

# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**SOLS & FONDATIONS.** TRAITEMENT ANTIGEL A LA CHAUX. DEPOLLUTION ET SOUTÈNEMENT PARIS 20<sup>e</sup>. ATELIERS JOURDAN-CORENTIN-ISSOIRE PARIS 14<sup>e</sup>. PIEUX STARSOL<sup>®</sup> SUR CNM. COMPLEMENT DE CAVITES CONFLANS-STE-HONORINE. CHARGEMENT CYCLIQUE INCLUSIONS RIGIDES. PUIXS D'ESSAI GRAND PARIS EXPRESS LIGNE 15 SUD. JET GROUTING CENTRALE DE CHOOZ. LE HUB A LEVALLOIS-PERRET. GRANDE HALLE DE LYON. PROLONGEMENT METRO LIGNE 12. FOUILLE IGH SKY 56 LYON PART-DIEU

N°924 JUIN 2016



HYDROFRAISE HC05  
SUR PUIXS D'ESSAI  
GRAND PARIS EXPRESS  
LIGNE 15 SUD  
© SOLETANCHE BACHY



Vivre le progrès.



## Les bouteurs Liebherr se distinguent par les qualités suivantes :

- Des moteurs performants et des systèmes de transmission hydrostatiques en continu
- Une consommation modérée grâce au régime moteur constant et au mode éco
- Un poste de travail extrêmement confortable pour un travail productif

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

# LIEBHERR

Directeur de la publication  
Bruno Cavagné

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

Comité de rédaction  
Hélène Abel (Ingerop), David  
Berthier (Vinci Construction France),  
Sami Bounatirou (Bouygues TP),  
Jean-Bernard Detry (Setec), Philippe  
Gotteland (Fntp), Jean-Christophe  
Goux-Reverchon (Fntp), Laurent  
Guilbaud (Saipem), Ziad Hajar  
(Eiffage TP), Florent Imberty  
(Razel-Bec), Claude Le Quééré (Egis),  
Stéphane Monleau (Soletanche Bachy),  
Jacques Robert (Arcadis), Claude  
Servant (Eiffage TP), Philippe Vion  
(Systra), Michel Morgenthaler (Fntp)

Ont collaboré à ce numéro  
Rédaction  
Monique Trancart, Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente  
Com et Com  
Service Abonnement TRAVAUX  
Bât. Copemic - 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.revues-travaux.com](http://www.revues-travaux.com)

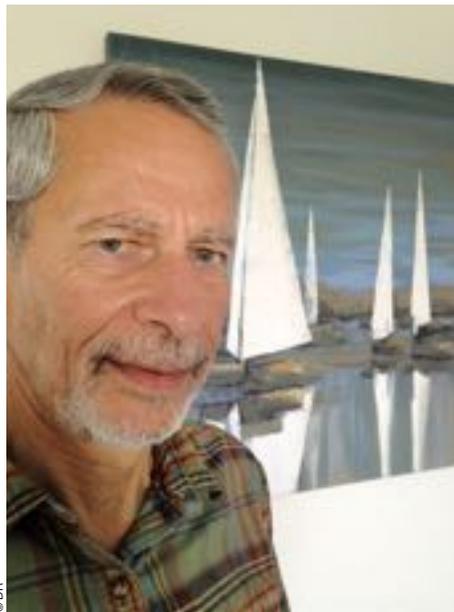
Édition déléguée  
Com'1 évidence  
Siège :  
101, avenue des Champs-Élysées  
75008 PARIS  
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52  
revuetravaux@com1evidence.com

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

# LA GÉOTECHNIQUE, UNE PASSION SANS FIN



© DR

« Sols et Fondations » : le titre de ce numéro est une bonne accroche pour parler de la géotechnique, discipline peu connue du grand public : et pourtant, comme pour la prose, chacun en fait sans le savoir, dès ses premiers pas, car la géotechnique est le lien direct entre l'homme et sa planète. De nombreux hommes célèbres français ont d'ailleurs contribué à son développement en mettant au point des théories fondamentales issues parfois d'autres disciplines, mais respectant sa spécificité. J'en citerai sept, pour la période s'étalant du 16<sup>e</sup> au 20<sup>e</sup> siècle :

- **VAUBAN**, spécialiste de la construction de murs de soutènement et de souterrains,
- **COULOMB**, qui a introduit les notions de cohésion, poussée, butée, plasticité,
- **PONCELET**, pour sa première analyse de la capacité portante,
- **BOUSSINESQ**, pour la définition des équilibres plastiques minima et maxima,
- **CAQUOT** et **KERISEL**, pour le calcul des équilibres limites de poussée et butée avec surface de rupture logarithmique,
- **CAMBEFORT**, qui a fait le lien entre la science géotechnique et les travaux associés.

Malgré ces nombreux et illustres pionniers, la méconnaissance de cette discipline est due à sa complexité : ses principes procèdent à la fois de la géologie dans toutes ses composantes (pétrographie, géologie structurale, géomorphologie, géodynamique, hydrogéologie), de la mécanique des sols et des roches, toutes deux faisant appel à la mécanique des milieux continus ou discontinus et

à la mécanique des fluides. La géotechnique est basée sur l'observation, l'expérimentation, des calculs, le raisonnement inductif et déductif. L'eau tient un rôle très important dans cette discipline, soit du fait des activités humaines d'exploitation des nappes, soit par son action directe sur les ouvrages construits ou à construire.

La géotechnique est au service de l'homme dans tous ses rapports avec la Terre. Elle est indispensable pour l'étude, la construction, la maintenance et la réparation de tout ouvrage ou aménagement, situé aussi bien en site terrestre, fluvial ou maritime, car elle étudie en particulier son interaction avec le massif environnant, aussi bien en statique qu'en dynamique (séisme, houle, machine vibrante). Ainsi, elle permet à l'homme :

- de mieux s'adapter aux risques naturels,
- d'assurer une assise solide à ses projets,
- de trouver des remèdes aux maux qu'il a fait subir à son environnement, que ce soit en exploitant des matériaux ou en polluant les sols par ses activités,
- de mieux préserver ses ressources en développant la réutilisation des matériaux.

La géotechnique mobilise de nombreuses techniques de prospection, de sondages, d'essais in situ et en laboratoire pour la collecte des données d'entrée indispensables à ses études. Elle s'appuie sur les techniques et procédés de construction en constante évolution pour proposer les méthodes les plus pertinentes pour réaliser chaque ouvrage ou aménagement qui est toujours un prototype, soit par sa structure, soit par la spécificité de son site.

Par ailleurs, le dernier défi de la géotechnique est d'apporter une aide pertinente vis-à-vis de la maîtrise des risques qui lui sont souvent attribués à tort ou à raison !

Cette omniprésence de la géotechnique en construction explique pourquoi elle est sous-jacente dans tous les numéros thématiques de la revue Travaux : pour ne citer que les plus liés à elle, « Ouvrages d'art », « Travaux souterrains », « Travaux maritimes et fluviaux », « Ville, transports et patrimoine », « Énergie ».

La grande complexité de cette discipline justifie la modestie que doit avoir tout géotechnicien, car comme le soulignait Francis Bacon, philosophe du 16<sup>e</sup> siècle, précurseur de l'empirisme, de la méthode expérimentale et de la logique inductive : « *On ne commande à la nature qu'en lui obéissant* ». Mais cette complexité justifie aussi l'intérêt inépuisable du métier de géotechnicien qui peut toujours passionner au bout de 50 ans d'exercice, comme ce sera mon cas le 23 août prochain.

**JACQUES ROBERT**

EXPERT ARCADIS  
PRÉSIDENT DU CFMS ET DU COMITÉ GÉOTECHNIQUE  
DE SYNTEC-INGENIERIE

LISTE DES ANNONCEURS : **LIBHERR**, 2<sup>e</sup> DE COUVERTURE - **SOLDATA**, P.9 - **ARCELORMITTAL**, P.11 - **GEOMENSURA**, P.14 - **CNETP**, P.15 - **CERMIX**, P.18 - **TERRASOL**, P.19 - **BALINEAU**, P.29 - **ITECH**, P.41 - **FAYAT-SEFI**, P.55 - **SCANLASER**, P.61 - **MENARD**, P.75 - **PRO BTP**, P.83 - **SMABTP**, P.91 - **SPIE FONDATIONS**, 3<sup>e</sup> DE COUVERTURE - **SOLETANCHE BACHY**, 4<sup>e</sup> DE COUVERTURE

# SOLS & FON DATIONS



04 ALBUM

08 ACTUALITÉ



20

**ENTRETIEN AVEC  
CHRISTIAN ALTAZIN**  
ADAPTER LE SOL  
À L'OUVRAGE

**24 IUT/UFR/INSA LE HAVRE :  
LE PÔLE GÉNIE CIVIL ET CONSTRUCTION  
DURABLE S'ÉLARGIT À LA GÉOTECHNIQUE**



30

**CONTRIBUTION DU TRAITEMENT  
À LA CHAUX À LA PROTECTION  
CONTRE LE GEL**  
des plateformes routières



36

**DÉPOLLUTION  
ET SOUTÈNEMENT  
D'UNE FOUILLE**  
à Paris XX<sup>e</sup>



42

**FONDATION DU PROJET  
DES ATELIERS JOURDAN-  
CORENTIN-ISSOIRE**  
dans le 14<sup>e</sup> à Paris



48

**PIEUX STARSOL®**  
Odyssée le long du contournement  
ferroviaire Nîmes-Montpellier (CNM)



56

**COMBLEMENT DE CAVITÉS  
TROGLODYTIQUES**  
sous l'école Saint-Joseph,  
à Conflans-Sainte-Honorine



62

**CHARGEMENT CYCLIQUE  
DES MASSIFS RENFORCÉS  
PAR INCLUSIONS RIGIDES**



68

**GRAND PARIS EXPRESS  
LIGNE 15 SUD**  
Puits de reconnaissance  
à Boulogne Billancourt



76

**RENFORCEMENT DE SOL  
PAR JET GROUTING**  
à la centrale nucléaire de Chooz



84

**LE HUB À LEVALLOIS-PERRET**  
Un emplacement stratégique  
au cœur d'une ville en plein  
développement



92

**FONDACTIONS  
DE LA GRANDE HALLE**  
à Lyon



98

**FONDACTIONS SPÉCIALES**  
sur le prolongement de la ligne 12  
du métro parisien



104

**UNE FOUILLE DE QUATRE  
SOUS-SOLS POUR SKY 56**  
Le nouvel IGH de la Part-Dieu

FONDACTIONS SPÉCIALES SUR LE PROLONGEMENT DE LA LIGNE 12 DU MÉTRO PARISIEN © PHOTOTHÈQUE BOTTE FONDACTIONS





## STARSOL® À L'ŒUVRE SUR LE CNM

**LES** innovations technologiques significatives ne sont pas légion dans le domaine des fondations spéciales. Le procédé Starsol® en est une, reconnue et durable. Outre ses performances de mise en œuvre, il garantit une qualité de fabrication qui autorise des règles de calcul spécifiques conduisant à d'importantes réductions de quantités. Moins de béton, moins de déblais : autant d'économies sur les coûts, sur les délais et sur l'impact environnemental en matière d'énergie, de transports, de décharges. Ces avantages ont convaincu RFF, Oc'Via et Ingerop, donnant lieu à une large utilisation des pieux Starsol® sur les ouvrages ferroviaires du Contournement Nîmes Montpellier. (voir article page 48).

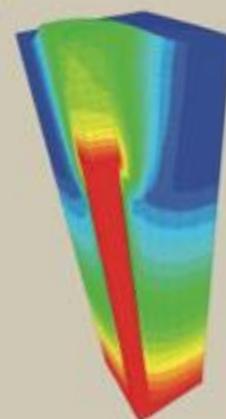




## INCLUSIONS RIGIDES SOUS CHARGES CYCLIQUES

**NOUS** assistons à la montée en puissance de la technique de traitement de sol par inclusions rigides. Des applications nombreuses, exécutées par quelques entreprises spécialisées qui se sont équipées du matériel adapté et ont acquis le savoir faire, démontrent l'intérêt et la fiabilité du procédé pour la fondation sur terrains meubles de charges lourdes réparties telles que celles apportées par les réservoirs. Le guide ASIRI et le guide AFPS-CFMS donnent l'état de l'art sur les inclusions rigides. L'Université de Grenoble, la société Ménard, la Direction Technique de la FNTP et l'IREX dans le cadre d'un Projet National, ont mené des études, sur modèles physique et numérique, portant sur le comportement sous charges cycliques du sol ainsi renforcé. **(voir article page 62).**

MODÈLE NUMÉRIQUE



© LABORATOIRE SSR

## SOLUTIONS GÉOSYNTHÉTIQUES DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION

**Les géosynthétiques aident à maintenir des terres en place, temporairement ou sur le long terme. Une journée technique a fait le point sur leur contribution.**



Matelas filtrant contenant du sable, posé entre l'enrochement et le remblai afin d'empêcher l'érosion de ce dernier.

La lutte contre l'érosion est une application traditionnelle des géosynthétiques mais « il existe beaucoup de produits différents, avec des développements importants par les producteurs pour améliorer cette lutte, indique Laetitia Van Schoors, présidente du comité scientifique de la journée technique sur ce thème, organisée par le Comité français des géosynthétiques (CFG)<sup>(1)</sup>. Une érosion non maîtrisée a des répercussions importantes sur la population. »

Les géosynthétiques sont utilisés pour protéger berges et côtes, barrages et réservoirs - remblais de retenue d'eau<sup>(2)</sup> - digues, piles d'ouvrage d'art (risque d'affouillement).

Des matériaux à base de fibre naturelle, souvent du chanvre, apparaissent : ils empêchent un talus de glisser le temps que la végétation repousse.

Le chanvre se dégrade, c'est un avantage sur les polymères dont sont constitués les géosynthétiques.

Les deux sont complémentaires, selon Jean-Paul Ducol de Texinov. Un géotextile de renforcement peut être allié à un biodégradable : le premier sera placé à l'horizontale, le second, sur la pente.

### → Casser les courants marins

Les solutions géosynthétiques contre l'érosion sont classées de l'unidimensionnel au tridimensionnel.

Ce peut être une grille de renforcement de support, un ensemble d'alvéoles remplies de terre confinant le sol, un matelas rempli d'un matériau en protection de berge, etc.

Huesker France a présenté un matelas filtrant contenant du sable, qui se pose entre un enrochement et un remblai afin de protéger celui-ci de l'érosion. Il propose aussi des dispositifs - matelas de sable posé en fond de rivière ou près d'une côte - qui cassent les courants et donc leur force destructrice. Un courant plus fort sera affaibli par un matelas rempli de béton, et ceci sur chantier.

### → Sol sec ou saturé d'eau ?

Le choix d'un dispositif fera l'objet d'une étude spécifique.

Un tableau d'aide à la décision figure dans les recommandations publiées par le CFG<sup>(3)</sup> que Philippe Reiffsteck (Ifsttar) a présentées. Le tableau croise phénomène d'érosion, ouvrage, technique et fonction. Figure en annexe du guide les principes de calcul de la stabilité sur pente dans les cas sans eau (drainé). « Le poids de la couverture est contrôlé par la force de frottement du géosynthétique, a expliqué Daniel Poulain, expert bar-

rages et digues à l'Irstea Bordeaux<sup>(4)</sup>. Si le sol est sec ou drainé, c'est relativement simple ; s'il est saturé d'eau, c'est plus difficile à calculer. »

Des programmes de recherche contribuent à une meilleure connaissance des phénomènes d'érosion tels que "Sols, structures et hydraulique : expertise et recherche appliquée" qui porte sur l'affouillement (Sshear 2014-2019, ANR) ou Digue 2020 sur le littoral méditerranéen (Irstea, Ifsttar, Cerema, UMR 7300 Espace et Symadrem).

### → Norme en préparation

La normalisation européenne sur les géosynthétiques employés en lutte contre l'érosion s'enrichit. « Le groupe de travail 4 du comité technique 189 (Comité européen de normalisation) développe une norme pour qualifier les géosynthétiques en contrôle d'érosion de surface des pentes, la prEN 00 189 224:2015, » a informé Nathalie Touze-Foltz, vice-présidente du CFG. Il existe déjà la EN 13 253 qui concerne l'érosion des côtes et berges. Enfin, l'ISO 10 318, intitulée "Géosynthétiques - termes et définitions", aborde l'érosion. ■

<sup>(1)</sup> À l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, le 23 mars.

<sup>(2)</sup> Retenues pour irrigation, soutien d'étiage de rivière, plans d'eau, etc.

<sup>(3)</sup> *Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion*, 2003, 128 pages téléchargeables sur [www.cfg.asso.fr](http://www.cfg.asso.fr).

<sup>(4)</sup> Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture.

## IMPACT D'UN GÉOMATELAS SUR LA QUALITÉ DE L'EAU



Le géomatelas se pose ouvert puis est rabattu une fois rempli du mélange bitumineux. Il est placé entre le talus, au-dessus, et un grillage et des pieux en bord de rivière.

Les géosynthétiques de lutte contre l'érosion influent-ils sur la qualité des eaux dans lesquels ils baignent ? Bonar a confirmé l'innocuité de ceux qu'il a fournis dans le marais poitevin, lors de la journée technique organisée par le CFG (cf. ci-dessus).

La question venait de l'Institut interdépartemental du bassin de la Sèvre niortaise (IIBSN), maître d'ouvrage et maître d'œuvre de la stabilisation des berges de la Sèvre entre Niort et la mer.

« L'administration nous a demandé des études in situ en plus des tests de laboratoire, explique Gilles Chouré, directeur

adjoint, responsable exploitation de l'IIBSN. Nous avons imaginé une solution en adoptant une technique qui stabilise et s'intègre dans le paysage. Il fallait aussi réduire les coûts. La solution consiste à dérouler un géomatelas ouvert et à le refermer une fois rempli du matériau. Elle n'est pas facile à mettre en œuvre. » Les premiers tronçons ont été traités en 2000 et le programme anti-érosion se poursuit avec la même méthode.

Les berges de la Sèvre niortaise sont fragilisées entre Niort et la mer à cause du sol argileux, peu cohérent, et du

terrain en dessous du niveau de la marée haute, d'où des variations de hauteur d'eau. ■



La solution s'intègre dans le paysage.

Mesures  
topographiques

1900

Construction  
du métro parisien

2016

Monitoring  
en temps réel

Construction des métros de

- PARIS
- GUADALAJARA
- RENNES
- DOHA
- LONDRES
- RIYAD
- BUCAREST
- HONG KONG
- SEATTLE
- AUCKLAND



Votre 6<sup>e</sup> sens pour maîtriser vos risques

[www.soldata.fr](http://www.soldata.fr)



**SOLDATA**

## GRAND PRIX DE L'URBANISME 2016

Le Grand prix de l'urbanisme a été attribué à Ariella Masboungi, personnalité de la discipline « qui insuffle un esprit d'ouverture aux questions urbaines, sociales et sociétales émergentes et favorise le dialogue entre les disciplines et les métiers qui pensent, conçoivent et fabriquent la ville, » selon le ministère du Logement et de l'Habitat durable qui l'octroie.

L'inspectrice générale du développement durable a organisé des ateliers projets urbains, des voyages à l'étranger et des rendez-vous réguliers de débat. Ces réflexions ont donné lieu à des publications.

## LE TRIANGLE DE GONESSE SE CONCRÉTISE

L'Établissement public d'aménagement Plaine de France (Val-d'Oise) confie la conception architecturale, paysagère et urbaine de la Zac Triangle de Gonesse ainsi que la 1<sup>re</sup> phase opérationnelle à un groupement international et pluridisciplinaire : agences Güller Güller, Paul Van Beek, Michel Desvigne, TVK et Artelia.

La Zac est un quartier d'affaires de 280 ha situé entre les aéroports du Bourget et Paris-Charles-de-Gaulle.

## 25 ANS DE DÉCIBELS D'OR

Les décibels d'or ont 25 ans. Cette année, les candidats au concours sur l'amélioration de l'environnement sonore doivent remettre leur dossier au plus tard le 9 septembre. Les prix seront remis en décembre.

Peuvent concourir : élus, industriels, chercheurs, associations, etc. Sont couronnés des actions, produits innovants, méthodes, outils et travaux de recherche.

[www.cidg.org](http://www.cidg.org)

## TROIS ENJEUX DE L'EAU



Outil détectant en quelques minutes le glyphosate et son produit de dégradation, développé par le Laboratoire de génie de l'environnement industriel de l'École des mines d'Alès (Gard) et Caminnov, recherche lauréate d'Agir pour la ressource en eau (Suez).

« Il y a de l'argent qui dort » a dit et redit Jean Launay, président du Comité national de l'eau, invité aux Enjeux de l'eau<sup>(1)</sup>. « Les subventions ne sont pas toutes distribuées, » a abondé Pierre Laurent, responsable du développement à la Caisse des dépôts et consignations (CDC). De plus, « l'argent n'est pas cher, mais on n'investit pas quand même dans les réseaux d'eau et d'assainissement, » s'est étonné Didier Haegel, président de l'Union nationale des industries et entreprises de l'eau et de l'environnement (UIE).

Sachant cela, comment expliquer que les investissements dans ces réseaux aient baissé de 20 % en 2015 ? De l'avis de plusieurs intervenants, les élus ne peuvent pas montrer ces investissements "invisibles". « Il faut expliquer à la population l'utilité des travaux, » propose Jean Launay. Un réseau sans entretien coûtera cher à refaire, sans compter les mètres

cubes d'eau potable perdus en fuites et que la collectivité paye. Avec une moyenne de 3,5 euros/m<sup>3</sup> en France, « la facture d'eau et d'assainissement ne représente que 0,8 % du budget d'un foyer (2013) contre 2,1 % pour les télécommunications et 4,4 % pour l'énergie, » précise Jean-Luc Ventura, président du Syndicat national des entreprises du traitement de l'eau.

### → Les compétences changent de mains

Les opportunités financières actuelles - dont des prêts à vingt-quatre ans pour les réseaux - « ne sont pas forcément pérennes, note Pierre Laurent. Il est envisageable de prendre de l'avance. Ces dépenses génèrent des économies pour la collectivité et favorisent l'emploi local ». Rappelons que l'eau potable court dans 1 000 000 km de tuyaux, et l'assainissement, dans 380 000 km. Valeur de ce patrimoine : 250 milliards d'euros.

Le non investissement dans ces réseaux s'expliquerait aussi par l'impact de la loi Notre<sup>(2)</sup>. À partir de 2018, les compétences eau et assainissement seront transférées à un établissement public de coopération intercommunale (EPCI). Cette obligation génère des interrogations. Quel territoire couvrira l'EPCI ? « L'échelle départementale pourrait être la bonne, estime Jean Launay, député du Lot. La capacité à investir est là mais les zones à argent dormant ne sont pas les mêmes que celles où il faut investir. » Les syndicats d'eau et d'assainissement pourront vraisemblablement se maintenir, à la place d'un EPCI ou en délégation technique de celui-ci.

### → Se servir des eaux usées

Deuxième enjeu sur lequel les entreprises de l'eau ont une influence, selon l'UIE : la contribution des eaux usées au développement durable. Elles peuvent alimenter un système d'arrosage. Leur chaleur sera récupérée pour du chauffage, de l'eau chaude. Les boues d'épuration produisent du biogaz.

Troisième enjeu : la présence de micropolluants au comportement mal connu. Parmi les nouvelles molécules, lesquelles sont dangereuses ? Conséquence : les eaux en sortie de station d'épuration peuvent contenir des polluants nocifs à la faune ; le traitement de l'eau potable doit être modernisé pour prendre en compte ces substances. ■

<sup>(1)</sup> Organisé par l'UIE, début avril à Paris.

<sup>(2)</sup> Loi Notre n°2015-991 du 7 août 2015 sur la nouvelle organisation de la République.

## RECHARGER LES NAPPES AVEC DES EAUX USÉES

Les eaux usées et pluviales peuvent-elles recharger les nappes souterraines ? Oui, répond le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) qui y voit une réponse au manque d'eau ou pour dessaler des nappes. À cause du changement climatique, la recharge des réserves souterraines et le débit des cours d'eau vont baisser. Le BRGM étudie l'abatement de la pollution par les couches géologiques traversées. Il participe au projet européen Frame (2015-2018) sur ce sujet. L'Australie, Israël, la Californie sont avancés dans ce domaine. Le service géologique national contribue aussi à Aquanes (euro-

péen, démarrage en juin) qui combine traitement naturel et industriel. Sur le site français de démonstration à Agon-Coutainville (Manche), des eaux épurées traversent les dunes de sable avant de rejoindre l'aquifère dans lequel le golf puise son eau d'arrosage.

### → Infiltrer l'eau et la stocker

Considérant que l'eau de surface s'évapore, le BRGM propose d'en favoriser l'infiltration vers le souterrain pour la stocker. Avec l'Agence de l'eau Rhône-Alpes, il conçoit un outil pour trouver les endroits propices, sans risque de transfert de pollution. ■



Les eaux en sortie de station d'épuration sont filtrées par le sable des dunes, à Agon-Coutainville (Manche), avant d'arroser le golf.



# ArcelorMittal Palplanches

ArcelorMittal propose des solutions complètes et économiques pour vos projets de fondations spéciales tels que les murs de quais, batardeaux, parkings souterrains, aménagements de berges, les protections anticrues, etc..., sans oublier les blindages de fouille. Nos palplanches sont gage de rapidité d'exécution, de rentabilité, de fiabilité et de durabilité. Elles se caractérisent par un excellent rapport module de flexion / poids et par un moment d'inertie élevé. Notre département technique et marketing offre des services complets à tout stade d'un projet, à savoir une assistance personnalisée à tous les acteurs de la conception, de la prescription et de la mise en œuvre.



ArcelorMittal

ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l.  
Palplanches | 66, rue de Luxembourg | L-4221 Esch/Alzette | Luxembourg  
T +352 5313 3105 | palplanches@arcelormittal.com | palplanches.arcelormittal.com

## DÉFENDRE LES INFRA- STRUCTURES

L'association Connexion 21 a été créée au 1<sup>er</sup> trimestre par des organisations professionnelles, des entreprises, des fournisseurs de matériaux et matériels, etc. pour défendre les projets d'infrastructures, en particulier auprès des élus et du grand public.

L'opinion publique est perçue comme pas assez favorable. Or, il est indispensable de disposer de réseaux d'eau, d'énergie, de transport en commun, de routes performants et donc de convaincre de la nécessité de les entretenir et de les renouveler.

L'association, présidée par Éric Berger, va publier des dossiers sur ces thèmes.

## DOCUMENTS SANTÉ SÉCURITÉ

Plusieurs documents sur la santé et la sécurité des salariés viennent de paraître.

L'Union nationale des industries de carrière et matériaux de construction met à disposition deux guides pratiques. Le premier s'intitule "Prévenir le renversement d'engins et risques associés".

Il a été réalisé par l'Unicem Normandie. Le second porte sur l'exposition aux poussières de l'Unicem Aquitaine. Il complète un document paru en 2014.

Par ailleurs, CNPP a sorti un formulaire d'analyse des risques en zone à risque d'explosion (Atex), préalable à tout travail en atmosphère explosive. Il permet de vérifier les dispositions prises pour la sécurité.

## L'ACTIVITÉ CIMENTIÈRE ENTRE EN CYCLE DE CROISSANCE



© LAFARGE FRANCE

Cimenterie Lafarge France à Saint-Pierre-La-Cour (Mayenne).

En 2016, la consommation de ciment en France devrait se stabiliser au niveau de celle de 2015, à 17,2 millions de tonnes. L'industrie cimentière connaît une baisse de ses débouchés depuis 2007 - 24,8 millions de tonnes - au rythme de 1 million de tonnes en moins par an, selon le Syndicat français de l'industrie cimentière (Sfic). « Cette évolution est à mettre en parallèle de celle du logement, a précisé Raoul de Parisot, son président. En 2007, 435 000 logements sortaient de terre, en 2015, 352 000. » L'industrie cimentière a perdu 1 milliard d'euros de chiffre d'affaires sur la période 2007-2015. Les 2,3 milliards d'euros réalisés en 2015 témoignent d'une érosion des prix et d'une baisse d'activité de 30% en huit ans. Le volume consommé est 5,3% en dessous de celui de 2014. Pour trouver un marché aussi bas, il faut remonter à 1964 avec 18 millions de tonnes, année qui s'inscrit toutefois dans une période de forte croissance puisqu'en 1972, l'effort de construction génère l'emploi de 32 millions de tonnes de ciment.

### → Importations dans la moyenne

Les sites industriels en France peuvent produire 27 millions de tonnes mais se limitent à 15,6 du fait de la faible demande. Certains pays, en récession - Espagne, Italie - ont cherché à écouler leurs volumes à l'export dont en France. La part de ciment importée a atteint 9% en 2015 - soit 1,5 million de tonnes - une proportion qui tend à monter mais reste dans la moyenne des dix dernières années. Les importations proviennent aussi d'Allemagne, du Luxembourg, de Belgique, et dans une moindre mesure de Turquie et de Grèce.

« Le redressement de l'activité depuis le 4<sup>e</sup> trimestre 2015 semble se confirmer début 2016 avec une hausse de 3,7% à fin février, informe M. de Parisot. Toute-

fois, il faudra attendre le mois de mai pour mieux connaître l'évolution. En effet, l'hiver a été doux, l'activité a subi peu d'arrêts pour intempéries. La conjoncture est encourageante mais nous ne pouvons pas parler de reprise franche en 2016. » Les mesures en faveur de l'investissement locatif - lois Alur et Pinel - devraient relancer la construction de logements.

### → Investir en R&D

Le Sfic estime que, sur le plus long terme, à cinq ou dix ans, l'activité est repartie dans un cycle de croissance malgré une certaine incertitude écono-

mique. La loi de transition énergétique pousse à des investissements. Les cimenteries investissent en recherche et développement dans l'énergie et la baisse des émissions de gaz à effet de serre.

L'activité est soutenue par la densification des villes, par exemple, la construction en souterrain - le Grand Paris Express, le tunnel Lyon-Turin - ou la couverture de voies ferrées. Le béton est utilisé pour les voies des transports en commun en site propre. Les éoliennes de plus en plus puissantes nécessitent des fondations de taille, etc. ■



© LAFARGE FRANCE

Le site recourt à 60% à des combustibles solides de récupération - déchets triés et broyés par les collecteurs de déchets - pour ses fours.

## BRÛLER PLUS DE COMBUSTIBLES DE RÉCUPÉRATION

L'industrie cimentière se préoccupe de plus en plus de son impact sur l'environnement. Elle se tourne vers les sources d'énergie autres que le charbon ou le pétrole.

En 2015, elle a brûlé 900 000 tonnes de déchets récupérés. Parmi eux, des huiles usagées, des solvants, des pneus mais aussi des combustibles solides dits de récupération (CSR), pour 280 000 tonnes, par exemple du bois, du textile, des fibres non recyclables.

Actuellement, elle parvient à substituer 38% de sa consommation et elle vise 50% en 2020, grâce à 1 million de tonnes de CSR.

## 1<sup>er</sup> PANORAMA DU BIOGAZ



© GRDF

La station d'épuration Aquapole de Grenoble Alpes métropole, connectée au réseau de gaz début avril, produira 250 Nm<sup>3</sup> de biométhane à partir de ses boues.

Les personnes qui cherchent à se familiariser avec le biogaz trouveront l'essentiel dans le premier *Panorama du gaz renouvelable en 2015* publié en avril par le Syndicat des énergies renouvelables (Ser) et quatre gestionnaires de réseaux <sup>(1)</sup>.

Le gaz d'origine renouvelable, dit biogaz, est reconnu comme une énergie à part entière par la loi de transition énergétique pour la croissance verte (2015) qui a fixé l'objectif de 10 % de biogaz dans la consommation de gaz en 2030.

L'année 2015 montre que les acteurs se sont saisi de la possibilité d'injecter le biométhane dans le réseau des gestionnaires depuis le décret n°2011-1597 du 21 novembre 2011 qui l'autorise. À fin 2015, 17 sites ont injecté 0,082 térawattheures (82 GWh), soit 0,02 % de la consommation de gaz <sup>(2)</sup>.

### → 200 projets en attente

La programmation pluriannuelle des investissements en énergies renouvelables, décidée en avril, prévoit 1,7 TWh en 2018 et 6-8 TWh en 2023. « Il est imaginable d'avoir 100 % de gaz renouvelable dans la consommation en 2050 à travers différents procédés, ce qui représente entre 400 et 550 TWh, a affirmé Jean-Louis Bal, président du Ser. Nous en consommons 421 à l'heure actuelle. »

Deux cents projets de raccordement sont au stade de l'étude de faisabilité ou détaillée, avec engagement de financement. Rappelons que le biométhane est du gaz issu de la fermentation de déchets. Il est épuré pour atteindre les caractéristiques du gaz naturel. Injecté dans le réseau, il ne s'en distingue plus.

### → Montage administratif complexe

Cette énergie intéresse les clients soucieux d'acheter une énergie renouvelable

et de contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre <sup>(3)</sup>.

Le schéma administratif et financier de cette démarche est complexe. Ils achètent du gaz vert à un fournisseur qui dispose d'une garantie d'origine parce qu'il l'a lui-même acheté à un producteur (agriculteur, collecteur de déchets, etc.). Le fournisseur a, au préalable, signé un contrat avec l'agriculteur (ou autre) où il garantit un prix d'achat sur quinze ans

ou plus (entre 45 et 139 euros/MWh). Il le revend avec une marge à son client. Il rétrocède 75 % de cette marge au groupe Caisse des dépôts et consignations, qui lui avait apporté son aide à l'achat du biométhane. S'il s'agit d'un gaz destiné à des véhicules, il ne doit rien.

Derrière ce montage, l'installation est relativement simple : le producteur de biogaz épuré se raccorde au réseau d'un gestionnaire par un poste d'injection qui en contrôle la qualité et les quantités. Les gestionnaires de réseau s'impliquent dans la filière biométhane en apportant leur expertise technique, en mettant en relation les différents acteurs et par les raccordements.

**Pour en savoir plus :**  
[www.enr.fr/publications-ser](http://www.enr.fr/publications-ser) ;  
<https://gobiomethane.grdf.fr> ■

<sup>(1)</sup> GRDF (distribution), GRTgaz (transport), Syndicat professionnel des entreprises gazières municipales et assimilées (SPEGNN), Transport et infrastructures gaz France (TIGF, transport international).

<sup>(2)</sup> Le pouvoir calorifique supérieur moyen du biométhane se situe autour de 10 kWh/m<sup>3</sup>.

<sup>(3)</sup> Cf. *Travaux* n°919, novembre 2015, page 8.

## LE BIO GNV POUR LES BUS ET CAMIONS

**La filière du gaz renouvelable (cf. ci-contre) veut développer de nouvelles utilisations comme le biocarburant dit aussi bio GNV. Les véhicules qui roulent au gaz naturel peuvent le faire au biogaz sans problème puisque celui-ci est obtenu par épuration afin d'avoir les mêmes caractéristiques. Ce carburant a sa place à côté de l'électricité, notamment sur les bus et les poids lourds qu'il ne serait pas rationnel d'équiper de grosses batteries électriques, à cause de l'encombrement et du poids.**



Bus roulant au biogaz à Paris.

© RATP

## 1<sup>er</sup> TRAMWAY À LUXEMBOURG

Luxtram a attribué la réalisation de 6 km de la 1<sup>re</sup> ligne de tramway à Luxembourg au groupement TSO, Muller TP, NGÉ GC avec deux entreprises luxembourgeoises, Sopinor et Costantini. Les travaux ont débuté en avril pour un an.

## EXTENSION DU RER EOË

Le prolongement du RER Eoë (E) vers l'ouest de l'Île-de-France nécessite la création de 8 km en tunnel avec trois gares. Les travaux commencent cet été.

SNCF Réseau a attribué la station Cnit-La Défense et les tunnels adjacents, au groupement conduit par Vinci Construction France, pour un montant de 496 millions d'euros.

Les travaux de cette cathédrale souterraine nécessitent la reprise en sous-œuvre du Cnit déjà engagée par Vinci pour la tour Trinity - 140 m de haut, 32 étages (2016-2018).

La construction du tunnel foré de 6 km ainsi que la gare Porte Maillot sont confiées à Bouygues Travaux Publics (mandataire). Montant : 460 millions.

Enfin, le lien entre la gare Haussmann-Saint Lazare actuelle et le tunnel - marché de 60 millions - sera réalisé par un groupement mené par Guintoli.



Une des 3 futures gares, celle de Cnit-La Défense en souterrain.

© SETEC-EGIS-DUTHILLEUL-AREP

### GINGER CEBTP REPREND BURGEAP

Ginger CEBTP, spécialiste de l'ingénierie des sols et des matériaux de construction, va reprendre Burgeap, bureau d'ingénieurs en dépollution de sites et en hydrologie.

Le groupe acquiert ainsi une entreprise de 400 personnes, d'envergure internationale, qui se développe dans l'énergie, la gestion de l'eau et des déchets.

Ginger CEBTP, qui a aussi repris V-Scan et Modeliris l'année dernière, veut doubler son chiffre d'affaires 2015 - 105 millions d'euros - d'ici 2020.

## BASSIN D'ASSAINISSEMENT ENTERRÉ SOUS UN STADE



© CB92/JEAN-LUC DOLMAIRE

Le bassin mesure 40 m de diamètre par 25 de profondeur.

Un grand bassin de stockage d'eaux d'assainissement est en chantier à Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine). De 40 m de diamètre et 25 m de profondeur, il accueillera jusqu'à 23 400 m<sup>3</sup> d'eaux pluviales et usées, le réseau étant unitaire dans ce secteur du département.

Le bassin est situé sous le stade Gabriel Voisin, dans le centre-ville qui a subi des débordements en 1997, 2001, 2002 et 2008.

Un ouvrage de cette taille ne pouvait s'installer sous la chaussée. Les terrains de sport de la ville offraient une surface

suffisante sans faire d'acquisition foncière.

En cas de pluie moyenne ou d'orage, le volume d'eaux du réseau engorge les canalisations. Le trop-plein s'évacue dans la Seine à travers les déversoirs dits d'orage, avec l'inconvénient de ne pas avoir été épuré. Il peut aussi déborder sur la voirie, générant une inondation avec parfois des dégâts chez les riverains. Le bassin stockera temporairement ces eaux, évitant ces deux phénomènes, avant de les restituer au réseau.

→ 31 millions d'euros

Les travaux ont commencé en janvier et durent deux ans. Ils s'élèvent à 31 millions d'euros TTC, en grande partie à la charge du conseil départemental qui a la compétence assainissement. L'Agence de l'eau Seine-Normandie apporte 8 millions. Un million est pris en charge par la ville d'Issy-les-Moulineaux pour la réfection du stade. ■

## BONNES PRATIQUES ET OUTILS DU BIM



© VÉRONIQUE PAUL

L'opération du Stade vélodrome Teisseire à Marseille figure dans les meilleures bonnes pratiques.

Tous les types de bâtiment étaient concernés. Citons parmi ceux d'envergure, le stade vélodrome Teisseire à Marseille (Linkcity Sud-Est, ex-Cirmad Grand Sud) ou la rénovation de la Manufacture des Gobelins et du Mobilier national, à Paris (Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture).

→ Dispositif pour petites collectivités locales

Dans la catégorie "processus, concepts, idées, services" de l'appel, figurent 15 lauréats. Leurs outils sont déjà utilisés ou peuvent servir à une expérimentation auprès de maîtres d'ouvrage à qui ils sont proposés. Notons la présence de grandes entreprises du BTP, des éditeurs de logiciels ou encore un cluster qui a développé un dispositif destiné aux petites collectivités territoriales.

Détails sur les lauréats :

<http://www.urbanisme-puca.gouv.fr/bim-maquette-numerique-a26.html>. ■

(1) Appel à propositions de 2014-2015, dévoilé en septembre dernier.

(2) Plate-forme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment ([www.prebat.net](http://www.prebat.net)).

**MENSURA LIGHT**  
VERSION 8

**TOPOGRAPHIE ET TERRASSEMENT.  
IL CONNAÎT LE TERRAIN**

MENSURA LIGHT, votre Logiciel incontournable.  
Nouvelle version compatible BIM-IFC (maquette numérique)

contact@geomensura.com

**GEOMENSURA**

www.geomensura.com | Tél. 02 40 16 92 60



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 **7 400 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à près de **270 000 salariés**.

### Nos coordonnées :

#### Par courrier :

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

Par Internet : [www.cnetp.fr](http://www.cnetp.fr)

Par mail : sur [www.cnetp.fr](http://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



## ITER : MARCHÉS INFRASTRUCTURES ET SUPRACONDUCTEURS



© FUSION FOR ENERGY

Vue récente de la construction d'Iter où sera expérimentée l'énergie de fusion.

En mars, Fusion for Energy a attribué plusieurs marchés à des entreprises françaises dans le cadre de la construction d'Iter, site qui servira à démontrer la faisabilité de la production

d'énergie par fusion d'atomes (Bouches-du-Rhône).

Fusion for Energy est l'organisation de la contribution de l'Union européenne dans le projet international.

Des infrastructures seront réalisées par un consortium composé de trois filiales du groupe Spie Batignolles (Spie Batignolles TPCI, Spie Batignolles Sud-Est et Valérian) et d'ADF. Elles desserviront la moitié de la plate-forme du site.

Les travaux durent quatre ans pour un montant de 60 millions d'euros. Ils comprennent : des galeries enterrées en béton armé pour abriter les réseaux de fluides hydrauliques et électriques ; l'évacuation des eaux pluviales et celle des eaux industrielles et usées ; 600 points d'éclairage extérieur ; les voiries entre bâtiments, les parkings et aires de stockage.

### → Bobines de 25 m

Par ailleurs, Constructions industrielles de la Méditerranée (Cnim) a remporté la fabrication sur site de 4 des 6 bobines supraconductrices (jusqu'à 25 m de diamètre) et le système d'inspection de l'état des composants (cartographie en 3D), pour un montant total de 80 millions d'euros. ■

## LIGNE TGV AU MAROC

France Maccaferri fournit des géogrilles de renforcement de remblais sur pieux de la future ligne à grande vitesse entre Kenitra et Tanger au Maroc. Elles limitent le maillage des pieux, leur diamètre et le ferrailage. Les géogrilles sont constituées de bandes de structures planes formées d'un noyau de fibres polyester enfermé dans une gaine de polyéthylène. La ligne TGV mesurera 1 500 km en 2030. Les travaux des premiers 200 km se terminent en 2018.



Les géogrilles renforcent les remblais.

© FRANCE MACCAFFERRI

## CANIVEAU D'UN BLOC

Le caniveau monolithique convient aux zones à trafic fort ou moyen. En bordure de trottoir, sa résistance à la charge est classée D400. En traversée de chaussée, elle monte à F900.

Ces monoblocs sont constitués d'un béton polymère, deux fois plus résistant à la flexion que le béton traditionnel, selon Aco qui le propose, et plus léger. Il évite la pose de grilles sauf à l'endroit des éléments de visite et des avaloirs.



Blocs pour bordure de trottoir ou traversée de chaussée.

## TÉLÉ RELÈVE DE COMPTEURS

Ce système de télé relève de compteur d'eau individuel contient un module radio de grande portée, jusqu'à 4 km en champ libre, à communication bidirectionnelle.

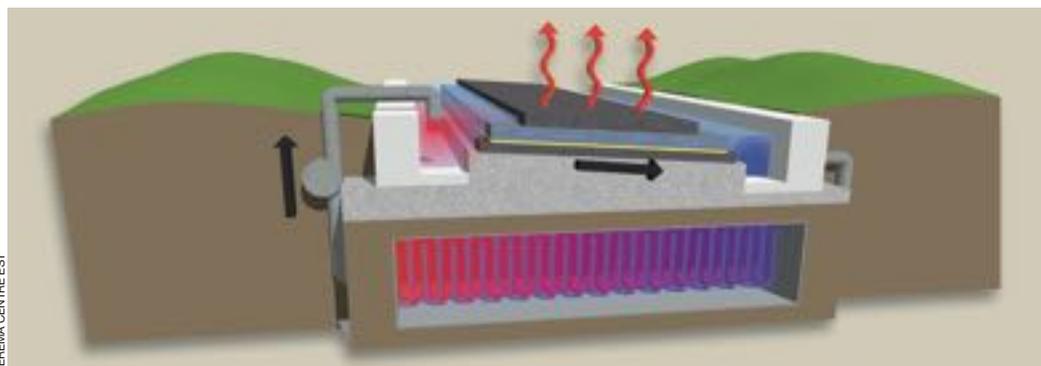
Le Senso transmet l'index du compteur et fournit un histogramme de la consommation, à tout moment.

Le fabricant, NKE Watteco, a aussi développé un modèle Pulse capable de relever à distance trois compteurs qui peuvent être d'eau, de gaz et d'électricité.



Le capteur, à gauche, se pose sur le compteur.

## LA ROUTE CHAUFFANTE TRAITE DES POINTS SINGULIERS



En hiver, une source de chaleur réchauffe le fluide caloporteur. Celui-ci en percolant dans la couche de liaison poreuse, va empêcher la formation de verglas sur le bitume.

La route peut avoir besoin d'être refroidie ou au contraire réchauffée, et peut elle-même être source de chaleur.

La "route à énergie positive" ou "chaussée chauffante" concrétise cette idée. Un fluide caloporteur circule dans une sous-couche de la chaussée. Il capte la chaleur du bitume ou au contraire, il lui en apporte. Ainsi, l'été, peut-il extraire des calories du revêtement en plein soleil pour aller chauffer une réserve d'eau chaude sanitaire. Il peut aussi recharger une ressource géothermique souterraine. En abaissant la température de surface de la chaussée, il climatise un îlot de chaleur en ville.

En hiver, le fluide sera chauffé par une source extérieure, par exemple un échangeur sur sonde géothermique ou sur chauffage urbain. Il empêchera le verglas de se former ou la neige de rester.

Concrètement, le fluide caloporteur circule par gravité à travers une couche de

liaison poreuse de la chaussée. Ce peut être un enrobé drainant. Pas de nappe de tuyaux à poser. Cette couche sera étanchéifiée en dessous et au-dessus (non-contamination par les eaux de chaussée). La pente suffit à faire percoler le fluide qui rejoint un réservoir avec un échangeur sous la route. Puis, il remonte dans la sous-couche grâce à une pompe.

→ **Tronçon démonstrateur de 50 m**  
« Nous en sommes au stade de la proposition de l'objet technique, précise Frédéric Bernardin, chef de projet au Cerema Centre Est<sup>(1)</sup> qui développe l'idée depuis 2012, mène cette recherche avec l'Isttar<sup>(2)</sup> et l'a présentée à l'assemblée générale du cluster Indura (voir article ci-dessous), en mars. Nous cherchons à quantifier l'énergie. Les applications sont le traitement de points singuliers - avoir un ouvrage d'art sans neige, une rampe d'accès. Il ne s'agit pas de faire du linéaire de route avec ça ».

En 2015, le Cerema a réalisé un démonstrateur de 50 m sur 4 m de large à l'École d'application aux métiers de travaux publics d'Égletons (Corrèze), hors trafic. Il sera relié à un système de géothermie, à sondes verticales. ■

<sup>(1)</sup> Une des 8 directions territoriales du Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

<sup>(2)</sup> Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux.



Tronçon de route chauffante situé à l'École d'application aux métiers des TP d'Égletons (Corrèze).

## INDURA S'ÉTEND À L'AUVERGNE

Le cluster Indura regroupe 91 acteurs de la grande région Rhône-Alpes/Auvergne. Depuis mars 2016, il s'étend à l'Auvergne. L'ont rejoint la Fédération régionale des travaux publics, l'école d'ingénieurs Polytech Clermont-Ferrand et l'entreprise Matière. Son but : développer l'innovation en matière d'infrastructures en faisant converger toutes les technologies dont ont besoin les travaux publics. Indura a été créé en 2009 par 22 entreprises et laboratoires de Rhône-

Alpes. La Région l'a labellisé cluster fin 2014.

Parmi les projets dans lesquels le cluster est impliqué, citons la réhabilitation des friches qui contribue à « un usage raisonné des ressources ». Ce programme est initié par la Région - 658 friches répertoriées en Rhône-Alpes - avec le pôle de compétitivité Axelera, le Centre d'échanges et de ressources foncières, et le groupement d'intérêt scientifique Envirhônalp.

Un colloque sera organisé sur ce thème en 2017. Indura a annoncé en mars qu'il participait à Greta, projet européen de promotion de la géothermie de faible profondeur dans l'arc alpin.

### → Valoriser les sols excavés

Rappelons que le projet national sur la prévention des risques de chute de blocs, C2ROP, est né à Indura. Signalons aussi sa participation à Mure (multi recyclage et enrobés tièdes) ainsi qu'à Triebun pour une valorisation des sols excavés. ■

## OUTILS POUR DÉVELOPPER LES ÉNERGIES MARINES



Câble sous-marin destiné aux éoliennes.

© ECOLE CENTRALE DE NANTES

Les énergies marines renouvelables (EMR) ont besoin, pour se développer, de connaissances et d'outils de recherche en amont et industrielle. Huit propositions allant dans ce sens ont été sélectionnées pour bénéficier de financements de l'État<sup>(1)</sup>, suite au premier appel à projets, en 2015.

Cette démarche se répète en 2016 avec des résultats publiés en juillet, et en 2017. À chaque étape, sont accordés des aides d'un total de 3-4 millions par an.

Ces appels EMR entrent dans l'action "Instituts pour la transition énergétique" du programme des investissements d'avenir. Ici, les projets alimenteront le

fonds technologique de France énergies marines, institut de recherche et développement.

Parmi les huit projets lauréats, citons Omdyn qui développe des câbles ombilicaux dynamiques sous-marins pour les industriels<sup>(2)</sup>. Ces câbles raccordent les éoliennes à la côte, sur plusieurs centaines de mètres entre deux eaux. Ils sont fortement mis à l'épreuve dans le milieu marin. Omdyn explore la modélisation de leur comportement hydromécanique en vue d'un banc d'essais et le suivi à distance de leur état.

Autre projet : l'Eolink, éolienne flottante reliée à son flotteur par trois bras au lieu d'un seul mât, ce qui répartit les contraintes structurales. Les lignes d'ancrage et de raccordement élec-

trique sont indépendantes de l'éolienne.

### → Impacts sur les fonds marins

Les autres propositions s'intéressent à la modélisation 3D de parcs hydroliens marins, au développement d'une hydrolienne fluviale, à la durabilité des structures multi matériaux collés utilisées par les EMR, à la caractérisation de la ressource au Raz Blanchard (Manche), à l'impact des éoliennes offshore sur les réseaux trophiques côtiers (chaînes alimentaires) et sur le compartiment benthique (organismes des fonds marins). ■

<sup>(1)</sup> Sont impliqués : les ministères de l'Environnement, de l'Économie, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et le Commissariat général à l'investissement.

<sup>(2)</sup> France énergies marines avec l'Université et l'École centrale de Nantes, DCNS, EDF et Innosea.



Cette éolienne a trois bras au lieu d'un mât.

© EOLINK

## 11 SITES DE DÉPOLLUTION DE FRICHES URBAINES

Les résultats de l'appel à projets sur les travaux de dépollution pour la reconversion des friches urbaines polluées, clos en mars 2015, ont été publiés en avril 2016.

Pour être retenus, ils devaient adopter une méthodologie nationale et notamment « privilégier des techniques *in situ*, maîtriser parfaitement les sources de pollution ainsi que leurs éventuels impacts, présenter un bilan coûts, recourir à un bureau d'études certifié LNE sites et sols pollués, concevoir un aménagement ou une construction de qualité ». L'appel d'offres était géré par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie pour le ministère de l'Environnement. L'objectif est de requalifier des zones urbaines délaissées pour du loge-

ment ou d'autres usages que leur passé industriel.

### → 16,5 millions d'euros de travaux

Ces 11 projets représentent des travaux de 16,5 millions d'euros auxquels l'Ademe apporte une aide totale de près de 4,7 millions.

Voici la liste avec, en tête, les maîtres d'ouvrage :

- Lisieux (Calvados) : site Wonder/Sanchez.
- Espace aménagement développement du Morbihan : Zac de Beau Soleil (logements, commerces et parc) à Saint-Avé.
- Territoires 25 (Doubs) : habitat sur le site de Gefco à Sochaux.
- Gruchet-le-Valasse (Seine-Maritime) avec l'Établissement public foncier

(EPF) de Normandie : habitat sur le terrain de l'usine Slic (caoutchouc).

- Le Havre (Seine-Maritime) avec l'EPF Normandie : réhabilitation du quartier Dumont d'Urville ; pôle éducatif et familial sur le quartier Hilaire Colombel.
- Sodearif : quartier d'habitat à Veneux-Sablons (Seine-et-Marne).
- Société d'équipement du département de la Réunion : Zac Est du port à Le Port (logements et tertiaire).
- Sem ville renouvelée (Nord) : écoquartier de l'Union à Tourcoing.
- EPF Ouest Rhône-Alpes : habitat, Zac de Châteaucieux Nord, Saint-Étienne (Loire).
- Eiffage Immobilier Méditerranée : terrain Allar (gaz) à Marseille (Bouches-du-Rhône). ■

## CHAMBRE DE RÉCUPÉRATION D'EAUX

Ces voûtes permettent de stocker temporairement les eaux de ruissellement des routes et parkings. Les parois annelées, en polypropylène ou en polyéthylène, retiennent les polluants contenus dans ces eaux.

Placées côte à côte sur un terrain à drainer, elles forment une chambre qui laisse les eaux s'infiltrer dans le sol ou si celui-ci est imperméable, les évacue. Cette chambre de récupération est ensuite recouverte d'un sol ou de granulats, et résiste aux sollicitations, selon Birco (Atec CSTB n°17/13-273).



Ces voûtes stockent temporairement les eaux de ruissellement.

© BIRCO

## ÉTANCHÉITÉ DE PARKING

L'étanchéité liquide Propark peut être utilisée sur les sols de parkings existants, extérieurs à étages, soumis aux intempéries. Elle est armée d'un non tissé à base de polyméthacrylate de méthyle. Elle donne de l'élasticité au support à protéger et bouche les fissures, selon Triflex.



Le revêtement existe en 14 coloris.

© TRIFLEX

# À CHAQUE CHANTIER, SA SOLUTION CERMIX

Conseils et assistance techniques sur toutes les phases du chantier !

GROUPE COFRAC

**CERMIX Mortiers Spéciaux propose une gamme complète et innovante de produits et services aux entreprises :**

- Du bâtiment
- Des travaux publics
- Du génie civil.

