

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

SOLS ET FONDATIONS. PAROI CLOUEE DE LA RD 1091. FONDATIONS DU NOUVEAU TGI DE PARIS. INTER IKEA : CHANTIER DE PIEUX A BAYONNE. TECHNIQUE ANCESTRALE POUR PATRIMOINE HISTORIQUE. LIGNE 14 : FONDATIONS SPECIALES DE 2 STATIONS. FONDATIONS PROFONDES A ISSY-LES-MOULINEAUX. TRAMWAY LIGNE D DE STRASBOURG : PONT SUR LE RHIN. METRO LIGNE B RENNES. OUVRAGES EN SOL RENFORCE MACRES® AU PUY-EN-VELAY. SOUTÈNEMENT EN DSM TRIPLE A VOIRON. FONCAGE D'OUVRAGES ECOLOGIQUES SOUS L'A89

N°916 JUILLET / AOÛT 2015



FONDATIONS DU NOUVEAU TGI DE PARIS
© CEDRIC HELSLY POUR SOLETANICHE BACHY

LES TRAVAUX PUBLICS
FÉDÉRATION NATIONALE



REPRISE EN SOUS-ŒUVRE

Une précision chirurgicale pour une efficacité optimale



POUR TOUT TYPE D'OUVRAGES

Découvrez l'alternative aux techniques traditionnelles

- Rapide et économique
- Respectueux de l'environnement
- Propre et sans nuisance
- Expertise et accompagnement durant le chantier
- Intervention sans aucune interruption d'activités
- Garantie décennale



www.uretek.fr

N° Vert 0 800 312 312



Contactez un conseiller URETEK près de chez vous !



LA RÉFÉRENCE

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 (Ingérop), David
Berthier (Vinci Construction France),
Sami Bounatirou (Bouygues TP),
Jean-Bernard Datry (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.frFrance (9 numéros) : 190 € TTC
International (9 numéros) : 240 €
Enseignants (9 numéros) : 75 €
Étudiants (9 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)**Publicité**
Rive Média
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.revuetravaux.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.comLa 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).Editions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0116 T 80259
ISSN 0041-1906

FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE CONCEPTION ET MAINTENANCE

Quelle que soit l'importance de l'ouvrage, une connaissance adéquate des caractéristiques du sol sur lequel on doit construire est indispensable. La définition du plan d'investigation et le choix des techniques de reconnaissance dépendent du type d'ouvrage et de la nature du sol. L'examen des cartes géologiques et des systèmes de fondation des constructions situées sur le même site est très instructif. La présence de cavités souterraines constitue un réel danger. Leur détection n'est pas toujours aisée. Ainsi, les anciennes carrières de la région parisienne posent depuis longtemps de très sérieux problèmes aux constructeurs. Tout le monde a encore en mémoire ce qui s'est passé à la limite d'Issy les Moulineaux le 1^{er} juin 1961.

Ce jour-là, une zone d'environ 6 hectares, située au dessus d'anciennes carrières, s'est effondrée, entraînant dans la cavité 25 pavillons et une usine de 3 étages. Dans ce trou immense, d'une profondeur moyenne de 5 à 6 mètres, avec des entonnoirs atteignant par endroits 10 mètres, furent ensevelis de nombreuses personnes, dont 20 morts et une quarantaine de blessés.

Les fondations ont une incidence capitale sur la tenue des constructions en cas de séisme. Pour les fondations superficielles ou semi-enterrées, on peut dire, en général :

- Le sable compact et sec constitue un bon sol,
- Le sable fin saturé d'eau et de faible compacité est à éviter - attention au phénomène de liquéfaction des sols,
- Les argiles sont des sols de moins bonne qualité que les sables compacts, mais leur comportement reste acceptable,
- Un bon chaînage est à prévoir entre les fondations isolées,
- Les crêtes, les bords de falaises et les pieds de talus sont à éviter.

Généralement, on a intérêt à prévoir des fondations profondes, à éviter les pieux inclinés et à réaliser des longrines de solidarisation entre les têtes des pieux isolés.

La conception d'un ouvrage doit prendre en considération l'impact que celui-ci peut avoir sur l'environnement, aussi bien pendant les travaux d'exécution qu'en phase d'exploitation (effet sur les constructions situées dans le voisinage, variation du niveau de la nappe phréatique, stabilité des pentes lors des travaux de terrassement, modification du régime hydraulique d'une rivière, ...).

La principale difficulté, inhérente à la surveillance des fondations, tient à ce qu'elles sont difficilement accessibles à l'examen visuel direct et que,

lorsque des désordres apparaissent dans la structure, les fondations peuvent être déjà largement affectées en profondeur. Le diagnostic sur l'état d'un ouvrage doit toujours être formulé globalement : fondations et superstructure. Etant un élément essentiel dans une construction et d'accès difficile, les fondations doivent donc offrir une sécurité suffisante et faire l'objet d'un suivi adapté. Les dégradations peuvent être dues à un vieillissement prématuré, à des erreurs de concep-

tion, à des défauts d'exécution ou à des modifications intervenues depuis la construction de l'ouvrage (conditions d'exploitation, agressions de l'environnement, ...).

Les travaux de confortement et de reprise en sous-œuvre sont des opérations délicates, compliquées et coûteuses. L'expérience acquise dans la construction neuve n'est pas suffisante pour bien appréhender ce marché d'entretien et de réparation des constructions. L'approche du problème est différente et les techniques à utiliser ne sont pas toujours les mêmes. Malheureusement, l'enseignement technique traditionnel ne donne pas à ces questions, ainsi qu'à la pathologie des ouvrages, la place qu'elles méritent.

Enfin, il n'est pas inutile de rappeler qu'il vaut toujours mieux prévenir que guérir.

ELIE ABSIPROFESSEUR HONORAIRE DE L'ÉCOLE CENTRALE PARIS
MEMBRE D'HONNEUR DU CFMS

© DR

SOLS & FON DATIONS



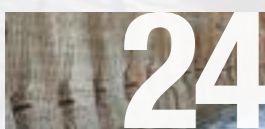


04 ACTUALITÉ



14 **ENTRETIEN AVEC
JEAN-PIERRE MAGNAN**
LA MÉMOIRE ACTIVE
DE LA GÉOTECHNIQUE

**18 SOL ENVIRONMENT :
DÉPOLLUTION DES TECHNIQUES PROPRES
AVEC DES APPROCHES GLOBALES**



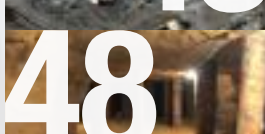
24 **PAROI CLOUÉE DE 47 M
DE HAUTEUR**
pour sécuriser la RD1091
à Séchilienne



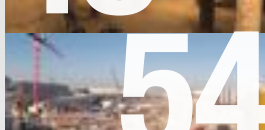
32 **FONDACTIONS DU NOUVEAU
TRIBUNAL DE GRANDE
INSTANCE DE PARIS**



43 **BAYONNE - INTER IKEA**
Un chantier de pieux
exceptionnel



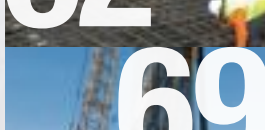
48 **TECHNIQUE
ANCESTRALE**
pour patrimoine
historique



54 **LIGNE 14 - LA NOUVELLE
STATION PONT CARDINET**
Les fondations spéciales



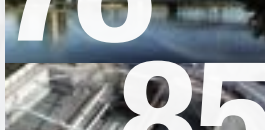
62 **SOUTÈNEMENTS DIVERS ET
FONDACTIONS PROFONDES**
à Issy-les-Moulineaux



69 **LIGNE 14 - LA NOUVELLE
STATION PORTE DE CLICHY**
Fondations spéciales



78 **LIGNE D DU TRAMWAY
DE STRASBOURG**
Construction d'un pont sur le Rhin



85 **STATIONS, PUIITS ET
TRANCHÉES COUVERTES**
de la ligne B du métro de Rennes



92 **OUVRAGES EN SOL
RENFORCÉ MACRÉS®**
sur le contournement
du Puy-en-Velay (43)



98 **SOUTÈNEMENT
EN DSM TRIPLE**
pour la réalisation d'un ensemble
immobilier à Voiron (38)



104 **FONÇAGE D'OUVRAGES
ÉCOLOGIQUES**
sous l'A89

LIGNE B DU MÉTRO DE RENNES - BUTONNAGE DE LA STATION COURROUZE © PHOTIMRW ZEPELINE BRETAGNE

GRAND PARIS EXPRESS : LES ÉTUDES GÉOTECHNIQUES SONT ENTRÉES DANS LEUR 2^e PHASE

Le futur métro de l'Île-de-France passe quasiment partout en souterrain. Les études géotechniques sont bien avancées. Les appels d'offres de travaux commencent à sortir.



Les études géotechniques requièrent de nombreux sondages. Ici, forage à Vitry-sur-Seine (Val-de-Marne).

© C. DUPONT/SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

Les appels d'offres de travaux pour la ligne 15 Sud du Grand Paris Express (GPE) sortent à la rentrée. C'est la plus avancée des six nouvelles lignes du futur métro autour de Paris. La ligne 15 complète formera une ceinture autour de Paris, bouclée au nord à Saint-Denis-Pléyrel (Seine-Saint-Denis).

Après consultation des entreprises, les travaux de la 15 Sud débuteront fin 2016 ou début 2017 pour une ouverture repoussée à 2022 par le gouvernement. Ses 33 km relient, d'ouest en est, le Pont de Sèvres (Boulogne-Billancourt/Hauts-de-Seine) à la limite entre Seine-Saint-Denis et Seine-et-Marne, à Noisy-le-Grand/Champs-sur-Marne. Ils seront desservis par 16 gares.

En réalité, un appel d'offres a déjà été lancé, celui de la gare de Fort d'Issy-Vanves-Clamart déjà planifiée à cause de son interconnexion avec le réseau SNCF.

→ Viaducs sur 20 km

Les études géotechniques du futur métro sont réalisées sous maîtrise d'ouvrage de la Société du grand Paris (SGP). Elles ont pour but de connaître l'ensemble des contraintes qui s'imposent au projet, notamment aux endroits où vont s'insérer gares et tunnels.

L'encombrement du sous-sol - réseaux, fondations, carrières - et ses caractéristiques géologiques et hydrauliques déterminent le tracé définitif et les méthodes constructives à utiliser.

Le GPE est en majorité souterrain sauf deux tronçons au nord (ligne 17) et au sud (ligne 18) qui traversent des zones rurales et seront en viaduc sur une vingtaine de kilomètres.

Les études sont conformes à la norme NF P 94500 sur les missions d'ingénierie géotechnique, classification et spécifications (novembre 2013). Elles comprennent deux grandes phases : la G1 des études géotechniques préalables et la G2, celles de conception. La G1 regroupe l'ancien découpage en G11 (études préliminaires) et G12 (celles d'avant-projet).

→ Maillage plus serré

Toutes les lignes sauf une ont franchi l'étape G11. La 15 Est va être étudiée à partir de fin 2015, début 2016 car sa maîtrise d'ouvrage n'a été confiée qu'en février à la SGP par le Syndicat des transports de l'Île-de-France.

« La Société du Grand Paris fournit les données d'entrée qui représentent les contraintes du projet en vue des études plus poussées par les maîtres d'œuvre, explique Vincente Fluteaux, ingénieur géotechnique infrastructures dans l'unité infrastructures et méthodes construc-

tives⁽¹⁾. Pour cela, elle commande des sondages, des essais par forage, des prélèvements examinés en laboratoire, à chaque étape des études. » En phase G11, la SGP cherche à confirmer sur le terrain le modèle géologique global donné par les documents disponibles.

En G12, le maillage devient plus systématique à un pas de 35-40 m. À ce stade, il s'agit de révéler les grands ensembles homogènes et de lever les particularités de certains points comme une poche de sable dans des argiles plastiques. Par exemple, sur la 15 Sud, la gare de Saint-Maur-Créteil (Val-de-Marne) se situe dans une couche d'alluvions de 8 m d'épaisseur sur argiles. Ailleurs, ces dernières se rencontrent plutôt à une trentaine de mètres. Les futures structures devront donc reprendre les efforts de gonflement des argiles humides.

→ 50 m de profondeur

Dans l'étape suivante G2, les études reviennent sur les zones particulières. La 15 Sud devra passer sous de nombreuses carrières. Certaines sont inconnues. Un ensemble mesure 6 km. Il faut les localiser, en dresser les cartes et déterminer leur état. Comment sont-elles comblées le cas échéant, faut-il les combler ailleurs. De ce fait, la ligne se trouve à 25-30 m de profondeur. La gare de Villejuif-Institut Gustave Roussy sera à 49 m. Celle de Saint-Maur/Créteil ira jusqu'à 51 m car les caractéristiques des argiles plastiques à cet endroit obligent à descendre dans la craie.

Le contexte hydrologique doit aussi être connu. Aux abords de la Seine et de la Marne, des stations vont se trouver dans l'eau avec un pompage permanent pendant les travaux.

CHIFFRES

200 km de nouvelles lignes.

69 gares.

Coût : 25,5 milliards d'euros (2012).

Coût des études géotechniques : 50 millions d'euros.

Les méthodes constructives devront tenir compte de la poussée de l'eau.

→ Interférométrie radar

Les méthodes d'essais sont, pour la plupart, éprouvées. Des caméras introduites dans des forages ont dévoilé l'intérieur de carrières. La SGP a aussi utilisé des données radars (interférométrie radar) qui ont l'avantage d'être fournies sur de longues périodes et pour de grandes surfaces par des satellites. Ici, l'historique 1992-2007 a montré les zones à variation de surface dans le temps, ce qui peut signaler la présence de gypse. Celui-ci en se diluant dans l'eau crée un vide, d'où un tassement au-dessus qui creuse la surface. Par ailleurs, tout le bâti situé au-dessus du tracé ou dans son environnement proche fait l'objet d'études et d'enquêtes. Les bureaux d'études qui s'en chargent, conseillent sur le type de fondation à utiliser. Des capteurs de déplacement sont posés en façade.

En savoir plus sur

le Grand Paris Express :

www.societedugrandparis.fr ■

⁽¹⁾ Voir aussi *Travaux* n°900, octobre 2013, page 13.

DES PUIITS CONFIRMENT LES MÉTHODES CONSTRUCTIVES

Trois puits de reconnaissance sont creusés sur le tracé de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express. Ces puits plus grands que ceux des sondages, servent à confirmer les méthodes constructives retenues après études géotechniques (cf. ci-contre). Vont y être testées les argiles dans la masse et à différentes profondeurs à l'endroit des futures gares de Saint-Maur/Créteil et Arcueil-Cachan (Val-de-Marne), et la craie au droit d'un ouvrage annexe à Boulogne-Billancourt (Hauts-de-Seine).

Un puits de 4 m de diamètre sur 30 m de profondeur a été creusé en mai à Arcueil-Cachan où sera également analysée la propagation des vibrations dans le sol afin d'en atténuer les effets.



Grâce à ce puits de reconnaissance de 30 m de profondeur à Arcueil-Cachan (Val-de-Marne), les argiles vont être testées dans la masse.

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

terrassol
setec
Ingénieurs-Conseils
en géotechnique
www.terrassol.com

INGÉNIERIE **LOGICIELS**

» Conception, Maîtrise d'oeuvre, Expertise Développement, Assistance technique, Formation «

Terrassol 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, Prolongement d'Eole vers la Défense, Métro de Rennes, LGV CNM, Nouveau Tribunal de Grande Instance de Paris, Tour Trinity, Terminal méthanier de Dunkerque...

Et à l'étranger : Pont du Bouregreg (Maroc), Centrales électriques de Plomin (Croatie) et Jijel / Biskra (Algérie), 3^{ème} pont sur le Bosphore (Turquie), Réservoirs de Shah Deniz (Azerbaïdjan), Corniche de Brazzaville (Congo), Pont de Jacquerville (Côte d'Ivoire), Terminal pétrolier de Cap Lopez (Gabon)...

	Paris	Lyon	Tunisie
	Tél : +33 (0)1 82 51 52 00	Tél : +33 (0)4 27 85 49 35	Tél : +276 71 23 63 14
	Fax : +33 (0)1 82 51 52 99	Fax : +33 (0)4 27 85 49 36	Fax : +256 71 75 32 88
	Email : info@terrassol.com	Email : lyon@terrassol.com	Email : info@terrassol.com.tn

MISE EN ŒUVRE DU CANAL SEINE NORD EUROPE



Navette fluviale à conteneurs entre Le Havre et Longueil-Sainte-Marie (Oise) lancée le 19 juin.

© HAROPA-PORT DE ROUEN

Les travaux du Canal Seine Nord Europe (SNE) débuteront au plus tôt en 2017, selon Rémi Pavros, qui a remis son 2^e rapport sur le canal, réflexion sur les conditions de sa mise en œuvre⁽¹⁾.

Le gouvernement va mettre en ordre juridique ses propositions. Voies navigables de France (maître d'ouvrage du projet) organise les enquêtes publiques à partir du 2^e semestre 2015. Une société de projet sera créée début 2016.

Le député du Nord avait déjà été chargé de reconfigurer le canal. Cette deuxième mission a fait l'objet de beaucoup de concertation, « une méthode qui préfigure celle pour la gestion future du canal, » a souligné Alain Vidalies, secrétaire d'État aux transports, lors de sa présentation. Les collectivités locales sont mises à contribution financièrement et pour les aménagements annexes (plates-formes), et les associations, pour leur connaissance du terrain.

Si la Commission européenne (CE) donne son feu vert au financement à 40 % - décision avant fin juillet - « alors le canal entrera dans une phase irréversible de sa réalisation, » estime M. Vidalies.

→ Taxe sur le trafic de transit

Le Canal SNE, réévalué à 4,5 milliards d'euros (2014), sera financé à 40 % par la CE, à 22 % par l'État et à 22 % par les collectivités territoriales. Le reste, 700 millions d'euros, viendra d'un emprunt de la société de projet qui se remboursera par des recettes telles qu'une taxe sur les poids lourds en transit - 4 camions sur 10 dans le grand nord

français -, ou un prélèvement sur les entrepôts.

Le futur canal permettant de relier la Seine à l'Escaut, est d'abord un projet économique. Transporter du fret par cette infrastructure avec des bateaux à grand gabarit - jusqu'à 4 400 tonnes - est plus rentable que de le faire avec des péniches de 800 tonnes qui, elles, resteront utiles, jugent les bateliers.

→ Nouvelle approche des infrastructures

Le Canal SNE sera « le premier grand chantier qui contribue au développement durable et à la transition énergétique, » insiste Rémi Pavros, en particulier grâce aux bateaux à conteneurs. Les ports de Paris Seine Normandie ont lancé le 19 juin une navette à conteneurs jusqu'au nouveau terminal de Longueuil-Sainte-Marie (Oise), en limite sud du tracé. « Le canal Seine Nord Europe est le projet qui peut modifier l'approche des infrastructures de transport dans notre pays, » augure le député. ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux mars 2014, n°904, page 9 et Travaux septembre 2009, n°864, page 13.

TROIS PUBLICATIONS

Le ministère de l'Économie publie un cahier des charges simplifié pour les projets du Plan très haut débit afin d'accélérer sa mise en œuvre en particulier auprès des entreprises et des organismes publics, et de débloquent les aides aux collectivités territoriales.

La norme NF P 03-002 portant sur le cahier des clauses administratives générales applicables aux marchés privés de travaux de génie civil a été entièrement remaniée.

Enfin, la ministre de l'Écologie publie une note technique du 21 mai pour aider les services déconcentrés de l'État à appliquer les décisions politiques sur les énergies renouvelables : appels d'offres, feuilles de route, schémas régionaux, loi sur la transition énergétique, etc. Elle sera publiée au Bulletin officiel du ministère et suivie d'un guide.



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 plus de **270 000 salariés**.

Nos coordonnées :

· Par courrier :

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

· Par Internet : www.cnetp.fr

· Par mail : sur www.cnetp.fr, lien [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



GRAND PARIS : CONTRÔLER LE FONCIER

D'ici la fin de l'année, l'Établissement public foncier (EPF) d'Île-de-France va intégrer trois EPF, ceux des Hauts-de-Seine, du Val-d'Oise et des Yvelines. L'établissement accompagnera à l'échelle de la région parisienne les projets d'aménagement aux abords des futures gares du Grand Paris et relancera le logement. Il réservera des emprises foncières afin de lutter contre la spéculation immobilière.

LES TRAINS D'ÉQUILIBRE DU TERRITOIRE PERDENT DU TERRAIN

Début juillet, Alain Vidalies, secrétaire d'État aux transports, a publié la feuille de route du gouvernement sur l'avenir des trains d'équilibre du territoire (TET) inspirée du rapport Duron remis en mai et des débats au Parlement.

L'État va signer une convention avec SNCF Mobilités pour l'exploitation commerciale des Intercités, Corail et Teoz, de 2016 à 2020. Il devient autorité organisatrice de ces trains. Les moyens des

services correspondants au ministère et dans les directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal) seront confortés. Il dialoguera avec les régions dans un conseil consultatif des TET.

→ Utiliser les alternatives

Un préfet, François Philizot, conduit déjà la concertation avec les régions « en exploitant au mieux les services existants et à partir d'un travail coordonné avec les

autres offres de transport », indique la feuille de route. Les décisions définitives sortiront en mai 2016, après les élections régionales de décembre 2015.

Parmi les mesures envisagées, citons le remplacement par des cars rapides des TET roulant sur le même parcours que des TER mais sans être omnibus.

Des trains de nuit seraient supprimés là où des alternatives plus rapides existent (Luxembourg-Strasbourg, Nice-Cerbère et Paris-Irun à la frontière espagnole). Seraient maintenues Paris-Briançon (Hautes-Alpes) et Paris/Rodez/La-Tour-de-Carol (Pyrénées-Orientales).

→ Réduire le déficit en 2023

L'État investit 1,5 milliard d'euros dans de nouveaux trains d'ici 2025 et 2 milliards dans les infrastructures d'ici 2020 (contrats de plan État-régions).

Le rapport Duron espérait stabiliser le déficit des TET à 350 millions d'euros entre 2017 et 2019, puis le réduire à 270, à partir de 2023, contre 330 en 2014. ■



Certaines lignes Intercités rapides font doublon avec des trains régionaux.

NICE GRID EXPÉRIMENTE UN GESTIONNAIRE D'ÉNERGIE



L'expérimentation du Nice Grid à Carros (Alpes-Maritimes) cherche à rapprocher consommations d'électricité et productions, traditionnelle et solaire. Le surplus, temporaire, est stocké en batterie (photo).

À Carros (Alpes-Maritimes), le gestionnaire d'énergie du Nice Grid est intervenu 37 fois pour résoudre la surproduction d'électricité due à celle de capteurs solaires, à l'été 2014. En hiver (sur plus d'un an), cet équipement a été sollicité 18 fois pour écrêter les pointes d'appels de puissance. « *Le gestionnaire d'énergie est la pierre angulaire du projet Nice Grid, a souligné Christophe Lebossé d'ERDF Méditerranée*⁽¹⁾. *Il rapproche chaque jour la production d'électricité de la consommation, la veille pour le lendemain. Il cherche de la puissance disponible, la géolocalise et prévoit une commande selon les besoins.* » Réseau de transport d'électricité (RTE) s'en sert pour affiner sa production.

Le projet Nice Grid se situe sur quatre quartiers - résidentiels ou d'immeubles collectifs, industriel - choisis parce que

des bâtiments étaient déjà dotés de capteurs photovoltaïques.

Nice Grid, partie prenante du programme européen Grid4EU destiné à tester des solutions innovantes de gestion de l'électricité et à préparer les futurs réseaux intelligents, est entre les mains d'un consortium de dix partenaires qu'ERDF coordonne⁽²⁾. Il se termine fin 2016.

→ Heures creuses solaires

Le gestionnaire identifie donc les décalages entre production et consommation, et lance des actions pour y remédier. Il peut s'agir en été de stocker l'électricité solaire la journée dans des batteries, ou d'enclencher des appareils de jour au lieu du soir chez des particuliers. Les industriels utilisent l'électricité quand les capteurs en fournissent. En hiver, le système teste également une réduction de puissance entre 18 heures et 20 heures sur

un site en fin de ligne en haute tension A. L'écrasement des pointes d'appel de puissance sur le réseau, ce qui évite d'enclencher des centrales à combustible fossile, est rémunérée par ERDF en chèques cadeau. Un tarif "heures creuses solaires" (12h-16h), moins cher, a été instauré. Les ballons d'eau chaude sanitaire peuvent être réchauffés sur ce créneau.

→ 25 batteries

Le stockage d'électricité a été réparti à plusieurs niveaux. Un poste source haute tension dispose d'une batterie de 1 MW (appel de puissance de 500 foyers) depuis 2014. En mars 2015, a été installée une batterie de 250 kW destinée à la production-consommation à l'échelle d'un îlot urbain. Trois unités de 33 kW sont sur le réseau basse tension et 20 batteries de 4 kW équipent des particuliers.

