (béton projeté armé de deux nappes de treillis soudé) tout en reconstituant au fur et à mesure la poutraison de plancher bas RDC des différents niveaux de la cave Saint Jean. Les murs de la cave ont été butonnés à l'avancement de la descente de la berlinoise. Des injections en régénération de la maçonnerie ont été réalisées à la descente pour renforcer la structure de la cave, l'ensemble de murs en maçonnerie ayant été recouvert d'un béton projeté fibré (figure 12).

4- Reconstitution du mur et de la voûte de la cave en béton armé, dès que l'assise du mur existant est retrouvé au niveau -7 fond de cave. La technique de coffrage grimpeur a été prescrite pour la réalisation du voile banché en lieu et place du mur en maçonnerie effondré (figures 13, 14 et 15).

des opérations à effectuer. En ce sens les équipes de Gts, en respect de la culture multimétier, sont formées avec un esprit de polyvalence. Aux projeteurs ont suivis les foreurs, relayés par les génie-civilistes, pour former au global

une équipe d'environ 10 à 12 personnes qui ont travaillé en postes de 2x8h afin de respecter les délais de réalisation de ces ouvrages.

Les moyens matériels ont également fait preuve de particularité, puisque,

outre les matériels classiques dans les travaux spéciaux, à savoir :

- Une foreuse 20 t ;
- Un robot de projection développé par le service R&D de Gts ;
- Une projeteuse Aliva ;
- Deux compresseurs (25 000 et 17 000 l/mn) ;
- Un silo de stockage du mélange sec ;
- Une centrale d'injection ;
- Des tours d'étalement, banches, etc.

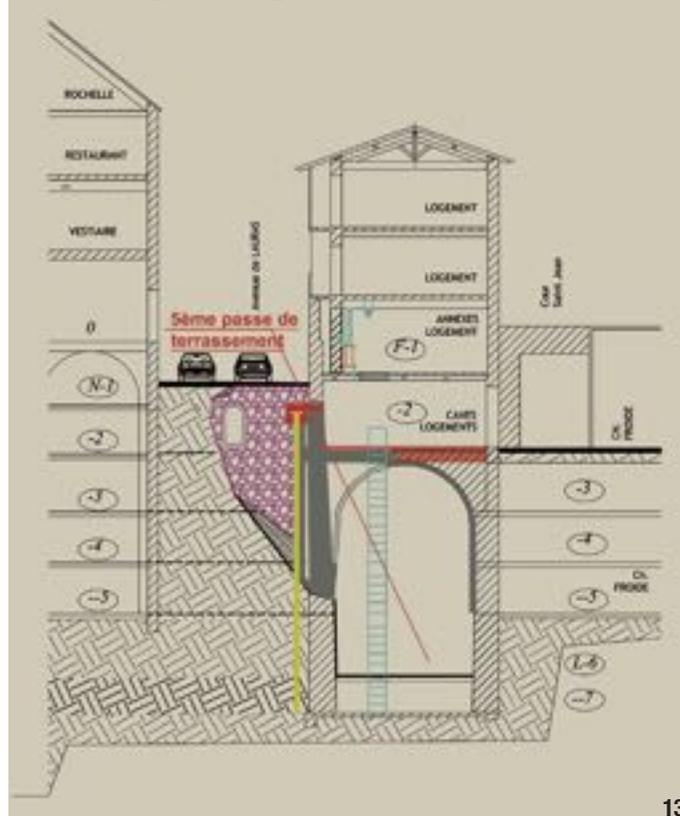
il a fallu concevoir et fabriquer des outils de manutention adaptés, comme un lorry sur une voie pour reprendre les charges évacuées depuis les niveaux inférieurs (à l'aide d'un treuil), ou comme des tours avec rouleaux pour permettre la mise en place des poutres métalliques.

Ces moyens, associés à la capacité de Gts à s'adapter aux contraintes du client, ont permis de tenir des délais de réalisation particulièrement tendus. Ils ont d'entrée été tendus, en phase conception.

La réactivité de Gts sur ce dossier démontre la compétence pluridisciplinaire de ses équipes.

À noter que l'organisation et la mise en place du planning devait tenir compte des contraintes d'approvisionnement de la cave qui se situe de l'autre côté de la route départementale en face de la cave Saint Jean. Pour le reste, une fois le bâtiment sécurisé, l'exploitation du planning par passes à l'intérieur du bâtiment n'avait plus pour aléa que l'altimétrie à laquelle l'assise du mur existant allait être trouvée lors des opérations d'excavation.

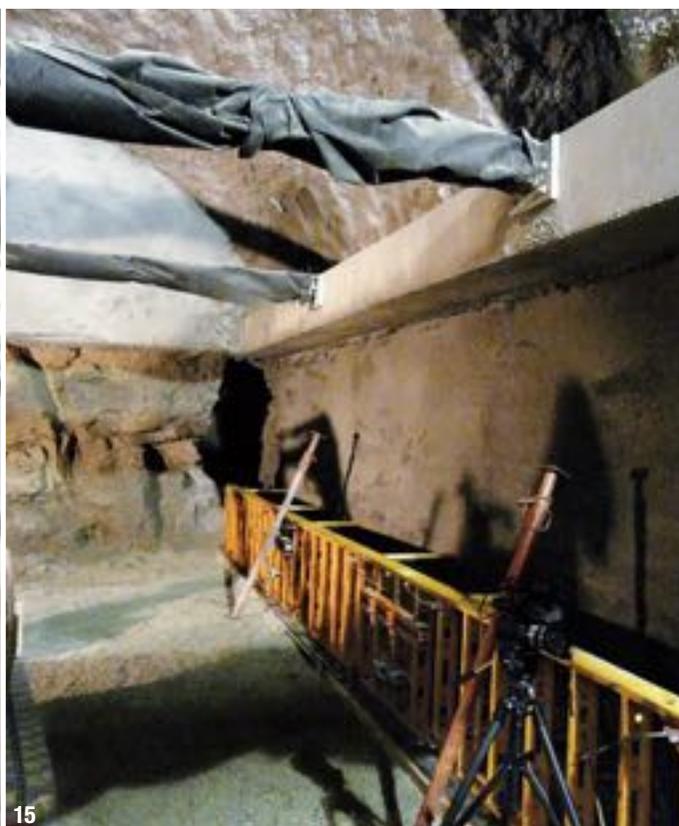
LE MUR ET LA VOÛTE DE LA CAVE SONT RECONSTITUÉS LORS DU TERRASSEMENT AUX NIVEAUX -5 ET -7



13 © DR

MOBILISATION DE MOYENS MATÉRIELS

Les moyens humains pour cette opération ont été adaptés à la diversité



14

15

CONCLUSION

Cette opération très technique a mobilisé une équipe de 10 personnes de septembre 2016 à mai 2017, avec une interruption de travaux de plus de deux mois pour des contraintes administratives liées à la route départementale.

Côté matériel, Gts a utilisé son robot de béton projeté en sous-sol puisque toute intervention humaine était exclue avant la mise en sécurité du site.

Une foreuse de 20 t ayant une course utile de 10 m a été utilisée pour les micropieux.

Une bonne préparation en amont a permis un enchaînement efficace

14 & 15- Vues de l'intérieur de la cave au niveau -5.

14 & 15- Views of the inside of the cellar at level -5.

des différentes phases d'intervention. Le savoir-faire multitechnique de Gts a permis de surmonter les contraintes aux travaux en milieu confiné identiques à celles des travaux souterrains (ventilation, accès, etc.). □

CHIFFRES-CLÉS

- Mise en place de deux poutres HEA 1000 de 24 m
- 3000 t de graviers 6/10 pour le comblement de la cave
- Réalisation de 1 000 m de micropieux Ø 250 mm
- Réalisation d'une longrine sur les micropieux liaisonnés au mur
- 500 m² de béton projeté et 30 m³ d'injection
- 150 m³ de béton de structure

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE/ MAÎTRES D'ŒUVRE : Société des caves Roquefort

BUREAU D'ÉTUDES STRUCTURE : Ocd

ENTREPRISE DE TRAVAUX : Gts (filiale de Nge)

ABSTRACT

RENOVATION OF THE SAINT JEAN CELLAR AT ROQUEFORT-SUR-SOULZON

LAURENT VIGUIER, GTS OCCITANIE

In order to restore identically the five levels of the Saint Jean cellar at Roquefort (Aveyron), damaged following a collapse of one of the walls, GTS, a specialist in geotechnical and safety improvement works, proposed a customised solution. In this Design and Build project, the contractor offered the project manager its multi-technique expertise to urgently ensure the building's safety. Using consolidation, retaining, grouting and civil engineering techniques, GTS carried out this project in accordance with a very precise schedule taking into account the site's constraints. Adaptation of equipment and machinery also contributed to compliance with deadlines for this highly technical operation to be performed urgently. □

REHABILITACIÓN DE LA BODEGA SAINT JEAN EN ROQUEFORT-SUR-SOULZON

LAURENT VIGUIER, GTS OCCITANIE

Para reconstruir de forma idéntica los cinco niveles de la bodega Saint Jean en Roquefort (Aveyron), dañados tras el hundimiento de uno de los muros, la sociedad Gts, especializada en obras geotécnicas y de protección, ha propuesto una solución a medida. En el marco de este proyecto de diseño-realización, la empresa ha puesto a disposición del director de obra sus competencias multitécnicas para ofrecer una protección de emergencia del edificio. Mediante técnicas de refuerzo, contención, inyección e ingeniería civil, Gts ha realizado esta operación siguiendo un plan por fases muy preciso, teniendo en cuenta las limitaciones del lugar. La adaptación de los materiales y las máquinas también ha contribuido al cumplimiento de los plazos de esta intervención, muy técnica y con carácter de urgencia. □



1

© PHOTOTHÈQUE ARTELIA

RESTRUCTURATION DE L'ÉCHANGEUR DU QUAI D'IVRY SUR LE BOULEVARD PÉRIPHÉRIQUE À PARIS

AUTEURS : MATTHIEU PAUZIÉ, RESPONSABLE DE MISSION, ARTELIA VILLE ET TRANSPORT - FABIAN ASCASO, INGÉNIEUR, ARTELIA VILLE ET TRANSPORT - STANISLAS MONNOT, DIRECTEUR TRAVAUX, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - STEPHAN EVEILLARD, DIRECTEUR GÉNIE CIVIL ÎLE-DE-FRANCE, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

DANS LE 13^e ARRONDISSEMENT SUR LE BOULEVARD PÉRIPHÉRIQUE ET POUR LE COMPTE DE LA SEMAPA, LES TRAVAUX DE RESTRUCTURATION DE L'ÉCHANGEUR SE DÉROULENT DEPUIS 2013 SOUS LA MAÎTRISE D'ŒUVRE ARTELIA DANS UN SITE À FORTES CONTRAINTES D'EXPLOITATION.

Dans le cadre du développement de la ZAC Paris Rive Gauche, la Semapa, désignée par la Ville de Paris pour conduire l'opération d'aménagement, intervient sur le secteur Bruneseau limitrophe de la commune d'Ivry-sur-Seine. Cette zone était initialement occupée par diverses implantations industrielles entre les voies du faisceau ferroviaire Austerlitz et la Seine. Depuis 2013, date des premières démolitions, les travaux de réaménagement s'enchaînent afin

de laisser place à la construction des bâtiments. Les nouveaux aménagements s'articuleront ainsi autour d'un échangeur du boulevard périphérique totalement remanié puisque les huit voies du boulevard périphérique et les quatre bretelles d'accès emprunteront au total sept ouvrages d'art. Le schéma directeur réalisé par le bureau d'architectes Ateliers Lion dans le cadre des études urbaines du secteur Bruneseau a prescrit la création d'une percée sous l'échangeur pour

1 - Vue générale du chantier - boulevard périphérique intérieur et extérieur en service - mars 2017.

1 - General view of the project - ring road on Paris side and on suburbs side in service - March 2017.

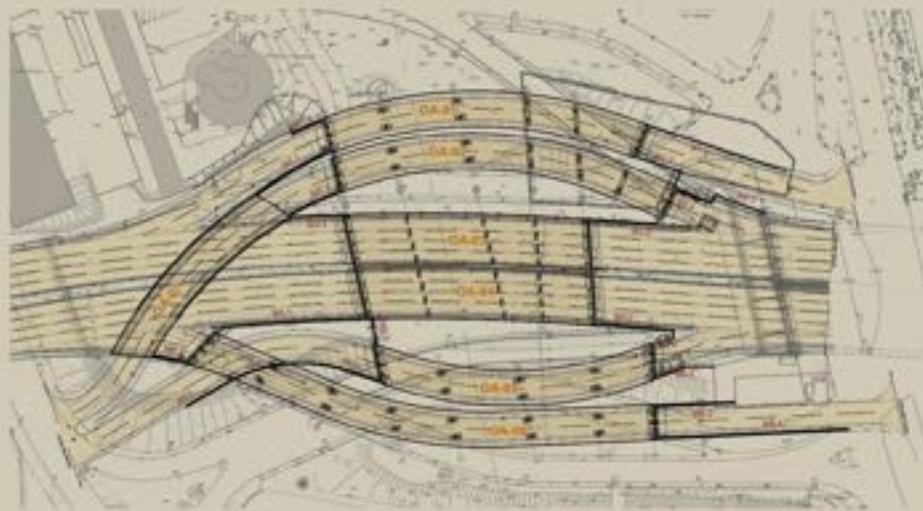
créer une allée entre la ville de Paris et la commune d'Ivry-sur-Seine appelée allée Paris-Ivry (figure 2a). Le projet du nouvel échangeur au-dessus de l'allée Paris-Ivry est composé de 7 ouvrages d'art (figure 2b). Le passage sous les voies du périphérique est constitué par deux ponts mixtes à 4 travées sur une longueur totale de 75 m. Les piles sont fondées sur pieux et les culées sont des écrans en parois moulées avec contreforts. Les tabliers comprennent chacun



© SEMAPA

2a

PLAN DE REPÉRAGE DES OUVRAGES



© PHOTO THÉQUE ARTELIA

2b

4 caissons métalliques entretoisés sur appuis ; ils reposent sur des piles architecturées en métal.

Les ouvrages portant les quatre bretelles sont des pont-dalles en béton précontraint supportés par des piles en béton armé. La longueur de ces ouvrages varie de 90 m à 150 m pour l'ouvrage le plus long. L'épaisseur des tabliers est de 1 m avec des rives équipées de corniches.

Un ouvrage cadre en béton permet la traversée de l'une des bretelles de sortie sous le boulevard.

UN PHASAGE COMPLEXE

Artelia, missionné dans le cadre d'une maîtrise d'œuvre complète, avait pro-

2a- Maquette illustrative.

2b- Plan de repérage des ouvrages.

3- État initial.

4- Vue générale - mise en service imminente.

2a- Illustrative model.

2b- Structure layout drawing.

3- Original state.

4- General view - commissioning imminent.

posé plusieurs solutions de phasage de l'opération pour construire les deux ouvrages principaux du boulevard périphérique. L'une d'entre elles aurait pu consister à réaliser les ponts par phases successives et par petits tronçons pour ensuite terrasser « en taube » sous les voies circulées du boulevard. Cette solution aurait duré plus de 8 ans en raison des contraintes d'exploitation imposées par le trafic routier qui ne permettaient pas de longues coupures de circulation.

Finalement, la solution retenue a consisté à procéder à un dévoiement préalable des 8 voies côté banlieue afin de construire successivement les deux ouvrages du périphérique : intérieur

(OA3) en 2016 et extérieur (OA4) en 2017.

Après avoir réalisé les ouvrages principaux et redonné au boulevard périphérique son tracé en plan initial, il reste alors à construire les bretelles d'entrée et de sortie pour finaliser l'opération. En premier lieu, la mise en services des ouvrages OA1, OA2 et OA7 côté Paris en 2017 puis ceux des bretelles extérieures côté Ivry, OA5 et OA6 en 2018.

LES TRAVAUX RÉALISÉS

Premier marché de travaux, le dévoiement du boulevard périphérique s'est déroulé d'avril 2014 à avril 2015. Les travaux menés par l'entreprise Sogea Tpi (Vinci Construction) ont consisté à démolir les bretelles côté extérieur, réaliser un remblaiement de 6 m de haut après consolidation des terrains en place par inclusions rigides pour accueillir le boulevard périphérique dévié sur une nouvelle plateforme de 32 m de largeur ainsi qu'une bretelle d'accès provisoire.

En mai 2015, une fois les emprises dégagées, un second marché, confié au groupement Eiffage - Spie Fondations, a débuté par la construction de l'ouvrage sous le boulevard périphérique intérieur (figure 4). Les culées composées d'un écran autostable en parois moulées avec contreforts et surmontées d'un chevêtre en béton armé ont ainsi été réalisées. Cette solution a permis de terrasser sur plus de 8 m de hauteur à proximité des voies circulées tout en limitant les déplacements et déformations grâce à la raideur de la paroi à contreforts. Ces parois profondes de 27 m sont ancrées dans la couche d'Yprésien sableux ; elles retiennent environ 8 m de poussée une fois découvertes jusqu'au niveau de l'allée Paris-Ivry. ▶



© PHOTO THÉQUE ARTELIA

3



4

Les parois ont été réalisées à la benne à câble (figure 5) par l'entreprise Spie Fondations sur la largeur totale de 33 m pour les deux ouvrages. L'épaisseur de la paroi filante est de 1,02 m, les contreforts ont une section de 1,02 m par 2,80 m. La géométrie complexe de l'ensemble de la cage d'armatures paroi/contrefort, hors gabarit routier, a nécessité un assemblage sur site des deux éléments constitués par les parois et contreforts au fur et à mesure de leur descente à l'intérieur du forage (figures 7 et 8).

FONDATEMENTS DES PILES ET DES CULÉES

Les culées composées de parois moulées assurent ainsi le soutien des terrains de part et d'autre d'une brèche de 80 m et la fondation propre des culées. Les piles des ouvrages ont pu être fondées sur pieux forés à la tarière creuse de diamètre 1 020 mm de 24,5 m de profondeur ancrés dans l'Yprésien sableux. Ces piles reposent sur des semelles communes pour supporter les 4 poteaux métalliques de chaque file. Au total 48 pieux ont été réalisés en plusieurs phases pour ces deux ouvrages, entre juin 2015 et septembre 2016 (figures 9a et 9b).

Les ponts portant des bretelles, de part et d'autre du périphérique, sont également fondés sur pieux, soit au total 127 pieux de diamètre 1 020 mm pour les piles et culées de ces ouvrages d'art.

5- Périphérique dévié et fondations des premiers ouvrages.

6- Benne à câble.

7- Équipement des parois moulées et contreforts.

8- Cage d'armature de la paroi en T.

5- Diverted ring road and foundations of the first structures.

6- Cable grab.

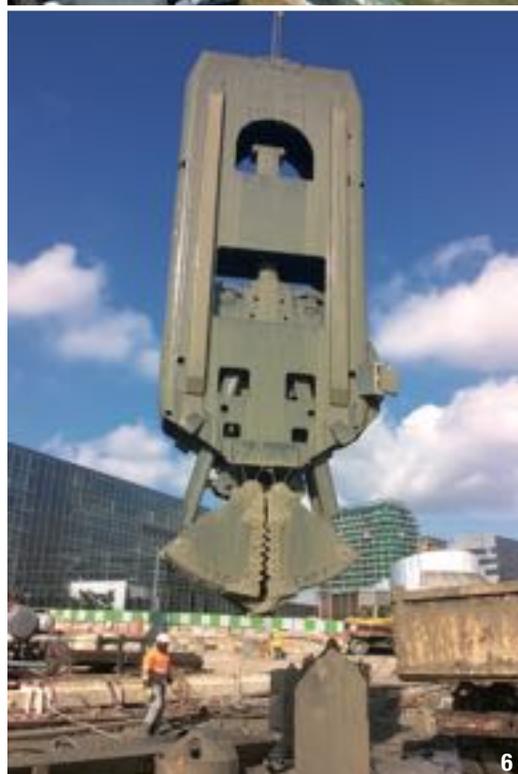
7- Equipment for diaphragm walls and buttresses.