**4 LIGNES DE PRODUITS, POUR TOUTES LES PHASES DE VOS PROJETS :**

- Imperméabilisation et étanchéité (IMP)
- Scellement et calage (SCC)
- Travaux de voirie (VOI)
- Réparation d'ouvrages (REP)

**PLUSIEURS TYPES DE CHIMIE SONT DISPONIBLES :**

- Ciment
- Polyuréthane
- Epoxy
- Methacrylate

**CERMIX**  
mortiers spéciaux

[www.cermix-mortiers-speciaux.com](http://www.cermix-mortiers-speciaux.com)

## AGENDA

### ÉVÉNEMENTS

• **30 AOÛT AU 2 SEPTEMBRE**

**5<sup>e</sup> conférence internationale sur l'écologie et les transports**

Lieu : Lyon

[www.iene2016.iene.info](http://www.iene2016.iene.info)

• **12 AU 14 SEPTEMBRE**

**3<sup>e</sup> conférence européenne sur les sols non saturés**

Lieu : Champs-sur-Marne (Seine-et-Marne)

<http://eunsat2016.sciencesconf.org>

• **20 ET 21 SEPTEMBRE**

**6<sup>e</sup> assises Port du futur**

Lieu : Paris

[www.eau-mer-fleuves.cerema.fr/assise](http://www.eau-mer-fleuves.cerema.fr/assise)

• **21 AU 23 SEPTEMBRE**

**Concevoir et construire un environnement bâti durable et innovant**

Lieu : Stockholm (Suède)

[www.iabse.org](http://www.iabse.org)

• **25 AU 28 SEPTEMBRE**

**Congrès européen des géosynthétiques**

Lieu : Istanbul (Turquie)

<http://eurogeo6.org>

• **27 AU 30 SEPTEMBRE**

**Salon européen de l'éolien**

Lieu : Hambourg (Allemagne)

[www.ewea.org](http://www.ewea.org)

• **11 ET 12 OCTOBRE**

**Maintenance des ouvrages de génie civil en Europe**

Lieu : Toulouse

[www.le-pont.com](http://www.le-pont.com)

• **8 AU 11 NOVEMBRE**

**6<sup>e</sup> conférence asiatique sur les géosynthétiques**

Lieu : New-Delhi (Inde)

[www.cfg.asso.fr/igs-india](http://www.cfg.asso.fr/igs-india)

• **8 ET 9 NOVEMBRE**

**Intelligent building systems**

Lieu : Paris (Porte de Versailles)

[www.ibs-event.com](http://www.ibs-event.com)

### FORMATIONS

• **6 ET 7 JUILLET**

**Évaluation du potentiel éolien et maîtrise des risques associés**

Lieu : Paris

[www.metrol.fr](http://www.metrol.fr)

• **20 ET 21 SEPTEMBRE**

**Organiser la maintenance des ouvrages portuaires**

Lieu : Paris

<http://formation-continue.enpc.fr>

• **21 ET 22 SEPTEMBRE**

**Stratégie et moyens de réduction du bruit (infrastructures)**

Lieu : Paris

<http://formation-continue.enpc.fr>

• **21 AU 23 SEPTEMBRE**

**Géotechnique et génie civil : risques naturels et environnement**

Lieu : Paris

<http://formation-continue.enpc.fr>

• **29 SEPTEMBRE**

**Financement de projets énergies renouvelables**

Lieu : Paris

[www.metrol.fr](http://www.metrol.fr)

• **4 AU 7 OCTOBRE**

**Process fondamentaux de l'innovation responsable**

Lieu : Paris

<http://formation-continue.enpc.fr>

• **20 ET 21 OCTOBRE**

**Conserver et restaurer la continuité écologique dans les infrastructures de transport**

Lieu : Paris

<http://formation-continue.enpc.fr>

### NOMINATIONS

**BIODIVERSITÉ :**

La phase d'installation de l'Agence française pour la biodiversité qui deviendra effective en 2017, a été confiée à Christophe Aubel par la ministre de l'Environnement. ▷

### DLR :

Bertrand Carret a été élu président de la Fédération des distributeurs, loueurs et réparateurs de matériels de BTP et de manutention. Il prend la suite de Sonia Dubès.

### ÉCONOMIQUE ET SOCIAL :

Laurent Degroote succède à François Berthelon à la présidence de l'assemblée des Conseils économiques, sociaux et environnementaux régionaux de France. Luc Machard remplace Annie Podeur au secrétariat général du Conseil économique, social et environnemental.

### ENGIE :

Isabelle Kocher est passée directrice générale du groupe (ex-GDF Suez). Elle remplace à ce poste Gérard Mestrallet qui était PDG et reste président du conseil d'administration pour deux ans.

### ENVIRONNEMENT ET LOGEMENT :

Emmanuel Acchiardi a été nommé

sous-directeur de la qualité et du développement durable dans la construction à la direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages des ministères de l'Environnement et du Logement. Il remplace Katy Narcy.

### GÉOMEMBRANES :

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

### GÉOSYNTHÉTIQUES :

Nathalie Touze-Foltz a été élue 1<sup>re</sup> vice-présidente du Comité français des géosynthétiques. Nicolas Laidié est secrétaire général en remplacement de François Caquel.

### GRAND PARIS :

La Société du Grand Paris a nommé Michel Thénault médiateur avec les riverains du futur métro Grand Paris Express, notamment en phase travaux.

### IDRRIM :

En août prochain, David Zambon va remplacer Marc Tassone à la direction générale de l'Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité.

### LAFARGEHOLCIM :

Beat Hess remplace Wolfgang Reitzle à la présidence du conseil d'administration.

### NORMALISATION :

Emmanuel Wagner dirige le bureau de normalisation de l'industrie du béton à la suite de Gilles Bernardeau devenu directeur général du Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton.

### PARIS SACLAY :

Pierre-Philippe Zemmour est le nouveau secrétaire général de l'Établissement public d'aménagement de Paris Saclay.

### PLAINE DE FRANCE :

Jérôme Chartier a été élu président

de l'Établissement public d'aménagement à la suite de Laurent Fiscuf, président en intérim après le départ de Jean-Paul Huchon.

### SNCF RÉSEAU :

Didier Bense devient directeur général pour l'Île-de-France. Il succède à Yves Ramette. Patrick Jeantet remplace Jacques Rapoport à la présidence.

### SPIE BATIGNOLLES :

Jean-Charles Robin préside désormais le directoire à la suite de Laurent Grall. Stéphane Monceaux devient directeur général génie civil chargé du développement international. Il rejoint le directoire comme Patrick Zulian, directeur général construction Île-de-France et énergie.

### STIF :

Laurent Probst a été nommé directeur général du Syndicat des transports d'Île-de-France. Il succède à Sophie Mougard.



**terrasol**

**setec**

Ingénieurs-Conseils  
en géotechnique

[www.terrasol.com](http://www.terrasol.com)



### INGÉNIERIE

» Conception, Maîtrise d'oeuvre, Expertise

### LOGICIELS

« Développement, Assistance technique, Formation

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

**Parmi nos références récentes en France :** Grand Paris Express, Métro de Rennes, Tunnel de la Borne Romaine, Déviation RD 1091, Ligne 14 Nord, Terminal méthanier de Dunkerque, Tour Trinity, Liaison A89/A6...

**Et à l'étranger :** Pont du Bouregreg, Centrales électriques de Plomin / Jijel / Biskra, EPR UK, 3<sup>ème</sup> pont sur le Bosphore, Parking des Spélugues, Tour CFC, Corniche de Brazzaville, Pont de Jacquville, Cap Lopez...

	<p><b>Paris</b></p> <p>Tél : +33 (0)1 82 51 52 00 Fax : +33 (0)1 82 51 52 99 Email : <a href="mailto:info@terrasol.com">info@terrasol.com</a></p>	<p><b>Lyon</b></p> <p>Tél : +33 (0)4 27 85 49 35 Fax : +33 (0)4 27 85 49 36 Email : <a href="mailto:lyon@terrasol.com">lyon@terrasol.com</a></p>	<p><b>Maroc</b></p> <p>Tél : +212 (051) 25 53 89 Fax : +212 (529) 53 64 00 Email : <a href="mailto:telmalki@terrasol.com">telmalki@terrasol.com</a></p>	<p><b>Tunisie</b></p> <p>Tél : +276 71 23 63 14 Fax : +256 71 75 32 88 Email : <a href="mailto:info@terrasol.com.tn">info@terrasol.com.tn</a></p>
---	---	--	---	---

**G.T.S.**

# ADAPTER LE SOL À L'OUVRAGE

**ENTRETIEN AVEC CHRISTIAN ALTAZIN, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE G.T.S.**

PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



© MARC MONTAGNON

LA MAÎTRISE DU RISQUE SOL EST INDISSOCIABLE DE L'ACTE DE CONSTRUIRE. APRÈS UN TRAVAIL D'EXPERTISE PERMETTANT DE SÉLECTIONNER LES TECHNIQUES LES PLUS APPROPRIÉES À CHAQUE CONTEXTE GÉOTECHNIQUE, G.T.S. APORTE DES SOLUTIONS ADAPTÉES ET SOUVENT INNOVANTES GRÂCE À UNE VRAIE PALETTE DE COMPÉTENCES TANT EN CE QUI CONCERNE LES TECHNIQUES QUE LES MATÉRIELS, AVEC UN OBJECTIF OMNIPRÉSENT POUR TOUS LES CHANTIERS : ADAPTER LE SOL À L'OUVRAGE PLUTÔT QUE L'OUVRAGE AU SOL. CE QUE NOUS EXPLIQUE CHRISTIAN ALTAZIN, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE G.T.S., APRÈS EN AVOIR RETRACÉ UN HISTORIQUE RÉVÉLATEUR DE L'ÉVOLUTION DE L'ENTREPRISE DEPUIS SA CRÉATION ET DE LA PLACE ORIGINALE QU'ELLE OCCUPE DANS LE SECTEUR DES TRAVAUX PUBLICS.

**Quelles sont les origines de G.T.S. ?**

G.T.S. a été créé ex-nihilo en 1988 par Guintoli, devenue depuis l'une des entités du groupe NGE, avec l'objectif de créer une société qui réaliserait des travaux liés à des techniques d'ingénierie afin de traiter les problématiques générées par les élargisse-

ments d'autoroutes. Tout a commencé avec la mise en œuvre de géotextiles pour renforcer les remblais, ce qui était innovant à l'époque, dans le domaine public. Dans le même temps, l'activité a été élargie à la mécanique des sols avec la densification dynamique et les drains verticaux, ce qui intéressait aussi la clientèle privée.



© G.T.S. 2



© G.T.S. 3

Puis, nos savoir-faire se sont développés naturellement vers les techniques de confortement dans les deux grands domaines de la mécanique des sols :

→ Tout ce qu'on ne voit pas et qui est sous nos pieds, relatif aux sols compressibles, (indice de vide, tassement, portance...), ce qui nous a amenés à intervenir dans le tissu urbain ainsi que dans les fondations de bâtiments.

→ Tout ce qu'on voit et qui nous menace, relatif aux instabilités de pentes (cohésion, frottement, glissements...) où nous sommes devenus un acteur majeur, y compris dans le domaine de la mécanique des roches et le milieu montagne.

Ces deux volets se sont bien développés et, par le biais d'une culture d'innovations, d'investissement et de croissance externe, l'entreprise a fortement progressé.

Nous réalisons un chiffre d'affaires de l'ordre de 106 millions d'euros en 2015, dont 12 millions à l'international. L'entreprise emploie 550 personnes dont 50 dans les DOM/TOM, et est dotée d'un parc matériel de plus de 400 machines pour une valeur de remplacement de 50 millions d'euros. Dans un métier où la complexité est devenue une constante, nous aimons bien démystifier les problématiques. Nous prouvons que ce qui semble complexe n'est pas forcément compliqué dès lors qu'il nous est donné la possibilité de proposer une ou plusieurs solutions alternatives.

### À ce jour, quels sont les métiers de G.T.S. ?

Pour reprendre le deuxième volet cité plus haut, nous maîtrisons toutes les techniques de confortement et soutènement de sol : paroi clouée, paroi berlinoise, tirants, traitement des glissements de terrain, jet grouting... jusqu'aux travaux de protections liés

au risque rocheux ainsi que les travaux d'accès difficiles associés.

Pour ce qui est du premier volet, nous disposons de toutes les techniques d'amélioration pour adapter les sols aux ouvrages notamment : la densification dynamique, les colonnes ballastées, la vibroflotation, les drains verticaux, les inclusions rigides, les injections, le jet grouting, etc.

Quand ces techniques d'adaptation montrent leur limite, nous pouvons aussi décliner les techniques de fondations profondes (tous types de pieux et micropieux, qu'ils soient en béton ou métalliques, par forage, battage ou vibrofonçage).

Dans notre métier - et nous le regrettons - il arrive souvent que les maîtrises

d'œuvre et les bureaux d'études, du fait d'une possible méconnaissance des sols, cherchent à adapter l'ouvrage au sol. Ils oublient ainsi qu'une étape intermédiaire, parfois plus économique, pourrait être d'adapter le sol à l'ouvrage.

Autrement dit, en faisant l'impasse de l'acquisition des données géotechniques dans les terrains compressibles de surface, ils privilégient inconsciemment une solution de fondations profondes.

En effet, on a longtemps cru que l'amélioration de sol concernait la zone entre 0 et 10 mètres de profondeur. On considère aujourd'hui qu'il est en fait possible d'intervenir avec succès jusqu'à 20 mètres.

### Chez G.T.S., vous procédez donc différemment ?

Ce que j'évoque ne constitue pas toujours la panacée mais, dans de nombreux cas, adapter le sol à l'ouvrage ou faire un mix de deux techniques permet de proposer une solution compétitive pour le client : il nous est arrivé, par une amélioration préalable du sol, d'optimiser un dimensionnement de pieux grâce à la réduction du frottement négatif ce qui a permis de réduire leur section pour passer, par exemple de Ø 1 000 mm à Ø 800 mm.

Cette démarche est adoptée depuis la création de l'entreprise, c'est cela notre ADN. Notre maîtrise de plusieurs techniques nous permet de toujours proposer celle qui nous semble la plus adaptée à la situation du moment. Cela est une des clés de la maîtrise du risque sol, car chaque technique génère sa propre pathologie si elle est utilisée de façon systématique.

Nous avons rapidement eu cette conviction que notre développement était lié à la multiplicité des techniques que G.T.S. peut mettre en œuvre. Cela répond aussi à la complexité des

appels d'offre actuels et lui permet de faire converger l'ensemble des atouts dont elle dispose au niveau des savoirs et des compétences.

### Parmi les nombreux chantiers multitechniques auxquels G.T.S. a participé, quels sont les plus emblématiques ?

La sécurisation de la pointe du Hoc, en Normandie, qui remonte à 2010, reste un bel exemple.

Cette falaise s'est érodée naturellement et a reculé d'une dizaine de mètres en 60 ans. Une partie du site était fermée aux 500 000 visiteurs annuels depuis 10 ans. Le poste d'observation situé au sommet menaçait de disparaître.

Grâce à ses compétences multitechniques, G.T.S. a sécurisé le site, pour le compte de l'ABMC<sup>(1)</sup>, selon quatre zones d'intervention : injection de comblement en pied de falaise, confortement des blocs intermédiaires, clouage des terrains en partie haute et confortement par micropieux des fondations du poste d'observation.

La particularité et les difficultés du chantier résultaient de la conjonction de plusieurs facteurs. Ceux-ci étaient liés tout autant aux problèmes d'accès à la falaise et aux plages, qu'à son érosion permanente, aux amplitudes des marées et aux contraintes environnementales fortes d'une zone Natura 2000.

Ce marché en conception/réalisation de 5 millions de dollars a nécessité la maîtrise des techniques de fondations profondes, d'injection de sol, de confortement et de travaux d'accès difficiles. La pointe du Hoc a conforté notre conviction et notre engagement complet dans ces chantiers multitechniques.

Il en a été de même, également en 2008, pour le chantier de réhabilitation de l'ancien quartier militaire de Bonne dans le centre de Grenoble, ▷

**1- Christian Altazin, directeur général de G.T.S.**

**2- La paroi de 47 m de hauteur / 18 000 m<sup>2</sup> de superficie sur la déviation de la RD 1091 rehaussée au pied des Ruines-de-Séchilienne.**

**3- Le chantier « multitechniques » de la Pointe du Hoc en Normandie.**

**4- Enceinte étanche pour le chantier de la Grande Halle de Lyon.**

**5- Confortement des berges du Bastan à Barèges, dans les Pyrénées, avec le procédé AD/OC®.**

© G.T.S.

4



© G.T.S.

5



pour le compte du groupe immobilier Georges V, qui impliquait plusieurs savoir-faire : bouchon étanche par injection et paroi au coulis, rabattement de nappe, battage de palplanches et mise en œuvre de tirants. Nous avons associé ces cinq techniques différentes pour la création des parkings de ce complexe immobilier.

Dans le même esprit, en 2015, nous avons participé à la réhabilitation de la Grande Halle de Lyon avec la mise en œuvre des bouchons étanches, des parois berlinoises, des rideaux de palplanches dans un environnement urbain très contraignant, impliquant la préservation du patrimoine historique<sup>(2)</sup>.

**D'autres réalisations récentes ou marquantes dans le domaine des confortements de sols peuvent-elles être mises en évidence ?**

Aux côtés d'autres filiales NGE, nous venons de réaliser entre 2013 et 2015, la déviation et la hausse de la RD 1091 qui relie Vizille à Bourg d'Oisans, dans l'Isère, en bordure de la vallée de la Romanche. Le chantier se situait au pied des Ruines de Séchillienne et avait pour objet de mettre la route à l'abri de l'imposant glissement de terrain du Mont Sec sur la commune de Saint-Barthélémy-de-Séchillienne en confortant un déblai rocheux<sup>(3)</sup> sur le versant opposé.

G.T.S. a réalisé une paroi clouée de 47 m de hauteur, d'une superficie totale de 18 000 m<sup>2</sup>, à cinq risbermes sur 500 m de longueur qui surplombe la nationale, ce qui constitue un record. Enfin, notre brevet de paroi AD/OC<sup>®</sup> a été mis en œuvre pour conforter une partie aval de cette déviation.

Ce brevet illustre tout particulièrement notre capacité d'innovation de notre département R&D. Ce procédé est une amélioration des parois clouées en utilisant des écailles en béton préfabri-

qué en lieu et place du béton projeté traditionnel. Grâce à l'industrialisation du procédé, les quantités de ciment et d'acier sont considérablement réduites. L'interface mécanique avec le terrain naturel est assurée par une couche de drainage spécifique dont la haute perméabilité préserve l'ouvrage des sinistres liés aux venues d'eau, tout en éliminant les hors-profils béton. Tout cela confère au procédé des atouts qualitatifs et financiers indéniables.

**De telles interventions nécessitent la mobilisation de gros moyens dans des délais généralement très courts. Cette démarche fait-elle aussi partie de la culture de l'entreprise ?**

Oui, il s'agit là d'une composante indissociable de notre histoire. Nous sommes issus du TP puisque nous sommes nés dans le creuset de Guintoli et de NGE, avec une culture des grandes opérations d'infrastructures. Nous avons ainsi, à la fois, ce credo sur le multitechnique mais aussi l'expérience du coup de poing, du coup de force sur une opération majeure qui va nécessiter la mise en place rapide de très gros moyens, tant en hommes qu'en matériels.

Il nous arrive ainsi de réaliser des opérations d'ampleur. Par exemple dans le domaine du rail : nous avons été largement partie prenante des principaux « Plans rail » de la SNCF qui visent des rénovations lourdes de voies et d'infrastructures ferroviaires. Pour en citer quelques-unes, nous avons contracté en tant qu'entreprise générale de nombreux plans rails dont Aurillac, Volvic, Commentry/Gannat, Langogne/Langeac, La Mativie/Viescamp, Firminy/le Puy, Cambo-les-Bains/Saint Jean-Pied-de-Port ..., en développant des moyens importants sur des temps très courts. Parfois ce fut plus de 100 personnes mobilisées sur six mois.

Dans le même état d'esprit, nous intervenons aussi dans des situations d'urgence. C'est le cas à la suite des crues dramatiques de juin 2013 dans le Sud-Ouest sur la ligne SNCF Bordeaux-Bayonne. Nous avons été missionnés dans un cas similaire dans le domaine hydraulique, pour le confortement des berges du Bastan dans la vallée de Barèges. À cette occasion, notre procédé paroi AD/OC<sup>®</sup> a pu être mis en œuvre.

**Dans le domaine de l'amélioration de sols et des fondations profondes, d'autres chantiers phares vous ont-ils permis de mettre en œuvre les capacités de G.T.S. ?**

L'une de nos références les plus marquantes est le chantier de la dernière tranche de la LGV Est où nous avons mis en œuvre nombre de nos techniques.

Les sols compressibles et karstiques détectés sous des remblais ou sous des assises d'ouvrages d'art ont nécessité des travaux de renforcement préalables. G.T.S. a proposé différentes techniques, seules ou associées, adaptées aux configurations rencontrées : drains verticaux, injections de comblement, inclusions rigides, pieux.

D'ailleurs sur cette dernière technique de pieux un challenge particulier a été relevé par nos équipes. Suite à une problématique de forage dans des roches dolomitiques de résistance exceptionnelle, nous avons réalisé à l'époque une première en France. Nous avons apporté la solution en associant la technique du forage au marteau-fond-de-trou, initialement réservé aux petits forages, à la technique des pieux d'ouvrage d'art. C'est ainsi qu'un porteur de 60 t a été adapté pour recevoir un marteau de 1 000 mm de diamètre alimenté à l'air comprimé (120 m<sup>3</sup>/mn, 13 bars).

Une centaine de pieux de plus de 15 m de profondeur a ainsi été réalisée pour fonder la culée d'un viaduc sur le tracé. Avec ce type de matériel, nous avons réalisé 4 forages par jour au lieu de seulement 2 par semaine avec un matériel classique, permettant ainsi de réduire considérablement les délais d'exécution des travaux.

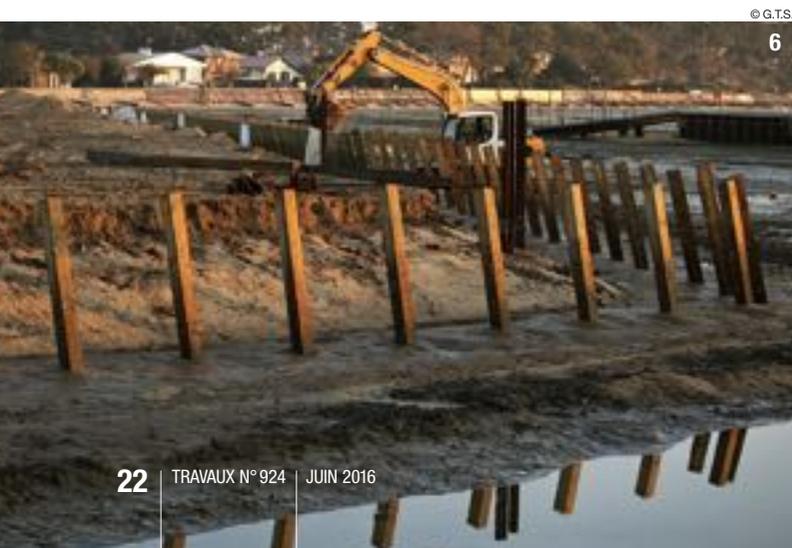
Mais nous avons aussi des interventions phares dans le domaine du privé avec les améliorations de sol et les fondations profondes du complexe Air'Innov de Thalès (31 000 m<sup>2</sup> par inclusions rigides) à Bordeaux ou du Centre de maintenance de Dassault (7 500 m<sup>2</sup> par densification dynamique) à Mérignac (33).

**Vous faites beaucoup de conception de matériels et de développements ; pouvez-vous expliquer votre politique en matière de R&D ?**

Nous sommes persuadés que la capacité d'innover et de développer est primordiale pour une entreprise qui se veut spécialisée dans son domaine. La pérennité d'une entreprise est liée à sa capacité de développer des solutions innovantes dans tous les domaines de ses compétences, voire à remettre au goût du jour des techniques qui ont été laissées de côté, souvent d'ailleurs parce que la connaissance du moment batait sur des verrous techniques.

Un exemple concret est la technique du pieu bois que nous relançons en France avec des partenaires et pôles de compétitivité alors qu'il s'en fait par centaines de milliers en Amérique du Nord. Sur ce sujet, plus que sur la technique, nous avons aussi innové sur le matériel en concevant un mât spécifique de fonçage.

Pour ce qui concerne le risque rocheux, avec notre maîtrise des travaux d'accès difficiles, G.T.S. est la seule entreprise française à développer et à fabriquer



© G.T.S. 6



© G.T.S. 7

des produits pour la protection contre les chutes de pierres 100% faits en France. Plus de 4 brevets ont été déposés sur ces types de produit et l'état de la connaissance acquise nous permet désormais d'imaginer des solutions sur des problèmes connexes comme les laves torrentielles.

Ces dernières, ou coulées de boues, sont pour les maîtres d'ouvrage publics un problème de grande ampleur toujours non résolu, qui survient, par surcroît, avec une occurrence de plus en plus fréquente (phénomènes cévenols). Des essais sont en cours et G.T.S. sera rapidement en mesure de proposer des solutions concrètes.

Dans le jargon des développeurs, ce dernier sujet est typique d'une innovation incrémentale mais nous allons aussi vers les innovations de rupture comme par exemple notre procédé AD/OC® cité plus haut.

Grâce à ce procédé, G.T.S. a été lauréat au CIRR, permettant aux maîtres d'ouvrage publics de préconiser ce produit, en toute légalité, conformément à l'article 75 du code des marchés publics, relatif à l'innovation.

Bien évidemment, nous avons d'autres projets de R&D qui restent pour l'instant confidentiels. Tous les projets précédemment cités ont aussi ce point commun d'être intimement liés à notre capacité de développement du matériel. Au fil des années, notre service matériel s'est structuré avec désormais plus de 40 personnes qui gèrent nos 400 machines dont certaines conçues en interne.

### Quels sont vos projets immédiats ou plus lointains ?

Contractuellement, il y a un vrai débat de fond sur l'avenir de notre métier. Notre positionnement, trop souvent en tant que sous-traitant, va à l'encontre tant de notre pérennité que de la qualité de l'ouvrage. Pour le client final,

## G.T.S. : DATES ET ÉVÉNEMENTS-CLÉS

**1988, création de G.T.S., filiale de Guintoli, et premiers pas de l'entreprise avec la densification dynamique et le confortement de sols.**

**1998, première croissance externe avec la reprise d'Elite, entreprise lyonnaise spécialisée dans les travaux d'accès difficile, les travaux de montagne, le risque rocheux, la sécurisation de site.**

**2002 : G.T.S. et Guintoli deviennent filiales de NGE et SOTRAC rejoint G.T.S.**

**Entre 2004 et 2008, croissance externe avec plusieurs rapprochements avec des entreprises de fondations : SATS en 2004, ROCS en 2005 (sur l'île de La Réunion), SFI en 2006, spécialisée dans les fouilles urbaines et Sud Fondations, entreprise bordelaise en 2008.**

**Un moment fort du développement est la reprise en 2012 de HC (Heaven Climber). G.T.S. intègre alors 150 personnes et un parc matériel conséquent. Cette acquisition lui permet de se développer dans le domaine des pieux. Elle lui permet également d'associer les travaux d'accès difficile aux travaux de Génie Civil spécifique en particulier pour EDF.**

**Fin 2013, dernière croissance externe sur l'île de la Réunion avec la reprise de SGTPS, entreprise de 30 personnes spécialisée dans les travaux nautiques et côtiers, complétant la présence déjà effective de G.T.S. dans ce département au travers de ROCS, entreprise de 20 personnes maîtrisant les métiers de l'injection, du confortement et du risque rocheux.**

**6- Chantier de battage de pieux en bois par injection d'eau sous pression pour le palissage de l'îlot du port de Pirailan.**

**7- Forage de pieux au marteau fond de trou Ø 1 000 mm sur le chantier de la LGV Est.**

**8- L'élévateur télescopique rail-route spécialement développé pour les travaux en hauteur sur voie.**

**9- Chantier d'inclusions rigides sur l'un des chantiers de la LGV SEA au sud de Poitiers.**

le risque sol est moins maîtrisé dans cette configuration, et les statistiques des assureurs au niveau de leur sinistralité sont là pour le prouver.

Sous-traiter, c'est gérer des contrats plutôt que des personnels qualifiés et compétents. Co-traiter, c'est contracter avec une entreprise dans des domaines pour lesquels elle est performante.

C'est vers cette forme contractuelle que nous souhaiterions que se dirigent nos donneurs d'ordres.

Pour revenir sur le terrain, le chantier du Grand Paris va évidemment nous porter, comme l'ensemble de la profession, dans les années à venir. À ce jour, nous sommes présents sur les lots 2 et 3 de la ligne 4, le lot 3 de la ligne 14, l'entonnement HSL.

Au niveau des implantations géographiques, nous nous développons désormais dans le Nord, et nous avons l'intention de renforcer notre présence

dans les régions du Grand Est et du Grand Ouest.

Là où nous sommes déjà présents, nous profitons de nos atouts pour continuer à nous développer auprès de nouveaux clients à partir de nos savoir-faire comme par exemple le génie civil spécifique de haute montagne, la réhabilitation de barrages et les conduites forcées dans les infrastructures hydrauliques, les aménagements spécifiques en station...

Pour les opérations de plus grande envergure, nous avons étoffé nos ressources d'études et de conception. Nous visons, par exemple, des chantiers d'aménagements portuaires où toutes les techniques liées à la mécanique des sols que nous maîtrisons sont souvent sollicitées et imbriquées.

Notre avenir passera aussi par l'international. Nous apportons nos compétences depuis 2015 aux structures internationales de NGE Structures et particulièrement de l'une de ses entités, Générale Routière Maroc.

Les premiers résultats sont déjà tangibles puisque nous venons d'obtenir trois contrats de plus de 10 millions d'euros pour des opérations au Maroc : un chantier d'injection de haute technicité pour l'Office Chérifien des Phosphates, la réalisation de protections rocheuses, où nous déclinons nos brevets, sur la route d'accès au barrage d'El Kansera et, enfin, l'important chantier de fondations par amélioration des sols du futur stade de Tétouan. □

1- L'ABMC (American Battle Monuments Commission,) en tant que maître d'ouvrage du projet, a retenu le groupement d'entreprises G.T.S. (mandataire) - Egis Structures & Environnement - Géolithe pour effectuer les travaux.

2- Ce chantier est présenté de façon détaillée dans un article spécifique de ce même numéro.

3- Le marché de la DR 1091 a été attribué au groupement Guintoli (mandataire), G.T.S. (confortement), NGE Génie Civil (Génie Civil, ouvrages d'art), Carron (terrassement), Bianco (Génie Civil, terrassement).

4- CIRR : Concours d'Innovation Routes et Rues organisé par le ministère de l'Écologie.

© G.T.S.

8



© PHILIPPE ROY

9





© MARC MONTAGNON  
1

# IUT/UFR/INSA LE HAVRE

## LE PÔLE GÉNIE CIVIL ET CONSTRUCTION DURABLE S'ÉLARGIT À LA GÉOTECHNIQUE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

**SUR LE CAMPUS UNIVERSITAIRE DU HAVRE, L'UN DES COMPOSANTS DE « NORMANDIE UNIVERSITÉ », S'EST DÉVELOPPÉ UN PÔLE GÉNIE CIVIL ET CONSTRUCTION DURABLE (GCCD) FORMANT CHAQUE ANNÉE PLUS DE 500 ÉTUDIANTS, ESSENTIELLEMENT DU NIVEAU BAC+2 À BAC+5. LE PROJET DE CE PÔLE EST DE METTRE EN PLACE À L'IUT DU HAVRE UNE NOUVELLE FORMATION COURTE PAR ALTERNANCE, DE TYPE LICENCE PROFESSIONNELLE (L3) EN « CONDUITE ET GESTION DE LA RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE », EN ÉTROITE SYNERGIE AVEC LES PROFESSIONNELS SPÉCIALISÉS EN INFRASTRUCTURES ET GÉOTECHNIQUE, QU'ILS SOIENT MAÎTRES D'OUVRAGE, BUREAUX D'ÉTUDES TECHNIQUES, BUREAUX DE CONTRÔLE OU ENTREPRISES. ANNE PANTET, PROFESSEUR EN GÉNIE CIVIL À L'IUT DU HAVRE, NOUS PRÉSENTE CE PROJET DE L'ÉQUIPE PÉDAGOGIQUE EN METTANT EN ÉVIDENCE LES NOMBREUX ATOUTS DONT DISPOSE LE GCCD POUR LE MENER À BIEN.**

Les formations du pôle GCCD du Havre sont dispensées au travers de trois établissements distincts et complémentaires : L'IUT Génie Civil, l'UFR Sciences et Techniques et l'antenne Génie Civil de l'INSA de Rouen. Historiquement, les formations en Génie Civil de l'Université du Havre se sont développées dès 1979 à l'UFR Sciences et techniques avec aujourd'hui un cycle LMD (Licence Master Doctorat) dont plusieurs parcours dans la spécialité BTP, puis en 1992 à l'IUT avec la création du département GCCD (Génie Civil Construction Durable). Plus récemment, en 2008, l'INSA de Rouen y a installé son départe-



© MARC MONTAGNON  
2

**1- L'IUT du Havre, en bordure du bassin Paul Vatine, sur le site des anciens docks Vauban.  
2- L'entrée principale de l'IUT du Havre.**

tement en "Génie Civil et Constructions Durables". La formation en doctorat est possible, et chaque année, ce sont environ 5 doctorats qui sont préparés et soutenus dans l'équipe Géo-Environnement et Milieux Poreux du Laboratoire



© MARC MONTAGNON

3

## LES FORCES DE L'IUT DU HAVRE

L'IUT du Havre ne manque pas d'atouts pour développer une telle formation :

- Un vivier d'étudiants à l'échelle nationale (Bac+2 : IUT - BTS) et aussi une ouverture vers l'international.
- Une expérience réussie de la L3 pro en conduite de travaux dans le BTP.
- Une équipe pédagogique mixte, avec des enseignants agrégés (7) et des enseignants-chercheurs (8), tous spécialisés en Génie Civil et des intervenants professionnels issus - chargés de cours (a minima 50% en Lpro), venant de collectivités, de bureaux d'études, d'entreprises du BTP et de bureaux de contrôle auxquels s'ajoutent des liens régionaux forts existants avec le Grand Port Maritime du Havre, le CEREMA (Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) et la CODAH (Communauté D'Agglomération du Havre) avec ses services techniques. Cette diversité garantit un large spectre de compétences et une formation de qualité, alliant la rigueur et l'innovation.
- Une salle de travaux pratiques mutualisée entre les trois composantes du pôle GCCD avec les logiciels de base en géotechnique et la volonté d'un pôle inter-niveaux de formation orientée géotechnique.
- Un contexte local dynamique dans le secteur du BTP - sur l'axe Seine - avec une accessibilité facile pour des visites de chantier.

Ondes et Milieux Complexes - UMR CNRS.

Ainsi au Havre, différents niveaux et voies de formation en Génie Civil et Construction Durable sont proposés aux étudiants, qui se complètent et qui ont les mêmes missions, à savoir : la formation initiale et continue, l'orientation et l'insertion professionnelle, la recherche et l'innovation, la coopération internationale et l'implication économique et sociale.

L'unicité de lieu - les trois établissements sont implantés à proximité du centre-ville - permet d'afficher l'existence forte d'un pôle Génie Civil en Normandie, identifiable par le monde professionnel, et crée des synergies entre les étudiants car il existe des passerelles entre les différentes formations. L'équipe pédagogique "Génie Civil" est composée d'une vingtaine d'enseignants chercheurs (maîtres de conférences et professeurs) et d'enseignants

**3- Anne Pantet, professeur à l'IUT du Havre.**

**4- L'antenne « Génie Civil Constructions Durables » de l'INSA de Rouen, en bordure du bassin de l'Eure.**

**5- L'UFR Sciences et Technique de l'Université du Havre.**

agrégés, tous spécialisés dans cette discipline.

« Cela correspond à deux démarches pédagogiques différentes, précise Anne Pantet. Cette complémentarité d'approche est riche pour la pédagogie. Elle entretient une véritable émulation entre les enseignants et les chercheurs ».

Les membres de cette équipe interviennent indifféremment dans les trois composantes - IUT, UFR et INSA - et entretiennent des liens étroits avec le monde industriel, pour assurer des visites de chantiers, les accueils de stagiaires (avec des stages obligatoires dans tous les parcours), des projets encadrés et des conférences.

L'implication de professionnels est aussi très importante avec des chargés de cours et des membres du monde professionnel siégeant dans les différents conseils des établissements et qui ont un droit de regard sur les contenus pédagogiques.

La fédération de moyens pédagogiques favorise aussi leur développement et leur performance.

À noter que certains parcours sont mutualisés, notamment le Master GPC (Génie Portuaire et Côtier) de l'Université du Havre (ULH) et l'option ETPM (Environnement et Travaux Publics

Maritimes) de l'INSA de Rouen : en 5<sup>e</sup> année, les étudiants de l'INSA suivent les mêmes cours que les étudiants de Master.

« Lorsqu'on arrive avec le Bac, plusieurs options sont possibles : entrer à l'IUT pour faire une licence Pro, intégrer l'UFR pour une licence en 3 ans puis, éventuellement, un Master et un Doctorat, ou faire une "prépa" pour entrer à l'INSA et devenir ingénieur. Il existe des passerelles entre les trois formations : après l'IUT, on peut faire une licence mais on peut aussi aller à l'INSA ; avec un Master ou une licence si on a de très bons résultats, on peut également intégrer l'INSA ; un étudiant de l'INSA peut faire un doctorat ».

## UNE FORMATION COURTE PAR APPRENTISSAGE

La nouvelle licence Pro "conduite et gestion de la reconnaissance géotechnique" compléterait celle déjà existante, créée en 2002, qui connaît un vrai succès de « conduite et gestion de projets en BTP », et qui peut être effectuée en initiale ou en alternance. Elle s'inscrit dans la même logique.

S'agissant d'une licence Pro, plus de 50% des cours en seraient assurés par des professionnels. L'IUT du Havre est donc en train de la mettre en place en collaboration avec des syndicats professionnels, la FSST<sup>(1)</sup>, l'AFTES<sup>(2)</sup> et l'Union Syndicale Géotechnique (USG).

« S'il existe déjà de nombreuses formations d'ingénieurs, poursuit Anne Pantet, j'ai le sentiment qu'il nous manque des formations de niveau L3, c'est-à-dire technicien supérieur. Il est loin le temps où les jeunes s'inséraient directement dans la vie professionnelle après un DUT. On constate que l'insertion professionnelle après le DUT Génie Civil est en nette diminution. »



© MARC MONTAGNON

4



5

Depuis 2010, plus de 80% de diplômés poursuivent leurs études (Bac+3 ou Bac+5) et donc moins de 20% entrent directement dans la vie professionnelle ».

Aujourd'hui le taux de poursuite d'études après le DUT - et c'est vrai pour tous les IUT de France - atteint 96%. Les raisons sont multiples, de l'harmonisation européenne du système LMD (Licence Master Doctorat) à l'effet d'une crise très marquée ainsi que des aspects sociétaux, ambition et sécurité des diplômés.

« Les professionnels apprécient le DUT, poursuit-elle. Les jeunes qui le préparent le font généralement en petits groupes, avec un taux d'encadrement très fort et un suivi plus directif qu'à l'université : travaux pratiques, travaux dirigés et stages obligatoires, discipline plus contraignante. Le niveau des cours est identique à l'université mais l'organisation même des études implique une prise en charge plus directe des étudiants eux-mêmes ». Ainsi, l'essentiel des étudiants titulaires d'un DUT de GCCD poursuivent leurs études et différentes voies sont d'ailleurs possibles, certes au Havre, mais aussi dans de nombreux autres établissements de l'enseignement supérieur.

Le site de l'AUGC<sup>(9)</sup> informe largement les étudiants des filières existantes. Il indique notamment que la formation initiale DUT peut mener aussi jusqu'aux études doctorales.

**LICENCE PRO : LES AVANTAGES**

La licence professionnelle est une offre de formation sur une année (L3), dispensée en liaison forte avec des représentants du milieu professionnel qui assurent 55% de la formation.

« Le monde universitaire travaille enfin de plus en plus en synergie avec le monde industriel. Ce ne sont plus deux mondes qui se regardent et qui s'ignorent ».

« La formation comprend impérativement une alternance entreprise/université et une immersion totale dans l'entreprise prévue avec le stage et le PTUT. Elle permet une insertion professionnelle directe aux jeunes qui ne peuvent pas ou ne veulent pas poursuivre leurs études jusqu'au doctorat ».

« Comme je le dis de manière caricaturale, nous faisons le travail académique, nous apprenons aux jeunes à lire et à écrire, aux professionnels de leur faire aimer Shakespeare ou Victor Hugo ». Ce type de licence professionnelle accueille un public diversifié. Elle est accessible en formation initiale, mais

**COMPOSANTES DE LA FORMATION GÉNIE CIVIL AU HAVRE**



Mutualisation des moyens pédagogiques. Mutualisation du corps enseignant.

6

© DOC IUT LE HAVRE

cela reste assez anecdotique, en formation continue, ainsi qu'en formation par alternance, soit en contrat d'apprentissage, soit en contrat de professionnalisation. C'est ce dernier contrat que l'IUT envisage de mettre en place.

Cette formation est accessible à tout étudiant de niveau Bac+2 ayant des compétences dans le domaine et tout particulièrement aux DUT Génie Civil - Construction Durable. Seule la formation en alternance par contrat de professionnalisation est à retenir pour un démarrage rapide, l'ouverture d'une nouvelle offre de formation initiale est actuellement exclue.

**6- Les composantes de la formation Génie Civil au Havre : UFR ST, INSA GCCD, IUT GCCD et LOMC (UMR-CNRS).**

**7- Le parcours universitaire proposé par le pôle GCCD de l'Université du Havre.**

**UN SITE OPÉRATIONNEL...**

Le département Génie Civil de l'IUT de l'université du Havre, désormais GCCD, a été créé en 1992. Il est le seul en Normandie et fait partie des premières structures d'enseignement supérieur de Génie Civil en Haute Normandie.

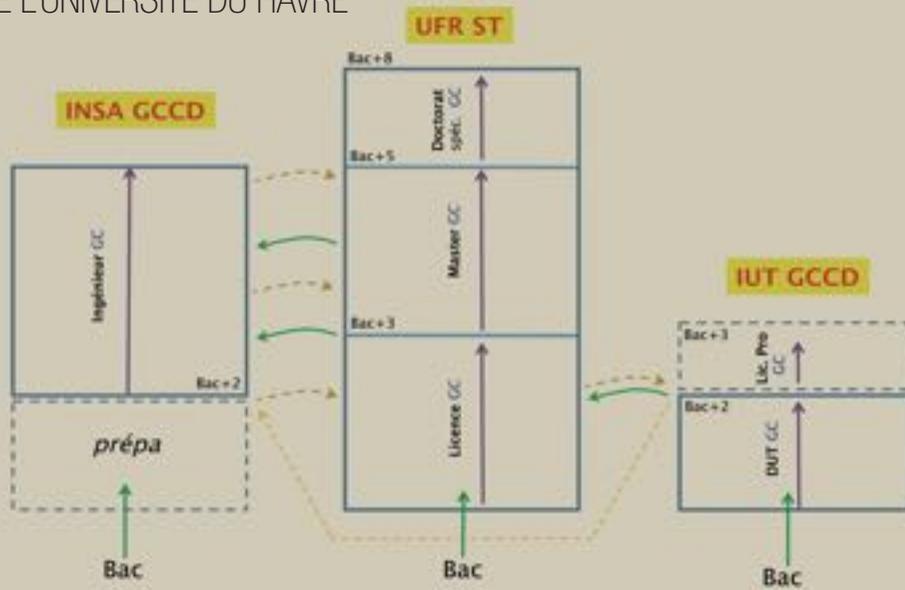
À ce jour, 1 300 étudiants y ont été formés. Depuis plusieurs années, le nombre annuel de diplômés s'est stabilisé entre 80 et 100. La dernière crise ne l'a pas impacté et l'intérêt des jeunes reste fort pour ces métiers.

La formation en DUT est régie par un programme pédagogique national qui, outre une force de réseaux importante, permet d'avoir une qualité des diplômés sur tout le territoire métropolitain et l'île de la Réunion.

Dans le cadre de sa politique d'échanges internationaux, il est attractif pour des étudiants étrangers qui bénéficient de bourses d'études. Les formations Bac+2 sont désormais ouvertes aux étrangers étudiants et l'IUT du Havre accueille chaque année des étudiants chinois, péruviens, colombiens, gabonais, burkinabés... qui viennent suivre une formation Bac+2.

« L'échange se fait d'ailleurs à double sens, précise Anne Pantet : nos étudiants vont souvent dans des pays anglophones ainsi qu'en Amérique latine. Ils sont d'ailleurs vivement encouragés à se former aux langues étrangères car ils peuvent bénéficier de cours de soutien, mais aussi d'aide à la mobilité à l'étranger dans le cadre de la bourse Erasmus. Certaines écoles

**LE PARCOURS UNIVERSITAIRE PROPOSÉ PAR LE PÔLE GCCD DE L'UNIVERSITÉ DU HAVRE**



7

© DOC IUT LE HAVRE



8



9



10



11

**8- Trois étudiants en TP d'économie de la construction (2<sup>e</sup> année de GCCD) : Chloé Baguesse, Bastien Lelaidier, Alexandre Flan-drin.**

**9- La bibliothèque universitaire offre un univers accueillant et chaleureux aux étudiants.**

**10- À l'entrée du hall technique, les blouses des étudiants et les consignes de sécurité.**

**11- Le hall technique dispose d'un équipement très complet pour les études sur le béton.**

**12- Quelques-uns des professeurs du pôle GCCD avec, de gauche à droite : Abdellah Alem, Anne Pantet, Daniel Jacob, Philippe Seelauthner, Jean-Robert Delahaye et Said Taibi.**

*comme l'INSA imposent d'ailleurs un stage de 6 mois à l'étranger».*

Pour permettre une insertion rapide dans la vie professionnelle, avec un cycle court de formation, des dispositifs de la formation par alternance sont aujourd'hui possibles. Ils permettent de mettre en contact rapidement les jeunes alternants avec le monde professionnel.

Anne Pantet insiste sur le fait que « *les entreprises partenaires, en prenant ce pari sur l'avenir, ont envie non seulement de former un futur collabo-*

*rateur mais aussi de participer activement à l'effort de formation. Les entreprises qui prennent un apprenti ont un objectif d'embauche potentielle après la formation, mais peuvent aussi avoir un étudiant sur une durée limitée pour répondre à une mission ponctuelle avec un réel contexte réglementaire pour les deux parties».*

#### **...ET UNE EXPÉRIENCE RÉUSSIE**

La licence Professionnelle en "métier du BTP, Génie Civil et construction, parcours : conduite et gestion de projets

BTP", créée en 2002, est un dispositif pédagogique qui a fait ses preuves, avec 100% d'insertion dans le tissu professionnel en moins de trois mois après la fin de la formation. En général, l'insertion du diplômé s'effectue dans l'entreprise qui l'a accueilli et financé. L'alternance induit une modification du comportement des étudiants : implication, motivation, mais aussi une culture d'entreprise.

La licence Pro est également ouverte à la formation initiale, mais aussi à la formation continue. Le service de la Formation Continue intervient dans l'organisation du parcours en alternance, en partenariat avec le département GCCD de l'IUT.

L'effectif total de l'année universitaire 2015-2016 est de 26 étudiants, qui suivent la formation répartie en 16 semaines ou 450 heures de formation académique et 36 semaines en entreprise, comprenant un projet tutoré de 110 heures.

#### **LES OBJECTIFS DE LA FUTURE L3PRO**

Anne Pantet précise les objectifs du projet : « *Ce projet de formation L3-Pro "Conduite et gestion de la reconnaissance géotechnique pour infrastructures" a pour but de compléter* ▽



12

## LE PÔLE GÉNIE CIVIL CONSTRUCTION DURABLE : LES FORMATIONS

les connaissances initiales acquises en géotechnique, en intégrant des concepts élargis sur les sols, notamment leurs propriétés mécaniques, thermiques et physico-chimiques et le rôle et la qualité de l'eau dans les sols saturés ou non-saturés. S'il y a lieu de décrire les mécanismes complexes et de définir les propriétés des sols, il faut également les quantifier, soit en laboratoire, soit in situ ».

« Outre un approfondissement des essais géotechniques usuels, les procédures expérimentales relatives aux essais d'eau, aux diagnostics des milieux, au suivi du comportement des ouvrages et aux contrôles (métrologie) seront développées, mais également l'acquisition et le traitement de ces données de plus en plus automatisés ».

L'ensemble des établissements constituant le pôle Génie Civil Construction Durable havrais représente plus de 500 étudiants répartis de la façon suivante :

- **IUT Génie Civil Construction Durable** : 200 étudiants
- **Licence BTP 3 ans** : 80 étudiants
- **Master 1 BTP** : 60 étudiants
- **5 Master 2 BTP** : en moyenne 20 étudiants par discipline, avec la dernière année spécialisée, soit une centaine d'étudiants avec les formations suivantes :
  - GCE** : Génie Civil et Environnement.
  - DRAQ** : Diagnostic et Réhabilitation des Architectures du Quotidien (commun avec l'École d'Architecture de Rouen).
  - GPC** : Génie Portuaire et Côtier (commun avec l'INSA).
  - EB** : Énergétique du Bâtiment.
  - REng** : Renewable Energy in Civil Engineering (Master international en anglais avec 50% de la promotion constitué d'étudiants étrangers).
- **INSA (antenne du Havre)** : 90 étudiants et 2 types de formation :
  - ISIS** : Ingénierie Sécurité Incendie Structures.
  - ETPM** : Environnement et Travaux Publics Maritimes.

13- Dans la salle de géotechnique, le portique à rouleaux de Schneebeli.

14- Une salle de cours.

15- Deux des enseignants de l'INSA département « Génie Civil Constructions Durables » : Saber Imanzadeh et Aymeric Le Borgne de l'équipe « environnements et milieux poreux ».

16- L'une des salles du LOMC (Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes).

### DES RECONNAISSANCES SPÉCIALISÉES...

Compte tenu de la complexité des infrastructures et des ouvrages souterrains et de la diversité des milieux géologiques, pour certains déjà bien perturbés par des constructions existantes, il est nécessaire de réaliser des reconnaissances géologiques et géotechniques spécialisées.

« Pour concevoir des ouvrages souterrains (des forages dirigés aux tunnels), indique Anne Pantet, pour permettre la reconquête des friches industrielles (du diagnostic des sols et aux techniques de dépollution), pour construire en sites difficiles (des fondations spéciales au traitement et le renforcement des sols) mais

aussi pour la production d'énergie (la géothermie basse énergie) et la protection des ressources en eau, les données géotechniques adaptées doivent être interprétées pour produire une synthèse détaillée des sites investigués et définir les interactions avec les ouvrages existants ou à construire, en milieu urbain ou non ».

### ...À DES OBJECTIFS DE PÉRENNITÉ...

De la reconnaissance à l'exécution des infrastructures ou des ouvrages de la géotechnique (fondations, galeries au traitement de sol), il est essentiel de prendre en considération la zone d'implantation de l'ouvrage, afin de garantir la pérennité des installations



13



14



15



16



et de prévenir les risques techniques et mais aussi environnementaux. Il s'agit de consolider les différents aspects de la géotechnique : de la géotechnique classique avec l'importance de l'interaction sol-structure mais aussi de la géotechnique environnementale. « *L'importance des études géotechniques dans la démarche d'optimisation des opérations de construction et d'aménagement est fondamentale, poursuit-elle, car l'occupation du sol et du sous-sol est de plus en plus forte. La démarche observationnelle, proche de la conception interactive en tunnels doit être introduite dans l'enseignement traditionnel. Le retour d'expérience et la pathologie des ouvrages seront traités afin de répondre aux besoins en travaux de confortement et de reprise en sous œuvre* ».

### ...EN INTÉGRANT UNE ACTIVITÉ DE TERRAIN

La conduite de travaux "reconnaissance des sols" est pluridisciplinaire ; alliant à la fois des compétences en géologie de la surface, hydrogéologie, cartographie, en physique - chimie et mécanique des sols, en interaction sol-structure et en métrologie et modélisation... Mais aussi des connaissances des différentes législations et réglementations : Code de l'environnement, Code de l'urbanisme, Code du travail... Il s'agit essentiellement d'une activité de terrain et de chantier, nécessitant une organisation et une bonne connaissance des procédures des essais in situ et des essais d'eau, mais aussi les règles de la contractualisation des marchés et des études de prix. Le conducteur travaux doit aussi rédiger les dossiers techniques, les différents CCTP, les études de prix et les contrats, et les rapports de fin de travaux, qui serviront au BET. « *En complément de ces enseignements technologiques, des modules de*

**17- Les équipements pour les essais sur le béton dans le hall technique.**

**18- Dans la salle Biarez, consacrée à la géotechnique, une presse d'essai triaxial.**

*conduite de travaux associant la réglementation, la sécurité et la gestion de chantier seront dispensés, sans oublier les risques pour la santé, en prenant en compte l'état des milieux (pollués ou non). Cette formation intégrera également des modules d'anglais technique, ainsi que des modules de recherches documentaires (des normes techniques et environnementales à l'usage des cartes interactives et informatives disponibles sur les sites concernés ; BRGM, INERIS, ministères...)* ».

### UNE VRAIE FORCE DE PROPOSITION...

La création d'une formation diplômante nécessite l'élaboration d'un dossier qui repose, d'une part, sur un programme pédagogique établi en accord avec les syndicats et les branches professionnelles et, d'autre part, sur la justification d'un besoin émergent sur le territoire en assurant l'employabilité d'une dizaine d'étudiants par an.

Ce dossier sera alors présenté aux instances de l'Université, qui après accord des différents conseils, attribuera les moyens nécessaires au fonctionnement, pour une période définie et renouvelable.

La formation associera des compétences disciplinaires dispensées à l'ULH et des pratiques professionnelles développées au sein des entreprises partenaires de la formation.

### ...ET UN APPEL À PARTICIPATION

Déjà, les associations professionnelles ont été contactées et un groupe de travail est en cours de montage. Il s'est réuni au printemps 2016.

Ce groupe doit, d'une part, estimer les besoins et les perspectives de développement des métiers liés à la reconnaissance géotechnique et, d'autre part, solliciter les entreprises pour accueillir des étudiants en alternance

et aussi pour animer la formation. Tous les professionnels intéressés par ce projet<sup>(4)</sup> y sont les bienvenus. □

- 1- **FSTT** : France Sans Tranchées Technologies, est une association scientifique et technique qui a pour objet de promouvoir les techniques sans tranchée pour les travaux de canalisation sur les réseaux enterrés...
- 2- **AFTES** : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain.
- 3- **AUGC** : Association Universitaire de Génie Civil.
- 4- **Contact** : anne.pantet@univ-lehavre.fr.

**BALINEAU**  
FONDATEURS  
FONDATIONS SPECIALES  
ET TRAVAUX NAUTIQUES

- Travaux en sites fluvial et maritime
- Dragage
- Pieux battus / forés
- Palplanches
- Amélioration des sols
  - Drains verticaux
  - Inclusions rigides
  - Compactage par vibrations

**Siège social et bureaux :**  
3 avenue Paul Langevin  
Enora Park – CS 30039  
33615 PESSAC cedex  
Tél. : +33 (0) 5 57 89 16 78  
Fax : +33 (0) 5 56 07 34 78  
balineau@balineau.fr

**Agence Antilles / Guyane :**  
Rue Nobel – Z.I. de Jarry  
BP 2183  
97195 JARRY cedex  
Tél. : +590 (0) 590 32 59 10  
Fax : +590 (0) 590 26 89 44  
Balineau.antilles@balineau.fr

[www.balineau.com](http://www.balineau.com)


 1  
© LHOIST

# CONTRIBUTION DU TRAITEMENT À LA CHAUX À LA PROTECTION CONTRE LE GEL DES PLATEFORMES ROUTIÈRES

AUTEURS : GONTRAN HERRIER, INGÉNIEUR DE RECHERCHE, LHOIST RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT, NIVELLES (BELGIQUE) - THI THANH HANG NGUYEN, DOCTEUR, ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES, UNIVERSITÉ PARIS-EST - VALÉRY FERBER, ENTREPRISE CHARIER, SYNDICAT PROFESSIONNEL DES TERRASSIERS DE FRANCE

**LE TRAITEMENT À LA CHAUX DES SOLS FINS CONSTITUE L'UNE DES TECHNIQUES LES PLUS EFFICACES POUR OPTIMISER LEUR RÉEMPLOI DANS LES OUVRAGES EN TERRE ET RÉDUIRE LE COÛT DES TERRASSEMENTS. LA MÉTHODE FRANÇAISE DE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉES PERMET D'INTÉGRER LES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX DANS LES CALCULS MÉCANIQUES MAIS ELLE NE DONNAIT JUSQU'À PRÉSENT AUCUNE RÈGLE SUR LA PRISE EN COMPTE DE CE TRAITEMENT DANS LA VÉRIFICATION DE LA TENUE AU GEL/DÉGEL. CETTE LACUNE PEUT CONDUIRE À CONSIDÉRER PAR DÉFAUT LES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX EN PARTIE SUPÉRIEURE DE TERRASSEMENTS COMME TRÈS GÉLIFS, CONDUISANT À DES SURCOÛTS INUTILES DE TRAITEMENT.**

Dans les régions froides, les parties supérieures des terrassements sont souvent traitées comme des couches de forme, conduisant à des surdosages en liant et à un surcoût très important. Le tableau A montre l'impact pénalisant d'une hypothèse de sol très gélif en termes de vérification au gel d'une structure de chaussée.

Pour pallier cette insuffisance des règles techniques, la société Lhoist (producteur de chaux) et la Fédération Nationale des Travaux Publics (via le Syndicat Professionnel des Terrassiers de France) ont initié et pris en charge financièrement une recherche sous la forme d'une thèse Cifre sur le sujet de la sensibilité au gel des sols fins traités

à la chaux. Le Cerema (Laboratoire de Clermont-Ferrand) a été impliqué dans le suivi de la thèse et dans la réalisation des essais de gélifonflement afin d'apporter un œil d'expert sur le sujet de la gélivité.