« *Nous manquons de références pour implanter les batteries lithium-ion, nous sommes obligés d'interpréter les normes, développe M. Lebossé. Les batteries et leurs onduleurs (transformation du courant) sont très souples à utiliser et très robustes. Il faut toutefois les surveiller en permanence et prévoir les périodes de recharge où elles ne seront pas disponibles. Leurs auxiliaires comme les convertisseurs et l'électronique consommant de l'électricité, ce qui abaisse leur rendement.* »

En savoir plus : www.nicegrid.fr ■

⁽¹⁾ Intervenu au congrès-salon Smart Grids : 27-29 mai, Paris (www.sgparis.fr).

⁽²⁾ ERDF avec EDF, Alstom Grid, Saft, Armines, RTE, Daikin, Netseenergy, Socomec et NKE Electronics.



© FNTP

FONDATEURS DES GRUES À TOUR

La Fédération nationale des travaux publics publie un guide des recommandations professionnelles relatives aux fondations des grues à tour. Cette synthèse de méthodes comprend deux parties. La première traite des efforts résultant de la grue à tour et de leur impact sur le dimensionnement de ses fondations. Elle a été rédigée avec les constructeurs.

La seconde partie, qui aborde la conception de la fondation, résulte d'échanges avec les bureaux de contrôle, bureaux d'études et les entreprises.

À télécharger : rubrique actualités de www.tpmateriel.com ou vie de l'entreprise/matériel et transport/publications de www.fntp.fr.

PRIX INFRASTRUCTURES

Les candidats au prix Infrastructures pour la mobilité, biodiversité et paysage, doivent déposer leur dossier au plus tard le 25 septembre à l'Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité (Iârrim). Le prix comporte une nouvelle catégorie, celle des projets prometteurs, c'est-à-dire en phase étude et conception.

ÉNERGIES RENOUVELABLES À L'EXPORT

Le groupe Agence française de développement (AFD) et le Syndicat des énergies renouvelables (SER) ont signé un accord cadre de partenariat afin de mieux faire connaître les modalités d'intervention financière de l'AFD auprès des entreprises exportatrices membres du SER. L'accord vise aussi à informer l'AFD du savoir-faire français qui peut être utile aux pays dits du Sud.



Le gestionnaire d'énergie couvre 4 quartiers déjà équipés de capteurs solaires photovoltaïques.

© ALBANE NOOR

© ERDF DAKOFILM

TOITURE VÉGÉTALISÉE CONNECTÉE

La toiture hydroactive connectée est une version améliorée de la toiture végétalisée classique.

Sogaris, propriétaire d'entrepôts logistiques, en a installées à Rungis (Val-de-Marne) et à Mions (Rhône). La solution, en absorbant les eaux de pluie grâce à la terre et à la végétation, évite de dimensionner les réseaux d'évacuation à hauteur des débits d'orage et fournit de l'eau d'arrosage. Selon Le Prieuré qui la conçoit, elle contribue également à rafraîchir le bâti.

L'installation sur les entrepôts Sogaris de Mions fait l'objet d'un suivi par le laboratoire déchets, eaux, environnement de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon. Le procédé a été mis au point avec l'Insa Lyon et le Centre d'études techniques de l'Équipement d'Île-de-France.

Il comprend une couche végétale au-dessus des bacs de rétention. Il peut donc être posé sur un bâtiment existant à condition que la toiture soit étanche et en supporte le poids.

Grâce à la connexion de ses capteurs à un système informatique, l'irrigation ou la vidange d'un des bacs de stockage se pilotent en fonction des prévisions météorologiques (température, précipitations) et du besoin en eau des plantes.



Toiture chez Sogaris à Mions (Rhône).

LE PALAIS DE JUSTICE DE STRASBOURG EST REMODELÉ



© CABINET GARCÉS-DE SETA-BONET ARCHITECTES

Le futur palais de justice de Strasbourg s'élève d'un étage.

Le palais de justice de Strasbourg fait l'objet d'une refonte et d'une modernisation. Les travaux ont commencé début 2014. Ceux de gros œuvre ont eu lieu en 2014 et début 2015. L'ouverture du nouveau site est prévue en 2017.

L'Agence publique pour l'immobilier de la justice (APIJ) est mandatée pour la réhabilitation d'un bâtiment construit fin XIX^e siècle dans un "style impérial allemand" avec des parties protégées au nom des Monuments historiques.

Le projet retenu qui consiste à démolir une extension du XX^e et à surélever le bâtiment existant, a été conçu par les

architectes espagnols Garcés-De Seta et Bonet Arquitectes avec Serra-Vives-Cartagena Arquitectes, co-traitants.

Les locaux sont rationalisés et les circulations repensées pour séparer les prévenus du public.

Les travaux ont été confiés au groupe Eiffage Construction Alsace (mandataire) avec Spie Batignolles Est, Eiffage Énergie et Clemessy.

Après avoir démolì le 3^e étage, la toiture de 1978 et une partie de la cour intérieure, ont été rebâties un 3^e étage dans le style général et un 4^e, partiel, les deux positionnés en retrait de la façade d'ori-

gine et comme chapeautant le toit ancien. L'étage supplémentaire reçoit une nouvelle charpente en acier pour abriter une bibliothèque, un restaurant, des locaux techniques. Cette charpente de 160 tonnes réalisée par BCM supporte la nouvelle toiture et ménage des puits de lumière descendant éclairer des salles d'audience.

→ Profilés posés à la main

La salle des pas perdus, classée monument historique, a été reprise et consolidée par tirants avant construction d'un renfort. Les deux cages d'ascenseur reprennent les efforts de charge des voûtes de la salle de 450 m². Les structures d'autres salles ont également été renforcées par des profilés en acier, posés un par un, à la main.

Le remaniement des locaux a généré des travaux de reprise en sous-œuvre. ■



© JIM BANNWARTH/BALLOIDE PHOTO

Vue des tirants provisoires dans la salle des pas perdus du palais de justice.

VINCI SE DÉVELOPPE DANS LES COMBUSTIBLES

Le groupe Vinci se développe dans le secteur du pétrole et du gaz. Par l'intermédiaire de Spiecapag (Vinci Construction), il participe à la construction d'oléoducs et de gazoducs en Australie et en Colombie.

De mars à novembre 2015, Spiecapag (mandataire) va construire avec Lucas un gazoduc de 300 km, à 1 000 km de Perth (Australie).

Ce pipeline traverse une région quasi désertique pour alimenter la centrale électrique de mines d'or.

En Colombie, Spiecapag avec Ismocol est impliquée dans la première tranche de 37 km d'un oléoduc au Sud-Est de Bogota, pour Ecopetrol. De plus, la société Pacific Strutus a adjugé au groupe Golfo de Morrosquillo CGM mené par Spiecapag, un gazoduc onshore de 80 km et un offshore de 4 km

avec un terminal maritime destiné à l'exportation de gaz naturel.

→ Marchés en Asie

Par ailleurs, la filiale Entrepose du groupe a acquis en mai la société indonésienne PT Istana Karang Laut (IKL), spécialisée dans le traitement de pétrole et de gaz, les systèmes de mesure ainsi que les projets clés en main. Ce rachat ouvre au groupe les marchés d'Asie centrale et

du Sud-Est où la demande en énergie croît fortement, selon Vinci.

Toujours en Asie, cette fois en Malaisie et dans le bâtiment, Vinci Construction Grands Projets va bâtir trois tours résidentielles de 20 étages, associées à un centre commercial et à un parking de 900 places, au nord de Bornéo, pour le compte de Jesselton Group. Livraison : juillet 2016.

→ 43 km d'autoroute

Enfin, signalons la mise en service progressive de la première section de l'autoroute M11 en Russie, au 1^{er} semestre 2015. NWCC, filiale de Vinci Concessions et Mostotrest, avaient remporté en 2008 la concession des 43 km, de la conception à la maintenance en passant par le financement, sur trente ans. À terme, la M11 reliera la capitale de la Russie à Saint-Petersbourg. ■

© FRANCIS VIGOUROUX/PHOTOTHÈQUE VINCI



La première section de la M11 à partir de Moscou (Russie) a été mise en service au premier semestre.

INTERCONNEXION DE DEUX RÉSEAUX D'EAU POTABLE



L'interconnexion court le long des routes pour faciliter son installation et les réparations.

Deux réseaux d'eau potable viennent d'être connectés dans l'Eure pour faire face à une éventuelle pénurie d'eau. En région agricole, il peut être difficile d'offrir une eau potable aux normes notamment en ce qui concerne la teneur en nitrates.

La région de Damville au sud d'Évreux est sujette à ce type de pollution de la nappe phréatique où est puisée l'eau.

Des forages ont été fermés. Aujourd'hui, deux des trois forages existants fournissent tout juste les 2 400 m³ d'eau par jour nécessaires aux 5 000 abonnés. De mai à octobre, la situation est limite.

Le secteur voisin, celui de Breteuil-sur-Iton, comporte six forages avec de l'eau de meilleure qualité et en excédent.

Le Syndicat d'eau potable et d'assainissement collectif du Sud de l'Eure (Sepase), qui regroupe depuis 2012 les deux secteurs (35 communes, 11 600 abonnés), a donc décidé de relier les deux réseaux⁽¹⁾.

« Le but premier de l'interconnexion est de secourir le réseau de distribution du secteur de Damville en cas de pollution ou de défaillance d'un de ses forages, explique Benoît Concedieu, directeur d'exploitation au Sepase. Pour maintenir une qualité d'eau dans l'interconnexion, un volume minimum d'eau sera mélangé avec celle de l'usine de traitement dans la bache enterrée de 500 m³. »

L'interconnexion de 14 km dont le chantier se termine en septembre, fournira donc un débit minimum de 780 m³/jour d'eau potable à Damville et selon les besoins, jusqu'à 2 500 m³/jour.

Sous pression de 10 à 13 bars, elle peut fonctionner dans les deux sens, gravitairement ou à l'aide de pompes, entre l'usine des Meurgers, secteur de Damville, et le château d'eau de la Mare des Naux, secteur de Breteuil-sur-Iton. Elle coûte 1,3 million d'euros HT.

→ Tubes en polyester renforcé

Le tracé suit autant que possible routes et chemins, afin de simplifier l'implantation des canalisations et de faciliter leur réparation. Toutefois, trois routes départementales et la rivière Iton ont été franchis grâce à des techniques de travaux sans tranchée (forages horizontaux).

La connexion est réalisée en tubes de polyester renforcé de fibre de verre (PRV). Hobas qui les fabrique a obtenu une attestation de conformité sanitaire en 2011 pour leur emploi en eau potable. Moins cher que la fonte, le PRV est plus léger (11 kg/mètre), ce qui fait gagner

du temps de pose. Il se raccorde à la fontainerie en fonte existante.

→ Déviation angulaire de 6°

La résine qui tapisse l'intérieur du tube lui confère un très bon coefficient hydraulique de 0,01. La résistance mécanique du tube - fabrication selon les pressions de service voulues - ses caractéristiques anti corrosion et anti abrasion, et ses diamètres de 200 à 2 000 mm, en font un produit adapté aux canalisations de transport d'eau.

Le matériau supporte une déviation angulaire de 6° contre 3° pour la fonte. Cette "souplesse" évite de poser certains coudes qui, eux, ont besoin d'être soutenus par une butée en béton et créent des pertes de charge supplémentaires. ■

(1) Le Sepase résulte de la fusion en 2012 du Syndicat d'eau potable Iton et Avre, et du Syndicat intercommunal de production et de distribution d'eau potable de la région de Breteuil-sur-Iton.



Le tronçon de 14 km fonctionne dans les deux sens, gravitairement ou à l'aide de pompes.

PETITE USINE DE DÉNITRIFICATION

L'usine des Meurgers au nord de Damville (Eure) élimine nitrates et pesticides au rythme de 40-70 m³/h d'eau par vingt-quatre heures. C'est une des plus petites installations de ce type en Europe.

L'eau polluée, surtout par des nitrates, traverse deux filtres, un à bactéries et un à charbon actif. Elle entre, par exemple, à 49 mg de nitrates par litre et en ressort à 3,4. Une fois traitée, elle peut être mélangée à une eau moins pure avant distribution dans le réseau régi par le Syndicat d'eau potable et d'assainissement collectif du Sud de l'Eure (voir ci-contre).

L'usine, ouverte en août 2014 mais inaugurée en 2015, a coûté 3,5 millions d'euros.

CENTRALES PAR BOUYGUES

Bouygues Énergies & Services démarre en août le chantier d'une centrale électrique à gaz et fuel léger à Gibraltar. La centrale produit de l'électricité (80 MW) et récupère 3,4 MW de chaleur sur les gaz d'échappement. Par ailleurs, la filiale de Bouygues Construction a commencé en juillet la construction d'une usine de gazéification à partir de déchets, au nord de Londres (Angleterre), à livrer en 2017. Elle en assurera la maintenance pendant dix ans. Le gaz sert à produire de l'électricité (10 MW).



Le chantier de la centrale thermique de Gibraltar démarre en août.

ÉCHANGEUR RESTRUCTURÉ

Eiffage Travaux Publics va restructurer un échangeur du périphérique parisien (Paris XIII^e).

Les travaux de 48 millions d'euros confiés par la Société d'étude, de maîtrise d'ouvrage et d'aménagement parisienne vont durer près de quatre ans. Ils incluent 7 ouvrages d'art en béton armé dont un mixte béton-métal et près de 20 000 m² de chaussées phoniques.

CARRIÈRE ÉCONOME EN ÉLECTRICITÉ

Les Carrières Le Valet et Brandefert (Ille-et-Vilaine) ont cherché à optimiser leur installation électrique à l'occasion de leur réhabilitation. EDF Optimal Solutions et RSW ont proposé une configuration à 1 MW de puissance là où d'autres candidats arrivaient à 2 MW.

Le site d'où sont extraits sables, cailloux et granulats, abrite des aspirateurs de poussières, des broyeurs, des extracteurs de silo, des extracteurs de trémie d'apport et des pompes. Le dispositif de RSW lisse les appels de puissance.

Il garantit un bon débit d'énergie par machine et harmonise les appels de puissance de manière à consommer la juste quantité d'énergie disponible. L'optimiseur baisse la puissance maximum appelée de 190 kW environ, ce qui réduit l'abonnement de 10 300 euros HT/an selon RSW. Les machines consomment moins grâce à des variateurs de fréquence et à l'adaptation de la puissance des broyeurs en fonction de leur charge, soit 7 600 euros HT en moins par an.

SOL TRAITÉ RENFORCÉ PAR GÉOSYNTHÉTIQUE SUR INCLUSIONS RIGIDES



© CONSEIL DÉPARTEMENTAL DU CHER

Pose du géotextile de renforcement dans le sol sous la rocade nord-est de Bourges (Cher).

La rocade nord-est de Bourges (Cher) passe sur une ancienne décharge, ce qui a nécessité une amélioration du sol par inclusions rigides (pieux) associées à un matelas de répartition renforcé par géosynthétique. Ce chantier, qui a donné lieu à une méthode de calcul spécifique, a été présenté aux Rencontres géosynthétiques de 2015⁽¹⁾. La rocade a été mise en service à la mi-juin 2015. L'amélioration des sols vise à maîtriser les tassements de la couche de déchets, à limiter ceux dus à leur éventuelle biodégradation, à assurer la portance et à évacuer les effluents.

Dans cette zone, la route repose sur un remblai de 3 à 8 m de haut, 30 m de

large au sommet et 48 m à sa base, sur 160 m de long. Ce tronçon raccorde un giratoire à un ouvrage de franchissement de la rivière, le Langis.

Le système adopté par le Conseil départemental du Cher, maître d'ouvrage et maître d'œuvre, parmi les propositions du cabinet d'ingénierie Antea Group avec l'entreprise Charier, comprend des inclusions en béton qui traversent les déchets et transfèrent les charges au sous-sol calcaire.

→ Reprise des efforts entre pieux

Pour réduire le poinçonnement par les inclusions rigides, celles-ci sont séparées du géosynthétique et du sol traité par une couche intermédiaire en matériau granu-

laire (dessin). Le calcul s'établit donc sur l'angle de leur frottement avec un matériau granulaire. L'empreinte d'une inclusion de 0,36 m de diamètre (haut du pieu) a ainsi été évaluée à plus de 1 m de diamètre dans le matelas de répartition situé 70 cm plus haut.

L'entreprise Charier a proposé le traitement hydraulique d'une partie du matelas de répartition. Un sol traité au liant est plus résistant à la compression et à la traction qu'un matériau granulaire. Toutefois, pour compenser son pH basique, il doit être séparé du géosynthétique par une couche de granulats.

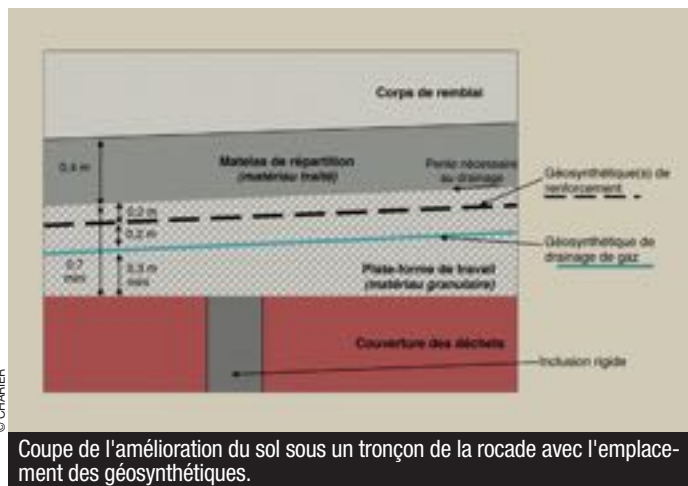
Cette conception a permis d'opter pour un renforcement en tissu multi filaments en polyester moins fort que la géogrille en PVA prévue.

Si la couverture de déchets se tasse, le tissu reprend les efforts entre les pieux, d'où une réduction du nombre d'inclusions. Il a également été dimensionné pour le cas de figure où une fissuration du sol traité conduirait au tassement de celui-ci entre les inclusions.

→ Base du dimensionnement

À 20 cm environ en dessous du géosynthétique de renforcement, a été posé, en pente, un géocomposite qui draine les eaux d'un côté, et de l'autre, laisse remonter le biogaz émanant des ordures. En phase projet, cette amélioration des sols a été dimensionnée avec l'appui du guide Asiri, de la norme BS8006-1, d'une modélisation et de la méthode EBGeo (géosynthétique de renforcement). ■

⁽¹⁾ Organisées par le Comité français des géosynthétiques. Cf. *Travaux* juin 2015, actualité. Conférences à la rubrique publications sur : www.cfg.asso.fr.



© CHARIER

Coupe de l'amélioration du sol sous un tronçon de la rocade avec l'emplacement des géosynthétiques.

DU CHANVRE EN SOUS-COUCHE ROUTIÈRE

Des fibres de chanvre ont été incorporées en sous-couche d'un barreau d'accès à la rocade de Bourges (Cher). Cet ajout accroît la résistance à la traction et à la fatigue d'un sol traité au ciment et en limite la fissuration. L'entreprise Charier l'expérimente en grandeur nature sur ce tronçon avec le Conseil départemental du Cher.

« La fibre de chanvre est relativement chère mais le surcoût est largement compensé par les économies de bitume et de granulats », écrit Valéry Ferber, directeur environnement et innovation chez Charier qui a mis au point le procédé (Satis) avec le laboratoire LMDC de l'Université Paul Sabatier de Toulouse et l'Ifsttar.



Station de la ligne 12, Aubervilliers

- PAROIS MOULÉES
- SOUTÈNEMENTS DE GRANDE HAUTEUR
- PIEUX DE FONDATIONS, MICROPIEUX
- FORAGES, INJECTIONS, TRAVAUX EN CARRIÈRE
- CLOUS ET TIRANTS D'ANCRAGE
- TRAVAUX DE REPRISE EN SOUS-ŒUVRE
- FONDATIONS DE PYLÔNES ET ÉOLIENNES
- SONDAGES DE RECONNAISSANCE
- JET GROUTING



CRÉATEUR DE **SOLUTIONS**



Ikea, Bayonne

LAMPADAIRE SOLAIRE SUR BATTERIE

Ce lampadaire fonctionne uniquement sur batterie reliée à un capteur photovoltaïque. En septembre, il sera disponible avec une batterie garantie dix ans pour une durée de vie de vingt ans, selon Novéa Énergies qui le propose. Ainsi, la maintenance s'en trouve-t-elle allégée. Il s'agit de cellules en lithium fer phosphate associées à une électronique de gestion, le tout réuni dans un boîtier d'aluminium afin d'en faciliter le montage.

Ces batteries ont été développées et testées en partenariat avec le Commissariat à l'énergie atomique.



© NOVEA ENERGIES

Ce lampadaire restitue la nuit l'électricité d'origine solaire grâce à une batterie à longue durée de vie.

REFROIDISSEMENT PAR GÉOTHERMIE

Dans le cadre de la construction d'un centre de données à l'Université de Strasbourg, Ecome participe à la maîtrise d'œuvre des installations énergétiques, en particulier le refroidissement.

Il prend en charge la modélisation, la conception des installations et le suivi d'exécution de deux puits géothermiques en doublets sur nappe (puissance 1,5 MW).

INCORPORER DU BÉTON RECYCLÉ DANS LE BÉTON



© RECYBÉTON

Vérification de la consistance du béton lors d'épreuves de convenance, centrale Cemex pour le chantier expérimental de Mitry-Mory (Seine-et-Marne).

De février à mai, du béton formulé avec du sable recyclé à 30% et du gravillon recyclé à 50% a été utilisé et son comportement analysé sur le chantier expérimental des archives de la Maison départementale des solidarités de Mitry-Mory (Seine-et-Marne), avec deux centrales Cemex (photos).

C'est un des sites d'application des recherches du projet national Recybeton, destiné à accroître l'emploi de bétons incorporant des produits recyclés. Le projet est reconnu par le Réseau génie civil et urbain et administré par l'Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil. Doté de 5 millions

d'euros HT, il a été lancé en 2012 pour quatre-cinq ans. Ses responsables viennent de publier un rapport intermédiaire. L'objectif de Recybeton est d'incorporer tous les matériaux issus des bétons de déconstruction dans de nouveaux bétons. Le projet envisage aussi l'emploi des parties fines comme liant hydraulique dans la production de ciment.

Le projet se développe autour des axes suivants : technologie et procédés, matériaux et structures, développement durable, aspects réglementaires et normatifs, études socio-économiques, et d'un plus récent, le prémélange en carrière des recyclats avec les granulats neufs.

→ Pas plus de risque de fissuration

Les recherches en laboratoire sont donc complétées par des chantiers expérimentaux afin de révéler les difficultés du terrain et d'y remédier. En 2013, la société ELTS avait mis à disposition 2 100 m² de parking afin de tester six dalles de 18 cm d'épaisseur avec une gamme de bétons incorporant de 0 à 100% de granulats recyclés. Le site a montré un abaissement d'élasticité avec les recyclés et un retrait croissant avec leur proportion. En revanche, le risque de fissuration n'est pas plus élevé.

En 2014, un piédroit et une traverse d'un pont cadre d'une véloroute sur le contournement ferroviaire Nîmes-Montpellier, ont été réalisés avec des granulats recyclés. L'expérience montre un comportement comparable à celui d'ouvrages en béton courant.

→ Murets à gravillon recyclé

En 2014-2015, des murets et trottoirs de Genevilliers (Hauts-de-Seine) ont été construits avec 30% de gravillon recyclé. Le projet national Recybeton se poursuit avec la publication d'un ouvrage sur ses acquis scientifiques à paraître en 2017, des guides pratiques et un recueil de propositions d'évolutions normatives et réglementaires pour faciliter l'emploi de béton recyclé. ■



© RECYBÉTON

Tri manuel des recyclés 40/100 mm, site Cemex pour le chantier de Mitry-Mory.

TOUR EN BOIS DE 84 M



© RÜDIGER LAINER AND PARTNER

Le bois est rattaché à des noyaux en béton et soutenu en périphérie des étages par des colonnes de bois.

Le chantier de la tour en bois de 84 m de haut à Vienne (Autriche) commence au printemps 2016. Ses 24 niveaux d'appartements, bureaux et hôtel, devraient être terminés fin 2017. Le maître d'ouvrage Cetus Baudevelopment GmbH y louera 19 500 m² sur 25 000 m² de surface brute, et investit 65 millions d'euros dans "Hoho".

La tour est construite par le cabinet d'architectes Rüdiger Lainer and Partner (RLP) qui a conçu l'urbanisme du nouveau quartier qu'elle dominera de sa façade en bois clair, près d'un lac.

Le bureau d'ingénierie RWT+ZT GmbH a étudié la structure mixte bois (74%) et béton. Ce dernier se voit peu - les espaces intérieurs sont en bois également. Les noyaux de béton servent de support à des structures autoportantes en bois. Des planchers composites, également en bois, rattachés aux noyaux, s'étendent jusqu'au bord extérieur des étages où ils sont alors soutenus par des

colonnes en bois. Les murs de façade sont préfabriqués.

→ Intérieur modulable

Les volumes intérieurs sont modulables pour s'adapter à différentes occupations des locaux, d'où une durée de vie très longue selon les architectes concepteurs. ■



© CY ARCHITECTURE

Intérieur tout en bois de la tour Hoho (Vienne, Autriche).