8- Reinforcement cage of the T-wall.



5

© PHOTO THÉQUE ARTELIA



6



7

© PHOTO THÉQUE ARTELIA



8

© PHOTO THÉQUE ARTELIA



9a

© PHOTOTHÈQUE ARTELIA

9a & 9b- Forage des pieux.

9a & 9b- Pile drilling.

L'OUVRAGE CADRE

L'ouvrage OA7 permet le passage sous les remblais du périphérique par la future bretelle de sortie du périphérique intérieur. Pour s'affranchir de soutènements ou de terrassements importants pour la construction du cadre en béton armé, d'une part, et pour respecter les délais serrés, d'autre part, une solution « en taupier » a été choisie pour ce passage inférieur. L'ouvrage a été conçu en paroi lutécienne surmonté d'une dalle butonnante de 80 cm d'épaisseur supportant la chaussée du périphérique. Une série de 71 pieux de diamètre 1020 mm espacés d'environ 2 m a été réalisée entre les mois d'août 2015 et août 2016, en plusieurs phases générées par les conditions de circulation. En effet, pour cet ouvrage, Artelia avait



9b

© PHOTOTHÈQUE ARTELIA

proposé à l'exploitant, au cours des études de conception, de réduire la circulation périphérique à 2x2 voies sur l'intérieur en réalisant deux interruptions de terre-plein central au mois d'août. Cette configuration était la seule possible pour achever la complétude de l'ouvrage sous le boulevard.

C'est du 3 au 25 août 2016 que l'opération s'est déroulée. Après basculement de la circulation, les entreprises ont réalisé les démolitions et terrassements, les 17 pieux, la dalle et la réfection de la chaussée en travaillant en postes pour assurer la remise en service à temps.

À partir de 2017, les terrassements « en taupier » ont débuté pour réaliser les parois de l'ouvrage en béton projeté jusqu'au radier de l'ouvrage (figure 10).

MURS CLOUÉS

La conception des murs en retour des deux ouvrages du boulevard périphérique a permis de libérer un maximum d'espace constructible ou aménageable en contrebas autour de l'allée d'Ivry ; les murs ont donc été prolongés tout le long du périphérique par des parois clouées verticales surmontées de murs en béton faisant office de dalle de frottement (figure 11).

10- Terrassement et parois projetées sous OA7.

11- Parois clouées le long du périphérique.

12- Clous munis de protection par gaine plastique.

13- Chargement d'une péniche pour évacuation des terres.

10- Earthworks and shotcreted walls under OA7.

11- Soil-nailed walls along the ring road.

12- Nails protected by plastic sheath.

13- Loading a barge to remove earth.

Compte tenu du caractère anthropique des terres du site, l'agressivité des matériaux en place a conduit à renforcer la sécurité des ancrages par le gainage des clous (protection par gaine plastique P2), d'une part, en surdimensionnant les sections et en adoptant une formulation spécifique du béton projeté, d'autre part (figure 12). Certaines parois soutiennent alors près de 9 m de remblai par des clous de diamètre 25 mm de 10 à 12 m de long forés et injectés en diamètre 150 mm.

LES TERRASSEMENTS ET ÉVACUATION DES TERRES

Le chantier produit près de 140 000 m³ de terre à évacuer pour la création de l'ensemble des ouvrages. Une partie de ces terres n'étant pas propre à une évacuation en filière pour terres inertes (ISDI), le choix de différents exutoires a été minutieusement fait par l'entreprise afin d'optimiser les coûts d'évacuation. Aussi, le phasage et les cadences de terrassement ont été concomitants avec un programme d'investigation et de caractérisation des terres selon un maillage de 10 m x 10 m. Dès le stade de l'appel d'offre, les entreprises étaient invitées à proposer des solutions d'optimisation pour l'évacuation des déblais afin de diminuer le recours au transport par camions dans ce secteur déjà fortement perturbé. Les déblais ont été évacués par péniches depuis le quai d'Ivry pour être revalorisés et traités. C'est ainsi qu'environ 5 700 rotations de camions ont été finalement évitées sur les routes d'Île-de-France (figure 13).



10



11



12

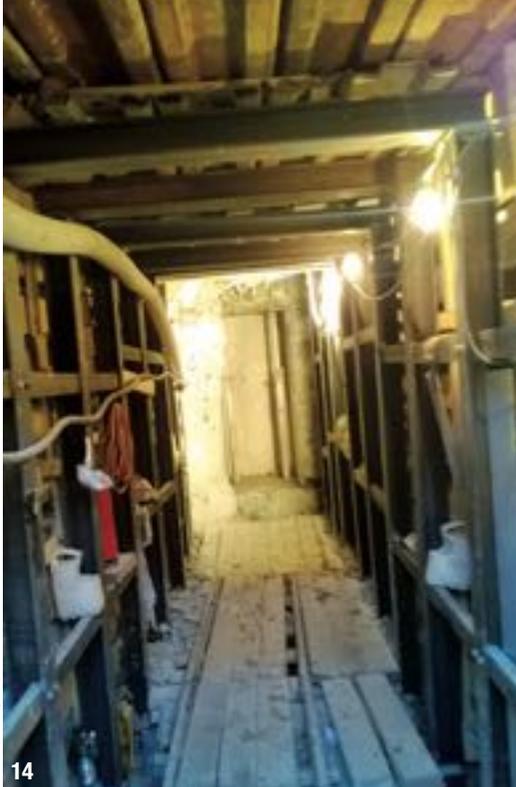


13

© PHOTO THÉQUE ARTELIA

© PHOTO THÉQUE ARTELIA

© PHOTO THÉQUE ARTELIA



© PHOTOHÉQUE ARTELIA

14

15

PRINCIPALES QUANTITÉS

DONNÉES GÉNÉRALES :

- 2 ouvrages mixtes de 75 m et 17 m de large, 815 t d'ossature métallique
- 4 ouvrages en béton précontraint de 90 m à 150 m
- 1 ouvrage cadre de 65 m de long en courbe et 10 m de large

PAROIS MOULÉES POUR CULÉES :

- Épaisseur 1,02 m avec contreforts de 2,80 m
- Profondeur : 27 m
- Surface réalisée 4 740 m²
- Armatures : 510 t

PIEUX POUR FONDATIONS D'OUVRAGE :

- 183 pieux de diamètre 1,02 m
- Longueur totale forée : 4 740 m
- Armatures : 600 t

PIEUX POUR OUVRAGE CADRE ET PUIXS D'ASSAINISSEMENT :

- 82 pieux de diamètre 1,02 m
- Longueur totale forée : 1 530 m
- Armatures : 280 t

PAROIS CLOUÉES :

- Parois provisoires : 2 000 m²
- Parois définitives : 700 m²

VOLUMES DE TERRE EXCAVÉS ET ÉVACUÉS :

- 140 000 m³ de terres dont une partie en filière ISDND

14- Blindage traditionnel pour galerie d'assainissement.

15- Assainissement - Puits de chute.

14- Traditional shielding for sanitation gallery.

15- Sanitation - Drop shaft.

LES OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT

L'assainissement de l'échangeur a nécessité la construction d'un ensemble de galeries visitables pour le drainage des voies ainsi créées. C'est donc 350 m de galeries en béton armé de section intérieure de 2 m x 1,60 m qui seront construits pour l'opération, dont une partie a été réalisée en souterrain traditionnel au-dessous de voies circulées (figure 14). Ces ouvrages comprennent en particulier deux puits de chute de 10 m dont les soutènements provisoires sont constitués par des pieux jointifs à l'intérieur desquels sont construites les structures (figure 15).

LES TRAVAUX SE POURSUIVENT

Après la mise en service des deux ponts sous le périphérique intérieur et extérieur respectivement en mai 2016 et en mars 2017 puis celle d'un ouvrage en béton précontraint pour l'une des bretelles d'entrée en juillet 2017, les travaux se poursuivent par la construction des trois dernières bretelles jusqu'au dernier trimestre 2018, fin prévue pour l'ensemble de la restructuration de l'échangeur. Les aménagements de l'Allée Paris-Ivry pourront être lancés afin de relier les deux communes. □

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société d'Étude de Maîtrise d'Ouvrage et d'Aménagement Parisienne - Semapa

MAÎTRE D'ŒUVRE GÉNÉRAL : Artelia Ville et Transport, sous-traitant géotechnique Sepia Gc

ARCHITECTE COORDONNATEUR : Agence Ateliers Lion

ARCHITECTE OUVRAGE D'ART : Agence Marc Mimram

ENTREPRISE TITULAIRE DU MARCHÉ DÉVOIEMENT : Tpi du groupe Vinci

GROUPEMENT TITULAIRE DU MARCHÉ ÉCHANGEUR : Eiffage Génie Civil, Spie Fondations, Eiffage Métal, Eiffage Route, Roland

ABSTRACT

STRUCTURAL RE-ENGINEERING OF THE QUAI D'IVRY INTERCHANGE ON THE PARIS RING ROAD

MATTHIEU PAUZIE, ARTELIA - FABIAN ASCASO, ARTELIA - STANISLAS MONNOT, EIFFAGE - STEPHAN EVEILLARD, EIFFAGE

The structural re-engineering of the Quai d'Ivry interchange on the Paris ring road involves the construction of seven bridge structures in an environment constrained by the traffic on the most heavily trafficked urban road in Europe. The structures of various types, prestressed bridges, composite bridges and frame bridges, are being executed from 2014 to 2018 to create a broad public passageway under the boulevard. Pile foundations, diaphragm walls with buttresses, soil-nailed walls, sanitation structures and earthworks represent a multidisciplinary project to give birth to the future district of the 13th arrondissement of Paris. □

REESTRUCTURACIÓN DEL ENLACE DEL QUAI D'IVRY, EN CINTURÓN PERIFÉRICO DE PARÍS

MATTHIEU PAUZIE, ARTELIA - FABIAN ASCASO, ARTELIA - STANISLAS MONNOT, EIFFAGE - STEPHAN EVEILLARD, EIFFAGE

La reestructuración del enlace del Quai d'Ivry, en el cinturón periférico de París, incluye la construcción de siete obras de fábrica en un entorno limitado por la circulación de la vía urbana más transitada de Europa. Las construcciones, de naturalezas variadas (puentes pretensados, puentes mixtos y puentes prefabricados), se realizarán de 2014 a 2018 para crear un amplio paso público bajo el cinturón. Un proyecto multidisciplinar que incluye cimentaciones por pilotes, pantallas de hormigón con contrafuertes, muros de contención tipo suelos enclavados, construcciones de saneamiento y movimientos de tierras, que da nacimiento al futuro barrio del distrito 13 de París. □



1 © PHOTO THEQUE BOTTE FONDATIONS

PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 À SAINT-OUEN – LOT T03 – UNE STATION, 6 OUVRAGES ET AUTANT DE TECHNIQUES DE FONDATIONS

AUTEURS : FRÉDÉRIC RENAUD, DIRECTEUR D'ACTIVITÉ, BOTTE FONDATIONS - PIERRE BOUTRU, CONDUCTEUR DE TRAVAUX, BOTTE FONDATIONS - LAURENT BUISSART, DIRECTEUR DE PROJET, SPIE TPCI

DANS LE CADRE DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 JUSQU'À SAINT-OUEN, LE GROUPEMENT SPIE TPCI - CHANTIERS MODERNES - TPI - DODIN CAMPENON BERNARD - SPIE FONDATIONS ET BOTTE FONDATIONS ADJUDICATAIRE DU LOT T03 A EN CHARGE LA CONSTRUCTION DE LA STATION CLICHY-SAINT-OUEN RER. LE CORPS DE LA STATION ET LES 5 OUVRAGES ASSOCIÉS NÉCESSITENT PAS MOINS DE 6 TECHNIQUES DE FONDATIONS POUR FAIRE FACE AUX DÉFIS TECHNIQUES IMPOSÉS PAR LES EXIGENCES DU PROJET ET SA CONFIGURATION.

INTRODUCTION

Le projet d'extension de la ligne 14 au nord de Paris a pour objet de prolonger la ligne existante de Saint-Lazare jusqu'à Mairie-de-Saint-Ouen.

L'ouverture des quatre stations Pont-Cardinet, Porte-de-Clichy, Clichy-Saint-Ouen RER et Mairie-de-Saint-Ouen vise ainsi la désaturation de la ligne 13.

La maîtrise d'ouvrage de l'ensemble de ce projet est assurée par la RATP et le

1- Travaux de paroi moulée et d'injection sur le corps de station.
2- Vue 3D des ouvrages.

1- Diaphragm wall and cement grouting works on the main part of the station.
2- 3D view of the structures.

STIF. Systra en est le maître d'œuvre. Le lot T03 objet du présent article consiste en la réalisation de la gare Clichy-Saint-Ouen RER.

Cette station est enclavée entre les lots T01 (Lot tunnel et gares depuis Saint Lazare) et T02 (Lot tunnel et gares jusqu'à Mairie-de-Saint-Ouen et site de maintenance et de remisage).

Si elle a fait l'objet d'un lot spécifique, c'est parce que :

- Elle sert de puits de sortie aux tunnels de ces deux lots ;
- Elle constitue un ouvrage particulièrement complexe du fait de son environnement urbain dense et de la présence de nombreux réseaux ;
- Elle doit passer par un ouvrage cadre sous le RER C.

Le lot T03 a été attribué au groupe Spie Batignolles Tpci (mandataire), Chantiers Modernes, Sogéa Tpi, Dodin Campenon Bernard, Spie Fondations et Botte Fondations. Les travaux ont débuté par ordre de service du 3 décembre 2014 (figure 2).

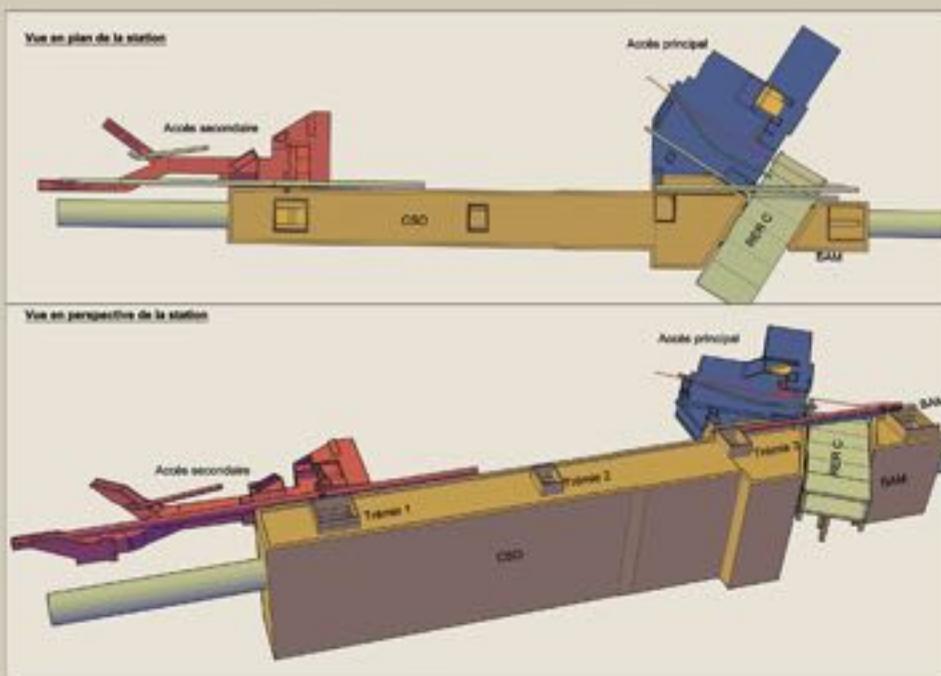
CONTEXTE URBAIN PARTICULIÈREMENT DENSE

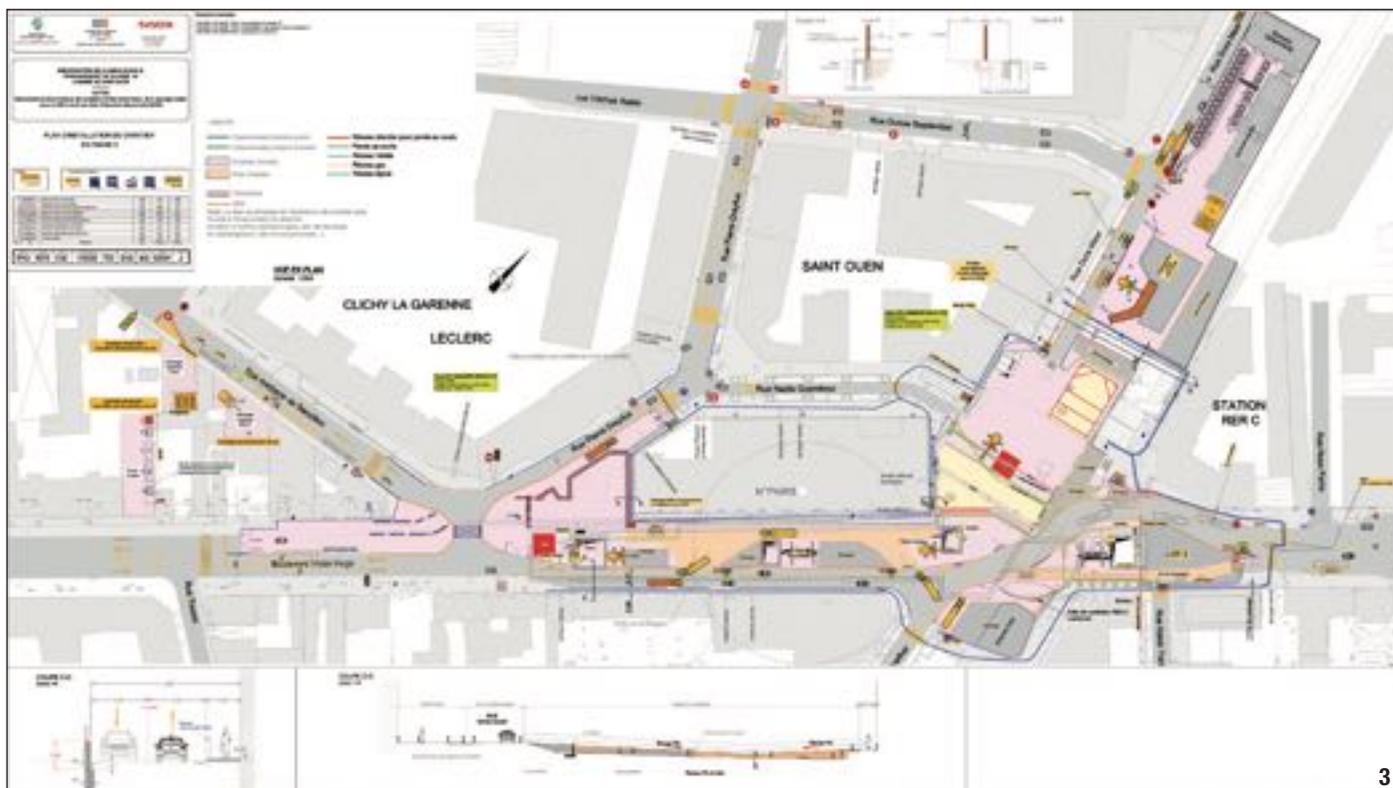
La station Clichy-Saint-Ouen sera située sous le boulevard Victor Hugo. Elle desservira le nouveau quartier d'affaires de Saint-Ouen et le sud du quartier des Docks ainsi que le nord-est de Clichy-la-Garenne (quartiers Espace-Clichy et Morel-Sanzillon). Tous les accès à la station seront situés sur la voirie. L'accès principal sera proche de la gare RER C et du boulevard urbain de Clichy Saint-Ouen.