L'encadrement de la thèse a été confié à l'École des Ponts ParisTech pour assurer la qualité scientifique des

résultats de ces travaux. Ce travail a été réalisé entre novembre 2011 et mars 2015 par Thi Thanh Hang Nguyen (doctorante).

Cet article présente les principaux résultats obtenus dans cette thèse ainsi que les pistes pour contribuer à améliorer la méthode de dimensionnement au gel.



2a & 2b- Effet d'un traitement à la chaux sur un sol argileux humide (à gauche avant traitement, à droite après traitement).

2a & 2b- Effect of a lime treatment on a humid clayey soil (on the left before treatment, on the right after treatment).

### LES EFFETS DU GEL DANS LES CHAUSSÉES

Les phénomènes de gel et de dégel peuvent affecter les propriétés mécaniques des chaussées selon deux processus : le gonflement au gel (gélif-gonflement, provoqué par la succion cryogénique) et la gélifraction (rupture du matériau suite à l'imposition de cycles de gel et dégel successifs).

En France, la sensibilité à la cryosuction est évaluée depuis 1970 par l'essai de gonflement au gel qui est réalisé notamment par les Laboratoires du Cerema, suivant la norme NF P 98-234-2.

L'essai de cycles de gel/dégel (gélifraction) fait, quant à lui, l'objet d'une nouvelle spécification technique européenne CEN TS 13286-54, inspirée de la norme européenne EN 1367-1 sur la résistance au gel des granulats. Ce document a un statut provisoire et la méthodologie qui y est décrite doit être évaluée avant d'évoluer vers un statut de norme ou d'être rejeté.

### MATÉRIAUX, CONDITIONS DE TRAITEMENT, PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET HYDRAULIQUES

Trois sols fins ont été choisis pour réaliser les expérimentations. Ils correspondent à des catégories de matériaux couramment rencontrés sur les chantiers de terrassements en France (A1, A2, A3 selon la norme française NF P 11-300). Trois dosages en chaux différents ont été appliqués, visant à répondre aux exigences suivantes :

- Amélioration de portance pour un usage en remblai, avec un objectif d'Indice Portant Immédiat de 10 (dosage en chaux minimal) ;
- Stabilisation et insensibilité à l'eau pour un usage en Partie Supérieure de Terrassements, avec un objectif de rapport CBR après immersion/PI supérieur à 1 (dosage en chaux intermédiaire) ;
- Stabilisation et non gélivité pour un usage en couche de forme, avec un objectif de résistance en compression de 2,5 MPa (dosage le plus élevé).

Les références de compactage relatives à chaque matériau et chaque niveau d'incorporation de chaux vive ont été déterminées et appliquées pour les études mécaniques, hydrauliques, et le comportement face aux phénomènes de gel. La chaux utilisée pour ces travaux est une chaux vive Proviacal® ST, de la société Lhoist, répondant aux spécifications de la norme NF EN 459-1 et correspondant à la dénomination EN 459-1 CL 90-Q (R4 P2). Les dosages appliqués ont été adaptés à chaque nature de sol (tableau B).

L'évolution des performances mécaniques est directement liée aux effets chimiques produits par l'ajout de la chaux dans le sol.

Un premier effet qui se produit immédiatement conduit à la floculation des minéraux argileux et à la granulation du sol fin, tandis qu'un second, appelé réaction pouzzolanique, intervient plus tardivement et conduit à la formation de composés cimentaires hydratés par combinaison du calcium apporté par la chaux avec les éléments argileux du sol. Ainsi, le gain de performance mécanique à long terme est-il d'autant plus prononcé que le dosage en chaux est élevé. Le développement des résistances des sols A1 et A2 est illustré à la figure 3, qui montre des niveaux de résistance en compression atteignant 1 MPa dès 28 jours et atteignant 2,5 MPa entre 50 et 150 jours selon les sols, et ce lorsque les dosages en chaux correspondent aux objectifs de stabilisation.

TABLEAU A : EXEMPLE DE VÉRIFICATION AU GEL d'une structure de chaussée dans laquelle on fait varier la classe de sensibilité au gel du sol traité en partie supérieure des terrassements, de « peu gélif » à « très gélif ». Dans cet exemple, la structure est vérifiée au gel seulement si le sol traité à la chaux est considéré comme peu gélif.

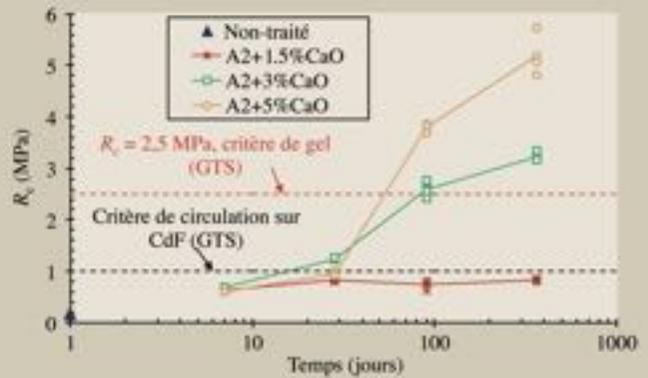
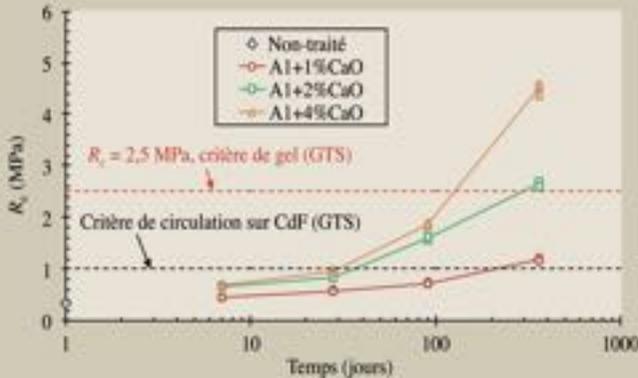
	Hypothèse de sol peu gélif ( $p = 0,4 \text{ mm}/(^\circ\text{C}\cdot\text{h})^{1/2}$ )	Hypothèse de sol très gélif ( $p = 1 \text{ mm}/(^\circ\text{C}\cdot\text{h})^{1/2}$ )
Couche de surface (Enrobé bitumineux)	8 cm Béton Bitumineux	8 cm Béton Bitumineux
Couche d'assise (Enrobé bitumineux)	14 cm Grave Bitume	14 cm Grave Bitume
Couche de forme (sol traité)	35 cm Sol traité au liant hydraulique	35 cm Sol traité au liant hydraulique
Partie Supérieure des Terrassements (partie supérieure, traitée) (Sol fin traité à la chaux)	35 cm SolA Sol peu gélif (SGp) $p = 0,4$	35 cm SolA Sol très gélif (SGt) $p = 1$
Sol support (Sol fin non traité)	SolA SGt $p = 1$	SolA SGt $p = 1$
Indice de gel admissible ( $^\circ\text{C}\cdot\text{j}$ )	187	136,4
Indice de gel de référence ( $^\circ\text{C}\cdot\text{j}$ ) (Ex : Alençon, Orne Indice de Référence Hiver Rigoureux Exceptionnel)	165	165
Résultat (Vérifié si Indice de Référence < Indice de Gel admissible)	Vérifiée	Non vérifiée

TABLEAU B : LES DOSAGES APPLIQUÉS ONT ÉTÉ ADAPTÉS À CHAQUE NATURE DE SOL

Sol	% CaO Objectif « Amélioration »	% CaO Objectif « Stabilisation et insensibilité à l'eau »	% CaO Objectif « Stabilisation et non gélivité »
A1	1	2	4
A2	1,5	3	5
A3	2	4	7

## ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION DE DEUX SOLS FINS

de classe A1 et A2 traités à la chaux, en fonction du dosage et du temps de cure



3 © BR

Le sol A3, pourtant plus argileux et théoriquement propice au traitement, est le seul à montrer une faible évolution des performances mécaniques. Pour expliquer cette faible réactivité, deux hypothèses ont été avancées. D'une part, des propriétés physico-chimiques particulières du sol qui le rendraient peu favorable au traitement à la chaux. D'autre part, l'étape de malaxage du sol avec la chaux qui conduirait à des agglomérats de trop grande taille. La distribution peu efficace de la chaux

dans le sol, concentrée à la surface des agglomérats, n'aurait alors pas permis le développement des réactions pouzzolaniques. Cette hypothèse mettrait en évidence l'importance du soin à apporter à l'étape de malaxage et de l'obtention d'une finesse de mouture suffisante du matériau traité. Enfin, les propriétés hydrauliques des sols traités ont été déterminées, car elles présentent de l'intérêt dans l'absolu pour la construction de parties d'ouvrages où la fonction d'étanchéité

peut être pertinente, mais également parce qu'elles sont au moins partiellement associées au phénomène de succion cryogénique et donc au comportement de gélifonflement. De manière générale, les valeurs de perméabilité des sols traités à l'état saturé (compactage dynamique proche de l'OPN) sont légèrement plus élevées, à court et moyen terme, que celles des matériaux originels à court terme, mais restent inférieures à des valeurs de  $10^{-8}$  m/s (figure 4).

### COMPORTEMENT FACE AU GEL GÉLIFONFLEMENT

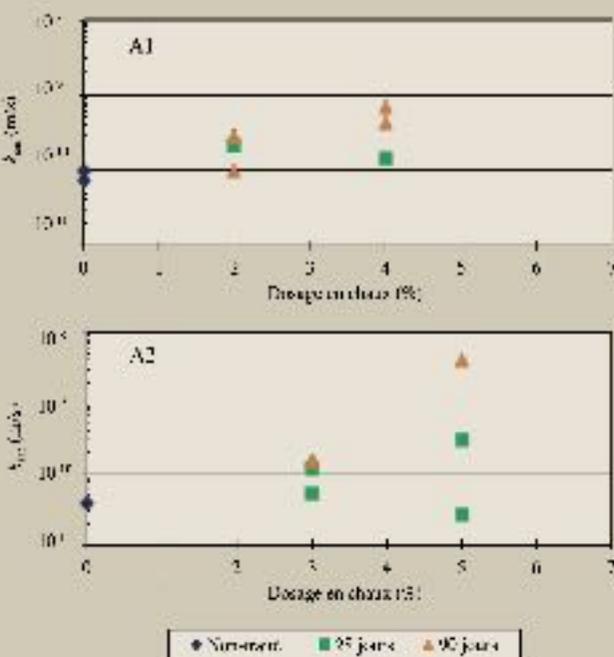
Le gonflement du sol sous l'effet de la remontée d'eau par cryosuction avec formation d'une lentille de glace, est un des deux phénomènes examinés dans ces travaux. Il est préjudiciable lorsqu'il se manifeste dans les sols supports de chaussées : le risque se traduit par une chute de la portance du sol support en période de dégel et, ensuite, par une dégradation rapide de la structure de chaussée sous le passage de poids lourds (d'où l'installation de barrières de dégel). Ce phénomène est apprécié par l'essai de gélifonflement, qui permet de déterminer une valeur de pente de gonflement par cryosuction, notée  $p$  (en  $\text{mm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{min})^{1/2}$ ) (figure 5). Cette valeur peut ensuite être utilisée dans le dimensionnement au gel des chaussées.

L'essai permet de classer les matériaux comme non gélifs (SGn) si la pente est inférieure à 0,05 ; peu gélifs (SGp) pour des pentes comprises entre 0,05 et 0,40 ; et enfin très gélifs si la pente excède 0,40. Les études de gélifonflement des sols traités à la chaux ont abouti aux résultats suivants (figure 6) :

- Les sols traités, après 28 jours de maturation, sont plus sensibles au gel (la pente de gélifonflement est plus forte) que les sols non-traités correspondants. Cette pente ne change pas au cours du temps lorsque le dosage en chaux correspond à l'objectif d'amélioration (dosage le plus faible) ;
- Un dosage plus élevé (dosage intermédiaire et fort) permet de diminuer la valeur de la pente de gélifonflement, et ce d'autant plus que le temps de cure est prolongé.

## ÉVOLUTION DE LA PERMÉABILITÉ À L'ÉTAT SATURÉ DE DEUX SOLS FINS

de classe A1 et A2 traités à la chaux, en fonction du dosage en chaux et du temps de cure



4 © BR

3- Évolution de la résistance en compression de deux sols fins de classe A1 et A2 traités à la chaux, en fonction du dosage et du temps de cure.

4- Évolution de la perméabilité à l'état saturé de deux sols fins de classe A1 et A2 traités à la chaux, en fonction du dosage en chaux et du temps de cure.

3- Change in the compressive strength of two class A1 and A2 fine soils treated with lime, as a function of dosing and the curing time.

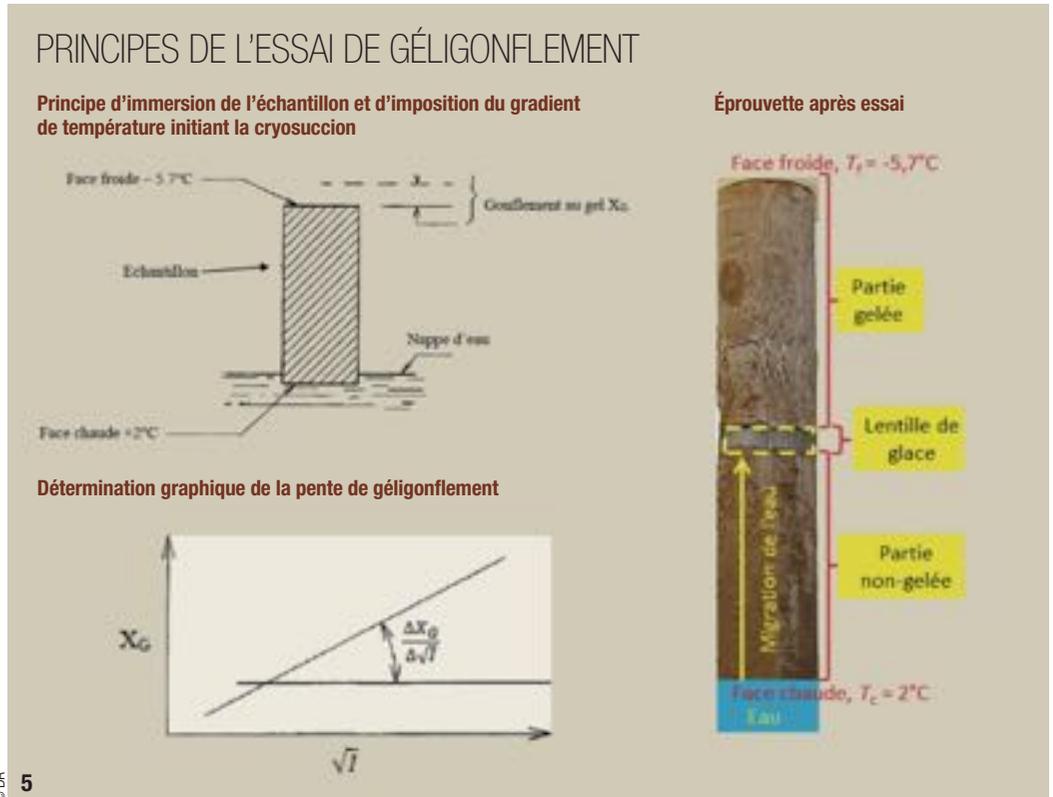
4- Change in the permeability in the saturated state of two class A1 and A2 fine soils treated with lime, as a function of lime dosing and the curing time.

**5- Principes de l'essai de gélifonflement.**

**6- Évolution de la pente de gélifonflement et du caractère de sensibilité au gel de deux sols fins de classe A1 (à gauche) et A2 (à droite) traités à la chaux, en fonction du dosage et du temps de cure.**

**5- Frost swelling test principles.**

**6- Change in the frost swelling gradient and the frost sensitivity of two class A1 (left) and A2 (right) fine soils treated with lime, as a function of dosing and the curing time.**



En d'autres termes, la sensibilité au gel est réduite avec le temps : le sol A1 traité devient non gélif après 1 an (4% de chaux), le sol A2 est non-gélif après 90 jours (quel que soit le dosage), et le sol A3 est non gélif après 1 an de cure, même si les performances mécaniques restent modestes.

Les résultats de la thèse ont confirmé que le gonflement au gel des sols traités est principalement gouverné par les propriétés hydrauliques du matériau (suction au front de gel et conductivité hydraulique), mais les réactions pouzzolaniques confèrent au

sol traité une résistance mécanique qui s'oppose à la formation d'une lentille de glace. Ceci explique qu'un sol traité peut présenter une pente de gélifonflement quasi-nulle (sol non gélif) pour un dosage élevé et un temps de cure long, alors que sa perméabilité n'est pas plus faible qu'un sol peu gélif ou très gélif. Ces propriétés sont corrélées avec l'action de la chaux en plusieurs étapes (floculation et amélioration dans un premier temps, puis stabilisation ultérieure lorsque le dosage en chaux est suffisant, comme dans le cas des dosages intermédiaires et forts de l'étude). On a aussi pu observer une tendance gé-

rale dans la relation entre la résistance à la compression des sols traités à la chaux et leur pente de gélifonflement. Les résultats obtenus dans cette thèse sont d'ailleurs cohérents avec les résultats obtenus antérieurement par les Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées (devenus Cerema), sur sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, parmi lesquels du ciment (figure 7).

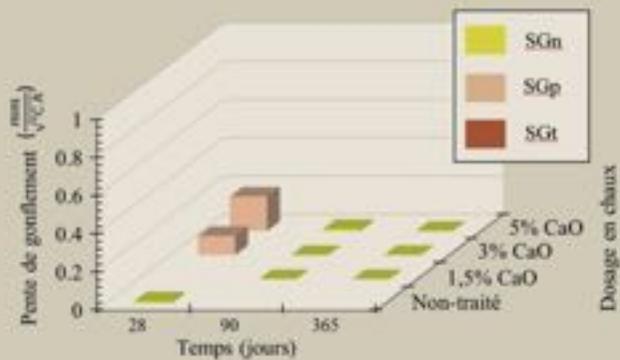
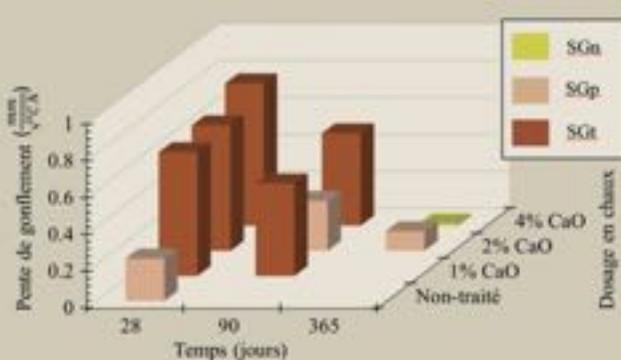
**GÉLIFRACTION**

Une autre source de désordres provoqués par le gel peut être attribuée au phénomène de gélifraction.

La succession de cycles de gel et dégel peut conduire à une destruction progressive des liaisons mécaniques créées par la prise initiée par la chaux. Ce phénomène concerne surtout les couches traitées en phase de chantier, lorsqu'elles sont exposées directement aux cycles gel-dégel avant la mise en œuvre des couches de chaussées. Il est à l'origine de nombreux désordres de couches de forme, et l'essai de gélifonflement n'est dans ce cas pas représentatif de la sollicitation.

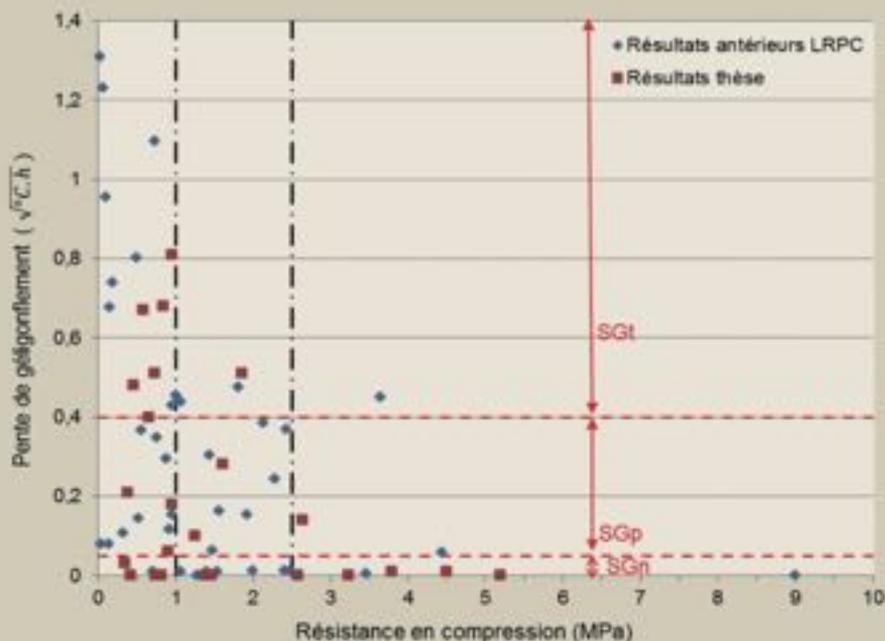
L'essai réalisé dans le cadre de la thèse se base sur la spécification technique européenne CEN TS 13286-54. ▶

### ÉVOLUTION DE LA PENTE DE GÉLIFONFLEMENT ET DU CARACTÈRE DE SENSIBILITÉ AU GEL de deux sols fins de classe A1 (à gauche) et A2 (à droite) traités à la chaux, en fonction du dosage et du temps de cure



© DR **6**

## INFLUENCE DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION DES SOLS FINS traités à la chaux et/ou aux liants sur leur pente de gélifonflement et leur critère de sensibilité au gel



7 © DR

**7- Influence de la résistance en compression des sols fins traités à la chaux et/ou aux liants sur leur pente de gélifonflement et leur critère de sensibilité au gel.**

**7- Influence of the compressive strength of fine soils treated with lime and/or binders on their frost swelling gradient and their frost sensitivity criterion.**

Le principe réside en la détermination d'un coefficient appelé "RFT" (Resistance to Freeze-Thaw), qui est un rapport de résistance en compression d'éprouvettes ayant subi 10 cycles gel-dégel par rapport à une série d'éprouvettes témoins. L'amplitude des cycles s'étalant de +20°C à -20°C et les éprouvettes subissant ces cycles étant saturées en eau au préalable, on peut considérer les conditions d'essai comme étant très pénalisantes et donc pessimistes (figure 8).

Les éprouvettes confectionnées avec un ajout de chaux correspondant à l'objectif d'amélioration sont détruites à l'issue de l'application des 10 cycles de gel et dégel. Dans le cas du sol A1, l'augmentation de la résistance en compression avec le dosage en chaux s'accompagne d'un accroissement du coefficient RFT. De manière générale, on constate une absence de dégradation visuelle des éprouvettes à partir d'une valeur RFT supérieure à 60 %. Lorsque le RFT est inférieur à cette valeur, un examen minutieux des dégradations a permis de mettre en évidence que les dommages apparaissent au tout début de la sollicitation dès les 3 premiers cycles. Par contre, les résultats de cet essai ne sont pas corrélés à l'examen des matériaux par gélifonflement. Il n'est donc pas possible, de ce fait, d'appliquer une classification similaire à celle tirée des essais de gélifonflement.

### CONCLUSIONS

Le travail de recherche mené dans le cadre de la thèse a permis de confirmer les propriétés particulières de la chaux et de mieux décrire ses effets à long terme sur la résistance mécanique et la résistance aux effets du gel.

Les résultats acquis confirment que la chaux n'est pas seulement un liant d'amélioration des sols fins humides mais qu'elle peut procurer des performances mécaniques très utiles dans l'optimisation de la conception des ouvrages en terre.

Deux conditions permettent d'atteindre ces performances : un dosage minimal, qui dépend de la nature du sol, et un

temps de cure suffisant. Les résultats obtenus avec les sols étudiés montrent très clairement que des performances intéressantes sont atteintes au-delà de 28 jours de cure.

Des résistances en compression de l'ordre de 5 MPa ont ainsi été observées pour les temps de cure les plus longs (avec 4 % de chaux dans un sol fin peu plastique A1 par exemple, 5 % dans un sol A2, moyennement plastique).

Le comportement des sols fins traités à la chaux face au gel dépend du type de sollicitation envisagée : gélifonflement par cryosuccion ou gélifraction sous l'effet des cycles de gel-dégel.

Le premier phénomène est très dépendant de la perméabilité du sol traité à court terme (plus la perméabilité est faible, plus le gélifonflement est limité) mais c'est la résistance mécanique qui prend le dessus lorsque la réaction pouzzolanique se développe.

On peut donc rendre un sol fin non gélif par le traitement à la chaux en adoptant un dosage permettant la stabilisation et en laissant un temps de cure suffisant.

Ainsi, les résultats de la thèse ont :

- Confirmé que la non gélivité est vérifiée si la résistance en compression atteint 2,5 MPa ;
- Montré qu'un dosage assurant un rapport CBR après immersion/IPI supérieur à 1 (exigence classique en partie supérieure des terrassements) permet de faire passer tous les sols étudiés dans la classe « Sol peu gélif ».

La résistance à la gélifraction, même si elle répond à des mécanismes physiques différents, est soumise à la même condition d'un dosage et d'un temps de cure permettant de garder 60 % au moins de la résistance en compression d'origine, après les cycles de gel/dégel.

L'ensemble de ces résultats a été rendu public et est actuellement examiné par la commission de normalisation française des terrassements. L'intégration de certains critères simplifiés est à

### DERNIÈRE MINUTE

**Les résultats de cette étude ont été portés à la connaissance de la commission de normalisation chaussées dans le cadre de la révision de la norme de dimensionnement des chaussées (NF P 98 086), à paraître prochainement. La nouvelle version de la norme devrait ainsi permettre d'évaluer la gélivité des sols fins traités à la chaux en fonction de leurs performances mécaniques :**

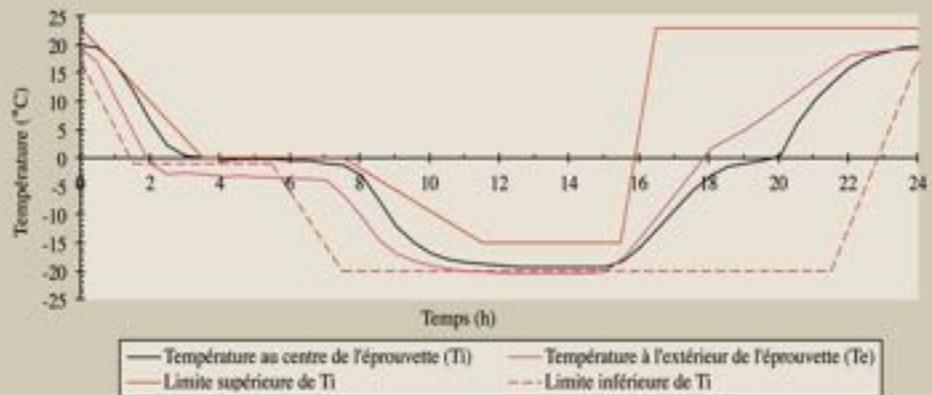
- Sol traité à la chaux non gélif si la résistance en compression atteint 2,5 MPa (hormis certains matériaux rocheux évolutifs) ;
- Sol traité à la chaux peu gélif, avec une pente de 0,4 mm/(°C.h)<sup>1/2</sup> moyennant un dosage minimum en chaux, la vérification classique de la relation CBR après immersion/IPI > 1, l'obtention d'une valeur minimale d'IPI et d'une mouture fine sur chantier.

8- Cycle de température lors d'un essai de gélifraction (en haut) et effet des cycles de gel/dégel sur des éprouvettes de sol fin (classe A1) en fonction du dosage en chaux et du temps de cure (la valeur RFT exprime le rapport entre la résistance en compression d'échantillons ayant subi les cycles de gel-dégel et celle d'échantillons témoins).

8- Temperature cycle during a frost splitting test (top) and effect of freeze-thaw cycles on test specimens of fine soil (class A1) as a function of lime dosing and the curing time (the value RFT expresses the ratio between the compressive strength of samples having undergone freeze-thaw cycles and that of control samples).

l'étude afin de justifier l'obtention du caractère peu gélif des sols fins traités à la chaux, ce qui permettrait de dispenser les études des essais de gélifraction, qui sont longs et coûteux. □

### CYCLE DE TEMPÉRATURE LORS D'UN ESSAI DE GÉLIFRACTION



### EFFET DES CYCLES DE GEL/DÉGEL SUR DES ÉPROUVETTES DE SOL FIN (classe A1) en fonction du dosage en chaux et du temps de cure (la valeur RFT exprime le rapport entre la résistance en compression d'échantillons ayant subi les cycles de gel-dégel et celle d'échantillons témoins)

Dosage	7 jours	28 jours	90 jours	365 jours
1%	RFT = 0%	RFT = 0%	RFT = 0%	RFT = 0%
2%	RFT = 0%	RFT = 17%	RFT = 62%	RFT = 67%
4%	RFT = 30%	RFT = 30%	RFT = 68%	RFT = 90%

8  
© DR

#### ABSTRACT

### CONTRIBUTION OF LIME TREATMENT TO THE FROST PROTECTION OF ROADBEDS

GONTRAN HERRIER, LHOIST - THI THANH HANG NGUYEN, ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES, UNIVERSITÉ PARIS-EST - VALÉRY FERBER, CHARIER

To clarify the design codes for pavement structures executed on levelling courses or capping layers treated with lime, the company Lhoist and the French earthworks contractors trade association (a member of the "Fédération Nationale des Travaux Publics" (French Public Works Federation)) carried out research in partnership with Cerema and engineering school École des Ponts ParisTech on the frost susceptibility of soils treated with lime, covering three more or less clayey fine soils. The PhD thesis work by Hang Nguyen provided new knowledge of the phenomena of frost swelling and frost splitting, highlighting in particular the weakly frost-susceptible or even frost-resistant nature of fine soils treated with lime in the medium and long term. □

### CONTRIBUCIÓN DEL TRATAMIENTO CON CAL A LA PROTECCIÓN CONTRA LA HELADA DE LAS PLATAFORMAS VIALES

GONTRAN HERRIER, LHOIST - THI THANH HANG NGUYEN, ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES, UNIVERSITÉ PARIS-EST - VALÉRY FERBER, CHARIER

Para precisar las normas de dimensionamiento de las estructuras de calzadas realizadas en enrasados o explanadas mejoradas con cal, la empresa Lhoist y el Sindicato Profesional de Excavadores de Francia (miembro de la Federación Nacional francesa de Obras Públicas) han realizado una investigación en colaboración con el Cerema y la Escuela de Puentes ParisTech sobre la heladidad de los suelos tratados con cal, basándose en tres suelos finos más o menos arcillosos. Los trabajos de tesis doctoral de Hang Nguyen han permitido adquirir nuevos conocimientos sobre los fenómenos de inflamamiento y fragmentación inducidos por el hielo. Dichas investigaciones revelan la alta e incluso la total resistencia al hielo de los suelos finos tratados con cal a medio o largo plazo. □



© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

# DÉPOLLUTION ET SOUTÈNEMENT D'UNE FOUILLE À PARIS XX<sup>e</sup>

AUTEURS : CHARLOTTE COCHEZ, INGÉNIEUR CHARGÉ DE PROJET GÉOTECHNIQUE, ARCADIS -  
CLAIRE CARPENTIER, CHEF DE PROJET ENVIRONNEMENT, ARCADIS

LA RARETÉ DES TERRAINS INOCCUPÉS À PARIS ET LE BESOIN CROISSANT DE LOGEMENT CONDUISENT DE PLUS EN PLUS À RÉHABILITER DES TERRAINS CONTAMINÉS PAR DES POLLUTIONS HISTORIQUES. C'EST AINSI QUE LA SEMAVIP A CONFIE À ARCADIS LA MAÎTRISE D'ŒUVRE DES TRAVAUX DE DÉPOLLUTION DU SECTEUR PAUL MEURICE À PARIS XX<sup>e</sup>. CES TRAVAUX ONT CONSISTÉ EN LA SUBSTITUTION DES TERRES POLLUÉES JUSQU'À 9 M DE PROFONDEUR, À L'ABRI D'UN SOUTÈNEMENT EN PAROI LUTÉCIENNE ET SOUS UN CHAPITEAU VENTILÉ POUR ÉVITER LES NUISANCES OLFACTIVES.

## CONTEXTE DU PROJET

Arcadis s'est vu confier la maîtrise d'œuvre des travaux de dépollution des lots D et E du secteur Paul Meurice situé dans le XX<sup>e</sup> arrondissement de Paris. Le type de pollution mise en évidence par les études antérieures au droit du lot E nécessitait un traitement des terres impactées jusqu'à une profondeur de 9 m. La solution choisie pour ce traitement a été le terrassement et la substitution des terres

impactées par des matériaux sains au droit de la zone indiquée sur la figure 2. Compte tenu de la profondeur des terrassements et de la présence de mitoyens, une technique de soutènement provisoire spécifique a dû être mise en œuvre afin de réaliser cette dépollution en toute sécurité pour les opérateurs et les avoisinants. Lors des campagnes de reconnaissance environnementales, une pollution aux hydrocarbures a été détectée

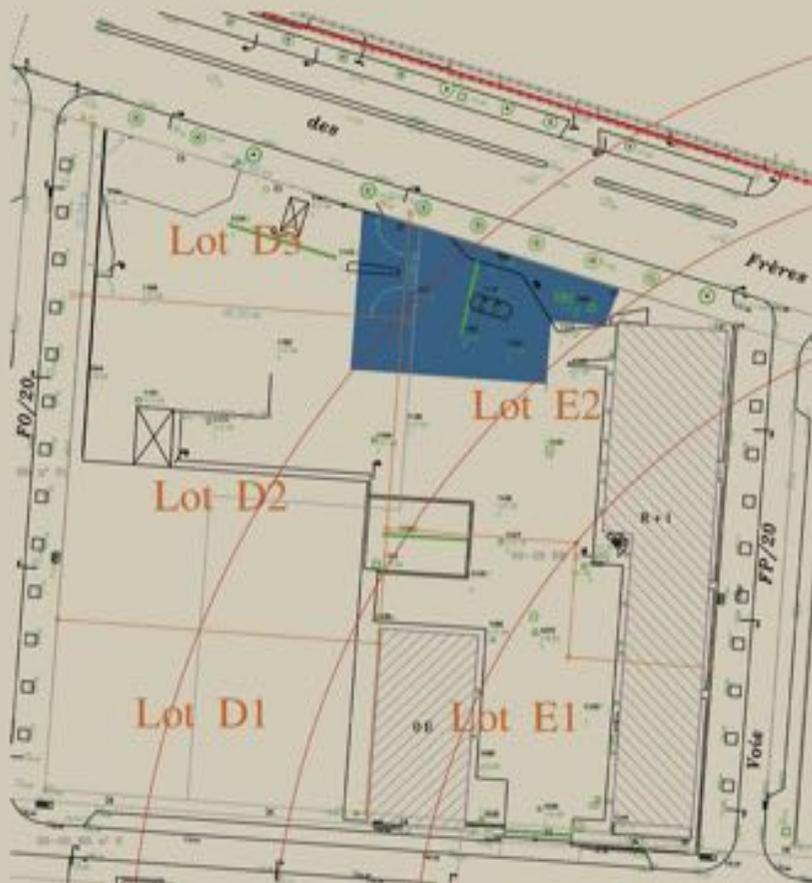
sur une partie de la parcelle ainsi qu'au niveau de la nappe souterraine.

En vue de l'aménagement du secteur, la Semavip souhaitait procéder aux opérations de dépollution. Pour ce faire il était nécessaire de purger entièrement la source de pollution, soit les installations de l'ancienne station-service du site et les sols sous-jacents jusqu'à la nappe. Les opérations se déroulant en zone urbaine et étant susceptibles d'être à l'origine de nuisances olfac-

**1- Travaux de pieux au droit du site.**

**1- Piling work near the site.**

## LOCALISATION DES LOTS D'AMÉNAGEMENT AU DROIT DU SITE



(ICPE) étaient présentes sur le site :

→ Une station-service à usage interne des services de la Direction de la Propreté et de l'Eau de la Ville de Paris au droit du lot E comprenant une cuve enterrée, un îlot de distribution et un décanteur/déshuileur ;

→ Et une déchetterie sur le lot D.

Ces deux installations, déclarées en Préfecture en 1996, ont cessé leur activité au démarrage du chantier. Les études environnementales et les travaux de dépollution sont engagées dans le cadre de la procédure administrative de cessation d'activité de ces installations.

Les diagnostics préliminaires à la mission de maîtrise d'œuvre ont permis de mettre en évidence trois zones sources de pollution sur l'ensemble de la zone d'étude :

→ « Zone 1 » : impact des sols, des gaz des sols et de la nappe d'eaux souterraines au niveau du lot E par des composés organiques de type Essence (BTEX, hydrocarbures aliphatiques, MTBE, ETBE)\* en lien avec la station-service ;

→ « Zone 2 » : impact des remblais de surface sur le lot D par des composés organiques type HAP ;

→ « Zone 1 bis » : impact des sols et gaz du sol type essence sur une partie de l'espace public au droit de la rue des Frères Flavien, en limite nord de la zone 1 ;

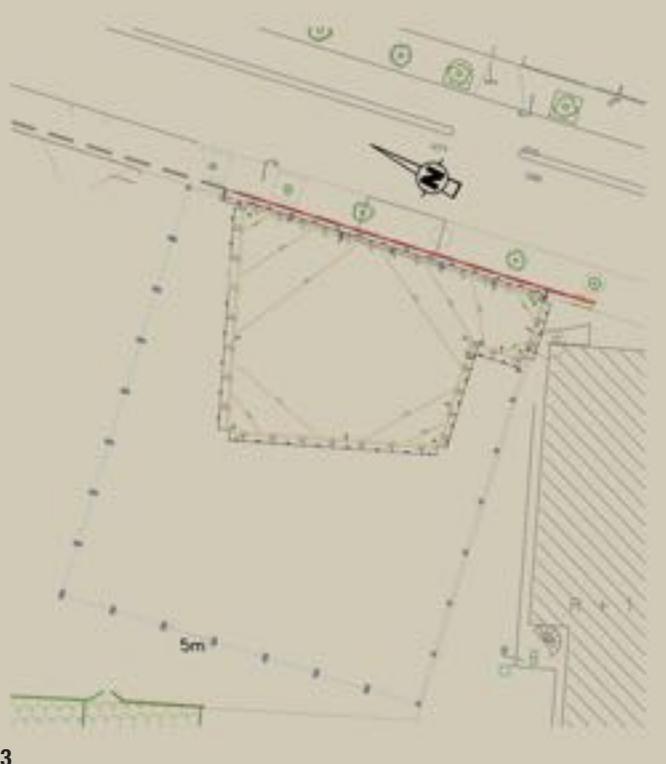
→ « Eaux souterraines et sols en zone de battement en aval de la zone 1 » : impacts par des composés organiques de type Essence (BTEX, hydrocarbures aliphatiques, MTBE, ETBE).

La source de ces impacts est la station-service et plus particulièrement les canalisations d'amenée des carburants entre la cuve enterrée et l'îlot de distribution (figure 4).

Les polluants ont transité dans les sols, formant un cône de dispersion dans la zone non saturée jusqu'à 8 à 8,50 m de profondeur, puis ont impacté la nappe souterraine et les sols en zone de battement au droit et à l'aval de la station-service.

Au terme d'un bilan coûts-avantages réalisé selon la norme NFX 31-620 comparant plusieurs types de traitement envisageables, l'excavation et l'évacuation en filières adaptées des déblais impactés s'est révélée être la seule solution permettant d'atteindre les seuils de réhabilitation sur les composés présents dans le délai imparti par le programme d'aménagement. ▷

## EMPRISE DE LA TENTE ET DE LA FOUILLE



**2- Localisation des lots d'aménagement au droit du site.**

**3- Emprise de la tente et de la fouille.**

**2- Location of development work sections near the site.**

**3- Area occupied by the tent and excavation.**

tives pour le voisinage, les travaux ont été réalisés de manière confinée sous tente ventilée, imposant une surface, une hauteur de travail ainsi que des possibilités de déplacement des engins de chantier limitées. La figure 3 permet de visualiser l'emprise de la tente par rapport à celle de la fouille.

## HISTORIQUE DU SITE ET POLLUTION

Deux Installations Classées au titre de la la Protection de l'Environnement

## CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Selon les campagnes géotechniques réalisées au droit de la parcelle, la stratigraphie des terrains rencontrés est composée de la succession des couches suivantes, à partir de la cote du terrain naturel (soit 117,50 NGF environ) :

- Remblais de nature limono-sableux, sur 2 m d'épaisseur, contenant des débris de démolition et du mâchefer ;
- Marnes à huîtres sur environ 3 m d'épaisseur de nature marneuse à argilo-marneuse ;
- Calcaire de Brie sur environ 5 m d'épaisseur localement marneux à argileux à passages calcaires indurés voir silicifiés ;
- Argile verte sur environ 8 m d'épaisseur, compacte, relativement plastique et homogène.

Sur le plan hydrogéologique la nappe circule au sein du Calcaire de Brie vers la cote 109 NGF, soit 8,50 m de profondeur.



## PARTICULARITÉS DU SITE

Le projet étant limitrophe d'ouvrages existants, certaines contraintes d'exécution devaient être intégrées. À l'est, l'excavation attenante à la rue des Frères Flavien exigeait la prise en compte de la surcharge générée par la circulation des voitures, la présence d'arbres sur le trottoir et de réseaux enterrés dont un réseau de gaz sensible aux faibles déformations. Au sud étaient à considérer les bâtiments des services de la Ville de Paris restant en activité pendant les travaux.

La volonté de la maîtrise d'ouvrage de purger le maximum de terres compactées, au plus près de la limite de propriété, et la nécessité du confinement des travaux sous tente ajoutaient des difficultés supplémentaires à l'opération. Au stade étude, ces données d'entrée ont nécessité une certaine limitation des déplacements de la paroi côté rue combinée à la réduction au maximum des diamètres des pieux.

Ces paramètres impliquaient de trouver le meilleur compromis entre la rigidité propre de l'écran et la position des appuis pour obtenir des déformations théoriques acceptables tout en optimisant les dimensions de la paroi.

Suite à la passation du marché, l'ensemble de ces contraintes a impliqué un décalage à plusieurs reprises de la position de la fouille. L'espacement minimum de 1,40 m considéré lors de la phase étude entre les travaux et

les bâtiments en activité a été augmenté ; l'information sur l'emplacement d'une sortie de secours non condamnable à ce niveau n'étant pas connue. De plus, l'utilisation par l'entreprise de fondations d'un nettoyeur de tarières n'avait pas été prise en considération pour l'implantation prévisionnelle de la fouille. Le diamètre de la coquille de décrochage étant fonction du diamètre des tarières utilisées (Ø 800 mm pour des pieux Ø 520 mm dans le cas présent), la mise en place d'un tel dispositif ne permettait pas la réalisation des pieux en limite de propriété (figure 5). Il a donc été convenu de déplacer la limite de la fouille au niveau des bâtiments de la ville de Paris et de déposer la barrière présente en limite de propriété. Le réseau de gaz étant présent à environ 0,70 m de cette limite, une dérogation a pu être obtenue pour leur forage auprès de GRDF suite à la réalisation de fouilles manuelles, mettant à nu le réseau sensible, permettant ainsi d'intervenir rapidement en cas de problème.

En plus des problématiques liées aux avoisinants, les travaux de soutènement se réalisant sous la tente en conditions atmosphériques polluées par composés volatils cancérigènes, mutagènes et repro-toxiques, le port de masque de protection individuelle à cartouches filtrantes était obligatoire pour les travailleurs et les visiteurs. La respiration

**4- Station-service initiale installée au droit du site.**

**5- Réalisation d'un pieu en limite de propriété.**

**6- Tranchée réalisée pour l'essai en vraie grandeur.**

**4- Service station initially set up near the site.**

**5- Execution of a pile on the property boundary.**

**6- Trench executed for the full-scale test.**

## DÉROULEMENT DES TRAVAUX

Les travaux ont débuté par la réalisation d'un essai en vraie grandeur de la tenue des remblais superficiels (entre 0 et -2,50 m de profondeur). Pour ce faire une tranchée de 2,50 m x 0,80 m x 2,50 m a été exécutée (figure 6), balisée et laissée ouverte pendant une semaine. Aucune instabilité n'a été constatée au droit des parois verticales pendant la durée de l'ouverture.

Par la suite, il a été entrepris le retrait des infrastructures enterrées : la cuve compartimentée de 30 m<sup>3</sup>, les structures de dépôtage (canalisations, caniveaux) et le séparateur à hydrocarbures. Les travaux se sont poursuivis par la réalisation des trente-six pieux à la tarière creuse (figure 5), couplée à l'utilisation ponctuelle du marteau fond-de-trou notamment au niveau des passages silicifiés présents dans la formation calcaire.

L'entreprise Chapiteaux de Paris est intervenue pour la mise en place de la tente de confinement après la réalisation de la poutre de couronnement. La tente en toile et charpente aluminium a été fondée à l'aide de platines et de clous ancrés selon les cas dans la poutre de couronnement et/ou directement dans le sol.

Les dimensions des platines étaient de 80 cm x 40 cm réduites à 40 cm x 40 cm au droit de la poutre de couronnement (figure 7).

au travers de ces masques étant plus difficile, une logistique particulière ainsi qu'une restriction des cadences à deux heures consécutives maximum ont dû être employées pour dégager des temps de pause hors de la tente sans masque respiratoire. Durant l'été la température extérieure et sous la tente, avoisinant les 35°C, ne permettait que la réalisation de séquences d'intervention ininterrompues de 30 minutes maximum avec port du masque.



7



8



9

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

Pour ces dernières, afin de limiter la difficulté de mise en œuvre, les cages d'armatures des pieux avaient été reçues au niveau de l'arase supérieure de la poutre afin de permettre la localisation visuelle des aciers.

Pour leur validation, les ancrages de la tente ont fait l'objet de tests d'arrachement au dynamomètre poursuivis jusqu'à une valeur maximale de 600 kg. Certains de ces essais, réalisés par l'organisme Bvcts, ont été arrachés précocement à 350 kg côté rue.

Des solutions palliatives ont donc été mises en place à cet endroit. Il a été installé un haubannage extérieur dans l'angle de la fouille entre la rue et les bâtiments de la ville et un haubannage intérieur pour le reste des portiques situés le long de la rue, les puits de *venting* situés entre la tente et la limite du chantier ne permettant par un renforcement par l'extérieur. D'autres essais ont été réalisés après le renforcement de la structure et à la fin de la première passe de terrassement, ils ont été concluants. Cette faiblesse localisée devait certainement être liée à la faible compacité des remblais, vraisemblablement remaniés le long de la rue. Les travaux sous tente ont conduit à des adaptations pour les terrassements. Les terres impactées étaient extraites à l'aide de deux pelles mécaniques principales (figure 8). La première était une pelle compacte à chenille de

**7- Ancrage de la tente dans la poutre de couronnement.**

**8- Co-activité des pelles et des opérateurs dans l'enceinte de la tente.**

**9- Remblaiement de la fouille.**

**7- Tent anchoring in the capping beam.**

**8- Concurrent work by excavators and operators in the tent enclosure.**

**9- Excavation backfilling.**

gabarit 16 t située au sein de la fouille. La seconde, située en bordure extérieure de la fouille, était une pelle à chenille de gabarit 25 t équipée d'un bâti long et d'une benne preneuse. Cette dernière était chargée de remonter les matériaux depuis la fouille jusqu'à l'aire de stockage temporaire située sous tente également en vue d'une évacuation hors site. L'atelier d'excavation a été complété par une minipelle déployée également dans l'enceinte

de la fouille afin de réaliser les terrassements dans les zones difficiles d'accès (entre les butons, angles de la fouille, etc.).

Avec le phasage de terrassement proposé par l'entreprise, les cadences de terrassement s'établissaient entre 100 et 150 m<sup>3</sup>/jour maximum. Malgré la co-activité des pelles mécaniques et des opérateurs de l'entreprise de réalisation des voiles en fond de fouille, les travaux se déroulaient en parallèle : terrassement, repiquage des pieux, ferrailage, bétonnage et même pompage.

Les terrassements étant menés jusqu'à 0,50 m sous le niveau des eaux souterraines, des opérations de pompage ont été nécessaires en fond de fouille. Des rigoles et tranchées drainantes ont été descendues en périphérie de la fouille au fur et à mesure de l'avancement des excavations et un puits busé de Ø 800 mm a été mis en place. Au fur et à mesure du terrassement, les déformations de la paroi de soutènement ont été suivies par le biais de relevés de géomètre. Ces mesures ont été poursuivies jusqu'à la fin des opérations de démolition des parois afin de prévenir tout risque de mouvement lors des travaux.

Des cibles ont été mises en place au droit de huit profils à trois cotes différentes : au centre de la poutre de couronnement (vers 117,65 NGF environ), à 4,50 m de profondeur (vers 113 NGF

et 0,50 m avant le niveau de fond de fouille (soit vers 109 NGF).

Globalement, les terrains au droit des passes verticales étaient stables pendant toute la durée des travaux de terrassement. Les matériaux terrassés, conformes à ceux mis en évidence lors des campagnes de reconnaissance géotechnique, présentaient une bonne cohésion apparente.

Cependant les mesures de déplacement indiquaient au fur et à mesure des terrassements des déformations progressives en tête de la paroi côté rue. Après analyse, il a été conclu que les mesures ne correspondaient pas au déplacement réel de la tête du voile mais à celui de la poutre de couronnement par manque d'ancrage entre celle-ci et les pieux. En effet, aucune liaison mécanique entre les deux ouvrages n'a été réalisée et seuls les aciers dépassant des cages d'armatures des pieux étaient coulés dans le béton de la longrine.

La poutre de couronnement devait être perturbée par les ancrages de la tente qui la faisaient tourner sans engendrer de déplacements non acceptables pour l'ouvrage.

Par mesure de sécurité quatre cibles supplémentaires ont été installées au niveau des profils présentant des déplacements. Elles ont été mises en place directement sur la paroi, soit à une hauteur de 0,30 m au-dessus du niveau de la lierne. Suite à leur installation seuls quelques déplacements résiduels ont été enregistrés, non significatifs d'une déformation réelle du voile.

D'autres légers déplacements ont été mesurés pendant les opérations de remblaiement liés très certainement aux vibrations engendrées par les compacteurs, cependant aucun dégât n'a été constaté sur les avoisinants.

## REMBLAIEMENT DE LA FOUILLE

La volonté de la maîtrise d'ouvrage pour le remblaiement de la fouille était de restituer aux futurs promoteurs un terrain à la même cote substitué par des matériaux inertes présentant des caractéristiques mécaniques équivalentes à celles des terrains en place avant intervention (figure 9).

Il a donc été défini de mettre en place des matériaux drainants 40/80 mm au droit de la zone saturée et de la base de la frange capillaire (soit entre -8 et -9 m de profondeur), puis des matériaux d'apport classiques. Un géosynthétique de séparation a été placé pour éviter toute diminution de la porosité du massif de grave.

Puis le reste des matériaux a été choisi en fonction des objectifs de compactage définis par formation sur la base des résultats des campagnes d'investigations géotechniques réalisées, soit :

- Remblaiement avec des graves traitées aux liants hydrauliques de -8 à -5,50 m (sur la hauteur du Calcaire de Brie) avec l'objectif d'obtention d'un module EV2  $\geq$  200 MPa ;
- Remblaiement avec des graves naturelles non traitées 0/31,5 mm de -5,50 à -3,70 m (sur la hauteur des Marnes à huîtres) avec l'objectif d'obtention d'un module EV2  $\geq$  80 MPa.

Afin de confirmer le choix du matériau de remblaiement pour la couche substituant le Calcaire de Brie (entre -8 et -5,50 m de profondeur), l'entreprise a proposé la réalisation d'une planche d'essai sur un de leurs sites localisé à Mantes-la-Ville. Une surface d'environ 15 m de long par 5 m de large a ainsi été recouverte d'un géotextile et environ 120 t de grave traitée aux liants hydrauliques à 3,5% ont été mis en place. Quatre couches successives de 30 cm foisonnées ont été mises en place avec pour chacune deux passages de compacteur (de type BW120) pour simuler le compactage au centre de la fouille et de plaque vibrante (de type NPQ4) pour simuler le compactage sur la périphérie. Au fur et à mesure du remblaiement, le compactage a été contrôlé par la réalisation d'essais au gammadensimètre.

La planche d'essai a ensuite été bâchée pendant sept jours afin d'assurer la prise des liants hydrauliques. L'obtention des critères requis a été contrôlée par la réalisation d'essais à la plaque de 16 t au droit de la planche d'essais et de mesures à la dynaplaque en périphérie de celle-ci afin de caractériser le sol support.

Un module EV2 de 409 MPa a été mesuré au droit de la planche d'essai alors qu'il variait entre 20 et 50 MPa pour le sol sous-jacent. Cet essai en conditions réelles a permis de conforter l'équipe sur la possibilité d'atteindre les caractéristiques attendues et ce dès le premier mètre remblayé.

De plus, les mesures au gammadensimètre pendant la mise en œuvre couplées aux essais à la plaque finaux ont permis d'établir un protocole de corrélation pour les opérations de contrôle du compactage lors du remblaiement de la fouille.

Sur site, les opérations de compactage ont été validées à chaque étape. La couche entre -8 et -5,50 m de


**10**

**11**

**12**

**10- Rampe de sortie de la fouille.**

**11- Démolition des parois lutéciennes.**

**12- Risberme mise en place le long de la rue des Frères Flavien.**

**10- Excavation exit ramp.**

**11- Demolition of the Lutetian type retaining walls.**

**12- Berm placed in position along Frères Flavien street.**

profondeur a fait l'objet de mesures au gammadensimètre tous les 0,25 m compactés et chaque mètre remblayé jusqu'à la cote finale a fait l'objet d'un essai à la plaque pour environ 100 m<sup>2</sup>. À noter cependant que la réception géotechnique de l'assise drainante entre -9 et -8 m de profondeur n'a pas été réalisée du fait de la configuration des matériaux employés : non roulés et sans fines.

D'après les termes du guide de remblaiement des tranchées du Setra, cette couche remblayée correspondait à une difficulté de type DC3.

## DÉMOLITION DE LA PAROI

Les travaux prévoyaient également au fur et à mesure du remblaiement la démolition partielle des parois de soutènement afin de limiter au maximum l'impact des travaux sur les constructions futures. Le projet d'aménagement ne comportant à ce stade que la réalisation d'un niveau de sous-sol, il a été convenu de maintenir l'ouvrage côté rue et de le démolir sur les trois autres côtés entre la cote du terrain naturel et -3,30 m de profondeur.

Ces opérations de démolition ont débuté au moment où la fouille était

remblayée jusqu'à -3,70 m de profondeur. En vue du démantèlement futur de la paroi, il a été réalisé une rampe d'accès à la fouille (figure 10) ainsi qu'une risberme de soutènement côté rue de 4 m de large en tête et de 2,30 m de hauteur (avec une pente de 1H/1V). Cette dernière a été mise en place par couches compactées successives de 0,35 m jusqu'à -1,50 m de profondeur (soit sous le niveau des butons et des liernes).

Pour la démolition des écrans, des terrassements en talutage 1 pour 1 ont été réalisés à la pelle autour des ouvrages jusqu'à 3,30 m de profondeur avec un couloir de circulation d'environ 1 m en pied de talus. Les voiles ont ensuite été piqués au BRH depuis l'extérieur de la fouille et broyés avec la pelle mécanique équipée d'une pince à béton. Enfin les pieux ont été démolis au BRH et à la pince croqueuse jusqu'à 3,30 m puis basculés côté intérieur (figure 11). L'entreprise n'a eu aucune difficulté à démolir les pieux qui partaient avec

## QUELQUES CHIFFRES

**SURFACE DE LA FOUILLE : 430 m<sup>2</sup>**

**SURFACE DE PAROIS LUTÉCIENNES : 803 m<sup>2</sup>**

**VOLUME DE MATÉRIAUX TERRASSÉS : 3 942 m<sup>3</sup>**

**SURFACE DE PAROIS DÉMOLIES : 122,2 m<sup>2</sup>**

**MÈTRES CUBES DE MATÉRIAUX REMBLAYÉS : 2 409 m<sup>3</sup>**

les voiles au moment de leur basculement par la pelle mécanique.