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 13 AU 17 SEPTEMBRE

16^e conférence mécanique des sols et géotechnique

Lieu : Édimbourg (Écosse)
<http://xvi-ecsmge-2015.org.uk>

• 14 AU 16 SEPTEMBRE

8^e symposium ponts en acier

Lieu : Istanbul (Turquie)
www.sbic2015.org

• 15 AU 17 SEPTEMBRE

Auscultation non destructive des ouvrages d'art

Lieu : Berlin (Allemagne)
www.ndt-ce2015.net

• 15 AU 17 SEPTEMBRE

16^e symposium ISAVFT sur l'aérodynamique, la ventilation et l'incendie dans les tunnels

Lieu : Seattle (Washington, États-Unis)
www.bhrconferences.com

• 16 AU 18 SEPTEMBRE

Lieux durables 2015 (efficacité énergétique des zones urbaines)

Lieu : Savone (Italie)
www.horizon2020.gouv.fr

• 16 AU 18 SEPTEMBRE

1^{ère} conférence sur la résilience des transports de surface face au changement climatique et aux événements météorologiques extrêmes

Lieu : Washington DC (États-Unis)
www.trb.org

• 21 AU 25 SEPTEMBRE

4^e conférence sur les ponts orthotropiques

Lieu : Tianjin (Nord-Est Chine)
<http://en.chinabridge.org.cn>

• 24 SEPTEMBRE

Ponts en maçonnerie : du diagnostic à la réparation (journée technique)

Lieu : Nancy (Meurthe-et-Moselle)
www.cerema.fr

• 30 SEPTEMBRE ET 1^{er} OCTOBRE

5^e assises Port du futur

Lieu : Paris
www.eau-mer-fleuves.cerema.fr

• 30 SEPTEMBRE AU 2 OCTOBRE

Rencontres nationales du transport public

Lieu : Lyon (Eurexpo)
www.rencontres-transport-public.com

• 1^{er} OCTOBRE

Restitution du programme national Ceos (fissuration des ouvrages spéciaux en béton)

Lieu : Lyon
www.ceosfr.irex.asso.fr

• 5 AU 7 OCTOBRE

4^e conférence sur la réparation, la réhabilitation et le recyclage du béton

Lieu : Leipzig (Allemagne)
www.iccrr.com

FORMATIONS

• 21 ET 22 SEPTEMBRE

Conduire un projet de gare

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

• 1^{er} OCTOBRE

Réhabilitation énergétique : choix des solutions techniques en bâtiment tertiaire

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

• 6 ET 7 OCTOBRE

Gestion des eaux pluviales : élaborer une politique territoriale

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

• 12 OCTOBRE

Prestations de service relatives aux sites et sols pollués

Lieu : Paris
www.lne.fr

• 14 AU 16 OCTOBRE

Concevoir un programme de reconnaissance géotechnique des sols

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

• 24 AU 27 NOVEMBRE

Analyse des projets de parcs éoliens raccordés au réseau

Lieu : Châteaudun (Eure-et-Loir)
www.metrol.fr

• 26 ET 27 NOVEMBRE

Robustesse des structures

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

NOMINATIONS

CEREMA :

Yves Krattinger a été élu président du conseil stratégique du Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement. Il y représente l'Assemblée des départements de France.

CERIB :

Philippe Gruat prend le relais de Jean Bonnie à la présidence du Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton.

EGF-BTP :

Laurent Grall préside le Syndicat national des entreprises générales françaises de bâtiment et de travaux publics. Il succède à Michel Gostoli.

GRAND PARIS :

deux personnes ont été nommées membres du directoire de la Société du Grand Paris. Bernard Cathelain est chargé du programme de conception et de réalisation du projet de transport, de la fonction industrie et achats, et de l'ingénierie

environnementale, en remplacement de Didier Bense. Catherine Pérenet est chargée de fonctions transversales dont les systèmes d'information et la valorisation du patrimoine, à la suite de Pierre-Alain Jeanneney.

EGIS :

Olivier Bouvard devient directeur général d'Egis Rail, fonction occupée par Hubert Magnon-Pujo qui reste directeur exécutif de la branche International et grands projets du groupe Egis. Vincent Roger est passé directeur général d'Atelier villes et paysages, filiale d'Egis.

RICS FRANCE :

Catherine Dargent-Ahlqvist préside la RICS France pour dix-huit mois, organisme de qualification des métiers de l'immobilier, de l'aménagement-urbanisme et de la construction. Elle relaie Karl Delattre.

UEPG :

Jesus Ortiz (Espagne) a été élu président de l'Union européenne des producteurs de granulats pour trois ans. Il succède à Arnaud Colson.

BALINEAU

FONDACTIONS SPÉCIALES ET TRAVAUX NAUTIQUES

Pilage au starter drill

- Pieux battus
- Palplanches
- Pieux forés
- Tarière continue
- Parois moulées
- Améliorations des sols
- Travaux en sites fluvial et maritime

Système de moulage de béton pour pieux battus

Métropole
Siège social et bureaux :
3 avenue Paul Langevin
ENORA Park - CS 30039
33605 PESSIAC cedex
tél. : +33 (0) 5 57 89 16 78
fax : +33 (0) 5 56 07 34 78
balineau@balineau.fr

Antilles :
Rue Nobel - Z.I. de Jarry
BP 2103
97195 JARRY cedex
tél. : +590 (0) 590 32 59 10
fax : +590 (0) 590 26 89 44
balineau.antilles@balineau.fr

www.balineau.com

LA MÉMOIRE ACTIVE DE LA GÉOTECHNIQUE

ENTRETIEN AVEC JEAN-PIERRE MAGNAN, CONSEILLER TECHNIQUE, ANCIEN DIRECTEUR DU DÉPARTEMENT GERS, IFSTTAR. PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON

JEAN-PIERRE MAGNAN A CONSACRÉ LA TOTALITÉ DE SA CARRIÈRE D'INGÉNIEUR À L'ÉTUDE DES PROBLÈMES DE GÉOTECHNIQUE, DANS LES DOMAINES DES SOLS ET DES ROCHES AINSI QUE DES TERRASSEMENTS, AU SEIN DU LCPC DONT IL ÉTAIT DIRECTEUR TECHNIQUE, AVANT DE DEVENIR CHEF DU DÉPARTEMENT DE GÉOTECHNIQUE, ENVIRONNEMENT, RISQUES NATURELS ET SCIENCES DE LA TERRE DE L'IFSTTAR.



© MARC MONTAGNON

Professeur de mécanique des sols et des roches à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, professeur de géotechnique à l'École Nationale des Travaux Publics de l'État, il est également président du Comité de coordination de la normalisation en géotechnique et président du comité Français des Géosynthétiques.

Depuis sa sortie de l'ENPC en 1973, il a, non seulement contribué à beaucoup des recherches menées en France dans le domaine géotechnique, mais les a souvent initiées, avec une démarche essentiellement pragmatique orientée, non pas vers la recherche fondamentale, mais toujours vers des résultats directement applicables sur les chantiers.

Avec ses souvenirs, c'est l'histoire de la géotechnique et de ses développements depuis 40 ans qu'il retrace dans cette interview d'ouverture de Travaux « Sols et fondations ».

© JEAN-PIERRE MAGNAN



2

© JEAN-PIERRE MAGNAN



3

Comment votre carrière peut-elle être résumée dans ses grandes lignes ?

À ma sortie de l'École des Ponts en 1973, une bonne connaissance du russe acquise à l'École Polytechnique m'a conduit à passer un an en URSS, en 1973 et 1974, dans le cadre d'un stage à la chaire de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations de l'Institut de Génie Civil de Moscou (MIS), dirigée alors par N.A. Tsytoïvitch. Ceci m'a permis de découvrir l'état de la géotechnique et de l'étude des sols dans ce pays.

Puis je suis entré au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées où j'ai effectué toute ma carrière entre septembre 1974 et novembre 2014. J'ai débuté comme ingénieur à la section de mécanique des sols du département des sols et fondations et, après avoir occupé plusieurs postes de responsabilité, dont celui de Directeur technique jusqu'en avril 2010, toujours dans le domaine de la géotechnique, je suis devenu chef du département de géotechnique du LCPC puis de l'IFSTTAR, né le 1^{er} janvier 2011 de la fusion entre le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) et l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité).

Depuis mon départ en retraite en novembre 2014, j'interviens en tant que conseiller technique dans le domaine de la mécanique des sols au sein de l'IFSTTAR.

De la période « moscovite » de ma vie, j'ai gardé comme trace la réalisation d'un lexique russe-français de mécanique des sols ainsi que la traduction de plusieurs ouvrages sur les sols mous compressibles et les sols loessiques, ce qui correspondait à mes activités initiales.

À mon retour en France, j'ai été chargé au LCPC du domaine de la construction sur les sols compressibles.

© MARC MONTAGNON



JEAN-PIERRE MAGNAN : UN PARCOURS PARTICULIÈREMENT DENSE

Ingénieur général des Ponts, des Eaux et des Forêts, Jean-Pierre Magnan, outre une carrière entièrement consacrée à la géotechnique tant au niveau de la recherche que de l'enseignement, peut faire état d'une multitude de projets et d'expertises dans les reconnaissances de site et la construction de nouvelles infrastructures, les risques naturels, les remblais ultra légers, les fondations de ponts, les ouvrages de soutènement, la géotechnique pour l'environnement.

Il a publié une trentaine d'ouvrages et de fascicules des techniques de l'ingénieur et assuré la traduction du russe de plusieurs ouvrages clés dans le domaine des sols mous et des sols loessiques affaissables.

À ceci s'ajoutent nombre d'actes de congrès et de symposiums ainsi qu'une multitude d'articles dans des revues spécialisées, de communications écrites à des congrès, de rapports de recherche.

Il a également dirigé 70 thèses et participé à de très nombreux jurys de thèses. Ses responsabilités dans des manifestations internationales ont été également et sont encore très nombreuses.

1- Jean-Pierre Magnan.

2- Site expérimental de Cubzac-les-Ponts.

3- Une route au Burkina Fasso.

4- Quelques uns des nombreux ouvrages écrits par Jean-Pierre Magnan.

5- Effondrement de falaise sur la Route du Littoral à La Réunion.

6- Expertise sur une voie ferrée au Maroc.

C'était l'époque du développement du réseau autoroutier, ce qui m'a amené à participer à plusieurs projets dans ce domaine avec les Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées, dont le LCPC assurait la coordination.

L'un des plus importants, mais qui ne s'est pas réalisé à la suite de la décision de changer le tracé, était celui du passage de l'autoroute A64 dans les Barthes de l'Adour.

J'ai également travaillé pour un grand nombre de projets autoroutiers et ferroviaires au Maroc, sur les problèmes de sols compressibles et de glissements de terrain. Ces travaux étaient menés avec le LPEE (Laboratoire Public d'Essais et d'Études) du Maroc, issu de la filiale marocaine du CEBTP, société privée dépendant de la Fédération Nationale du Bâtiment, qui disposait

de filiales dans toutes les anciennes colonies françaises.

Le CEBTP a été démantelé en 1997 et ses filiales nationales se sont développées indépendamment dans la quasi-totalité des pays francophones d'Afrique. Il existe d'ailleurs une association de ces laboratoires - l'ALBTP⁽¹⁾ - dont l'un des projets actuels est de rééditer le guide de conception des routes en Afrique, projet qui devrait se réaliser avec la participation de toutes les entreprises françaises travaillant en Afrique. Outre les travaux sur les sols compressibles, dont je suis devenu l'un des spécialistes au niveau mondial, j'ai élargi mon champ d'activité à l'ensemble de la géotechnique en réalisant notamment de nombreuses expertises à l'étranger, puis je me suis intéressé à la mécanique des roches. J'ai participé, par exemple, à la gestion de la crise consécutive à la chute d'une falaise à La Réunion, en 2006. J'ai également abordé les problèmes de construction en zone sismique, notamment lors de travaux sur l'aéroport de Nice.

Quelle était la nature de cette activité très variée bien que consacrée essentiellement à l'ensemble des problèmes de mécanique des sols ?

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées se considérait, avec le SETRA, comme le coordinateur des capacités techniques du ministère de l'Équipement dans le domaine de la construction au sens large, c'est-à-dire incluant les chaussées, les ouvrages d'art et la géotechnique.

Toute notre activité était centrée sur l'application aux projets et à la construction. Nous n'avons jamais, à proprement parler, fait de la recherche sur des sujets qui n'avaient pas d'application. Ceci explique que je me sois toujours intéressé aux travaux, ▷

© JEAN-PIERRE MAGNAN



© JEAN-PIERRE MAGNAN



qui constituent une phase essentielle de la construction que nous nous sommes toujours efforcés d'intégrer à nos recherches. Nous avons ainsi développé beaucoup d'outils pour la conception des projets, pour le suivi des travaux et leur réception.

Ceci est caractéristique de la démarche du LCPC : il n'a jamais été un centre de recherche pure, même si nous avons fait de la modélisation. Notre idée a toujours été d'appliquer nos recherches à des problèmes réels.

Vous travaillez donc principalement sur des projets dont la construction était déjà envisagée ?

Si l'on prend, par exemple, le cas des remblais sur sols mous, à l'époque, les chantiers de ce type étaient très nombreux.

Dans les années 1970, ils posaient énormément de problèmes de tassements, de stabilité... Nous avons d'abord réalisé beaucoup d'observations à l'occasion de chantiers, puis nous les avons poursuivies sur des sites expérimentaux.

Le problème posé par les chantiers est qu'après leur achèvement il n'est plus possible d'accéder au site étudié. Or, dans les problèmes de sols compressibles, l'une des composantes est le tassement qui peut durer plusieurs mois, voire plusieurs années, bien après la fin des travaux.

Nous sommes donc passés des ouvrages expérimentaux sur chantiers réels à des sites expérimentaux que nous avons exploités pendant très longtemps. L'un d'entre eux était situé à Cubzac-les-Ponts, près de Bordeaux, au nord de la Dordogne, et nous l'avons suivi pendant plus de 30 ans.

Sur ce site, nous avons construit quatre remblais et mené un très grand nombre de recherches sur le comportement des



© MARC MONTAGNON

LES 5 DÉPARTEMENTS DE L'IFSTTAR

- Mast** - Département Matériaux et structures.
- Gers** - Département Géotechnique, environnement, risques naturels et sciences de la terre.
- Cosys** - Département Composants et systèmes.
- TS2** - Département Transport santé, sécurité.
- Ame** - Département Aménagement, mobilité et environnement.

LE DÉPARTEMENT GERS

Le département GERS (Géotechnique, environnement, risques naturels et sciences de la terre) est l'un des cinq départements issus de la restructuration de l'IFSTTAR, créé 2011 par fusion entre le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) et l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité). Il a été créé le 1^{er} janvier 2013 et a pour activité principale les géosciences appliquées au génie civil et à l'aménagement.

Le département GERS couvre un spectre large de disciplines scientifiques et techniques, telles que la géotechnique, la géologie, l'hydrologie, la chimie environnementale, la géophysique et l'auscultation.

Les 96 agents permanents du département sont répartis sur plusieurs sites géographiques au sein de 6 laboratoires et de 2 unités mixtes de recherche : Nantes-Bouguenais (58 agents), Marne-la-Vallée (29 agents), Bron (4 agents), Grenoble (4 agents) et 1 agent au sein du centre CEREMA de Nice.

remblais et la rhéologie des sols argileux. Nous disposons d'autres sites pour les fondations, pour la stabilité des pentes... qui avaient été choisis en fonction de leurs caractéristiques par les laboratoires régionaux, qui en assuraient par ailleurs la gestion. Nous avons toujours eu cette politique de travailler sur des terrains réels, qui posent toujours le même problème : on construit sur des terrains dont on ne connaît pas précisément la nature et les propriétés.

La reconnaissance géotechnique a pour but de mesurer autant que possible les propriétés des terrains sur lesquels on va construire.

Dans le cadre de l'autoroute A64, dont je vous ai parlé, nous avons construit 10 remblais d'essai pour comprendre comment il était possible de résoudre les problèmes de stabilité et de tassement.

Bien qu'il n'ait pas été mené à terme, ce projet nous a permis d'acquérir énormément de connaissances.

Dans la mesure où vous interveniez directement ou indirectement sur des chantiers en cours, quelles étaient vos relations avec les entreprises ?

Nous avons accompagné toutes les techniques d'amélioration et de renforcement des sols. Par exemple, avec Louis Ménard, nous avons contribué très largement au développement du pressiomètre dans les années 1960/1970 puis nous avons participé aux chantiers de validation des techniques d'amélioration et renforcement pour l'entreprise Ménard mais aussi pour d'autres entreprises. Nous faisons des observations sur les chantiers non seulement pour les techniques d'amélioration des sols mais aussi pour le comportement des pieux. Nous avons ainsi créé une banque de données sur les fondations qui a servi à définir les bases de calcul de ces ouvrages. Tous ces essais étaient réalisés sous l'égide du LCPC en collaboration avec les laboratoires régionaux : ils ont permis de définir la méthode de calcul des pieux à partir du pressiomètre, qui fait partie des normes françaises actuelles. Le LCPC a eu de ce fait une très grande influence sur le développement des techniques dans les Travaux Publics. Par la suite, les entreprises ont développé progressivement de plus en plus de compétences pour montrer l'efficacité des techniques qu'elles proposent, sur la base d'essais que nous avons faits au départ et qui ont ensuite été réalisés par d'autres structures indépendantes.

En tant que directeur technique du domaine géotechnique au LCPC, vous avez ainsi été amené à aborder également tous les problèmes liés à la construction proprement dite des ouvrages.

J'ai toujours considéré qu'il était impor-



tant de tenir compte du fonctionnement des ouvrages car la finalité des études géotechniques est de gérer les interactions avec les autres éléments des constructions, qu'il s'agisse de couches de chaussées ou de structures en béton ou en métal, voire plus rarement en bois.

L'activité que j'ai eue et que, globalement, nous avons cherché à avoir au LCPC était de maîtriser l'interaction des constructions avec le sol.

C'est pour compléter cette démarche que, dès ma sortie de l'École des Ponts, je suis devenu enseignant, d'abord en appui de François Schlosser qui était professeur de mécanique des sols à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, puis en tant que professeur, quand je lui ai succédé, fonction que j'exerce depuis plus de 20 ans. Je suis également devenu professeur à l'École Nationale des Travaux Publics de l'État, qui formait les fonctionnaires appelés notamment à travailler dans les laboratoires régionaux.

Parallèlement, avec mes collègues du LCPC, j'ai organisé la normalisation française en géotechnique. Il n'existait au départ pas de normes : seulement des règlements, des modes opératoires et des recommandations.

Lorsque l'Europe a commencé à se mettre en place, la décision des gouvernements a été d'harmoniser les techniques par les normes plutôt que par les règlements.

Nous avons donc pensé qu'il serait utile de développer un corps de normes françaises. Nous nous sommes beaucoup investis avec les laboratoires régionaux dans leur définition et le LCPC a créé avec le SETRA le bureau de normalisation qui s'appelait à l'époque BNSR, c'est-à-dire Bureau de Normalisation des Sols et des Routes, fusionné depuis avec d'autres et qui est devenu le BNTRA (Bureau de Norma-

LE BNTRA

Le Bureau de Normalisation des Transports, des Routes et de leurs Aménagements (BNTRA) est placé sous la responsabilité de la direction technique Infrastructures de transports et matériaux (DTITM, anciennement SETRA) du CEREMA.

Le domaine d'intervention du BNTRA est l'ingénierie normative relative à la conception, la construction et l'entretien des chaussées et des ouvrages d'art en béton ainsi qu'aux questions liées aux terrassements, fondations et soutènements, à l'exclusion des liants bitumineux (BNPé) et hydrauliques (BNLH) et des méthodes d'essais correspondantes.

7- Le nouveau siège de l'Ifsttar à Champs-sur-Marne.

8- Effondrement de terrain sur une route dans la région d'Epinal.

9- Le tunnel du Bois de Peu sur la rocade sud de Besançon : définition des têtes d'accès dans une pente en limite de stabilité.

10 et 11- L'oued Drader sur la côte du Maroc entre Rabat et Tanger. Suite à une période de fortes pluies, une crue d'ampleur imprévue a érodé le fond du lit de la rivière, emporté les remblais d'accès et déformé le pont. Les remblais d'accès ont été reconstruits avec des buses pour les alléger.

lisation des Transports, des Routes et de leurs Aménagements).

Ce bureau de normalisation gère des commissions de normalisation qui couvrent tous les secteurs de la géotechnique, des ouvrages et des matériaux. Nous sommes ensuite passés au niveau européen et nous avons participé à la création de toutes les instances de normalisation du Comité Européen de Normalisation (CEN) dans le domaine Géotechnique.

J'ai participé personnellement à l'écriture de l'Eurocode 7, relatif à la géotechnique, mais nous avons parallèlement contribué à la normalisation de toutes les autres disciplines : techniques de construction, exécution des travaux, fondations, essais, produits... Cela remonte déjà à plus de vingt ans. Depuis 5 ou 6 ans, nous sommes investis dans les normes sur les terrassements avec toujours, en arrière-plan, l'idée que l'objectif n'est pas d'élaborer des constructions théoriques mais de résoudre les problèmes dans le secteur de la construction.

Avant les normes européennes, existait-il déjà des recommandations ou l'équivalent ?

Avant le début des normes européennes sur les terrassements, il existait

des règles dans chaque pays. En France, il s'agissait d'un outil appelé « guide de terrassements routiers » (GTR), définissant des règles applicables pour les terrassements. C'est un ouvrage dont la fabrication, qui a nécessité énormément de travaux, a commencé dans les années 1970 et a produit une méthodologie française autonome. Depuis cinq ans, la situation a évolué et chacun des pays a dépassé ses habitudes nationales pour contribuer à la production de normes européennes dont les textes seront envoyés en enquête finale en mai 2015.

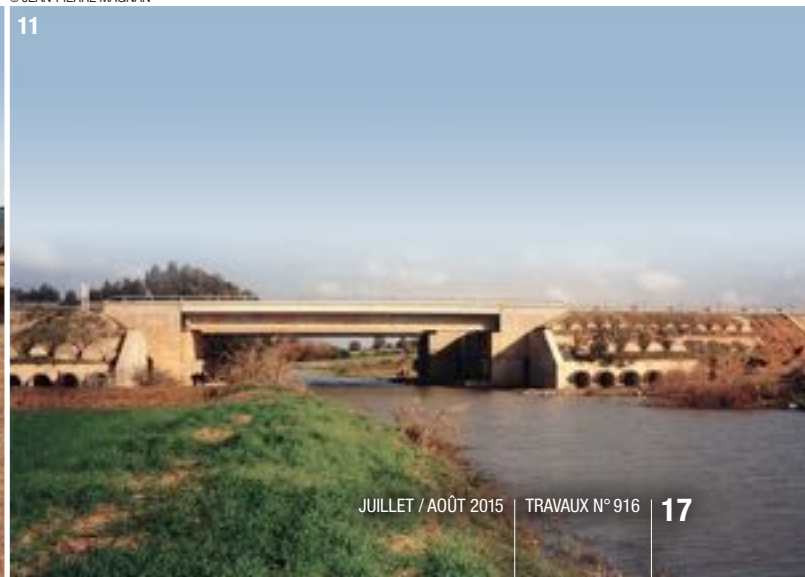
L'IFSTTAR a-t-il conservé une action dans le domaine des terrassements ?

Nous continuons de mener, dans notre laboratoire de Nantes, une action plutôt centrée sur le traitement des sols, pour encourager l'utilisation de certains sols dans des emplois pour lesquels ils n'étaient pas acceptés précédemment, notamment dans le secteur des assises de voies de chemin de fer ainsi que pour utiliser des matériaux traités dans les zones inondables.

L'une des normes européennes en préparation est consacrée à la stabilisation des sols utilisés en remblai par des matériaux tels que le ciment, la chaux ou les liants hydrauliques. L'interaction avec les couches de chaussées est gérée, de son côté, par le département MAST (Matériaux et Structures) de l'IFSTTAR.

Mais nous avons toujours à l'esprit de proposer des solutions directement transposables sur chantier. C'est une orientation qui était l'une des caractéristiques des travaux du LCPC et qui est demeurée en tant que telle à l'IFSTTAR. □

1- **ALBTP** : Association africaine des Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics.





SOL ENVIRONMENT

DÉPOLLUTION

DES TECHNIQUES PROPRES AVEC DES APPROCHES GLOBALES

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

DEPUIS QUELQUES ANNÉES, LA DÉPOLLUTION DES SITES, QU'ILS AIENT ÉTÉ PRÉCÉDEMMENT INDUSTRIELS OU NON, EST DEVENUE UN MÉTIER À PART ENTIÈRE, AU MÊME TITRE QUE LA DÉCONSTRUCTION. UN MÉTIER BEAUCOUP PLUS COMPLEXE QU'IL N'Y PARAÎT VU DE L'EXTÉRIEUR ET QUI NÉCESSITE DÉSORMAIS DES COMPÉTENCES TECHNIQUES ÉLEVÉES. POUR SE POSITIONNER SUR CE MARCHÉ EN PLEIN DÉVELOPPEMENT, SOL ENVIRONMENT S'APPUIE SUR QUATRE AXES DE DÉVELOPPEMENT : RECONVERTIR LES SITES, MAÎTRISER LES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS ET TRAITER LES EAUX, RÉHABILITER LES LAGUNES INDUSTRIELLES, EXCAVER LES POLLUTIONS PROFONDES.