Deux autres accès sont prévus : l'un place Pierre Dreyfus, le second rue Madame de Sanzillon à Clichy-la-Garenne.

Du fait de la géologie du site, de la présence de nombreux réseaux, de la présence du RER C, la réalisation de cette station et de ses ouvrages associés nécessite un très large éventail de techniques de fondations : paroi moulée, injection, paroi au coulis armée, berlinoise, jet grouting, pieux, micro-pieux, congélation (figure 3).

VUE 3D DES OUVRAGES





3

© PHOTOTHÈQUE BOTTE FONDATIONS

3- Plan d'installation en phase 2.
4- Coupe type sur corps de station.

3- Layout drawing in phase 2.
4- Typical cross section on main part of station.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

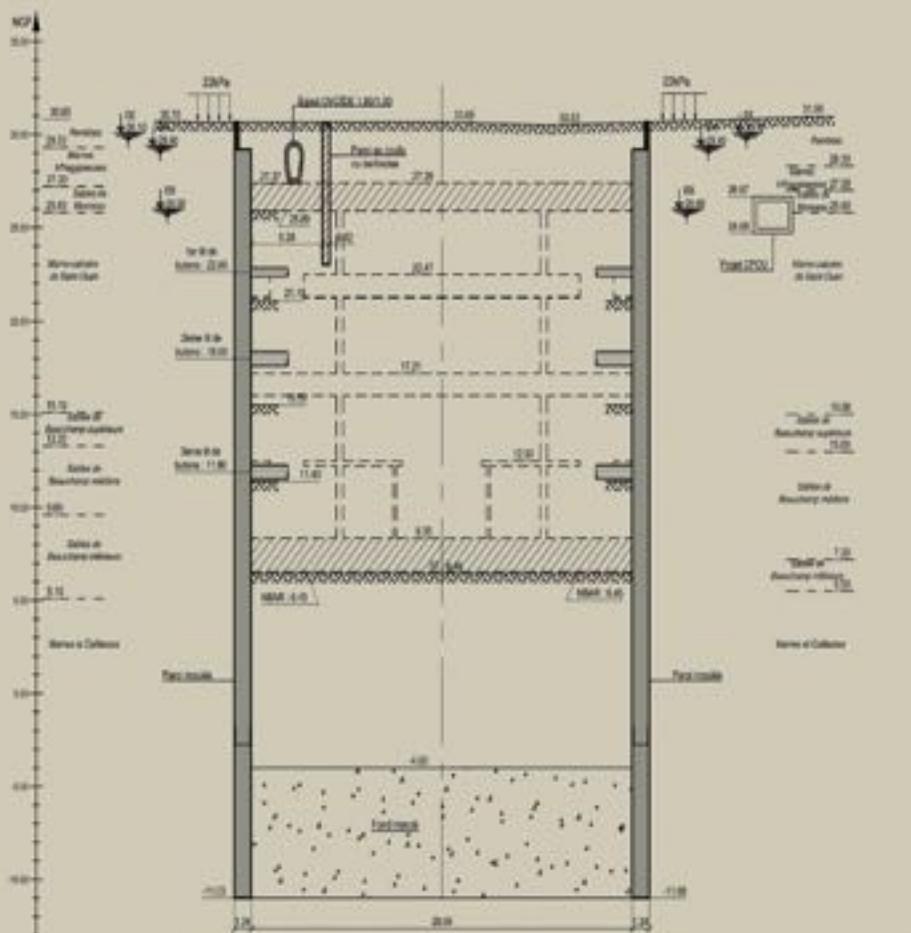
Les horizons géologiques successivement rencontrés sont constitués de remblais, Sables de Monceau, Marno-Calcaire de Saint-Ouen, Sables de Beauchamp supérieurs, Sables de Beauchamp médians, Sables de Beauchamp inférieurs, Marnes et Caillasses et Calcaire Grossier.

La nappe phréatique se situe à environ 2,5 m de profondeur. La présence de vides de dissolutions dans les Marnes et Caillasses a imposé un prétraitement systématique au droit des parois moulées pour éviter les pertes de boue au forage. La présence de bancs indurés dans les Sables de Beauchamp et dans les Marnes et Caillasses imposent l'utilisation du cutter (figure 4).

CORPS DE STATION

La station Clichy-Saint-Ouen est implantée sous le Boulevard Victor Hugo, en limite des communes de

COUPE TYPE SUR CORPS DE STATION



4

© PHOTOTHÈQUE BOTTE FONDATIONS

Clichy-La-Garenne et de Saint-Ouen. Cet ouvrage comprend une trémie provisoire pour la sortie du tunnelier venant de Pont-Cardinet (lot N° T01) et l'approvisionnement en matériel du lot Voie Ferrée.

La station est une enceinte en paroi moulée d'environ 160 m de longueur, 16 m de largeur et 25 m de profondeur. La paroi moulée de 1,24 m d'épaisseur descend à 42 m.

Un fond injecté est réalisé dans les marnes et caillasses entre 35 et 42 m de profondeur afin de limiter le débit d'exhaure (débit attendu de l'ordre de 100 m³/h) (figure 5).

Les structures intérieures se composent :

- D'une dalle de couverture ;
- D'un niveau salle d'accueil R-1 constitué de deux dalles l'une au nord avec une ouverture sur l'accès principal et un vide sur mezzanine et l'autre au sud comportant une ouverture sur l'accès secondaire ;
- D'un niveau mezzanine R-2 constitué de deux dalles, l'une au nord avec un vide sur les voies et l'autre dalle au sud ;
- Entre ces deux dalles, le niveau mezzanine comprend les butons cylindriques en béton armé entre les

- liernes structurelles de la station ;
- Le niveau des quais R-3 est constitué de deux dalles de 5,12 m de largeur reposant chacune sur un voile côté voies ferroviaires et des poteaux côté parois moulées ;
- D'un radier de forme incurvée dans le corps de la station et plat à l'extrémité côté RER C.

Le mode constructif est une réalisation en taube, le phasage de réalisation est le suivant (figure 6) :

- Pré-injection ;
- Réalisation de la paroi moulée ;
- Pré-terrassement au niveau de la dalle de couverture ;

- Réalisation du radier injecté et essai de pompage ;
- Réalisation de la dalle de couverture et remblaiement de la dalle de couverture ;
- Terrassement en taube et réalisation des différentes dalles ;
- Pose de butons métalliques provisoires côté ouvrage cadre RER C et au-dessus du radier ;
- Réalisation du radier et dépose des butons métalliques provisoires ;
- Fermeture des trémies.

BAIE D'AÉRATION MÉCANISÉE (BAM)

Une baie d'aération mécanisée implantée en rive Est de la station RER. Cet ouvrage est également utilisé comme puits de sortie du tunnelier provenant de la Mairie de Saint-Ouen (lot N° T02). La BAM est une boîte trapézoïdale de 16 à 22 m de longueur, de 12 à 13 m de largeur et de 24 m de profondeur. Elle est constituée d'une paroi moulée de 1,24 m d'épaisseur et de 44 m de profondeur.

Un radier injecté dans les Marnes et Caillasses limite le débit d'exhaure (débit attendu de l'ordre de 20 m³/h) (figure 7).

La structure intérieure se compose :

- D'une dalle de couverture,
- De deux dalles,
- D'un radier de forme incurvée.

Le mode constructif est du type fouille ouverte butonnée en angle.

ACCÈS PRINCIPAL ET ACCÈS SECONDAIRE

L'accès principal à la station est implanté en rive Ouest de la station RER sous la rue Dora Maar. Il se situe en limite des communes de Clichy-La-Garenne et Saint-Ouen.

La fouille d'environ 35 m par 40 m est réalisée à l'abri d'un soutènement du type paroi au coulis armée avec des profilés métalliques.

La stabilité de ce soutènement de 10 m de hauteur est assurée par des butons métalliques en phase provisoire (figure 8).

En phase service, les poussées des terres et de la nappe sont reprises par un contre-voile définitif, stabilisé par le radier et la dalle de couverture.

Les structures intérieures se composent :

- D'une dalle de couverture sur 2 niveaux : l'une à 3 m de profondeur pour la partie principale comportant une rampe d'accès vers la rue et l'une à 1,5 m de profondeur pour la correspondance RER C ;

- 5- Travaux de paroi moulée.
- 6- Génie civil et terrassement en cours dans le corps de station.
- 7- Baie d'Aération Mécanique (BAM) avec amorce de l'ouvrage cadre sous RER C.

- 5- Diaphragm wall works.
- 6- Civil engineering and earthworks in progress in the main part of the station.
- 7- Mechanical ventilation aperture with start of the frame structure under RER C.



© PHOTO THÉQUE BOTTE FONDATIONS



© PHOTO THÉQUE BOTTE FONDATIONS



- 8- Coupe type paroi au coulis armée - accès.
- 9- Dispositif de soutènement réseaux (ERDF et Numéricable).
- 10- Coupe de principe jet grouting au droit des réseaux.

- 8- Typical cross section of reinforced grout wall - access.
- 9- Supporting structure for utilities (ERDF and Numéricable).
- 10- Schematic cross section of jet grouting at the utilities level.

→ D'un radier au niveau de la salle d'accueil R-1 à environ 9 m de profondeur.

L'accès secondaire à la station est implanté à l'angle de la rue Pierre Dreyfus et du Boulevard Victor Hugo sur la commune de Clichy-La-Garenne. La fouille d'environ 18 m de longueur et de 16 à 24 m de largeur est également réalisée à l'abri d'un soutènement du type paroi au coulis armée avec des profilés métalliques. La stabilité de ce soutènement de 10 m de hauteur est assurée par des butons métalliques en phase provisoire.

L'enceinte périmétrique définitive est, comme pour l'accès principal, réalisée en béton armé par le génie civil.

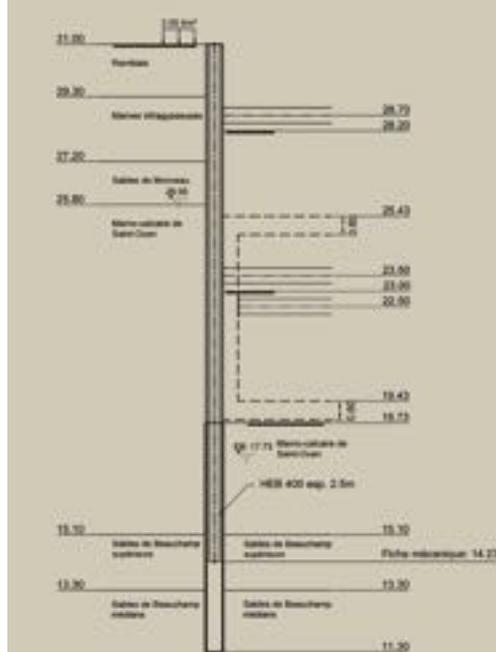
Les structures intérieures se composent :

→ D'une dalle de couverture sur 2 niveaux : l'une à 1 m de profondeur pour la partie donnant accès aux voiries sus-jacentes via une rampe et l'une à 4 m de profondeur pour la partie reliée au corps de station ;

→ D'un radier au niveau de la salle d'accueil R-1 à 9 m de profondeur.

Ce type de soutènements est particulièrement adapté pour des soutènements de hauteur moyenne avec la présence de nombreux réseaux à préserver. La paroi au coulis ancrée dans les Sables de Beauchamp médians réputés peu perméable ($k=1.10^{-6}$ m/s) assure l'étanchéité de la fouille. Les profilés disposés dans le coulis assurent la fonction mécanique du soutènement. Ce dispositif permet de laisser des fenêtres autour des réseaux à préserver.

COUPE TYPE PAROI AU COULIS ARMÉE - ACCÈS



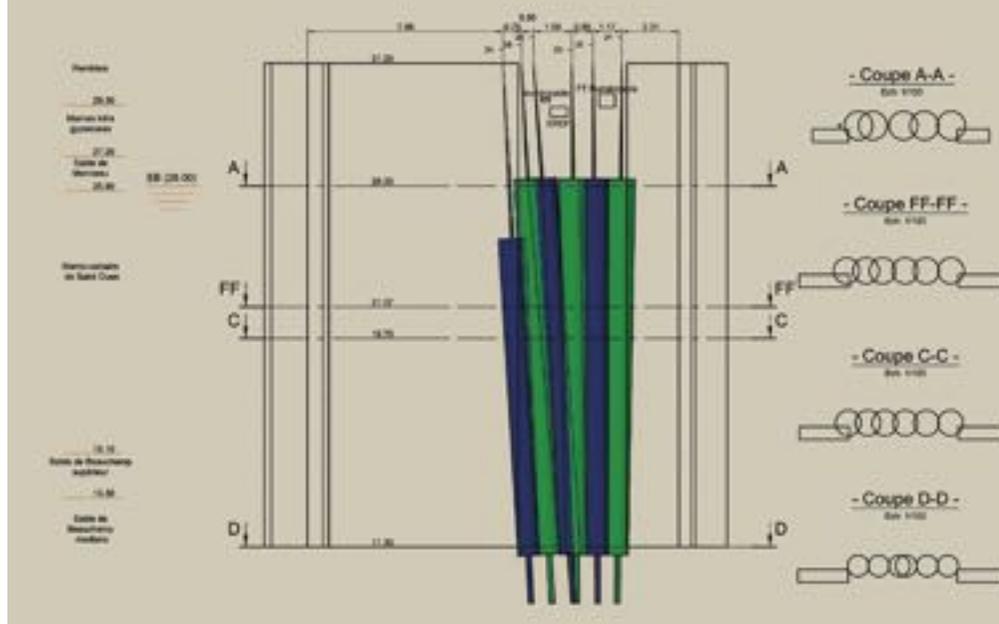
8



9

© PHOTO THÉQUE BOTTE FONDATIONS

COUPE DE PRINCIPE JET GROUTING AU DROIT DES RÉSEAUX



10

© PHOTO THÉQUE BOTTE FONDATIONS

Ces fenêtres sont fermées sous les réseaux par des colonnes de jet grouting (figures 9 et 10).

ACCÈS SANZILLON

Les deux accès dits Sanzillon sont deux couloirs situés au droit de la rue Sanzillon à Clichy. Ils débouchent dans l'accès secondaire.

De 45 m de longueur et 5 de largeur ils descendent entre 8,7 et 10 m de profondeur.

Compte tenu de la très forte densité de réseaux existants et de l'exiguïté des emprises de travail, le type de soutènement retenu est du type colonnes de jet grouting sécantes avec pieux de soutènements intégrés.

La stabilité est assurée par un lit de butons métalliques en phase provisoire et par une enceinte périmétrique en béton armé stabilisée par le radier et la dalle de couverture en phase définitive. Le débit d'exhaure est limité par la réa-

lisation d'un radier en jet grouting en pied dans les Sables de Beauchamp supérieurs (à environ 12 m de profondeur) (figure 11).

Les structures intérieures se composent :

→ D'une dalle de couverture avec un niveau variable allant de 0 à 4 m de profondeur ;

→ D'un radier au niveau de la salle d'accueil R-1 avec un niveau allant jusqu'à 9 m de profondeur.

OUVRAGE CADRE SOUS LE RER C

Le passage sous le RER C entre la station d'un côté et la baie d'aération et de ventilation (BAM) de l'autre côté est réalisé par l'intermédiaire d'un tunnel cadre de 5 m x 10 m de section intérieure et 25 m de longueur. Cet ouvrage passe sous la station du RER C, dans le Calcaire de Saint-Ouen pour la dalle supérieure et dans les Sables de Beauchamp supérieurs et médians pour les piédroits et le radier.

Il s'agit là d'un ouvrage particulièrement sensible et technique compte tenu de sa position directement sous le RER C. Le fond de fouille se situe à 22 m de profondeur soit 17 m sous le niveau de la nappe.

La réalisation de cet ouvrage doit se faire dans une enceinte la plus étanche possible. Pour cela, il est prévu de réaliser des injections à la base du Calcaire de Saint-Ouen et de la congélation dans les Sables de Beauchamp (figure 12). Une partie des injections est réalisée au sas directement depuis la station et de la BAM. De même les forages de congélation sont réalisés au sas (figure 13).

La congélation est lancée à l'azote pour la mise en froid puis elle est entretenue à la saumure.

Deux linteaux de part et d'autre portent de la paroi de la station principale à la paroi de la baie d'aération. Ils permettent de reprendre les charges du cadre du RER C. Le tunnel cadre est ensuite réalisé en traditionnel.

SUIVI OBSERVATIONNEL

Compte tenu du contexte urbain dense et sensible le dispositif de suivi observationnel est particulièrement important. La maîtrise des risques est un enjeu majeur sur ce type de projet. Elle passe



11

© PHOTOTHÈQUE BOTTE FONDATIONS

11- Travaux de jet grouting.
12- Image 3D de la congélation.
13- Forage au SAS.

11- Jet grouting work.
12- 3D image of ground freezing.
13- Drilling through airlock valve.

par une instrumentation et une auscultation continue des ouvrages.

Les principaux risques identifiés sont :

- La présence de bâtiments avoisnants d'habitation et de bureaux ;
- La voirie impliquant la circulation du public ;
- La présence de la station du RER C ;
- La présence de nombreux concessionnaires et plus particulièrement les réseaux du SEDIF (eau potable), du CPCU (chauffage urbain), d'assainissement, d'ERDF, de télécommunication ;

→ Des interfaces avec :

- L'arrivée prévue dans la gare principale du tunnelier du lot T01 (tunnel Pont-de-Clichy à Clichy-Saint-Ouen),
- L'arrivée prévue dans la BAM du tunnelier du Lot T02 (tunnel Mairie-de-Saint-Ouen à Clichy-Saint-Ouen).

Une surveillance toute particulière est mise en place dans la station du RER C au-dessus de l'ouvrage cadre à réaliser pour le futur passage de la ligne 14. Un cyclops associé à 37 prismes et 66 barres électro-nivelles permettent de suivre en temps réel les tassements et déformées au sein de la station (figures 14 et 15).

Trois cyclops permettent de suivre en temps réel l'ensemble des bâtiments environnants.

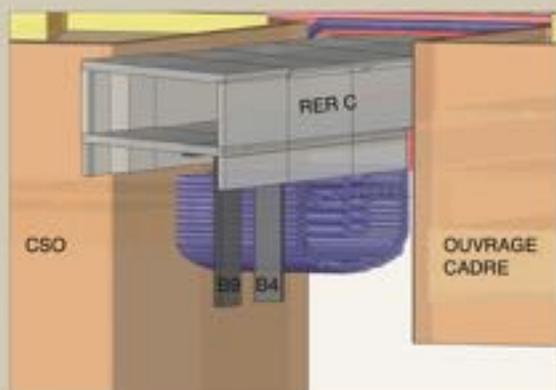
Des inclinomètres et cellules topo permettent de suivre les déformées des soutènements.

Ces mesures de déformées associées aux enregistrements des paramètres des outils de forage, aux relevés de terrassement, au suivi de niveaux de nappe par 15 piézomètres automatisés, au relevé des efforts réels dans les butons par 120 jauges de contraintes permettent de collecter les données permettant une rétro-analyse des calculs du soutènement. Il est ainsi procédé à une vérification des résultats des études d'exécution de manière empirique et ce à chaque étape de la réalisation des ouvrages.

Enfin, 2 capteurs de vibrations et un capteur acoustique permettent de suivre les vibrations et les niveaux sonores en temps réel.