Par sécurité, une banquette en graves a été mise en place sur toute la périphérie de la fouille afin de garantir la verticalité des terrains mis à nu après démolition et pour soutenir les mètres linéaires de voile restants côté rue (figure 12). Cette banquette a été réalisée avec le surplus de graves ayant servi au remblaiement jusqu'à -3,70 m et encore disponible sur le site. □

(\*) **GLOSSAIRE :**

**BTEX :** Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes - composés monoaromatiques (chaîne carbonée comportant un cycle).

**hydrocarbures aliphatiques :** composés constitués d'atomes de carbone et d'hydrogène uniquement. Ce terme est utilisé pour désigner les hydrocarbures dits « pétroliers », ici plus précisément à chaînes de carbone ouvertes, linéaires et acycliques (aliphatiques).

**MTBE :** Méthyl Tertio Butyl Ether, composé ajouté dans les carburants de type essences.

**ETBE :** Ethyl Tertio Butyl Ether, composé ajouté dans les carburants de type essences.

**HAP :** Hydrocarbures Aromatiques Polycyclique.

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Semavip

**ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Sce

**MOE :** Arcadis

**BUREAU DE CONTRÔLE :** QualiConsult

ENTREPRISES

**TRAVAUX DE DÉPOLLUTION :** Grs Valtech

**TRAVAUX DE PIEUX :** Spie Fondations

**INSTALLATION DE LA TENTE :** Chapiteaux de Paris

## ABSTRACT

### DECONTAMINATION AND RETAINING STRUCTURE FOR EXCAVATION IN PARIS (20th ARRONDISSEMENT)

CHARLOTTE COCHEZ, ARCADIS - CLAIRE CARPENTIER, ARCADIS

*Given the scarcity of unoccupied land in Paris and growing housing needs, work is increasingly being performed to reclaim plots of land contaminated by historical pollution. Accordingly, there is increasing demand for decontamination of sites located in highly urbanised sectors. This decontamination work must therefore take into account the constraints affecting operations on site (containment tent) and the replacement of impacted ground sheltered by Lutetian type vertical retaining walls is becoming more prevalent. This type of retaining structure must be used to maintain the activities present around the site without destabilising the adjacent buildings and underground networks. □*

### DESCONTAMINACIÓN Y ENTIBACIÓN DE UNA EXCAVACIÓN EN EL DISTRITO 20 DE PARÍS

CHARLOTTE COCHEZ, ARCADIS - CLAIRE CARPENTIER, ARCADIS

*La escasez de terrenos disponibles en París y la creciente necesidad de viviendas obligan cada vez más a rehabilitar parcelas afectadas por contaminaciones históricas. Por este motivo, la demanda de descontaminación de tierras está creciendo en las áreas muy urbanizadas. En tales casos, los trabajos de descontaminación deben tener en cuenta las restricciones de intervención in-situ (tiendas de confinamiento). Asimismo, la sustitución de la tierra afectada protegida por pantallas de contención verticales de tipo pantallas parisinas es una práctica muy generalizada. Es preciso utilizar esta modalidad de entibación para mantener las actividades existentes alrededor del emplazamiento sin desestabilizar las construcciones vecinas ni las redes subterráneas. □*

**CESAR**  
Code aux Eléments Finis  
pour le Génie Civil

**Nouvelle version 6**  
pour toutes vos analyses 2D et 3D  
d'ouvrages géotechniques :  
excavations, stabilités, écoulements ...

Téléchargez une version d'évaluation  
sur [www.cesar-lcpc.com](http://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](http://www.itech-soft.com) [contact@itech-soft.com](mailto:contact@itech-soft.com)

# LA SOLUTION DE FONDATION DU PROJET DES ATELIERS JOURDAN-CORENTIN-ISSOIRE DANS LE 14<sup>e</sup> À PARIS

AUTEURS : FLORA RAYNAUD, INGÉNIEUR CHARGÉE D'ÉTUDES, BE GÉOTECHNIQUE EIFFAGE CONSTRUCTION - LIONEL VOUTE, CHEF DE GROUPE, BE GÉOTECHNIQUE EIFFAGE CONSTRUCTION - SYLVAN OLIVA, CONDUCTEUR DE TRAVAUX PRINCIPAL, EIFFAGE CONSTRUCTION TERTIAIRE - MICHAËL REBOUL, DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT, TECHNOSOL

LE PROJET DES ATELIERS JOURDAN-CORENTIN-ISSOIRE IMPLANTÉ PORTE D'ORLÉANS DANS LE 14<sup>e</sup> ARRONDISSEMENT DE PARIS, A CONSISTÉ EN LA CONSTRUCTION D'UN CENTRE-BUS DE LA RATP EN SOUS-SOL COMBINÉE À LA RÉALISATION, EN SURÉLÉVATION, D'UN PROGRAMME IMMOBILIER DE 2 À 10 NIVEAUX. UNE ÉTROITE COLLABORATION ENTRE TOUS LES ACTEURS DU PROJET A PERMIS DE LE RÉALISER SUR DES FONDATIONS SUPERFICIELLES, MALGRÉ LA PRÉSENCE, ENVIRON 20 M EN-DESSOUS, DE CARRIÈRES SOUTERRAINES.

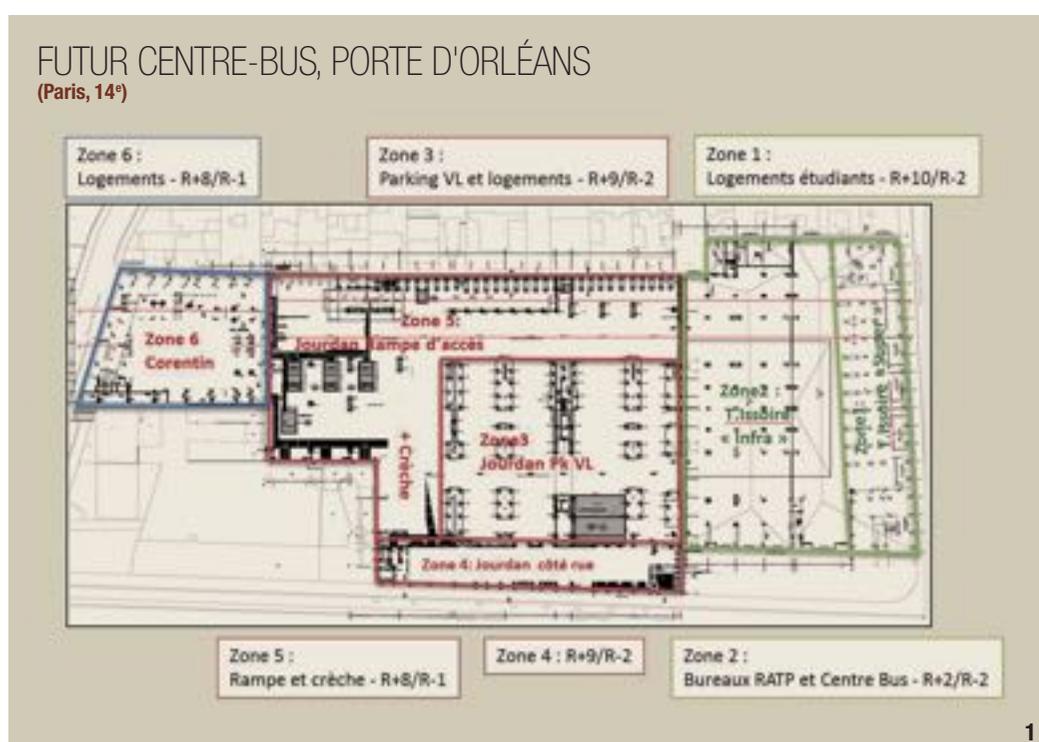
## LE PROJET DES ATELIERS JOURDAN-CORENTIN-ISSOIRE EN QUELQUES MOTS

Situé à proximité de la Porte d'Orléans à Paris (14<sup>e</sup>), le centre bus de la RATP est bordé par la rue du Père Corentin, la rue Tombe Issoire et le Boulevard Jourdan qui ont donné leur nom au projet global. La restructuration concerne une superficie au sol d'environ 20 000 m<sup>2</sup> divisée en 6 zones en fonction des différents bâtiments prévus (figure 1). Le projet est né de la nécessité de moderniser et d'agrandir le dépôt de bus implanté sur le site depuis 128 ans. Pour ce faire, la restructuration est passée par la destruction de l'ancien dépôt et la réalisation, en sous-sol, du futur centre-bus.

Afin de financer le projet, 395 logements étudiants, 191 logements sociaux, 96 logements en accession libre, des bureaux pour la RATP, une crèche, etc. ont été réalisés en partie supérieure du dépôt, reconstruisant ainsi une « ville » sur le projet de la RATP (figure 2). Débutés en juillet 2013, les travaux vont durer 4 ans avec un achèvement estimé à fin 2017. Logis-Transports, filiale du groupe RATP, est maître d'ouvrage de ce chantier.

## PRÉSENTATION DU PROJET CONTEXTE GÉOTECHNIQUE DU PROJET

D'après les sondages géotechniques réalisés et synthétisés par Technosol,



en charge des missions géotechniques de conception du projet, la lithologie au droit du site est la suivante (figure 3) :

- Remblais ;
- Calcaire de Saint-Ouen ;
- Sables de Beauchamp ;
- Marnes et caillasses ;
- Calcaire Grossier.

Le site est sous-miné par d'anciennes carrières souterraines au sein du Cal-

1- Vue en plan des zones du projet Centre Bus.

1- Plan view of the Bus Centre project zones.

caire Grossier Supérieur entre 20 et 24 m de profondeur avec une hauteur d'exploitation de l'ordre de 0,8 à 2 m environ.

## SOLUTION DE FONDATION INITIALE

La solution de fondation définie au stade de l'avant-projet était une solution d'appui sur pieux fondés au sein

du calcaire grossier sous le mur de la carrière.

Les modifications au stade projet et la volonté d'optimisation ont conduit, au moment du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE), à évoluer pour certaines zones vers une solution de pieux courts fondés 5 m au-dessus de la carrière (avec vérification du poinçonnement du ciel de carrière et des tassements associés).

Le marché de confortement de carrière, sous maîtrise d'œuvre Technosol, a été engagé en ce sens, avec des injections gravitaires sous les lots fondés sur pieux profonds et avec des injections gravitaires et de traitement pour les lots fondés sur pieux courts.

## ÉTUDE DE LA FAISABILITÉ DES FONDATIONS SUPERFICIELLES EN PHASE APPEL D'OFFRES

### PREMIÈRE APPROCHE

La réalisation de pieux longs avec un ancrage de 1 m au minimum sous le mur des carrières (soit sensiblement sur une hauteur de plus de 20 m) représentait un coût et un délai de réalisation importants. L'objectif fut alors d'évaluer la possibilité de réaliser des fondations superficielles. En première approche, le contexte géotechnique, l'interaction sol/structure et la problématique des carrières furent analysés :

#### → Résistance des sols :

D'après le rapport de mission géotechnique G2 PRO établi à partir des essais géotechniques par Technosol (selon la norme NF P 94-500 de décembre 2006), les sols présents sous les remblais de surface sont plutôt résistants.



2 © DR

2- Perspective du futur Centre-Bus, Porte d'Orléans (Paris 14<sup>e</sup>).

3- Lithologie du site d'après les sondages.

2- Perspective view of the future Bus Centre, Porte d'Orléans (Paris 14<sup>e</sup>).

3- Lithology of the site based on test boring.

#### → Descentes de charge :

Fort de son expérience sur l'opération de la RATP rue de Lagny (Paris 20<sup>e</sup>), le Bureau d'Étude Structure d'Eiffage Construction GD a réalisé une maquette numérique de l'ensemble du projet afin d'étudier les possibilités de redistribution des charges tout en répondant aux exigences géométriques imposées par

la circulation des bus de la RATP (largeur entre poteaux par exemple). En augmentant le nombre de points d'application, il a été possible de répartir différemment les charges transmises aux sols supports.

#### → Carrières souterraines :

La dernière problématique concernait les carrières localisées jusqu'à 20 m en moyenne sous le niveau d'assise des fondations, laissant une importante hauteur pour la diffusion des contraintes.

Au regard de ces différents paramètres, la solution de fondation sur des semelles superficielles semblait envisageable.

### APPROFONDISSEMENT DE L'ÉTUDE

Afin d'approfondir l'étude de faisabilité de la variante, il a fallu s'assurer qu'au droit du projet la portance du sol était suffisante et que les déformations étaient acceptables.

Plus globalement, il était important d'étudier la cuvette de tassement engendrée au droit de l'environnement

du projet soit dans la Zone d'Investigation Géotechnique (Z.I.G.).

### Capacité portante des sols en place

Celle-ci a été établie à partir de nombreux essais pressiométriques pour dégager un taux de travail minimum de 6 bars dans la formation du Calcaire de Saint-Ouen.

### Déformation

L'étude des déformations liées au projet et à l'échelle du site a nécessité une modélisation aux Éléments Finis tridimensionnels (sous le logiciel Plaxis 3D) afin d'intégrer la carrière et son comblement ainsi que les incidences au droit des avoisinants et de la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG).

→ La **modélisation globale du projet** permettait l'appréciation de l'étendue et de l'importance des déformations chez les avoisinants dans la ZIG (figure 4).

→ Les **modélisations locales** des 6 zones du projet, présentées en figure 1, ont été réalisées aux endroits les plus chargés afin d'apprécier les tassements absolus et différentiels pour chacune des zones (figure 5).

→ Le projet, et plus particulièrement la zone 4 (cf. découpage sur la figure 1), est impacté par la proximité d'une raquette de retournement de la ligne de métro 4 localisée sous le boulevard Jourdan. Au droit du projet, le tunnel RATP est surmonté d'une galerie technique rassemblant des canaux d'adduction d'eau (figure 6). Moins de 1,5 m sépare le nu du piedroit du tunnel de la RATP et le voile en limite de propriété.

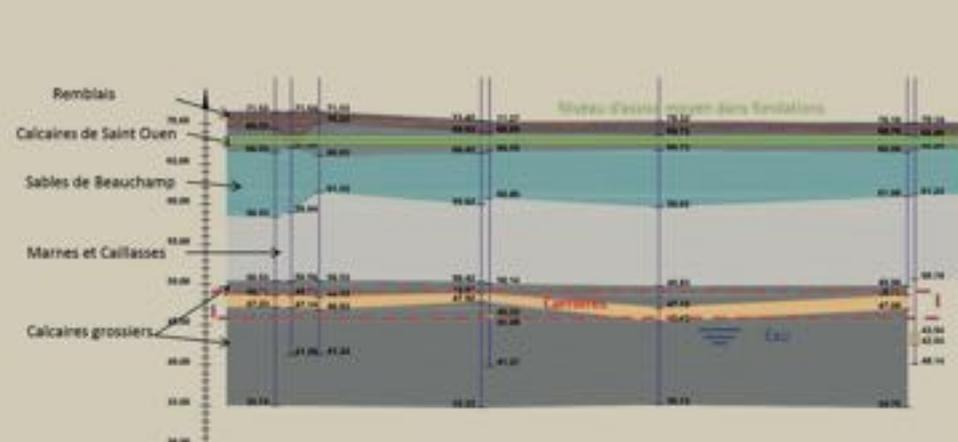
La modélisation a permis d'apprécier les tassements au droit des semelles ainsi que l'impact de ces dernières sur la raquette de la RATP et la galerie technique tant en termes d'efforts que de déformations.

Des analyses détaillées dans le cadre de la Méthode des Éléments Finis (MEF) ont permis de mieux appréhender et confirmer la faisabilité de la solution de fondation superficielle pour tenir compte en particulier des contraintes suivantes :

→ Tassements absolus limités de 10 à 30 mm et critère de tassement différentiel du 1/500<sup>e</sup> respecté pour les ouvrages neufs ;

→ Tassements absolus limités inférieurs à 10 mm et critère de tassement différentiel inférieur au 1/1000<sup>e</sup> respecté pour les ouvrages avoisinants ;

## LITHOLOGIE DU SITE D'APRÈS LES SONDRAGES



3 © TECHNOSOL

→ Impact sur le tunnel limité en abaissant le point d'application des charges des semelles (par puits ou pieux courts le long du mur périmétrique).

L'intérêt et la viabilité de la solution par fondations superficielles ont été présentés à la maîtrise d'ouvrage Logis-Transports. Cette variante impliquait une adaptation du marché de traitement des carrières qui était déjà en cours de réalisation lors de la phase d'appel d'offres.

Au vu des perspectives induites par cette variante, la maîtrise d'ouvrage a accepté d'amender le marché de complément des carrières qui permettait, entre autres, une réduction significative des délais de réalisation.

Sous maîtrise d'œuvre Technosol, le chantier d'injection a donc vu la réalisation sur l'ensemble du site d'injections, gravitaires et de traitement, selon une maille de 4x4 m. Au total, environ 27 000 m<sup>3</sup> de coulis ont été injectés via près de 1 400 forages pour un linéaire total de 34 000 m.

**4- Modélisation de la Zone d'Influence Géotechnique sous le logiciel Plaxis 3D.**

**5- Modélisation locale de la zone 2 : Tombe Issoire « Infra » sous le logiciel Plaxis 3D.**

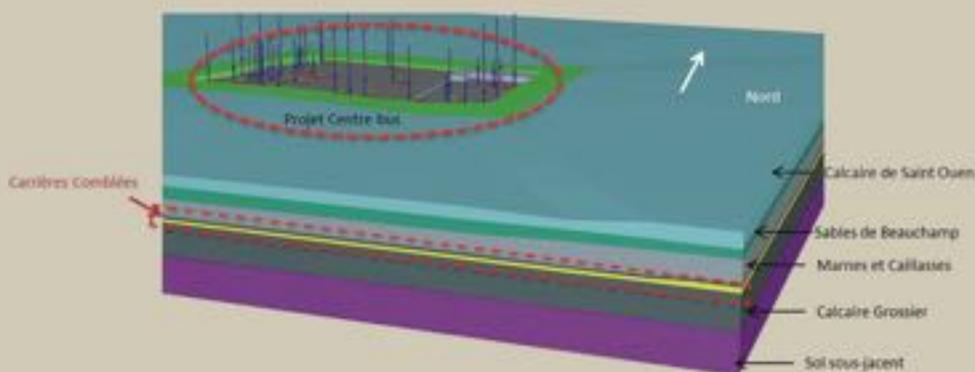
**6- Modélisation de la raquette RATP - Zone 4 : Jourdan Rue sous le logiciel Plaxis 3D.**

**4- Modelling the geotechnical zone of influence with the Plaxis 3D software.**

**5- Local modelling of zone 2: Tombe Issoire "Infra" in Plaxis 3D software.**

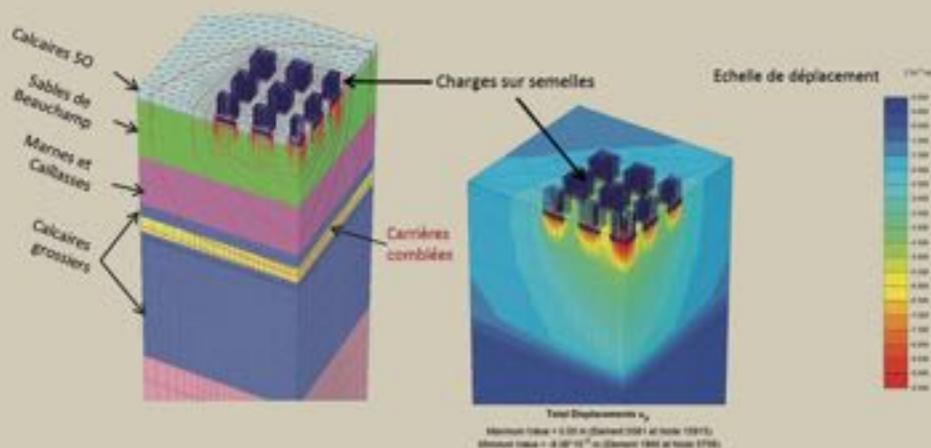
**6- Modelling of RATP U turn - Zone 4: Jourdan Rue in Plaxis 3D software.**

**MODÉLISATION DE LA ZONE D'INFLUENCE GÉOTECHNIQUE SOUS LE LOGICIEL PLAXIS 3D**



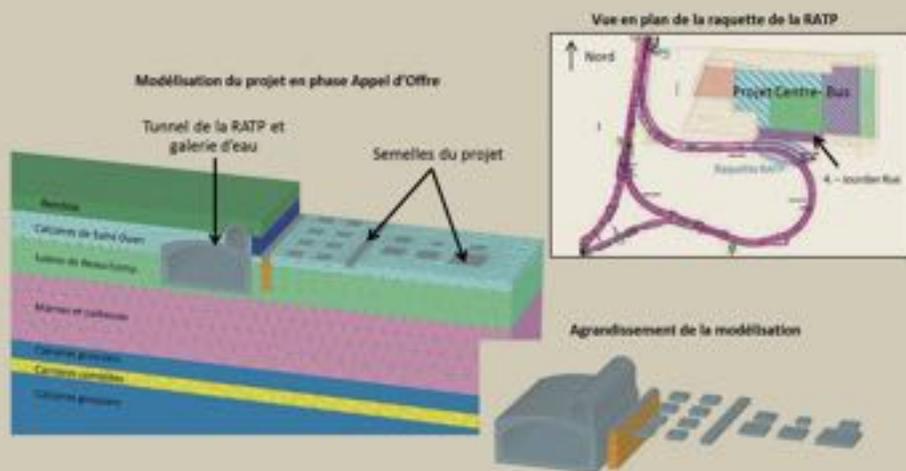
4 © BE GÉOTECHNIQUE EIFFAGE CONSTRUCTION

**MODÉLISATION LOCALE DE LA ZONE 2 : TOMBE ISSOIRE « INFRA » SOUS LE LOGICIEL PLAXIS 3D**



5 © BE GÉOTECHNIQUE EIFFAGE CONSTRUCTION

**MODÉLISATION DE LA RAQUETTE RATP - ZONE 4 : JOURDAN RUE SOUS LE LOGICIEL PLAXIS 3D**



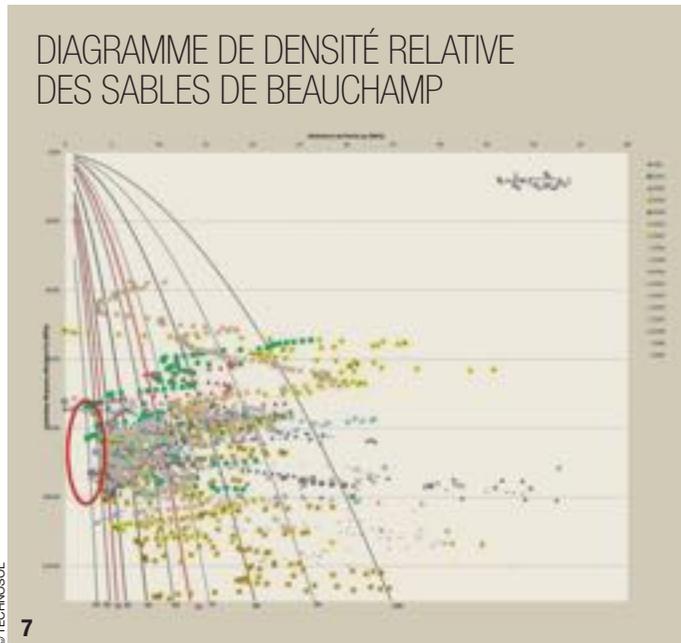
6 © BE GÉOTECHNIQUE EIFFAGE CONSTRUCTION

7- Diagramme de densité relative des Sables de Beauchamp.

8- Modèle géotechnique intégration de la couche de moindre compacité.

7- Chart of the relative density of Beauchamp sands.

8- Geotechnical model: integration of the layer of least compactness.



© TECHNOSOL

### CAMPAGNE DE SONDAGES COMPLÉMENTAIRES

Parallèlement, les analyses tridimensionnelles du projet ont permis de mettre en évidence la sensibilité de certains paramètres géotechniques relatifs aux déformations (notamment au niveau de la formation des Sables de Beauchamp dans laquelle quelques valeurs pressiométriques faibles avaient été identifiées dès les études amont). Pour valider définitivement la solution variante en fondations superficielles, il a donc été nécessaire de réaliser une campagne de sondages complémentaires au droit des zones les plus sollicitées.

La campagne de sondages complémentaires, définie en collaboration entre Technosol et Eiffage Construction, a été réalisée pendant la phase d'appel d'offres. Elle a été prise en charge par le maître d'ouvrage et a fait l'objet d'un rapport interprétatif de la part de Technosol. Il s'agit d'une campagne de reconnaissance spécifique qui cible les semelles les plus sollicitées afin de déterminer, de manière précise pour chaque zone, les paramètres géotechniques des horizons et plus par-

ticulièrement de celui des Sables de Beauchamp.

Au total, 25 sondages au pénétromètre statique CPT furent réalisés sur le site, avec localement la réalisation de préforages afin de traverser la formation du marno-calcaire de Saint-Ouen.

Ces sondages CPT ont confirmé la présence, plus ou moins continue, entre 6 et 8 m de profondeur, de lentilles de moindre compacité au sein des sables ( $q_{c,0} = 2$  à 4 MPa), sur 1 à 1,5 m d'épaisseur environ, pouvant générer des tassements préjudiciables pour le projet. Le diagramme de densité rela-

tive (figure 7) met ainsi en évidence ces passages de sables lâches avec  $Dr < 35\%$ .

Les modèles aux Éléments Finis furent modifiés afin d'intégrer cette couche ou lentille de moindre compacité (figure 8). Ces investigations et modélisations complémentaires ont conduit à renforcer la couche de moindre compacité par des colonnes de jet grouting sous les semelles les plus sollicitées.

Consécutivement, Technosol a adapté son rapport de mission géotechnique G2 PRO (sur la base des investigations complémentaires) en préconisant une solution de fondations superficielles localement renforcées par colonnes de jet grouting, à l'appui de modélisations MEF 3D complémentaires.

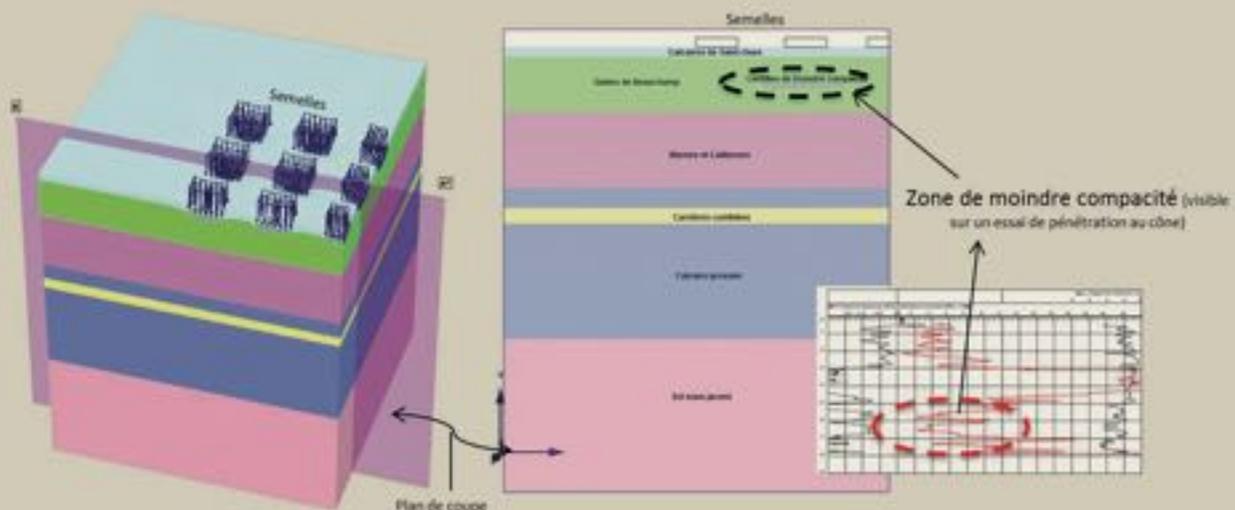
Suite à l'attribution du marché à Eiffage, un complément de sondages géotechniques a été réalisé au droit des charges les plus importantes. Il s'agissait en fait de la fin de la campagne de sondages complémentaires qui n'avait pas pu être finalisée précédemment.

Le nombre important, mais nécessaire, d'essais géotechniques a donc permis de connaître avec précision, pour chaque modèle géotechnique, l'implantation de la couche de moindre compacité.

### RÉALISATION DE LA MISSION D'ÉTUDES D'EXÉCUTION RELATIVE AUX SEMELLES DE FONDATION

À partir des essais complémentaires associés à la mission G2 PRO, ▷

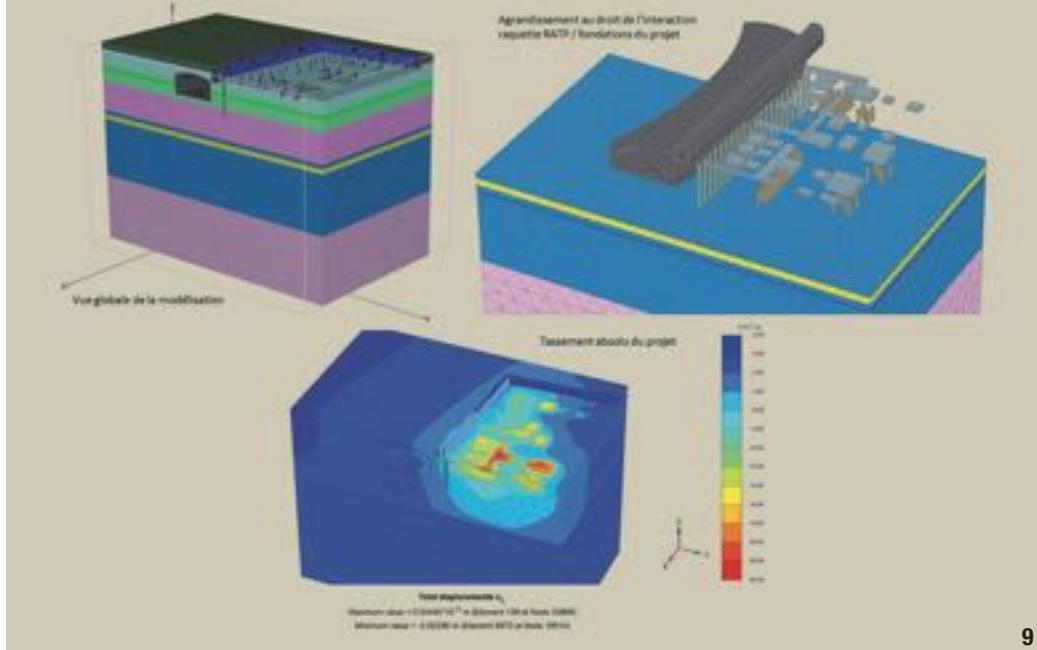
### MODÈLE GÉOTECHNIQUE INTÉGRATION DE LA COUCHE DE MOINDRE COMPACTITÉ



© BE GÉOTECHNIQUE EIFFAGE CONSTRUCTION

8

MODÈLE AUX ÉLÉMENTS FINIS "RAQUETTE RATP" SOUS LE LOGICIEL PLAXIS 3D - PHASE G3 EXÉCUTION



© BE GÉOTECHNIQUE EIFFAGE CONSTRUCTION

9- Modèle aux Éléments Finis "Raquette RATP" sous le logiciel Plaxis 3D - Phase G3 Exécution.

10- Photographie de la cible de la semelle ST20.

11- Tassements absolus théorique et réel des semelles auscultées.

9- Finite elements modelling of RATP u turn with Plaxis 3D software - Phase G3: Execution.

10- Photograph of the ST20 footing target.

11- Absolute theoretical and real subsidence of footings analysed in detail.

le Bureau d'Étude Géotechnique d'Eiffage Construction GD (en charge des études d'exécution relatives aux semelles de fondation) a réalisé une synthèse de l'ensemble des reconnaissances géotechniques afin d'établir les hypothèses nécessaires à la finalisation des modélisations aux Éléments Finis. En étroite collaboration avec le Bureau d'Étude Structure d'Eiffage Construction GD, les modélisations locales des 6 zones du projet ont été modifiées pour intégrer les géométries finales avec notamment les colonnes de jet grouting au sein de la couche de moindre compacité et les descentes de charge définitives.

Pour tous les modèles, les tassements absolus étaient limités de 3 mm à 20 mm avec la nécessité de vérifier le critère du 1/500<sup>e</sup> pour les ouvrages neufs. La mise à jour des modélisations a été validée par Technosol dans le cadre de sa mission de supervision G4 (selon la norme NF P 94-500 de novembre 2014) et les dispositions constructives associées (notamment renforcement par jet grouting) ont fait l'objet d'un suivi d'exécution dans ce même cadre.

Pour le modèle (Jourdan - Rue), impacté par la raquette de la RATP et la galerie technique, l'objectif a été de limiter les efforts induits par le projet sur les tunnels tout en conservant des tassements absolus et différentiels acceptables pour ces structures.

Le meilleur compromis technico-économique a consisté à fonder la première ligne de semelle sur des pieux courts (ancrés de 1,8 m dans la formation des Marnes et Caillasses). Pour les semelles les plus chargées, situées immédiatement en arrière, un renforcement par jet grouting a été réalisé systématiquement. Grâce à ces techniques, la galerie technique et la raquette RATP n'ont subi qu'un tassement différentiel inférieur au 1/1 000<sup>e</sup>.

**RETOUR D'EXPÉRIENCE**

Compte tenu de l'importance des charges et de la sensibilité du contexte géotechnique, une auscultation a été mise en œuvre sur le chantier pour suivre le tassement des semelles les plus sollicitées.

L'auscultation a consisté en la mesure du déplacement vertical de 14 semelles présentant lors des études MEF (Méthode des Éléments

Finis) un tassement absolu ou différentiel important.

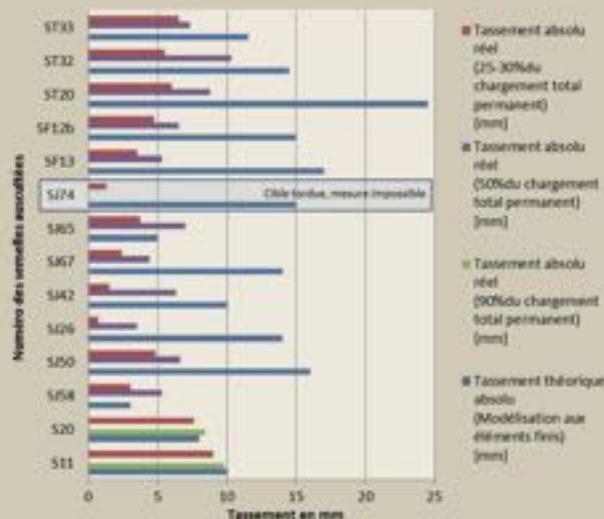
Pour réaliser la mesure, une cible a été posée sur l'amarce du poteau surmontant la semelle (figure 10) puis le point zéro a été relevé avant la réalisation du premier plancher.

Au moment de la parution de cet article, trois mesures ont été réalisées :

- La 1<sup>re</sup> à l'état zéro ;
- La 2<sup>e</sup> à 25% - 30% du chargement permanent total ;



TASSEMENTS ABSOLUS THÉORIQUE ET RÉEL DES SEMELLES AUSCULTÉES



© BE GÉOTECHNIQUE EIFFAGE CONSTRUCTION

## RÉALISATION DES FONDATIONS SUR LE CHANTIER



1



2



## CONCLUSION

Grâce à la contribution active du maître d'ouvrage, Logis-Transports, et de son géotechnicien, Technosol, Eiffage Construction a eu l'opportunité d'adapter la solution de fondation initiale pour proposer une optimisation significative du système de fondations (figure 12).

Pour ce faire, une campagne de reconnaissances complémentaires ciblée a été nécessaire pour caler les modélisations tridimensionnelles par la Méthode des Éléments Finis (MEF).

Une étroite concertation entre les différents protagonistes à l'acte de construire (maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, bureau d'études et entreprise générale) a permis de mesurer les enjeux techniques et financiers de cette opération et de converger vers une solution adaptée et optimisée.

Sur le plan technique, un échange continu entre les ingénieurs structures et les géotechniciens a donné le moyen de valoriser pleinement l'interaction sol/structure pour aboutir à une optimisation raisonnée.

Les outils numériques ont servi de guide mais c'est avant tout l'ensemble des investigations spécifiques en adéquation avec la structure et ses spécificités qui ont rendu possible la fiabilité de la solution de fondations superficielles mise en œuvre avec succès. □

12

→ La 3<sup>e</sup> à 90% du chargement permanent total pour la zone du Père Corentin (zone 6 sur la figure 1) et 50% du chargement permanent total pour le reste du projet.

La figure 11 présente les résultats de l'auscultation en les comparant avec

**12- Réalisation des fondations sur le chantier.**

**12- Execution of foundations on the site.**

le tassement théorique obtenu à l'aide des modélisations aux Éléments Finis en interaction sol/structure.

On note que, pour la plupart, les mesures restent en deçà des valeurs théoriques mais dans un ordre de grandeur comparable.

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**101 000 m<sup>2</sup>** de surface de planchers

**42 000 m<sup>3</sup>** de béton

**14 points** d'auscultation du tassement réel absolu

**3 600 t** d'acier

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Logis-transports et Eiffage Immobilier

**MAÎTRE D'ŒUVRE (GÉOTECHNIQUE) :** Technosol

**MAÎTRE D'ŒUVRE (STRUCTURE) :** Hdm / Khephen / Batiserf

**ARCHITECTES :** Ecdm / Atelier Seraji / Eric Lapierre Expérience

**ENTREPRISE GÉNÉRALE DE CONSTRUCTION :**

Eiffage Construction Résidentiel et Eiffage Construction Tertiaire

## ABSTRACT

### FOUNDATION SOLUTION FOR THE JOURDAN-CORENTIN-ISSOIRE WORKSHOPS PROJECT IN PARIS (14th ARRONDISSEMENT)

FLORA RAYNAUD, EIFFAGE - LIONEL VOUTE, EIFFAGE - SYLVAN OLIVA, EIFFAGE - MICHAËL REBOUL, TECHNOSOL

The Jourdan-Corentin-Issoire Workshops project located at Porte d'Orléans in the 14th arrondissement of Paris involved the construction of an underground 'RATP' public transport bus centre and, above the centre, a real estate programme two to ten stories high. Close cooperation between all the project players made it possible to build the structure on shallow foundations, despite the existence of underground quarries about 20 m below it. Electronic tools served as a guide, but it was above all the specific investigations, appropriate for the structure and its special features, which made it possible to successfully implement a reliable shallow foundation solution. □

### LA SOLUCIÓN DE CIMENTACIÓN DEL PROYECTO DE DE LOS TALLERES JOURDAN-CORENTIN-ISSOIRE EN EL DISTRITO 14 DE PARÍS

FLORA RAYNAUD, EIFFAGE - LIONEL VOUTE, EIFFAGE - SYLVAN OLIVA, EIFFAGE - MICHAËL REBOUL, TECHNOSOL

El proyecto de los Talleres Jourdan-Corentin-Issoire implantado en la Puerta de Orléans, en el distrito 14 de París, ha consistido en la construcción de un depósito subterráneo de la RATP combinada con la realización, en sobreelevación, de un proyecto inmobiliario de 2 a 10 niveles. La estrecha colaboración entre todos los actores del proyecto ha permitido implantarlo sobre cimientos superficiales, pese a la presencia de canteras subterráneas unos 20 m por debajo. Las herramientas digitales han servido de guía, pero ha sido ante todo el conjunto de estudios específicos, adaptados a la estructura y sus especificidades, lo que ha hecho posible la aplicación con éxito de una solución fiable de cimentación superficial. □



# PIEUX STARSOL® : ODYSSEE LE LONG DU CONTOURNEMENT FERROVIAIRE NÎMES-MONTPELLIER (CNM)

AUTEUR : BRUNO DEMARCO, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY PIEUX

DE MARS 2014 À JUILLET 2015, SOLETANCHE BACHY PIEUX A RÉALISÉ LES FONDATIONS DE DIFFÉRENTS OUVRAGES D'ART RÉPARTIS LE LONG DE LA NOUVELLE LIGNE LGV ENTRE NÎMES ET MONTPELLIER. OUVRAGE APRÈS OUVRAGE, LA DÉMONSTRATION DE LA PUISSANCE ET DE LA FIABILITÉ DU PROCÉDÉ STARSOL® A CONVAINCU LE GROUPEMENT OC'VIA, EN CHARGE DES TRAVAUX, PUIS DE L'EXPLOITATION DE LA LIGNE FERROVIAIRE, DE TELLE MANIÈRE QUE SOLETANCHE BACHY PIEUX S'EST VU CONFIER LA RÉALISATION D'OUVRAGES SUPPLÉMENTAIRES À SON MARCHÉ INITIAL.

## LE PROJET

Lancé en juin 2012 par la phase d'études, le projet a pour but de placer Paris à moins de 3 heures de Montpellier par TGV. Pour cela, 80 km de ligne nouvelle doivent être créés. Le parcours ferroviaire initial entre Nîmes et Montpellier sera raccourci de 20 minutes lors de la mise en service de la nouvelle voie, première voie française mixte permettant à la fois la circulation de trains de voyageurs et de trains de marchandises.

La livraison de l'infrastructure est prévue pour fin 2017.

**1- Pied Starsol® avec tube plongeur télescopé.**

**2- Séquence de réalisation d'un pieu Starsol®.**

**1- Starsol® base with extendible tremie pipe.**

**2- Starsol® pile® execution sequence.**

## LES TRAVAUX À RÉALISER

L'essentiel de la ligne est réalisé sur un total de 8,5 millions de m<sup>3</sup> de remblais. Le génie civil est sollicité dès fin 2013 lors des franchissements de reliefs ou de cours d'eau.

Au total, 7 viaducs et 145 ouvrages d'art assurent la transparence hydraulique de la ligne et la libre circulation des animaux. Trente-quatre de ces ouvrages ont nécessité la réalisation de fondations spéciales, notamment des pieux traditionnels forés tubés ou forés boue et des pieux Starsol®. Une fois terminés, ces travaux ont per-

mis, à partir de fin 2015, la pose des voies ferroviaires et des raccordements électriques.

## UN PROJET RÉALISÉ EN PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ

Le projet est mené en Partenariat Public Privé pour le compte de Réseau Ferré de France. Le groupe en charge du marché se dénomme Oc'Via et regroupe plusieurs acteurs industriels et financiers spécialisés dans les infrastructures de grande envergure (voir encart principaux intervenants). Ces partenaires sont répartis dans les 3 entités du groupement :

- En maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre : Oc'Via Pilotage ;
- En conception et construction : Oc'Via Construction ;
- En maintenance : Oc'Via Maintenance.

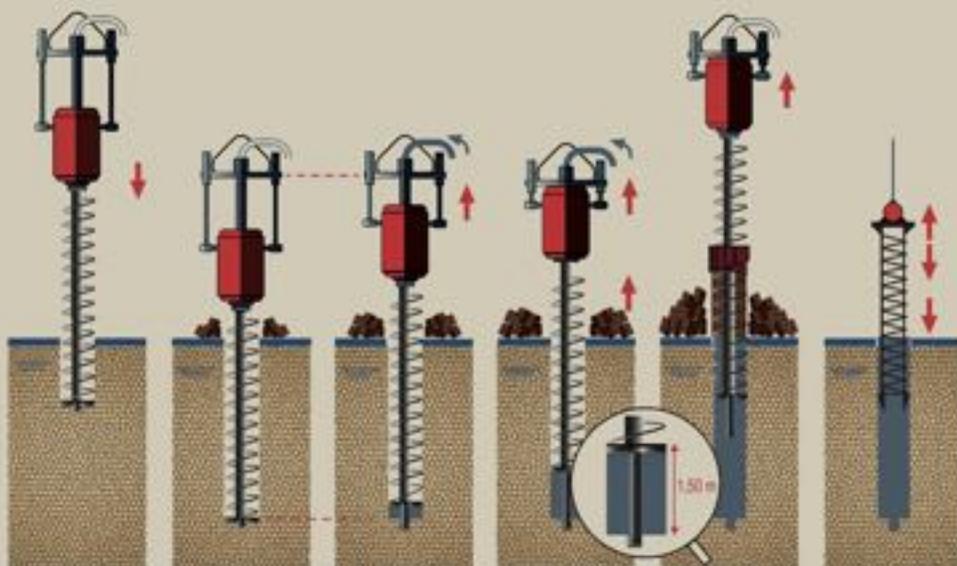
Dans ce cadre, Soletanche Bachy Pieux est intervenu au sein d'un groupement d'entreprises de fondations spéciales, en sous-traitance de Oc'Via Construction, pour la réalisation des pieux de fondation de certains ouvrages.

## RÉPARTITION PROGRESSIVE DES OUVRAGES

Le contrat relatif aux fondations par pieux, passé entre Oc'Via Construction et ses sous-traitants, autorisait l'entreprise principale à modifier, au gré des travaux, l'attribution provisoire des ouvrages d'art.

Ainsi, pour des raisons de planning ou de qualité d'exécution, un sous-traitant A pouvait se voir retirer les travaux de fondations d'un ouvrage au profit d'un sous-traitant B.

## SÉQUENCE DE RÉALISATION D'UN PIEU STARSOL®



Les contrats passés sont des contrats au bordereau de prix, permettant donc la souplesse évoquée ci-avant.

Au sein du groupement de fondeurs (NDLR - entreprises de fondations), Soletanche Bachy Pieux apportait les avantages du procédé Starsol® pour l'exécution des pieux à tarière continue munie d'un dispositif de bétonnage rétractable, tandis que son cotraitant était en charge des pieux en méthodes traditionnelles.

La performance du procédé Starsol® a permis au groupement, au fur et à mesure des travaux, d'intégrer de nouveaux ouvrages dans son escarcelle, augmentant ainsi son programme de travaux de près de 24%.

### FOCUS SUR LE PROCÉDÉ STARSOL®

Les pieux à tarière continue sont regroupés en 2 familles : la méthode « courante » (anciennement type 2 - avec enregistrements éventuels de paramètres, mais sans tube plongeur) et la méthode « améliorée » (anciennement type 3 - avec enregistrements de paramètres et tube plongeur).

Pour chaque type, le principe de base reste le même : une vis sans fin (tarière), portée par une foreuse rotative, est enfoncée dans le sol jusqu'à la profondeur visée par le calcul. Le diamètre de la vis correspond au diamètre du pieu à réaliser. La tarière est ensuite remontée en extrayant le terrain, tandis que le béton est pompé au travers de l'âme de la vis pour être injecté en pied de tarière. Une cage d'armature peut ensuite être descendue dans le béton encore à l'état frais.

3- Vue en coupe de l'ouvrage SC576, CNM.

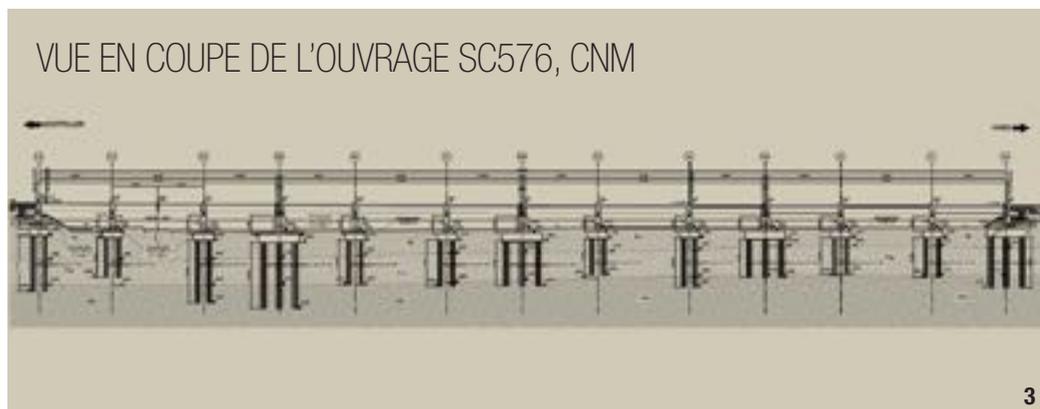
4- Cage en cours d'équipement surmontée d'un vibreur.

5- Carottage d'un fond de pieu réalisé en Starsol®.

3- Cross-section view of structure SC576, CNM.

4- Reinforcing cage undergoing equipment, with a vibrator on top.

5- Core sampling of a bottom of pile executed by Starsol®.



3

© INGEROP

### INCONVÉNIENTS DE LA TARIÈRE CONTINUE « COURANTE »

Dans le cadre de cette famille, la tarière est munie d'un bouchon en pied qui est expulsé par le béton lui-même pour être laissé en fond de pieu. Malheureusement, ce procédé est sujet aux aléas suivants :

- Problème d'expulsion de la plaque en pied avec risque de montée en pression du béton et donc formation de bouchon dans le circuit de bétonnage.
- Remontée de la tarière au bétonnage réalisée sans contrôle de vitesse. La tarière peut être remon-

tée trop vite par rapport au volume béton injecté, et le fût du pieu risque donc d'être discontinu (« pieu coupé »). Ce risque est légèrement atténué - sans être totalement écarté - par l'affichage du volume béton injecté dans la cabine de l'opérateur.



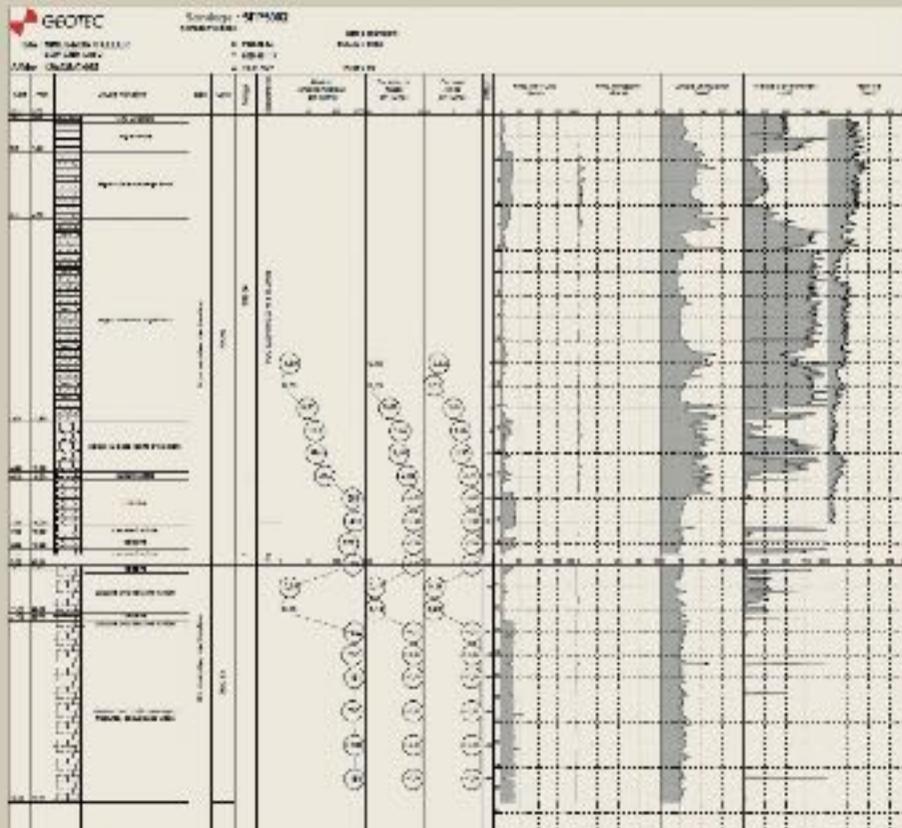
4



5

© SOLETANCHE BACHY

## SONDAGE PRESSIOMÉTRIQUE OUVRAGE SC571, CNM



6- Sondage pressiométrique ouvrage SC571, CNM.

7- Plan de répartition des pieux gare Odysseum, CNM.

6- Pressiomètre logging on structure SC571, CNM.

7- Odysseum station pile distribution plan, CNM, CNM.

### AVANTAGES DU PROCÉDÉ STARSOL®

L'évolution majeure du procédé Starsol® consiste à proposer un tube plongeur télescopique intégré à l'âme de la tarière et disposant de 2 lumières latérales à sa base, ainsi que des dents de forage à sa pointe (figure 1). Le procédé Starsol® présente ainsi les avantages suivants :

- Plus aucun problème d'expulsion du bouchon à l'amorçage du bétonnage (pilotage par vérins) ;
- Plus aucun risque de coupure (sécurité de 1,50 m = longueur de télescopage) ;
- Un bétonnage meilleur en compacité.

Ces avantages ont permis au procédé de bénéficier d'un cahier des charges particulier, validé par une cinquantaine d'essais de chargement statique, applicable aux ouvrages d'art, permettant, d'une part, d'optimiser les coefficients de dimensionnement et autorisant, d'autre part, la mobilisation de contraintes supérieures dans le béton. Le procédé Starsol® présente en plus l'avantage d'être novateur en termes de transparence de réalisation :

- La position du tube plongeur est connue à tout instant par mesure visuelle de la course des vérins qui le pilotent (figure 2) ;
- Les paramètres du pieu sont édités en direct par une imprimante embarquée, les rendant infalsifiables.

L'évolution permanente du procédé Starsol® est accompagnée du développement parallèle d'outillages adaptés (puissance de la machine, design des outils de forage...) et d'un savoir-faire unique sur les formulations de béton de pieux.

## PLAN DE RÉPARTITION DES PIEUX GARE ODYSSEUM, CNM





8

© CÉDRIC HELSY

Notamment sur de nombreux ouvrages du CNM, l'ajout de Starsolithe-R aux différentes formules béton a permis la mise en place d'armatures toute hauteur dans des pieux traversant des terrains à forte succion, et donc normalement problématiques lorsqu'il s'agit de pieux en tarière continue.

### TRAVAUX SUR LES OUVRAGES

La phase de préparation de chantier a été l'occasion, pour les équipes de Soletanche Bachy Pieux, d'optimiser les formulations béton proposées par les deux groupements de fournisseurs béton désignés. Puis, la phase travaux a permis de démontrer la performance du procédé Starsol<sup>®</sup> en termes d'optimisation du dimensionnement et de puissance de forage.

### OUVRAGE SC576 : VALIDATION DE LA FORMULATION BÉTON

En amont des travaux sur ce premier ouvrage, situé à proximité de Gallargues-le-Montueux, Soletanche Bachy Pieux a pris contact avec les 2 groupements de bétonniers désignés par Oc'Via Construction.

Les formules de base proposées par ces derniers ont été retravaillées de manière à les adapter aux travaux de tarière creuse. En effet, avec cette technique, la formulation doit per-



9

© CÉDRIC HELSY

**8- Zonage de travaux sur gare Odysseum, vue générale chantier.**

**9- Atelier Starsol<sup>®</sup> modèle F3500 et son personnel.**

**8- Work zoning on Odysseum station, general view of the project.**

**9- Model F3500 Starsol<sup>®</sup> equipment and its personnel.**

mettre, d'une part la mise en œuvre du béton par pompage, et d'autre part la conservation des propriétés du béton au contact du terrain.

Les principales difficultés rencontrées avec cette méthodologie proviennent de l'essorage du béton sous sa propre charge au contact de certaines natures de sol. Ce phénomène peut aller jusqu'à empêcher la descente d'une cage d'armature dans le béton frais à la suite du coulage. Afin de contrer cet effet néfaste, Soletanche Bachy Pieux dispose d'un adjuvant, sous la forme d'une poudre dénommée Starsolithe-R. Ce produit a été testé avec succès sur

**10- Pieu exécuté en recépage par débordement.**

**11- Quai de gare Odysseum livrable.**

**10- Pile exécutée by trimming the concrete overflow.**

**11- Odysseum station platform ready for delivery.**

près de 400 chantiers exécutés entre les années 2005 et 2013. Pour pouvoir être intégré à une formule de béton, ce produit révolutionnaire nécessite une étude approfondie afin de vérifier sa compatibilité avec les autres ingrédients, tout en assurant une maniabilité suffisante pour le pompage.

Soletanche Bachy Pieux a donc mené, en collaboration avec le service qualité de Oc'Via Construction, une étude béton accélérée qui s'est déroulée du mois de janvier au mois de mars 2014, mois de démarrage des pieux de l'ouvrage SC576.

L'ouvrage en question était fondé sur huit piles et deux culées. L'ensemble des piles était lui-même fondé sur un ensemble de 48 pieux Starsol® à des profondeurs variant de 15 à 20 m (figure 3).