Sol Environment a développé à cet effet des techniques et des matériels spécifiques pour répondre sur site et in situ à la demande toujours plus exigeante des clients et de l'Administration.

Ce que nous explique Pierre-Yves Klein, directeur général de l'entreprise dont le métier est de réaliser des travaux dans le domaine de la dépollution des sols, des eaux souterraines et, plus généralement, des sites.

« Il faut savoir, indique-t-il en préambule, que le métier de la dépollution est exercé par deux grands types d'acteurs : les bureaux d'études et les entreprises de travaux. Les bureaux d'études font une "photographie" de l'état du sol et évaluent les moyens de les rendre compatibles avec l'usage que l'on en fait.

Les entreprises conçoivent la solution technique et exécutent les travaux pour parvenir à l'image finale désirée. Notre job n'est pas de créer des ouvrages, comme le font les entreprises de BTP, mais de réaliser des opérations sur site qui vont permettre d'atteindre un niveau de pollution acceptable ».

1- Reconvertir les anciens sites industriels.

2- Pierre-Yves Klein, directeur général de Sol Environment.

© MARC MONTAGNON



SOL ENVIRONMENT EN BREF

Sol Environment est une filiale de Soletanche Bachy. L'entreprise a été créée en tant que telle en 2005.

Dirigée par Pierre-Yves Klein, elle emploie 25 personnes et dispose de deux implantations en France, à Nanterre et Aix-en-Provence. Son parc de matériel interne est basé à Montereau, en Seine et Marne.

Son chiffre d'affaires se situe autour de 8,5 millions d'euros.

Elle est certifiée LNE, SSP et OHSAS.

Mais elle a déjà entamé également un développement à l'international avec l'appui de Soletanche Bachy et de Ménard, autre entité du groupe Soletanche Freyssinet, spécialisée dans l'amélioration des sols.

Ainsi, Sol Environment peut déjà faire état d'une présence significative au Qatar sur un problème de pollution aux hydrocarbures.

Elle investit en Pologne pour proposer ses techniques principalement pour le traitement de sites et de sols pollués. Elle étudie déjà dans ce pays plusieurs projets de réhabilitation de décharge et de dépollution.

Elle se développe également au Canada et au Kazakhstan dans le cadre d'interventions sur les problématiques minières.

LA NOTION DE RISQUE

La réglementation française en ce domaine, à l'image des réglementations européennes, est basée sur la notion de risque : lorsqu'il se trouve en présence d'un site potentiellement pollué, le bureau d'études évalue la nature des polluants, leur configuration et leur concentration. Il établit des calculs permettant de déterminer si ce site présente un risque par rapport à son usage en fonction des documents d'urbanisme y afférant. L'ampleur des éventuels travaux à effectuer est adaptée à la destination finale du site, sachant que la réglementation prévoit qu'en tout état de cause, indépendamment des études de risque, il faut, sinon enlever, au moins maîtriser les sources de pollution. Tout cela nécessite des études très importantes dont les résultats constituent les données d'entrée préalables à la phase travaux confiée aux entreprises. Le bureau d'études indique également quelle est l'image finale à obtenir de façon à ce que le site soit utilisable.

« Notre spécificité est d'intervenir sur le marché de la dépollution des sols, poursuit Pierre-Yves Klein, en nous appuyant sur tous les savoir-faire de notre maison-mère Soletanche Bachy, elle-même spécialisée dans les travaux dans le sol. Cela nous permet de disposer des techniques classiques de dépollution, de développer et de proposer des techniques nouvelles, plus efficaces, grâce à nos matériels propres ainsi qu'à ceux de Soletanche Bachy ».



3



4



5



6

© SOL ENVIRONNEMENT

Ce que propose notamment Sol Environnement, ce sont des solutions de maîtrise du risque à partir de parois étanches, de parois drainantes, de portes filtrantes insérées dans le sol pour traiter les nappes en utilisant leurs mouvements naturels.

Sur le marché de la dépollution des sols, l'entreprise met en œuvre également les techniques de « soilmixing » qui permettent de mélanger les sols à des réactifs qui vont détruire ou fixer les polluants.

Une troisième gamme de techniques est développée autour de l'injection systématique, en particulier dans les zones source, qui permet de mettre en œuvre par injection des réactifs en maîtrisant avec précision leur dispersion.

TROIS GAMMES DE SOLUTIONS

L'ensemble de ces techniques est réparti dans trois gammes de solutions : Solplume®, Solmix® et Solgrout®.

« Certaines sont brevetées, précise Pierre-Yves Klein. Par exemple, c'est le cas du Springsol qui est un outil ouvrant permettant de réaliser des traitements de manière ciblée à des profondeurs prédéfinies. L'outil est descendu dans le sol par forage, ouvert à la profondeur requise avec ajout du réactif mélangé au sol, replié et sorti du forage. Le Springsol permet de cibler des horizons en profondeur avec beaucoup de précision, sans gâcher du réactif dans des horizons qui ne le nécessitent pas et en préservant les plateformes en surface en ne destructurant pas le terrain ».

Un tel outil permet de descendre à une profondeur pouvant atteindre 30 m. Certains polluants légers restent en surface, d'autres descendent en pro-

TROIS GAMMES DE SOLUTIONS

Sol Environnement a organisé ses « métiers » en trois gammes qui permettent de répondre à la totalité de la demande en matière de traitement sur site et in situ des pollutions sous toutes leurs formes.

SOLPLUME®

Ses applications concernent la maîtrise des panaches de dissout, flottant et plongeant :

S-PRB® : portes filtrantes à filtres échangeables (ou barrières perméables réactives BPR).

Continuous-PRB : zones réactives in situ.

Trenchmix® : parois étanches en soilmixing.

Tranchées drainantes : barrières hydrauliques à débit réduit.

Parois GeoSOL : confinements verticaux à grande résistance chimique.

SOLMIX®

Cette solution pour l'oxydation, la réduction et la stabilisation des sources in situ s'applique aux sols peu perméables ou hétérogènes :

SpringSOL® : soilmixing cible en forage.

MavenSOL : désorption in situ sous malaxage.

StabSOL : soilmixing par double tarière.

SOLGROUT®

Il s'agit d'une solution pour l'oxydation, la réduction et la stabilisation des sources par injection de la porosité dans le cadre de sols injectables ou de roches fissurées :

TamSOL® : injection systématique de la porosité par tube à manchette.

RockSOL : injection de fissures à trou ouvert par passes descendantes.

fondeur du fait de leur densité, flottent sur la nappe phréatique, coulent dans la nappe. Certains se solubilisent plus ou moins rapidement dans les eaux souterraines... De ce fait, le mode de traitement doit être adapté pour chaque intervention à la nature chimique du polluant. Le perchloréthylène ou le trichloréthylène que l'on utilisait autrefois fréquemment en dégraissage de pièces métalliques avant de les usiner, de les

assembler ou de les souder, ont comme propriété d'être liquides et plus denses que l'eau : ils coulent ainsi dans les sols et pénètrent dans la nappe où ils peuvent demeurer sous forme de produit pur susceptible de descendre à une forte profondeur dans les sols aquifères jusqu'à rencontrer une couche étanche sur laquelle ils se stockent et se solubilisent petit à petit en impactant les nappes.

3- Pieux sécants et palplanches pour la ZAC Renault à Boulogne-Billancourt.

4- Dépolluer les nappes et traiter les eaux, ici, par confinement latéral superficiel.

5- Excaver les pollutions profondes, par exemple à l'abri de blindages métalliques.

6- Dépollution d'une ancienne usine automobile par écrémage en fouille ouverte.

UNE APPROCHE COMPLEXE

La dépollution s'avère ainsi être un métier compliqué dans l'approche des problématiques puisque s'y côtoient la physique et la chimie des polluants mais aussi leur biologie, la nature de leur comportement en fonction de l'environnement, notamment de la géologie et de l'hydrologie des terrains rencontrés. L'ensemble de ces caractéristiques doit être pris en compte pour déterminer la forme de l'intervention tant en ce qui concerne la mise en œuvre sur chantier que les précautions à prendre en matière d'hygiène et de sécurité pour les équipes.

La certification LNE « sites et sols pollués » comporte un chapitre relatif aux conflits d'intérêt qui impose d'être transparent sur le positionnement de

chacun des intervenants - bureau d'études et entreprises - vis-à-vis des clients. « Chez Sol Environment, précise à ce sujet Pierre-Yves Klein, nous avons fait le choix de ce qui nous semble aller dans le sens de l'avenir de ce secteur, c'est-à-dire de ne pas mélanger les genres et de nous positionner exclusivement sur les travaux ».

Le corollaire de la complexité de la nature des polluants induit beaucoup d'incertitudes sur leur quantité et leur localisation dans le sol car, par rapport à la géotechnique, se présente un double risque : la connaissance du polluant et la connaissance du sol.

« Dans ce contexte, le mélange des genres ajouté aux incertitudes au niveau des investigations préalables aux travaux nous semble assez malsain et, d'un point de vue déontologique, il nous apparaît que l'avenir de ce métier - qui est encore jeune - se situe dans un positionnement clair de chacun, soit sur la partie amont diagnostic, soit la partie aval réalisation des travaux ».

« Les clients ont des enjeux de plus en plus forts par rapport à la pollution dans leurs cessions foncières tant en ce qui concerne les responsabilités vis-à-vis de l'administration sur la pollution nouvelle

qu'ils auraient pu créer sur les sites que celles vis-à-vis des usagers futurs des sites dans le cadre de projets immobiliers. À notre sens, la taille et la nature des enjeux justifie que l'on clarifie les périmètres de responsabilité des uns et des autres avant toute intervention ». Ainsi, les bureaux d'études donnent-ils la description du site avec sa pollution et les risques associés et les objectifs à atteindre en termes de niveau de pollu-

tion résiduelle pour se situer en deçà du niveau de risque : c'est leur responsabilité. La responsabilité des entreprises est de mener à bien l'opération qui permet de passer de la photographie du début à l'état de risque résiduel requis à la fin des travaux.

UNE CLIENTÈLE INDUSTRIELLE

La clientèle de Sol Environment est constituée à plus de 75% de grands comptes industriels qui ont des installations classées au niveau de la protection de l'environnement et qui, dans ce cadre, doivent faire un certain nombre d'opérations et en rendre compte à l'Administration.

Pour une installation classée, lors d'une cessation d'activité, l'exploitant doit rendre les terrains en fin de vie dans un état conforme à l'usage.

La loi ALUR⁽¹⁾ relative aux logements comporte également des dispositions vis-à-vis des sols pollués qui vont permettre aux industriels de déléguer une partie de leurs obligations envers l'administration à des tiers compétents techniquement et ayant la solidité financière requise.

Pour les installations non classées, sur les périmètres de sites pollués, l'obli-

gation de fournir une levée de doutes sur l'état du terrain devrait intervenir prochainement.

Bien qu'il n'y ait pas encore d'obligation légale, tous les professionnels de l'immobilier s'intéressent à ce sujet car il s'agit d'un enjeu fort, y compris au niveau financier.

Pierre-Yves Klein apporte une précision sur cet aspect : « Sur un projet donné, l'approche se traduit de deux manières différentes. Il peut y avoir un risque direct qui nécessite de dépolluer, par exemple dans le cas de solvants chlorés qui peuvent créer un risque d'émanations. Mais, dans le cas de déblais à excaver, si les terrains sont impactés, les matériaux ne pourront pas toujours, en fonction de leur nature, être évacués dans des centres de traitement de déchets inertes, ce qui ne sera pas sans incidence financière sur l'opération ».

DES MATÉRIELS DÉVELOPPÉS SPÉCIFIQUEMENT

Les matériels mis en œuvre sur chantier par Sol Environment sont directement liés aux trois grands types d'intervention en matière de dépollution des sols : les traitements hors site, les traitements sur site et les traitements in situ. ▷

7- Reconversion d'un ancien site industriel par extraction mécanique de solvants chlorés.

8- Traitement in situ d'une pollution de sol à l'arsenic.

9- Réalisation d'une plateforme clé en main par gestion des sols pollués et amélioration géotechnique des sols.



© SOL ENVIRONMENT
7

© SOL ENVIRONMENT
8

9

10- Injection par tubes à manchettes pour traitement in situ.

11- La nouvelle machine de curage des collecteurs développée par Sol Environment.

12- Mise en place d'une station mobile de traitement des eaux pour le curage d'un collecteur.

13- Réhabilitation de lagunes industrielles par curage des bassins.



10



11



12



13

Les traitements hors site, où les matériaux sont excavés et envoyés directement dans des centres de traitement font appel à des engins classiques d'excavation et de transport.

Les interventions dites « sur site » font appel, pour la plupart d'entre elles, à des techniques classiques : les terres sont excavées et transportées dans une zone de traitement sur chantier avant d'être remises en place. Par exemple, s'il s'agit d'eau, elle est dirigée dans une unité de traitement en surface puis réinjectée dans le terrain ou éliminée dans un réseau. Il en est de même pour les matériaux peu pollués.

C'est dans le cadre des traitements « in situ » que Sol Environment peut mettre à profit de la façon la plus remarquable ses spécificités techniques au travers de ses trois gammes de solutions : Solplume®, Solmix® et Solgrout®.

Sans entrer dans le détail de chacun des procédés proposés par ces solu-

tions, il est intéressant de mettre en évidence quelques uns de ceux qui constituent son originalité.

La méthode Trenchmix® utilise un outil constitué d'une trancheuse mélangeant intimement le terrain avec du ciment sur une profondeur pouvant atteindre 10 m, tout en ajoutant de l'eau de façon à créer un béton de sol. Cela permet de faire des parois étanches dans le sol sans excaver le terrain, donc sans générer de déblais à évacuer.

Le procédé SpringSOL® repose sur l'utilisation d'un outil de forage muni de bras pouvant se déplier à la profondeur voulue après tubage et permettant un malaxage des terrains avec un réactif par plots de 400 ou 600 mm de diamètre.

Ses principaux avantages sont de réaliser un traitement in situ, par malaxage du fond de fouille avant excavation, ou de traiter des zones localisées et profondes sans déblai. D'autres procédés sont mis en oeuvre en mobilisant des

containers de traitement pré installés qui permettent ainsi de les acheminer aisément sur site.

Sol Environment a développé à cet effet plusieurs types d'unité de traitement.

La technologie ODS (Oil Deep Streaming) pour récupérer des pollutions d'hydrocarbure qui flottent sur les nappes, à des niveaux variables et avec des épaisseurs de flottants qui peuvent être fines. Il faut donc des outils de récupération qui s'ajustent en hauteur et sont capables de pomper des épaisseurs fines de produits

Toujours dans la gamme des traitements in situ, l'entreprise dispose de containers de « venting » qui consistent à faire circuler de l'air dans les sols de manière à « volatiliser » la pollution qui est aspirée dans un réseau de forages et traitée par du charbon actif mobilisé sur site.

En traitement sur site, une unité de ventilation de terre permet de la traiter par passage dans un malaxeur qui

la déstructure avec passage d'un flux d'air favorisant l'échange entre l'air et le sol. Cet air est ensuite traité dans des filtres à charbon actif pour en extraire la pollution.

Certaines gammes de polluants peuvent également être traitées par voie biologique sur site à l'aide de bactéries dans des andins traversés par des réseaux à l'intérieur desquels circulent de l'air et des nutriments pour les bactéries. Le remblaiement est ensuite effectué dès que le taux de pollution est acceptable. Une autre technique dite de « stabilisation chimique » consiste à ajouter des réactifs pour immobiliser les polluants. Elle est utilisée notamment pour le traitement des métaux lourds.

La dernière grande gamme de traitement est relative à l'oxydo-réduction, grande voie de développement technique depuis quelques années. Elle consiste à détruire la pollution au moyen de réactions d'oxydation ou de réduction.



© SOL ENVIRONNEMENT

14

15

14- Container pour l'écrémage d'hydrocarbures flottants.

15- Démobilisation d'un container après traitement d'un site.

16a et 16b- Principe du « soil mixing » à l'aide du procédé SpringSOL®.

DES RÉFÉRENCES DIVERSIFIÉES

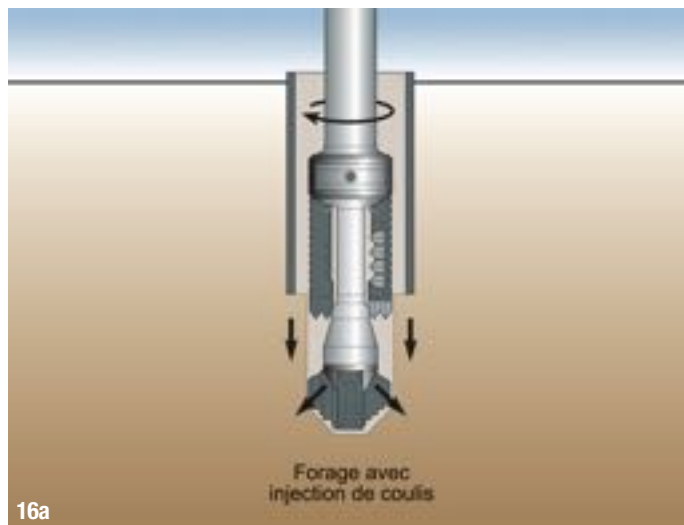
Sol Environment peut faire état d'un très grand nombre de références depuis sa création en 2005. Nous en avons retenu quelques unes qui mettent en évidence la diversité des « métiers » qu'elles représentent dans l'univers complexe de la dépollution.

À Boulogne-Billancourt, sur une partie du site occupé par les usines Renault, Sol Environment a été appelé à dépolluer 9 ha dans lesquels 100 ans d'exploitation industrielle avaient induit des infiltrations localisées dans le sous-sol d'hydrocarbures et de solvants organiques volatils.

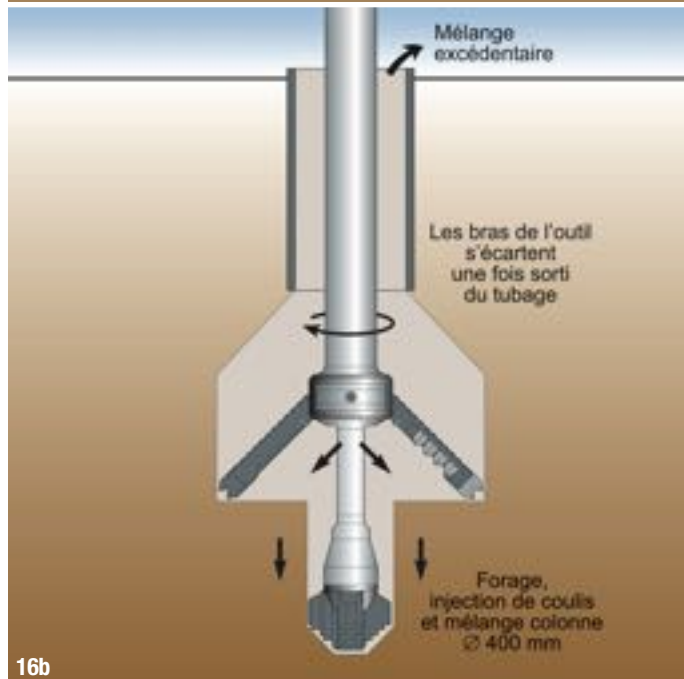
Dans la région lyonnaise, l'entreprise a réalisé le traitement in situ d'un ensemble de 3 000 m² ayant été impacté par une pollution à l'arsenic. Le principe a été de traiter systématiquement les sols dans la zone de battement de la nappe, entre 5 et 8 m de profondeur, et les zones les plus lixiviées entre 0 et 5 m, en injectant un réactif permettant d'immobiliser l'arsenic et de le mettre sous forme insoluble.

À Grand Quevilly, ce sont 1 200 m² de terrains industriels en activité sur lesquels la pollution à l'arsenic a été traitée de façon identique.

À Soissons, pour le compte d'un industriel américain, une pollution chlorée a été traitée par injection de fer 0 dans



16a



16b

© SOL ENVIRONNEMENT

le sol jusqu'à 30 m de profondeur de façon à dégrader les solvants chlorés et avoir un impact positif sur la nappe. Dans l'Est de la France, le traitement de terrains pollués situés à la périphérie de l'usine d'un équipementier automobile a conduit à réaliser une paroi étanche

de 200 m de long et trois portes filtrantes de 10 m de hauteur. La technique des Barrières Perméables Réactives (BPR), évoquée précédemment, a été mise en œuvre sur un site de 6,5 ha pollué à l'arsenic correspondant aux anciens bassins de décanta-

tion d'une usine de production de verre. La solution technique a consisté en l'interception du flux d'eaux polluées au moyen d'une tranchée drainante associée à un traitement par porte filtrante souterrain capable de retenir l'arsenic. Il serait possible de multiplier les exemples : reconversion d'un ancien site industriel par extraction mécanique de solvants chlorés ; dépollution des sols de la ZAC Mont Thabor près de Meaux par élimination de Hotspots en biocentre et traitement sur site par extraction mécanique de solvants chlorés ; sur un ancien site de production de piles électriques en Alsace, traitement in situ des sols pollués par du mercure et des eaux souterraines polluées par des hydrocarbures...

DÉPOLLUTION : DE GRANDS ENJEUX

Comme on le voit, les enjeux sont multiples pour une entreprise de dépollution : outre ceux de responsabilité contractuelle, de clarification des interfaces, s'ajoutent le mouvement venant des clients eux-mêmes confrontés à des impératifs de plus en plus exigeants de la part de l'Administration.

« *Le métier devient de plus en plus mature*, conclut Pierre-Yves Klein. *Nous avons des enjeux technologiques avec la volonté d'aller plus loin dans nos développements de façon à apporter des solutions nouvelles aux clients, nouvelles techniques, mais aussi nouvelles dans une meilleure maîtrise des délais et des résultats finaux, ce qui n'est pas simple à déterminer dans le cas des réalisations in situ. Avec également un enjeu fort de préservation de la santé de nos personnels à laquelle il convient d'attacher la plus grande attention* ». □

1- La loi ALUR, dite également loi Duflot, est la loi pour l'Accès au Logement et un Urbanisme Rénové (ALUR). Elle a été publiée au Journal officiel du mercredi 26 mars 2014. Certaines mesures de la loi sont d'application immédiate, d'autres entreront en vigueur progressivement.



1
© L. TAVARES

PAROI CLOUÉE DE 47 M DE HAUTEUR POUR SÉCURISER LA RD 1091 À SÉCHILIENNE

AUTEURS : LAURENT RENAC, DIRECTEUR DES GRANDS PROJETS RÉGION RHÔNE ALPES, NGE -
ALBAN NICOLINI, CHEF DE SECTEUR INJECTION/CONFORTEMENT, G.T.S. - LIONEL LORIER, GÉRANT, SAGE

TRAVERSANT UNE ZONE TRÈS ACTIVE D'ÉBOULEMENTS ENTRE VIZILLE ET SÉCHILIENNE, LA RD 1091 A ÉTÉ SÉCURISÉE EN DÉVIANT SON TRACÉ SUR LE VERSANT OPPOSÉ. CETTE PARADE RADICALE A IMPLIQUÉ DES TRAVAUX D'ENVERGURE POUR LA RÉALISATION D'UN CONFORTEMENT DE 47 M DE HAUTEUR.

CONTEXTE PARTICULIER : SCÉNARIO « CATASTROPHE NATURELLE »

Au sud de Grenoble, le RD1091, serpentant dans la vallée étroite de la Romanche, permet de relier les villes de Bourg d'Oisans, Briançon et leurs stations de sport d'hiver.

À l'est de Vizille au sud du massif de Belledonne cet itinéraire traverse une zone à risque d'éboulement majeur appelée « les ruines de Séchilienne ». En effet, sur cette partie sud du massif de Belledonne, des fractures et des affaissements affectent la structure

micaschisteuse du versant sud du Mont Sec.

L'aléa est bien connu et des éboulements mineurs ont régulièrement lieu depuis 1983. Le cône d'éboulis (figure 2) évolue d'année en année, et il est bien surveillé. Une instrumentation est positionnée à la naissance du décollement, des mesures régulières permettent d'apprécier l'évolution du glissement et d'appréhender les vitesses ainsi que les accélérations des mouvements, afin de prévenir un possible éboulement majeur.

Le risque ultime est un éboulement

1- La vallée de l'Oisans vue du ciel.

1- Aerial view of the Oisans valley.

important et brutal qui obstruerait la vallée de la Romanche, très étroite à cet endroit (environ 400 m de largeur). Les masses en mouvement sont aujourd'hui estimées à trois millions de m³. Un tel événement créerait un véritable barrage

sur la Romanche et, outre les impacts hydrauliques à l'aval dont les aménagements de la Romanche tiennent compte, la vallée de l'Oisans se trouverait enclavée (figure 1).