Ce dispositif permet de vérifier le respect des limites de nuisances environnementales. ▷

IMAGE 3D DE LA CONGÉLATION



12



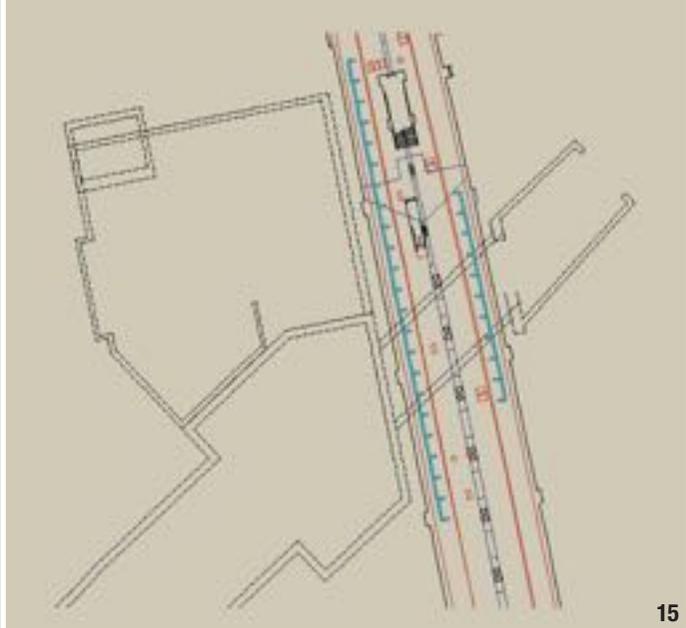
13

POSITION THÉORIQUE DU CYCLOPS DANS LA STATION DU RER C



14

POSITION THÉORIQUE DES ÉLECTRONIVELLES SUR LES VOIES DU RER C



15

© PHOTO THÉRIQUE BOTTE FONDATIONS

AVANCEMENT DU PROJET

Le corps de station, la baie d'aération mécanique, l'entrée principale, l'entrée secondaire, l'accès Sanzillon et l'ouvrage cadre sous le RER C sont autant d'ouvrages spécifiques, voire autant de chantiers à gérer en interaction les uns avec les autres.

Le lot T03 ne se résume pas à la construction d'une station mais, au contraire, à la réalisation de plusieurs ouvrages accolés nécessitant la mise en œuvre de techniques de fondations différentes dans un phasage complexe.

La majorité des fondations sont aujourd'hui réalisées. Les efforts se concentrent maintenant sur l'ouvrage le plus sensible, le tunnel cadre sous la station du RER C. □

14- Position théorique du Cyclops dans la station du RER C.

15- Position théorique des électronivelles sur les voies du RER C.

14- Theoretical position of the Cyclops in RER C station.

15- Theoretical position of electronic level gauges on RER C tracks.

PRINCIPALES QUANTITÉS DE FONDATIONS SPÉCIALES

PAROIS MOULÉES ÉPAISSEUR 1,22 M : 20 000 m²

PAROIS AU COULIS ARMÉE ÉPAISSEUR 0,50 M : 4 500m²

FORAGE D'INJECTION DE RADIER : 35 000 m

RADIER INJECTÉ : 3 000 m²

FORAGES DE CONGÉLATION : 2 000 m

JET GROUTING : 12 000 m

PAROIS BERLINOISES : environ 500 m²

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : RATP

MAÎTRE D'ŒUVRE : Systra

ENTREPRISES : groupement Spie Tpci (mandataire), Chantiers Modernes, Dodin Campenon Bernard, Tpi, Spie Fondations, Botte Fondations

ABSTRACT

EXTENSION OF LINE 14 TO SAINT-OUEN – WORK SECTION T03 – ONE STATION, SIX ENGINEERING STRUCTURES AND AS MANY FOUNDATION TECHNIQUES

FRÉDÉRIC RENAUD, BOTTE FONDATIONS - PIERRE BOUTRU, BOTTE FONDATIONS - LAURENT BUISSART, SPIE TPCI

The Saint-Ouen RER (rapid transit system) station construction project aims to provide an interconnection with the RER C station, a passageway under RER C with a frame structure, and finally a broad opening onto the urban space via three accesses: a main access, a secondary access and a third so-called 'Sanzillon' access. A diaphragm wall, cement-grouted foundation raft, ground treatment, reinforced grout wall, Lutetian type retaining wall including secant jet grouting, a jet grouting foundation raft, micropiles and ground freezing are used to cope with the various project constraints. Risk management is performed with extensive instrumentation of the structures and their environment. □

PROLONGACIÓN DE LA LÍNEA 14 EN SAINT-OUEN – LOTE T03 – UNA ESTACIÓN, 6 CONSTRUCCIONES Y SUS TÉCNICAS DE CIMENTACIÓN

FRÉDÉRIC RENAUD, BOTTE FONDATIONS - PIERRE BOUTRU, BOTTE FONDATIONS - LAURENT BUISSART, SPIE TPCI

La obra de construcción de la estación de Saint-Ouen RER tiene como objetivo garantizar la interconexión con la estación del RER C, el paso bajo el RER C mediante una obra prefabricada y, finalmente, una amplia apertura al espacio urbano por tres accesos: un acceso principal, un acceso secundario y un tercer acceso, bautizado como Sanzillon. Pantalla de hormigón, losa de cimentación inyectada, tratamiento del terreno, pared de lechada armada, pared luteciana integrada en jet grouting secante, losa de cimentación por jet grouting, micropilotes, congelación para hacer frente a las distintas limitaciones del proyecto. La avanzada instrumentación de las obras y su entorno ha permitido controlar los riesgos. □



**PRO BTP,
LE MEILLEUR DE LA
PROTECTION SOCIALE**

SANTÉ
PRÉVOYANCE
RETRAITE
ÉPARGNE
ASSURANCES
ACTION SOCIALE
VACANCES

 **PRO BTP**
GROUPE

BIOCALCIS[®], LE RENFORCEMENT DES SOLS PAR CIMENTATION BIOLOGIQUE

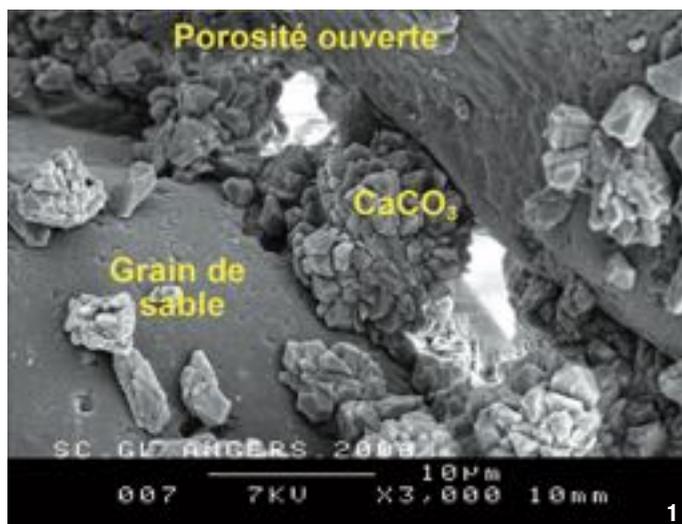
AUTEURS : ANNETTE ESNAULT FILET, CHEF DE PROJET R&D, SOLETANCHE BACHY - IRA GUTJAHR, CHEF DE PROJET BE, SOLETANCHE BACHY - LESLIE SAPIN, INGÉNIEUR PROCÉDÉ, SOLETANCHE BACHY - LOUIS LÉPINE, INGÉNIEUR BE, SOLETANCHE BACHY

LE BIOMIMÉTISME DANS LE DOMAINE DE LA GÉOTECHNIQUE ENTRAÎNE UN CHANGEMENT DE PARADIGME ET DES INNOVATIONS DE RUPTURE DANS LES TRAVAUX PUBLICS. LE BIOMIMÉTISME EST SOURCE D'INSPIRATION ET D'AMÉLIORATION DANS DES DOMAINES AUSSI VARIÉS QUE L'AÉRONAUTIQUE, LE MÉDICAL OU ENCORE LA MICROMÉCANIQUE. QUI AURAIT IMAGINÉ, IL Y A ENCORE 10 ANS, QUE LE SECTEUR DE LA GÉOTECHNIQUE SERAIT LUI AUSSI CONCERNÉ UN JOUR PAR CETTE NOUVELLE APPROCHE ? ET QU'UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE PROCÉDÉS ET DE SOLUTIONS BIO GÉOTECHNIQUES INSPIRÉS PAR LA NATURE TRANSFORMERAIT LA CONCEPTION, LA CONSTRUCTION, LA MISE EN ŒUVRE OU ENCORE LA MAINTENANCE D'INFRASTRUCTURES DURABLE ET RÉSILIENTES ? LE PROCÉDÉ BIOCALCIS[®] EST PRÉCURSEUR DANS CE DOMAINE ET SE DISTINGUE PAR LE RECOURS À DES BIOTECHNOLOGIES POUR CONSOLIDER LE SOL PAR VOIE BIOLOGIQUE.

GÉNÉRALITÉS

La biocimentation est un nouveau principe d'injection utilisé pour le renforcement des sols. Soletanche Bachy détient plusieurs brevets sur la mise en œuvre industrielle du procédé basé sur l'utilisation de bactéries non pathogènes extraites du milieu naturel. Ces bactéries vont agir sur une solution calcifiante et conduire à la formation de calcite - une forme minéralisée de carbonate de calcium - qui agira in situ comme un ciment biologique stable et pérenne.

Les fluides injectés, suspension bactérienne et solution calcifiante, sont injectés sans pression en raison de leur viscosité proche de celle de l'eau.



1- Image de la calcite CaCO_3 au Microscope Électronique à Balayage.

1- Image of calcite CaCO_3 by Scanning Electron Microscope.

En créant des ponts de calcite entre les grains, Biocalcis[®] apporte une cohésion à un sol granulaire initialement meuble sans changement significatif de sa porosité initiale, comme montré sur

l'image au microscope électronique à balayage (MEB) de la figure 1. Le résultat final se traduit par la transformation du sol en un massif cohérent de type grès-calcaire. Différents niveaux de calcification peuvent être obtenus en fon-

ction des dosages utilisés, les gammes de Rc les plus courantes étant comprises entre 100 et 500 kPa environ. Une caractéristique très intéressante du procédé est qu'il permet de garder la porosité ouverte sans modification

significative de la perméabilité du milieu après traitement, à la différence des autres procédés d'injection dont les principes sont illustrés en figure 2. Comme montré dans la figure 3, Biocalcis® peut être utilisé pour une

large gamme de granulométries de sols, y compris pour des granulométries hétérogènes incorporant une partie de graviers et/ou de silts.

Le procédé Biocalcis® couvre l'ensemble des étapes de mise en œuvre, depuis la phase de culture des bactéries, leur injection sur chantier, la gestion et le contrôle de l'ensemble des fluides de calcification.

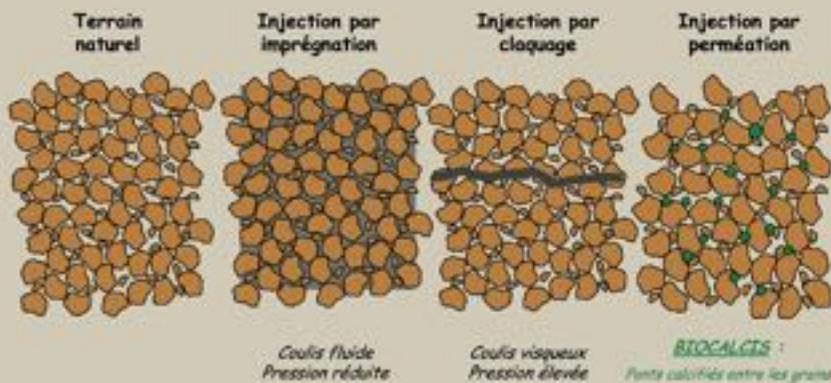
Un outil de modélisation a été spécialement développé à l'aide du logiciel Comsol, pour optimiser le dimensionnement en fonction des caractéristiques du site et des objectifs de traitement. Un exemple est donné figure 4, pour une mise en œuvre sous nappe par circulation à l'aide d'un réseau de puits d'injection et d'extraction. Le recours à un outil numérique permettant de modéliser le procédé de bio-calcification est un élément important afin de définir un protocole de traitement adapté au site.

Le modèle permet de coupler l'écoulement poreux, le transport des réactifs et leurs produits de réaction, la fixation et désactivation des bactéries, le profil de calcification.

Les paramètres de mise en œuvre peuvent ainsi être optimisés : maillage des forages, débits d'injection, concentration de la suspension bactérienne, concentration des solutions calcifiantes, extraction des fluides, etc.

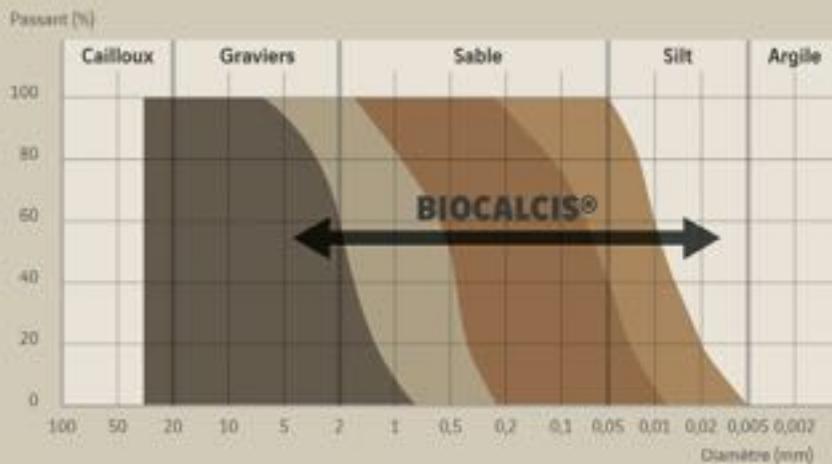
Une représentation des résultats d'une modélisation est illustrée figure 5, montrant les contours d'un traitement de biocalcification obtenus à partir de deux forages et une injection sous flux continu. ▶

DIFFÉRENTS PRINCIPES D'INJECTION



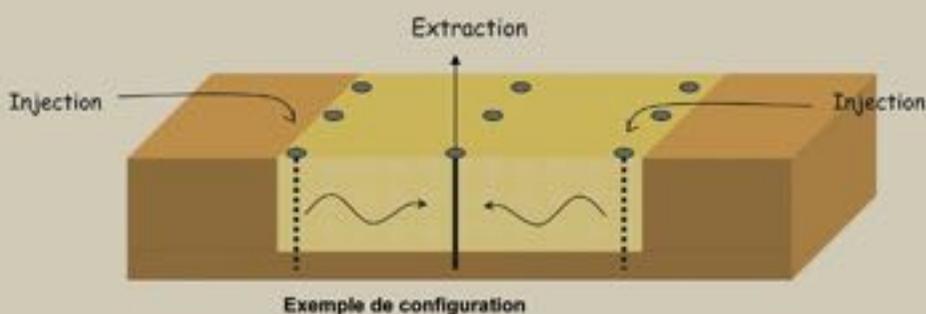
2

DOMAINES D'APPLICATIONS DU BIOCALCIS®



3

PRINCIPE DE MISE EN ŒUVRE SOUS NAPPE PAR INJECTION & EXTRACTION



4

2- Différents principes d'injection.

3- Domaines d'applications du Biocalcis®.

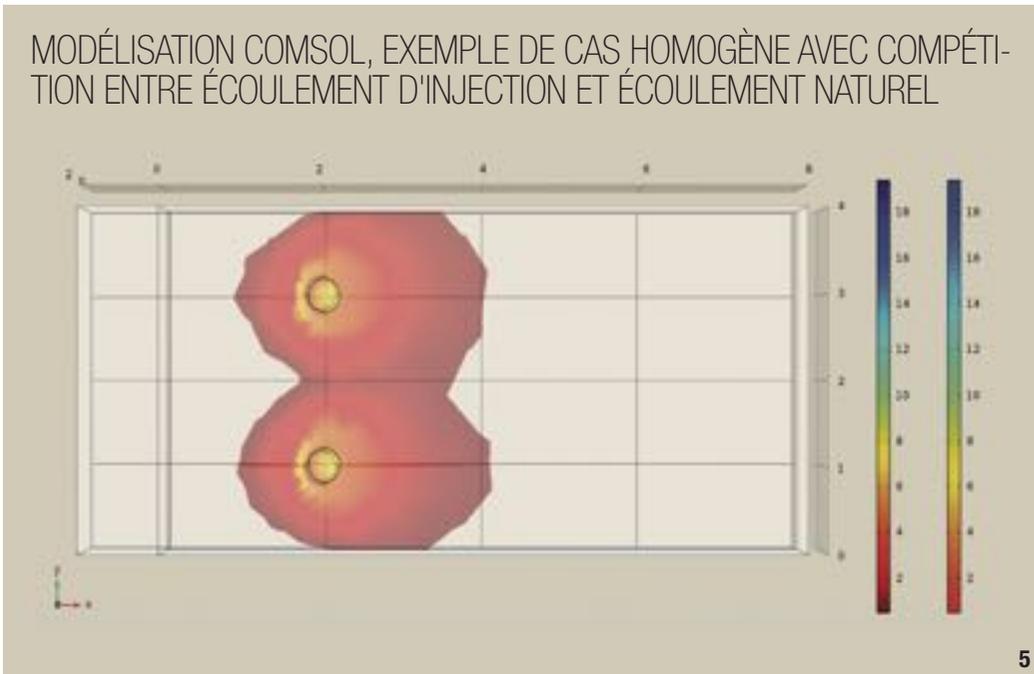
4- Principe de mise en œuvre sous nappe par injection & extraction.

2- Various injection techniques.

3- Fields of application of Biocalcis®.

4- Technique of application under water by injection & extraction.

MODÉLISATION COMSOL, EXEMPLE DE CAS HOMOGÈNE AVEC COMPÉTITION ENTRE ÉCOULEMENT D'INJECTION ET ÉCOULEMENT NATUREL



5 © SOLETANCHE BACHY

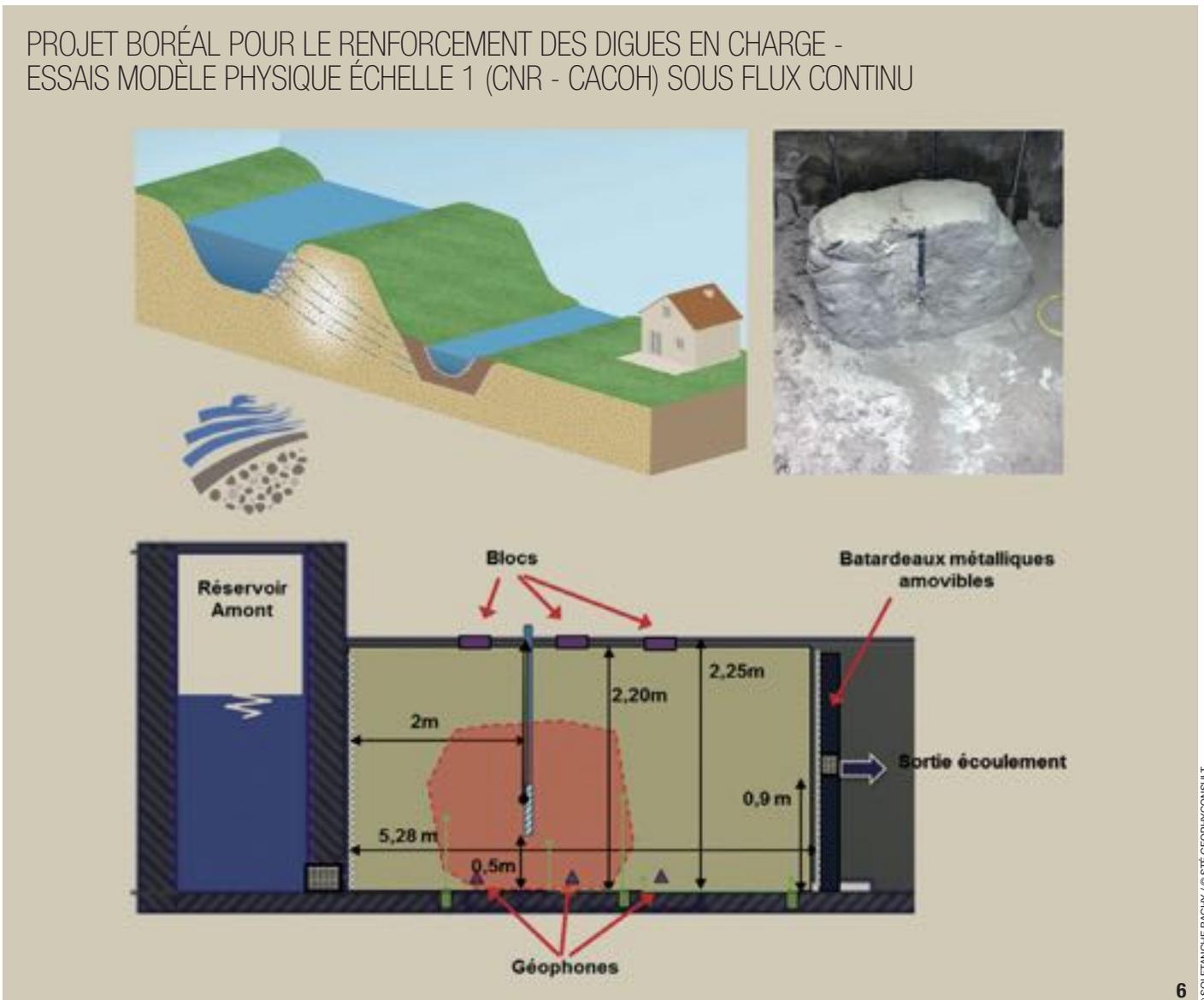
5- Modélisation Comsol, exemple de cas homogène avec compétition entre écoulement d'injection et écoulement naturel.