Après une dernière étape de convenue du béton consistant à pomper la formule béton en conditions réelles,



10

© SOLETANCHE BACHY

l'ensemble des pieux de cet ouvrage a pu être coulé à grand débit de béton (environ 60 m<sup>3</sup>/h) sous des pressions n'excédant pas 20 bars en sortie de pompe. Chaque cage d'armature, équipée de tubes d'auscultation sonique et de carottage, est descendue dans le

béton frais jusqu'en fond de pieu sans nécessiter d'opération de trépidation. Un vibreur coiffant la tête de cage est simplement utilisé en fin d'équipement afin d'assurer le parfait enrobage des aciers sur toute la hauteur de cage (figure 4).

Lors des contrôles par auscultations soniques - 100 % des pieux étaient testés - aucune anomalie n'est apparue. De même, le contrôle de pointe de pieux par carottage a mis en évidence un contact direct entre le béton du pieu et le terrain en place (figure 5).

La réalisation des pieux de cet ouvrage a donc permis de valider définitivement les formules béton mises au point en phase de préparation.

#### **OUVRAGE SC370 : OPTIMISATION DU DESIGN**

En septembre 2014, Soletanche Bachy Pieux a réalisé les pieux de l'ouvrage SC370. Au cours des mois précédents, son bureau d'étude s'est mis en relation avec le bureau d'étude Oc'Via Construction afin d'optimiser les diamètres ainsi que les profondeurs de pieux envisagées par la maîtrise d'œuvre. Un dimensionnement aux quantités réduites a pu être émis, mais n'a malheureusement pas été adopté du fait de délais de validation incompatibles avec le planning de travaux. En effet, la réduction des diamètres de 1200 mm à 1000 mm modifiait la raideur prise en compte sous les appuis de l'ouvrage et aurait donc nécessité la reprise de la modélisation dynamique de ce dernier.

Toutefois, l'exercice a permis de démontrer que l'application du cahier des charges Starsol® aurait permis une économie substantielle de 12 % par rapport au dimensionnement préconisé par l'Eurocode 7.

#### **OUVRAGE SC571 : FORAGE DANS LE ROCHER**

Au mois d'octobre 2014, le groupement de fondeurs s'est vu confier la réalisation des fondations de l'ouvrage SC571. Cet ouvrage ne faisait à l'origine pas partie du marché du groupement et lui a été accordé avec application d'un prix nouveau adapté au forage dans le terrain dur.

En effet, les pieux de cet ouvrage venaient s'ancrer dans un substratum calcaire extrêmement induré, disposition adoptée du fait de la présence de karsts dans les horizons supérieurs. Les vides en question avaient préalablement été traités par une campagne d'injection de remplissage. Le terrain d'ancrage présentait des valeurs de pression limite non-mesurées (valeurs en dehors du domaine d'utilisation de la sonde pressiométrique au-delà de 7 Mpa) et des modules pressiométriques s'élevant jusqu'à 500 MPa (figure 6).



11

© SOLETANCHE BACHY

Les essais de résistance en compression réalisés sur les carottes ont montré des résultats de l'ordre de 100 MPa. Les diamètres de pieux variaient de 1 200 mm à 1 800 mm. Les diamètres supérieurs à 1 200 mm ont été réalisés en méthode « foré boue ».

Concernant les pieux de 1 200 mm, les ancrages de 2 à 7 m visés par la note de calcul ont pu être exécutés en tarière continue au moyen d'une Starsol® modèle F3500 avec des vitesses instantanées de perforation de l'ordre 3 m/h. À noter que dans ce type de terrain, la vitesse d'avancement au carottier excède rarement les 30 cm/h.

La possibilité d'exécuter ces pieux en tarière continue, y compris dans le rocher, a donc permis à Oc'Via Construction de se soustraire aux inconvénients de la méthode « foré boue » sur une partie des pieux de l'ouvrage.

## GARE ODYSSEUM DE MONTPELLIER

Les atouts techniques démontrés sur ces 3 ouvrages ont permis au groupement de fondeurs de se voir confier la réalisation de trois ouvrages supplémentaires par rapport aux six initialement prévus.

En complément du marché initial, Oc'Via Construction a décidé de confier à Soletanche Bachy Pieux la réalisation des pieux de la gare Odysseum de Montpellier, dans le cadre d'une consultation de gré à gré.

Les quais de la gare, réalisés par le groupement Oc'Via Construction, devaient être réceptionnés par un groupement tiers ayant en charge la réalisation de la structure.

La qualité attendue et les délais partiels imposés aux entreprises revêtaient donc dans ce cadre un caractère tout particulier.

### PHASE ÉTUDE

L'ouvrage était initialement prédimensionné sur un ensemble de 222 pieux de diamètre 1 200 mm, à des profondeurs variant de 16 à 23 m (figure 7). La reprise des études par le bureau d'étude Soletanche Bachy Pieux selon le cahier des charges Starsol® a permis d'optimiser les profondeurs de pieux à des profondeurs variant de 11 à 21 m.

Cette optimisation a permis une économie directe de 16 %, mais également un gain en termes de planning, puisque les quantités à mettre en œuvre étaient finalement réduites et associées à une technologie particulièrement rapide.

### PHASE TRAVAUX

L'enjeu majeur du chantier était le délai de libération de chaque pile.

Un phasage fin a donc été proposé par Soletanche Bachy Pieux, afin de permettre à Oc'Via de lancer ses travaux au fur et à mesure de l'avancement sans gêner la production des pieux (figure 8).

Les 222 pieux de diamètre 1 200 mm ont ainsi pu être réalisés en un mois, en ne mobilisant qu'un seul atelier Starsol® modèle F3500 (figure 9).

Tous ces pieux ont été livrés avec une arase béton finie, permettant également à Oc'Via Construction d'économiser le temps de recépage des pieux. Pour ce faire, les plateformes de travail étaient calées au niveau de béton recépage. Un recépage sur béton frais par débordement a ainsi été mis en œuvre.

Cette méthodologie, validée par le contrôle externe missionné par Réseau Ferré de France, consiste à bétonner le pieu jusqu'à une cote située au-dessus du niveau de la plateforme. Le télescopage du tube plongeur de la Starsol® est fiabilisé par les vérins situés au niveau de la table de rotation. Il est donc possible de bétonner le pieu jusqu'à un mètre au-dessus du niveau de plateforme, à l'abri du cône formé par les déblais en tête de forage, et sans que les ouvertures latérales d'injection du béton ne passent au-dessus du Niveau de Béton Recépage (correspondant au niveau de la plateforme). L'arase est ensuite réalisée sur béton frais, à la pelle mécanique, en rasant le cône de déblais contenant le fût de béton excédentaire.

La formulation de béton utilisée étant stabilisée par l'ajout de Starsolithe-R, cela permet d'éviter l'apparition d'une laitance en surface, habituellement liée au phénomène de décantation lorsque le béton s'essore en profondeur. Il est donc possible de bétonner directement sur la surface de béton livrée, moyennant un bouchardage de reprise (figure 10).

À l'issue des travaux, les livrables de la gare Odysseum ont été réceptionnés sans aucune réserve sur les pieux de fondation (figure 11). □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**CLIENT : RFF**  
(Réseau Ferré de France)

**GROUPEMENT OC'VIA :**

- Spie Batignolles
- Bouygues Construction
- Colas
- Fideppp
- Meridiam Infrastructures
- Alstom

**EN CONTRAT AVEC LE GROUPEMENT :**

- Maîtrise d'œuvre : Ingerop
- Bureau d'études techniques : Incet

**GROUPEMENTS BÉTONNIERS :**

- Cemex / Unibeton
- Lafarge / Colas Montpellier Bétons

**GROUPEMENT SOUS-TRAITANT PIEUX :**

- Botte Fondations (hors Gare Odysseum)
- Soletanche Bachy Pieux

## CHIFFRES CLÉS

**NOMBRE D'OUVRAGES RÉALISÉS EN STARSOL® : 10 ouvrages**

**NOMBRE DE PIEUX STARSOL® : 495 u**

**VOLUME BÉTON PIEUX STARSOL® : 9 000 m<sup>3</sup>**

**LINÉAIRE DE PIEUX STARSOL® : 10 800 m**

**TONNAGE ACIER : 830 t**

## ABSTRACT

### STARSOL® PILES: ODYSSEY ALONG THE NIMES-MONTPELLIER RAIL BYPASS (CNM)

BRUNO DEMARCO, SOLETANCHE BACHY PIEUX

**The rail bypass project between Nimes and Montpellier (CNM) entailed in particular the construction of 152 bridges and viaducts, 34 of which were founded on piles. The project was carried out on a Public-Private Partnership basis by the Oc'Via entity. Its sub-entity Oc'Via Construction entrusted to the consortium comprising Soletanche Bachy Pieux the piling work for a number of bridge structures. Soletanche Bachy Pieux was notably in charge of piles of diameter less than 1200 mm, using the Starsol® process. This process has technical specifications allowing optimisation of the piles and benefits from experience feedback regarding concrete mix designs that can ensure a high quality of execution. These qualities were explained structure after structure to Oc'Via Construction, which no longer hesitated to entrust to the consortium new work for foundations on piles. □**

### PILOTES STARSOL®: ODISEA A LO LARGO DE LA VARIANTE FERROVIARIA NIMES-MONTPELLIER (CNM)

BRUNO DEMARCO, SOLETANCHE BACHY PIEUX

**El proyecto de la variante ferroviaria entre Nimes y Montpellier (CNM) consistía básicamente en la realización de 152 obras de fábrica, 34 de las cuales sustentadas sobre pilotes. El proyecto fue llevado a cabo en el marco de un consorcio público-privado por la entidad Oc'Via. La división Oc'Via Construction encargó a un grupo de empresas, entre ellas Soletanche Bachy Pieux, la instalación de los pilotes en varias obras. Soletanche Bachy Pieux se encargó principalmente de los pilotes de diámetro inferior a 1.200 mm siguiendo el procedimiento Starsol®. Este procedimiento cuenta con unas especificaciones propias que permiten optimizar los pilotes y aplicar la experiencia acumulada a las formulaciones de hormigón para garantizar una alta calidad de ejecución. En cada una de las obras se expusieron dichas ventajas a la empresa Oc'Via Construction, que no ha dudado en encargar al consorcio nuevas obras de cimentación sobre pilotes. □**



## EXPERTS EN FONDATIONS SPÉCIALES



- SOUTÈNEMENT
- TIRANTS
- PIEUX
- MICROPIEUX
- INJECTIONS
- CONSOLIDATION  
ET AMÉLIORATION DE SOLS

Fort des 4 entreprises de son pôle Fondations, le groupe Fayat dispose d'une gamme complète de solutions techniques pour tous les types de fondations et de travaux de consolidation des sols.

Les 4 sociétés Fayat Fondations apportent ainsi à leurs clients toute leur expertise en fondations spéciales et le savoir-faire de leurs équipes sur des chantiers d'envergure comme sur des travaux de proximité.





1

© WIKIPEDIA

# COMBLEMENT DE CAVITÉS TROGLODYTIQUES SOUS L'ÉCOLE SAINT-JOSEPH, À CONFLANS- SAINTE-HONORINE

AUTEUR : NICOLE BENZ-COLLANGE, INGENIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE

PERCHÉE SUR LES HAUTEURS DE CONFLANS-SAINTE-HONORINE, L'ÉCOLE SAINT-JOSEPH EST SOUS-MINÉE PAR DEUX NIVEAUX DE CAVITÉS TROGLODYTIQUES CREUSÉES À MÊME LE CALCAIRE GROSSIER DÈS LE MOYEN ÂGE ET ENCORE EN PARTIE UTILISÉES DE NOS JOURS. UN DIAGNOSTIC, MENÉ DANS LE CADRE DU PLAN DE PRÉVENTION DES RISQUES MOUVEMENT DE TERRAIN (PPRMT), A PERMIS DE METTRE EN ÉVIDENCE DES CAVES EN MAUVAIS ÉTAT, NÉCESSITANT D'ÊTRE COMBLÉES EN PRIORITÉ POUR GARANTIR LA SÉCURITÉ DE L'ÉCOLE. UNE PREMIÈRE PHASE DE TRAVAUX A DONC ÉTÉ MENÉE LORS DE L'ÉTÉ 2015.

## DIAGNOSTIC ET ZONES CIBLÉES

Au travers d'une campagne d'inspections visuelles des caves accessibles, complétée par des sondages de reconnaissances, l'accent a été mis, pour ces premiers travaux de mise en sécurité, sur :

- Le comblement de trois caves, situées directement sous l'école, visitables, mais accessibles uniquement en traversant des habitations privées ;
- Le comblement d'une cave comprenant deux niveaux, partiellement remblayée, mais encore accessible, se trouvant à la fois sous l'école et sous le domaine public ;
- Des sondages de reconnaissances complémentaires au droit de cavités sous-jacentes supposées ou non accessibles, réalisés depuis les salles de classe, préalablement à leur comblement.

## UN PLANNING IMPOSÉ

Ces travaux nécessitaient une intervention avec des machines de forage depuis les classes, les couloirs et les cours de l'école ; de ce fait, l'intervention de Soletanche Bachy France n'a été possible qu'à la fin de l'année scolaire, le 6 juillet 2015.

1- Le centre historique, avec, du premier au dernier plan : la tour Montjoie, l'école Saint-Joseph et l'église Saint-Maclou.

2- Protection des salles de l'école.

3- Mur en pierres sèches.

4- Reconnaissance de la cave principale par les pompiers de la ville.

1- The historic centre, with, from the foreground to the background: Montjoie tower, Saint-Joseph school and Saint-Maclou church.

2- Protection of the school rooms.

3- Dry stone wall.

4- Reconnaissance of the main cellar by the town's fire fighters.



2 © PHOTOTHÈQUE SOLETANCHE-BACHY FRANCE

Pour permettre des opérations de réfection des sols et le réaménagement du mobilier avant la rentrée de septembre, les travaux de comblement et de remise en état devaient être achevés le 14 août au plus tard,

soit une fenêtre de tir de 6 semaines seulement.

Afin de tenir ces délais, des moyens renforcés, ainsi qu'une organisation particulière, ont été mis en place.

#### UN SITE EXIGU

L'école Saint-Joseph, installée sur d'anciennes constructions médiévales dominant la vallée de la Seine, n'était accessible que par la rue de la Tour, une voie non carrossable desservant la Tour Montjoie (XI<sup>e</sup> siècle) encore visible (figure 1).

Il en allait de même pour les rues menant aux deux niveaux de caves à combler, qui ne pouvaient être empruntées qu'à pied.

Le seul espace extérieur accessible par voie routière était le parking de la place de l'Église.

Celui-ci n'offrant pas la superficie nécessaire pour y installer une centrale de fabrication de mortier et son stock de ciment et de sablon, c'est l'option du mortier livré prêt-à-l'emploi qui a été retenue pour les 1 000 m<sup>3</sup> d'injection estimés.

À l'intérieur de l'école, les accès pour les machines de forage se sont avérés tout aussi compliqués.

En effet, en raison de la configuration atypique de l'école, aucun espace ne se situait au même niveau et certaines salles offraient moins de deux mètres



3



4



5



6



7

### TRAVAUX PRÉPARATOIRES INSTALLATION SOIGNÉE DANS L'ÉCOLE

Trois journées complètes ont été nécessaires à l'installation du matériel sur la place de l'Église, à la protection intégrale des salles de classe (figure 2), à la création de rampes d'accès dans les escaliers de l'école et à la protection, voire au démontage, de certaines portes pour le passage des machines.

### IMPLANTATION ET CAROTTAGES

C'est un maillage 3 m x 3 m qui a été préconisé par la maîtrise d'œuvre pour les forages d'injection. Les points d'impact des forages ont été implantés sur site en tenant compte des obstacles présents dans les sous-sols de l'école, comme la chaufferie ou d'anciennes salles techniques désaffectées et parfois inconnues. Une partie des forages était à réaliser depuis l'intérieur du réfectoire de l'école, situé sur un vide sanitaire à préserver et non visitable. Une implantation minutieuse des forages a été effectuée entre les poutres du plancher, repérées préalablement par une inspection à la caméra, avant la réalisation de carottages et leur chemisage par un tube PVC destiné à canaliser le mortier de comblement.

5- Forage depuis le couloir d'accès au réfectoire.

6- Forage débouchant dans une cave visitable.

7- Forage dans l'atelier de l'école, avec ventilation renforcée.

8- Forage de barrage dans l'étroite rue de la Tour.

5- Drilling from the canteen access corridor.

6- Drilling, coming out into a man-entry cellar.

7- Drilling in the school's workshop, with enhanced ventilation.

8- Drilling a barrier in a narrow street, rue de la Tour.



8



© PHOTOTHÈQUE SOLETANCHE-BACHY FRANCE

## TRAVAUX DE MAÇONNERIE

Pour chaque cave accessible et à combler, un ou plusieurs murages de séparation ont été réalisés. Ceux-ci ont permis de séparer, sur la base d'un bornage préalablement défini, les parcelles situées directement sous l'école à sécuriser, et les parties privées appartenant aux riverains qui devaient être maintenues en l'état.

La plus grande des caves, s'étendant sur deux niveaux, a été abandonnée après avoir été partiellement remblayée, puis murée. L'accès d'origine au niveau inférieur était donc particulièrement dangereux, car rempli de gravats.

Pour des raisons de sécurité, un accès direct depuis la rue a été créé lors des travaux préparatoires. Les zones de travaux dans l'école et en souterrain ont été reconnues par les pompiers de la ville, lors d'une visite préventive (figure 4).

Une exploration poussée de la cave principale a également permis de mettre en évidence un mur de séparation en pierres sèches, long de 17 m et quasiment à l'aplomb de l'école (figure 3). Celui-ci a donc été conforté et étanché avant tout travail d'injection, afin d'éviter son effondrement et la propagation du mortier vers le domaine public.

Les accès aux caves étant indépendants de l'école et au vu de l'enjeu du respect des délais, les travaux de maçonnerie ont été anticipés et initiés

**9- Centrale d'injection et installations de chantier devant l'école Saint-Joseph.**

**10- Murage d'une cave équipé d'évents.**

**9- Grouting plant and site facilities before Saint-Joseph school.**

**10- Walling of a cellar provided with vents.**

dès la fin du mois de juin, avant les vacances scolaires. Les cheminements piétons autour de l'école ont été maintenus pendant cette période.

## TRAVAUX DE COMBLEMENT FORAGE ET RECONNAISSANCES COMPLÉMENTAIRES

Pour s'affranchir des nuisances qu'aurait causées la mise en place de conduites d'injection chez les riverains et pour garantir un traitement complet de la zone d'intervention, l'ensemble des injections a été effectué par le biais de forages réalisés depuis l'intérieur de l'école (figure 5).

Les forages ont donc été implantés selon un maillage 3 m x 3 m.

Comme les cavités recherchées ont été creusées directement à flanc de colline, dans le calcaire grossier, les forages ont été réalisés de l'extérieur vers l'intérieur de l'école. Ainsi, si la pleine masse de calcaire était rencontrée sur deux forages successifs, autrement dit si la cavité avait été dépassée, la ligne de forage était alors abandonnée, en accord avec la maîtrise d'œuvre. En cas de rencontre de vide franc à la perforation, une inspection télévisuelle a été systématiquement menée au droit des cavités non accessibles. Ce mode opératoire a permis de mettre en évidence des salles vides non répertoriées directement sous l'école (figure 6). Chaque forage a ensuite été équipé de tubes lisses et crépinés, destinés à conduire le mortier de comblement jusqu'aux caves à remplir.

L'espace disponible dans l'école étant particulièrement restreint, ce sont quatre foreuses de très petit gabarit, de type Beretta T21 et T46 et TEC Futuro, qui ont été utilisées. Pour le travail en environnement confiné, des mesures spécifiques ont été mises en œuvre, comme l'emploi d'une foreuse électrique ou la mise en place de dispositifs de ventilation renforcée, doublés de systèmes de détection de gaz (figure 7). En complément des forages dédiés à l'injection et de manière à limiter le cheminement du mortier hors des zones spécifiées, des forages de barrages en limite ont aussi été réalisés depuis l'extérieur (figure 8). Initialement, leur remplissage était prévu en grave-ciment, mais, comme ces forages n'ont pas présenté de vides francs importants, la création de barrages a été réalisée en y injectant, par petites quantités successives, du mortier de comblement. Pour mener à bien les opérations de forage dans le délai imparti, les équipes ont travaillé en deux postes sur les trois foreuses évoluant à l'intérieur de l'école.

## INJECTIONS

Le comblement a été réalisé en employant du mortier prêt à l'emploi, livré en toupie et déversé dans le malaxeur de grande contenance (5 m<sup>3</sup>) de la centrale d'injection installée sur la place (figure 9). Un ensemble de pompes à pistons et de flexibles d'injection permettait d'injecter gravitairement le produit dans les cavités, via les forages. Pour garantir l'approvisionnement en mortier selon les cadences de comblement visées, le chantier a dû faire appel à plusieurs fournisseurs et unités de fabrication.

© PHOTOTHÈQUE SOLETANCHE-BACHY FRANCE



10

Afin de ne pas exercer une poussée trop importante sur les murs en maçonnerie existants ou préalablement réalisés dans le cadre des travaux, l'injection n'a pas été effectuée en continu, mais au moins en trois fois.

La montée du mortier de comblement était régulièrement surveillée, soit visuellement par des événements laissés dans les murages (figure 10), soit par des forages voisins à l'aide de la caméra d'auscultation.

Au total, ce sont près de 900 m<sup>3</sup> de mortier de comblement qui ont été injectés dans les cavités sous-minant l'école.

Après un délai permettant la prise et la décantation du mortier, des injections de clavage sous faible pression ont été réalisées, également avec du produit prêt-à-l'emploi (figure 11).

Pour l'ensemble des opérations de forage et d'injection, une surveillance constante a été mise en place pour les habitations riveraines des rues adjacentes, mais aussi en contrebas.

En effet, malgré les efforts mis en œuvre pour la réalisation de murages et de barrages visant à confiner le mortier, il n'était pas exclu que celui-ci emprunte d'éventuelles fractures présentes dans la masse de calcaire et cause des dégâts aux avoisinants.

### RENDU ET CONTRÔLES

À la fin des opérations de comblement et de clavage, les protections des salles de classes ont été retirées afin de procéder à la remise en état de l'école. Pour les pièces fréquentées par les enfants, et conformément au souhait de la maîtrise d'ouvrage, Soletanche Bachy France a fait appel à une entreprise de nettoyage spécialisée.

Conformément aux préconisations de l'Inspection Générale des Carrières, une



**11 - Injection de mortier prêt à l'emploi.**

**11 - Injection of ready-to-use mortar.**

campagne de sondages de contrôle a été réalisée lors des vacances de la Toussaint 2015 et a permis de valider la qualité des travaux d'injection réalisés. L'école a pu rouvrir comme prévu en septembre 2015 pour accueillir sans encombre ses 400 élèves de maternelle et de primaire pour la nouvelle année scolaire. □

### LES CHIFFRES

**154** forages pour un linéaire total de 2053 m forés

**869** m<sup>3</sup> de mortier de comblement prêt à l'emploi

**34** m<sup>3</sup> de mortier de clavage prêt à l'emploi

### LES INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Ogec Saint-Joseph

**ASSISTANT MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Mgb Cpc

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Fugro Geoconsulting

**ENTREPRISE :** Soletanche Bachy France

### ABSTRACT

#### FILLING TROGLODYTIC CAVITIES UNDER SAINT-JOSEPH SCHOOL IN CONFLANS-SAINTE-HONORINE

NICOLE BENZ-COLLANGE, SOLETANCHE BACHY

**Saint-Joseph school**, located on the heights of Conflans-Sainte-Honorine, is undermined by two levels of troglodyte cavities, dug out of the rough limestone as early as the Middle Ages. While some of them are well preserved and still used today, others are in poor condition and must be filled to ensure the school's safety. So Soletanche Bachy France worked in a six-week time slot during the summer shutdown in 2015 to carry out, from inside the classrooms, a campaign for drilling and filling all the detected cavities with ready-to-use mortar. An essential project requirement was that the works be completed before the post-holiday resumption. Access management proved to be the main constraint of the project. □

#### RELLENO DE CAVIDADES TROGLODÍTICAS DEBAJO DE LA ESCUELA SAINT-JOSEPH, EN CONFLANS-SAINTE-HONORINE

NICOLE BENZ-COLLANGE, SOLETANCHE BACHY

**Debajo de la escuela Saint-Joseph**, situada en la zona alta de Conflans-Sainte-Honorine, discurren dos niveles de cavidades troglodíticas perforadas en la propia caliza gruesa durante la Edad Media. Aunque algunas están bien conservadas y todavía se actualizan hoy en día, otras están en mal estado y deben ser rellenadas para garantizar la seguridad de la Escuela. Así, Soletanche Bachy France intervino durante un período de 6 semanas durante el cierre estival de 2015 para realizar, desde el interior de las aulas, una campaña de perforación y relleno con mortero de obra del conjunto de cavidades halladas. El plazo era un factor clave de las obras a causa del inicio del nuevo curso escolar. La gestión de los accesos resultó ser la principal dificultad de la obra. □

- when it has to be right

**Leica**  
Geosystems

# VITESSE ET PRECISION !

NOS SOLUTIONS VONT ACCROÎTRE VOTRE PERFORMANCE ET OPTIMISER VOTRE TRAVAIL SUR LES CHANTIERS :  
**LE SYSTEME DE GUIDAGE ICON EST FAIT POUR VOUS**



**scanlaser**  
MACHINE CONTROL



**SCANLASER**

60 ROUTE DE SARTROUVILLE - BÂTIMENT N°2 - 78230 LE PECQ  
TÉL. 0130156150 - [MARKETING@SCANLASER.FR](mailto:MARKETING@SCANLASER.FR)



1

© MÉNARD

# CHARGEMENT CYCLIQUE DES MASSIFS RENFORCÉS PAR INCLUSIONS RIGIDES

AUTEURS : ORIANNE JENCK, MAÎTRE DE CONFÉRENCES, LABORATOIRE 3SR, UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES, CNRS - STÉPHANE BRÛLÉ, DIRECTEUR RÉGIONAL, MÉNARD - FABRICE EMERIAULT, PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, LABORATOIRE 3SR, UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES, CNRS - PHILIPPE GOTTELAND, DIRECTION TECHNIQUE RECHERCHE, FNTP

**ÉTUDE EXPLORATOIRE DU RÔLE DE LA PLATEFORME DE TRANSFERT DE CHARGE (PTC) ÉRIGÉE SUR UN MASSIF DE SOL COMPRESSIBLE RENFORCÉ PAR INCLUSIONS RIGIDES VERTICALES, POUR UN CHARGEMENT CYCLIQUE LENT VERTICAL APPLIQUÉ EN SURFACE EST ÉTUDIÉ. DEUX MODÉLISATIONS SONT RÉALISÉES : PHYSIQUE À L'ÉCHELLE DU LABORATOIRE ET NUMÉRIQUE. CONTRIBUANT À UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES SE DÉVELOPPANT DANS LA PTC, ELLE MET EN PERSPECTIVE UN NOUVEAU DOMAINE D'INVESTIGATION ET D'APPLICATION POUR CETTE TECHNIQUE D'AMÉLIORATION DE SOLS.**

## INTRODUCTION

Les techniques de renforcement des sols par inclusions rigides ont connu une évolution majeure en 2012 avec le souhait de la profession de rassembler et de publier un état des connaissances ainsi que des règles professionnelles à la faveur de deux guides principaux : le Guide ASIRI pour les inclusions rigides et le Guide AFPS-CFMS traitant notamment le cas des inclusions rigides en zones sismiques. Cependant, la réalité des dallages industriels reposant sur une plateforme de transfert s'appuyant

sur un réseau d'inclusions rigides, correspond d'avantage à des cas de chargements cycliques et/ou dynamiques pouvant conduire à un réarrangement des éléments granulaires constitutifs de la plateforme avec, pour conséquence suspectée, une évolution au cours du temps de la répartition des efforts dans le complexe dallage (ou radier), plateforme, sol et inclusions. On présente ici le résultat d'une étude exploratoire menée sur un modèle réduit 3D échelle 1/10 sous pesanteur naturelle (1g) pour une charge répartie,

monotone ou cyclique. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un travail de thèse (Houda, 2016) ayant reçu le support du Comité sols de la Commission Technique Innovation de la FNTP.

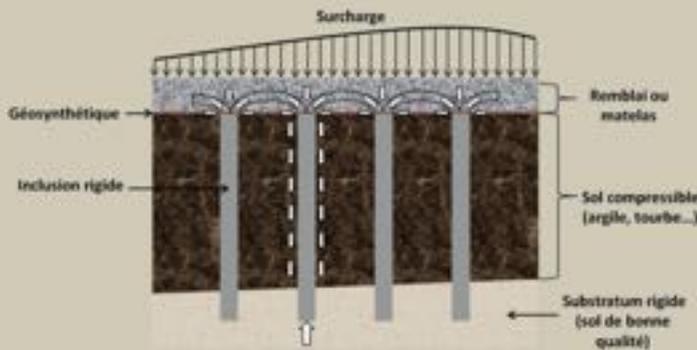
## PRINCIPE DU RENFORCEMENT DES SOLS PAR INCLUSIONS RIGIDES ET CADRE DE L'ÉTUDE

La technique de renforcement des sols par inclusions rigides consiste à mettre en place un réseau d'inclusions verticales dans des sols compressibles afin de transférer les charges appliquées en

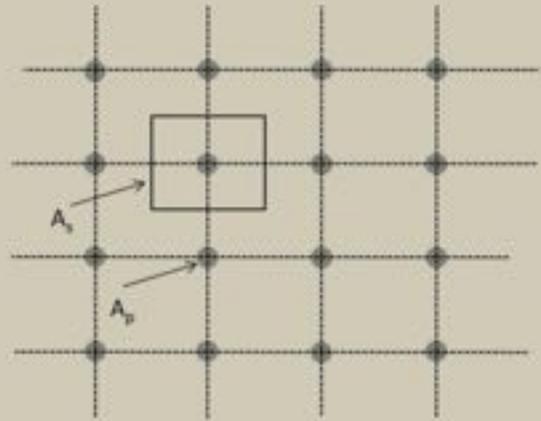
surface vers un horizon plus résistant par la mobilisation d'un effort de pointe et d'un frottement négatif le long de la partie supérieure du fût des inclusions rigides. La différence majeure de cette technique avec celle des fondations profondes de type « pieux », réside notamment dans l'absence de lien mécanique avec la superstructure. Soit les semelles reposent directement, mais de façon disjointe mécaniquement, sur les inclusions (il est question alors de fondation mixte), soit un matelas intercalaire se situe entre la

## PRINCIPE DU RENFORCEMENT DE SOL PAR INCLUSIONS RIGIDES

dans le cas de charges surfaciques pour un dallage ou un radier



## MATELAS GRANULAIRE $D_{max}$ 200 mm sur chantier d'inclusions rigides en béton de type CMC



1- Matelas granulaire sur chantier d'inclusions rigides en béton (Terminal Morero, Louisiane USA).

2- Principe du renforcement de sol par inclusions rigides dans le cas de charges surfaciques pour un dallage ou un radier (Houda, 2016).

3- Maillage régulier carré d'inclusions rigides, avec  $A_p$  la section de l'inclusion et  $A_s$  son aire d'influence.

4- Maillage carré sous remblai (Raceland, USA).

1- Granular mattress on concrete rigid inclusions site (Morero Terminal, Louisiana, USA).

2- Method of soil reinforcement with rigid inclusions in the case of surface loads for slabbing or a foundation raft (Houda, 2016).

3- Regular square meshing of rigid inclusions, where  $A_p$  is the cross section of the inclusion and  $A_s$  its area of influence.

4- Square meshing under backfill (Raceland, USA).

sous-face de la semelle et les têtes des inclusions.

Dans ce dernier cas, le dispositif répond au référentiel ASIRI issu du Projet National du même nom porté par l'IREX. Dans le cas des charges réparties, ou considérées comme telles, s'appliquant sur des surfaces de dallage et de radier, les inclusions sont recouvertes par une couche de remblai ou matelas appelée plateforme de transfert de charge (PTC) (figure 2). Cette couche est majoritairement constituée de gravaux mais peut aussi être réalisée avec des sols plus fins traités aux liants hydrauliques (chaux ou chaux-ciment). Elle transfère partiellement par effet de voûte, phénomène décrit par Terzaghi en 1943, les charges aux têtes d'inclusion, permettant ainsi la réduction et l'homogénéisation des tassements à la surface. Le développement de voûtes dans la PTC suppose que cette dernière ait une épaisseur et une résistance au cisaillement suffisantes. Une ou plusieurs nappes de renforcement horizontal à base de géosyn-

thétiques peuvent éventuellement être intercalées dans le matelas, contribuant au report de charges vers la tête des inclusions rigides par effet membrane. Les travaux de recherche présentés ne concernent que les cas de plateforme granulaire reposant sur un maillage régulier d'inclusions, avec un chargement en surface monotone et cyclique (figures 1 et 2). Deux types d'ouvrage doivent être distingués : les ouvrages de type dallage ou radier (en 1<sup>re</sup> approximation tassement uniforme de la dalle sur la PTC) et les remblais (pression sensiblement uniforme appliquée sur la PTC).

### DÉFINITION DES PARAMÈTRES DE DESCRIPTION DES MÉCANISMES

Les inclusions peuvent être préfabriquées (inclusions métalliques, inclusions bois, inclusions en béton armé ou précontraint, etc.) ou construites in situ : inclusions forées, inclusions en béton armé battues, colonnes à module contrôlé ou CMC, jet grouting,

soil-mixing, etc. Les inclusions sont le plus généralement ancrées dans un sol plus résistant rencontré en profondeur. Le taux de recouvrement  $\alpha$  est défini comme le rapport entre la surface occupée par l'inclusion  $A_p$  sur la surface totale de son aire d'influence  $A_s$ <sup>(1)</sup> (figures 3 et 4).

$$\alpha = \frac{A_p}{A_s} \quad (1)$$

Le terme d'efficacité  $E$ <sup>(2)</sup> est défini comme le rapport entre la force  $Q_p$  transférée vers la tête de l'inclusion rigide, et la force totale  $Q+W$  appliquée sur sa zone d'influence (figure 5).

$$E = \frac{Q_p}{Q + W} \quad (2)$$

Paramètre influent important en renforcement de sol, le choix du taux de recouvrement influence, d'une part l'efficacité de cette technique, et d'autre part le temps et le coût de construction de l'ouvrage. Sa valeur courante sur les chantiers est souvent inférieure à 5%.

### PROBLÉMATIQUES SPÉCIFIQUES AU CHARGEMENT CYCLIQUE

Les matériaux granulaires montrent, sous chargement cyclique répété, des relations contraintes-déformations complexes caractérisées par des non-linéarités et des irréversibilités. La structure granulaire des sols entraîne, à chaque cycle, des déplacements entre les grains partiellement réversibles lors du déchargement. Des réarrangements granulaires ont donc lieu à chaque cycle. Les paramètres qui entrent en compte dans ces déformations plastiques dépendent du chargement cyclique ainsi que des propriétés mécaniques et minéralogiques des sols (Houda, 2016).

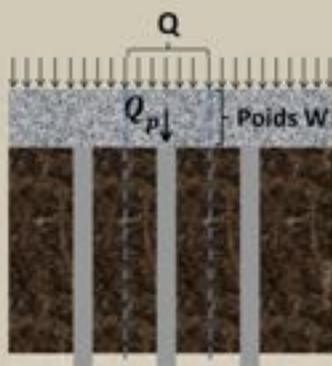


© MÉNARD

4

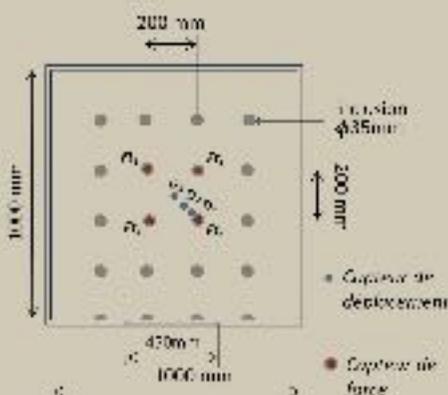
### CALCUL DE L'EFFICACITÉ $E$

$W$ , le poids de la plateforme de transfert,  $Q_p$ , la force transférée en tête d'inclusion et  $Q$ , la charge répartie en surface



5

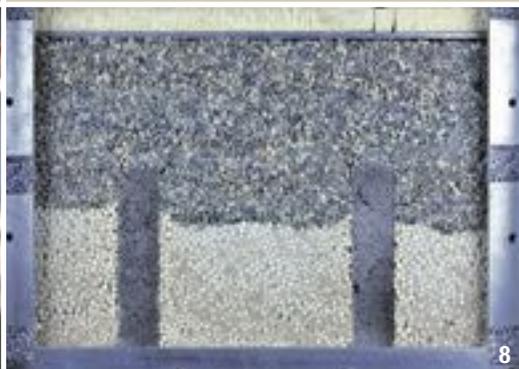
### VUE EN PLAN SCHEMATIQUE DU MODÈLE RÉDUIT



7



6



8

FIGURE 5 © DR - FIGURES 6 A 8 © LABORATOIRE SSR

5- Calcul de l'efficacité  $E$ ;  $W$ , le poids de la plateforme de transfert,  $Q_p$ , la force transférée en tête d'inclusion et  $Q$ , la charge répartie en surface.

6- Modèle réduit équipé des inclusions rigides, avant remplissage par le sol compressible.

7- Vue en plan schématique du modèle réduit.

8- Fenêtre latérale de visualisation avec les différents éléments qui constituent le modèle : inclusions rigides, sol compressible, plateforme granulaire (gravillon 2 - 6 mm) et dalle rigide.

9- Modèle Numérique : Déplacement vertical en maillage déformé pour une pression en surface de 30 kPa. En rouge l'inclusion rigide qui ne subit pas de déplacement.

La technique de renforcement des sols compressibles avec inclusions rigides verticales sollicite le matelas granulaire de la PTC par des mécanismes de cisaillement du milieu granulaire (AFPS - CFMS, 2012). Ces phénomènes ont été bien étudiés dans le cas de chargement monotone des ouvrages.

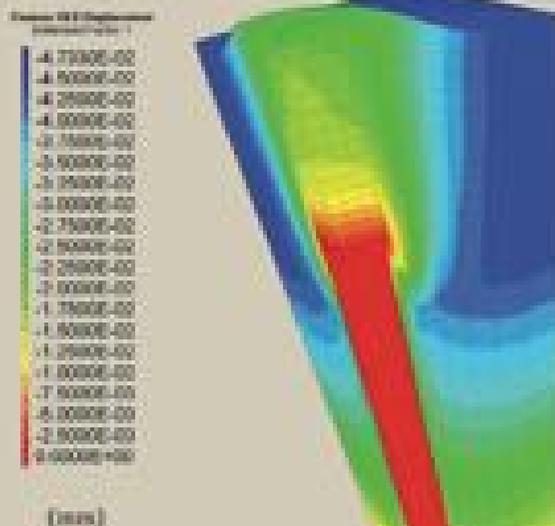
Lors de chargements cycliques, l'identification et la compréhension des mécanismes opérant au sein du matériau granulaire de la PTC demeurent à explorer, en particulier dans les cas de PTC de faible épaisseur avec ou sans dallage ou radier. C'est l'objet de l'étude.

### ÉTAT DES CONNAISSANCES - RETOUR D'EXPÉRIENCE

De l'étude bibliographique des essais réalisés sur modèles réduits et sur chantiers instrumentés (Houda, 2016), il ressort que sous chargement cyclique, les références sont plus abondantes pour le cas de charges variables avec un très grand nombre de cycles de type charge de trafic que pour le cas du chargement cyclique de type réservoir de stockage (fréquence basse, amplitude forte).

### MODÈLE NUMÉRIQUE

Déplacement vertical en maillage déformé pour une pression en surface de 30 kPa. En rouge l'inclusion rigide qui ne subit pas de déplacement



9

© LABORATOIRE SSR

5- Calculation of efficiency  $E$ ;  $W$  is the weight of the load transfer platform,  $Q_p$  the force transferred to the inclusion head and  $Q$  the distributed load on the surface.

6- Scale model provided with rigid inclusions, before filling with compressible soil.

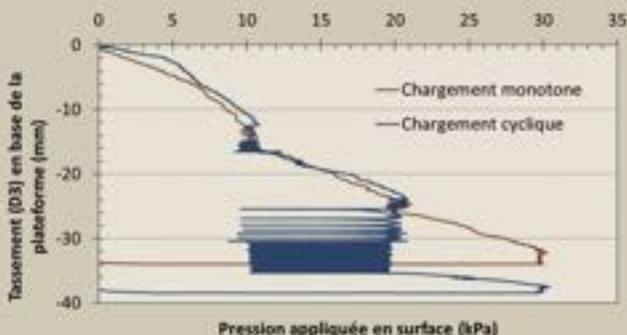
7- Schematic plan view of the scale model.

8- Side viewing window with the various elements forming the model: rigid inclusions, compressible soil, granular platform (2-6 mm fine gravel) and rigid slab.

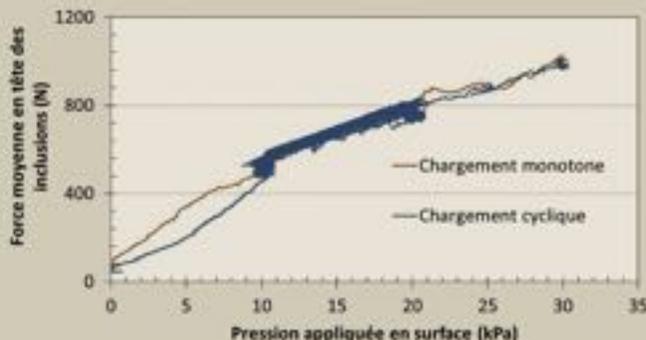
9- Computer model: Vertical displacement in deformed meshing for a surface pressure of 30 kPa. In red, the rigid inclusion which undergoes no displacement.

## TASSEMENT ET FORCE MOYENNE

en fonction du chargement externe par la membrane en surface (Essai réalisé avec une dalle rigide en surface de la PTC)



10a



10b

**10a & 10b-**  
Tassement et force moyenne en fonction du chargement externe par la membrane en surface (Essai réalisé avec une dalle rigide en surface de la PTC).

**10a & 10b-**  
Subsidence and average force depending on external loading by the surface membrane (test performed with a rigid slab on the surface of the load transfer platform).

Ces études montrent que le chargement cyclique vertical se traduit par une diminution de l'efficacité  $E$  et une accumulation de tassements sans parvenir toutefois à une stabilisation pour les cas avec et sans dallage ou radier. Ces deux effets sont encore plus marqués pour de faibles épaisseurs de PTC (notamment pour des rapports entre épaisseur de PTC et espacement entre inclusions inférieurs à 0,5). Quant aux modèles numériques simulant le comportement de massifs renforcés par inclusions rigides en milieu continu (méthodes aux éléments finis, différences finies) et en milieux discrets (méthodes par éléments discrets), les études réalisées s'intéressent plus particulièrement au cas de chargements répétés de type trafic routier ou ferroviaire, donc d'amplitude relativement faible, et cela pour un nombre très important de cycles.

## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX OBTENUS SUR LE MODÈLE RÉDUIT

Les résultats expérimentaux sont obtenus sur modèle réduit et concernent le cas d'une plateforme de 100 mm d'épaisseur sous dallage, soumise à un chargement cyclique vertical en surface de pression  $q$  entre 10 et 20 kPa. Sur une maille élémentaire de section 200 mm x 200 mm (zone d'influence d'une inclusion), le poids de la plateforme et de la dalle est  $W = 62$  N et la charge répartie en surface est  $Q = q \times 0,04$  ( $q$  en Pa et  $Q$  en N). Sous poids propre de la plateforme et de la dalle, avant application de la charge externe en surface, l'efficacité du système est de 35%. Pour un premier chargement vertical uniforme en surface de 20 kPa, l'efficacité atteint 82%.

### INFLUENCE DU CHARGEMENT CYCLIQUE

La figure 10 montre l'accumulation des tassements au centre du modèle en base de la PTC au cours des cycles, suivie d'une rigidification lors du chargement post-cycles jusqu'à 30 kPa (incrément de tassement sous l'incrément de pression en surface de 20 à 30 kPa plus faible que pour le cas du chargement monotone). Elle met également en évidence que la force moyenne en tête des inclusions et donc que l'efficacité du système n'est pas modifiée par l'application des cycles. De plus, lors du chargement post-cycles jusqu'à 30 kPa, les efforts en tête des inclusions sont identiques à ceux mesurés pour un chargement monotone. Ceci montre que le fonctionnement du système n'a pas été altéré par l'application du chargement cyclique.

### INFLUENCE DU DALLAGE

La figure 11 compare les résultats sous chargement cyclique avec et sans dallage (plaque) en surface. Sans dallage, le tassement sous une pression en surface de 20 kPa avant application des cycles est plus important qu'avec une dalle, mais l'accumulation des tassements au cours des cycles est ensuite plus faible. L'efficacité du système pour un premier chargement jusqu'à 20 kPa est de 44% (contre 82% avec une dalle) et elle diminue très légèrement au cours des 50 cycles. Ainsi, le comportement global du système est très fortement conditionné par la condition limite en surface (avec ou sans dallage), notamment car l'épaisseur de la plateforme est (trop) faible (100 mm) par rapport à l'espacement entre les inclusions (200 mm).

Ces études illustrent, comme pour les essais sur modèle réduit ou en vraie grandeur, une diminution de l'efficacité  $E$  accompagnée d'une concentration des tassements, sans parvenir à une stabilisation durant le chargement cyclique.

### OUTILS SPÉCIFIQUES DÉVELOPPÉS POUR NOTRE ÉTUDE

Le cas de référence étudié est un massif de sol compressible de 4 m d'épaisseur, renforcé par un réseau d'inclusions de 350 mm de diamètre

disposées suivant un maillage carré avec un espacement entre inclusions de 2 m. Le taux de recouvrement est alors de 2,4%.

La PTC a une épaisseur de 0,5 ou 1 m, sous dallage.

Afin d'étudier finement les mécanismes qui se développent dans la PTC sous chargement cyclique, un modèle réduit tridimensionnel instrumenté a été développé au laboratoire 3SR de Grenoble (Houda 2016) avec un facteur de réduction sur les longueurs de 1/10 (figures 6 et 7). Une fenêtre de visualisation latérale (figure 8) permet par méthode de corrélation d'images, d'obtenir le champ de déplacement dans le massif (voir encadré "Résultats expérimentaux obtenus sur le modèle réduit"). Le sol compressible a été simulé par un sol analogique, constitué d'un mélange de sable et de billes de polystyrène expansé, ceci afin d'assurer une bonne homogénéité, une bonne répétabilité des essais et d'avoir une ouvrabilité facilitée. La compressibilité de ce matériau est similaire à celle d'un sol compressible réel ; en revanche on ne modélise pas le phénomène de consolidation.

Sont étudiés particulièrement les effets de cycles lents, quasi-statiques, de chargement vertical en surface entre 10 et 20 kPa (ce qui correspondrait à 100 - 200 kPa dans un ouvrage à dimensions réelles).

### RÉSULTATS OBTENUS SUR MODÈLE RÉDUIT

Dix configurations différentes et plus de vingt essais réalisés ont permis de faire varier :

- La hauteur de la PTC ;
- La présence ou non d'une dalle en surface ;
- Le chargement en surface.

Les résultats expérimentaux ont tous montré une accumulation des tassements en base de la PTC au cours des cycles, mais le maintien de l'efficacité du système, qu'il y ait ou non une dalle en surface. L'influence de la dalle en surface a été mise en évidence : tassements globalement plus faibles, mais plus d'accumulation au cours des cycles (efficacité plus importante).

L'application de la DIC (*Digital Image Correlation*) a permis d'analyser de manière plus approfondie l'évolution des mécanismes au cours des cycles et l'influence de paramètres tels que la présence de la dalle et l'épaisseur de la PTC (voir encadré "Analyse du champ de déplacement par DIC").

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE**

Une modélisation numérique en retour des essais expérimentaux à échelle réduite a été réalisée.

L'objectif est de mettre au point une méthodologie de modélisation numérique en milieu continu, sous chargement cyclique, validée à partir de résultats physiques qui aura pour vocation d'être étendue à une configuration à échelle réelle.

Le logiciel de résolution de problèmes en contraintes-déformations en milieu continu Flac3D a été utilisé. Les conditions de symétrie permettent de ne modéliser qu'un quart d'inclusion et sa zone d'influence (figure 9).

Des modèles de comportement adaptés aux matériaux ont été mis en œuvre,

**ANALYSE DU CHAMP DE DÉPLACEMENT PAR DIC**

L'application d'une méthode DIC (*Digital Image Correlation*) sur les photographies prises à travers la fenêtre latérale de visualisation permet d'accéder au champ de déplacement dans le modèle, dans le plan de la fenêtre (figure 8). Cette analyse permet l'étude qualitative (partiellement quantitative) de l'évolution des mécanismes dans la PTC au cours des chargements, notamment cycliques.

Après un premier chargement 0-20 kPa, la figure 12 montre le champ de déplacement vertical après 1 cycle et après 6 cycles de déchargement/chargement (20-10-20 kPa). Les deux images correspondent au même niveau de chargement en surface (20 kPa). On voit clairement l'accumulation de tassement dans le modèle, tout en conservant une zone de tassement quasiment nulle au-dessus des inclusions.

Référence : Houda M., Jenck O., Emeriault F. (2014) *Physical evidence of the effect of vertical cyclic loading on soil improvement by rigid piles: a small-scale laboratory experiment using Digital Image Correlation. Acta Geotechnica, DOI 10.1007/s11440-014-0350-z.*

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE**

On constate (figure 13) que le modèle numérique en milieu continu permet de prendre en compte l'accumulation des tassements en base de la PTC, celle-ci étant plus importante lors des premiers cycles. En revanche, la rigidification du massif observée par un chargement post-cycle jusqu'à 30 kPa n'est pas représentée par le modèle numérique, car le modèle de comportement mis en œuvre pour la PTC ne le permet pas.

Sous premier chargement monotone jusqu'à une pression de 20 kPa en surface, il y a une bonne concordance en termes de force sur les têtes d'inclusions, avec une efficacité alors égale à 78% dans le modèle numérique (82% dans le modèle physique). Le modèle numérique proposé conduit ensuite à une force sur la tête des inclusions qui diminue légèrement au cours des cycles, ce qui aboutit à une efficacité de 60% à la fin des cycles.

dont les paramètres ont été calibrés à partir d'essais de caractérisation en laboratoire (Cam Clay pour le sol compressible, le modèle élastoplastique CY-Soil pour la PTC).

Ce travail préliminaire de modélisation numérique (voir encadré "Modélisation numérique"), donne des résultats encourageants avec la confrontation des résultats expérimentaux en termes de prise en compte de l'évolution des tassements, de force et de report de charge sur les inclusions. Une étude plus approfondie avec la mise en œuvre de modèles de comportement plus complexes dédiés à la prise en compte des phénomènes cycliques pourront être effectuées.

**CONCLUSIONS**

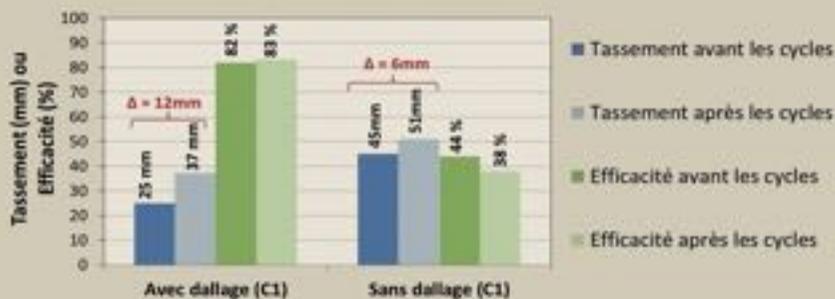
Le dispositif expérimental conçu spécifiquement pour observer les phénomènes se développant au sein de la PTC met volontairement en retrait la déformabilité de la plaque transmettant la charge en surface, le raccourcissement des inclusions et le déplacement de ces dernières dans la couche d'ancrage en pied.

Les études ont été menées sous chargement monotone et cyclique, dans le cas d'une charge répartie sur une plaque « rigide » sur PTC (cas du dallage ou radier) ou directement sur la PTC (cas du remblai).

Cas dallage : l'efficacité *E* peut dépasser 80% sous chargement vertical uniforme et cette efficacité n'est pas

**CHARGEMENT CYCLIQUE**

Influence de la présence de la dalle rigide en surface



11

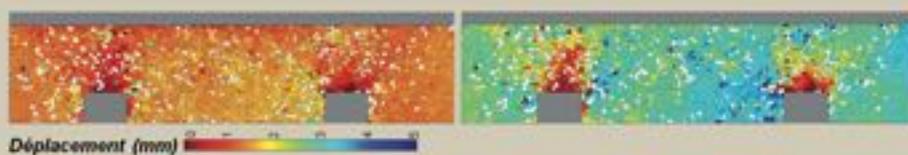
© LABORATOIRE CSR

11- Chargement cyclique : influence de la présence de la dalle rigide en surface.

12- Champ de déplacement vertical après 1 cycle (gauche) et après 6 cycles de déchargement-rechargement (droite) (20-10-20 kPa).

**CHAMP DE DÉPLACEMENT VERTICAL**

après 1 cycle (gauche) et après 6 cycles de déchargement-rechargement (droite) (20-10-20 kPa)

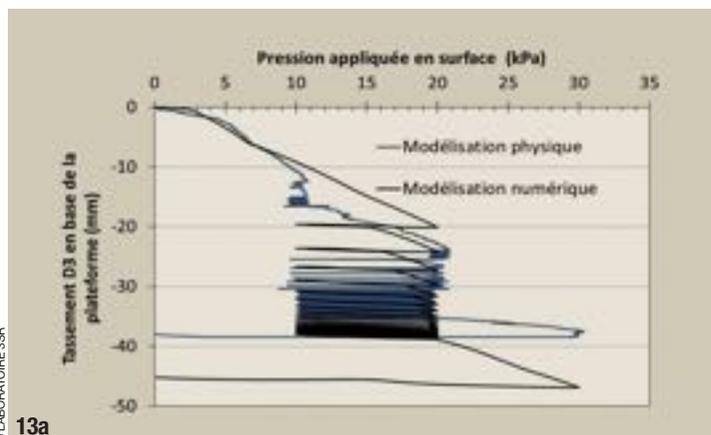


12

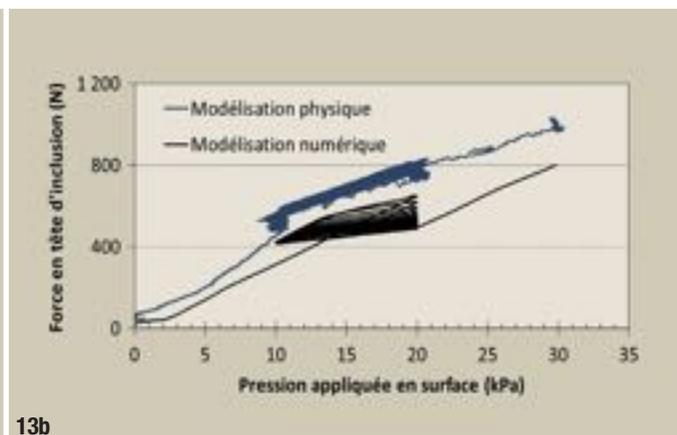
© LABORATOIRE CSR

11- Cyclic loading: influence of the presence of the rigid slab on the surface.

12- Field of vertical displacement after 1 cycle (left-hand) and after 6 unloading-reloading cycles (right-hand) (20-10-20 kPa).



13a



13b

modifiée par l'application des cycles. L'efficacité sous chargement monotone est confirmée par la modélisation numérique mais, en revanche, les résultats numériques obtenus montrent qu'elle tend à diminuer sous chargement cyclique.

Cas remblai : l'efficacité est plus faible (environ 40%), et le tassement avant application des cycles est plus important qu'avec une dalle, mais l'accumulation des tassements au cours des cycles est ensuite plus faible.

Il faut toutefois préciser que dans le cas expérimental présenté, l'épaisseur de la plateforme est relativement faible par rapport à l'entraxe des inclusions. La formation des mécanismes de voûte nécessite une épaisseur de PTC suffisante (ASIRI).