Devant l'accélération des mouvements, une modélisation de l'éboulement a mis en évidence l'insuffisance des dispositions prises précédemment et a conduit le Conseil Départemental de l'Isère à élaborer un nouveau projet de déviation sur le versant opposé, le Mont Falcon, à une cote permettant de s'affranchir de l'impact de l'éboulement et assurer ainsi une continuité de l'itinéraire.



© NGE
2

SÉCURISATION DE LA VALLÉE DE LA ROMANCHE : LA DÉVIATION DU RD 1091

Ce projet radical de nouveau tracé (figure 3) est ainsi rehaussé de 30 m au droit des ruines. Cette nouvelle section de 1,3 km comporte un ouvrage hydraulique (figure 4) d'une section de 20x5 m permettant de parer à une éventuelle inondation, un créneau de dépassement de 600 m, le tout accompagné d'un itinéraire cyclable. Le marché de travaux été confié au groupement d'entreprises : Guintoli

2- Le cône d'éboulis est très instable.
3- Vue en plan du nouveau tracé.

2- The talus cone is very unstable.
3- Plan view of the new route.

(mandataire), G.T.S., Nge GC (filiales de Nge), Carron, Bianco et du sous-traitant Serfotex (Nge) pour le minage. Le groupement a été accompagné de Sage pour les études et le suivi géotechniques. Les travaux ont débuté en mai 2013 et seront réceptionnés en août 2015, tenant compte des deux trêves hivernales imposées par les conditions climatiques propres à ce secteur. Le groupement aura mobilisé environ 50 personnes en permanence sur le site, tous métiers confondus.

Le futur tracé comporte un seul déblai de 300 000 m³ sur le flanc du mont Falcon et des remblais de part et d'autre permettant le raccord de la déviation sur les deux ouvrages existants de franchissement de la Romanche (environ 240 000 m³). Le déblai nécessite la réalisation d'une paroi clouée de 18 000 m², les études menées par le conseil du groupement ont mis en évidence un contexte géologique particulièrement complexe.

UN CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE PARTICULIER : ENTRE MICASCHISTE, QUARTZ ET LIMON

Des études d'avant-projet et de projet ont été effectuées en février/mars 2009 pour le compte du Conseil départemental de l'Isère. Selon les zones de déblai ou de remblai, les reconnaissances ont consisté en 40 sondages (jusqu'à 44 m), des tomographies sismiques et des essais en laboratoire sur des échantillons de roche.

L'étude d'exécution, confiée par le groupement d'entreprises au bureau géotechnique Sage en mai 2012, a consisté, dans un premier temps, à analyser les résultats des reconnaissances de 2009.

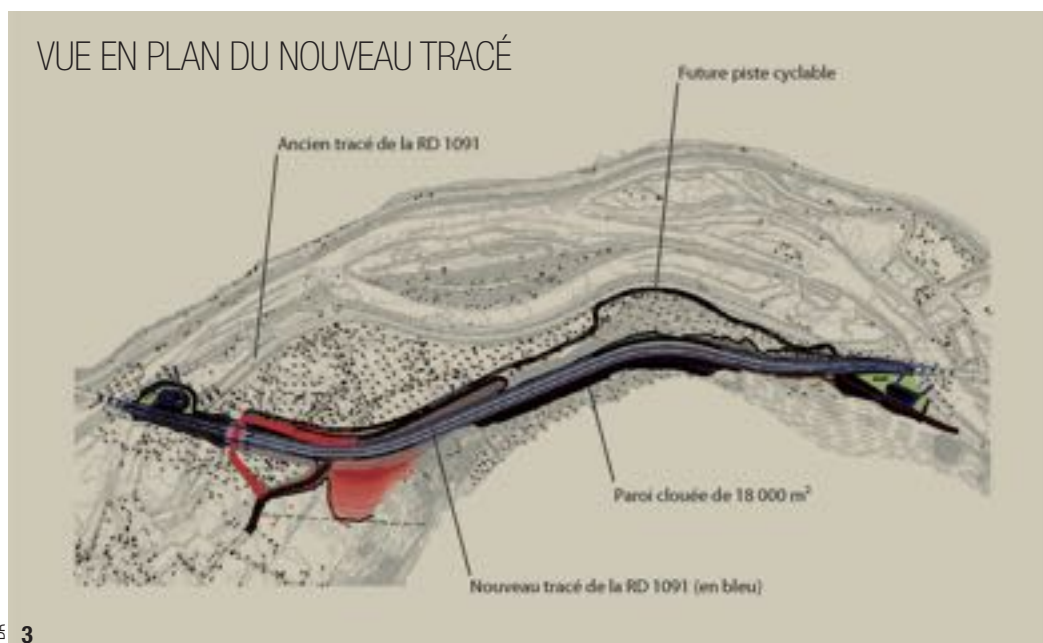
Au terme de cette analyse et compte tenu de l'ampleur des travaux de déblais et de la fraction intense des micaschistes associée à très grande hétérogénéité, il est apparu nécessaire de réaliser des sondages complémentaires pour lever les incertitudes résiduelles, notamment :

- La présence d'un ancien glissement en amont de la zone de déblais (profondeur de la surface de glissement, activité, géométrie) ;
- La profondeur des interfaces entre couche superficielle décomprimée/rocher altéré/sain.

Il a donc été proposé un programme d'investigations complémentaires dans le but d'améliorer le modèle géotechnique et hydrogéologique. Il a donné lieu à des observations de terrain (figure 5), 4 tomographies sismiques de 120 m, 5 sondages carottés de 30 à 40 m, des essais de conformité sur clous et des essais de pompage.

En vue du suivi de chantier en phase travaux, les nouveaux sondages carottés ont été équipés de tubes inclinométriques.

Au démarrage des travaux, des piézomètres ont été réalisés à proximité des inclinomètres et équipés de cellules de mesures avec enregistrement des données en continu.



© DR
3

D'un point de vue géologique, le tracé de la déviation recoupe un versant constitué de micaschistes micacés et quartzeux très hétérogènes et fracturés en profondeur.

Les relevés effectués sur site au niveau des principaux affleurements et en sondages (par diagraphies) indiquent que la schistosité et la fracturation sont chahutées, avec des pendages est et ouest, dirigés vers l'aval (défavorable à la stabilité) ou rentrants (constituant un découpage du talus).

L'analyse des résultats de l'ensemble des investigations au niveau du versant a permis de mettre en évidence une lithologie sous la forme de 3 couches :

- **Couche 1** sur 3 à 5 m d'épaisseur : des terrains de couverture composés de débris schisteux dans une matrice limoneuse marron ;
- **Couche 2** sur 5 à 13 m d'épaisseur : des micaschistes gris clair à foncé très fracturés ;
- **Couche 3** au-delà de 5 à 13 m : des micaschistes gris clair fracturés (substratum rocheux).

Les essais de pompage et les mesures piézométriques ont permis de constater qu'il existe des circulations d'eau permanentes et d'amplitude variable au sein du massif.

Les reconnaissances réalisées en pied de versant ont par ailleurs mis en évidence :

- Des alluvions constituées en majorité de galets et sables à passées peu limoneuses, de couleur grise, compactes ;
- La présence très localisée de lentilles peu compactes reconnues en surface et en profondeur.

REDÉFINITION DE LA GÉOMÉTRIE DES OUVRAGES

À l'issue d'échanges techniques entre la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre et le groupement d'entreprises et selon la synthèse géotechnique mise en évidence par l'ensemble des reconnaissances, l'analyse effectuée a permis de définir une géométrie du talus de déblais adaptée aux différents horizons. Cette géométrie des ouvrages est différente de celle qui était définie au niveau du projet. Ainsi, les principes constructifs retenus ont-ils été les suivants, définis de l'amont vers l'aval :

→ Dans les couches n°1 (terrains de couverture meubles) et n°2 (rocher très fracturé) :

- une berme de hauteur variable (maximum 9 m), inclinée à 1H/5V. Cette berme est calée au niveau des entrées en terre du projet.



© V. RAMET

- une seconde berme de 9 m de hauteur, inclinée à 1H/5V, avec une risberme en tête de 3 m de largeur.
- un confortement de type paroi clouée avec parement en béton projeté, pour garantir la stabilité du talus de déblais au sein des couches n°1 et n°2. La longueur des ancrages varie entre 20 m et 3 m.

→ Dans la couche n°3 (rocher massif) :

- 1 à 2 bermes de 9 m de hauteur maximum (condition sur la hauteur liée à la faisabilité du minage), inclinée à 1H/10V, avec en tête une risberme de 4,5 m de largeur (pour conserver une pente globale de 60° telle que définie au projet).
- clouage associé à un grillage plaqué, à adapter en fonction de la fracturation constatée à l'ouverture des déblais.

4- Un des 2 ouvrages hydrauliques qui relient le nouveau et l'ancien tracé.

5- Suivi géotechnique effectué tout au long du chantier.

6- Les 1^{ères} risbermes de la paroi de 47 m de hauteur.

4- One of the 2 culverts linking the new and old routes.

5- Geotechnical monitoring performed throughout the project.

6- The first berms of the 47-metre-high wall.

TERRASSEMENTS GÉNÉRAUX : 300 000 M³ DE DÉBLAIS

La création de la plate-forme routière dans le massif du Mont-Falcon, qui se raccorde aux deux ouvrages actuels franchissant la Romanche par l'intermédiaire de rampes à environ 5%, occasionne un terrassement d'environ 300 000 m³ de déblais rocheux dont 230 000 m³ extraits à l'explosif.

Ces déblais sont réutilisés, à hauteur de 240 000 m³, en remblais de hauteur variable afin de constituer les deux rampes de raccordement.

Ces zones en remblais pouvant être soumises à de forts aléas hydrauliques, des dispositions constructives particulières sont mises en œuvre.

En effet, le corps de remblais comporte une importante base drainante, un noyau composé par les matériaux jugés potentiellement évolutifs type R62-63, des remblais latéraux de 4 m de large en matériaux insensibles à l'eau type R61, une PST de granulométrie 0/100 fermant ainsi l'encagement.

Une protection des talus en enrochement avant mise en œuvre de terre végétale est nécessaire vis-à-vis de l'érosion que pourrait provoquer une crue exceptionnelle de la Romanche (figure 7).

L'ensemble des matériaux nécessaire à la création de ces remblais proviennent du déblai et sont triés et élaborés sur place.

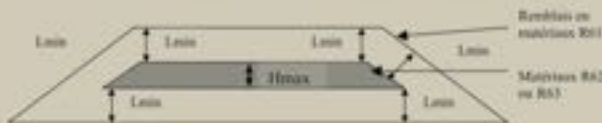


© NGE



© V. RAMET

COUPE TYPE de la constitution du remblai



© DR
7

7- Coupe type de la constitution du remblai.

8- 300 000 m³ de terrassement de déblais rocheux dont 230 000 m³ de minage.

9- Co-activité forte et intervention en simultanée des différents métiers.

10- Depuis la paroi clouée, la zone de terrassement et la base vie du chantier.

7- Typical section of the backfill formation.

8- 300,000 m³ of earthworks on rocky excavated material, of which 230,000 m³ by blasting.

9- Substantial concurrent work and simultaneous operations by the various trades.

10- From the soil-nailed wall, the earthworks area and the project construction camp.

INTERVENTION SIMULTANÉE DES DIFFÉRENTS MÉTIERS

La principale difficulté de l'opération réside dans la réalisation des déblais confortés. En effet, en premier lieu, des pistes d'accès ont été créées afin d'accéder en tête du déblai culminant à 50 m de haut. Les extrémités des premières passes ont nécessité la création de microplateformes en remblais de 20 à 30 m de hauteur afin de permettre l'évolution du matériel de confortement. La nature des matériaux et la morpho-

logie du déblai ont imposé un redécoupage sur 9 m de haut par plot, avec minage (figure 8) du carreau associé (1 tir tous les deux jours, 370 g/m³ soit environ 90 t d'explosif au total).

Pour limiter les hors profils, les pentages défavorables et la nature de la roche ont généré un terrassement par plots et par passes de 1,5 m devant la paroi et par passes de 3 m environ en largeur en conciliant l'évolution des accès et des pistes. Malgré le prédécoupage, un dressement à l'aide de petits matériels (minipelle équipée de brise-roche hydraulique) est obligatoire pour éviter des surconsommations excessives de béton.

L'évolution des ateliers de terrassement sur les deux tiers du déblai est strictement dépendante de celle des ateliers de confortement, limitant les extractions sur les parties extérieures du profil en travers afin de maintenir les accès. Ces contraintes nécessitent une perpétuelle remise en cause dans l'inté-

rêt mutuel des différents intervenants. Les entreprises missionnées pour le terrassement/génie civil/assainissement et réseau/aménagement-paysager, Guintoli, Nge Génie Civil, Carron, Bianco et Serfotex, sont intervenues simultanément (figure 9 et 10). Le groupement, de par sa composition et ses acteurs multimétiers, a permis d'optimiser au mieux cette opération par une mutualisation des moyens, notamment entre confortement et minage.

Les remblais ont été réalisés exclusivement avec les matériaux du site, les matériaux des strates supérieures dégradables par altération ont été dans un premier temps stockés pour être mis en œuvre en noyau après réalisation de la base drainante. Les matériaux plus sains en partie inférieure du déblai permettent de réaliser l'encagement. Le minage a été adapté dans les sur-largeurs et dans les parties inférieures du déblai pour élaborer les 10 000 m³ d'enrochement de blocométrie 0,5/3 t. ▷



© L. TAVARES
8

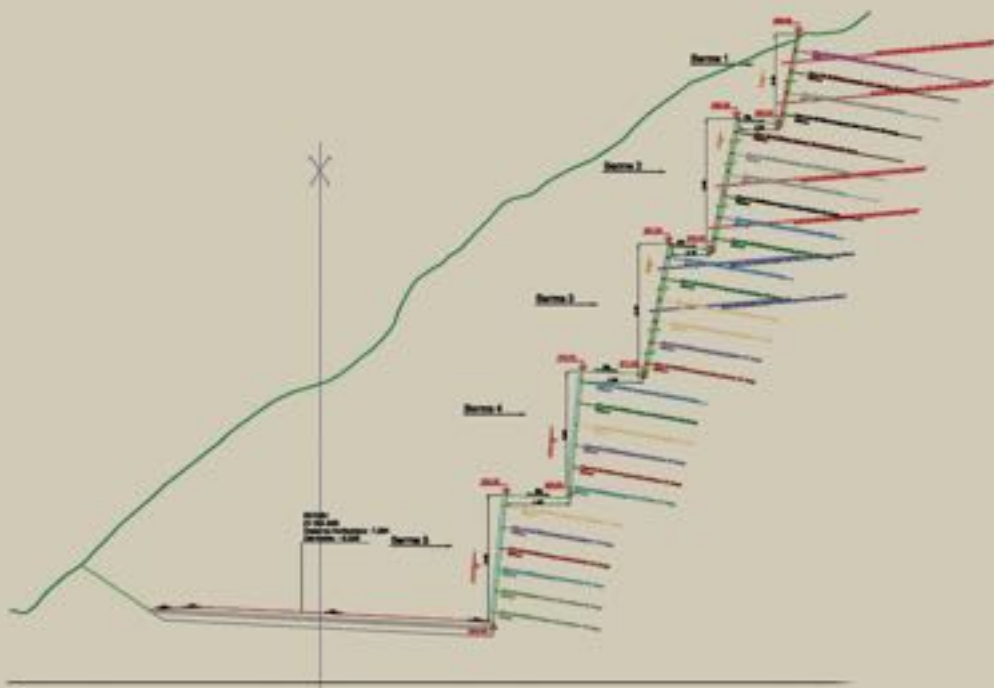


9
© V. RAMET



10
© V. RAMET

COUPE DE LA PAROI DE 47 M DE HAUTEUR
qui comprend 5 risbermes avec ses ancrages et ses drains subhorizontaux



11 © DR

11- Coupe de la paroi de 47 m de hauteur qui comprend 5 risbermes avec ses ancrages et ses drains subhorizontaux.

12- La paroi de 47 m de hauteur comprend 5 risbermes.

13- Le confortement a nécessité plusieurs passes de ferrailage et de béton projeté.

11- Cross section of 47-metre-high wall comprising 5 berms, with its anchorages and subhorizontal drains.

12- The 47-metre-high wall comprises 5 berms.

13- The consolidation work requires several applications of reinforcing bars and shotcrete.



12

© V. RAMET



13

© V. RAMET

CONFORTEMENT DE GRANDE HAUTEUR : PAROI CLOUÉE DE 50 M
UNE ORGANISATION PROPORTIONNELLE À L'ENVERGURE DE LA PAROI

En phase préparatoire, G.T.S., accompagné du bureau d'étude Sage, a procédé à des études géologiques complémentaires qui ont mis en évidence une hétérogénéité du massif et une proportion importante de sols meubles et de rocher très altéré. Le design de la paroi (nature du parement, forme de l'ouvrage) a donc dû être adapté au terrain,

COMPOSITION DES ATELIERS DE TERRASSEMENT

ATELIERS D'EXTRACTION : pelle 40 t et pelle 25 t suivant configuration terrain + 4 tombereaux A25 à A35.

ATELIER DE REMBLAIS : Bull D6R + compacteur type V5 + pelle 25 t (élaboration et mise en œuvre enrochements / dressage des talus / mise en œuvre terre végétale).

ATELIER DE DRESSAGE DE LA PAROI : pelle 20 t et minipelle 8 t toutes deux équipées de BRH.

ATELIER ASSAINISSEMENT PAROI : minipelles 9 t et 5 t.

pour aboutir au final à cinq risbermes de neuf mètres de hauteur et de 3 à 5 m de large chacune (figure 11).

Au démarrage du chantier, la tête de la paroi, située à 50 m de hauteur, a été techniquement difficile à atteindre, du fait d'une piste d'accès unique, inclinée à 17%. Au final, le haut de la paroi clouée suit le dénivelé naturel du terrain, d'où sa forme en « bosses de dromadaire » (figure 12), une caractéristique qui ne manque pas d'esthétique.

L'organisation du chantier dépendait en grande partie de l'avancement de



© V. FAVRETT

la paroi clouée, et notamment de l'efficacité simultanée des différents postes de travail :

→ **Le minage** : plusieurs phases de minage réalisées par Serfotex (prédécoupage de chaque berme sur 9 m de haut puis abattage par passes de 4,50 m de haut), permettaient de réaliser une plateforme de travail pour les équipes de G.T.S.. Les forages de minage étaient réalisés à l'aide de machines équipées de marteau hors de trou.

→ **Le terrassement** : le déblai des matériaux était ensuite réalisé par passe de 1,50 m, par les ateliers pelles-tombereaux articulés. Les matériaux impropres à la mise en remblai étaient réutilisés en modelages paysagers. Les matériaux réutilisables étaient directement mis en remblai de 16 m de hauteur maximale.

→ **Le ferrailage (figure 13) et le bétonnage de la première nappe de treillis soudé** : à chaque passe de terrassement, un suivi minutieux du terrassement permettait de préparer le rocher avant la mise en œuvre du ferrailage et du béton projeté (voie sèche). Le béton projeté était fabriqué en centrale et livré sur chantier par camion toupie.

→ **Le forage des ancrages** : plusieurs ateliers de forage étaient positionnés face à la paroi, précédemment équipée d'une première nappe de ferrailage recouverte d'une couche de béton projeté. En fonction des horizons de sols

14- Le confortement représente 51 000 m de forage d'ancrage et 6 500 m de forage des drains subhorizontaux.

14- The consolidation work represents 51,000 m of anchorage drilling and 6,500 m of subhorizontal drain drilling.

rencontrés, les forages (figure 14) étaient réalisés en méthode marteau hors trou et même parfois en méthode tubée. Chaque forage (jusqu'à 20 m de longueur) a été ensuite équipé d'une barre d'ancrage de diamètre 40 mm ou 32 mm selon les zones.

→ **L'injection des ancrages** : le coulis d'injection était préparé dans des centrales d'injection, munies d'un bac de fabrication de 500 l, d'un bac de reprise 250 l et d'une presse d'injection. Le rapport ciment/eau était égal à 2. Deux centrales étaient utilisées simultanément : un atelier était approvisionné avec

sacs de 35 kg. Le deuxième atelier était constitué d'une centrale automatisée sur pesons, alimentée par un mini-silo et une vis. Pour ce deuxième atelier, le ciment était approvisionné en big bag. Le coulis de scellement était ensuite injecté depuis le fond de l'ancrage en remontant vers la tête de celui-ci (à l'aide d'une canule d'injection).

→ **Le ferrailage et le bétonnage de la deuxième nappe de treillis soudé** : une fois l'injection des ancrages achevée, les têtes d'ancrages étaient mises en œuvre. Une projection de béton spécifique était alors réalisée, avant matage de la plaque d'ancrage dans le béton frais, par serrage d'un écrou.

Puis ensuite, une seconde phase de ferrailage et de béton projeté venait finir le confortement. Pour la passe sommitale de chaque berme, le coffrage était façonné pendant le ferrailage de la deuxième nappe de treillis soudé. Ce coffrage permettait d'obtenir des arêtes sommitales et latérales parfaitement rectilignes.

Un drainage profond au niveau des zones de scellement des ancrages était assuré par la réalisation de drains subhorizontaux (leur longueur pouvait atteindre 25 m pour les bermes supérieures). Le drainage du parement était assuré par des barbacanes, d'une part, et des bandes de géo-composites drainants, d'autre part, qui étaient raccordées à un drain de pied d'ouvrage. L'exutoire de l'ensemble de ces éléments de drainage était assuré au niveau de chaque berme puis, in fine, par un raccordement en pied d'ouvrage sur le réseau d'assainissement de la future chaussée.

PRISE EN COMPTE DU VOLET ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL

UN CHANTIER AUTONOME EN MATÉRIEAUX

- La limitation des apports par une gestion rigoureuse des ressources réduit fortement son bilan carbone et limite les gênes à la circulation.
- Une installation classée pour l'activité concassage qui tient compte du périmètre éloigné du captage de Jouchy permet d'optimiser le mouvement de terre.

UNE GESTION DES ÉMISSIONS ET DES REJETS

- Un arrosage des pistes a permis de réduire les émissions de poussières, les eaux de ruissellement du chantier sont collectées par des fossés et traitées par décantation et filtration avant rejet dans la Romanche.

UTILISATION DES FILIÈRES DE VALORISATION

- Broyage du bois sur place pour réutilisation en bois de chauffage.

MISE EN ŒUVRE DES CLAUSES SOCIALES

- 9 000 h d'insertion de personnes en difficulté.

MOBILISATION DE MOYENS HUMAINS ET MATÉRIELS

L'exiguïté des accès et la forte co-activité ont été une constante pendant la majeure partie de la réalisation de l'ouvrage, seule les bermes inférieures ont offert un espace de travail confortable pour les équipes de chantier. Pour cette dernière phase de chantier, les équipes disposaient de trois accès, une efficacité maximale des différents ateliers a pu alors être constatée. Les cadences de production ont été majorées, pour atteindre, au plus fort de la production, 1 200 m² de surface confortée par mois. Des moyens humains et matériels ont été déployés en conséquence sur ce chantier : 40 personnes en permanence dédiées au minage, au terrassement et au confortement.

Le site a compté jusqu'à quatre ateliers de forage pour le minage et le forage des ancrages, deux ateliers d'injection et deux ateliers de projection.

Pour le forage en zones d'accès difficiles situées aux extrémités de la paroi, G.T.S. a déployé des ateliers supplémentaires spécifiquement adaptés : pelles hydrauliques de 13 t à 25 t dotées de glissière de forage, permettant de réaliser toutes les méthodes de forage précitées.

CONCLUSION

En réponse à un risque majeur de catastrophe naturelle dans la vallée de l'Oisans, une parade sous forme de déviation routière a été décidée par le Conseil départemental de l'Isère pour sécuriser la route départementale 1091 dans la vallée de l'Oisans. Cette solution radicale a impliqué des aménagements de grande envergure (de début 2013 à courant 2015) en termes de terrassement (300 000 m³ en déblai),

15- La particularité de la paroi clouée AD/OC tient dans son parement en écailles préfabriquées.

15- The special feature of the 'AD/OC' soil-nailed wall is its facing in prefabricated scales.

de confortement et de génie civil. Ainsi, une paroi clouée de 47 m de hauteur, unique en France, vient sécuriser le nouveau tracé de la RD 1091 et sa piste cyclable. En parallèle, une parade hydraulique a été mise en œuvre sous forme de confortement des digues existantes de la Romanche. Cette opération marque l'histoire de cette vallée très fréquentée dont le paysage a été modelé pour la sécurité des personnes et des biens. □

© P. LE DOARÉ



15

PAROI AD/OC®

Une autre paroi de confortement de 300 m² a été dimensionnée selon le nouveau concept AD/OC® développé par G.T.S. au niveau de la piste cyclable en contre bas du futur tracé de la RD 1091.