6- Projet BORÉAL pour le renforcement des digues en charge - Essais modèle physique échelle 1 (CNR - CACOH) sous flux continu.

5- Comsol model, an example of a homogeneous case with competition between injection flow and natural flow.

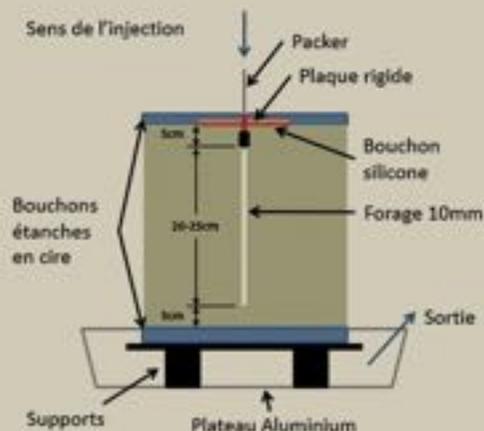
6- BORÉAL project for reinforcement of dykes under pressure - Full-scale physical model tests (CNR - CACOH) under continuous flow.

PROJET BORÉAL POUR LE RENFORCEMENT DES DIGUES EN CHARGE - ESSAIS MODÈLE PHYSIQUE ÉCHELLE 1 (CNR - CACOH) SOUS FLUX CONTINU



6 © SOLETANCHE BACHY / © SITE GEOPHYCONSULT

DISPOSITIF D'INJECTION DU BLOC CALCAIRE



→ L'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols, afin de réduire la poussée des terres ou d'augmenter la butée, ou pour toute autre application de renforcement nécessitant le traitement de sols fins. Par exemple, pour l'approfondissement des murs de quai existants, la biocalcification est une alternative intéressante de traitements, notamment dans des zones difficiles d'accès ou en présence de réseaux enterrés. Il s'agira de créer un massif de sol pour lequel les valeurs de cohésion/résistance à la compression simple à atteindre seront plus faibles que pour les traitements en soil-mixing par exemple. De plus, pour l'amélioration de la butée devant un ouvrage existant, un traitement par biocalcification permettra, de par sa nature, de s'affranchir de l'ajout d'éléments structurels (profilés, dalles, ...).

→ Les résultats obtenus pour ces applications en géotechnique ont amené l'entreprise à tester l'efficacité du Biocalcis® dans un tout autre domaine, celui du renforcement mécanique de piliers en calcaire d'un monument historique. Des essais ont été réalisés dans un bloc de 90 kg injecté à cœur à l'aide d'un forage de 10 mm selon un assemblage expérimental montré sur la figure 7. La précipitation de calcite in situ par voie biologique permet en effet d'accroître considérablement la résistance mécanique de cette roche calcaire altérée, en passant d'une Rc de l'ordre de 1 MPa avant traitement à une valeur supérieure à 10 MPa. La figure 8 montre la relation entre la résistance mécanique et la densité sèche du matériau et illustre l'évolution de la résistance avant et après traitement. En complément, les propriétés microstructurales du matériau avant et après traitement ont été étudiées par micro-tomographie RX, technique d'imagerie par absorption de rayons X. Comme montré dans l'exemple de la figure 9, en reconstituant l'image 3D d'un échantillon, on peut mettre en évidence l'évolution de sa microporosité et de sa densité avant et après calcification. Cette solution, encore en phase d'optimisation, permettrait de garantir une solution pérenne dans le temps en régénérant le calcaire dans la masse. Elle est de plus respectueuse de l'environnement architectural du site car elle n'altère pas l'aspect de la pierre. ▷

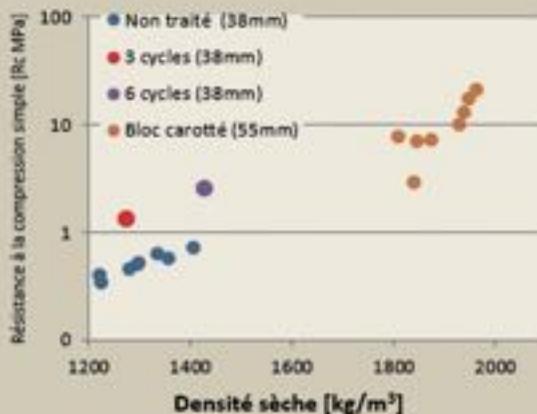
7- Dispositif d'injection du bloc calcaire.

8- Résistance mécanique des échantillons avant et après traitement, en fonction de la densité sèche.

7- Limestone block injection device.

8- Mechanical strength of samples before and after treatment, according to the dry density.

RÉSISTANCE MÉCANIQUE DES ÉCHANTILLONS AVANT ET APRÈS TRAITEMENT, EN FONCTION DE LA DENSITÉ SÈCHE



APPLICATIONS TYPIQUES

Les applications typiques du procédé concernent principalement :

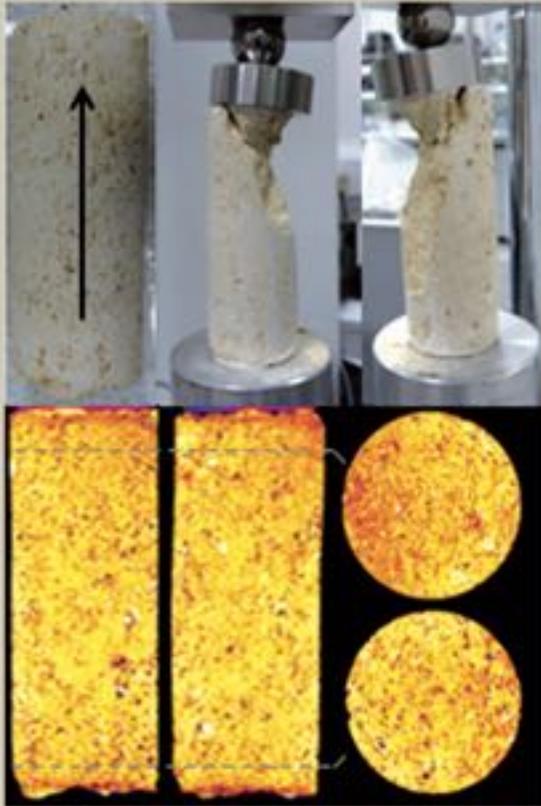
→ Les traitements contre la liquéfaction des sols : il est possible de réduire les risques de liquéfaction de sables lâches en augmentant leur résistance au cisaillement grâce à la création de ponts de calcite entre les grains qui transforment le sol granulaire en un massif de sol cohérent caractérisé par sa résistance à la compression simple et sa cohésion Cu. Pour cette application, des Cu de quelques dizaines de kPa sont suffisants et ces valeurs sont facilement atteignables par biocalcification. La perméabilité étant inchangée à l'issue du traitement,

il n'y a pas d'obstacle à la dissipation des pressions interstitielles en cas de séisme.

→ Les traitements contre les risques d'érosion dans des digues ou leur fondation. Le lessivage de fines particules entraînant l'érosion interne (entre des silts et des graviers par exemple) ou les problèmes de suffusion (érosion sélective de fines particules dans une matrice plus grossière) pourraient être évités car les fines particules seront fixées entre elles ou sur des particules plus grossières. Dans les deux cas de figure, en raison de gradients hydrauliques potentiellement importants, il est nécessaire de procéder à des adaptations du procédé pour le rendre efficace sous écoulement

hydraulique continu. C'est l'un des thèmes abordés dans le cadre du projet de recherche FUI BORÉAL coordonné par Soletanche Bachy et réalisé en partenariat avec EDF, CNR, geophyConsult, Enoveo et des laboratoires académiques des universités d'Angers (laboratoire de MicroBioGéologie) et de Grenoble (LTHE, 3SR) au cours duquel des essais à l'échelle 1 sont réalisés. La figure 6 illustre la thématique du projet sur les digues et montre une coupe du modèle physique installé au laboratoire CACOH de la CNR à Lyon, ainsi que la photo d'un bulbe de sable biocalcifié de 2 m de diamètre obtenu dans ce dispositif suite aux premiers essais d'injection.

TOMOGRAPHIE RX D'UN ÉCHANTILLON
APRÈS BIOCALCIFICATION



9

© SOLETANCHE BACHY



10

© SOLETANCHE BACHY

**RENFORCEMENT D'UN MUR
EN REMBLAI RENFORCÉ**

Le projet concerne le renforcement d'un mur de soutènement situé sous la culée du pont d'un échangeur autoroutier, dans le sud de la France. Il s'agit d'un ouvrage en sol renforcé, construit dans les années 70, constitué d'un mur en remblai compacté et renforcé par des armatures subhorizontales en acier. Le parement de ce mur est constitué d'écailles en béton, dans lesquelles passent une ou plusieurs épingles en acier connectées aux armatures. En raison de risques de corrosion des

armatures, il est nécessaire d'engager des travaux de renforcement de ce mur en terre armée.

Le site se trouve en zone urbaine, particulièrement difficile d'accès sous la culée du pont, avec le passage d'un tramway en dessous et la présence d'immeubles d'habitation à proximité immédiate. De plus, les travaux doivent être exécutés sans interrompre la circulation de l'autoroute ni celle du tramway.

Le contexte particulier du site ne permet pas le recours à des techniques traditionnelles de traitement.



11

© SOLETANCHE BACHY

9- Tomographie RX d'un échantillon après biocalcification.

10- Chantier Biocalcis®, vue générale de l'implantation.

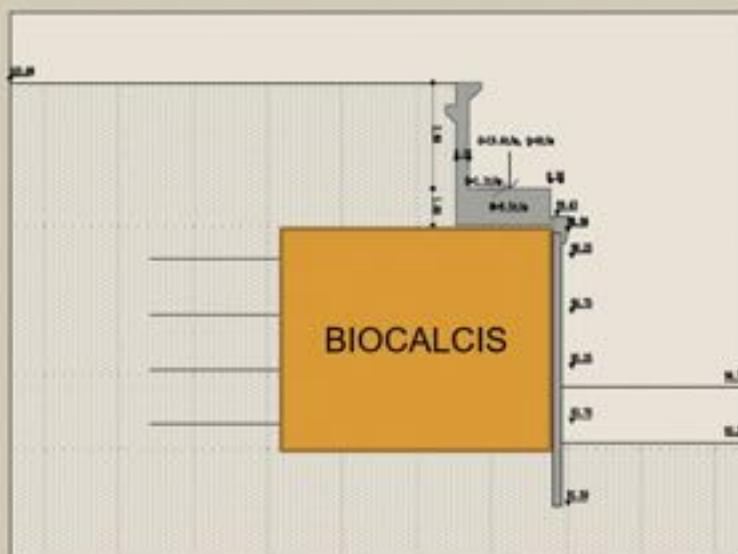
11- Bloc calcifié de Biocalcis®, issu d'un carottage en grand diamètre.

9- X-ray tomography of a sample after biocalcification.

10- Biocalcis® project, general view of the layout.

11- Calcified block of Biocalcis®, coming from large-diameter core sampling.

PRINCIPE DU RENFORCEMENT, MUR POIDS BIOCALCIS®



© SOLETANCHE BACHY

12

La technique de renforcement par clouage n'est pas applicable car l'emprise devant le parement n'est pas suffisante pour y installer la foreuse.

L'utilisation du jet-grouting est écartée en raison des risques sur la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis des pressions d'injection trop fortes.

Le remblai étant constitué d'un matériau compacté de très faible perméabilité (matrice sablo-limoneuse et galets centimétriques à décimétriques ; K inférieure à 10^{-6} m/s), il n'est pas injectable avec les procédés classiques.

Le procédé Biocalcis® a été étudié pour effectuer ce renforcement, la faisabilité du procédé ayant préalablement été vérifiée à différentes échelles - labora-

toire et colonne pilote - sur le matériau prélevé sur le site.

Des essais de convenance ont ensuite été réalisés sur le terrain en vue de confirmer le dimensionnement final pour les futurs travaux.

12- Principe du renforcement, mur poids Biocalcis®.

12- Renforcement technique, Biocalcis® gravity wall.

Les essais ont consisté en l'implantation de 23 forages horizontaux de 5 m de profondeur, répartis sur trois lignes d'injection, avec une ligne de drainage à la base de la zone injectée (figure 10).

Un volume de l'ordre de 100 m^3 a ainsi été biocalcifié, sur une bande de 3 m de hauteur et 6 m de longueur.

Pour contrôler la qualité du résultat final, une campagne de reconnaissance a été organisée avec la réalisation de carottages (figure 11) et d'essais presiométriques.

Ces essais ont permis de conclure à la faisabilité du procédé Biocalcis® pour le renforcement du mur et à proposer la solution finale qui consistera à fabri-

quer un bloc biocalcifié qui fonctionnera en mur poids selon le principe de la figure 12.

CONCLUSION

La consolidation de sols par voie biologique offre une alternative très intéressante par rapport aux procédés existants, et plus particulièrement dans l'injection des sols fins à très fins.

Cette écotechnologie innovante imite les processus naturels de calcification pour cimenter le sol en place tout en laissant la porosité ouverte. Les développements récents ont permis de mettre au point et de valider le procédé pour des applications sous nappe en équilibre hydrostatique et hors nappe. Pour les maîtres d'ouvrage, il s'agit d'étendre considérablement le champ des possibilités en matière, par exemple, de lutte contre la liquéfaction des sols dans des zones difficilement accessibles comme à l'intérieur ou sous des bâtiments existants ou pour contrôler efficacement les phénomènes d'érosion interne sur différents types d'ouvrages, comme des digues, avec un procédé à la fois durable, efficace, non intrusif, qui permet de traiter les points singuliers.

C'est un procédé qui offre un large champ d'application pour toutes applications réclamant une augmentation de la résistance du sol.

Le renforcement par Biocalcis® ne perturbe pas le régime hydraulique au niveau de la zone traitée alors que les méthodes classiques, comme la paroi étanche ou l'injection bloquent tous les écoulements, y compris ceux de l'aquifère sous-jacent.

Le procédé présente un bilan carbone favorable comparé aux techniques existantes nécessitant de grandes quantités de ciment. □

ABSTRACT

BIOCALCIS®, SOIL REINFORCEMENT BY BIOLOGICAL CEMENTATION

ANNETTE ESNAULT FILET, SOLETANCHE BACHY - IRA GUTJAHR, SOLETANCHE BACHY - LESLIE SAPIN, SOLETANCHE BACHY - LOUIS LÉPINE, SOLETANCHE BACHY

The rapid development of biotechnologies and the appearance of new environmental constraints have led scientists to draw inspiration from natural biological phenomena to design new processes to replace existing materials with a large carbon footprint. Biological soil cementation is a concrete example of these recent developments. Soletanche Bachy has developed a new biocementation injection process called Biocalcis®, tested and validated on an industrial scale on site. This process provides new solutions, notably in the area of prevention of soil liquefaction or internal erosion and for any consolidation application in fine ground which cannot be treated with conventional processes. □

BIOCALCIS®, REFUERZO DE SUELOS POR CIMENTACIÓN BIOLÓGICA

ANNETTE ESNAULT FILET, SOLETANCHE BACHY - IRA GUTJAHR, SOLETANCHE BACHY - LESLIE SAPIN, SOLETANCHE BACHY - LOUIS LÉPINE, SOLETANCHE BACHY

El auge de las biotecnologías y la aparición de nuevas limitaciones medioambientales han llevado a los científicos a inspirarse en fenómenos biológicos naturales para diseñar nuevos procedimientos de sustitución de los materiales existentes con una fuerte huella de carbono. La cimentación de suelos por vía biológica es un ejemplo concreto de estos recientes avances. Soletanche Bachy ha creado un nuevo procedimiento de inyección de biocimentación, denominado Biocalcis®, probado y validado a escala industrial in-situ. Esta técnica aporta nuevas soluciones, en especial en el ámbito de la prevención de la licuefacción o la erosión interna de los suelos, y para cualquier aplicación de consolidación en terrenos finos que no pueda tratarse con los procedimientos convencionales. □



© PHOTOTHÈQUE SEFI-INTRAFOR

LE BILM À ISSY-LES-MOULINEAUX - UN BASSIN CACHÉ SOUS UN STADE EN PLEIN CENTRE VILLE

AUTEUR : CHRISTOPHE ALLEMOZ, RESPONSABLE ADJOINT SECTEUR PAROI MOULÉE, SEFI-INTRAFOR

BIEN PLACÉ DERRIÈRE LE PALAIS DES SPORTS DE LA VILLE D'ISSY-LES-MOULINEAUX, LE STADE ROBERT CHARPENTIER A DONNÉ LIEU A DES TRAVAUX DONT L'AMPLEUR RESTERA INSOUÇONNABLE DANS CETTE ARÈNE DÉDIÉE AU BALLON ROND. SEFI-INTRAFOR A RÉALISÉ LES PAROIS MOULÉES D'UN BASSIN ENTERRÉ DE 40 M DE DIAMÈTRE, AINSI QUE LE DISPOSITIF D'ANCRAGE DU RADIER. CET OUVRAGE DE 23 400 M³ DE CAPACITÉ, INITIÉ PAR LE CONSEIL DÉPARTEMENTAL DES HAUTS-DE-SEINE, PERMETTRA DE STOCKER TEMPORAIREMENT LES EAUX PLUVIALES LORS D'INTEMPÉRIES VIOLENTES. LES INONDATIONS DU QUARTIER SERONT BIENTÔT DE L'HISTOIRE ANCIENNE GRÂCE À DES FONDATIONS HORS NORME.

UN EMPLACEMENT STRATÉGIQUE ÉTUDIÉ POUR UN FONCTIONNEMENT OPTIMISÉ

De nos jours, il n'est pas simple, dans un centre-ville urbanisé, de trouver un site pour placer un réservoir tampon avec de telles dimensions.

De plus, s'agissant d'assainir un quartier meurtri par les inondations, les options d'implantation étaient relativement restreintes, voire nulles. Faute d'une zone disponible localement, la maîtrise d'ouvrage, assistée de sa maîtrise d'œuvre, a convergé vers une solution ingénieuse, invisible après travaux :

1- Vue du bassin
terrassé.