L'étude a mis en évidence une diminution progressive des tassements au cours des cycles, sans toutefois identifier un seuil de stabilisation. Elle contribue à une meilleure compréhension des mécanismes se développant au sein d'une PTC reposant sur un réseau d'inclusions rigides sous sollicitation cyclique. □

**13a & 13b- Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour le cas de la plateforme de 100 mm sous dallage et application d'un chargement cyclique entre 10 et 20 kPa en surface.**

**13a & 13b- Comparison of the numeric and experimental results for the case of the 100 mm platform under slabbing and surface application of between 10 and 20 kPa cyclic loading.**

## TRAVAUX DE RECHERCHE SUPPORTS

Les résultats expérimentaux et numériques présentés sont issus de la thèse de Moustafa Houda, soutenue le 22 janvier 2016, préparée au laboratoire Sols, Solides, Structures, Risques (3SR) de Grenoble et co-encadrée par Fabrice Emeriault et Oriane Jenck et l'appui d'un comité de suivi de thèse impliquant le monde professionnel. Elle a été cofinancée par une allocation de recherche du Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MENESR) et par le Comité Sols de la Commission Technique Innovation de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTF).



ASIRI National Project (2013). Recommendations for the Design Construction and Control of Rigid Inclusion Ground Improvements, Presses des Ponts, Paris.

AFPS-CFMS (2012). Procédés d'amélioration et de renforcement des sols sous actions sismiques - Guide technique, Presses des Ponts, Paris.

Houda M. (2016). Comportement sous chargement cyclique des massifs de sol renforcés par inclusions rigides : expérimentation en laboratoire et modélisation numérique. Thèse de l'Université de Grenoble Alpes.

### ABSTRACT

#### CYCLIC LOADING OF FOUNDATIONS STRENGTHENED BY RIGID INCLUSIONS

O. JENCK, UGA - S. BRÛLÉ, MÉNARD - F. EMERIAULT, UGA - P. GOTTELAND, FNTF

**Industrial slabbing and foundation rafts** resting on a load transfer platform supported by a network of vertical rigid inclusions are subjected to cyclic loading forces such as tank emptying and filling phases, the passage of rolling loads, vibrating machinery, or else inertial effects under seismic loading. Based on research work carried out on a scale model, this article presents the main results obtained regarding the mechanisms of granular rearrangement in the load transfer platform and changes in the stress distribution in the soil/inclusion/platform unit during cyclic loading. □

#### CARGA CÍCLICA DE LOS MACIZOS REFORZADOS POR INCLUSIONES RÍGIDAS

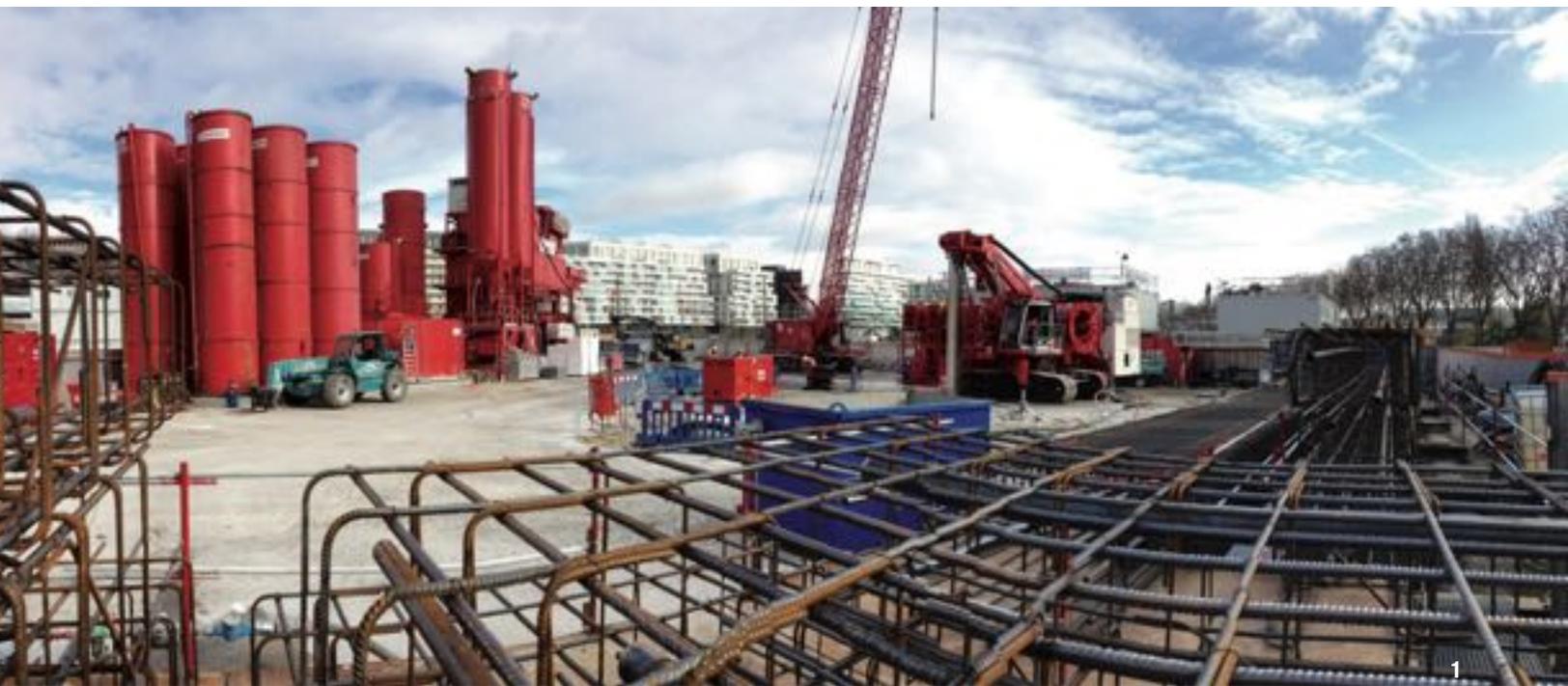
O. JENCK, UGA - S. BRÛLÉ, MÉNARD - F. EMERIAULT, UGA - P. GOTTELAND, FNTF

**Los enlosados o soleras industriales** sustentados sobre una plataforma de transferencia y apoyados sobre una red de inclusiones rígidas verticales están sometidos a cargas cíclicas, como las fases de vaciado y llenado de depósitos, el paso de cargas rodantes, las máquinas vibratorias o los efectos inerciales debidos a cargas sísmicas. Basándose en un trabajo de investigación sobre un modelo activo, este artículo presenta los principales resultados obtenidos sobre los mecanismos de reordenación granular dentro de la plataforma de transferencia y sobre la evolución de las distribuciones de esfuerzos en el complejo suelo/inclusión/plataforma durante las sollicitaciones cíclicas. □

# GRAND PARIS EXPRESS LIGNE 15 SUD. PUITS DE RECONNAISSANCE À BOULOGNE BILLANCOURT

AUTEURS : ROBERT PORET, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY - JEAN GEISTODT-KIENER, CHEF DE PROJET, GC INGEROP CONSEIL ET INGÉNIERIE - MARTIN CAHN, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, GEOS INGÉNIEURS CONSEIL

LA PARTIE OUEST DU TRONÇON T3 DE LA FUTURE LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS S'INSCRIT EN PARTIE DANS LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA VALLÉE DE SEINE : DEUX GARES, QUATRE OUVRAGES ANNEXES ET 3900 M DE TUNNEL Y SERONT CREUSÉS PRINCIPALEMENT DANS LA CRAIE CAMPANIENNE DANS UNE ZONE COMPRISE ENTRE LES COMMUNES DE SAINT CLOUD ET CLAMART. DE FAÇON À RÉDUIRE LES INCERTITUDES GÉOTECHNIQUES LIÉES À LA RÉALISATION DE CES OUVRAGES, UN MARCHÉ DE RECONNAISSANCE A ÉTÉ CONFÉ À UN GROUPEMENT D'ENTREPRISES SADE / SOLETANCHE BACHY / SOLETANCHE BACHY TUNNELS. CELUI-CI CONSISTE EN LA RÉALISATION D'UN Puits EN PAROIS MOULÉES, DE TESTS D'AMÉLIORATION DE SOL PAR JET GROUTING, D'UNE GALERIE CREUSÉE SOUS INJECTION ET DE DIFFÉRENTES RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES.



© INGEROP/GEOS

## OBJECTIFS DES RECONNAISSANCES

Afin de tester le comportement des terrains en vraie grandeur pour fiabiliser et valider les principes constructifs du tronçon 3 Ouest de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express, un puits, un rameau et des reconnaissances géotechniques diverses sont réalisés au

niveau de l'emplacement d'un futur ouvrage annexe dans la ZAC Val de Seine sur la commune de Boulogne-Billancourt, à proximité de la RD1. Les informations attendues à l'issue de l'exécution de ce marché de reconnaissance sont multiples. Il s'agit tout d'abord de conforter les hypothèses de performance des parois

moulées dans la Craie Campanienne. Les deux méthodes de réalisation - benne hydraulique et Hydrofraise - sont testées et comparées :

- Cadence de réalisation et précision de la verticalité ;
- Résistance mécanique et déformation ;
- Étanchéité.

**1- Vue générale  
du chantier.**

**1- General view  
of the site.**



2- Implantation de l'ouvrage.  
3- Contexte géologique.

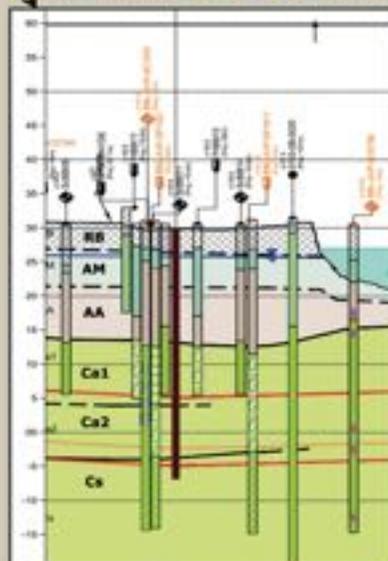
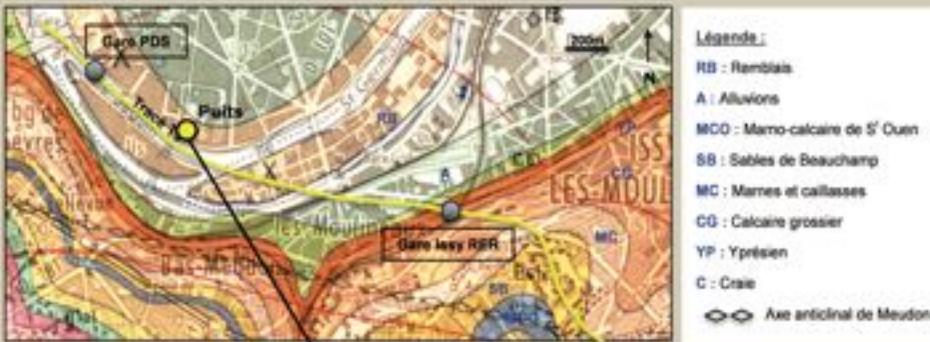
2- Works location.  
3- Geological context.

L'amélioration de sol par jet grouting dans la craie est également investiguée. Les différentes méthodes de réalisation sont comparées pour obtenir des informations sur :

- Le diamètre des colonnes ;
- La comparaison de la mesure physique du diamètre avec des mesures géophysiques non destructives ;
- Leur résistance et leur déformation. Il s'agit ensuite de tester la réalisation d'un rameau en méthode traditionnelle de dimension réduite. Celui-ci, creusé dans des conditions géotechniques similaires à celles rencontrées par les futurs rameaux de jonction qui relieront le tunnel aux ouvrages de ventilation et de désenfumage, permet :
- De vérifier le besoin de confortement pour l'ouverture dans la paroi ;
- De tester l'efficacité de l'étanchement et du confortement du terrain par injection ;
- De vérifier les efforts dans le soutènement ;
- De mesurer les déformations en surface.

Il s'agit, finalement, de préciser le modèle géotechnique.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE



CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET INCERTITUDES

Le puits et la galerie de reconnaissance sont implantés en rive droite de la Seine dans la boucle de Boulogne-Billancourt, à proximité du quai Georges Gorse. Le contexte géologique local est marqué par l'affleurement de la Craie Campanienne sous faible couverture alluvionnaire. Cette particularité stratigraphique est liée à l'érosion en vallée de Seine de l'anticlinal de Meudon dont l'axe est proche de celui de la ligne 15. La problématique géotechnique majeure des ouvrages souterrains implantés dans ce contexte est la caractérisation de la Craie Campanienne et de ses différents faciès d'altérations.

La craie a un comportement géomécanique complexe, en raison de la porosité inter et intra-granulaire, qui se traduit par une thixotropie en présence d'eau.



Sur la base des sondages pressiométriques réalisés lors des campagnes G11, G12 et G2, trois faciès d'altérations ont pu être distingués.

→ **Ca1** : craie très altérée, pâteuse, marneuse, très fragmentée voire désagrégée ;

→ **Ca2** : craie moins molle que Ca1, très fracturée ;

→ **Cs** : craie saine compacte avec peu de fractures.

La craie est un terrain difficile à échantillonner et il s'est révélé quasiment impossible d'identifier les trois faciès visuellement à l'échelle des carottes.

Par ailleurs, l'existence de niveaux à silex n'a pu être confirmée ou infirmée dans les sondages, bien qu'avérée dans les retours d'expérience des

travaux réalisés à proximité (figures 2 et 3).

Le projet est implanté à proximité immédiate de la Seine. Deux nappes sont rencontrées au droit du puits : la nappe des alluvions et la nappe de la craie.

Les relevés piézométriques indiquent que les deux nappes sont en communication, vraisemblablement via le réseau de fractures existant dans la craie. Malgré la réalisation préalable d'essais de pompage sur les gares de Pont-de-Sèvres et Issy-RER, la détermination de valeurs de perméabilité des trois faciès de craie reste délicate. De même, le contexte des travaux sous forte charge hydraulique nécessite une connaissance du comportement de la craie vis-à-vis du risque d'érosion interne.

**4- Hydrofraise HC05.**

**5- Vue aérienne du chantier de parois moulées.**

**6- Excavation des colonnes dans le puits.**

**7- Réalisation des colonnes de jet grouting.**

**4- HC05 Hydrofraise.**

**5- Aerial view of the diaphragm wall project.**

**6- Excavation of columns in the shaft.**

**7- Execution of jet grouting columns.**

## TRAVAUX ET RECONNAISSANCES

### DESCRIPTION DES TRAVAUX

Le puits de reconnaissance circulaire comporte un diamètre de 9,4 m utile. Il sera creusé jusqu'à la craie saine. Le dimensionnement de l'ouvrage tient compte de la configuration définitive de l'ouvrage annexe.

Le fond de fouille provisoire (phase reconnaissances) est porté à la cote -7 NGF soit à 38,30 m de profondeur. Le soutènement du puits est assuré par des panneaux de paroi moulée de 49 m de profondeur ancrées dans la Cs. Le puits est constitué de 5 panneaux d'environ 265 m<sup>3</sup> dont 3 sont réalisés avec une Hydrofraise HC05 et deux à la benne hydraulique KS (figures 4 et 5).

## EXCAVATION DES COLONNES DANS LE PUIT

Colonne C4



Colonne C1

Colonne C2

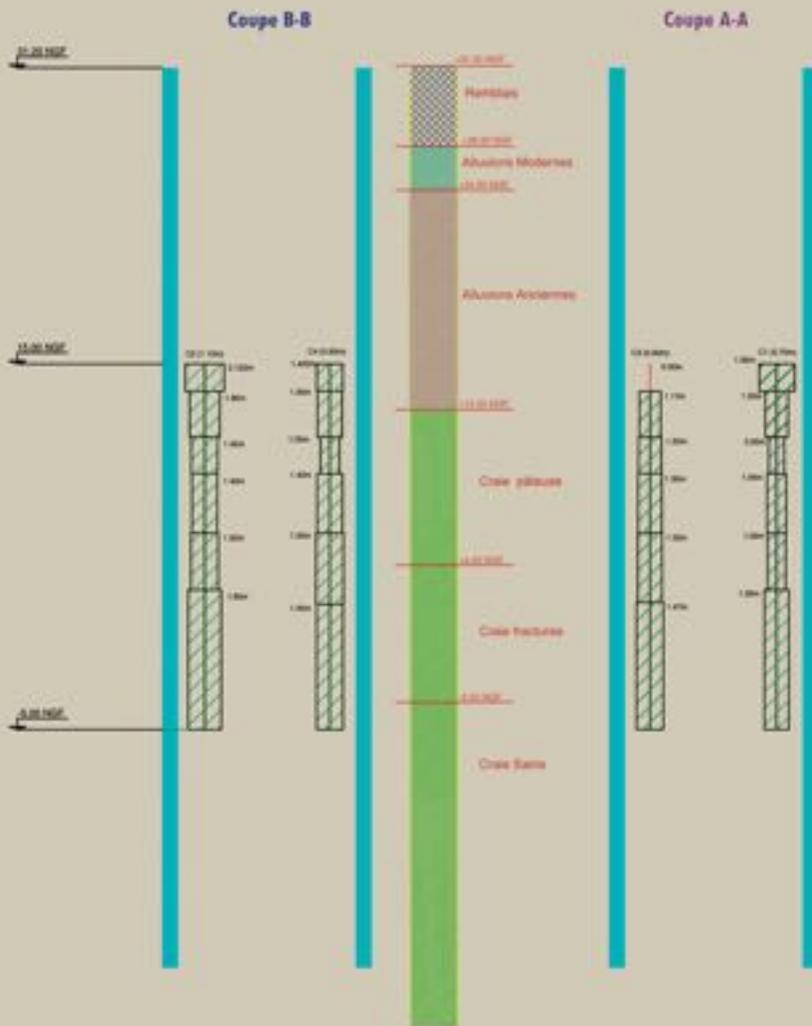
Colonne C3

6



7

## RELEVÉ DES DIAMÈTRES DES COLONNES DE JET GROUTING



8- Relevé des diamètres des colonnes de jet grouting.  
9- Implantation des colonnes de jet grouting.

8- Recording of jet grouting column diameters.  
9- Location of jet grouting columns.

Le marché prévoyait une tolérance de déviation des parois de 0,5% qui a été respectée avec les deux méthodes. Il est à noter que la mise à disposition successive de différents matériels de creusement a permis de vérifier, lors des terrassements, la précision de mesure des appareils embarqués que sont le Sakso et l'Empafraise. Ces mesures ont montré une bonne concordance avec les relevés de géomètre réalisés au fur et à mesure de l'excavation.

La fiche hydraulique de 11 m de longueur permet d'obtenir un faible débit de pompage de l'ordre de  $6 \text{ m}^3/\text{j}$ . La stabilité hydraulique du bouchon de craie saine est assurée par la mise en œuvre d'un puits de pompage descendu jusqu'à la cote -21 NGF. Ces mesures ont permis de mesurer  $5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  pour la craie saine.

Des colonnes de jet grouting ont été réalisées à l'intérieur de l'enceinte ; cet essai en grandeur nature a permis de statuer sur la faisabilité et l'efficacité des colonnes de jet dans la Craie Campanienne.

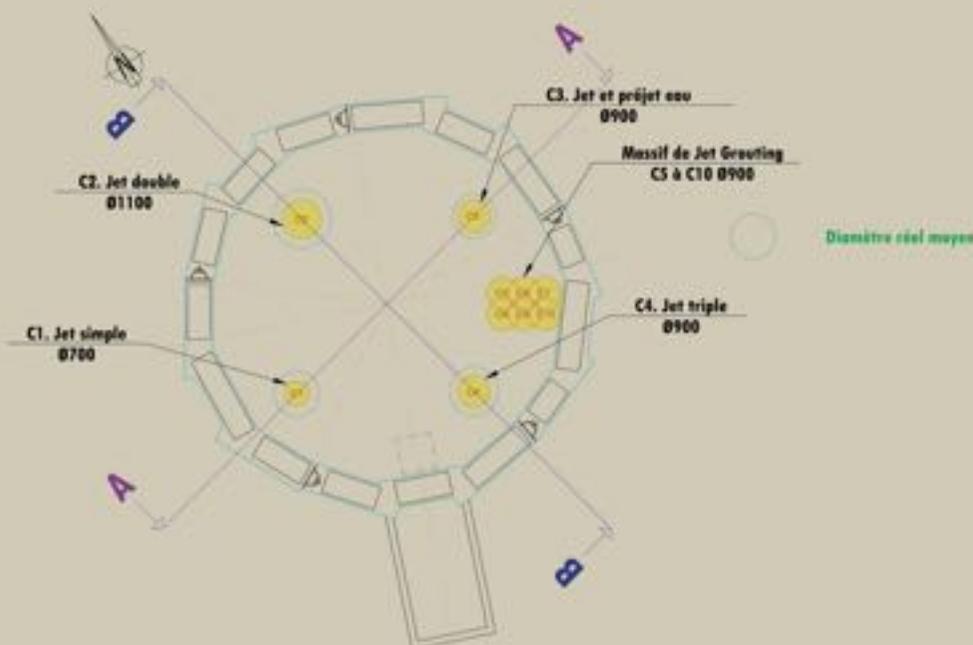
Quatre colonnes de 20 m ont été réalisées entre -5 et 0 NGF selon quatre méthodes de réalisation :

- **Colonne C1** en jet simple ;
- **Colonne C2** en jet double ;
- **Colonne C3** en jet simple avec prédécoupage à l'eau ;
- **Colonne C4** en jet triple.

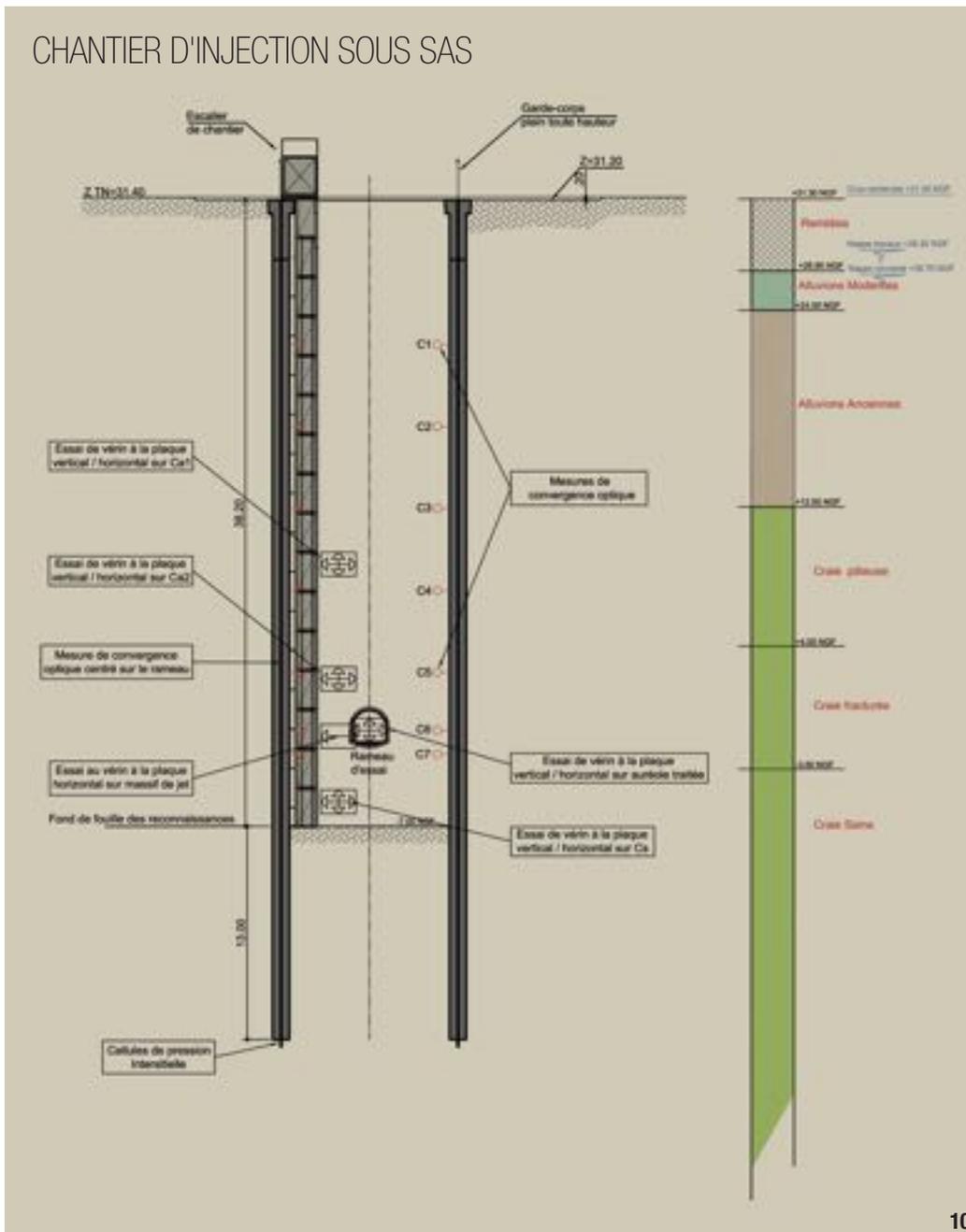
Un massif de 6 colonnes sécantes a été réalisé en jet double entre -5 et 0 NGF. Toutes les colonnes ont été réalisées avec la même énergie spécifique de l'ordre de  $45 \text{ MJ/m}$ .

Deux méthodes non destructives d'estimation des diamètres de colonnes ont été mises en œuvre : le Cyljet par mesure de résistivité électrique (Soldata) et le Tempjet par mesure de température (Porr).

## IMPLANTATION DES COLONNES DE JET GROUTING



CHANTIER D'INJECTION SOUS SAS



Ces estimations ont été confrontées aux relevés en continu des diamètres de colonnes lors de leur mise à nu pendant le terrassement.

Les diamètres moyens des colonnes obtenus dans la craie sont les suivants :

→ **Colonne C1** : 1,25 m pour 0,7 m visé ;

→ **Colonne C2** : 1,65 m pour 1,1 m visé ;

→ **Colonne C3** : 1,25 m pour 0,9 m visé ;

→ **Colonne C4** : 1,40 m pour 0,9 m visé.

Ils ont été relevés sur toute la hauteur des colonnes (figures 8 et 9).

Le massif a, quant à lui, été retrouvé monolithique (figures 6 et 7).

Le rameau d'une longueur de 4 m possède une section d'environ 2,00 x 2,00 m. Il sera réalisé principalement dans l'horizon de Ca2 avec le radier

10- Campagne d'essais.

11- Essai de plaque horizontal sur le massif de jet grouting.

12- Essai de plaque vertical sur la craie.

10- Test campaign.

11- Horizontal plate test on the jet grouting foundation.

12- Vertical plate test on the chalk.

10 © SOLETRANCHE BACHY



11



12 © INGÉROP/GEOS



**13- Chantier d'injections sous sas.**

**13- Grouting works through waterlock.**

© INGÉROPI/GIECS

13

TABLEAU 1 : PROGRAMME DES RECONNAISSANCES (voir figures 11, 12 et 13)

Catégorie	Information recherchée	Type d'essais
Reconnaitances préalables à la réalisation de l'enceinte en paroi moulée	Perméabilité des différents faciès de craie	Essai de pompage par palier et longue durée avant travaux
	Stratigraphie/ Déformabilité	Forages carotté et sondages pressiométriques
Reconnaitances préalables au terrassement et ultérieur à la réalisation de l'enceinte en paroi moulée. Réalisation de l'enceinte en paroi moulée	Influence de la paroi moulée sur la perméabilité	Essai de pompage par palier et longue durée dans l'enceinte
Reconnaitances mises en place dans les parois moulées	Déformation des parois moulées	Inclinomètres en panneaux
	Gradient hydraulique, dimensionnement de la fiche	Cellules de Pression Interstitielle en pied de fiche
	Bonne mise en œuvre du bétonnage	Tubes soniques en panneaux
Reconnaitances dans le puits	Stratigraphie, fracturation, inclusions de silex	Levé du fond de fouille
	Efficacité du jet grouting dans la craie	Mesure type cylindre électrique, relevé des tailles de colonnes dans le puits
	Déformabilité des parois moulées et interactions	Mesure de convergence, prélèvements de carottes dans la paroi moulée
	Déformabilité du massif	Essais au vérin à la plaque
	Fissuration, Inclusions de silex, déformabilité, résistance, abrasivité à l'échelle de l'échantillon	Prélèvements, essais de laboratoire
	Déformabilité du massif de jet grouting	Prélèvements, essais de laboratoire
		Essais au vérin à la plaque
		Essais au vérin plat
	Perméabilité du massif de Jet grouting	Essais d'infiltration
	Influence du creusement sur la nappe	Suivi du débit de pompage, suivi piézométrique
Pollution de l'eau	Mesures in situ des paramètres physico-chimiques des eaux, analyses chimiques	
Reconnaitances dans le rameau	Déformabilité du massif traité	Mesure de convergence, essais au vérin à la plaque
	Contraintes dans le soutènement	Essais au vérin plat
	Efficacité du traitement d'imperméabilisation	Drains de contrôle, suivi des débits, mesures CPI
	Déformabilité, résistance à l'échelle de l'échantillon traité en injection	Essais de laboratoire sur carotte

partiellement dans la Cs. Son creusement dans de bonnes conditions de sécurité nécessite la mise en œuvre d'une auréole d'injection de 3 m d'épaisseur à l'aide de 320 m de forage sous sas (figure 10).

### RECONNAISSANCES

Le programme des reconnaissances peut être séparé en deux phases, l'une préalable à la réalisation du puits et l'autre en parallèle de l'excavation.

La première phase comprend la réalisation d'un sondage carotté, de deux sondages pressiométriques et d'un essai de pompage. Un second essai de pompage est réalisé après réalisation des parois moulées afin de vérifier l'efficacité de l'enceinte étanche.

La deuxième phase des reconnaissances, réalisée en parallèle de l'excavation, permet de tester le comportement du terrain en vraie grandeur mais également de déterminer les caractéristiques mécaniques et géométriques des parois moulées et du jet grouting. Le programme des reconnaissances peut-être résumé selon le tableau 1. À chaque passe de terrassement (3-4 m environ), les travaux sont arrêtés pour effectuer une série de mesures au fond du puits :

- Levé géologique du fond de fouille ;
- Relevé des cibles de convergences ;
- Mesures inclinométriques ;
- Prélèvement d'échantillons de sol ;
- Prélèvement de carottes dans la paroi moulée et dans les colonnes de jet grouting.

En complément de ces opérations périodiques, des essais au vérin plat et des essais au vérin à la plaque sont effectués dans chaque faciès de craie ainsi que sur le massif de jet grouting et dans le rameau.

### CONTRAINTES DU CHANTIER

L'emprise du chantier à l'emplacement des anciennes usines Renault a été bombardée durant les deux guerres mondiales. La présence de bombes non explosées était donc probable. ▷

Pour traiter le risque pyrotechnique, la campagne de reconnaissance préalable a dû être adaptée afin de sécuriser les sondages.

Les terrains au droit des parois moulées ont été préalablement purgés sous assistance d'un pyrotechnicien. Lors du terrassement du puits, la plus forte contrainte a été la coordination entre le creusement et les essais. La priorité a été donnée aux reconnaissances plutôt qu'à la cadence de réali-

sation. Les opérations de terrassement ont été interrompues périodiquement pour permettre la réalisation des essais. Ce phasage a été rendu encore plus complexe dans la couche des alluvions anciennes qui était suspectée de pollution.

Des analyses en laboratoire ont donc été faites à l'avancement du terrassement avant chaque mise en décharge. Aucune pollution n'a finalement été détectée.

Le chantier, à proximité de la Seine, est en zone inondable et des mesures de prévention ont été prises en cas de crue. Les installations de chantiers ont été mises sur pilotis.

Enfin, le chantier est à l'intérieur de la ZAC Rive-de-Seine et doit donc respecter certains règlements imposés par l'aménageur : horaires de chantier de 7 h à 20 h, suivi environnemental, coordination avec les chantiers voisins.

## DÉLAIS

Le chantier a démarré les travaux fin octobre 2015. Les parois moulées ont été réalisées entre le 28 octobre 2015 et le 5 janvier 2016, le jet grouting entre le 6 janvier 2016 et le 8 février 2016 ; le terrassement a débuté le 22 février 2016.

Compte tenu de l'avancement actuel des travaux, la terminaison du chantier va se situer vers la fin juillet 2016.

## CONCLUSION

Les essais et reconnaissances sont encore en cours, mais les premiers résultats permettent d'ores et déjà de mieux appréhender le comportement mécanique et hydraulique de la craie. Les informations récoltées valident les hypothèses de conception et permettent une meilleure connaissance du comportement du terrain. Celle-ci servira à la réalisation d'études d'exécution poussées et à la détermination des méthodes constructives adéquates, tant pour le tunnel que pour les gares et les ouvrages annexes. Le retour d'expérience de ce marché sera bénéfique à la fois pour le maître d'ouvrage qui aura réduit le niveau de risque de ses travaux futurs, pour le maître d'œuvre qui aura fiabilisé ses études et pour les entreprises de travaux qui pourront adapter au mieux leurs méthodes dès les appels d'offre. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

### SONDAGES DE RECONNAISSANCE PRÉALABLES :

- 1 sondage carotté, 2 sondages pressiométriques, 6 piézomètres, 2 puits de pompage

### PAROI MOULÉE :

- Épaisseur : 0,80 m
- Longueur : 49 m
- Surface excavée : 1 650 m<sup>2</sup>
- Volume de béton mis en œuvre : 1 320 m<sup>3</sup>
- Aciers : 87 t

### JET GROUTING :

- 4 colonnes de jet grouting de 20 m atteignant entre 16 et 36 m de profondeur.
- Un massif de 5 m de haut de 6 colonnes sécantes situé entre 31,00 et 36,00 m de profondeur

### TERRASSEMENT DU PUIT ET RECONNAISSANCES À L'AVANCEMENT :

- 3 200 m<sup>3</sup> de déblais de terrassement
- 11 levés de fond de fouille
- 7 essais de plaque réalisés accompagnés de nombreuses mesures extensométriques
- 7 relevés de convergence et 10 prélèvements de sol effectués
- 1 essai de plaque, et d'infiltration d'eau au sein du massif de colonnes de jet grouting

### FORAGES ET INJECTION :

- 37 forages horizontaux sous sas d'une longueur cumulée de 320 m environ

### TERRASSEMENT DU RAMEAU :

- 16 m<sup>3</sup> de déblais de terrassement correspondant aux 4,00 m de longueur du rameau ; au cours du terrassement de celui-ci seront réalisés : 1 levé de fond de taille, 2 essais de plaque dont 1 horizontal et 1 vertical, un essai d'extensomètre, une mesure de cellule de pression interstitielle

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Société du Grand Paris

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Setec Tpi (mandataire), Ingerop Conseil & Ingénierie, Atelier Barani, Marc Barani Architectes, ar thème Associés, Brunet Saunier Architecture, Périphériques Architectes Marin +Trottin architectes, Périphérique Architectes Afja, Philippe Gazeau Architecture, Agence Duthilleul. Ingerop, associé à sa filiale Geos, assure notamment la conception et le suivi des travaux du puits.

**ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Artelia Ville et Transport (mandataire), Arcadis Esg, Bg Ingénieurs Conseils

### GROUPEMENT D'ENTREPRISES POUR LA RÉALISATION DE L'ENSEMBLE DES TRAVAUX :

Sade, mandataire du groupement, chargée des travaux d'installation de chantier, terrassement généraux, dispositif d'accès au fond de puits, rabattement de nappe, sécurité du puits, remise en état et repliement du chantier. Soletanche Bachy, cotraitante du groupement pour la réalisation des travaux de fondations profondes et d'essais associés (campagne de sondages de reconnaissances, paroi moulée, jet grouting, mesures de convergences, essais de plaques, forages et injections, relevés géologiques). Soletanche Bachy Tunnels, pour les travaux de terrassement et de confortement du rameau d'essai.

## ABSTRACT

### GRAND PARIS EXPRESS LINE 15 SOUTH. RECONNAISSANCE SHAFT AT BOULOGNE BILLANCOURT

R. PORET, SOLETANCHE BACHY - J. GEISTODT-KIENER, GC INGEROP - M. CAHN, GEOS

As part of the design process for the future line 15 of the Grand Paris Express, a test shaft is being executed at Boulogne Billancourt. The purpose of this programme is to obtain information on the soil's behaviour in order to validate the assumptions for construction of the future tunnels and stations. It entails the construction of a circular shaft 9.4 metres in diameter and 38 metres deep by the diaphragm wall method, with jet grouting columns inside the shaft and the excavation of a gallery in the chalk. A series of geotechnical tests is performed before and during execution of the shaft. □

### GRAND PARIS EXPRESS LÍNEA 15 SUR. POZO DE RECONOCIMIENTO EN BOULOGNE BILLANCOURT

R. PORET, SOLETANCHE BACHY - J. GEISTODT-KIENER, GC INGEROP - M. CAHN, GEOS

En el marco del proceso de diseño de la futura línea 15 del Grand Paris Express, se ha perforado un pozo de pruebas en Boulogne Billancourt. Este proyecto tiene por objeto obtener información sobre el comportamiento del suelo para validar las hipótesis de construcción de los futuros túneles y estaciones. Incluye la realización de un pozo circular de 9,4 m de diámetro y 38 m de profundidad con pantalla continua, columnas de jet grouting en el interior del pozo y la excavación de una galería en la roca caliza. Se ha ejecutado una batería de ensayos geotécnicos antes y durante la realización del pozo. □



**menard**

## LE SPÉCIALISTE DE L'AMÉLIORATION DE SOL

Compactage Dynamique - Substitution Dynamique - Colonnes Ballastées  
Colonnes Bi-Modules - Colonnes à Module Contrôlé - Vibro Compactage  
Menard Vacuum - Drains Verticaux - Jet Grouting  
Paroi Sol Bentonite - Soil Mixing - Injection Solide Refoulante



Prologis Elizabeth Seaport  
ÉTATS-UNIS



Puerto Cancún  
MEXIQUE



Raffinerie Nghi Son  
VIETNAM



Stade de Perth  
AUSTRALIE



La Mer - Dubaï  
ÉMIRATS ARABES UNIS



N-S Route  
POLOGNE

### **MENARD**

2, rue Gutenberg - BP 28 - 91620 Nozay - France

Tél. : 01 69 01 37 38 - Fax : 01 69 01 75 05

[courrier@menard-mail.com](mailto:courrier@menard-mail.com)

[www.menard-web.com](http://www.menard-web.com)





1

© KELLER

# RENFORCEMENT DE SOL PAR JET GROUTING À LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE CHOOZ

AUTEURS : SIMON DEPINOIS, SERVICE GÉOLOGIE GÉOTECHNIQUE, EDF / DIPNN CEIDRE TEGG - CHRISTOPHE FRITSCH, DIRECTEUR TRAVAUX, KELLER FONDATIONS SPÉCIALES

**SUR LE SITE DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE CHOOZ, EDF A FAIT RÉALISER UN RENFORCEMENT DES SOLS DE FONDATION SOUS LES FUTURS BÂTIMENTS DIESELS D'ULTIME SECOURS, AU TITRE DU RETOUR D'EXPÉRIENCE DE FUKUSHIMA. CONSISTANT EN UN CONFINEMENT PAR MAILLAGE DE VOILES EN JET GROUTING, CE RENFORCEMENT, INÉDIT SUR UNE CENTRALE NUCLÉAIRE EN FRANCE, VISE À SE PRÉMUNIR DU RISQUE DE LIQUÉFACTION SOUS SÉISME EN CONDITIONS EXTRÊMES.**

## 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.

Pour le CNPE de Chooz (site 2 tranches de 1 450 MWe, Ardennes, France), ce sont deux bâtiments DUS qui sont à construire, à raison d'un par tranche. Pour ce site, 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 quasi accolés, distants l'un de l'autre de seulement 2 m (bord à bord des radiers).

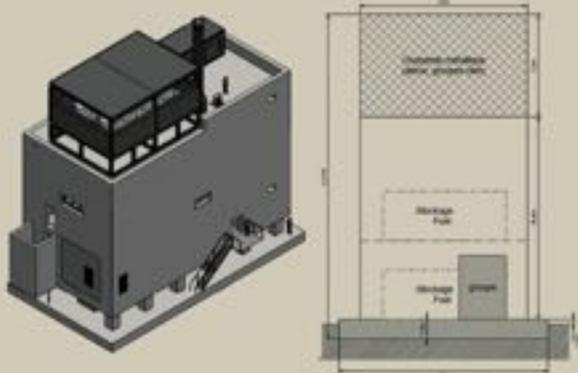
## CONTEXTE GÉOTECHNIQUE SOUS LES DUS

La campagne d'investigation géotechnique a porté sur la zone d'implantation des deux DUS accolés ( $S \approx 1\,200 \text{ m}^2$ ), ainsi que sur les liaisons VRD entre les DUS et les îlots nucléaires (210 m). Cette campagne s'est composée de 3 sondages carottés SC (-12,3 m à 30 m/PF du site), 4 sondages pressiométriques PMT (-11 m à -17 m/PF), de 5 sondages au carottier battu SPT (-6,6 m à -11,5 m/PF) et 5 puits à

**1- Vue générale du site.**

**1- General view of the site.**

## ILLUSTRATION DES BÂTIMENTS DUS (à gauche sur appui parasismique ; à droite sur radier élargi)



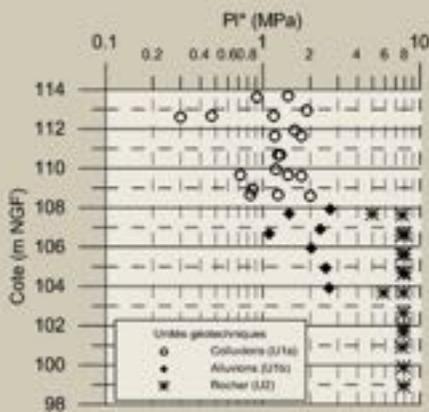
2

## COUPE STRATIGRAPHIQUE TRANSVERSALE SOUS LES DUS



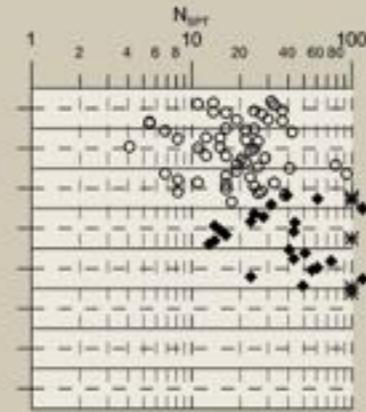
3

## VALEURS DE PRESSIONS LIMITES $P_L^*$



4a

## VALEURS DE PRESSIONS LIMITES $N_{SPT}$



4b

la pelle mécanique PM ( $\approx -3,5$  m/PF). Le sondage carotté SC3 a été mis à profit pour réaliser un essai géophysique de type Down-Hole jusqu'à  $-30$  m/PF, couplé à un profil de mesures MASW en surface (45 m de longueur environ). En complément, 5 sondages SPT ont également été réalisés sur le tracé des liaisons VRD ( $-9,2$  m à  $-14,0$  m/PF). 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. Ceux-ci sont successivement :

- Des remblais hétérogènes (U0) de voirie, constitutifs de la plateforme du site, présents sur une épaisseur de 0,9 m à 1,5 m ;
- Des limons sableux fins (U1a), à graves anguleuses, constitutifs de colluvions de versant entaillées par les terrassements de construction

**2- Illustration des bâtiments DUS (à gauche sur appui parasismique ; à droite sur radier élargi).**

**3- Coupe stratigraphique transversale sous les DUS.**

**4a- Valeurs de pressions limites  $p_L^*$ .**

**4b- Valeurs de pressions limites  $N_{SPT}$ .**

**2- Illustration of the backup diesel buildings (left-hand on earthquake-resistant support; right-hand on enlarged foundation raft).**

**3- Stratigraphic cross section under backup diesel building.**

**4a- Limit pressure values  $p_L^*$ .**

**4b- Limit pressure values  $N_{SPT}$ .**

du CNPE. Cette formation est hétérogène et présente des passées purement sableuses fines, ou de graves et cailloux très crus. Elle est présente en épaisseur assez régulière, de 4,7 m à 5,8 m ;

- Des alluvions sablo-graveleuses (U1b) légèrement limoneuses, très hétérogènes en faciès, et se rattachant à une terrasse alluviale ancienne de la Meuse, imbriquée dans les colluvions sus-jacentes. Cet horizon U1b n'a pu être distingué des colluvions que sous le DUS 1 ;

- Le substratum rocheux local (U2), constitué de schistes gréseux des grauweekes de Montigny, présentant un abaissement progressif de son toit dans l'axe transversal des DUS, avec une profondeur variant de  $-5,8$  m à  $-11,6$  m/PF. Ce schiste est très fracturé en tête sur 4 m à 6 m d'épaisseur, fracturation qui devient plus irrégulière en profondeur.

Cette succession stratigraphique est illustrée en figure 3.

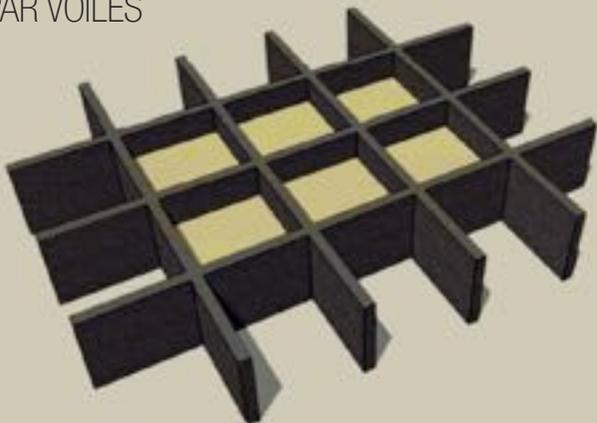
Les essais *in situ* pressiométriques et SPT ont montré une compacité globalement moyenne à bonne des horizons de fondation (figure 4), à l'exception :

- De niveaux de très faible résistance au sein des colluvions limoneuses U1a, sur 2 m d'épaisseur sous le niveau d'ancrage du radier :  $N_{SPT}$  de 3 à 5,  $p_L^*$  de l'ordre de 0,3 MPa, et des essais pressiométriques inexploitable du fait du remaniement des forages et de la déformabilité de parois ;

- De quelques passées faiblement à moyennement denses au sein des colluvions U1a et alluvions sablo-graveleuses U1b, identifiées par les essais SPT ( $N_{SPT} \approx 6$  à 15).

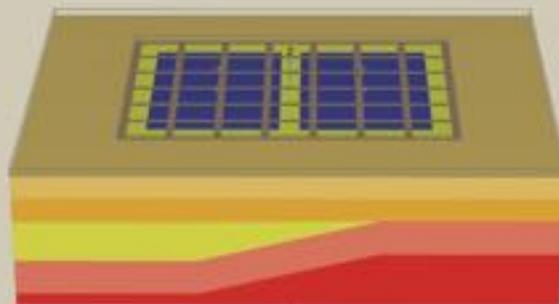
Les niveaux d'eau évalués dans les terrains, au sens de l'Eurocode 7 pour le Niveau Moyen Permanent (associé à  $G_{k,w}$ ) et le Niveau Variable Fréquent (associé à  $Q_{k,wief}$ ), sont situés respectivement à  $-6,7$  m/PF et  $3,7$  m/PF. ▷

PRINCIPE DU CONFINEMENT DE SOLS PAR VOILES



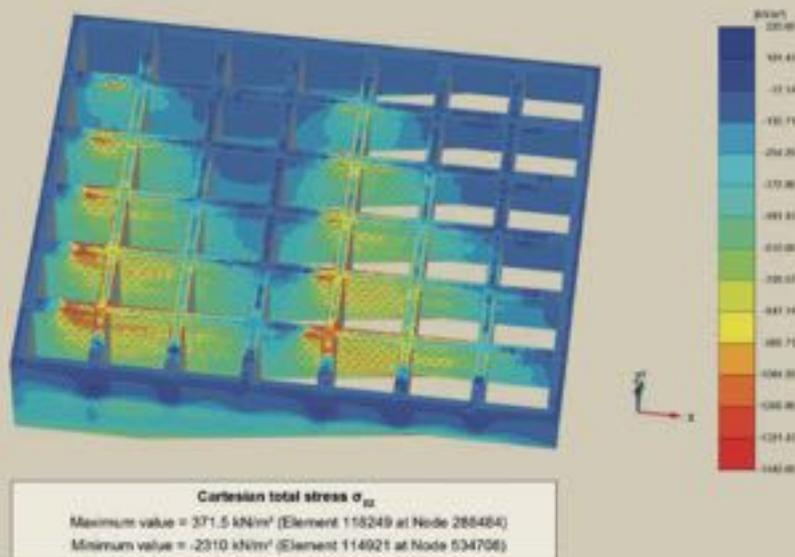
5a

MODÈLES ÉLÉMENTS FINIS 3D SOUS LES RADIERS DUS ACCOLÉS DE CHOOZ



5b

DISTRIBUTION DES CONTRAINTES VERTICALES DANS LE MAILLAGE DES COLONNES



6

5a- Principe du confinement de sols par voiles.

5b- Modèles éléments finis 3D sous les radiers DUS accolés de Chooz.

6- Distribution des contraintes verticales dans le maillage des colonnes.

5a- Shear-wall soil containment method.

5b- 3D finite element models under attached backup diesel building foundation rafts at Chooz.

6- Vertical stress distribution in the column meshing.

**ÉLÉMENTS DE CHOIX POUR LE RENFORCEMENT DE SOL**

Au regard des hypothèses de dimensionnement (notamment sismiques, PGA = 0,12 g), des caractéristiques du projet DUS et du modèle géotechnique établi sur la zone, les études de prédimensionnement ont préconisé le principe d'un renforcement de sol : ceci afin d'écartier tout risque de liquéfaction éventuelle tout en apportant des marges de dimensionnement supplémentaires, notamment sous situations sismiques.

Le principe de base envisagé repose sur le principe de confinement des terrains par un réseau de voiles verticales (figure 5), selon un principe déjà mis en œuvre par ailleurs dans le monde :

Japon (Uchida et al., 2012), Martinique (Jeanty et al., 2013). Le principe est de limiter voire annuler l'apparition de pressions interstitielles dans les horizons liquéfiables par l'action des voiles d'inclusions : l'inertie beaucoup plus importante de ces voiles par rapport aux terrains encaissants limite fortement la génération de contraintes de cisaillement dans les sols, et de facto les surpressions interstitielles associées. Pour réaliser ces voiles et leur garantir une inertie suffisante, la technique retenue pour le site de Chooz est la réalisation de colonnes sécantes, exécutées par méthode jet grouting. Cette technique permet de s'adapter à l'hétérogénéité des terrains reconnus sous les DUS, en nature et en compacité :

franchissement des points durs identifiés, ancrage au rocher, homogénéité de la qualité du mortier de sol constitué de limons ou d'alluvions, et traitement des niveaux de très faible compacité. Le marché a été confié à l'entreprise Keller Fondations Spéciales, incluant études de conception et dimensionnement définitif du renforcement (y compris matelas de répartition entre têtes de colonnes et radier).

**DIMENSIONNEMENTS DU MAILLAGE JET GROUTING TRAITEMENT DU RISQUE DE LIQUÉFACTION**

La vérification de la non-liquéfaction après renforcement a été menée par Keller sur la base de la méthodologie

proposée par N'Guyen (N'Guyen et al., 2011).

Le risque de liquéfaction est dans un premier temps évalué selon la méthode NCEER (Youd et Idriss, 1997), par laquelle est estimé un facteur de sécurité à la liquéfaction  $F_{Si}$  avant renforcement.

L'approche de N'Guyen permet d'évaluer un facteur de réduction  $R_{CSR}$  s'appliquant au rapport de contrainte de cisaillement cyclique (Cyclic Stress Ratio CSR) évalué selon NCEER.

Ce facteur de réduction  $R_{CSR}$  est ensuite appliqué au facteur de sécurité initial  $F_{Si}$  pour obtenir un facteur de sécurité réduit tenant compte du confinement par les voiles :

$$F_{Sc} : F_{Sc} = F_{Si} / R_{CSR}$$

7- Plan d'exécution du maillage des colonnes jet grouting.

8- Mise en place inclinomètre avec contrôle.

9- Boîtier d'enregistrement ACI.

7- Working drawing of the meshing of jet grouting columns.

8- Inclinometer positioning and checking.

9- ACI recording unit.

Le facteur de réduction  $R_{CSR}$  est évalué selon la formule <sup>(1)</sup> :

$$R_{CSR} = R_{rd} = \frac{1}{G_r \left[ A_r C_G \gamma_r + \frac{1}{G_r} (1 - A_r) \right]} \quad (1)$$

Avec :

$G_r = G_{jet}/G_{sol}$  : rapport des modules de cisaillement du voile de jet-grouting et du sol (de l'ordre de 5 à 10 dans le cas présent) ;

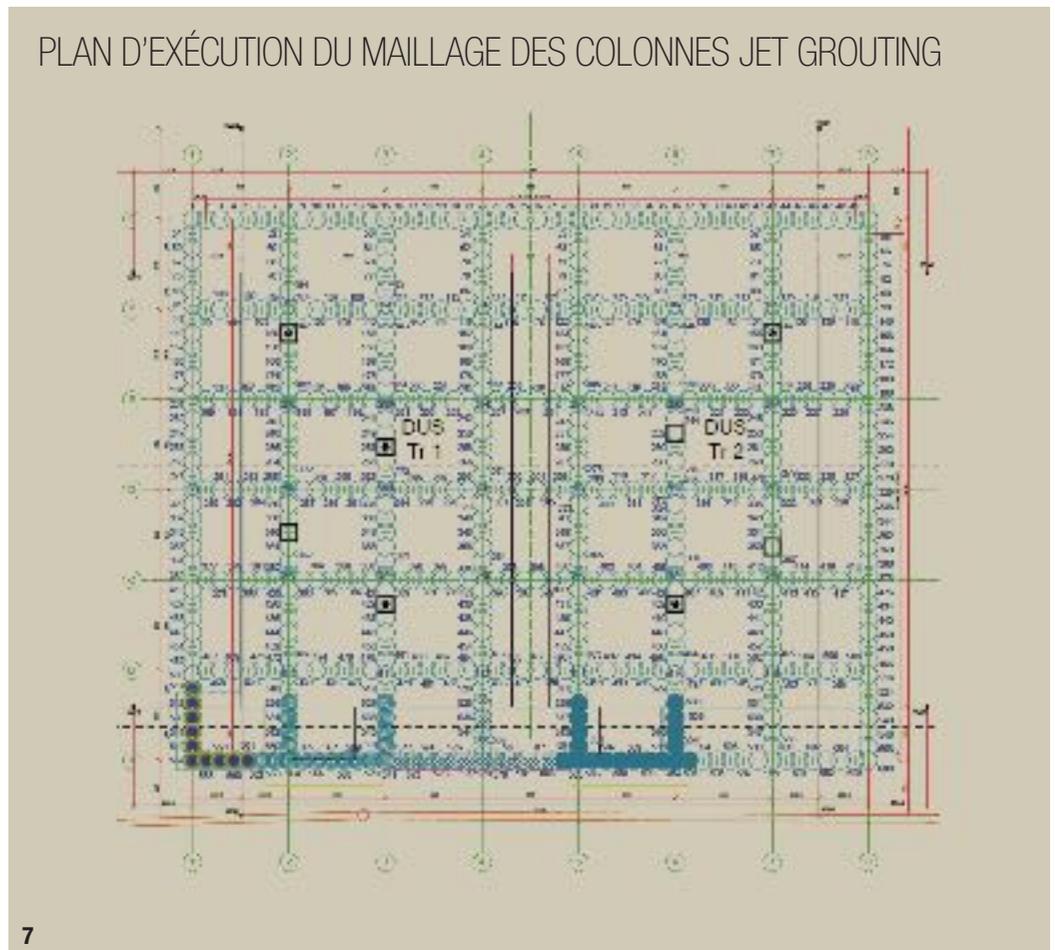
$A_r$  : pourcentage d'incorporation (31 % pour le projet DUS Chooz) ;

$C_G$  : facteur équivalent de cisaillement, selon formule <sup>(2)</sup> ;

$\gamma_r$  : rapport des contraintes de cisaillement dans le voile de jet et dans le sol, évalué selon formule <sup>(3)</sup>.

$$C_G = 1 - 0,5\sqrt{1 - A_r} \quad (2)$$

$$\gamma_r = 1 - (1 - A_r)^2 \left( \frac{G_r - 1}{240} \right)^{0,4} \quad (3)$$



© KELLER

Selon l'approche développée par N'Guyen, ce facteur RCSR tient compte du caractère bidimensionnel du renforcement, et il est donc valable pour les deux directions principales du maillage de voiles.