Ce nouveau concept de paroi clouée a été développé par le Département R&D de G.T.S. en collaboration avec l'Insa et l'Ifsttar de Lyon. Composée d'écailles préfabriquées en béton (figure 15), la Paroi AD/OC® offre une véritable alternative à la paroi clouée traditionnelle grâce à ses avantages prouvés : parement aut drainant, délais optimisés, matricage pour intégration paysagère. Ici, la paroi clouée compte 100 ancrages et 100 écailles préfabriquées en remplacement du parement en béton projeté.

PRINCIPALES QUANTITÉS

TERRASSEMENT DÉBLAIS ROCHEUX : 300 000 m³ (dont 230 000 m³ de minage)

REMBLAIS : 240 000 m³ en multicouches (assise drainante 15 000 m³ / encagements latéraux : 30 000 m³ / cœur de remblais : 165 000 m³ / redans d'ancrage : 10 000 m³ / enrochements : 10 000 m³ avec blocométrie variant de 0,5 à 3 t / terre végétale : 10 000 m³)

COUCHE DE FORME : 25 000 m³ par concassage des déblais rocheux
PAROI CLOUÉE : 18 000 m² béton projeté (11 500 m³ de béton) / 47 m de hauteur / 550 m de longueur / 5 risbermes / 51 000 m de forage d'ancrage / longueur des clous de 3 à 20 m / 6 500 m de forage des drains sub-horizontaux

PAROI CLOUÉE AD/OC® : 300 m² en assise de chaussée / 100 écailles / 100 ancrages

OUVRAGE D'ART : un ouvrage hydraulique de 20 m de portée sans précontraintes situé sous ligne EDF 63 000 V nécessitant adaptation des modes opératoires de réalisation et un passage cycle en éléments préfabriqués

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE/D'ŒUVRE : Conseil départemental de l'Isère

GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Guintoli (mandataire), G.T.S. (parois clouées), Nge Génie Civil (Génie civil, ouvrage d'art) (filiales de Nge), Carron (terrassement), Bianco (Génie civil, terrassement)

SOUS-TRAITANT : Serfotex (minage)

BUREAU GÉOTECHNIQUE : Sage

ABSTRACT

SOIL-NAILED WALL 47 METRES HIGH TO ENSURE SECURITY FOR COUNTY ROAD RD 1091 AT SÉCHILLENNE

LAURENT RENAC, NGE - ALBAN NICOLINI, G.T.S. - LIONEL LORIER, SAGE

In the Oisans valley, south of the Belledonne mountains, county road 1091 passes through an area with a high risk of a major rock slide known as "les ruines de Séchillienne". The masses in movement are currently estimated at three million m³. Such an event would be a real natural disaster. The road, heavily travelled, has been diverted on the opposite slope, at an altitude making it possible to avoid the impact of a rock slide and thus ensure the continuity of the route. The future route comprises a single earth cut of 300,000 m³ (of which 230,000 m³ by blasting) on the mountainside. The earth cut requires the execution of an 18,000 m² soil-nailed wall 47 metres high in an extremely complex geological environment. □

PARED CLAVADA DE 47 M DE ALTURA PARA PROTEGER LA CARRETERA COMARCAL RD 1091 EN SÉCHILLENNE

LAURENT RENAC, NGE - ALBAN NICOLINI, G.T.S. - LIONEL LORIER, SAGE

En el valle de Oisans, al sur del macizo de Belledonne, la carretera comarcal 1091 atraviesa una zona con un alto riesgo de desprendimiento denominada "las ruinas de Séchillienne". Actualmente, las masas en movimiento se estiman en tres millones de m³. Un suceso de este tipo provocaría una auténtica catástrofe natural. La carretera, muy frecuentada, se ha desviado a la vertiente opuesta, a una altitud que permite librarse del impacto del desprendimiento y, de este modo, garantizar la continuidad del itinerario. El futuro trazado incluye un único desmonte de 300.000 m³ (de los cuales 230.000 m³ de voladura) en la ladera de la montaña. El desmonte requiere la realización de una pared clavada de 18.000 m² y 47 m de altura en un contexto geológico especialmente complejo. □



ArcelorMittal

Heiko Zillgen
Chef de Département
Bureau d'études
ArcelorMittal Palplanches
Luxembourg

Connecting **pioneers**

Pour nos clients, nous créons de la valeur en combinant les idées innovantes de nos chercheurs à l'excellence de notre force de vente. Les ingénieurs, vecteurs d'innovation par la force de leurs idées, et les entrepreneurs, prêts à changer le monde par l'audace de leur vision, deviennent ainsi les pionniers des solutions de demain. Deux univers unis par un lien d'acier. Les palplanches signées ArcelorMittal.



© CEDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY

FONDATEMENTS DU NOUVEAU TRIBUNAL DE GRANDE INSTANCE DE PARIS

AUTEURS : AUDREY ZONCO, RESPONSABLE D'AFFAIRES, SETEC TPI - ALEXANDRE BEAUSSIER, TERRASOL - EMMANUEL LAPIE, DIRECTEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - DOMINIQUE MICHEL, DIRECTEUR PÔLE FONDATIONS, SERVICE INGÉNIERIE, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

LE CHANTIER DU TGI, SITUÉ DANS LE QUARTIER DES BATIGNOLLES À PARIS, COMPORTE UNE TOUR DE GRANDE HAUTEUR ET UN SOCLE SUR 3 NIVEAUX DE SOUS-SOLS. APRÈS UN TRAITEMENT DES DISSOLUTIONS DE GYPSE PAR INJECTION DE MORTIER, UNE PAROI MOULÉE PÉRIMÉTRALE SOUTENUE PAR DEUX NIVEAUX DE TIRANTS D'ANCRAGE A PERMIS LA RÉALISATION DES SOUS-SOLS. DES BARRETTES PROFONDES ONT SERVI À FONDER LA TOUR. LE RESTE DU SOCLE EST, QUANT À LUI, FONDÉ SUR DES PIEUX STARSOL.

LE PROJET

L'Établissement Public des Palais de Justice de Paris (EPPJP) souhaite la centralisation des institutions juridiques sur un même site.

Ce projet a été confié à la maîtrise d'ouvrage Arélia, composée en grande partie de filiales de Bouygues Construction, sous la forme d'un contrat PPP (Partenariat Public Privé). Il est implanté au cœur du quartier des Batignolles de Paris, dans le 17^e arrondissement. Renzo Piano Building Workshop est l'architecte mandataire du groupement de maîtrise d'œuvre, qui comprend notamment la société Setec Tpi pour la conception et la maîtrise d'œuvre de la

structure, assistée dans cette tâche par Terrasol pour les problématiques géotechniques. Bouygues Bâtiment Île-de-France est le constructeur. Soletanche Bachy a réalisé l'ensemble des travaux de fondations de l'infrastructure.

Le bâtiment s'ordonne selon un plan en « L » avec trois niveaux de sous-sols d'environ 15 000 m². Le socle du bâtiment principal s'élève sur 6 niveaux, s'ajustant ainsi sur la traditionnelle cote du plafond haussmannien, et abrite les grands volumes programmatiques : la salle des pas perdus et les 90 salles d'audience. Au-dessus du socle, une superstructure se développe sur 19, 29 et 39 niveaux disposés en trois

1- Vue d'ensemble du chantier de paroi moulée.

1- General view of the diaphragm wall construction site.

ensembles horizontaux en gradins, culminant à 160 m. Ils abritent les services juridictionnels et administratifs, et sont séparés les uns des autres par des terrasses arborées sous des niveaux de

transfert qui donnent au projet sa ligne « en taille de guêpe » (figure 2).

À cette architecture de volumes horizontaux répond un partage vertical de la structure. Les plateaux, d'une longueur de 113 m, comprennent trois blocs indépendants séparés par des joints de dilatation verticaux. Chaque bloc est doté d'un noyau de contreventement. Ces blocs sont reliés entre eux par des clés de transfert d'effort tranchant aux niveaux 10, 20 et 30, afin d'homogénéiser les déplacements horizontaux (figure 3).

Finalement, l'originalité de cet ensemble de trois tours consiste à juxtaposer six sous-ensembles superposés, cassant



MAQUETTE DU NOUVEAU TRIBUNAL DE GRANDE INSTANCE DE PARIS

dessinée par Renzo Piano

2

© RENZO PIANO

de ce fait l'image habituelle des immeubles de grande hauteur.

À l'ouest, le deuxième bâtiment, appelé « Bastion », est constitué de 8 niveaux et regroupe les espaces de détention des personnes appelées à comparaître. Positionné sur une nouvelle voie baptisée rue du Bastion, il longe les anciennes fortifications de Thiers.

L'ensemble des structures (IGH Socle et Bastion) comprend trois niveaux de sous-sols et présente une arase inférieure à la cote 18,8 NVP, soit environ 12 m sous le terrain actuel. Cela exige des travaux d'infrastructure importants : l'excavation à l'abri de 721 m de paroi moulée maintenue par des tirants d'ancrage, le confortement des sols supports par injection de 5 500 m³ de mortier et les fondations composées de 350 pieux et 78 barrettes disposées sous les noyaux de la tour.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE - GÉOTECHNIQUE

Le contexte géologique et géotechnique général au droit du projet peut être décrit par la stratigraphie suivante :

→ Les remblais anthropiques datant d'anciennes activités industrielles sur le site sont de nature assez variée, avec en tête des terrains argileux de couleur brun foncé à noirâtre et de faible compacité, ainsi que des terrains limoneux plus compacts en profondeur ; ces remblais ont une épaisseur d'environ 6 m, allant de 1,5 à 9 m.

→ Les alluvions anciennes sont constituées de sables moyens à grossiers,

à passes graveleuses (galets de silex assez arrondis) de bonne compacité. Des lentilles de matériaux fins, limoneux et argileux peuvent être rencontrées. Ces alluvions ont une épaisseur variable et sont parfois absentes là où les remblais reposent directement sur les calcaires de Saint-Ouen. Elles présentent une faible épaisseur moyenne de 0,8 m.

→ Les marno-calcaires de Saint-Ouen sont ici des marnes blanchâtres tendres à cailloutis calcaires. En base de cette formation, un niveau de calcaire raide fracturé et altéré (karst), le calcaire de Ducy, est rencontré avec une puissance métrique. Ils ont une puissance moyenne de 3,2 m sur l'ensemble du

2- Maquette du nouveau Tribunal de Grande Instance de Paris, dessinée par Renzo Piano.

3- Les trois noyaux et les trois niveaux de transfert.

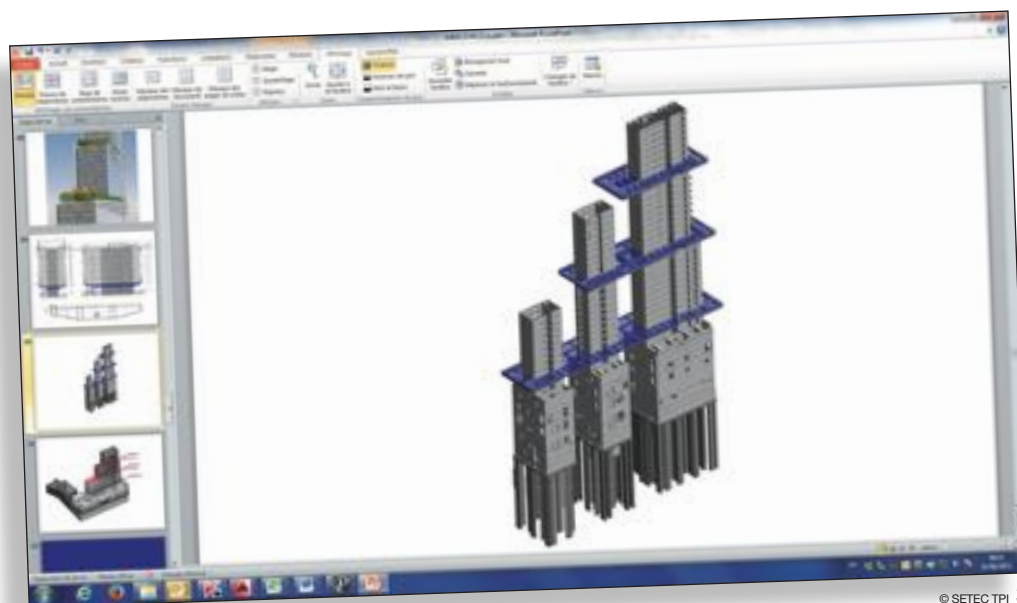
2- Mock-up of the new Tribunal de Grande Instance (High Court) of Paris, designed by Renzo Piano.

3- The three cores and the three transfer levels.

site, dont les valeurs sont comprises entre 1,5 et 7,3 m.

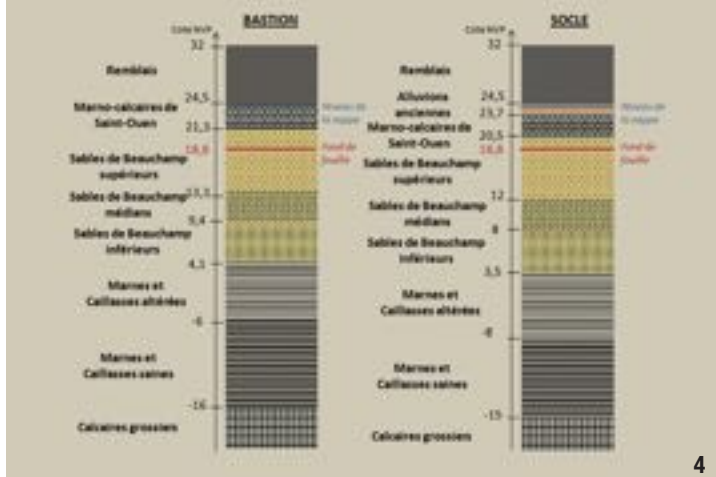
→ Les sables de Beauchamp sont des sables fins noirâtres, d'épaisseur moyenne de 17 m, dont le toit est compris entre 15 et 21 m. Cette formation présente 3 sous-unités : les sables de Beauchamp supérieurs, médians et inférieurs, d'épaisseurs moyennes respectives de 8, 4 et 5,4 m. Les sables médians sont beaucoup plus argileux et constituent une couche très peu perméable. Les sables inférieurs peuvent être décomprimés par remontée de fontis des terrains sous-jacents.

→ Les Marnes et Caillasses sont des marnes blanchâtres à verdâtres, magnésiennes et argileuses avec des



© SETEC TPI 3

MODÈLES GÉOTECHNIQUES SOCLE ET BASTION



4

© BOUYGUES

lits d'argile brune ou noire, des marnes calcaires blanches contenant des blocs calcaires, dolomitiques ou siliceux, et des bancs calcaires. Au sein des masses marneuses, quelques cristallisations de gypse sont rencontrées, généralement inférieures à 0,5 m mais pouvant atteindre localement 1,5 m. Cette formation a une puissance totale d'environ 19 m.

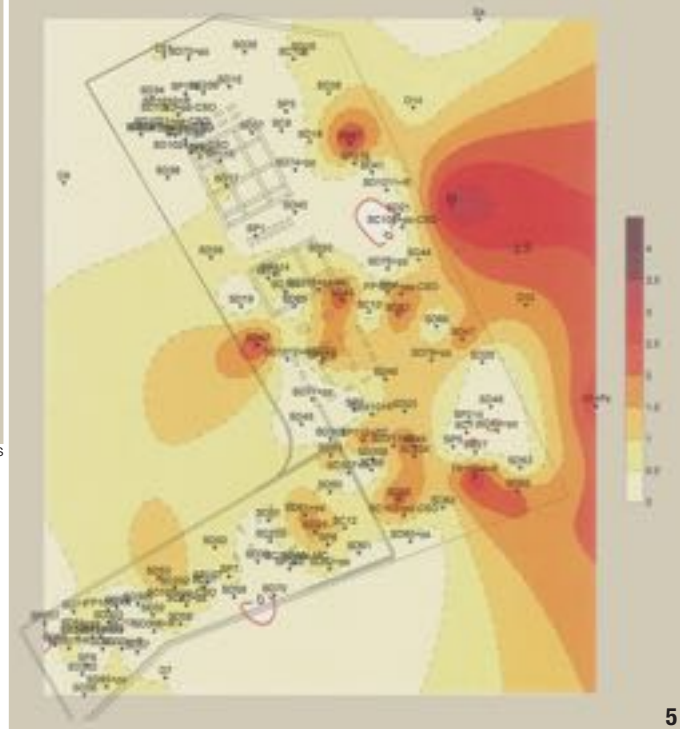
L'altération de cette formation est due au phénomène de dissolution du gypse initialement présent, favorisant la décompression des terrains et le développement de cavités vides ou remplies d'argiles molles. Cette altération est rencontrée sur les premiers mètres de la formation, faisant en moyenne 12 m d'épaisseur.

→ Les Calcaires Grossiers supérieurs sont des calcaires sains blanchâtres en petits bancs, alternant des niveaux sableux assez tendres et des niveaux de calcaire francs très raides. Le toit de cette formation est repéré à 48 m de profondeur.

Ces formations sont caractéristiques du bassin parisien. La suite de la stratigraphie est donc constituée des Calcaires Grossiers inférieurs plus tendres, des sables cuisiers, des formations sparnaciennes (Fausses Glaises, sables d'Auteuil, Argiles Plastiques), et, au-delà, des marno-calcaires du Montien et de la craie campanienne présentant de très faibles compressibilités en comparaison du cortège argilo-sableux sus-jacent.

ÉQUIVALENCE EN HAUTEUR DES VIDES

(en mètres) des zones touchées par la dissolution du gypse à la base des marnes et caillasses altérées



5

© TERRASOL

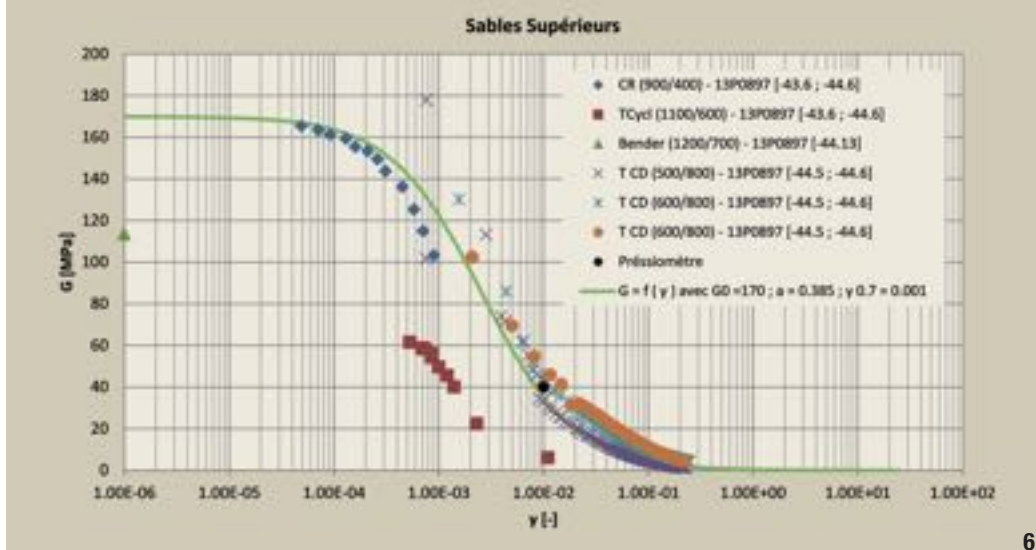
LES CONDITIONS DE SITE - LES RISQUES IDENTIFIÉS

La stratigraphie est marquée par de multiples formations sableuses qui, malgré leur compacité, sont susceptibles d'engendrer des tassements importants sous les efforts apportés par le bâtiment. Ces charges étant hétérogènes, des tassements différentiels

4- Modèles géotechniques socle et bastion.
5- Équivalence en hauteur des vides (en mètres) des zones touchées par la dissolution du gypse à la base des marnes et caillasses altérées.

6- Détermination de la courbe de dégradation des modules en fonction du taux de déformation.

DÉTERMINATION DE LA COURBE DE DÉGRADATION DES MODULES EN FONCTION DU TAUX DE DÉFORMATION



6

© TERRASOL

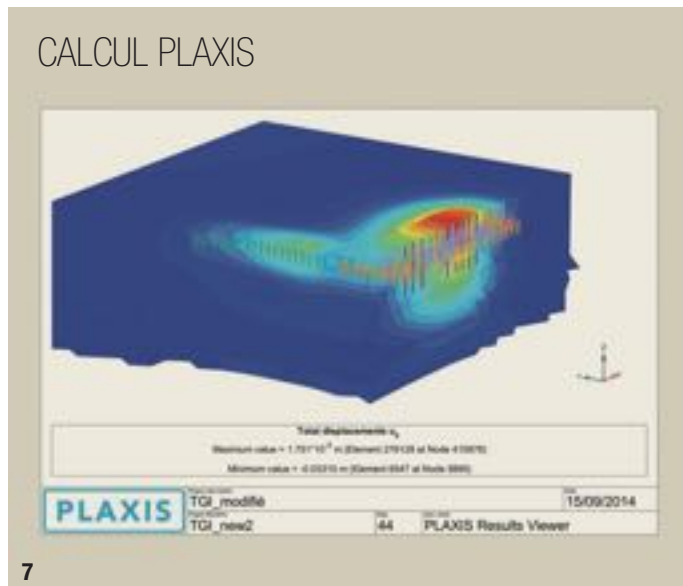
4- Geotechnical models of the "socle" and "bastion".
5- Equivalent in height of voids (in metres) of the areas affected by gypsum dissolution at the base of the weathered marnes et caillasses.

6- Determining the modulus degradation curve as a function of the deformation ratio.

peuvent alors être générés et affecter l'intégrité des ouvrages.

Les reconnaissances géotechniques ont mis en évidence des zones décomprimées, voire des cavités, au sein des Marnes et Caillasses, pouvant se propager dans les sables de Beauchamp inférieurs. Localement, ces zones au développement erratique diminuent considérablement la capacité portante des sols.

Le bâtiment est implanté en plein cœur de la ville de Paris. La proximité d'un mur SNCF à 50 cm de l'infrastructure, destiné à l'élévation de la plateforme SNCF, présente un risque réel. Les tassements doivent être limités à la tolérance imposée par le voisinage, entre 0,5 cm et 2,5 cm suivant la localisation. D'un point de vue hydrogéologique, le site est constitué par un système de nappes superposées, séparées par les sables de Beauchamp médians : l'aquifère des marno-calcaires de Saint-Ouen et des sables de Beauchamp supérieurs, avec un niveau à la cote 23,6 NVP et une variabilité (latérale et saisonnière) de 1,6 m à l'échelle du site, et l'aquifère des Marnes et Caillasses sous-jacent, présentant une charge inférieure de l'ordre de 50 cm mais pouvant s'avérer nettement plus productif. Or, l'infrastructure nécessite une excavation jusqu'à la cote 18,8 NVP, générant ainsi une hauteur de charge d'eau d'environ 5 m.



7
© SETEC / TERRASOL

- 7- Calcul Plaxis.
- 8- Stratigraphie générale et allure de la cuvette.
- 9- Modèle Pythagore®.

- 7- Plaxis computation.
- 8- General stratigraphy and shape of the basin.
- 9- Pythagore® model.

Cette charge doit être prise en compte lors des dimensionnements du rabattement de nappe et des ouvrages de soutènements, ainsi que dans la conception de l'ouvrage définitif.

SYNTHÈSE GÉOTECHNIQUE - CAMPAGNE COMPLÉMENTAIRE

Ce projet est constitué d'une tour de grande hauteur qui repose sur un terrain présentant des risques identifiés ; les incertitudes doivent donc être limitées. Une importante campagne de sol a été conduite dès les premiers stades

de l'étude, avec des sondages et des essais aussi nombreux que diversifiés, réalisés par différents opérateurs.

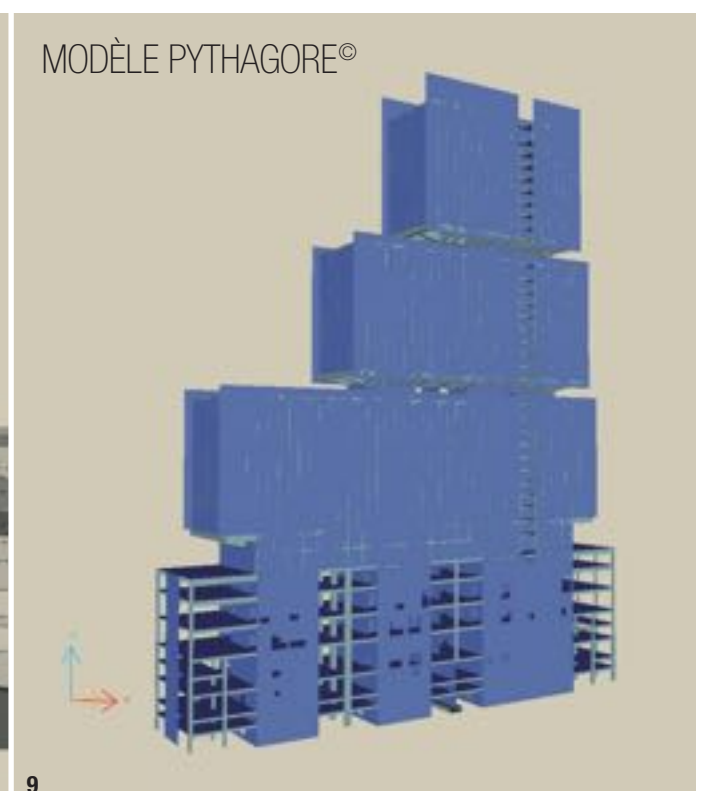
La coupe lithologique a été définie sur la base de sondages carottés, de sondages destructifs et de diagraphies Gamma-ray. Les paramètres hydromécaniques ont été déterminés par des essais ponctuels d'infiltration, ainsi que par des essais de pompage combinés à des mesures au micro-moulinet. Les caractéristiques mécaniques des différents horizons ont, quant à elles, été déterminées par le biais d'essais in situ (essais pressiométriques et essais cross-hole), associés à une importante campagne d'essais mécaniques de laboratoire (essais de cisaillement à la boîte, essais triaxiaux et essais œdométriques). Enfin, des essais d'injection ont été menés afin de repérer et de quantifier les zones sujettes au problème de dissolution de gypse.