1- View of the
earthworked
basin.

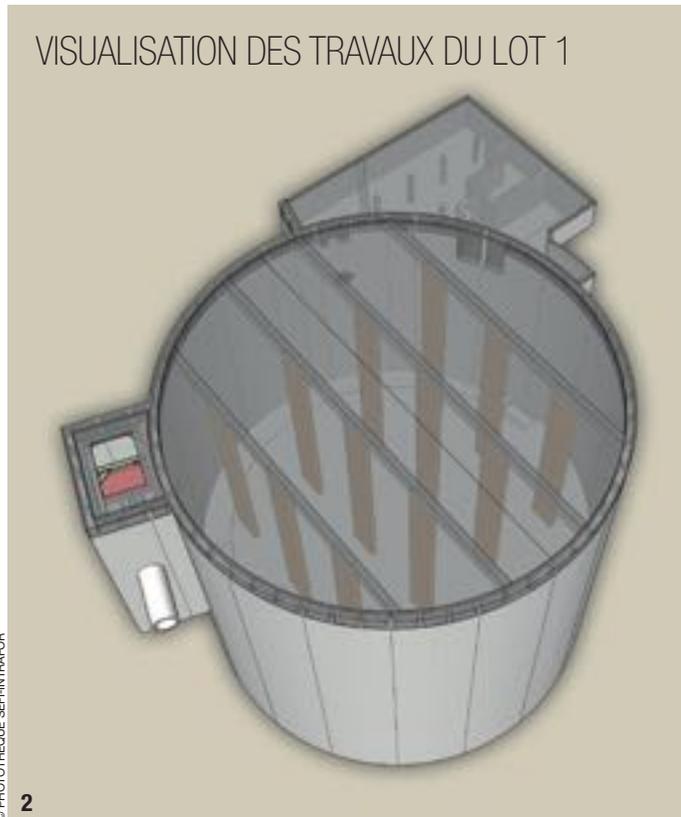
- Neutralisation du stade à proximité de la zone ciblée, le temps des travaux, qui offre une surface adaptée aux travaux et aux installations ;
- Réalisation des travaux du bassin sur le stade, ainsi que des ouvrages annexes situés dans les rues adjacentes ;

- Fermeture du bassin par la dalle de couverture posée sur les barrettes/poteaux afin de reconstituer la pelouse ;
 - Restitution de la zone à sa destination initiale : le terrain de football.
- La condamnation du stade pendant de nombreux mois est le fruit d'un accord entre le Conseil Départemental des Hauts de Seine, la ville d'Issy-les-Moulineaux et la Communauté d'Agglomération du Grand Paris Seine Ouest.

2- Visualisation des travaux du Lot 1.

3- Plan d'installation de chantier phase « Paroi Moulée ».

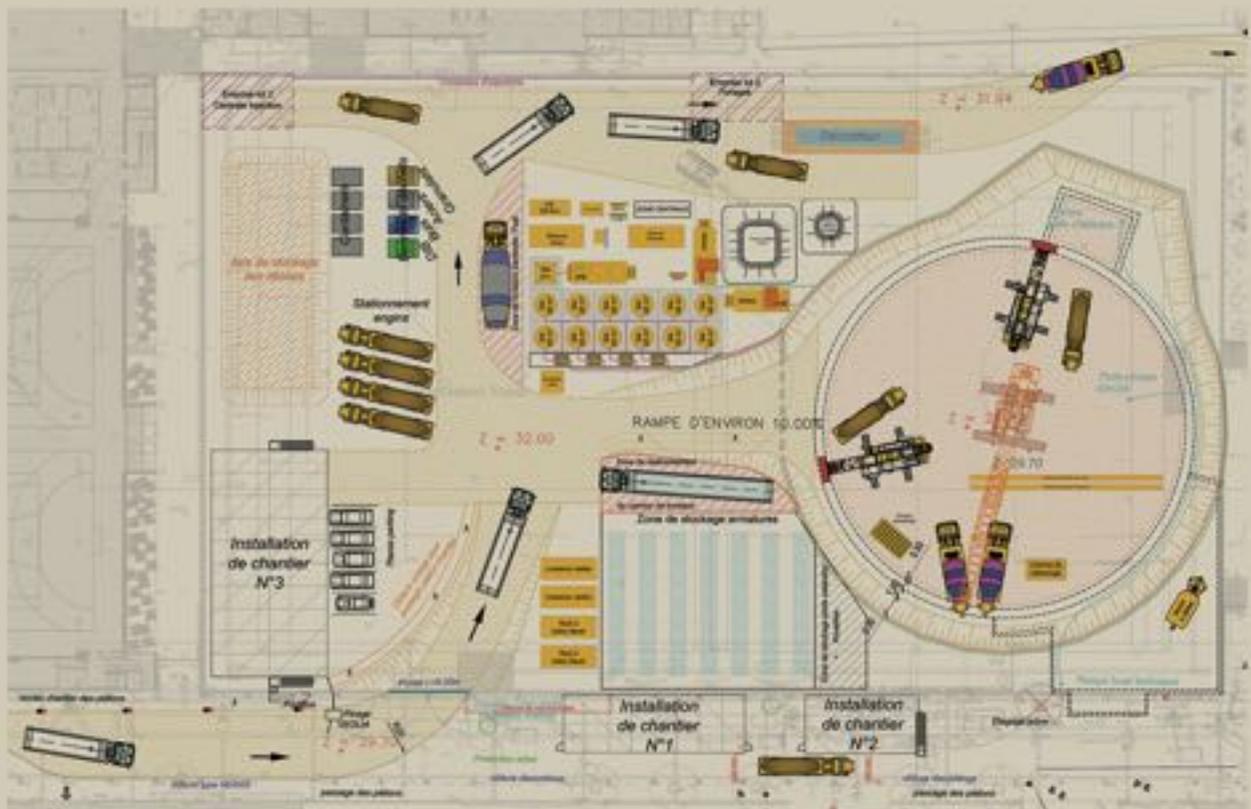
- 2- View of work on work section 1.**
- 3- Site layout plan in 'diaphragm wall' phase.**



2

Le fonctionnement de l'ouvrage reste fidèle au principe du réservoir tampon. Le bassin est généralement vide. Lors de fortes averses, les eaux sont collectées via deux déversoirs d'orage reliés au bassin par une canalisation de 2000 mm de diamètre. Le premier déversoir, rue du Gouverneur Général Éboué, amène l'eau au réservoir par une conduite de 12 m de long posée à ciel ouvert, puis remblayée. Le second, boulevard des Frères Voisin, transfère l'eau collectée par une canalisation de 161 m de long, réalisée par un tunnelier, pour s'affranchir de l'urbanisation. Dès que l'accalmie s'annonce, l'eau emmagasinée est alors restituée au réseau d'assainissement par de puissantes pompes installées en fond de bassin. Le tout est piloté à partir d'un local technique, qui renferme également la désodorisation. Un puits accolé au bassin sert de point de départ au tunnelier (figure 2). Ce bassin colossal est un outil indispensable pour la gestion des épisodes pluvieux conséquents.

PLAN D'INSTALLATION DE CHANTIER PHASE « PAROI MOULÉE »



3



4

© PHOTOTHÈQUE SEFI-INTRAFOR

4- Une organisation optimale.
5- Plan de panneautage.

4- An optimal organisation.
5- Panelling layout.

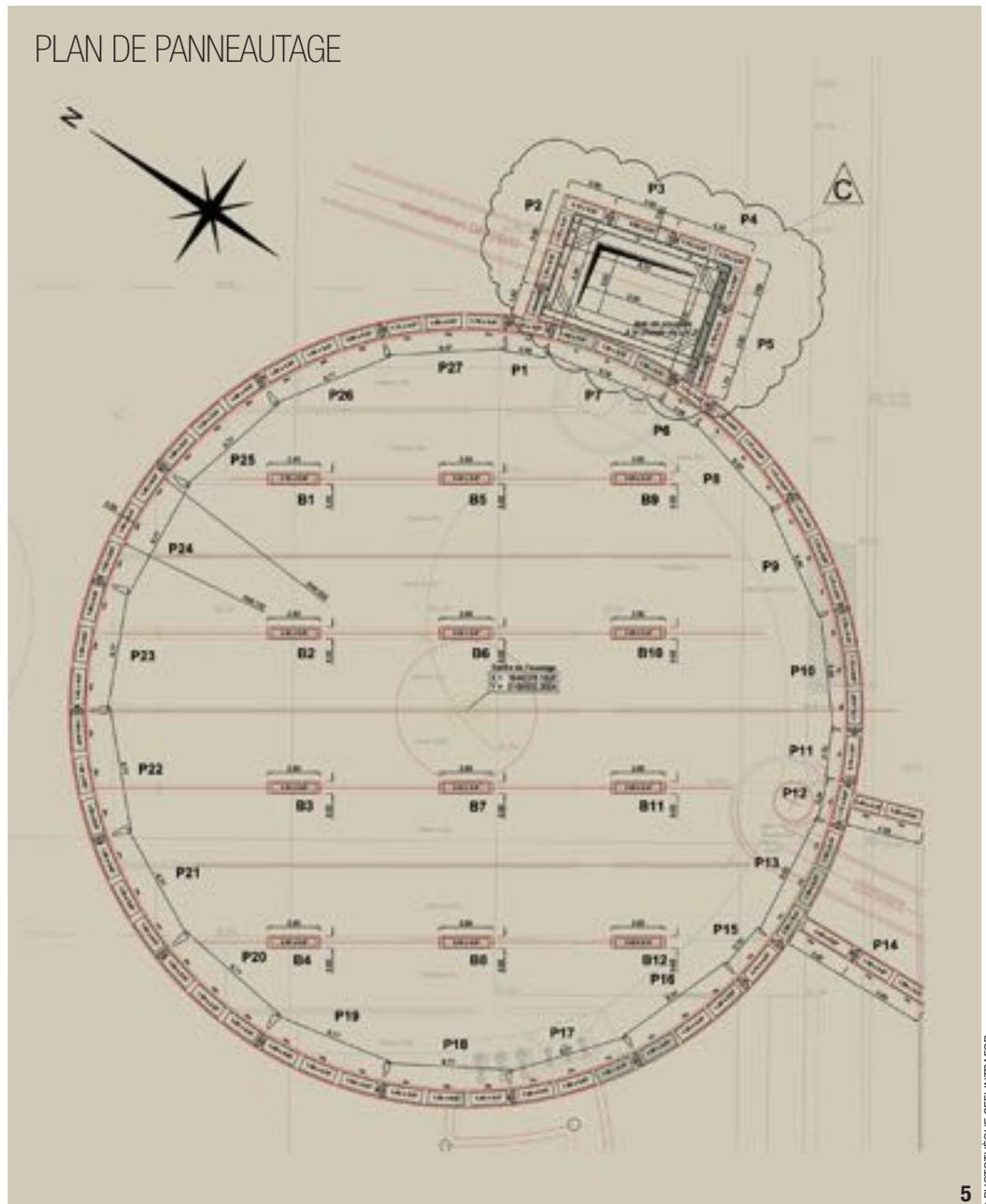
D'une part, il évitera la montée en charge du réseau d'assainissement par une restitution régulée des eaux, et, d'autre part, il limitera les rejets d'eau polluée en Seine par une rétention des premières eaux qui, bien souvent, véhiculent des polluants de tout genre. Le maître d'ouvrage a confié le Lot 1, bassin et local technique, au groupe Fayat représenté par un groupement d'entreprises composé de : Razel-Bec (génie-civil et mandataire) - Sefi-Intrafor (fondations spéciales) - Coteg (terrassement).

Sefi-Intrafor ayant plus particulièrement en charge les travaux de paroi moulée, barrettes, et micropieux.

UN ENVIRONNEMENT SENSIBLE

Construire en centre-ville est un exercice difficile, qui doit prendre en compte toutes les contraintes environnementales susceptibles de remettre en cause la quiétude des riverains : le bruit, la poussière, la propreté des rues du quartier, la gestion de la circulation, entre autres. La zone de travail et d'évolution se résumait, comme décrit précédemment, aux dimensions d'un terrain de football. La moitié du terrain pour la construction du bassin, l'autre moitié pour les ins-

PLAN DE PANNEAUTAGE



5

© PHOTOTHÈQUE SEFI-INTRAFOR



tallations de chantier et les stockages. Le plan d'installation de chantier en phase paroi moulée était d'une densité qui ne pouvait laisser place à l'improvisation. Comme le montre la figure 3, chaque m² était optimisé.

Le chantier est entouré par deux axes de circulation et les riverains :

- À l'ouest, par le Palais des Sports d'Issy-les-Moulineaux ;
- Au nord, par les vestiaires du stade et les riverains les plus proches ;
- À l'est par la rue du Gouverneur Général Éboué, à sens unique ;

→ Au sud par la rue Charlot, voie à vocation piétonne qui permet de se rendre du centre-ville à la gare RER et inversement.

6- Puits d'attaque avec butonnage de tête galvanisé.

6- Entry shaft with galvanised head staying.

RUE CHARLOT

C'est l'axe privilégié du chantier. C'est une voie piétonne dont l'accès est condamné par des plots amovibles, où seuls les utilisateurs ont le code d'entrée : Service de la voirie, Engie, riverains. Pour le projet, c'est devenu l'axe d'accès au chantier, avec une gestion maîtrisée des accédants au chantier. Comme le montre le plan d'installation, la rue Charlot est utilisée pour se rendre sur le chantier, la sortie se faisant par la rue du Gouverneur Général Éboué.

Il a donc fallu faire cohabiter le trafic dédié au chantier avec le flot de piétons aux heures de pointe matin et soir, qui empruntent cet itinéraire de choix pour rejoindre la gare.

Pour mener à bien cette mission, un compagnon orientait le trafic du chantier à l'entrée de la rue Charlot en gérant la commande des bornes escamotables à la demande, pendant les heures d'ouverture du chantier.

Le trafic chantier était séparé du trafic piéton par des barrières/grilles de type « Héras » de 2 m de haut. ▷



© PHOTO THÉOQUE SEFI-INTRA FOR

6



© PHOTO THÉQUE SEFI-INTRAFOR

LE PALAIS DES SPORTS

Il a parfois fallu coordonner la desserte du chantier avec les nombreuses activités du Palais des Sports, mitoyen également de la rue Charlot.

En effet, cet édifice accueille de nombreuses manifestations qui vont de la compétition sportive européenne, voire mondiale, aux forums locaux en passant par des expositions.

De ce fait, le Palais des Sports utilise la rue Charlot pour approvisionner chaque manifestation avec la logistique qui l'accompagne. Les camions stationnent donc dans cette voie le temps des installations/replis. Un planning événementiel a permis une anticipation de la co-activité dans cette étroite ruelle.

LES RIVERAINS

Comme bon nombre de nos concitoyens, les riverains étaient particulièrement attentifs au bruit. Les fondations spéciales génèrent des nuisances sonores inhérentes à ce type d'activité, primo par la puissance des grues de forage et secundo par l'utilisation qui en était faite. Les horaires du chantier étaient de 7h30 à 19h00 en semaine. La moindre dérive était sanctionnée immédiatement par les voisins, via les Services Municipaux.

Compte-tenu des dimensions de l'ouvrage et par conséquent des dimensions des panneaux de paroi moulée, les coulages atteignaient souvent 240 m³.

Chaque jour de bétonnage était un challenge, qui a été relevé avec succès, malgré quelques accrocs rectifiés au fil de la production.

RUE DU GOUVERNEUR GÉNÉRAL ÉBOUÉ

La sortie du chantier débouchait directement sur cette double voie à sens unique. Un aménagement spécifique avec feux tricolores a permis de contrôler la sortie des véhicules, de manière à ce qu'ils s'insèrent dans la circulation parfois soutenue à certaines heures de la journée.

UN PHASAGE AMÉNAGÉ

Non seulement le phasage était très précis entre les co-traitants et partenaires, mais également avec les entreprises du Lot 2, en charge du tunnelier et des déversoirs d'orage. Les interfaces étaient nombreuses avec des mises à disposition programmées. Pour respecter le planning du marché, deux grues de forage étaient dédiées à la paroi moulée avec une centrale

7- Les barrettes entièrement découvertes.

8- Atelier classique de forage.

7- Completely dug barrettes.

8- Conventional drilling equipment.

à boue bentonitique capable de fournir et de stocker l'équivalent de trois panneaux, soit 720 m³.

Pour compléter les moyens mobilisés, deux autres grues ont été déployées :

- Une grue de manutention flèche treillis de 110 t, pour les cages d'armatures et les coffrages joints ;
- Une grue de manutention télescopique de 80 t pour les bétonnages.

Par anticipation, et pour limiter le temps consacré au recépage, la plateforme de travail a été amenée au niveau de l'arase de recépage. Le pré-terrassement de 2 m, exécuté en parallèle des installations, a permis de mettre en œuvre cette opportunité en calant les murettes guides au niveau de l'arase finale.

En revanche, cette décision a contraint Sefi-Intrafor à faire évoluer ses quatre grues dans un cercle de 40 m de diamètre comme le montre la figure 4. Le bétonnage par débordement a donc minimisé cette tâche. Les finitions de recépage se sont faites manuellement à l'avancement, les surlendemain de bétonnage. Les contreparties étaient :

- La gestion des boues polluées par le béton en fin de bétonnage et leur stockage provisoire ;
- Les filants dépassant de 1 m au-dessus des murettes, qu'il a fallu équiper de protections.

L'autre temps fort du chantier pour Sefi-Intrafor concerne la réalisation des micropieux et les essais préalables indispensables. Les micropieux ont fait l'objet d'une attention particulière avec plusieurs scénarios selon les résultats de l'essai de pompage. Le choix de la plateforme intermédiaire était le plus judicieux.

En définitive, le phasage retenu pour nos travaux a été le suivant :

- 1-** Réalisation de la plateforme de travail à 30,00 NGF pour la paroi moulée avec un pré-terrassement de 2,00 m.
- 2-** Réalisation des murettes guides de la paroi moulée.

- 3- Réalisation de la paroi moulée en épaisseur 82 cm profondeur 38 m et des barrettes.
- 4- Enlèvement des murettes guides.
- 5- Poutre de couronnement.
- 6- Essai de pompage et pompage.
- 7- Terrassement phase 1 à 18,00 NGF et rabotage.
- 8- Dalle béton pour la réalisation des micropieux.
- 9- Réalisation des micropieux d'ancrage en arase basse.

9- Détails des micropieux d'essais.

9- Details of test micropiles.

- 10- Terrassement phase 2 à 6,00 NGF et rabotage.
- 11- Recépage des micropieux et essais de contrôle.
- 12- Ferrailage et coulage du radier.

LA PAROI MOULÉE

L'ouvrage majeur du lot 1 est constitué d'une paroi moulée, enceinte enterrée du bassin de rétention. Sur le plan de panneautage (figure 5) nous pouvons distinguer les différents ouvrages

annexes intégrés à la réalisation globale de la paroi moulée avec, en particulier :

→ P1 à P7 : puits d'attaque du tunnelier.

→ P12 à P14 : amorces pour déversoir Éboué.

→ Le bassin : constitué des panneaux P7 à P13, P15 à P27, P1.

→ Panneaux spécifiques : P1, P6, P12 et P13. Ces panneaux sont originaux puisque, d'une part, ils sont en forme de « T » et, d'autre part, la profondeur de paroi côté bassin (38 m) est différente de la profondeur de paroi côté ouvrage annexe (20 m). Le « T » permet de garantir l'étanchéité entre deux parois moulées d'ouvrages distincts.

→ B1 à B12 : 12 barrettes de soutien des poutres et de la dalle de couverture.

La surface de forage représente 6500 m² pour 40 jours de travail soit une cadence journalière de 162,5 m²/j avec un prévisionnel d'un coulage par jour (27 panneaux - 12 barrettes).