Le facteur de réduction de cisaillement  $R_{CSR}$  est ainsi évalué à 0,78, soit un gain de 28% sur le facteur de sécurité à la liquéfaction  $F_{Sc}$ , ce qui *in fine* permet, pour le cas présent, l'obtention

de facteurs bien supérieurs au critère 1,25 usuellement visé comme facteur minimum.

#### MODÉLISATION DU MAILLAGE DE COLONNES

Les études de dimensionnement portées par l'entreprise Keller Fondations Spéciales incluaient la modélisation tridimensionnelle aux éléments finis du maillage des voiles de colonnes

sécantes (logiciel Plaxis 3D, modèle affiché en figure 5), pour évaluer la distribution des contraintes entre colonnes et sol confiné.

Cette cartographie des contraintes a été déterminée pour les cas ELS (figure 6) et ELU, y compris Accidentel sous séisme.

Ces différentes études ont permis de valider les dimensions envisagées par EDF lors des études de projet, ▷

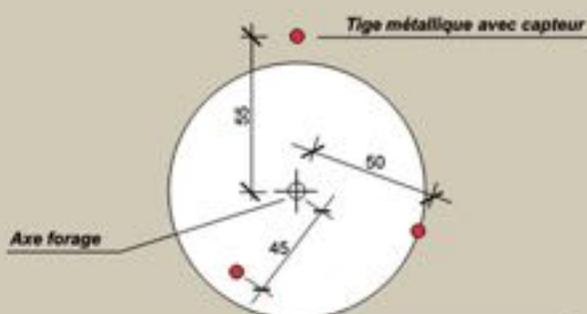


© KELLER



10

**PLAN DE POSITIONNEMENT**  
des tiges de contrôle pour la mesure du diamètre avec l'ACI



11

à savoir la réalisation de colonnes de jet grouting de 1 m de diamètre et espacées de 80 cm, garantissant ainsi un recouvrement théorique de 20 cm entre colonnes adjacentes. Le maillage entre voiles a été ajusté pour lui donner une meilleure régularité dans les deux directions principales, conduisant à des entre-axes de voiles de 5,35 m (axe X local) et 5,00 m (axe Y local), soit respectivement 8 et 7 voiles sur ces mêmes axes.

Ce maillage tient également compte du débord minimum prévu de part et d'autre des radiers accolés (en l'occurrence de 2,75 m). La figure 7 présente le plan d'exécution reprenant ces principes.

Les quantités en découlant sont de 608 colonnes de jet-grouting, avec une hauteur de colonnes variant de 5,0 m à 9,5 m, soit un linéaire cumulé de 3486 m de jet-grouting (et 5346 m de forage), aboutissant au taux de traitement de 31 % du volume global de sol sous les deux DUS accolés.

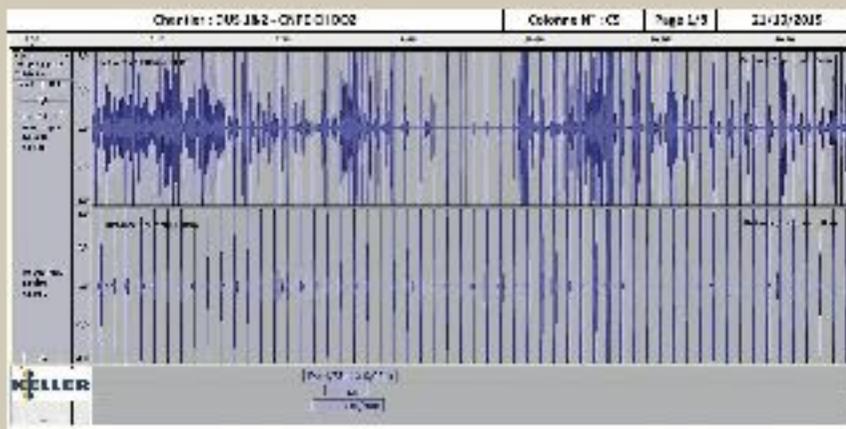
**EXÉCUTION DES TRAVAUX DE JET GROUTING**

La réalisation des travaux de jet grouting pour le CNPE de Chooz, s'est déroulée en trois phases bien distinctes :

**1- PLOT D'ESSAI DU 16/10 AU 22/10/2015**

Il est constitué de 4 colonnes isolées et d'un voile de jet avec 5 colonnes sécantes (Entre-axe de colonne de 80 cm et recouvrement minimum de 20 cm). Un panel de contrôles renforcés a été mis en œuvre pour s'assurer du calage définitif des paramètres de travail afin d'obtenir le diamètre minimum requis de 1 m et de s'assurer du bon ancrage dans les couches de schistes altérés.

**ENREGISTREMENT ACI SUR COLONNE D'ESSAI N°C5**



12

**Matériels retenus après validation du plot :**

→ Train de tige 88,9 mm et taillant de 110 mm.

Les paramètres de forage et d'injection sont enregistrés en continu durant toute la durée de réalisation de chaque colonne. Dans le cadre du contrôle qualité, tous les enregistrements sont remis quotidiennement à EDF.

**Essais réalisés conformément au marché :**

→ Contrôle de la densité (1,66), viscosité et ressuage du coulis de ciment. Utilisation de ciment CEM III avec C/E = 1,5 ;

→ Essais d'écrasement à 7, 14, 28 et 56 j des spoils constitutifs de la colonne de jet, avec Rc28 > 3,5 Mpa ;

→ Carottages verticaux et horizontaux dans les colonnes de jet, pour prélèvement d'échantillons intacts afin de s'assurer de la continuité du traitement et du recouvrement minimum de 20 cm entre les colonnes ;

**10- Capteur acoustique ACI monté sur tige de contrôle.**

**11- Plan de positionnement des tiges de contrôle pour la mesure du diamètre avec l'ACI.**

**12- Enregistrement ACI sur colonne d'essai n° C5.**

**10- ACI acoustic sensor mounted on monitoring rod.**

**11- Control rod positioning plan for diameter measurement with the ACI unit.**

**12- ACI recording on test column C5.**

→ Essais d'écrasement à 14, 28 et 56 jours sur les échantillons carottés dans les colonnes avec des résistances obtenues comprises entre 6 et 12 MPa, suivant les zones de prélèvements ;

→ Contrôle de la déviation du forage à l'aide d'un inclinomètre, avec une tolérance maximale de 1 % de déviation par rapport à l'axe théorique de forage.

Une fois le forage terminé, une sonde inclinométrique (figure 8) est insérée à l'intérieur du train de tige, depuis la plateforme de travail (la sonde étant étanche, le train de tige n'a pas besoin d'être purgé du fluide de forage).

Les mesures sont faites selon un premier axe à la descente de la sonde, puis selon un deuxième axe lors de la remontée de la sonde.

La sonde étant reliée à un système d'acquisition des données en surface, les résultats bruts pourront être lus instantanément sur un boîtier. La courbe représentant la déviation



13

© KELLER



14

© KELLER

selon les plans X/Y pourra être visualisée sur ordinateur après traitement des données, quelques minutes plus tard. Toutes les 9 colonnes du plot d'essai ont été contrôlées, puis 1 contrôle toutes les 10 colonnes en phase production.

Contrôle du diamètre par méthode ACI (Acoustic Column Inspector), développé et mis au point par Keller (figure 9). Toutes les 9 colonnes du plot d'essai ont été contrôlées par la méthode ACI, puis 1 contrôle toutes les 120 à 150 colonnes en phase production. Ce procédé permet de vérifier en temps réel le diamètre effectivement atteint par le jet, et ainsi d'adapter immédiatement les paramètres d'injection.

Les capteurs (figure 10) permettant l'enregistrement acoustique seront placés sur les tiges métalliques préalablement mises en place à distance de 45, 50 et 55 cm de l'axe de la colonne de jet à contrôler (figure 11).

Ainsi, le diamètre atteint pourra être contrôlé tout au long de l'exécution de la colonne, dans les différentes couches de sol traité. Les fiches d'enregistrements ACI (figure 12) sont éditées pour chaque colonne de jet et permettent d'attester par l'intermédiaire des « Pics » de contact, que le diamètre minimum est atteint.

Un dégarnissage et un décaissement des colonnes isolées et du voile de jet ont été réalisés pour un contrôle visuel de la géométrie, la vérification du diamètre (relevés compris entre 1,10 m et 1,20 m) et le contrôle de l'imbrication des colonnes sécantes (figure 13).

## 2- COLONNES DE JET SOUS DUS 1 & 2 : PHASE PRODUCTION DU 09/11/2015 AU 03/02/2016

Après validation du plot d'essai, la phase « industrielle » de réalisation des colonnes de jet grouting sur les DUS a permis de réaliser 608 colonnes en moins de 3 mois, soit un linéaire total de forage de 5 450 m.

Durant toute la phase de production, des PVCT (Procès-Verbaux de Contrôle Technique) ont été réalisés quotidiennement pour s'assurer de la qualité

**13- Vue des colonnes dégarnies du plot d'essai.**

**14- Essai de chargement avec grue.**

**15a- Carottage triple dans colonne de jet avec prélèvement d'échantillon intact sous gaine PVC.**

**15b- Échantillon de jet intact (carotte) prélevé dans la colonne.**

**13- View of bare columns of the test section.**

**14- Loading test with crane.**

**15a- Triple core sampling in jet grouting column with intact sample taken under PVC duct.**

**15b- Intact jet sample (core sample) taken in the column.**

des matériaux et de la conformité des travaux. Ont ainsi été vérifiés :

- La réception des matériaux (ciment pour le jet, granulat pour le matelas) ;
- L'implantation des colonnes ;
- La confection du coulis et les essais s'y rapportant ;
- La réalisation de chaque colonne (inclinaison, profondeur, pression, débit etc.) ;
- Les spoils après réalisation du jet (prélèvement d'échantillons avec essais d'écrasement).

Des contrôles complémentaires au plot d'essais ont été réalisés, à savoir 8 essais de chargement (figure 14) répartis sur l'ensemble de la zone de traitement. Une grue automotrice a été utilisée comme massif de réaction. Les colonnes ont été chargées à 500 kN (charge ELS de référence de 392 kN) et les tassements mesurés étaient très faibles, de l'ordre de 3 mm. 5 carottages complémentaires dans les colonnes d'essai de chargement ont également été réalisés, afin de s'assurer de la continuité de celles-ci et de procéder à des essais d'écrasement

pour le contrôle de la résistance finale du matériau constitutif des colonnes de jet (figures 15a et 15b).

Les résultats ont montré des résistances comprises entre 8 MPa et 12 MPa.

## 3- RÉALISATION DU MATELAS DE RÉPARTITION SUR L'EMPRISE DES DUS 1 & 2 DU 15/02/2016 AU 04/03/2016

La mise en œuvre d'un matelas de répartition d'épaisseur 1,35 m sur l'ensemble des DUS avait pour but de livrer une plateforme à EDF avant intervention du lot génie civil, avec les objectifs suivants :

- Niveau altimétrique final à 113,60 NGF ;
- Portance EV2 > 80 MPa ;
- EV2/EV1 < 2.5 ;
- Intensité de compactage : Q/S = 0,07.

Une procédure d'exécution ainsi qu'une planche d'essai ont été réalisées au préalable pour caractériser les matériaux mis en œuvre et vérifier l'obtention des critères de réception. ▷



15a

© EDF



15b



16

© KELLER

Des PVCT (Procès-Verbaux de Contrôle Technique) ont été réalisés quotidiennement pour s'assurer de la qualité des matériaux et de la conformité des travaux.

Ont ainsi été vérifiés l'excavation du terrain en place, l'approvisionnement et les caractéristiques des matériaux granulaires, la mise en œuvre et le contrôle des matériaux remblayés.

### CONCLUSION

La technique jet grouting mise en œuvre en fondation des bâtiments DUS de Chooz a donné satisfaction du point de vue des requis de dimensionnement et d'exécution exigés par EDF pour le renforcement des sols. L'objectif premier de traitement du risque de liquéfaction est atteint, tout en apportant dans le même temps des marges de dimensionnement

vis-à-vis d'autres états limites géotechniques (en particulier, en situation sismique, pour la portance dynamique) et des phénomènes d'interaction sol-structure. Le mode d'exécution et les contrôles réalisés (au plot d'essai et en phase de production) permettent de garantir la performance exigée du renforcement, à la fois sur la qualité intrinsèque du matériau sol+coulis et

sur le comportement global du réseau de voiles jet grouting.

*In fine*, le choix du mode de renforcement issu des études projet réalisées par l'ingénierie EDF et la collaboration en phase Études et Chantier entre EDF et l'entreprise exécutante Keller Fondations Spéciales ont permis de répondre aux exigences liées à la sûreté nucléaire des ouvrages concernés. □

16- Vue générale du maillage avant réalisation du matelas.

17- Vue du matelas terminé.

16- General view of meshing before execution of the mattress.

17- View of completed mattress.



© KELLER

17

### PRINCIPALES QUANTITÉS

**608** colonnes de jet-grouting de diamètre 80 cm  
**5 346** m de forages  
**3 485** m de jet-grouting  
**1 653** m<sup>3</sup> de coulis injecté

### INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** EDF - CNPE de Chooz  
**MAÎTRE D'ŒUVRE :** EDF - CIPN  
**MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉOTECHNIQUE :** EDF - TEGG  
**ENTREPRISE TITULAIRE DU LOT RENFORCEMENT DE SOLS :**  
**Keller Fondations Spéciales**

### ABSTRACT

#### SOIL REINFORCEMENT BY JET GROUTING AT CHOOZ NUCLEAR POWER STATION

SIMON DEPINOIS, EDF / DIPNN CEIDRE TEGG - CHRISTOPHE FRITSCH, KELLER

On the site of the Chooz nuclear power station, EDF had foundation soil reinforcement performed under the future buildings for the ultimate backup diesel sets based on experience feedback from Fukushima. This reinforcement work, unprecedented on a nuclear power station in France, comprises a containment system by meshing jet grouting shear walls. The aim is to guard against the risk of liquefaction under an earthquake more powerful than the design earthquake. □

#### REFUERZO DE SUELO POR JET GROUTING EN LA CENTRAL NUCLEAR DE CHOOZ

SIMON DEPINOIS, EDF / DIPNN CEIDRE TEGG - CHRISTOPHE FRITSCH, KELLER

En el emplazamiento de la central nuclear de Chooz, EDF ha hecho realizar un refuerzo de las explanadas bajo los futuros edificios que albergarán los grupos electrógenos diésel de último recurso, aprovechando la experiencia extraída de Fukushima. Este refuerzo, inédito en una central nuclear en Francia y que consiste en un confinamiento mediante un entramado de paneles de jet grouting, tiene como objetivo evitar el riesgo de licuefacción en caso de sismo más allá del dimensionamiento. □





1  
© DGM & ASSOCIÉS

# LE HUB À LEVALLOIS-PERRET, UN EMPLACEMENT STRATÉGIQUE AU CŒUR D'UNE VILLE EN PLEIN DÉVELOPPEMENT

AUTEUR : CHRISTOPHE ALLEMOZ, CHARGÉ D'AFFAIRES TRAVAUX, SEFI-INTRAFOR

AU CŒUR DE LEVALLOIS-PERRET (HAUTS-DE-SEINE), À MOINS DE 500 M DES PORTES DE PARIS, SEFI-INTRAFOR A RÉALISÉ L'ENSEMBLE DES FONDATIONS SPÉCIALES D'UN BÂTIMENT À VOCATION DE BUREAUX, D'UNE SURFACE DE 15 000 M<sup>2</sup>, COMPOSÉ D'UN R+8 SUR UNE INFRASTRUCTURE DE 4 SOUS-SOLS. UN PROJET AU PLANNING AMBITIEUX, QUI COMPRENAIT UNE PAROI MOULÉE DE 240 M DE LINÉAIRE POUR UNE PROFONDEUR MAXIMUM DE 27 M, 31 TIRANTS, 55 POTEAUX PRÉ-FONDÉS À L'IMPLANTATION MINUTIEUSE POUR LE PARKING, AINSI QUE DES INJECTIONS DE REMPLISSAGE.

## UN IMMEUBLE À LA SITUATION IDÉALE

Ce futur immeuble, baptisé « Le Hub », accueillera des entreprises soucieuses de la vie professionnelle et personnelle de leurs collaborateurs (figure 1).

La localisation de cet édifice, en limite de la commune de Clichy (92), devrait satisfaire pleinement ses occupants par une implantation géographique optimisée au regard des axes des dessertes rayonnant dans son environnement immédiat :

1- Vue  
du projet.

1- View of  
the project.

- Construit face à la gare de Clichy - Levallois, l'idéal pour les salariés utilisant le réseau RER.
- Dans la perspective du « Grand Paris », l'attrait de sa situation n'en sera que renforcé.

## PLAN D'INSTALLATION PAROI MOULÉE



© SEFI-INTRAFOR

2

→ À quelques centaines de mètres, la Porte d'Asnières offre un axe routier privilégié avec le boulevard périphérique parisien.

→ La Porte d'Asnières dispose également de tous les transports en commun circulant dans la capitale : bus, métro et, dans un avenir proche, tramway.

→ Le centre commercial So Ouest, dans le périmètre immédiat accentue la notion d'emplacement idéal.

Tous ces moyens de locomotion et les commerces à proximité, accessibles aux futurs occupants, permettront de fidéliser les entreprises qui auront élu domicile au sein de cet immeuble.

Les 4 sous-sols projetés abritant les parkings seront consacrés, d'une part, aux véhicules des locataires du bâtiment et, d'autre part, à l'accueil d'un parking public, la ville de Levallois-Perret étant à l'écoute des difficultés de stationnement dans ces quartiers restructurés. Chaque parking aura de ce fait son entrée dédiée.

Maître d'ouvrage, le Groupe Marignan a confié les lots Gros-œuvre - Fondations - Terrassements au groupement d'entreprises Fayat Bâtiment Île-de-France (mandataire) / Sefi-Intrafor / Smtp. Sefi-Intrafor ayant plus particulièrement en charge les travaux de paroi mou-

**2- Plan d'installation Paroi Moulée.**

**3- Protection des agents SNCF côté voie « Fenwick ».**

**2- Diaphragm wall layout drawing.**

**3- Protection of railway personnel on the "Fenwick" path side.**

lée, barrettes pour poteaux pré-fondés, tirants, butons et bracons.

### PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

La parcelle concernée par la construction se situe au droit de la place du 8 Mai 1945 sur un ancien site appartenant à la SNCF, desservie par la rue Jean Jaurès, en sens unique vers la commune de Clichy.

La ville de Levallois-Perret a accordé le permis de construire de cet ouvrage

au promoteur BDP Marignan Immobilier (BMI), moyennant des conditions d'exécution contraignantes pour les entreprises.

Nous citerons principalement :

→ Aucune restriction de circulation sur la voie desservant le chantier.

→ Aucune gêne à la circulation des bus RATP empruntant l'artère Jean Jaurès.

→ Respect des horaires définis au sein de la charte environnementale de la Ville et du Marché : 8h-18h.

→ Un délai très court de réalisation, pour limiter la gêne aux riverains, d'où une conception « top and down ».

→ Une gestion des piétons au niveau de l'entrée chantier, usagers de la gare Clichy - Levallois, extrêmement nombreux aux heures de pointe.

→ Gestion du trafic « camions » lors du terrassement en taupe.

→ Le réaménagement de la place du 8 Mai 1945 lié aux dessertes du bâtiment.

L'emprise du chantier, d'environ 50 m par 70 m soit 3 500 m<sup>2</sup>, se caractérise au premier abord par un dénivelé important de 6 m avec une parcelle calée à 36,40 NGF au sud-est à 30,40 NGF au nord-ouest, place du 8 Mai 1945 (rue Jean Jaurès).

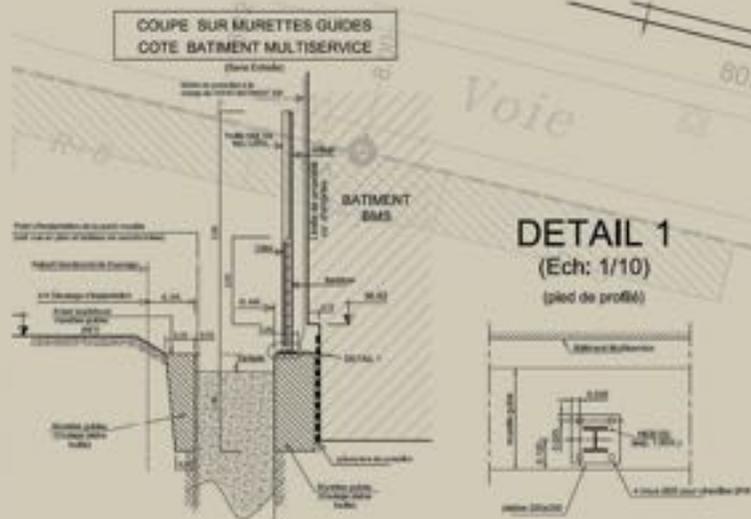
© SEFI-INTRAFOR



3



PROTECTION DU BÂTIMENT BMS PAR BÂCHES JOINTIVES



4a

4a



5

6

Ses limites se démarquent de la manière suivante :

- Au nord-est, le voisin « historique » SNCF, délimité par la « voie Fenwick ».
- Au sud-est, le voisin « historique » SNCF, délimité par le « bâtiment BMS », façade de vitres et de tôles d'habillage en acier laqué blanc.
- Au sud-ouest, en limite du pignon d'immeuble de bureaux, habillés de plaques de parement.
- Au nord-ouest, la zone des cantonnements au droit de la place du 8 Mai 1945.

Le périmètre de l'ouvrage souterrain sera constitué d'une paroi moulée, devant, d'une part, servir de soutènement aux côtés mitoyens à la SNCF (altimétrie à 36,50 NGF) et, d'autre part, servir d'enceinte relativement étanche afin de limiter les venues d'eau lors des terrassements en taupe.

La solution technique retenue, terrassement en taupe à l'abri d'une paroi moulée, avec une infrastructure basée sur des poteaux pré-fondés coulés dans les barrettes de fondation, permet de s'affranchir d'un butonnage classique par tirants ou par éléments métalliques.

Si la solution d'un terrassement à ciel ouvert entre les parois moulées n'était guère envisageable, il n'en demeure pas moins que l'impact visuel des travaux s'en trouve, par conséquent, minimisé vis-à-vis des riverains.

**LES TRAVAUX PRÉALABLES**

Comme bon nombre de projets à l'heure actuelle, la démarche environnementale est prépondérante avec un suivi en temps réel des critères énoncés dans le marché. Pour ce chantier, HQE Excellent est visé avec une certification BREEAM Very Good à la clé.

**4- Protection du bâtiment BMS par bâches jointives.**

**5- Production Paroi Moulée Zone Haute.**

**6- Production Paroi Moulée Zone Basse.**

**4- Protection of the BMS building with close-jointed waterproof sheets.**

**5- Upper-area diaphragm wall production.**

**6- Lower-area diaphragm wall production.**

**L'HISTORIQUE DU SITE**

La parcelle appartenait précédemment à la SNCF sur laquelle étaient édifiés quelques bâtiments fonctionnels, derrière un mur poids en façade.

Levallois-Perret est également connu pour avoir abrité au XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle une multitude de petites industries, poumon économique de la proche banlieue de Paris.

Malheureusement, les critères environnementaux de l'époque étaient loin d'être équivalents à ceux d'aujourd'hui, ce qui a généré une pollution des sols.

**DÉMOLITION ET POLLUTION**

Après une démolition des bâtiments à l'abandon, il a fallu créer deux plateformes de travail pour la réalisation de la paroi moulée tel que mentionné sur le plan d'installation (figure 2) :

**7- Perte de boue et remplissage en grave-ciment.**

**8- Avant et après injection de la base des remblais.**

**7- Loss of sludge and filling with cement treated base material.**

**8- Before and after grouting of the backfill base.**



- 1-** Une plateforme à 36,40 NGF sur 2 côtés pour le soutènement des locaux voisins.
- 2-** Une plateforme à 30,50 NGF sur le reste du projet.
- 3-** Une rampe entre les 2 plateformes. Ces travaux furent l'occasion de purger les anciennes fondations, les anciens réseaux et les obstacles divers pouvant interférer avec le forage de la paroi moulée et des barrettes pour les poteaux pré-fondés. Le diagnostic des sols a démontré l'existence de matières polluantes sur 8 m de profondeur selon des degrés de pollution divers. Il a alors fallu créer 3 fosses à déblais distinctes, de manière à gérer les déblais issus de la paroi moulée et des barrettes, vers des centres de stockage ISDI, ISDI+ et ISDND.

#### LA PROTECTION DES AVOISINANTS

Sur ce projet, deux côtés étaient particulièrement exigeants en matière de

protection vis-à-vis des travaux de fondations. Il s'agissait des deux côtés mitoyens avec la SNCF.

Le côté « voie Fenwick » était délimité par un muret surmonté par une grille ornementale. Cette voie sert d'accès aux salariés SNCF qui se rendent quotidiennement dans leurs locaux. Les surfaces étaient tellement optimisées que le muret séparatif a servi de murette-guide extérieure.

La grille a été préalablement déposée et un tunnel d'accès spécifiquement créé (figure 3) pour protéger les agents SNCF des projections diverses pouvant émaner du chantier lors de la réalisation des travaux de fondation : projection de boue de forage, projection de béton au coulage. Le côté « bâtiment BMS » était également très sensible, puisqu'il offrait à la benne de forage sa façade de vitres et de tôles laquées.

Pour limiter l'impact d'une benne sur cette façade, des profilés métalliques

de 2,50 m de haut ont été scellés sur les murettes-guides extérieures, espacés de 1,50 m avec des madriers entre ces profilés.

La totalité du bâtiment a été couverte d'une bâche pour le protéger des projections de boue (figure 4).

#### UN PHASAGE PARTICULIER

La configuration du site avec le dénivelé important a contraint Sefi-Intrafor à phaser distinctement la réalisation de la paroi moulée.

Dans un premier temps, la « partie haute » du projet a été réalisée, avec une paroi moulée servant de soutènement sur les deux côtés mitoyens à la SNCF. Dans un deuxième temps, la « partie basse » a été réalisée, après terrassement. Le phasage plus précis de cette opération se décrit de la façon suivante :

**Partie haute** (figure 5) :

- 1-** Réalisation de la plateforme de travail pour la paroi moulée.

- 2-** Réalisation des murettes-guides de la paroi moulée.

- 3-** Réalisation de la paroi moulée en épaisseur 82 cm profondeur 27 m.

- 4-** Enlèvement des murettes guides et recépage.

- 5-** Poutre de couronnement.

- 6-** Terrassement phase 1 et rabotage.

- 7-** Réalisation des tirants d'ancrage et boutons pour la partie soutènement.

- 8-** Terrassement phase 2 et rabotage.

**Partie basse** (figure 6) :

- 9-** Réalisation de la plateforme de travail pour la paroi moulée et suppression de la rampe.

- 10-** Réalisation des murettes guides de la paroi moulée et des barrettes.

- 11-** Réalisation de la paroi moulée en épaisseur 62 cm profondeur 21 m puis des barrettes en 102 cm profondeur 24 m pour les poteaux pré-fondés.

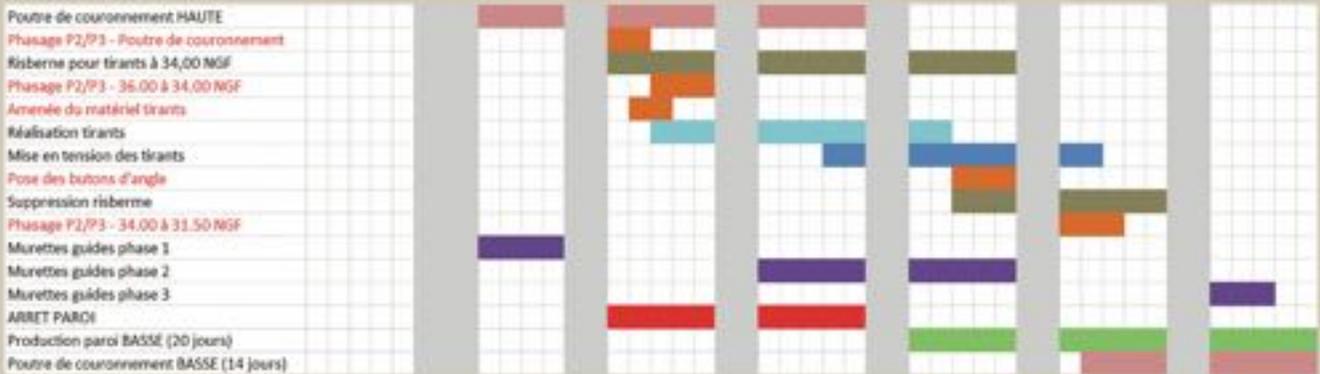
- 12-** Enlèvement des murettes guides et recépage.

- 13-** Poutre de couronnement. ▷





## PLANNING GESTION CO-ACTIVITÉ



© SEFI-INTRAFOR

12

Cette méthodologie créait une co-activité gros-cœuvre/terrassements/fondations avec un délai de réalisation qu'il était difficile d'optimiser sans compter le démontage à l'avancement des bracons.

Afin de ne pas générer de co-activité, le groupement Fayat Bâtiment / Sefi-Intrafor a proposé de remplacer les bracons par des tirants provisoires. L'avantage premier était donc d'inclure cette phase durant la réalisation de la paroi moulée en zone basse, en laissant la maîtrise du délai à Sefi-Intrafor. Cette solution (figure 11), acceptée par la SNCF - propriétaire des tréfonds, était d'autant plus adaptée que deux tirants permanents, au droit du panneau P3, étaient imposés pour le soutènement au niveau de la rampe du parking. 31 tirants ont donc été réalisés, sur une plateforme intermédiaire à 34,50 NGF, pendant la phase de réalisation de la paroi moulée en zone basse.

**12- Planning gestion co-activité.**

**13- Poteau type.**

**14- Pré-fondés, un site encombré.**

**12- Concurrent work management schedule.**

**13- Typical column.**

**14- Plunge columns, on a cluttered site.**

### LE PHASAGE FONDATIONS - TERRASSEMENT

Comme vu précédemment, la configuration du site exigeait la création de deux plateformes au démarrage des travaux : la plateforme haute, qui maintenait la stabilité des ouvrages SNCF voisins et la plateforme basse,

qui devait permettre l'accès au chantier. La desserte de la plateforme haute était assurée par une rampe intermédiaire. Le plan d'installation de Sefi-Intrafor montre un site exigu où les zones de stockage des cages d'armatures par exemple ne sont pas matérialisées en raison du pianotage quotidien de la zone de forage.

Ajouter des tâches de terrassement et de gros-cœuvre sur ce site particulièrement confiné fut l'objet d'une gestion quotidienne de la logistique de production. Le challenge fut de maintenir l'activité paroi moulée le plus longtemps possible en minimisant l'arrêt de l'atelier, puisque le terrassement de la plateforme haute et de la rampe entraînait des mouvements de terre importants, incompatibles avec le forage en continu de la paroi moulée. Des zones d'interventions ont été définies pour maintenir l'activité de chaque cotraitant, tout en respectant le planning contractuel.

### LES POTEAUX PRÉ-FONDÉS

L'autre volet principal « fondations » de ce projet consistait à mettre en place 55 poteaux pré-fondés scellés dans 55 barrettes, disposées sur l'ensemble de la fouille selon une trame architecturale définie, avec une tolérance d'implantation rigoureuse imposée par la répartition au plus juste des places de parking.

Dans le cadre d'une synergie au sein du Groupe Fayat, Fayat Bâtiment Île-de-France était en charge de l'étude, de la préfabrication et de la livraison des poteaux pré-fondés (figure 13) et Sefi-Intrafor en assurait la pose et le réglage après le forage des barrettes.

Les poteaux et les barrettes sont composés de béton haute performance pour recevoir la superstructure tout en réduisant leurs dimensions en fonction du design architectural :



© SEFI-INTRAFOR

13



14



© SEFI-INTRAFOR

### 15- Calage d'un poteau avant remplissage annulaire.

### 15- Adjusting a column before annular filling.

- Poteaux : C 60/75 à C 80/95 en XA3 ;
- Barrettes : C 35/45 en XA2.

La longueur des poteaux, visibles sur la hauteur des 4 sous-sols, était de l'ordre de 14 m pour une section de 45x90 cm pour les plus conséquents. Ces envergures ne permettaient pas de stocker un nombre important d'unités sur le site.

Les conditions de réalisation de la paroi moulée ont été reconduites pour les poteaux pré-fondés, c'est-à-dire :

- 1- Un planning tendu ;
- 2- Une logistique de livraison des poteaux au jour et à l'heure près avec livraison matinale impérative ;
- 3- Une gestion de la co-activité (figure 14).

La cadence était de 2 pré-fondés par jour avec forage, bétonnage et pose. Les principales tâches liées aux pré-fondés :

- Forage de la barrette 2,80x1,02x 24,00 m maximum ;
- Dessablage ;
- Équipement de la cage d'armatures de la barrette (arase à -15,00 m) ;
- Bétonnage de la barrette (arase à -15,00 m) ;
- Pose et réglage du poteau pré-fondé ;
- Le lendemain : remplissage de l'espace annulaire et retrait des équipements de calage (figure 15).

Soucieux de réduire le délai supplémentaire lié aux injections non prévues, la co-activité fut également de mise entre fondations et gros-œuvre.

L'ordre de réalisation des barrettes et pré-fondés fut donc tributaire des zones de libération pour le gros-œuvre, avec en priorité l'emprise dédiée à la seule grue à tour du chantier. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Bpd Marignan Immobilier  
**MAÎTRE D'ŒUVRE CONCEPTION :** Dgm & Associés  
**MAÎTRE D'ŒUVRE D'EXÉCUTION :** Imogis  
**MAÎTRE D'ŒUVRE GÉOTECHNIQUE :** Géotechnique Appliquée  
**BUREAU DE CONTRÔLE :** Btp Consultants  
**COORDINATEUR SPS :** Ls Conseils

POUR LE GROUPEMENT D'ENTREPRISES :

**GROS ŒUVRE / CHARPENTE MÉTALLIQUE / MAÇONNERIES / RABATTEMENT DE NAPPE :**  
**LOT 11 - Fayat Bâtiment Île-de-France (Mandataire)**  
**TERRASSEMENTS GÉNÉRAUX / DÉPOLLUTION / DÉMOLITION :**  
**LOT 04 - Smtp**  
**PAROIS MOULÉES / PRÉ-FONDÉS / SOUTÈNEMENTS PARTICULIERS :**  
**LOT 10 - Sefi-Intrafor**

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**INJECTIONS :** 216 forages pour 1 200 m<sup>3</sup> d'imprégnation

**TIRANTS :** 31 unités dont 2 permanents

**PAROI MOULÉE :**

- 6 000 m<sup>2</sup> de forage (60% en 82 cm et 40% en 62 cm)
- 4 500 m<sup>3</sup> de béton
- 380 t d'armatures

**BARRETTES :** 3 500 m<sup>2</sup> de forage en 102 cm, 1 500 m<sup>3</sup> de béton, 120 t d'armatures

**POTEAUX PRÉ-FONDÉS :** 55 unités de 14 m de long

**VOLUME DE TERRASSEMENT :** 70 000 m<sup>3</sup>

## ABSTRACT

### THE HUB IN LEVALLOIS-PERRET, A STRATEGIC LOCATION IN THE CENTRE OF A RAPIDLY EXPANDING TOWN

CHRISTOPHE ALLEMOZ, SEFI-INTRAFOR

**In the centre of Levallois-Perret (Hauts-de-Seine), less than 500m from the gates of Paris, Sefi-Intrafor executed all the special foundation works for an office building with a floor space of 15,000 m<sup>2</sup>, consisting of a ground floor plus eight levels on an infrastructure of four basement levels. The ambitious project schedule comprised a diaphragm wall 240m long with a maximum depth of 27m, 31 tie anchors, 55 plunge columns laid out meticulously for the car park, and filling grout injection under pressure, not initially planned. □**

### EL HUB DE LEVALLOIS-PERRET, UNA UBICACIÓN ESTRATÉGICA EN PLENO CENTRO DE UNA CIUDAD EN DESARROLLO

CHRISTOPHE ALLEMOZ, SEFI-INTRAFOR

**En pleno centro de Levallois-Perret (departamento de Hauts-de-Seine), a menos de 500 m de las puertas de París, Sefi-Intrafor ha realizado el conjunto de los cimientos especiales de un edificio de oficinas, de una superficie de 15 000 m<sup>2</sup> y ocho pisos sobre una infraestructura de 4 sótanos. Un proyecto con una planificación ambiciosa, que incluía una pantalla continua de 240 m lineales y una profundidad máxima de 27 m, 31 tirantes, 55 postes pre-cimentados para el parking, que exigieron una implantación minuciosa, así como inyecciones de relleno a presión no previstas inicialmente. □**

# Lundi, 7h00, mon véhicule ne démarre plus.

- Mon chantier attendra.
- J'emprunte la voiture de ma femme.
- Je reste serein : mon assureur SMABTP a tout prévu !



## Franck, conseiller en assurance SMABTP

« Quand un problème arrive à l'un de nos clients, ce n'est jamais celui qu'il imaginait ! Heureusement notre savoir-faire nous permet d'anticiper pour lui : nous avons déjà tout envisagé. C'est pour cela que nous apportons à nos assurés la meilleure solution pour l'entreprise, leurs dirigeants et leurs collaborateurs. »

Fort de plus de 150 ans d'expérience, SMABTP assure les professionnels du BTP. Ses experts vous accompagnent à chaque instant.

Par exemple, en cas de sinistre auto, vos collaborateurs et vous-même bénéficiez d'une **assistance performante et complète**, avec la fourniture d'un véhicule de remplacement et l'expertise à distance. Tout ce dont vous avez besoin pour protéger votre activité !

**Notre métier : assurer le vôtre**

Retrouvez-nous sur  
[www.groupe-sma.fr](http://www.groupe-sma.fr)

**ACTIVITÉ** Responsabilité décennale - Responsabilité civile  
Dommages en cours de travaux - Protection juridique

**BIENS PROFESSIONNELS** Engins de chantier - Locaux - Véhicules

**DIRIGEANTS ET SALARIÉS** Couverture des engagements sociaux - Épargne  
Prévoyance - Retraite collective et individuelle

**SMABTP**  
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

SMABTP, société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics, société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances - RCS PARIS 775 684 764 - 114 avenue Emile Zola - 75739 PARIS Cedex 13

# FONDATEMENTS DE LA GRANDE HALLE À LYON (69)

AUTEURS : ALBAN NICOLINI CHEF DE SECTEUR INJECTION/CONFORTEMENT/TRAVAUX FLUVIAUX ET MARITIMES G.T.S. -  
PIERRE LAUMAIN RESPONSABLE D'AGENCE G.T.S. - SÉBASTIEN PARTOUCHE RESPONSABLE D'EXPLOITATION G.T.S.

LA GRANDE HALLE, ANCIEN SITE INDUSTRIEL DE 20 600 M<sup>2</sup>, EST SITUÉE AU CŒUR DU QUARTIER GERLAND À LYON. UNE FOIS RÉHABILITÉ, CE BÂTIMENT REMARQUABLE SERA RELIÉ À DEUX BÂTIMENTS NEUFS DÉDIÉS AUX BUREAUX. L'ANCIENNE HALLE DE STOCKAGE, DONT LES FAÇADES ET UNE PARTIE DE LA CHARPENTE ONT ÉTÉ CONSERVÉES, ACCUEILLERA LE FUTUR RESTAURANT D'ENTREPRISE ET UN PATIO (FIGURES 1 ET 2). LA SOLUTION MULTITECHNIQUE DE G.T.S. (FILIALE DE NGE) A ÉTÉ RETENUE PAR GECINA POUR LA RÉALISATION DE L'ENCEINTE ÉTANCHE DU PARKING CONSTITUÉ DE DEUX NIVEAUX DE SOUS-SOL.



1 ©

## RÉHABILITATION D'UN BÂTIMENT REMARQUABLE : LA GRANDE HALLE

Située au cœur de Lyon dans le quartier de Gerland, la Grande Halle doit accueillir les futurs bureaux de EDF SEPTEN (Le centre d'ingénierie nucléaire d'EDF). Sur les 20 600 m<sup>2</sup>, le nouveau projet immobilier a été repensé par Gecina, assisté des Maîtres d'œuvre RR&A et D3 Architectes.



2 © DR

1- Vue en 3D  
de la future  
Grande Halle.

2- Vue en 3D de  
la future Grande  
Halle côté jardin.

1- 3D view  
of the future  
Grande Halle.

2- 3D view of  
the future  
Grande Halle,  
garden side.



### PLAN D'IMPLANTATION DES SOUTÈNEMENTS EN RIDEAU DE PALPLANCHES ET PAROIS BERLINOISES



**3- L'ancienne halle de stockage sera réhabilitée pour devenir La Grande Halle.**

**4- Les façades et la charpente ont été conservées.**

**5- Réalisation de la paroi berlinoise ancrée (1<sup>er</sup> plan) et du rideau de palplanches.**

**6- Plan d'implantation des soutènements en rideau de palplanches et parois berlinoises.**

**3- The old storage hall will be renovated to become the Grande Halle.**

**4- The facades and framework have been preserved.**

**5- Execution of the anchor Berlin-type retaining wall (foreground) and the sheet piling curtain.**

**6- Layout drawing of sheet piling curtain retaining structures and Berlin-type retaining walls.**

Au final, deux bâtiments de six niveaux viendront encadrer l'ancienne halle. Cette dernière sera également réhabilitée, pour devenir le restaurant d'entreprise doté d'un patio (figures 3 et 4). Dans le cadre de la réhabilitation de cet ancien site industriel, un parking souterrain est prévu sur deux niveaux de sous-sol, avec un accès direct par un ascenseur dans le bâtiment. Sur cette opération de grande ampleur, G.T.S. s'est vue confier la réalisation des soutènements en paroi berlinoise tirantée et d'une enceinte étanche constituée :

- D'un rideau de palplanches pour l'étanchéité latérale (tiranté ou non selon les hauteurs soutenues) ;
- D'un bouchon injecté pour l'étanchéité verticale.

Pour contrecarrer l'effet des sous-pressions d'eau, l'entreprise a aussi été missionnée pour la réalisation de micropieux dans les parties d'ouvrage de hauteur réduite.

### PROBLÉMATIQUE GÉOTECHNIQUE ET DIFFÉRENTES CONTRAINTES RENCONTRÉES

#### CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Le site en plein cœur de la ville de Lyon présentait un contexte géotechnique relativement homogène :

- Remblais de tête (marché spécifique) ;
- Alluvions du Rhône ;
- Nappe présente à 4 m par rapport au niveau 0 du bâtiment.

#### CONTRAINTES DU SITE

Comme souvent, l'environnement urbain était contraignant vis-à-vis des horaires de travail, des nuisances sonores et des émissions de poussières, avec interdiction de travaux postés pour les tâches bruyantes. ▷



**7- Vibrofonçage du rideau de palplanches à l'extérieur du bâtiment.**

**8- Accès réduit pour les palplanches approvisionnées en tronçons de 3 m.**

**9- Battage du rideau de palplanches à l'intérieur du bâtiment.**

**7- Vibropiling of the sheet piling curtain outside the building.**

**8- Restricted access for sheet piling, supplied in 3m sections.**

**9- Pile driving for the sheet piling curtain inside the building.**

7 © VINCENT RAMET

Le planning des travaux géotechniques, contenu sur quatre mois, était très tendu. Cette contrainte a imposé un phasage et un enchaînement des différentes techniques très minutieux. Pendant le déroulement des travaux, d'autres contraintes de planning ont été induites par des interfaces fortes avec différents lots dont celui de la réalisation des puits de pompage.

L'ancienne halle étant conservée, une méthodologie spécifique a dû être mise en œuvre pour réaliser les travaux de battage et de bouchon injecté, dans la périphérie proche et dans l'enceinte de cet ancien bâtiment.

**OFFRE GLOBALE G.T.S. RÉPONDANT, À L'ENSEMBLE DES PROBLÉMATIQUES DU PROJET**

G.T.S. a mobilisé plusieurs de ses secteurs d'activité en fonction des besoins du planning de chantier.

Le pilotage global du planning a mobilisé selon l'avancement du chantier les personnels et matériels nécessaires à la bonne réalisation de chaque phase de travaux.

Ainsi, différentes phases de chantier se sont succédé au cours de ces quatre mois d'intervention :

→ La préparation du terrain ;

→ L'installation de la base vie et des installations techniques d'injection (Montage d'une unité de production automatisée grosse capacité, composée d'une centrale de fabrication automatisée, de deux silos 50 m<sup>3</sup>, d'un bac de reprise et de 12 presses de traitement pilotées par un automate) ;

→ La réalisation de parois berlinoises ancrées (ancrages passifs), pour dégager l'emprise du niveau de sous-sol R-1 (au-dessus de la nappe) (figures 5) ;

→ La mise en œuvre des palplanches, pour dégager d'une part l'emprise

du niveau de sous-sol R-2 et assurer d'autre part l'étanchéité latérale de l'enceinte (en dessous de la nappe) ;

→ La mise en œuvre d'ancrages passifs en tête du rideau de palplanches ;

→ Le terrassement du niveau R-1 du futur parking ;

→ La réalisation de micropieux (forés tubés) pour contrecarrer les sous-pressions d'eau ;

→ La mise en œuvre par vibrofonçage de tubes à manchette pour réaliser le bouchon injecté ;

→ L'injection du bouchon étanche



8



9

© VINCENT RAMET



10

© G.T.S.

**10- Le vibrofonçage des tubes à manchettes est adapté à ce type de sol.**

**11- Délais réduits grâce au vibrofonçage des tubes à manchettes.**

**10- Vibropiling of tubes à manchettes is appropriate in this type of soil.**

**11- Shorter completion times thanks to vibropiling of tubes à manchettes.**

(injection du coulis de gaine, puis injection de traitement au coulis de ciment, puis injection de traitement au gel) ;

→ Le terrassement du niveau R-2 du futur parking.

#### ZOOM SUR LA MISE EN ŒUVRE DES PALPLANCHES

Les équipes sont intervenues par étapes selon les phases de réalisation de la berlinoise et des palplanches (figure 6) :

- Mise en œuvre des soutènements pour la réalisation des terrassements R-1 et R-2 (mise en œuvre de fers berlinois et de palplanches) ;
- Depuis la plateforme R-1 réalisation des soutènements pour la phase R-2 (mise en œuvre de palplanches) ;



11

© G.T.S.

- Travaux dans la Grande Halle (mise en œuvre de palplanches). Le soutènement a été réalisé au plus près des voiles béton. En fonction des contraintes dimensionnelles du gros œuvre, les palplanches et la berlinoise ont été calepinées au plus précis.

À chaque contrainte du site, le matériel a été adapté en collaboration entre l'équipe du chantier et celle du service Matériel G.T.S. À l'extérieur de la Grande Halle (figure 7), les équipes ont utilisé un vibrateur hydraulique à haute fréquence

variable, un marteau hydraulique et une grue télescopique sur pneus pour mettre en œuvre les profilés métalliques (poutrelles et palplanches). À l'intérieur de la Grande Halle (figures 8 et 9), les palplanches ont été mises en œuvre par battage au moyen d'un marteau trépidateur à air. Quant au moyen de levage de manutention, c'est une grue télescopique sur chenilles qui a été choisie. Pour cette partie du chantier, les palplanches ont été approvisionnées sur place en plusieurs tronçons (trois fois 3 m) pour être rabotées au fur et à mesure de leur mise en œuvre (rabotage par entures).

La manipulation de la flèche télescopique (au moment du positionnement de chaque palplanche) se déroulait sous le contrôle d'un autre collaborateur en contact radio avec le chauffeur de la grue. Peu de marge de manœuvre s'offrait aux opérateurs au niveau des poutres constitutives de la charpente en bois. Ces poutres, assurant le contreventement du bâtiment pendant la phase provisoire des travaux de gros œuvre et ne pouvaient en aucun cas être démontées.

#### ZOOM SUR LA RÉALISATION DU BOUCHON INJECTÉ

Le secteur Injection de G.T.S. a défini la composition du bouchon pour garantir le débit d'exhaure maximum de 80 m<sup>3</sup>/h lors de l'assèchement de la fouille par pompage, référence contractuelle qui était l'objectif de résultat fixé à G.T.S. par le marché de travaux. Pour arriver à cet objectif en tenant compte de la nature des sols rencontrés, G.T.S. a proposé la réalisation du dispositif d'injection selon une procédure particulière. ▷

## MAILLAGE DES 900 POINTS D'INJECTION

qui ont représenté 30 000 injections en comptant les différentes phases de traitement

**12- Maillage des 900 points d'injection qui ont représenté 30 000 injections en comptant les différentes phases de traitement.**

**13- Réalisation du bouchon injecté avec en arrière-plan l'unité de production du coulis.**

**14- Vue générale de la zone du bouchon injecté avec les différents points de traitement.**

**12- Meshing of the 900 grouting points which represented 30,000 grout injections, counting the various treatment phases.**

**13- Execution of the cement-grouted plug with, in the background, the grout production unit.**

**14- General view of the cement-grouted plug area with the various treatment points.**

Pour la mise en place des 900 points d'injection, les tubes à manchettes ont été mis en œuvre par vibrofonçage (figures 10 et 11) à l'extérieur de la Halle et par forage à l'intérieur de la Halle.

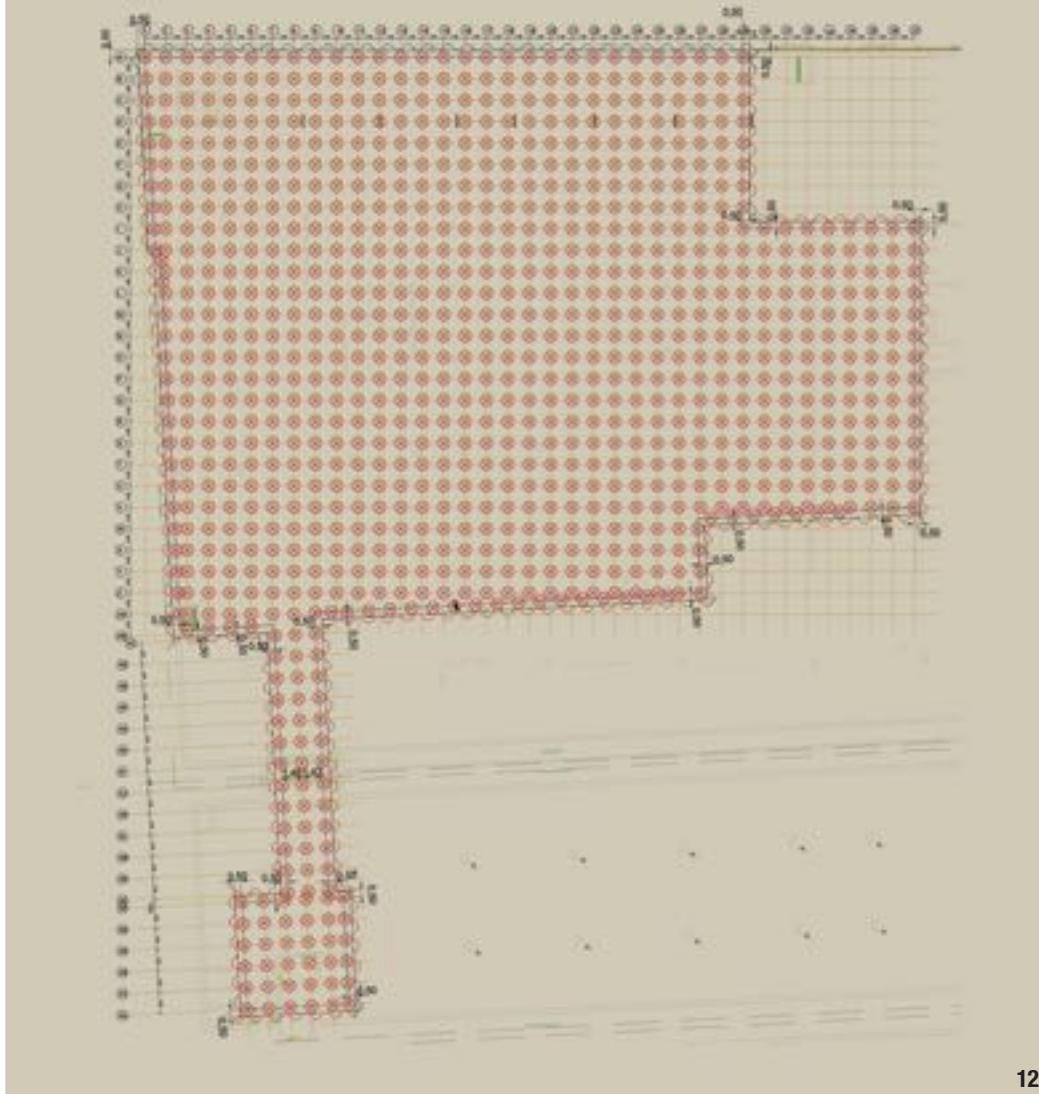
Cette technique de vibrofonçage est régulièrement éprouvée par G.T.S.

dans ce type de terrain. Elle permet de réduire considérablement le délai dédié à la mise en œuvre des tubes à manchettes et ainsi le délai global de l'opération.

Une fois les tubes à manchettes installés, les opérateurs ont procédé à la réalisation du coulis de gaine puis

à l'injection de traitement primaire au coulis de ciment. En toute fin, l'injection de traitement secondaire au gel était effectuée.

Au total les différents points d'injection et les différentes phases de traitement ont représenté plus de 30 000 injections réalisées (figure 12).



12

© D.F.R.



13



14

© VINCENT RAVET

Cette opération d'envergure a nécessité l'installation d'une unité de production automatisée imposante (figures 13 et 14), nécessaire pour la fabrication des coulis de ciment et des gels de traitement.

Douze presses de traitement pilotées individuellement (figures 15 et 16) assuraient ensuite l'acheminement sous pression du coulis jusqu'à chaque point d'injection.

Cette méthodologie d'injection, proposée par G.T.S., a permis d'atteindre l'objectif de 80 m<sup>3</sup>/h fixé par le marché (figures 17), et de rendre ainsi l'emprise de la fouille hors d'eau pour l'entreprise de gros œuvre.

## CONCLUSION

Forte de plus de 28 ans d'expérience et par la convergence de ses compétences techniques, G.T.S. a proposé une offre globale au maître d'ouvrage, résolvant l'ensemble des différentes problématiques géotechniques rencontrées sur ce projet.

Le maître d'ouvrage n'avait ainsi qu'un seul interlocuteur, ce qui lui garantissait notamment une opération rythmée, et



15 © VINCENT RAMET

**15- Poste de pilotage des injections de traitement.**

**16- Presses d'injection de traitement.**

**17- Pompage régulier de l'eau.**

**15- Treatment grouting control console.**

**16- Treatment grouting presses.**

**17- Regular water pumping.**



16

donc in fine le respect du planning global de cette phase de travaux.

Cette opération illustre la capacité de G.T.S. à apporter et à combiner plusieurs savoir-faire au service d'un seul ouvrage, en mobilisant tour à tour les services qualifiés en fonction des phases d'intervention.

Cette convergence multimétier est rendue possible par la présence au sein

de notre société d'un potentiel humain pluridisciplinaire et la possession d'un parc matériel diversifié d'une valeur de 50 M€.

L'entreprise avait déjà eu l'occasion de mettre en place cette organisation en phasage « multimétier » au service du chantier, sur des projets présentant des problématiques d'étanchéité similaires (Région parisienne, Grenoble...). □



17 © G.T.S.

## CHIFFRES-CLÉS

### PALPLANCHES AZ18-700 :

- Longueur de 8,35 à 12 m
- Tonnage : 200 t
- Surface traitée : 1 830 m<sup>2</sup>

### TIRANTS PASSIFS : 870 m

### MICROPIEUX : 180 ml ; Ø 200 mm

### BOUCHON ÉTANCHE :

- Tubes à manchettes mis en œuvre par vibrofonçage et forage : 8 000 m ; 900 Unités
- Traitement au coulis de ciment : 1 000 m<sup>3</sup>
- Traitement au gel : 400 m<sup>3</sup>

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Gecina

**MAÎTRES D'ŒUVRE :** RR&A et D3 Architectes

**ENTREPRISE DE TRAVAUX :** G.T.S. (filiale de NGE) mandataire lot 1

## ABSTRACT

### FOUNDATIONS OF THE GRANDE HALLE IN LYON

ALBAN NICOLINI, G.T.S. - PIERRE LAUMAIN, G.T.S. - SÉBASTIEN PARTOUCHE, G.T.S.