Les épaisseurs des strates et les taux de décompression des marnes et caillasses étant variables à l'échelle de l'ouvrage, le site a été divisé en deux zones : la partie Nord nommée « socle » et la partie Sud découpée par l'angle du mur SNCF et nommée « bastion ». Cette distinction a permis d'élaborer deux modèles limitant les écarts à la réalité (figure 4).

Étant donné la complexité du projet, une analyse globale de l'ensemble des reconnaissances disponibles a été

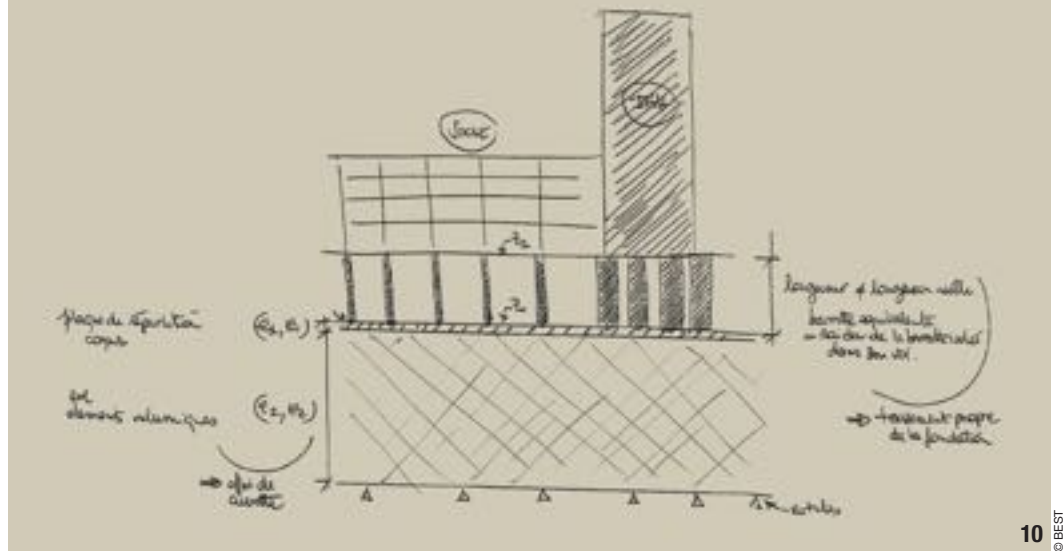


8
© SETEC / TERRASOL



9
© SETEC TPI

COUPE DE PRINCIPE DU MODÈLE EN PHASE D'EXÉCUTION



10

menée par Terrasol (groupe Setec) avec tout d'abord, une analyse plus poussée des paramètres faite pour tenir compte des variations en fonction de la profondeur, ce qui permet une meilleure connaissance des interactions sol/structure (tableaux 1 et 2) ; puis a suivi une caractérisation fine de l'aléa karstique basée sur l'analyse des paramètres de foration des 150 sondages destructifs répartis sur le site : analyse morphologique et mécanique des formations concernées et estimation des volumes de traitement (figure 5).

Enfin, pour mieux appréhender l'estimation des tassements sous les trois noyaux de la tour, il a été nécessaire de caractériser les formations sous-jacentes aux calcaires grossiers jusqu'à 120 m de profondeur : le cortège sablo-argileux du Cuisien/Yprésien est en effet à l'origine de la majeure partie des tassements. Ces reconnaissances ont été basées sur un forage carotté

profond permettant l'établissement de la coupe lithostratigraphique et le prélèvement d'échantillons intacts pour la réalisation d'essais de laboratoire statiques et dynamiques qui ont fourni les paramètres de consolidation des matériaux argileux ainsi que, pour chaque couche, l'évolution du module en fonction du taux de déformation (figure 6).

10- Coupe de principe du modèle en phase d'exécution.

10- Schematic cross section of the model in the execution phase.

La variabilité des formations à l'échelle de l'IGH a été, quant à elle, estimée par des forages pressiométriques de 80 m de profondeur. De plus, des études hydrographiques supplémentaires ont été commandées, car les résultats des études précédentes n'étaient pas concordants. Ces études menées par Burgeap ont permis

TABLEAU 1 : PARAMÈTRES DE SOLS RETENUS POUR LA CONCEPTION DES OUVRAGES DANS LA ZONE DU SOCLE

Stratigraphie	Cote base R ¹⁾ [m]	Paramètres généraux										Pieux Tarière creuse		Barrettes et pieux boue	
		γ [kN/m ³]	K [m/s]	Classification	E_{50} [MPa]	ν [-]	α [-]	E_{10} [MPa]	ϵ^0 [kPa]	ϕ^0 [°]	E_{100} [MPa]	q_c (kPa)	$t_{c,100}$ ²⁾ [-]	q_c (kPa)	$t_{c,100}$ ²⁾ [-]
TR	22	20	20	cc	20	0,28	0,2	20	0	30	20	20	20	20	20
R	24,3	19	1,25.10 ⁻⁵	Limons A	5	0,65	0,3	ND	0	30	ND	ND	ND	ND	ND
NA	27,2	21	5.10 ⁻⁶	Sables C	20	0,4	0,2	100	0	35	100	ND	ND	ND	ND
CS1	20,4	20	7,5.10 ⁻⁷	Marnes A	25	2,5	0,2	20	10	30	200	ND	ND	ND	ND
SB sup	12	20 & 22	10 ⁻⁷	Sables C	20	0,4	0,2	200	5	38	1000	170	1,65	90	1,1
SB med	8	20 & 21	5,5.10 ⁻⁷	Sables C	20	0,4	0,2	80	20	28	ND	170	1,65	90	1,1
SB inf	4,1	20 & 21	10 ⁻⁷	Sables C	20	0,4	0,2	70	5	38	ND	170	1,65	90	1,1
MC au niveau NC	Variable	20	10 ⁻⁷	Marnes A	25	Var. ³⁾	0,2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
MC au niveau CS	16	20	10 ⁻⁷	Marnes B	20	5,5	0,2	140	20	30	ND	ND	ND	170	1,45
CS	ND	ND	ND	Sables B	240	0,5	0,2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	200	1,45

TABLEAU 2 : PARAMÈTRES DE SOLS RETENUS POUR LA CONCEPTION DES OUVRAGES DANS LA ZONE DU BASTION

Stratigraphie	Cote base R ¹⁾ [m]	Paramètres généraux										Pieux Tarière creuse		Barrettes et pieux boue	
		γ [kN/m ³]	K [m/s]	Classification	E_{50} [MPa]	ν [-]	α [-]	E_{10} [MPa]	ϵ^0 [kPa]	ϕ^0 [°]	E_{100} [MPa]	q_c (kPa)	$t_{c,100}$ ²⁾ [-]	q_c (kPa)	$t_{c,100}$ ²⁾ [-]
TR	22	20	20	cc	20	0,28	0,2	20	0	30	20	20	20	20	
R	24,5	19	1,25.10 ⁻⁵	Limons A	5	0,65	0,3	ND	0	30	ND	ND	ND	ND	
NA	27,5	21	5.10 ⁻⁶	Sables C	20	0,4	0,2	100	0	35	100	ND	ND	ND	
CS1	21,7	20	7,5.10 ⁻⁷	Marnes A	25	2,5	0,2	20	10	30	200	ND	ND	ND	
SB sup	12,3	20 & 22	10 ⁻⁷	Sables C	20	0,4	0,2	200	5	38	1000	170	1,65	90	1,1
SB med	9,4	20 & 21	5,5.10 ⁻⁷	Sables C	20	0,4	0,2	80	20	28	ND	170	1,65	90	1,1
SB inf	4,1	20 & 21	10 ⁻⁷	Sables C	20	0,4	0,2	70	5	38	ND	170	1,65	90	1,1
MC au niveau NC	Variable	20	10 ⁻⁷	Marnes A	25	Var. ³⁾	0,2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
MC au niveau CS	16	20	10 ⁻⁷	Marnes B	20	5,5	0,2	140	20	30	ND	ND	ND	170	1,45
CS	ND	ND	ND	Sables B	240	0,5	0,2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	200	1,45

© TERRASOL

de préciser les différentes cotes d'eau nécessaires au CCTP (Basses Eaux, Hautes Eaux, Eaux Exceptionnelles, Crue Chantier). Ces niveaux intègrent notamment la possible remontée générale des nappes parisiennes par arrêt des pompages industriels.

SOUTÈNEMENTS

Le projet préliminaire d'infrastructure était bien différent et prévoyait :

- Un socle à 2 niveaux de sous-sol, au-dessus de la nappe, à l'abri d'une paroi parisienne ;
- Un bastion à 4 niveaux de sous-sol, avec une forte sous-pression d'eau, à l'abri d'une paroi moulée étanche et d'un radier injecté dans l'horizon des Marnes et Caillasses, qui permettait l'équilibre des forces grâce au poids des terres au-dessus du bouchon. Cette solution nécessitait un pompage continu en phase d'exploitation pour évacuer le débit de fuite à travers le terrain injecté.

En phase finale, Arélia a décidé d'uniformiser l'infrastructure à trois niveaux de sous-sol protégés par une paroi moulée sur toute la périphérie. L'horizon des sables de Beauchamp intermédiaires est considéré comme l'horizon étanche. La couche des sables médians ayant une altimétrie assez variable sur la surface de la parcelle, l'arase inférieure de la paroi moulée est choisie à 9 NVP : ce choix permet d'assurer un



© SOLETANCHE BACHY

11- Foreuses pour comblement des vides de dissolution de gypse.

12- Benne hydraulique KS en largeur 3,6 m.

11- Drillers for filling gypsum dissolution voids.

12- KS hydraulic grab of width 3.6 m.

ancrage dans le sable de Beauchamp médian toujours supérieur à 2 m.

Une attention toute particulière a été apportée à l'étude de la stabilité du fond de fouille en phase travaux, notamment dans les zones où la remontée de l'horizon médian a imposé la création de puits de décharge pour assurer la stabilité aux sous-pressions.

La paroi moulée est considérée relativement étanche au sens du DTU 14.1, avec des débits de fuite inférieurs à 0,5 l/m²/jour en moyenne annuelle. Le béton reçoit un hydrofuge dans la masse et des bandes d'arrêt d'eau pour assurer l'étanchéité entre panneaux.

Enfin, un joint hydrogonflant est installé dans la reprise de bétonnage radier/paroi pour garantir l'absence d'arrivée d'eau.

La stabilité de la paroi est assurée :

- En phase provisoire, par des lits de tirants d'ancrage sub-horizontaux ;
- En phase définitive, par les planchers des niveaux de sous-sols, réalisés en dalle pleine pour diminuer la compression moyenne et limiter le fluage.

Au niveau RDC du bastion, le plancher présente une faille longitudinale.

Des butons franchissent l'ouverture tous les 12 m. Le raccourcissement des butons est pris en compte pour le calcul du soutènement.

Pour limiter les déplacements imposés à la paroi moulée dus au retrait des planchers butonnants, ces derniers contiennent une bande coulée 3 mois et demi après achèvement des planchers.

FONDACTIONS DE L'IGH

Les descentes de charge des trois noyaux de l'IGH avoisinent les 25 000 t, 35 000 t et 75 000 t à l'ELSQP.

De manière à limiter les tassements induits par les structures de l'IGH sur ses avoisinants et notamment le Socle qui lui est accolé, les fondations de l'IGH ont été descendues jusqu'aux horizons raides formés par les Calcaires Grossiers. Associée à des injections de comblement/clavage, cette solution permet de se prémunir vis-à-vis de l'aléa karstique.

Compte tenu de l'importance des charges verticales, des barrettes ont été disposées sous les noyaux des tours.

En outre, les barrettes, grâce à leur section rectangulaire, sont bien adaptées à la reprise de l'effort tranchant global en pied de tour sous les effets du vent.

FONDACTIONS DU SOCLE

Bien que les charges descendues par les poteaux des structures courantes du Socle et du Bastion soient nettement plus modestes, une solution de fondations profondes a été retenue. Ces pieux contribuent localement à la reprise des sous-pressions en service. Vis-à-vis de l'aléa karstique, la stratégie retenue consiste à ménager une garde suffisante entre la pointe de pieux et les Marnes et Caillasses, de manière à ce qu'une anomalie locale traitée ne dégrade pas la raideur ou la capacité portante des fondations. C'est ainsi qu'a été retenue la technologie Starsol, permettant d'optimiser les longueurs de pieux.



© CEDRIC HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY

12



13

© CEDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY



14

© CEDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY



15

© CEDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY

MODÉLISATION ET ANALYSE NUMÉRIQUE

L'étude du comportement d'ensemble de ce système de fondation a été réalisée par Setec - Terrasol à l'aide d'un modèle EF3D de sol réalisé sous Plaxis, intégrant explicitement les 78 barrettes des noyaux modélisées en éléments volumiques et les 350 pieux courants modélisés par des « Embedded piles » (éléments filaires).

Avec leur épaisseur de 20 m sous les pointes des barrettes, les calcaires grossiers agissent comme une dalle diffusant les surcharges aux horizons sous-jacents qui, moins raides, sont à l'origine de la majeure partie des tassements sous l'ouvrage. L'ensemble des terrains a donc été modélisé depuis la base des structures jusqu'au Montien, qui, une soixantaine de mètres sous les pointes des barrettes, apparaît indéformable à l'échelle des charges du projet. Ces couches ont fait l'objet de modélisation par des lois de comportement avancées (HSM small strain) permettant de prendre en compte la réduction des modules en fonction des taux de déformations, ainsi que le comportement différé des formations sparnaciennes.

Finalement, ce modèle de 463 000 nœuds a permis de calculer la cuvette de tassement dont la flèche maximale avoisine les 35 mm sous les noyaux (figure 7 montrant le modèle Plaxis et figure 8 montrant la stratigraphie générale et l'allure de la cuvette).

En phase conception, Setec Tpi a réalisé sur Pythagore® (logiciel interne) le modèle de l'IGH, son radier et ses barrettes, afin de maîtriser le centrage des charges sur chacun des trois noyaux de fondations (figure 9).

Le modèle Plaxis réalisé par Terrasol a montré qu'environ 25% des charges verticales descendantes passaient dans le radier, 75% dans les barrettes. La modélisation Pythagore® ne prend en compte que les barrettes et la raideur équivalente du système mixte (barrette + radier) est déterminée par trois itérations successives.

En phase d'exécution, l'entreprise a choisi de réduire les efforts dans le radier en supprimant l'effet de fondations mixtes. Le radier est désolidarisé du sol par l'intermédiaire d'un coffrage biodégradable. Une fois le coffrage dégradé par la remontée de la nappe, le vide sous le radier est suffisant pour

13- Équipement d'une cage d'armature.

14- Benne hydraulique KS et Hydrofraise Evolution 5.

15- Hydrofraise Evolution 5.

13- Reinforcement cage equipment.

14- KS hydraulic grab and Evolution 5 hydrofraise.

15- Evolution 5 hydrofraise.

descendantes ni d'alléger les fondations des noyaux. Le modèle d'exécution comprend l'ensemble de la tour et du socle. Le bureau d'études d'exécution Best a choisi de modéliser des couches de sol équivalentes, dont le calage du module et de l'épaisseur permettent de reconstituer l'effet de cuvette général à la base des fondations, ainsi que des éléments de fondations équivalents, dont la longueur est calée de façon à obtenir le tassement propre de la fondation considérée comme isolée dans son sol. On obtient ainsi le tassement total à la sous-face du radier (figure 10).

LE DÉROULEMENT DES TRAVAUX DE FONDATIONS PAR SOLETANCHE BACHY TRAVAUX D'INJECTION

Une première phase de travaux consistait à réaliser les injections de comblement jusqu'à 50 m de profondeur, afin de traiter les zones de dissolution de gypse, principalement dans les Marnes et Caillasses altérées. Le traitement entrepris sur l'ensemble de la surface du projet, soit près de 2 ha, se traduit par plus de 30 km de forage et 5 500 m³ d'injection de mortier.



16

© CEDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY



17

© CEDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY

Les forages sont disposés suivant un maillage de 7 m x 7 m avec une densification par un maillage de 5 m x 5 m sur la partie centrale correspondant aux zones de barrettes.

Les forages sont équipés de tubes crépinés pour réaliser ensuite une injection gravitaire d'un mortier constitué d'un mélange de sable argileux, de ciment et d'eau.

Les travaux d'injection se sont déroulés sur une durée de 2 mois, de fin mars à fin mai 2014. Afin de tenir ce délai, des moyens importants ont été mobilisés : 4 foreuses de type SM 18 (figure 11) ont travaillé en 2 postes pendant ces 2 mois (production moyenne de 1 000 m par jour).

Le mortier était fabriqué sur le chantier à l'aide d'une centrale à mortier alimentée quotidiennement en sable et en ciment. Le mortier était ensuite pompé par des presses type PH160 vers les forages équipés de tubes crépinés.

L'équipe pour ces travaux d'injections était composée d'une trentaine de compagnons répartis sur les 2 postes journaliers.

TRAVAUX DE PAROIS MOULÉES ET BARRETTES

Une enceinte d'un périmètre de 721 m, constituée d'une paroi moulée en béton armé de 23 m de profondeur et 60 cm d'épaisseur, est ensuite réalisée.

Sur la partie centrale de l'ouvrage où s'élèvent les tours, les fondations sont constituées de 78 barrettes en béton armé de section 2,8 m x 1 m ou 1,2 m à 49 m de profondeur.

Les travaux de parois moulées ont démarré début juin 2014, dès la fin des injections.

La centrale de traitement de la boue avait commencé à être installée dès le mois de mai afin d'être opérationnelle début juin pour alimenter les 2 ateliers

16- Centrale à boue.

17- Vue du terrassement et du premier lit de tirants.

18- Forage des tirants.

16- Slurry mixing plant.

17- View of earthworks and the first layer of tie anchors.

18- Tie anchor drilling.

de d'excavation à la benne hydraulique de type KS. La largeur de ces bennes était de 3,6 m (figure 12), ce qui permettait de réaliser l'excavation de panneaux de paroi moulée de l'ordre de 9 m de long en 2 passes primaires de 3,6 m et un merlon central de 2 m : cet outillage est bien adapté pour les terrains pulvérulents ou argileux de compacité moyenne et il permet d'améliorer la cadence d'excavation.

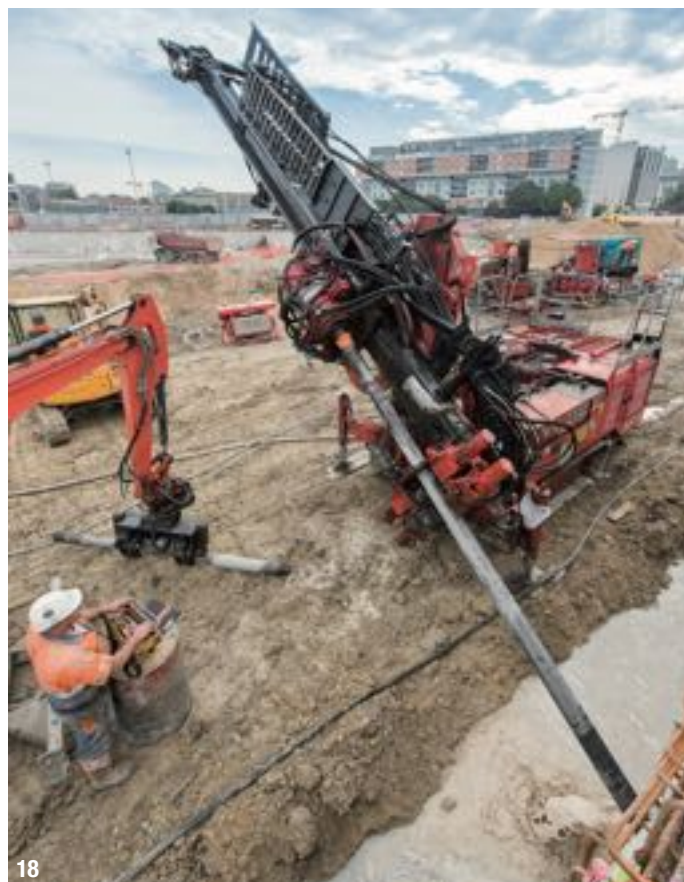
Pour réaliser l'équipement des armatures (figure 13) et le bétonnage des panneaux des parois moulées, 2 grues de manutention, de capacité respective 50 t et 80 t ont été utilisées.

Ces moyens permettaient de bétonner jusqu'à 2 panneaux de 125 m³ dans une même journée. Au total, 81 panneaux de paroi ont été bétonnés sur une durée de 2,5 mois.

Avec un décalage de 2 semaines par rapport au démarrage des parois, l'exécution des barrettes a été entreprise. Un atelier d'excavation à la benne hydraulique KS et une Hydrofraise Evolution 5 ont été mobilisés (figure 14). Une centrale de dessablage spécifique pour l'Hydrofraise a complété la centrale de traitement de boue de la paroi. À noter que, le planning pour réaliser l'ensemble des travaux étant très tendu, l'option consistant à réaliser les barrettes à partir du terrain naturel en même temps que les parois moulées a été retenue. Cette disposition a permis de gagner un mois sur le délai global de l'opération.

Les barrettes traversant l'intégralité des Marnes et Caillasses avec des passages rocheux, l'utilisation de l'Hydrofraise s'est révélée indispensable. Les terrains supérieurs, à savoir le calcaire de Saint-Ouen, les sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses altérées étaient excavés à la benne hydraulique. La partie inférieure des barrettes dans les Marnes et Caillasses saines et le Calcaire Grossier était traversée avec l'Hydrofraise (figure 15). L'objectif du chantier pour tenir le planning consistait à réaliser 2 barrettes par jour en 2 postes de travail de 8 heures. Il a donc fallu renforcer les moyens avec un atelier d'excavation à la benne hydraulique supplémentaire.

Les 2 ateliers d'excavation à la benne hydraulique permettaient alors de poursuivre le forage jusqu'aux Marnes et Caillasses saines. Cela limitait ensuite l'utilisation de l'Hydrofraise au seul terrain très dur, ce qui permettait d'améliorer globalement la production journalière.



18

© CEDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY

Pour assurer l'équipement des armatures (figure 16) et les bétonnages des barrettes, des grues de manutention d'une capacité respective de 80 t et 120 t ont été utilisées.

La réalisation des travaux de parois moulées et de barrettes sur une même période a exigé la mobilisation de très gros moyens en matériel et en personnel entre juin et août 2014 : 4 à 5 ateliers de forage, 4 grues de manutention et un effectif de 90 personnes dans une organisation à 2 postes de travail journalier. La gestion de la co-activité avec 9 grues a été un point clé pour tenir le planning en optimisant au mieux les déplacements de chaque engin.

Les approvisionnements d'armatures préfabriquées en usine et du béton prêt à l'emploi étaient planifiés sur la journée pour éviter la saturation des emprises des travaux.

Il arrivait régulièrement de réaliser le bétonnage de 2 panneaux de parois moulées et de 2 barrettes sur une même journée, ce qui représentait un volume de 500 m³ de béton et de 40 t d'acier !

En termes de trafic de véhicules sur le chantier, ces quantités représentaient la rotation de 150 camions par jour en tenant compte également de l'évacuation des déblais de forage.

Le phasage des travaux a été adapté afin de pouvoir démarrer les travaux de terrassement dans l'enceinte en paroi moulée avant la fin complète des barrettes : cette disposition a permis de démarrer, comme prévu, le premier niveau de tirants mi-août 2014.



19 © CEDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY

TRAVAUX DE POMPAGE

Un pompage provisoire a été mis en œuvre pendant toute la phase de terrassement jusqu'à la construction d'une partie de la structure, soit pendant une année.

L'arrêt du pompage est conditionné par la reprise, par la structure, des efforts liés aux sous-pressions.

Le débit moyen pour l'ensemble de la fouille a été de l'ordre de 50 m³/h, si l'on ne prend pas en compte les arrivées d'eau ponctuelles liées à des sondages anciens qui n'avaient pas été rebouchés.