LA PAROI MOULÉE DU BASSIN

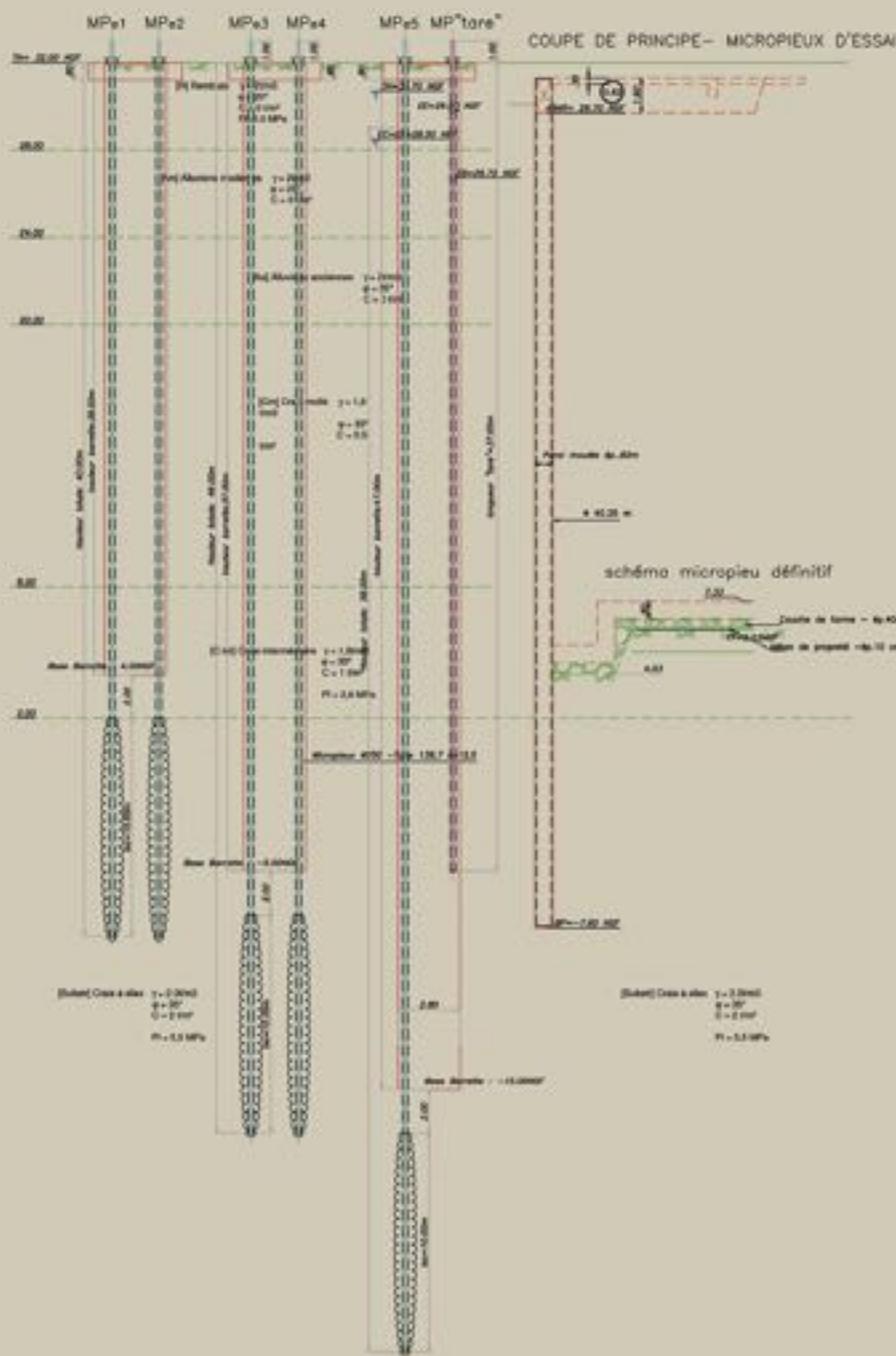
La paroi moulée du bassin a été réalisée en épaisseur de 82 cm, à une profondeur de 38 m. Pour garantir les 23400 m³ de capacité en tenant compte de la tolérance de verticalité de la paroi moulée, le diamètre théorique a été porté à 40,25 m.

Les panneaux courants, d'une longueur de 6,77 m, représentent une surface de 257 m² pour un volume de déblais théoriques de 210 m³. Avec une surconsommation moyenne de 15%, les coulages de ces panneaux avoisinent les 240 m³ de béton C35/45 XA2. La place faisant défaut, les cages d'armatures ne pouvaient être montées sur site. Les cages étaient livrées en flux tendu puisque chaque panneau courant était composé de 3 cages dans la hauteur et 3 unités par panneau soit 9 éléments pour équiper un panneau, d'où la nécessité d'avoir deux grues de manutention sur le site.

La plage horaire imposée de 7h30 - 19h00 ne permettait pas la mise en place des coffrages-joint, l'équipement du panneau avec les 9 éléments d'armatures et le bétonnage du panneau. Les équipes ont dû faire preuve d'anticipation les veilles de bétonnage pour la mise en place des coffrages-joints et quelques éléments de cages pour être sûr de finir le bétonnage dans le temps imparti.

Pour une mise à disposition du puits d'attaque au Lot 2, toute la zone du bassin ne pouvait être occupée.

DÉTAILS DES MICROPIEUX D'ESSAIS





10

© PHOTOTHÈQUE SEFI-INTRAFOR

La priorité était de finaliser les panneaux P1 à P7 de manière à libérer cette partie d'ouvrage au plus tôt.

Ce délai partiel a généré par la suite une co-activité avec le terrassement et le génie-civil jusqu'à la fin de la paroi moulée.

La figure 6 montre la poutre de couronnement du puits d'attaque réalisée avec le premier lit de butonnage.

À l'arrière-plan, la paroi moulée du bassin en production.

LA PAROI MOULÉE DU Puits D'ATTAQUE ET LES AMORCES

La paroi moulée du puits d'attaque a été réalisée en épaisseur 82 cm, à une profondeur de 20 m. Ces panneaux sont beaucoup moins volumineux que les panneaux du bassin. L'objectif de couler un panneau ou une barrette par jour a pu être respecté en alternant « grand bétonnage » et « petit bétonnage ».

LES BARRETTES

Les barrettes ont été exécutées en épaisseur 82 cm, sur des longueurs de 2,80 m, à une profondeur de 29 m. Le volume béton de chaque barrette était de l'ordre de 75 m³. La profondeur du bassin, 25 m environ, amplifie l'impression d'élançement lorsque l'on se positionne au niveau du radier (figure 7).

LES TERRAINS - LES MOYENS

Les terrains traversés ont été conformes au rapport de sol avec les couches suivantes : Remblais, Alluvions Modernes, Alluvions Anciennes, Craie Molle, Craie Intermédiaire et Craie à Silex.

Pas de surprise au niveau des cadences, quelques passages difficiles dans la Craie à Silex, qui n'ont pas altéré l'organisation du chantier.

Les porteurs Liebherr 855 munis de bennes lourdes (figure 8) ont parfaitement rempli leur office.

LES MICROPIEUX

L'étude de cette phase a démarré très tôt, dans un premier temps pour caler les essais préalables au tout début du chantier, puis pour finaliser le dimensionnement des micropieux.

LES MICROPIEUX D'ESSAIS

Pour minimiser l'impact des micropieux d'essais sur le planning, l'opération a été menée pendant la phase d'installation de la paroi moulée.

Le programme des travaux étant primordial, la méthode de pose de micropieux en « autoforé » avait été choisie, méthode qui diminue les manutentions après forage et supprime l'utilisation permanente d'un engin de levage.

Les micropieux de l'ouvrage devaient être exécutés selon la même métho-

10- Réalisation des micropieux.

10- Exécution of micropiles.

dologie que les micropieux d'essais. Les micropieux, d'une longueur estimée de 20 à 35 m, devaient être faits depuis le fond de fouille situé à -25 m par rapport à la plateforme de travail.

En réalisant ces micropieux au démarrage du chantier, les équipes ont été confrontées à des longueurs de forage de l'ordre de 60 m.

À cette difficulté est venu s'ajouter la problématique de la longueur libre de ces micropieux d'essais. Les longueurs de scellement des horizons à tester étaient de 10 m. Pour s'affranchir de ce sujet en isolant la partie scellée de la partie libre, une procédure (figure 9) a été imaginée :

- Réalisation de 3 barrettes de 28 m, 37 m, et 47 m de profondeur, dès que la grue de forage de la paroi moulée était opérationnelle ;
- Équipement de chaque barrette de deux tubes de réservation de 300 mm intérieur, scellés au coulis ;

PRINCIPALES QUANTITÉS RÉALISÉES PAR SEFI-INTRAFOR

PAROI MOULÉE ET BARRETTES :

- 6 500 m² de forage en 82 cm
- 6 400 m³ de béton
- 400 t d'armatures

MICROPIEUX :

170 unités de 20 m à 30 m

- Forage et pose des micropieux à l'intérieur de ces tubes respectivement à 40 m, 49 m et 59 m ;
 - Réalisation sur la partie libre d'un enduit préalable au téflon ;
 - Lavage de la partie libre.
- Après séchage, il a été procédé à la mise en tension et les résultats ont été exploités en tenant compte du micropieu « tare ».

LES MICROPIEUX DE L'OUVRAGE

De nombreuses modélisations ont été nécessaires pour arriver à la solution finale. Les descentes de charge sur les micropieux sont un des facteurs du dimensionnement.



© PHOTO THÉÂTRE SEFI-INTRAFOR

En jouant sur le nombre de micropieux, leur maillage, leur longueur et en avançant par itération, on est arrivé à 170 micropieux de 20 m à 30 m. Les moyens en matériel et en personnel ont été doublés pour satisfaire le planning de réalisation des micropieux (figure 10). L'emploi d'une pince pour la manutention et la mise en œuvre des tubes de micropieux a rationalisé la production pour atteindre 8 unités par jour en moyenne (figure 11).

CONCLUSION

Un environnement urbain, un site exigü, des contraintes horaires draconiennes sont des difficultés rencontrées régulièrement sur les chantiers des grandes métropoles. Pour satisfaire le marché, il faut connaître au mieux les horizons dans lesquels on opère, d'une part,

11- Utilisation d'une pince à tube : pratique et sécuritaire.

11- Use of pipe tongs: practical and safe.

et proposer au client des solutions techniques éprouvées, innovantes et pérennes, d'autre part. Le bassin d'Issy-les-Moulineaux n'échappe pas à cette règle.

L'activité liée aux micropieux en est une preuve concrète. En doublant les moyens en matériel, il a été possible de préserver la mise à disposition du bassin pour le génie civil. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Conseil départemental des Hauts-de-Seine (92) - Direction de l'eau

MAÎTRISE D'ŒUVRE EN GROUPEMENT / ARCHITECTE : Safège (LOT1 et LOT3 - mandataire) - Artelia (LOT2) - Ligne Dau (Architecte)

BUREAU GÉOTECHNIQUE : Geolia

BUREAU DE CONTRÔLE : Alpha Contrôle

COORDONNATEUR SPS : Veritas

OPC : Segic

POUR LE GROUPEMENT D'ENTREPRISES DU LOT 1

PAROIS MOULÉES / BARRETTES / MICROPIEUX : Sefi-Intrafor

GÉNIE-CIVIL / INSTALLATIONS : Razel-Bec DRN Grands Chantiers (mandataire)

TERRASSEMENTS GÉNÉRAUX / DÉPOLLUTION / DÉMOLITION : Coteg

ABSTRACT

BILM STORAGE BASIN IN ISSY-LES-MOULINEUX - A BASIN CONCEALED UNDER A STADIUM IN THE TOWN CENTRE

CHRISTOPHE ALLEMOZ, SEFI-INTRAFOR

Well located behind the main sports centre of Issy-Les-Moulineux town, the Robert Charpentier football stadium underwent works of unimaginable magnitude. Sefi-Intrafor executed the diaphragm walls of an underground basin 40 m in diameter, and the foundation raft anchoring system. This structure of 23,400 m³ capacity, initiated by the Conseil départemental des Hauts-de-Seine, will be able to temporarily store rainwater in the event of dramatically bad weather. Flooding in the district will soon be ancient history thanks to exceptional foundations. □

EL BILM EN ISSY-LES-MOULINEUX - UN DEPÓSITO OCULTO BAJO UN ESTADIO, EN PLENO CENTRO DE LA CIUDAD

CHRISTOPHE ALLEMOZ, SEFI-INTRAFOR

Bien situado detrás del Palacio de Deportes de la ciudad de Issy-les-moulineux, el estadio Robert Charpentier requirió unas obras de insospechada amplitud en esta arena dedicada al fútbol. Sefi-Intrafor realizó las pantallas de hormigón de un depósito subterráneo de 40 m de diámetro, así como el dispositivo de anclaje de la losa de cimentación. Esta construcción de 23.400 m³ de capacidad, impulsada por el Consejo del departamento de Hauts-de-Seine, permitirá almacenar temporalmente las aguas pluviales en caso de fuertes precipitaciones. Las inundaciones del barrio pasarán pronto a la historia gracias a estos excepcionales cimientos. □



1

© FRANCK MARCELLIN / INTERCONSTRUCTION

REGARDS-EN-SEINE - UN PROJET À FLANC DE COLLINE À SAINT-CLOUD

AUTEUR : JULIEN PELSUY, INGÉNIEUR TRAVAUX, FRANKI FONDATION

À SAINT-CLOUD (92), FRANKI FONDATION RÉALISE LES FONDATIONS D'UN AMBITIEUX PROJET IMMOBILIER À FLANC DE COLLINE : « REGARDS-EN-SEINE » SE SITUE SUR UN TERRAIN TRÈS PENTU AU CENTRE DE LA VILLE, FACE À LA SEINE. LE PROJET COMPREND 3 BÂTIMENTS R+5 À R+6 SUR 5 NIVEAUX DE SOUS-SOLS UN SOUTÈNEMENT QUI FAIT APPEL À DE NOMBREUSES TECHNIQUES DE FONDATIONS SPÉCIALES. POUR UN SOUTÈNEMENT FINAL D'UNE HAUTEUR DE 20 M, FRANKI FONDATION A CONSTRUIT UNE PAROI CLOUÉE PROVISoire SUR LES 8 PREMIERS MÈTRES ET UNE PAROI LUTÉCIENNE DE 12 M AVEC 3 LITS DE TIRANTS.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Avec une situation idéale au cœur de Saint-Cloud, Regards-en-Seine est développé autour de trois bâtiments (Lescoeur, Dailly et Eugénie) alliant tradition et modernité (figure 2) qui proposera des appartements du studio au cinq pièces. Pourvus de larges balcons, de grandes terrasses ou de beaux jardins en rez-de-chaussée, certains appartements jouiront d'un panorama sur Paris avec vue sur la Seine et la Tour Eiffel. Chaque logement est doté de prestations haut de gamme avec parking et cave.

LE PAVILLON LESCOEUR : UN BÂTIMENT CLASSÉ

Élément important du chantier pour le promoteur, la présence d'un bâtiment classé du XIX^e siècle sur le haut du terrain. Le bâtiment Napoléon III dit « Château du Pélican » ou « Pavillon Lescoeur », doit être reconstruit à l'identique sur 3 façades et la toiture, selon les prescriptions du Plan Local d'Urbanisme. Sous validation de l'architecte des Bâtiments de France et suivant la technique de l'anastylose, le Pavillon Lescoeur a été démonté pierre par pierre, toutes numérotées, pendant l'été 2016. Il pourra être reconstruit à

l'identique, une fois les travaux de fondations réalisés pour stabiliser le terrain et la rue Dailly et permettre la construction des autres bâtiments.

1- Vue du chantier en phase finale du soutènement.

1- View of the project in the final retaining structure phase.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE/ GÉOTECHNIQUE ET CHOIX DES TECHNIQUES

La particularité du chantier repose principalement sur deux aspects :

- La topographie très pentue qui varie de 61 NGF en partie haute à 41 NGF en partie basse, soit 20 m de dénivelé : le projet immobilier doit donc s'encaster dans le coteau.
- Une géologie complexe, avec notamment sur les 10 premiers mètres de terrain du remblai et des argiles plastiques qui présentent de très mauvais paramètres géotechniques.



Pour réaliser ces 20 m de hauteur de soutènement, la solution proposée a été de cumuler deux techniques de fondations :

- 1- Une paroi clouée de 5 à 8 m de haut.
- 2- Une paroi lutécienne tirantée de 12 m de haut.

LE PHASAGE D'EXÉCUTION

Afin de répondre au contexte géotechnique et géométrique du projet, les étapes ont été formalisées comme suit :

- 1- Démolition de la superstructure existante ;

2- Vue d'architecte du projet.

3- Démarrage de la paroi clouée en septembre 2016 en co-activité avec la démolition.

2- Architect's view of the project.

3- Start of work on the soil-nailed wall in September 2016 concurrent with the demolition work.

2- Réalisation d'une paroi clouée inclinée provisoire de 61 NGF à 53 NGF, en co-activité avec la démolition des existants ;

3- Création d'une plateforme pour accueillir une machine de forage de pieux Kelly forés simples, type Liebherr LB20 de 70 t ;

4- Réalisation des tirants d'essais ;

5- Réalisation des pieux de la paroi lutécienne ;

6- Réalisation des tirants et du béton projeté en co-activité avec le terrassement de 53 NGF à 41 NGF.

CO-ACTIVITÉ IMPORTANTE / DIFFICULTÉ D'ACCÈS

Le démarrage des travaux de paroi clouée et ensuite des pieux a été opéré en même temps que les travaux de démolition des bâtiments existants (figure 3).

Un phasage fin des zones de travaux a dû être observé avec le lot du démolisseur, sur une pente abrupte avec peu de place pour les installations de chantier.

De plus, la complexité d'accès au chantier par une voie privée très pentue ne permettait pas l'évacuation ou la livraison des matériaux en camion-plateau, l'ensemble devant être effectué avec des camions de 8 m maximum.

LA PAROI CLOUÉE

Du fait de la pente importante du coteau, une paroi clouée en béton projeté sur les 8 premiers mètres du projet (figure 4) a été réalisée de septembre à octobre 2016.

Le but de cet ouvrage était de soutenir les remblais de tête, et de permettre la réalisation d'une plateforme pour accueillir une machine à pieux de 75 t.

Cette paroi est composée de 4 lits de clous de 15 à 10 m de profondeur, réalisés en technique auto-foré avec une machine MC600 Comacchio.

Dans le même temps, un voile de béton projeté de 20 cm d'épaisseur a été mis en œuvre, sur lequel les clous sont boulonnés, l'ensemble de la structure permettant de reprendre la poussée des terres.

Le principe de forage des clous est le suivant :





4

© PHOTOTHÈQUE FRANKI FONDATION

→ Le premier tronçon de la barre équipé du taillant perdu est positionné sur le mât de forage. La barre est reliée au marteau perforateur par l'intermédiaire d'une tête d'injection qui permet l'envoi du coulis dans la barre creuse vers le fond du forage.

→ Une fois la première barre entièrement forée dans le terrain, la barre suivante équipée du manchon de couplage peut être positionnée sur le mât de forage. Après avoir soigneusement vissé la deuxième barre sur l'extrémité de la première par l'intermédiaire du manchon de couplage, la barre doit être introduite du côté du marteau, dans la tête d'injection.

Le forage de la deuxième longueur est exécuté de la même façon que la première.

→ La série d'opérations décrite ci-dessus doit être répétée jusqu'à obtention de la longueur complète du clou.

CONFORTEMENT DES BÂTIMENTS MITOYEN

Des bâtiments mitoyens se trouvant en surplomb de la futur fouille, il a été nécessaire, afin d'éviter tout déplacement, de les conforter.