As part of the renovation of an old building, the Grande Halle in Lyon, G.T.S. (a subsidiary of NGE) constructed a sealed enclosure for the future car park. Various techniques were employed by G.T.S. to treat the various basement levels: retaining structure of sheet piling, cement-grouted plug and micropiles (absorbing underpressures) for the second basement level, and an anchored Berlin-type retaining wall for the level above the aquifer. Here, the special technical feature is the execution of the cement-grouted plug by vibropiling of the tubes à manchettes in order to comply with the pumping capacity of 80 m<sup>3</sup> per hour. This technique, already tried and tested on other projects by G.T.S. in this type of soil, substantially reduces project completion time. □

### CIMENTOS DE LA GRANDE HALLE EN LYON

ALBAN NICOLINI, G.T.S. - PIERRE LAUMAIN, G.T.S. - SÉBASTIEN PARTOUCHE, G.T.S.

En el marco de la rehabilitación de un edificio antiguo, la Grande Halle de Lyon, G.T.S. (filial de NGE) ha realizado una cámara estanca para el futuro aparcamiento. La empresa ha utilizado distintas técnicas para tratar los diferentes niveles de sótano: entibación con tablestacas, tapón inyectado y micropilotes (recuperación de las contra-presiones) para el nivel de sótano -2, y pantalla berlina anclada para el nivel situado encima del nivel freático. Aquí, la particularidad técnica reside en la realización del tapón inyectado mediante hincas por vibración de los tubos con manguitos para respetar el caudal de achicamiento de 80 m<sup>3</sup>/h. Una técnica ya probada en otras obras por G.T.S. en este tipo de suelo, que reduce considerablemente los plazos de ejecución. □



© PHOTOTHÈQUE BOTTE FONDATIONS

# FONDATEMENTS SPÉCIALES SUR LE PROLONGEMENT DE LA LIGNE 12 DU MÉTRO PARISIEN

AUTEURS : FRÉDÉRIC RENAUD, DIRECTEUR COMMERCIAL, BOTTE FONDATIONS - OLIVER HESSE, DIRECTEUR AGENCE PAROI MOULÉE, BOTTE FONDATIONS - CARLOS GUIMARAES, DIRECTEUR TRAVAUX, BOTTE FONDATIONS

**CONSTRUIRE DEUX NOUVELLES STATIONS DE MÉTRO AUTOUR D'UN TUNNEL EXISTANT EST UNE PROBLÉMATIQUE SINGULIÈRE. C'EST AUSSI UNE CONFIGURATION QUI A PERMIS LA MISE AU POINT D'UNE SOLUTION INÉDITE : UN CHANTIER DONT L'APPROVISIONNEMENT POUR LA FABRICATION DU BÉTON ET L'ÉVACUATION DES DÉBLAIS DE FORAGE SONT ASSURÉS EN DOUBLE FLUX PAR VOIE FLUVIALE, PUIS PAR POMPAGE DANS LE TUNNEL SUR UNE DISTANCE ALLANT JUSQU'À 1 200 M.**

## CONTEXTE GÉNÉRAL

Le projet de prolongement de la ligne 12 du métro parisien vise à relier Paris au secteur de la plaine St-Denis et à Aubervilliers. Il permettra un accès à Porte-de-la-Chapelle depuis Mairie-d'Aubervilliers en 10 minutes, ainsi qu'au centre de Paris et Saint-Lazare en 30 minutes. Mairie-d'Aubervilliers sera à terme en interconnexion avec la ligne 15 Nord du Grand Paris (figure 3). Le projet d'extension de la ligne 12 a été prévu en deux étapes.

La première étape réalisée entre 2008 et 2014 a consisté à réaliser un tunnel jusqu'à La-Courneuve, à construire et aménager la station Front-Populaire et à créer un accès supplémentaire à Porte-de-la-Chapelle. Dans ce cadre, Botte Fondations avait réalisé la paroi moulée et le radier injecté de la station Front-Populaire, l'accès pompier de Victor-Hugo et le puits Valmy de sortie du tunnelier à l'extrémité de la ligne. La deuxième étape du projet consiste

à construire et aménager deux nouvelles stations : Aimé-Césaire et Mairie-d'Aubervilliers.

Dans ce cadre, le groupement Chantiers Moderne Construction (mandataire), Dodin Campenon Bernard, Tpi, Botte Fondations est adjudicataire d'un lot comportant : les études d'exécution, les travaux de génie civil des deux stations, les accès aux stations, les ouvrages provisoires permettant notamment la circulation piétonne et routière.

**1 - Vue d'ensemble du chantier Mairie-d'Aubervilliers.**

**1 - General view of the Mairie-d'Aubervilliers site.**

## DESCRIPTIF

### DES OUVRAGES (figure 2)

La station Aimé Césaire est constituée de deux ouvrages : le puits de Stains ayant servi de puits de départ de tunnelier en phase 1 et son extension en paroi moulée de 83 m de longueur et de 18 à 13 m de largeur objet du présent projet. La paroi moulée de 1,20 m d'épaisseur descend à 43 m. Le fond de fouille est à 26 m de profondeur. Des colonnes de jet grouting assurent le raccordement entre les deux ouvrages.

2- Vue d'ensemble chantier Aimé-Césaire.

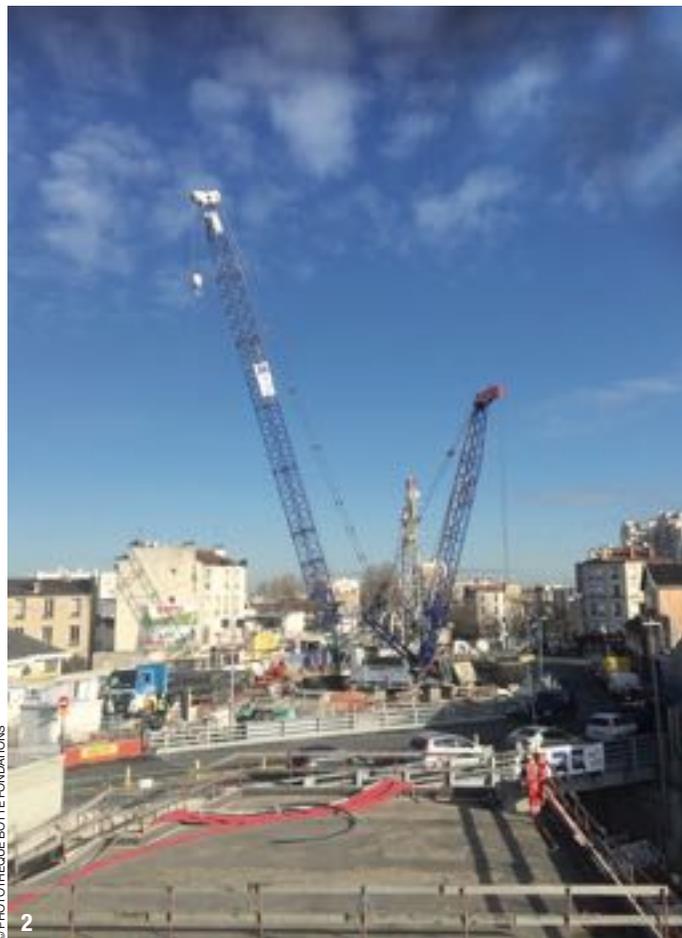
3- Plan des stations.

4- Coupe type sur Aimé-Césaire.

2- General view of the Aimé-Césaire site.

3- Drawing of the stations.

4- Typical cross section on Aimé-Césaire.



© PHOTO THÉRIQUE BOTTE FONDATIONS

Un bouchon injecté de 5 m d'épaisseur, entre 38 et 43 m de profondeur, permet de limiter les arrivées d'eau par le fond en phase travaux (figure 4).

La station Mairie-d'Aubervilliers est une enceinte en paroi moulée de 280 m de longueur, 22 m de largeur, 26 m de profondeur. La paroi moulée de 1 m descend à 36 m. Elle est prolongée par une jupe injectée de 16 m de hauteur afin de limiter les venues d'eau en phase travaux (figure 5).

Ces deux stations sont prévues réalisées en taube sous la dalle de couverture avec un lit de butons métalliques provisoires intermédiaires. La stabilité en phase définitive est assurée par quatre niveaux de dalle : radier voûte, salle des billets, salle d'accueil et dalle de couverture.

### CONTEXTE GÉOLOGIQUE

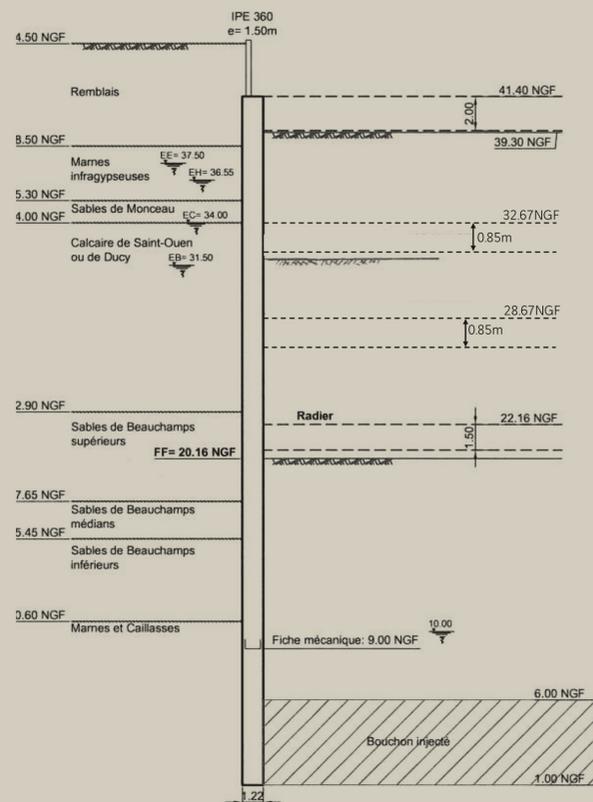
Les horizons géologiques successivement rencontrés sont constitués de remblais, Marne-Infragypseuse, Calcaire de Saint-Ouen, Calcaire de Ducy, Sables de Beauchamp supérieurs, Sables de Beauchamp médians, Sables de Beauchamp inférieurs, Marnes et Caillasse et Calcaire grossier. La nappe phréatique se situe à environ 6 m de profondeur.

## PLAN DES STATIONS



- ligne M12 en service
- prolongement M12
- futures stations M12 (en cours de réalisation)
- ouvrages annexes M12 (en cours de réalisation)

## COUPE TYPE SUR AIMÉ-CÉSAIRE



© PHOTO THÉRIQUE BOTTE FONDATIONS

COUPE TYPE SUR MAIRIE-D'AUBERVILLIERS

La présence de vides de dissolutions dans les Sables de Beauchamp et dans les Marnes et Caillasses a imposé un prétraitement systématique au droit des parois moulées pour éviter les problèmes de perte 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.

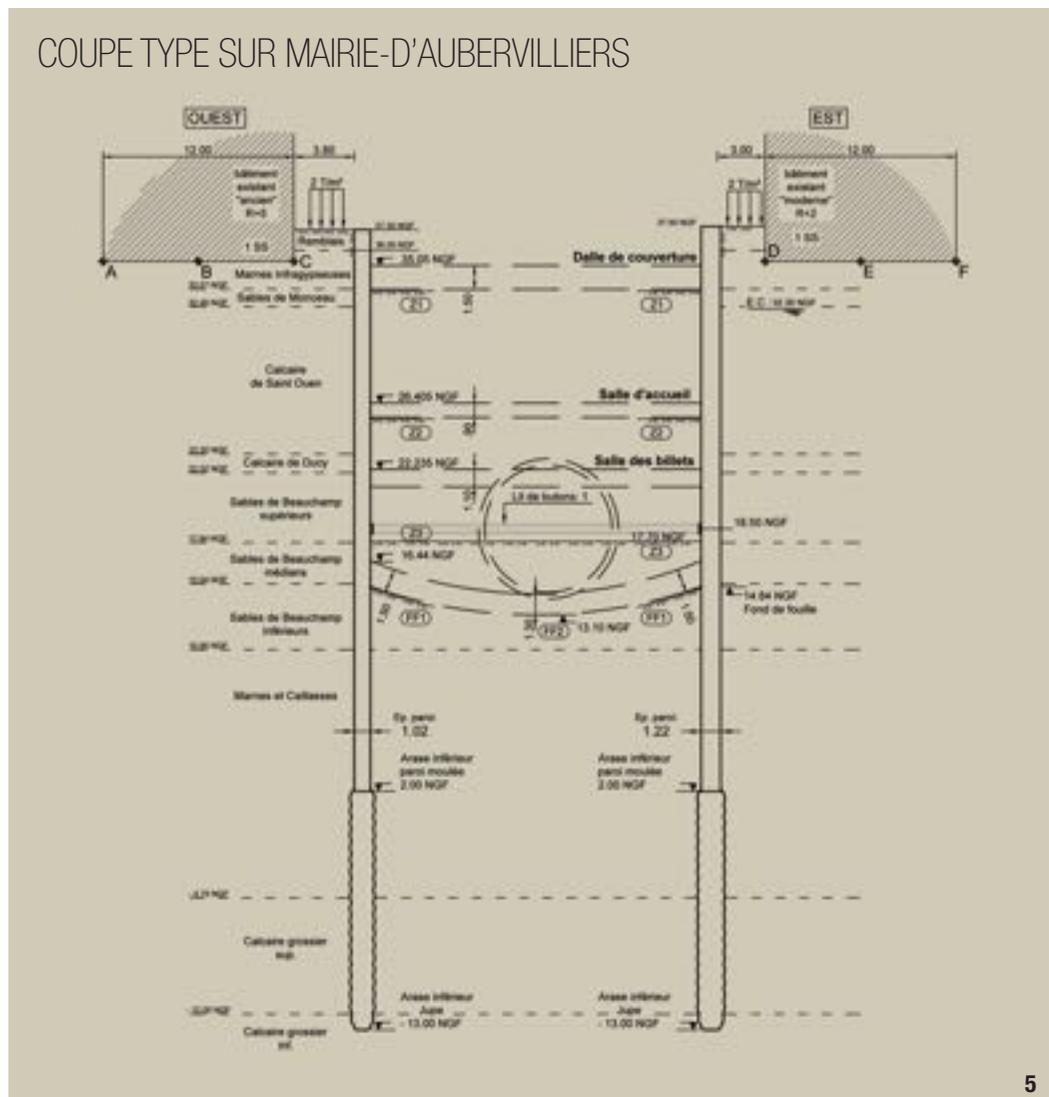
**PHASAGE COMPLEXE POUR UN CHANTIER EN MILIEU URBAIN DENSE**

Les deux stations à réaliser se situent dans un contexte urbain particulièrement dense. Le maintien de la circulation sur le Boulevard Victor-Hugo, artère principale d'Aubervilliers, et la préservation de l'activité autour de la mairie sont des contraintes majeures du projet. Sur la station Aimé-Césaire, la mise en place d'un autopont du type « Viaduc Métallique Démontable » permet de détourner la circulation au-dessus du puits existant et de libérer l'emprise chantier. Côté station Mairie, le projet est beaucoup plus complexe. Pour maintenir l'activité du marché fréquenté par environ 5000 personnes 3 jours par semaine, l'accès aux commerces, aux habitations et la circulation routière, le chantier est une succession de phases et d'emprises. Un basculement intégral de chaussée sépare la réalisation des travaux de fondations d'un côté puis de l'autre de l'avenue. Des berlinoise provisoires visent à réduire les emprises du chantier et permettent de maintenir les cheminements piétons et la circulation routière au droit des terrassements de réalisation des dalles de couvertures.

**UN CHANTIER ENVIRONNEMENTAL MODÈLE**

Conscient de l'enjeu environnemental fort sur la vie du quartier, le groupement a mis au point une solution visant

à limiter au maximum l'impact du chantier par la suppression de la majorité des camions. Contrairement aux projets de métro classiques où le tunnel est réalisé après les enceintes des stations, les deux stations sont ici réalisées autour du tunnel déjà en place. Cette configuration est à l'origine d'une des singularités du projet : un projet sans toupies béton, sans camions de déblais de forage et sans camions de déblais de terrassement ! En effet, dès la phase d'appel d'offre le groupement a travaillé sur une solution visant à faire passer ces flux par le tunnel existant (figure 6). Si l'accès au tunnel par l'ouvrage existant est direct côté canal Saint-Denis,



5

© PHOTO THÉRIQUE BOTTE FONDACTIONS

5- Coupe type sur Mairie-d'Aubervilliers.

6- Entrée du tunnel.

7- Vue d'un puits de connexion depuis le tunnel.

5- Typical cross section on Mairie-d'Aubervilliers.

6- Tunnel entrance.

7- View of a connection shaft from the tunnel.

il a fallu aménager trois puits de communication avec le tunnel au droit du site de réalisation de la station Mairie-d'Aubervilliers. Chaque puits d'environ 15 m (distance entre le terrain naturel et l'extrados du tunnel) est un pieu foré tubé de 2 m de diamètre injecté au contact. Les voussoirs ont été découpés par carottage et étanchés par injection de résine (figure 7). Concernant les flux pour le forage de la paroi moulée tout d'abord : la centrale à boue a été montée sur les berges du canal Saint-Denis (figure 8). La boue de forage emprunte le tunnel sur une distance d'environ 1100 m, remonte par un des trois puits de communication avec la surface et alimente le forage.



6



7

© PHOTO THÉRIQUE BOTTE FONDACTIONS

**8- Plan d'installation de la centrale à béton et de la centrale à boue sur le quai.**

**9- Pompe de relai béton dans le tunnel.**

**10- Cutter BC40 sur MC 96.**

**11- Convoyeurs de chargement et déchargement des péniches.**

**8- Layout plan of the concrete mixing plant and slurry mixing plant on the platform.**

**9- Concrete transfer pump in the tunnel.**

**10- BC40 cutter on MC 96.**

**11- Conveyors for loading and unloading the barges.**



© PHOTO THÉQUE BOTTE FONDATIONS

Les déblais de forage du cutter empruntent le chemin inverse du forage à la centrale où ils sont traités. Pour ce, la pompe du cutter et des pompes relais dans le tunnel sont nécessaires. Un dispositif de 5 lignes de conduites de boue est installé (soit environ 5 km de conduites).

Concernant le béton, les moyens mis en œuvre sont également très importants. La production est assurée par deux centrales de grande capacité chacune équipé d'un malaxeur de 3 m<sup>3</sup>. Chaque centrale alimente une conduite par une pompe de départ et deux pompes relais

dans le tunnel. Pas moins de 7 pompes à béton (dont une de secours) permettent ainsi d'acheminer jusqu'à 70 m<sup>3</sup> de béton par heure jusqu'au site de la mairie par le tunnel, de le remonter de 22 m jusqu'à la surface par un puits et de l'acheminer jusqu'au panneau bétonné. En bout de ligne, un flexible sur enrouleur motorisé fait office de colonne de bétonnage.

Au plus loin, un panneau de 450 m<sup>3</sup> a ainsi été bétonné à 1,2 km de la centrale.

La mise au point d'une formulation adaptée, avec notamment une rhéologie

de 6 heures, a rendu possible cette performance (figure 9).

Des péniches de 600 t approvisionnent la centrale à béton en granulats et repartent chargées des déblais de forage. Chargement et déchargement se font par un dispositif de convoyeurs (figure 11).

Ce principe sera également mis en œuvre pour l'évacuation des déblais de terrassement des stations (une bande transporteuse parcourra le tunnel) et pour la réalisation du génie civil.

C'est environ 30 000 rotations de poids lourds dans un environnement urbain particulièrement dense qui seront ainsi évitées à terme. Les conséquences positives sont importantes non seulement sur le trafic mais également en terme de bruit.

Les efforts pour limiter les nuisances sonores ont également porté sur le matériel utilisé avec le choix de machines récentes et insonorisées (c'est le cas notamment du porteur lourd MC96) (figure 10).

Enfin, les enrouleurs de bétonnage ont permis d'éviter les traditionnelles et bruyantes manutentions de colonnes de bétonnage. Le chantier a ainsi pu respecter les seuils acoustiques imposés mesurés en temps réel. ▷



© PHOTO THÉQUE BOTTE FONDATIONS



© PHOTO THÉQUE BOTTE FONDATIONS



Pour compléter le volet environnemental du projet, un tiers des panneaux de paroi moulée de la station Mairie est équipé en géothermie. La prise en compte des contraintes thermiques dans le calcul du ferrailage est à ce titre un exercice intéressant.

**LES INJECTIONS**

Entre le prétraitement systématique au droit des parois, la jupe injectée sur Mairie-d'Aubervilliers et le radier injecté sur Aimé-Césaire, les problématiques d'injection ont été multiples.

Les plans de tirs de forage tiennent compte des phasages de libération d'emprise et de la présence du tunnel (figure 13).

Sur Aimé-Césaire tout particulièrement, la présence du tunnel impose la réalisation du radier injecté avant la paroi moulée.

Plusieurs techniques d'injection sont utilisées : trou ouvert dans les calcaires et tube à manchettes dans les Marnes et Caillasses (figure 12).

**CONGÉLATION POUR RÉALISATION DES TYPANS**

Si la présence du tunnel est un atout pour une solution « sans camions », c'est une contrainte pour la réalisation des 3 tympans des stations (le tympans sur l'extension de l'ouvrage existant de la station Aimé-Césaire et les deux tympans de la station Mairie-d'Aubervilliers).

En effet la construction du voile autour du tunnel dans les Sables de Beauchamp et sous charge d'eau est une difficulté du projet (figure 14).

La solution retenue consiste à construire une paroi moulée au-dessus et de part et d'autre du tunnel, puis d'intervenir à l'abri d'un massif de sol congelé.

**12- Atelier de forage d'injection.**

**13- Exemple de tir d'injection pour radier injecté.**

**12- Grout injection drilling equipment.**

**13- Example of grouting holes distribution for grouted plug.**

Pour ce, des forages auréolaires réalisés depuis le tunnel, sous sas compte tenu de la charge d'eau (jusqu'à 18 m de charge), permettent la mise en place de sondes de congélation. La circulation de saumure à -30°C dans ces sondes va permettre de développer et entretenir un massif de sol congelé à l'abri duquel le terrassement pourra être effectué et les voiles bétons pourront être coulés (figure 15).

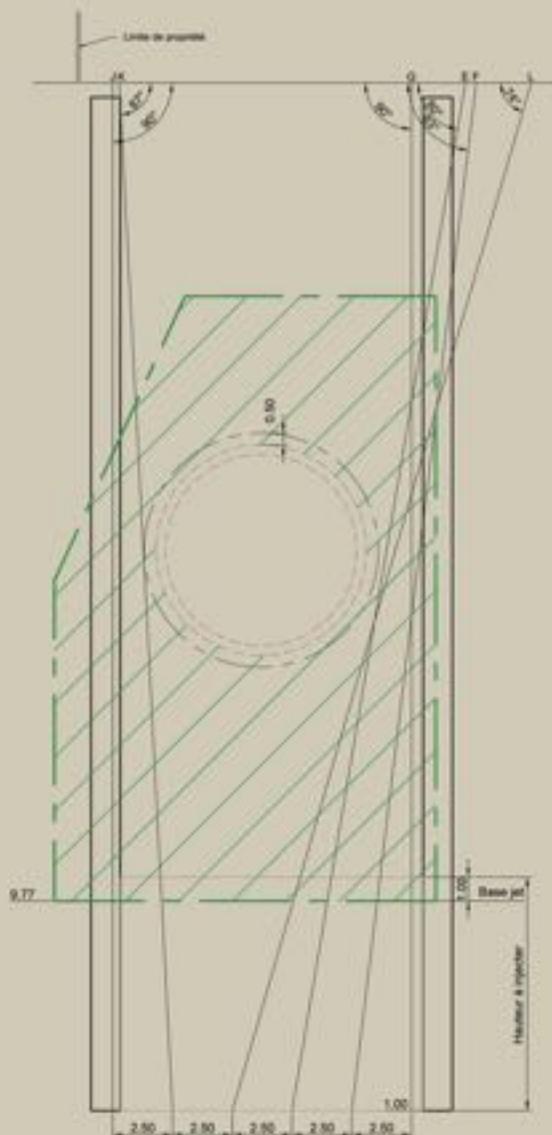
**SUIVI OBSERVATIONNEL**

Le chantier fait l'objet d'une instrumentation importante. Tous les bâtiments environnants sont équipés de cibles auscultées par laser en temps réel. 6 panneaux de paroi moulée sont équipés d'inclinomètres avec acquisition automatique et suivi en temps réel.

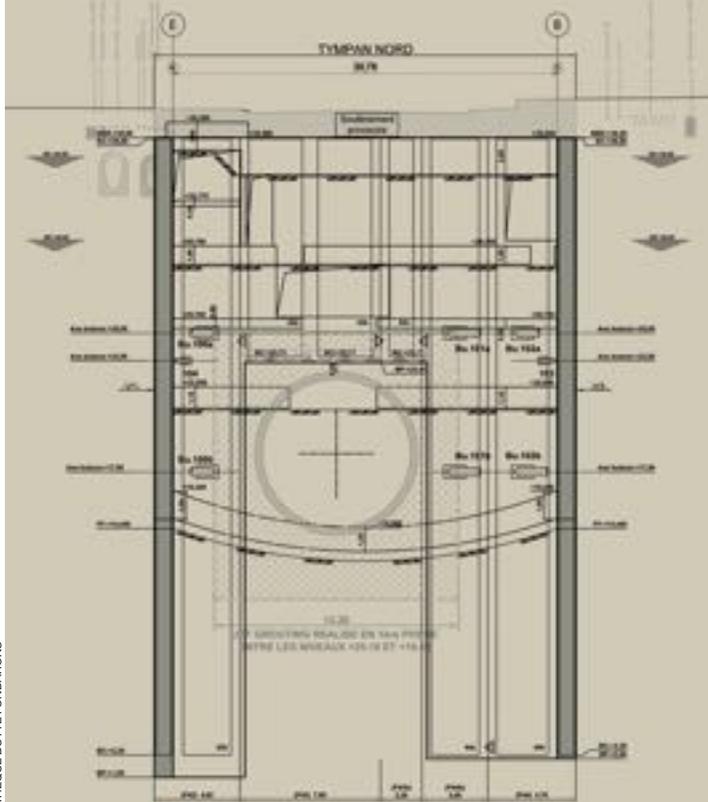
**LES MOYENS MIS EN ŒUVRE**

Les travaux ont nécessité la mise en œuvre de moyens importants. Pour la paroi, en travail à deux postes :  
→ Un cutter BC40 porté par un MC96 insonorisé ;

**EXEMPLE DE TIR D'INJECTION POUR RADIER INJECTÉ**

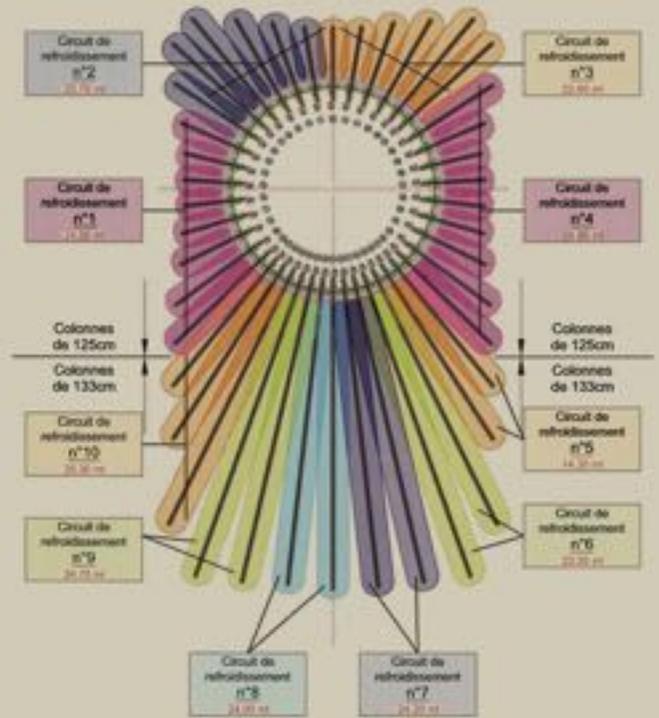


## COUPE TYPE D'UN TYMPAN



## PRINCIPE DE CONGÉLATION D'UN TYMPAN

Aimé Césaire - Ligne B



© PHOTO THÉÂTRE BOTTE FONDATIONS

14

15

- Un atelier de benne Stein sur porteur Liebherr 855 ;
  - Une grue de manutention 8100 Liebherr ;
  - Une centrale à boue de 1 200 m<sup>3</sup> de stockage, un dessableur de 450 m<sup>3</sup>/h, un dessilteur de 150 m<sup>3</sup>/h et une centrifugeuse de 90 m<sup>3</sup>/h.
- Pour l'injection, en travail à deux postes :
- Jusqu'à 5 foreuses sur site ;
  - Une centrale automatisée de 10 points d'injection.

Deux ateliers de pieu pour réalisation des berlinoises :

- Une foreuse Soilmec 518 ;
- Une foreuse Soilmec 625.

### CONCLUSION

Comme l'illustre le présent projet, la géotechnique et ses métiers ne cessent d'évoluer pour s'adapter de manière

**14- Coupe type d'un tympan.**

**15- Principe de congélation d'un tympan.**

**14- Typical cross section of a front wall.**

**15- Ground freezing technique for a front wall.**

pertinente à des problématiques de plus en plus complexes.

La prise en compte des paramètres environnementaux en milieu urbain dense est un enjeu clé qui conditionne les méthodes de réalisation. Ce projet préfigure parfaitement le niveau d'exigence et de technicité que va requérir la formidable épopée du Grand Paris. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

STATIONS AIMÉ-CÉSAIRE ET MAIRIE-D'AUBERVILLIERS :

**PAROI MOULÉE : 38 500 m<sup>2</sup>**

**FORAGE D'INJECTION DE PRÉ TRAITEMENT ET DE TRAITEMENT : environ 66 000 m**

**COMBLEMENT : environ 2 000 m<sup>3</sup>**

**RADIER INJECTÉ : 1 500 m<sup>2</sup>**

**JUPE INJECTÉE : 10 000 m<sup>2</sup>**

**BERLINOISES : 2 000 m<sup>2</sup>**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : RATP**

**MAÎTRE D'ŒUVRE : Systra**

**ENTREPRISES : groupement Chantiers Modernes Construction (mandataire), Dodin Campenon Bernard, Tpi, Botte Fondations**

### ABSTRACT

#### SPECIAL FOUNDATIONS ON THE EXTENSION OF LINE 12 OF THE PARIS METRO

FRÉDÉRIC RENAUD, BOTTE FONDATIONS - OLIVIER HESSE, BOTTE FONDATIONS - CARLOS GUIMARAES, BOTTE FONDATIONS

**The project for construction of the Mairie-d'Aubervilliers and Aimé-Césaire stations on line 12 in Aubervilliers entails diaphragm wall works, filling cement grouting, a cement-grouted perimeter wall and invert, a Berlin-type retaining wall, jet grouting and ground freezing. In a dense urban environment, the Vinci consortium was able to propose a solution without lorries, using the existing tunnel over 1200 metres for concrete pumping and for removal of excavated drilling material. The concrete mixing plant was supplied and excavated material was removed by barge. □**

#### CIMENTOS ESPECIALES EN LA PROLONGACIÓN DE LA LÍNEA 12 DEL METRO DE PARÍS

FRÉDÉRIC RENAUD, BOTTE FONDATIONS - OLIVIER HESSE, BOTTE FONDATIONS - CARLOS GUIMARAES, BOTTE FONDATIONS

**La obra de realización de las estaciones de Mairie d'Aubervilliers y Aimé Césaire de la línea 12 de Aubervilliers (departamento 93) emplea las técnicas de pantalla continua, inyección de relleno, faldón inyectado, solera inyectada, berlina, jet grouting y congelación. En un contexto urbano denso, el consorcio de empresas Vinci ha sabido proponer una solución sin camiones aprovechando el túnel existente de 1 200 m de longitud para bombear el hormigón y retirar los escombros de la perforación. El abastecimiento de la central de hormigonado y la evacuación de los escombros se realizan con barcazas. □**



1

© BOUYGUES BÂTIMENT SUD-EST

# UNE FOUILLE DE QUATRE SOUS-SOLS POUR SKY 56, LE NOUVEL IGH DE LA PART-DIEU

AUTEURS : DOMINIQUE BLANC, DIRECTEUR TECHNIQUE, DACQUIN - JULIEN GIOVANNINI, RESPONSABLE DES ÉTUDES, BOUYGUES BÂTIMENT SUD-EST - ALEXANDRE BEAUSSIER, CHEF DE PROJETS ÉTUDES, TERRASOL

LA CONSTRUCTION DU PROJET SKY 56 A LYON, NÉCESSITE LA RÉALISATION D'UNE FOUILLE D'UNE QUINZAINE DE MÈTRES DE PROFONDEUR, À SEULEMENT QUELQUES MÈTRES DU FAISCEAU DE VOIES SNCF DE LA GARE PART-DIEU, L'UN DES PLUS ENCOMBRÉS DU RÉSEAU FERROVIAIRE FRANÇAIS.

## LE PROJET

L'opération SKY56 consiste en la construction d'un immeuble de grande hauteur à destination de bureaux et services (figure 2), réalisée en R+13, avec un niveau de locaux techniques en R+14 (Surface utile 30 690 m<sup>2</sup>). Le bâtiment vise une triple certification HQE, EFFINERGIE+ et BREEAM. La durée totale du chantier est de 34 mois de travaux, avec une livraison prévue pour l'été 2018. L'ensemble de l'immeuble est assis sur 4 niveaux de parking gérés en demi-niveaux avec places en pente, créant ainsi 332 places de stationnement (figure 3).

## L'ENVIRONNEMENT DU PROJET

L'enceinte en paroi moulée, d'une longueur de 88 m et d'une largeur de 35 m, est bordée :

- À l'ouest, par les voies SNCF surélevées par des murs de soutènement ; ces voies correspondent à l'entrée Sud de la gare de la Part-Dieu ;
- En partie Nord, par la rue Félix Faure ;
- À l'est par la rue Mouton-Duvernet et les voies du tramway T4 ;
- En partie Sud, par un foncier à usage de terrain de sport provisoire.

## 1- Vue aérienne de la fouille.

## 1- Aerial view of the excavation.

Le contexte géologique consiste en une épaisseur de remblais surmontant des alluvions fluviales du Rhône, puis le faciès du Miocène plus communément appelés molasse. La nappe phréatique est présente sur le site à une profondeur de 4 m.

## LA CONCEPTION DU SOUTÈNEMENT

L'avant-projet développé par la maîtrise d'œuvre en phase de conception consistait en la réalisation d'une paroi moulée périphérique d'épaisseur 62 cm, stabilisée par deux lits de tirants d'ancrage précontraints. Le long des voies SNCF, la paroi était épaissie à 82 cm avec trois lits de tirants, afin de respecter les critères de déplacements horizontaux du soutènement limités à 15 mm. En phase d'exécution, l'entreprise Dacquin a proposé puis réalisé une solution variante consistant à remplacer le deuxième lit de tirants prévu sous

- 2- Vue d'architecte du projet.
- 3- Coupe longitudinale de l'infrastructure.
- 4- Coupe transversale du soutènement.

- 2- Architect's view of the project.
- 3- Longitudinal section of the infrastructure.
- 4- Cross section of the retaining structure.



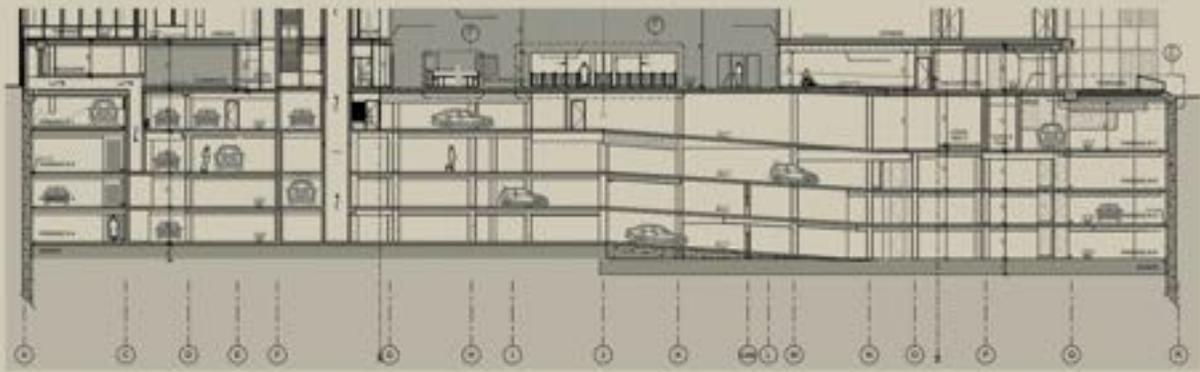
© ATELIER D'ARCHITECTURE CHAIX ET MOREL ET ASSOCIÉS, ARCHITECTE

2

nappe, par un lit de butons pré-chargés par vérinage (figure 4). Cette solution a permis de s'affranchir des risques liés à l'exécution des tirants sous la nappe. Le calage altimétrique des butons et leur position en plan ont fait l'objet de nombreux échanges entre les bureaux d'étude Dacquin et Bouygues, pour éviter que le butonnage n'engendre une gêne sur la construction de l'infrastructure.

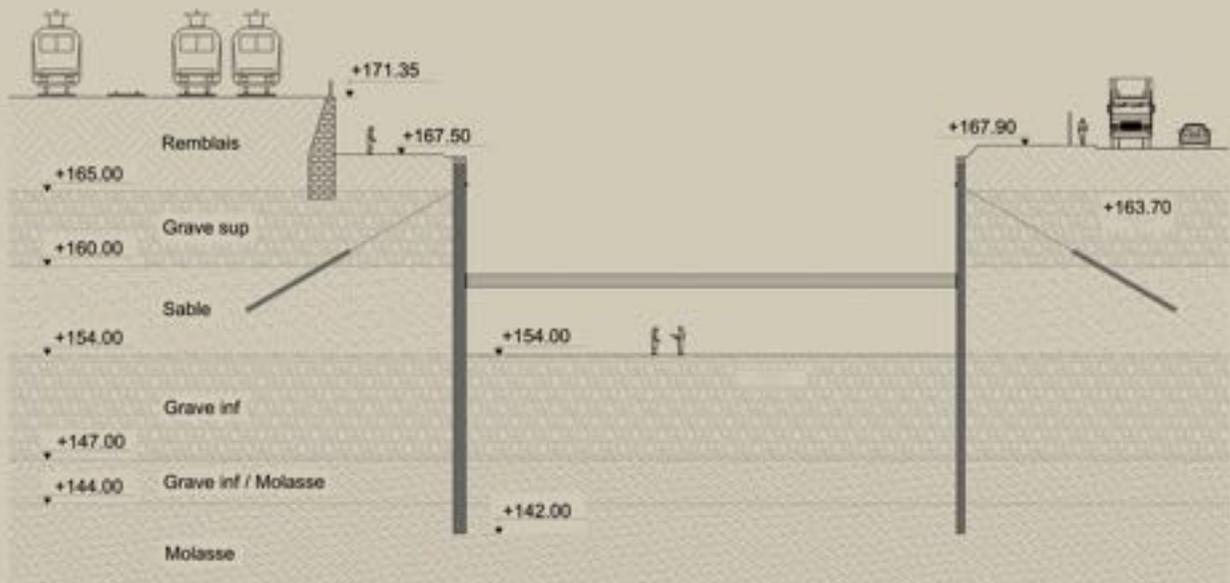
Les études d'exécution ont également permis de réduire l'épaisseur de paroi moulée à 52 cm en partie courante, et de supprimer le troisième lit d'appui initialement prévu sur le linéaire de paroi moulée longeant les voies ferrées. ▷

### COUPE LONGITUDINALE DE L'INFRASTRUCTURE



3

### COUPE TRANSVERSALE DU SOUTÈNEMENT



4



5

© DACQUIN



6



8



7

© DACQUIN

## LES TRAVAUX DE FONDATION

Les travaux de paroi moulée, de tirants d'ancrage et de mise en œuvre du butonnage ont été réalisés en propre par Dacquin, en sous-traitance de Bouygues Bâtiment Sud-Est.

La proximité des voies ferrées a imposé, en phase de préparation de chantier, une étude de la cinématique et de l'évolution des grues de forage et de manutention, afin d'éviter tout risque de basculement sur les voies (figure 5). Deux ateliers de forage et une grue de manutention ont été mobilisés pour l'exécution de la paroi moulée (figure 6).

Lors de l'excavation, les problématiques typiques des terrains lyonnais ont été rencontrées : importantes consommations

de boue bentonitique liées à la forte perméabilité des terrains alluvionnaires, ou baisse de cadence de forage lors de l'ancrage de la paroi réalisé dans les molasses.

Le forage de la paroi moulée s'est déroulé sans difficulté majeure ; ceci s'est traduit lors du terrassement dans la fouille par la découverte d'une paroi avec très peu de hors-profils et une parfaite étanchéité des joints entre panneaux.

Pour le premier lit d'appui, principalement constitué de tirants d'ancrage précontraints, le forage a été exécuté sous tubage, avec une tête vibrante, puis le scellement a fait l'objet d'une injection globale unitaire. Les essais de conformité réalisés au démarrage

**5- Forage de la paroi moulée à proximité des voies.**

**6- Matériel de forage de la paroi moulée.**

**7- Pose des butons.**

**8- Pré-chargement des butons.**

**5- Drilling the diaphragm wall near the tracks.**

**6- Diaphragm wall drilling equipment.**

**7- Placing struts.**

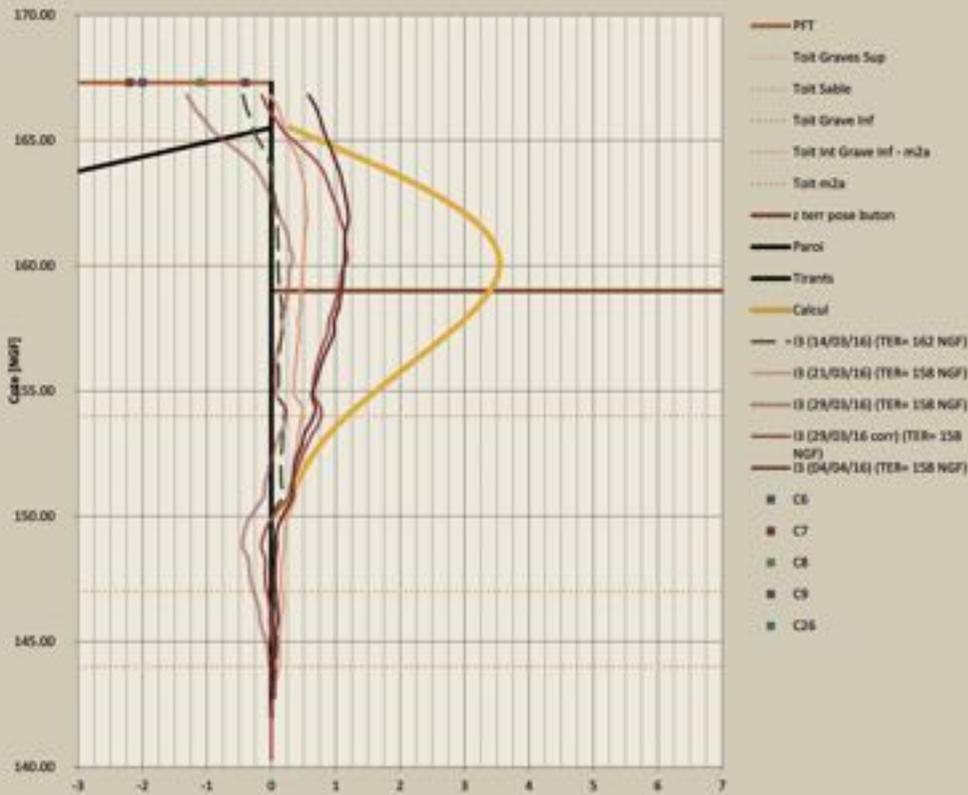
**8- Struts preloading.**

du chantier ont permis de justifier d'un frottement admissible du scellement supérieur à 15 tonnes par mètre.

Au niveau du second lit d'appui, tous les butons impactant la paroi moulée du côté des voies SNCF ont été pré-chargés au moyen de vérins plats lors de leur pose, afin de limiter les déplacements engendrés par la phase de terrassement au fond de fouille.

Les butons droits de longueur 30 à 32 m, constitués chacun de trois éléments, ont été pré-assemblés dans la fouille, puis posés sur leur support en une journée au moyen d'une grue PPM de 200 t (figure 7). Le pré-chargement a ensuite été mis en œuvre, après clavage des butons à leurs extrémités (figure 8).

## SUIVI INCLINOMÉTRIQUE DE LA PAROI (Suivi des déformées au droit de la coupe F - Phase 4)



9- Suivi inclinométrique de la paroi.

10- Pompage en phase de terrassement.

9- Clinometric monitoring of the wall.

10- Pumping during the earth-works phase.

### LE SUIVI DE L'OUVRAGE

D'une hauteur vue variant entre 12,2 m et 14,5 m, le soutènement est, dans sa fonction mécanique, en forte interaction avec les alluvions du Rhône, puissante formation détritique composée, au droit du site, des horizons suivants :

- **Graves supérieures** : formation graveleuse composée de quelques blocs, de galets décimétriques, de graviers et de sable jaune fin, formant les terrains entre le lit de tirants et le lit de butons ;
- **Sables** : formation sableuse avec quelques graviers roulés, présentes entre le buton et le fond de fouille ;
- **Graviers inférieurs** : formation graveleuse charpentée très hétérogène composée de quelques blocs, de galets, formant les terrains au contact de la fiche mécanique du soutènement.

Du fait de leur nature charpentée, le comportement mécanique des alluvions est difficile à appréhender par des reconnaissances géotechniques classiques.

Aussi, en phase exécution, le parti a été pris de définir les paramètres de calcul sur la base d'une étude bibliographique, s'appuyant d'une part sur une campagne d'essais de cisaillement à la boîte de dimension 60 x 60 x 40 cm<sup>3</sup> réalisés sur différents lieux de l'agglomération lyonnaise [Y. Bourdeau - *Revue Française de Géotechnique n°79*], et d'autre part sur les suivis de comportement de soutènements réalisés dans ces mêmes terrains [travaux de R. Kastner].

© TERRASOL

9



© BOUYGUES BÂTIMENT SUD-EST

10

En contrepartie, au vu de la proximité du faisceau de voies de la gare de la Part-Dieu, cette optimisation des paramètres mécaniques a été associée à un suivi renforcé du comportement de la fouille par le biais d'un dispositif de 6 inclinomètres, 16 cibles en tête de paroi, 9 cibles positionnées sous le lit de butons, 4 cales dynamométriques sur les tirants, ainsi que pour chacun des 10 grands butons pré-contraints, un suivi de la charge par le biais de manomètres installés sur les vérins plats ; le suivi hebdomadaire de ce dispositif ayant pour but d'identifier toute dérive du comportement par rapport au comportement théorique de manière à injecter, en cas de besoin, une précontrainte supplémentaire dans les butons, ce qui n'a pas été nécessaire au vu du comportement de la paroi (figure 9).

#### LES TERRASSEMENTS ET LE POMPAGE

Le projet a nécessité, durant les phases de terrassement, la mise en place d'un dispositif de rabattement de nappe de plus de 10 m.

Celui-ci était constitué de 3 puits de pompage crépinés en Ø 600 mm répartis dans l'emprise de la fouille (figure 10), et de 2 puits de réinjection crépinés en Ø 600 mm hors de la fouille.

Les débits de mise hors d'eau de la fouille ont été stabilisés entre 150 à 200 m<sup>3</sup>/h.

L'étude hydrogéologique du projet a nécessité des études d'impact sur l'écoulement de la nappe en phases provisoire et définitive, afin de contrôler son influence sur les avoisinants, nombreux dans le quartier de la Part-Dieu.



11- Vue depuis le fond de fouille.

11- View from bottom of excavation.

En phase définitive, la mise en hors d'eau de l'infrastructure est assurée par un radier en béton armé étanche de forte épaisseur 80 à 120 cm.

Le terrassement des 33 000 m<sup>3</sup> de terres extraites de la fouille a été réalisé de manière classique avec une rampe durant la première phase pour la pose du lit de butons, puis au moyen d'une pelle à câble positionnée en bordure de fouille pour la seconde phase sous butons (figure 11). □

#### PRINCIPALES QUANTITÉS

**LINÉAIRE DE PAROI MOULÉE : 230 m**  
**SURFACE DE PAROI MOULÉE : 6 000 m<sup>2</sup>**  
**BÉTON : 3 600 m<sup>3</sup>**  
**ARMATURES : 205 t**  
**TIRANTS : 40 unités de longueur 16 m**  
**BUTONS : 32 unités de longueur 32 m maxi**  
**TERRASSEMENTS : 33 000 m<sup>3</sup>**

#### INTERVENANTS DU PROJET

**MAÎTRISE D'OUVRAGE : Icade / Linkcity**  
**ARCHITECTE : Chaix et Morel Associés / Afaa**  
**MAÎTRISE D'ŒUVRE STRUCTURE : Iliade Ingénierie**  
**GÉOTECHNICIEN PHASE G2 : Fondasol**  
**HYDROGÉOLOGUE PHASE G2 : Archambault**  
**BUREAU DE CONTRÔLE : Socotec**  
**ENTREPRISE GÉNÉRALE : Bouygues Bâtiment Sud-Est**  
**ENTREPRISE DE FONDATIONS : Dacquin**  
**ASSITANCE GÉOTECHNIQUE PHASE G3 : Terrasol**  
**ASSITANCE HYDROGÉOLOGIQUE PHASE G3 : Burgeap**

#### ABSTRACT

### EXCAVATION OF FOUR BASEMENTS FOR SKY 56, THE NEW HIGH-RISE BUILDING IN LA PART-DIEU

D. BLANC, DACQUIN - J. GIOVANNINI, BOUYGUES - A. BEAUSSIER, TERRASOL

**Construction of the four infrastructure levels for the SKY 56 project, in the Part-Dieu district of Lyon, required the execution of a diaphragm wall 25m deep, anchored several metres into the molassic substratum, in order to limit pumping delivery in the excavation during the works. Stability of the diaphragm wall during the provisional phase was ensured by a layer of prestressed tie rods at the head, combined with a layer of jacked struts on the span. Earthworks down to the bottom of excavation at a depth of about fifteen metres were thus able to be performed, only a few metres from the railway sidings of Part-Dieu station, in compliance with very strict displacement criteria. □**

### UNA EXCAVACIÓN DE CUATRO SÓTANOS PARA SKY 56, EL NUEVO EGA DE LA PART-DIEU

D. BLANC, DACQUIN - J. GIOVANNINI, BOUYGUES - A. BEAUSSIER, TERRASOL

**La construcción de los cuatro niveles de infraestructura del proyecto SKY 56 en Lyon, en el distrito de la Part-Dieu, ha exigido la realización de una pantalla continua de 25 m de profundidad, anclada varios metros en el substratum molásico para limitar el caudal de bombeo en la excavación durante las obras. La estabilidad de la pantalla continua durante la fase provisional se ha logrado mediante un lecho frontal de tirantes pretensados, asociado a un lecho de tornapuntas introducido a presión en fila. Esto permitió llevar a cabo los movimientos de tierras hasta el fondo de la excavación situado a unos quince metros de profundidad, a tan solo algunos metros del haz de vías de la estación de la Part-Dieu, con arreglo a unos criterios muy estrictos de desplazamiento. □**



**Résoudre  
votre problématique  
de sol & de construction**

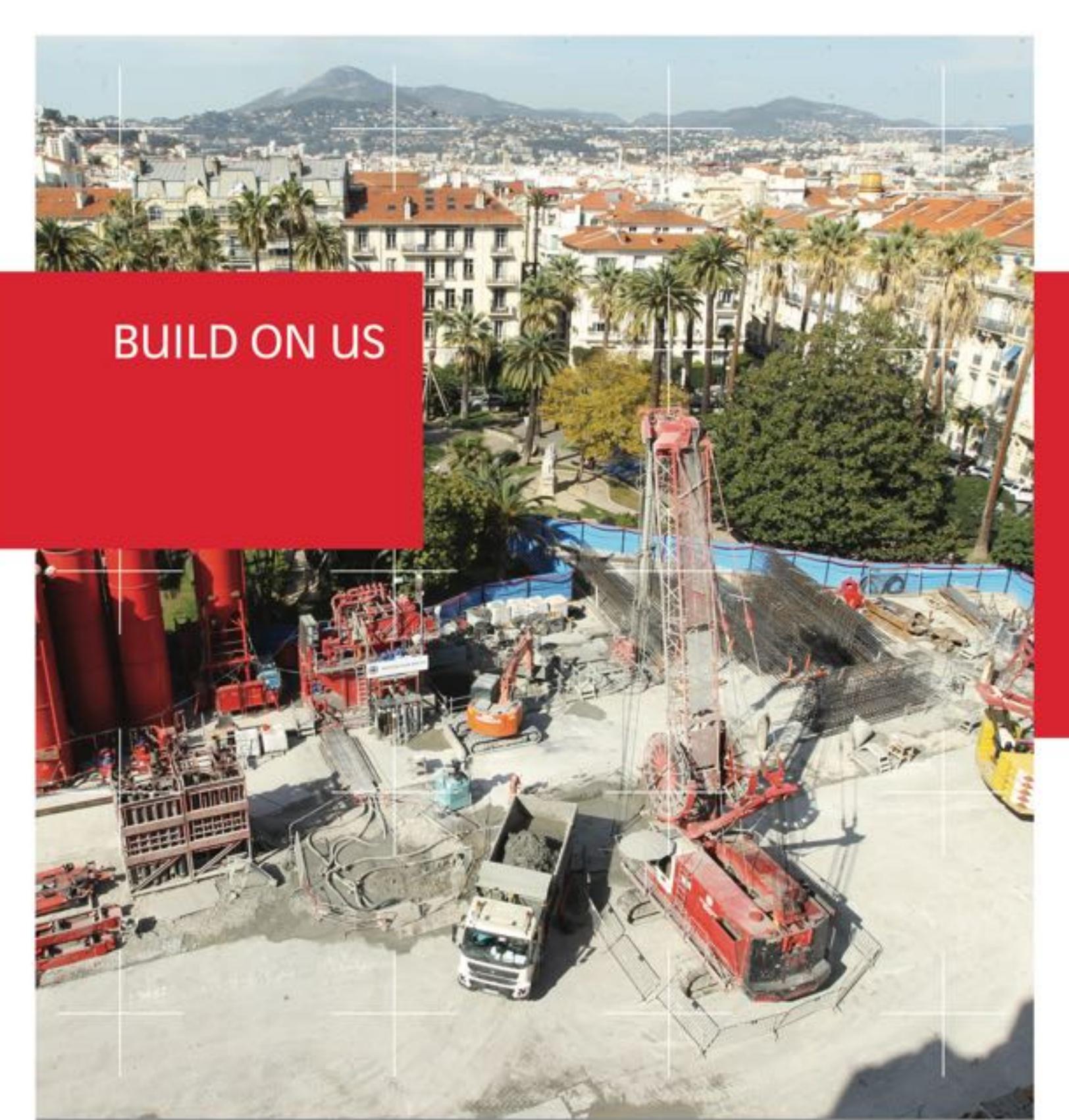
- Fondations profondes
- Soutènements
- Ecrans étanches
- Reprises en sous-œuvre
- Réhabilitations d'ouvrages
- Comblements de cavités
- Traitements de terrains
- Améliorations de sols
- Ancrages
- Fouilles clés en main

**Partenaire-expert**

[www.spiefondations.com](http://www.spiefondations.com)

**/ Spie fondations**

**spie batignolles**



BUILD ON US

[www.soletanche-bachy.com](http://www.soletanche-bachy.com)

→ **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.



| Tramway de Nice | FRANCE |  
Réalisation de la station Alsace-Lorraine.



**SOLETANCHE BACHY**