Le confortement mis en place correspond à des pieux en béton réalisés tous les 3 m en pied du bâtiment, dans lesquels un HEB 300 est scellé et recouvre la face en surplomb (figures 5 et 6).

4- Paroi clouée en cours de réalisation.

5 & 6- Confortement des bâtiments mitoyens par pieux béton avec HEB.

4- Soil-nailed wall during execution.

5 & 6- Consolidation of adjoining buildings by concrete piles with HEB beams.

RÉALISATION DES PIEUX DE SOUTÈNEMENT

80 pieux de diamètres 700 mm à 1000 mm de 15 à 25 m de profondeur ont été réalisés de décembre 2016 à février 2016 en 2 phases (figure 7). Il s'agit de pieux forés simples, armés toute hauteur. Les étapes de réalisation sont :

- Réglage : mise en place de la machine et réglage de la verticalité au droit du piquet d'implantation.
- Forage avec un ancrage minimum dans les craies blanches (figure 8).
- Mise en place de la cage d'armature sur toute hauteur du pieu avec une grue de manutention. La complexité d'accès au chantier a nécessité de livrer les aciers en éléments



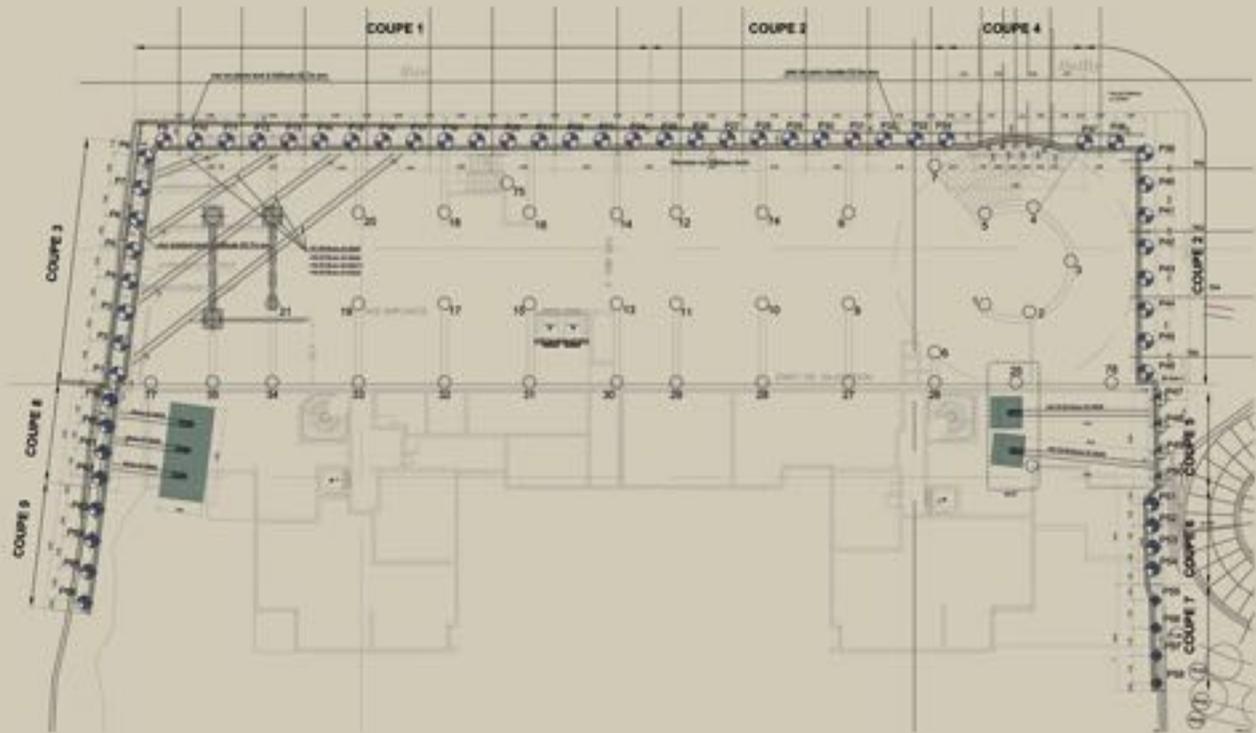
5



6

© PHOTOTHÈQUE FRANKI FONDATION

PLAN DE REPÉRAGE DU SOUTÈNEMENT PAROI LUTÉCIENNE PIEUX / TIRANTS / BÉTON PROJETÉ



© PHOTOTHÈQUE FRANKI FONDATION

7

7- Plan de repérage du soutènement Paroi Lutétienne pieux / tirants / béton projeté.

8- Réalisation des pieux de soutènement.

7- Layout drawing of the Lutetian type retaining wall, piles / tie anchors / shotcrete.

8- Execution of retaining structure piles.



© PHOTOTHÈQUE FRANKI FONDATION

8

de maximum 8 m. Les éléments sont ensuite raccordés entre eux avec des serre-câbles sur le forage et descendus à la cote au fur et à mesure.

→ Bétonnage réalisé avec un tube plongeur, et vidange de la toupie béton en gravitaire dans le tube.

TIRANTS D'ESSAIS

En octobre 2016, quatre tirants d'essai ont été réalisés, deux avec un ancrage dans les marnes de Meudon et deux avec un ancrage dans les craies blanches.

Ces tirants ont ensuite été mis en tension jusqu'à rupture du scellement afin de pouvoir déduire les paramètres réels de frottement des différents horizons et valider in situ les hypothèses de calcul.

PAROI LUTÉCIENNE : VOILE EN BÉTON PROJETÉ SCELLÉ DANS LES PIEUX, MISE EN ŒUVRE DE TIRANTS ACTIFS ET BUTONS D'ANGLE EN ACIER

Les travaux de voiles en béton projeté ont démarré en janvier 2017 et représentent une surface de 1450 m²

de 25 à 35 cm d'épaisseur, armés à 100 kg/m³. Il s'agit de voiles qui sont scellés chimiquement via des barres d'acier HA dans les pieux béton (figure 9).

Sur 50% de la surface, une nappe de géotextile drainant reliée à des barbacanes est mise en œuvre afin de gérer les arrivées d'eau collinaires.

Le phasage de réalisation des voiles se déroule selon le processus suivant :

- Terrassement et ouverture de la passe ;
- Nettoyage des pieux en béton par rabotage ;

→ Mise en place du treillis acier côté terre ;

→ Réalisation des scellements par percements d'environ 40 cm dans les pieux, injection de résine, et mise en place d'une barre HA16 tous les 30 cm ;

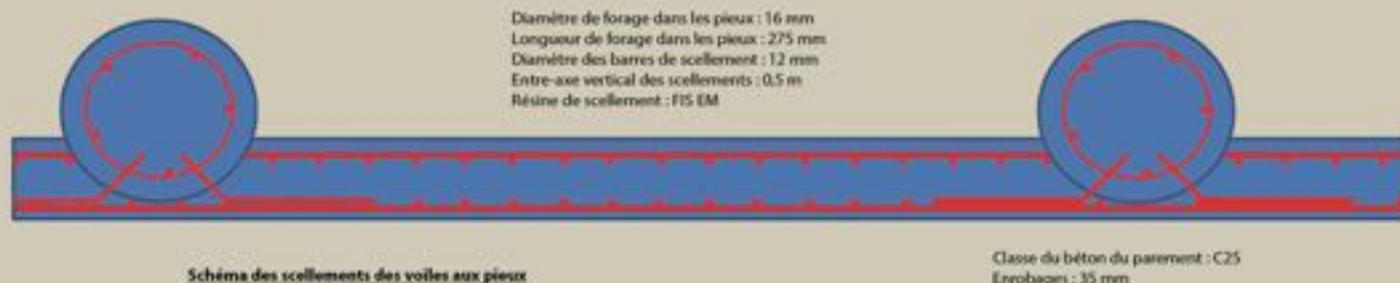
→ Mise en œuvre du treillis coté fouille ;

→ Projection béton de la couche dite de charge (20 à 25 cm d'épaisseur) ;

→ Projection à J+1 de la couche dite de finition de 10 cm moyen ;

→ Talochage de la couche de finition. ▷

SCHÉMA DU FERRAILLAGE DE VOILE BÉTON PROJÉTÉ



9

© PHOTOTHÈQUE FRANKI FONDATION

En parallèle s'opèrent les travaux de forage de tirants.

L'ouvrage se compose de 64 tirants de 15 à 30 m de profondeur sur 3 lits successifs.

Les tirants IGU mis en œuvre sur site sont armés avec des câbles acier scellés dans du coulis. Le câble d'armature est composé :

→ D'une longueur dite scellée qui correspond à la zone d'ancrage en fond de forage ;

→ D'une longueur libre sur laquelle les câbles sont gainés en tête de l'armature, et qui permet d'assurer l'allongement nécessaire lors de la mise en tension du tirant.

Les forages sont réalisés avec une machine Commachio MC 1200 (figure 10).

Les étapes de réalisation des tirants sont :

→ Forage en rotation simple avec outil tricône (terrain dur) ou tri-

9- Schéma du ferrailage de voile béton projeté.

10- Forage des tirants.

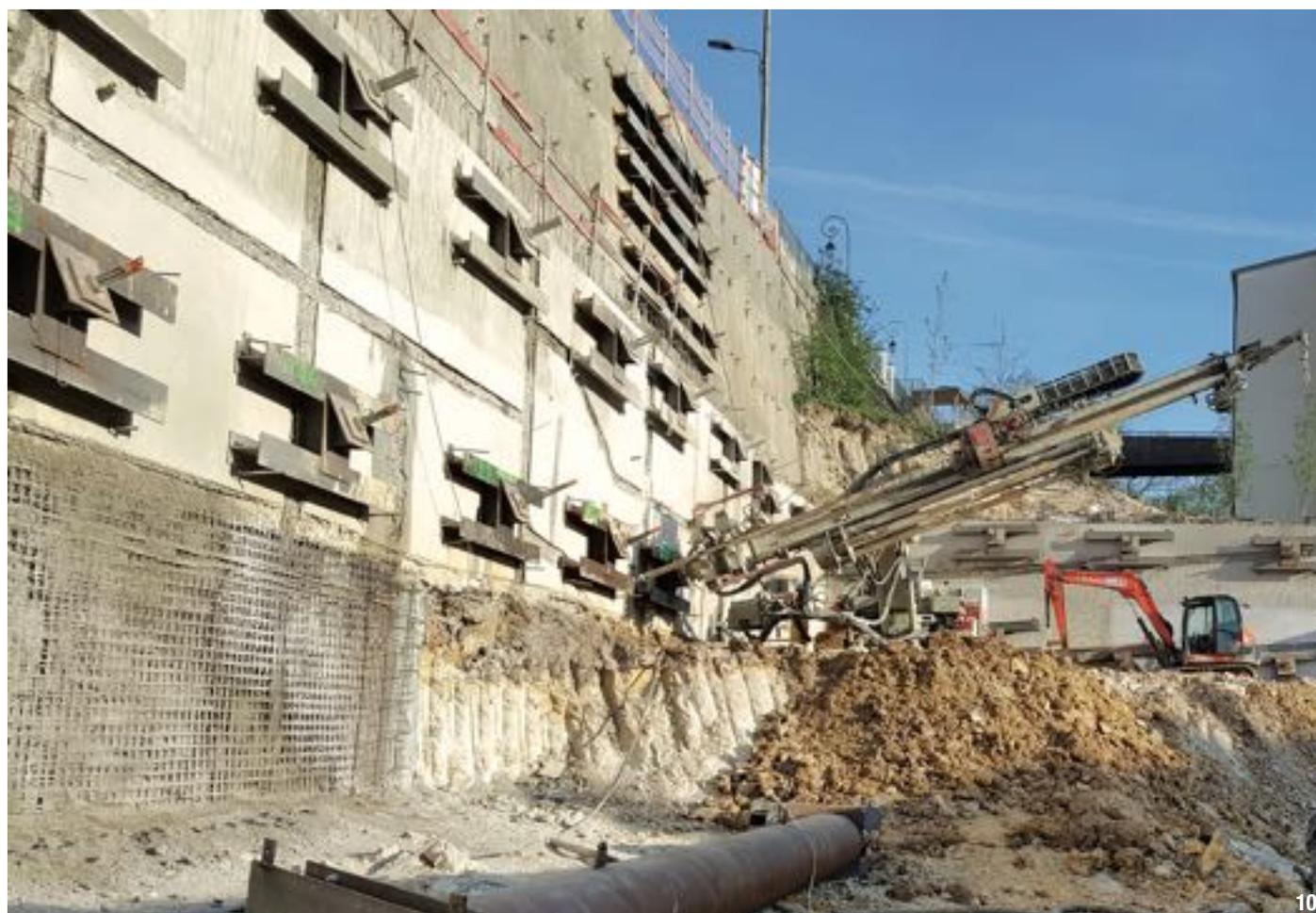
9- Diagram of shotcrete wall reinforcement.

10- Tie anchor drilling.

lame (terrain plus tendre) sous eau en diamètre 200 à 250 mm. Les paramètres sont enregistrés à l'avancement (vitesse de rotation, couple, pression d'injection) ;

→ Injection d'un coulis à 1200 kg de ciment par m³ lors de la remontée des tiges ;

→ Mise en place du câble composé de 8t15 à 5t15 dans le forage, avec une grue de manutention au vu des longueurs ;



10

© PHOTOTHÈQUE FRANKI FONDATION



11

© FRANCK MARCELLIN / INTERCONSTRUCTION

→ Réalisation d'une injection en tête du tirant (IGU) pour finaliser le scellement.

Le câble est enfin placé dans une lierne (composée de HEB et d'un renvoi d'angle à 30°), l'ensemble du système permettant de renvoyer l'effort vers les pieux. Tous les tirants sont ensuite mis en tension (figure 11) et bloqués avec une force variant de 50 à 100 t avec un vérin, au minimum 7 jours après

11- Mise en tension d'un tirant.
12- Tirant en tension sur lierne acier 2HEB280.

11- Tensioning of a tie anchor.
12- Tie anchor under tension on 2HEB280 steel lierne rib.

séchage (figure 12). Ces ouvrages sont provisoires et seront détendus une fois l'ensemble du bâtiment terminé. C'est ensuite le poids du bâtiment fondé sur pieux qui reprend les efforts de poussée de terre.

Les tirants horizontaux ne pouvant pas être réalisés vers les bâtiments mitoyens qui possèdent des caves, une solution de butonnage d'angle a été adaptée (figure 13).

Les butons sont constitués de tubes acier d'une longueur allant jusqu'à 22 m, de diamètre 350 à 850 mm, et d'épaisseur 8 à 18 mm. Ils s'appuient sur des liernes en acier doublées de profilés métalliques HEB ou sur des liernes en béton incorporées dans le voile.

ADAPTATION TECHNIQUE DE LA ZONE RAMPE PARKING

Au démarrage de l'implantation des ouvrages de soutènement à réaliser, il s'est avéré que l'emprise de la rampe d'accès au parking n'était pas compatible en termes d'espace avec la réalisation de pieux de soutènement.

Une adaptation technique sur cette zone a donc été proposée par Franki Fondation, pour réaliser une paroi clouée toute hauteur (20 m) sur une zone de 8 m de large.

Afin de limiter les déplacements dans cette zone sensible sans pieux, un phasage type « reprise en sous-œuvre » a été mis en œuvre avec des passes de béton projeté de 2 m de large par 1 m de haut en plots alternés.

CONTRÔLE ET SUIVI DES OUVRAGES

Afin d'appréhender les déplacements possibles sur un ouvrage d'une telle hauteur avec des terrains en tête de qualité médiocre, les calculs de paroi ont été menés avec le logiciel de calculs aux éléments finis Plaxis. ▽



© PHOTO THÉRIE FRANKI FONDATION

12



13

© PHOTOTHÈQUE FRANKI FONDATION

L'utilisation de ce logiciel a permis de définir les déplacements envisagés pour chaque phase de travaux et de définir des seuils.

Le chantier est suivi avec :

- 7 inclinomètres plus ou moins proches de la paroi qui permettent de suivre la déformée du terrain ;
- 45 prismes fixés sur ouvrages de soutènement suivis par un appareil

de type « Cyclops ». Cet appareil peut réaliser des mesures topographiques de déplacement toute les heures. Le suivi est accessible en temps réel sur un portail internet, et des alertes SMS/mail sont envoyées dans le cas éventuel de dépassement de seuil ;

- 5 cellules de contrôle de charge sur tirants qui permettent de vérifier les

13- Butonnage d'angle.

13- Angle staying.

efforts appliqués dans les câbles au fur et à mesure du terrassement de la fouille.

C'est au final une réelle méthode observationnelle qui a été mise en œuvre sur le chantier et qui a pour but de maîtriser les seuils définis par le calcul et d'anticiper la mise en œuvre de confortement complémentaire afin d'éviter les déplacements non prévus au calcul. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 1 450 m** de clous
- 550 m²** de paroi clouée (sur 8 m de hauteur)
- 1 650 m** de pieux de soutènement
- 1 300 m²** de voile en béton projeté scellé contre pieux
- 1 400 m** de tirants
- 25** butons acier
- 35 000 m³** de terrassement

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE :** Interconstruction
- MAÎTRE D'ŒUVRE D'EXÉCUTION :** Sima
- PILOTAGE :** Acll
- COORDINATEUR SPS :** Lm3c
- MISSION GÉOTECHNIQUE G4 :** Geolia
- BUREAU DE CONTRÔLE :** Veritas
- FONDATEURS :** Franki Fondation

ABSTRACT

REGARDS-EN-SEINE - A HILLSIDE PROJECT IN SAINT-CLOUD

JULIEN PELSY, FRANKI FONDATION

In Saint-Cloud, Franki Fondation is executing the foundations for an ambitious hillside real estate project called 'Regards en Seine', located on very steep land in the centre of the town, facing the Seine. To use the land as well as possible, the project, which consists of three 6- and 7-storey buildings above five basement levels, requires a retaining structure making use of numerous special foundation techniques. For a final retaining structure 20 m high, Franki Fondation executed a 450 m² temporary soil-nailed wall over the first eight metres and a Lutetian type retaining wall of 70 piles with three layers of tie anchors, over a height of 12 m. □

REGARDS-EN-SEINE - UN PROYECTO EN FLANCO DE COLINA EN SAINT-CLOUD

JULIEN PELSY, FRANKI FONDATION

En Saint-Cloud (departamento 92, Francia), Franki Fondation ha realizado la cimentación de un ambicioso proyecto inmobiliario en flanco de colina, llamado "Regards en Seine", situado sobre un terreno con fuerte pendiente en el centro de la ciudad, frente al Sena. Para aprovechar al máximo el terreno, el proyecto, que consta de 3 edificios de PB+5 a PB+6 con 5 niveles de sótano, precisa una entibación que requiere el uso de numerosas técnicas especiales de cimentación. Para una entibación final de una altura de 20 m, Franki Fondation ha realizado un muro de contención tipo suelo enclavado provisional de 450 m² en los 8 primeros metros y una pared luteciana de 70 pilotes con 3 capas de tirantes sobre una altura de 12 m. □

Spie fondations, partenaire-expert

Résoudre
votre problématique
de sol & de construction

- Fondations profondes
- Soutèvements
- Ecrans étanches
- Reprises en sous-œuvre
- Réhabilitations d'ouvrages
- Comblements de cavités
- Traitements de terrains
- Améliorations de sols
- Ancrages
- Fouilles clés en main

Assemblée Nationale, Paris

www.spiefondations.com 

spie batignolles

/ Spie fondations



Grand Paris Express
Gare de Fort d'Issy-Vanves-Clamart,
Île-de-France, France
Parois moulées sous faible hauteur à l'Hydrofraise® HC05

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.

Build on

Construire sur du solide

www.soletanche-bachy.com



SOLETANCHE BACHY