Ces arrivées d'eau ponctuelles représentaient un risque de renard liquide ; des injections localisées en cours de terrassement ont donc été entreprises pour bloquer ce phénomène de renard lorsqu'une arrivée d'eau était détectée. Au total, 39 puits de pompage ont été forés, dont plus des deux tiers ont été équipés d'une pompe.

19- Équipement des tirants.

20- Plate-forme intermédiaire pour le forage des pieux.

19- Tie anchor equipment.

20- Intermediate platform for pile drilling.

La réalisation des puits de pompage a été faite à partir d'une plate-forme intermédiaire située un mètre au-dessus de la nappe. Ces puits étaient forés au tricône, en rotation à l'eau, sur une profondeur de 20 m.

Le diamètre de forage de 350 mm permettait de les équiper avec un tube crépiné Ø 200 mm enrobé de sable drainant dans l'espace annulaire.

TRAVAUX DE TIRANTS

La paroi moulée est maintenue par 2 niveaux de tirants précontraints représentant 350 unités d'une capacité de 55 t à 125 t.

Ces travaux ont été réalisés au fur et à mesure du terrassement, sur la période allant du mois d'août 2014 au mois de janvier 2015 (figure 17).

Au préalable, des tirants d'essais avaient été réalisés au mois de juillet 2014, afin de définir les longueurs de scellement.

Les tirants ont été forés à l'aide d'une foreuse DCH 147 équipée d'une tête de forage Hi'Drill (figure 18). Ce matériel permet de mettre en œuvre une méthode de forage tubé qui facilite l'équipement des tirants (à l'abri du tubage) en évitant les éboulements. Ces tirants étaient constitués de 4 à 7 torons type T15. Ils étaient livrés sur des racks et disposés ensuite dans un dérouleur pour être mis en place dans le forage (figure 19).

Après débutage du forage, une injection de coulis de ciment était réalisée pour sceller le tirant au terrain. La mise en tension était exécutée au moins 7 jours plus tard.

La cadence de réalisation des tirants était de 4 à 5 unités par jour.

TRAVAUX DE PIEUX

Sur les autres zones, les structures sont fondées sur 350 pieux de type Starsol, dont les diamètres varient de 700 mm à 1200 mm.

Ces pieux sont relativement courts (10 à 17 m), car ils sont ancrés dans



20

© CEDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY

les sables de Beauchamp et doivent avoir une garde suffisante vis-à-vis des Marnes et Caillasses altérées sous-jacentes.

Dès que le premier niveau de tirants a été terminé sur une zone, le terrassement à l'intérieur de l'enceinte en paroi moulée a pu être poursuivi ; une plateforme intermédiaire a été constituée un mètre au-dessus du niveau de la nappe phréatique afin de pouvoir réaliser les pieux (figure 20).

Ces travaux ont été réalisés par Soletanche Bachy Pieux entre octobre 2014 et janvier 2015.

Ces pieux sont armés sur toute leur hauteur. Le procédé consiste à réaliser le forage à la tarière, puis à remonter cette tarière en bétonnant sous pression (figure 21). La cage d'armature est ensuite descendue dans le béton frais à l'aide d'une tête vibrante (figure 22). Ces pieux ont été réalisés en 2 phases principales en fonction des dates de libération des plates-formes, à une cadence moyenne de 5 pieux par jour tous diamètres confondus.

ENCEINTES EN PAROI AU COULIS ARMÉE

Au niveau des 2 cages d'ascenseur, le fond de fouille est approfondi ponctuellement de 3 à 5 m.

Pour permettre le terrassement, deux enceintes en paroi au coulis armées ont été exécutées.

Ces travaux ont consisté à réaliser une excavation à l'aide d'une benne hydraulique type KS.

Le terrain est substitué au fur et à mesure du forage par du coulis de bentonite ciment.

L'excavation est ensuite équipée de profilés métalliques qui permettront de reprendre les efforts de poussée lors du terrassement à l'intérieur de l'enceinte. Ces travaux ont été réalisés en même



21 © CEDRIC HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY



22 © CEDRIC HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY

21- Foreuse de pieux Starsol.
22- Mise en place d'une cage d'armature dans un pieu Starsol.

21- Starsol pile rig.
22- Placing a reinforcement cage in a Starsol pile.

temps que les travaux de pieux et de forage des puits de pompage, sur une durée de 3 semaines à partir de fin octobre 2015. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

INJECTIONS DE COMPLEMENT : 30 km de forage, 5 500 m³ de mortier
PAROIS MOULÉES : 16 00 m² excavés, 910 t d'acier, 10 000 m³ de béton
BARRETTES : 10 700 m² excavés, 525 t d'acier, 9 000 m³ de béton
TIRANTS : 350 unités de 55 t à 125 t
PIEUX : 350 pieux Starsol de Ø 700 mm à Ø 1 200 mm
PAROI AU COULIS ARMÉE : 1 150 m² excavés, 200 t de ciment
PUITS DE POMPAGE : 39 puits de pompage Ø 350 mm

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Arélia
MAÎTRE D'ŒUVRE : Renzo Piano Building Workshop / Setec Tpi
CONSTRUCTEUR : Bouygues Bâtiment Île-de-France
TRAVAUX DE FONDATIONS : Soletanche Bachy France

ABSTRACT

FOUNDATIONS OF THE NEW TRIBUNAL DE GRANDE INSTANCE (HIGH COURT) OF PARIS

AUDREY ZONCO, SETEC TPI - ALEXANDRE BEAUSSIER, TERRASOL - EMMANUEL LAPIE, SOLETANCHE BACHY - DOMINIQUE MICHEL, BOUYGUES TP

The TGI (High Court) project, located in the Batignolles district in Paris, comprises a high-rise building and a base slab above three basement levels. The project is carried out within the framework of a PPP by Arélia, with project management provided by Renzo Piano / Setec Tpi. The foundation works are carried out by Soletanche Bachy under subcontract to Bouygues. After gypsum dissolution treatment by mortar injection, a perimeter diaphragm wall supported by two levels of anchor ties allowed execution of the basements. Deep supporting wall units passing through various type of marls and drilled by hydrofraise were used to form the tower's foundations. As regards the remainder of the base slab, it rests on short Starsol piles. □

CIMENTACIONES DEL NUEVO TRIBUNAL DE PRIMERA INSTANCIA DE PARÍS

AUDREY ZONCO, SETEC TPI - ALEXANDRE BEAUSSIER, TERRASOL - EMMANUEL LAPIE, SOLETANCHE BACHY - DOMINIQUE MICHEL, BOUYGUES TP

La obra del TPI, situado en el barrio de Batignolles en París, incluye una torre de gran altura y una base con 3 niveles de sótanos. La obra ha sido realizada por Arélia, en el marco de una Colaboración Público-Privada, con dirección de obra a cargo de Renzo Piano / Setec Tpi. Soletanche Bachy realizó las obras de cimentación, subcontratada por Bouygues. Después de un tratamiento de las disoluciones de yeso por inyección de mortero, un muro pantalla perimetral sostenido por dos niveles de tirantes de anclaje permitió la realización de los sótanos. Unas barras profundas que atraviesan las margas y los guijarrales, perforados con la técnica de hidrofresa, sirvieron para cimentar la torre. El resto de la base se apoya en pilotes tipo Starsol cortos. □

**Ensemble,
allons plus loin !**



Solide et fiable, le Groupe SMA est le premier assureur des acteurs du BTP ; ses experts vous accompagnent à chaque instant grâce à des solutions adaptées à vos enjeux.

L'écoute, la proximité et la réactivité sont les atouts qui nous permettent de répondre exactement à vos besoins.

Chaque jour, nous développons des solutions innovantes pour, ensemble, aller plus loin.



SMA BTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

www.groupe-sma.fr

SMA

SMA VIE

SMA ASSURANCES

SMA COURTAGE

SMA VIE COURTAGE



1

© BALLOÏDE PHOTO BAYONNE

BAYONNE - INTER IKEA UN CHANTIER DE PIEUX EXCEPTIONNEL

AUTEURS : JULIEN PELSY, INGÉNIEUR TRAVAUX, FRANKI FONDATION - PIERRE LAGARDE, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY PIEUX

CE CHANTIER DE PIEUX DE TRÈS GRANDE PROFONDEUR, RÉALISÉ POUR LE GROUPE IKEA, CONSTITUE INDUBITABLEMENT LE PLUS GRAND CHANTIER DE PIEUX EN FRANCE. DES MOYENS EXCEPTIONNELS ONT ÉTÉ MIS EN ŒUVRE POUR RÉALISER LES 442 PIEUX DONT LES PLUS LONGS ATTEIGNENT 75 M !

LE PLUS GRAND CHANTIER DE PIEUX DE FRANCE

Pour son nouveau centre de Bayonne, le groupe Ikea Centres a choisi un emplacement à la confluence des autoroutes de Bordeaux, Toulouse et Donostia/San Sebastian (Espagne). Ce centre est composé du magasin Ikea et d'un forum commercial de 58 000 m² de boutiques, sur 3 niveaux. Si les dimensions du centre ne sont pas exceptionnelles, sa construction sur un terrain marécageux, submergé par l'Adour lors de ses crues, engendre d'importants travaux qui concernent aussi bien le confortement des sols que les fondations. Pour assurer le soutien de la structure en béton armé du bâtiment, les 30 à 50 m d'épaisseur d'allu-

vions vasardes nécessitent la réalisation des 442 pieux de fondation descendus jusqu'à la profondeur de 75 m.

Hors bâtiment, des préchargements permettent la consolidation des terrains de surface pour limiter les tassements à long terme.

La construction du centre est scindée en deux parties qui font l'objet de deux marchés distincts. Pour celui du forum commercial, le groupe Ikea Centres a délégué la maîtrise d'œuvre de ses travaux à un groupement composé d'Oger international, Fugro géotechnique, Cetab et Egis. Le suivi des travaux de confortement des sols et des fondations échoit à Fugro géotechnique, avec le soutien du Bureau Veritas, qui intervient en tant que contrôle technique. La pré-

1- Remblais de préchargement.

1- Soil preloading backfills.

sence d'un ingénieur à temps plein sur chantier permet un suivi assidu et minutieux, ainsi qu'un dialogue de confiance avec les entreprises, ce qui assure des dénouements concertés et efficaces si des imprévus surgissent. La réalisation des travaux de préchargement et de pieux du forum a, quant à elle, été confiée au groupement Franki

Fondation/Soletanche Bachy Pieux/Colas sud-ouest.

Au sein de ce groupement, Colas sud-ouest a réalisé la consolidation des terrains hors bâtiment. Franki Fondation et Soletanche Bachy Pieux assurent, pour leur part, la réalisation des 442 pieux de fondation de l'ouvrage, exécutés de juin 2014 à août 2015.

PRÉCHARGEMENTS

Il est indispensable de limiter les risques de sinistres ultérieurs sur les réseaux enterrés, qui pourraient pâtir de tassements différentiels entre le bâtiment fondé sur pieux et les voiries extérieures posées sur sols compressibles : de ce fait, les terrains hors bâtiment sont consolidés. ▷



2



4



3

2- Atelier de pose des drains verticaux.

3- Foreuses BG30 et Mait HR420/800.

4- Grues mobiles grande flèche.

2- Vertical drain laying equipment.

3- BG30 and Mait HR420/800 drillers.

4- Long-boom mobile cranes.

À cette fin, 27 000 drains verticaux ont été mis en œuvre, jusqu'à une profondeur de 50 m, puis 150 000 t de remblais de préchargement, instrumentés, sur une durée de 6 à 8 mois selon les zones (figures 1 et 2).

Ces préchargements ont provoqué des tassements de l'ordre du mètre et ainsi forcé la consolidation des terrains superficiels.

Une instrumentation très complète (tassomètres magnétiques, boules tassométriques, profilomètres, inclinomètres, piges et plots topographiques, tapis sensitifs, complétés par des essais de pénétromètres CPI, CPTu et de dissipation), a permis le suivi de cette consolidation.

L'estimation des évolutions sur les prochaines années garantit un tassement à 10 ans inférieur à 0,10 m.

DES PIEUX DE DIMENSIONS EXCEPTIONNELLES

La géologie du site présente des alluvions de piètre qualité, sur un substratum essentiellement marneux qui sert d'horizon d'ancrage des pieux ; la coupe hydro-géologique est la suivante :

→ Quelques remblais en surface : matériaux d'apport extérieur avec blocs, débris végétaux, ...

→ Des alluvions argilo-sableuses vasardes, parfois grésifiées, sur une épaisseur importante de 20 m à 50 m ; les passées sableuses sont le siège de circulations d'eau ;

→ Un substratum pouvant présenter différents faciès : marnes argileuses et sableuses, calcaires, argiles bariolées à inclusion de gypse ;

→ La présence, au sein du substratum

marneux, d'un filon d'ophite, roche d'origine magmatique (voir par ailleurs) ;

→ Le niveau de la nappe est très proche de la surface, puisqu'il se situe à 1 m sous la cote de la plateforme de travail.

Cette géologie explique les mensurations exceptionnelles des pieux à réaliser :

→ Des profondeurs de 45 m à 75 m, avec une moyenne de 61 m ;

→ Des diamètres de 0,90 m à 1,30 m ;

→ Des cages d'armatures de 50 m à 70 m, renforcées pour prendre en compte la sismicité locale ;

→ Un volume de pieux de 30 m³ à 91 m³ théorique, avec une moyenne de 50 m³ (hors survolumes).

Le cumul des quantités montre l'importance du chantier de pieux :

→ 2 plots d'essais de chargement statique poussés à la rupture (700 t) ;

→ 442 pieux définitifs ;

→ Longueur de forage cumulée : 27 000 m ;

→ Volume total des pieux : 27 000 m³ ;

→ Poids cumulé des armatures : 1 900 t.

Même sans aucun niveau de sous-sol, le projet fait penser à un iceberg puisque la partie immergée des pieux (61 m de profondeur moyenne) est plus importante que le bâtiment émergeant (20 m environ).

La technique des pieux forés boue s'est imposée au vu des profondeurs. Les moyens ont été dimensionnés à la mesure de l'envergure du projet :

→ 2 foreuses équipées d'un kelly de grande longueur (80 m) : une foreuse Bauer BG30 (Franki Fon-



5

5- Centrale de traitement des boues de forage.
6- Assemblage d'une cage d'armature dans les pieux « garage ».
7- Essai de chargement d'un pieu d'essai.

5- Drilling sludge treatment plant.
6- Assembling a reinforcement cage in the "depot" piles.
7- Test pile loading test.



6



© DR 7

- ation), une foreuse Mait HR420/800 (Soletanche Bachy Pieux) - (figure 3) ;
- 2 grues de manutention mobiles de grande hauteur : capacité 180 t, hauteur de flèche 80 m (figure 4) ;
- 1 grue de manutention pour le vibro-fonçage du tubage de tête ;
- Une centrale à boue équipée d'un dessableur 300 m³/h, d'un desilteur et de 500 m³ de stockage (figure 5) ;
- 5 pieux « garage » provisoires de 50 m à 70 m de profondeur, tubés, pour permettre l'assemblage préalable des cages d'armatures et le stockage des colonnes mono-éléments (voir la description des singularités techniques ci-après) - (figure 6) ;

- Jusqu'à 54 personnes mobilisées au plus fort des travaux, ainsi que 3 personnes en bureau d'études. Ces moyens permettent une cadence moyenne d'exécution de 2 à 3 pieux par jour, nécessaire au respect d'un calendrier de travaux ambitieux, dans un contexte de forte co-activité avec le lot gros-œuvre.

CONTEXTE DE RÉALISATION COMPLIQUÉ

Comme c'est le cas pour tout projet qui a mis plusieurs années à se concrétiser, le calendrier d'exécution devient un enjeu crucial. Les titulaires des différents lots interviennent au fur et à mesure de la libération des zones de travaux, sans zone tampon, ce qui exige une coordination intelligente entre entreprises.

Les co-activités doivent être gérées selon les 4 dimensions, notamment à cause de l'interférence entre les grues à tour pour le bâtiment et les grues mobiles de grande hauteur pour les fondations.

Ces co-activités étant complexes, les difficultés imprévues doivent être promptement résolues sous peine de perturber l'équilibre de l'ensemble du calendrier. Ainsi, les moyens de réalisation des pieux ont-ils dû être substantiellement renforcés pour pallier les difficultés imprévues d'origine naturelle telles que :

- Des épisodes pluvieux exceptionnels en fin d'année 2014, rendant fastidieux les travaux et l'entretien de l'immense plateforme de travail ;
- La rencontre d'un massif d'ophite à une quarantaine de mètres de

profondeur, extrêmement préjudiciable au forage d'environ 70 pieux, puisque la résistance de cette roche magmatique peut dépasser les 300 MPa (résistance à la compression simple sur échantillons). Une campagne de sondages supplémentaires, ainsi qu'une adaptation des méthodes, ont permis de dimensionner les pieux impactés au cas par cas, en fonction du terrain rencontré.

Enfin, à ces difficultés techniques inhérentes au chantier, se sont ajoutées les sujétions d'ordre environnemental qui sont le propre des projets d'une telle ampleur. Ainsi, a-t-il fallu restreindre les horaires de travail et adapter la filière d'évacuation des déblais aux exigences d'associations allant au-delà des contraintes imposées par la législation. ▽



8

© BALLOÏDE PHOTO BAYONNE

MÉTHODE DE RÉALISATION DES PIEUX

Les pieux du chantier Inter Ikea sont exécutés selon la méthode des pieux forés boue. La séquence de réalisation d'un pieu est la suivante :

- 1- Implantation du pieu et vibro-fonçage d'un tube de longueur 12 m. Ce tube remplit quatre fonctions : le guidage du forage, la tenue des terrains alluvionnaires en tête, le maintien du niveau de boue à 1 m au-dessus de la nappe (qui se situe 1 m sous le niveau de plateforme), la limitation des surconsommations de béton (dans la partie supérieure des alluvions compressibles) ;
- 2- Perforation sous boue, jusqu'à atteindre la hauteur d'ancrage nécessaire ;
- 3- Curage du fond de forage, puis dessablage de la boue ;
- 4- Équipement de l'armature ;
- 5- Bétonnage, avec complément durant le détubage ;
- 6- Pré-recépage.

Au vu de la nature des sols et en rapport avec l'activité du futur magasin, la qualité d'exécution des pieux constitue un enjeu très fort. Maître d'œuvre et contrôleur technique ont donc requis la mise en place d'un contrôle qualité particulièrement exigeant.

Tout d'abord, les hypothèses de dimensionnement sont validées par deux essais de chargement sur deux pieux dissociés de la structure. Chacun de ces plots d'essai est constitué d'un carré de quatre pieux de réaction, au centre duquel se situe un pieu instrumenté (extensomètres) sur lequel est

8- Opérations de dessablage et de bétonnage.

9- Manutention d'une cage assemblée.

10- Vue du sol des ateliers de pieux.

8- Degritting and concreting operations.

9- Handling an assembled cage.

10- Ground view of pile equipment.

appliquée la charge, jusqu'à 700 t (figure 7).

Pour chaque pieu, plusieurs étapes de sa réalisation sont systématiquement soumises à constat contradictoire avec l'ingénieur de la maîtrise d'œuvre :

- Validation de la nature du substratum d'ancrage et mesure de la profondeur du toit du substratum ;
- Relevé de la cote de fond de forage ;
- Contrôle de la qualité de la boue avant bétonnage (après dessablage), et notamment de la teneur en sable (< 1 %) ;
- Limitation à 3 heures du délai entre la fin du dessablage et le début du bétonnage ;

→ Contrôle de résistance du béton sur éprouvettes, pour chaque pieu ;

→ Contrôle de l'intégrité d'un pieu sur huit, par la méthode d'auscultation par transparence.

Ces exigences ont justifié la présence d'un ingénieur travaux dédié au suivi des études et de la qualité.

SINGULARITÉS TECHNIQUES

Le nombre et les dimensions, exceptionnels, des pieux, les cadences imposées, ainsi que l'exigence de qualité d'exécution ont stimulé la réflexion et suscité des innovations techniques. Ainsi la méthode d'exécution des pieux forés boue a été améliorée par une



9



10



11

© BALLOÏDE PHOTO BAYONNE

adaptation aux grandes profondeurs des pieux, notamment par la simplification des manutentions des colonnes et armatures en un seul élément :

→ Colonnes de dessablage de diamètre 0,20 m et de longueur 75 m ;

→ Colonnes de bétonnage de diamètre 0,13 m et de longueur 75 m (figure 8) ;

→ Pré-assemblage des éléments d'armatures en une seule cage de 50 m à 70 m de longueur (figure 9). Ces éléments de grande longueur sont stockés dans 5 pieux « garage » de 50 m à 70 m de profondeur, tubés sur la hauteur des alluvions, puis mis en œuvre dans les pieux à l'aide de l'une des grues de 80 m.

Ainsi, les opérations de dessablage et de bétonnage, employant habituellement une colonne à câbles assemblée sur le pieu, ne nécessitent plus de temps d'assemblage et de désassemblage. De même, la cage d'armature est équipée en un seul élément dans

11- Vue aérienne des ateliers de pieux.

11- Aerial view of pile equipment.

le pieu, sans perte de temps liée au raboutage.

Le dessablage est assuré par méthode « air-lift », qui consiste à émulsionner la boue pour créer un mouvement ascendant dans la colonne, par différence de densité. Les débits obtenus sont supérieurs à 100 m³/h, permettant le dessablage des pieux les plus importants en 1,5 h environ.

L'équipement de l'armature peut être ensuite réalisé, en un temps record de 15 minutes.

Enfin, le bétonnage est réalisé à l'aide d'une colonne en un seul élément, à l'aide d'une pompe à béton, sur le

mode de fonctionnement d'une tarière creuse.

Si les débits de bétonnage sont équivalents à ceux d'un bétonnage classique gravitaire, cette méthode permet un enchaînement rapide entre les pieux, permettant jusqu'à 4 bétonnages en 12 heures.

Les méthodes et moyens mis en œuvre ont permis de respecter les cadences du calendrier général, ainsi que les exigences de qualité demandées par la maîtrise d'œuvre et le bureau de contrôle (figures 10 et 11). □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PIEUX DÉFINITIFS :
442

LONGUEUR DE FORAGE :
27 000 m

VOLUME TOTAL DES PIEUX :
27 000 m³

POIDS DES ARMATURES :
1 900 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ikea Centres Bayonne SAS

MAÎTRE D'ŒUVRE MANDATAIRE : Oger International

MAÎTRE D'ŒUVRE EN CHARGE DES TRAVAUX DE FONDATIONS SPÉCIALES : Fugro Géotechnique SAS

GROUPEMENT D'ENTREPRISES TITULAIRE DU LOT « FONDATIONS SPÉCIALES » : Franki Fondation / Soletanche Bachy Pieux / Colas sud-ouest

ABSTRACT

BAYONNE - INTER IKEA. AN EXCEPTIONAL PILES PROJECT

JULIEN PELS, FRANKI FONDATION - PIERRE LAGARDE, SOLETANCHE BACHY PIEUX

This article describes the soil preloading and deep foundation works performed in Bayonne for the Inter Ikea project, by a consortium formed by Franki Fondation, and Soletanche Bachy Pieux and Colas sud-ouest. The site's geology required the choice of piles at a great depth, 45 to 75 metres. The slurry boring method was the obvious choice. The large drilling depths gave rise to technical singularities: single-element concreting columns, use of the air-lift, and creation of "depot" piles. □

BAYONA - INTER IKEA. UNA EXCEPCIONAL OBRA CON PILOTES

JULIEN PELS, FRANKI FONDATION - PIERRE LAGARDE, SOLETANCHE BACHY PIEUX

En el presente artículo se describen las obras de precarga y cimentaciones profundas realizadas en Bayona en el marco del proyecto Inter Ikea, por la agrupación Franki Fondation / Soletanche Bachy Pieux / Colas Sud Ouest. La geología del emplazamiento impuso la elección de pilotes muy profundos: de 45 a 75 m. El método adoptado fue el de perforación en el lodo. Las grandes profundidades de perforación provocaron singularidades técnicas: columnas de hormigonado en un único elemento, utilización del sistema airlift y creación de pilotes "garaje". □

TECHNIQUE ANCESTRALE POUR PATRIMOINE HISTORIQUE

AUTEUR : PHILIPPE SAVOUROUX, RESPONSABLE DE SECTEUR, SOTRAISOL FONDATIONS

À PARIS, DANS LE XIV^e ARRONDISSEMENT, UN PATRIMOINE HISTORIQUE DATANT DU XIV^e SIÈCLE SE TROUVE SOUS NOS PIEDS, À 20 MÈTRES DE LA SURFACE. CETTE ANCIENNE CARRIÈRE DE CALCAIRE EST INSCRITE À L'INVENTAIRE SUPPLÉMENTAIRE DES MONUMENTS HISTORIQUES DEPUIS JANVIER 1994. EN SURFACE, UN PROJET IMMOBILIER NÉCESSITE LE CONFORTEMENT DE CES CARRIÈRES EN RESPECTANT LES PRÉCONISATIONS DE L'INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES. SOTRAISOL FONDATIONS A CONSOLIDÉ CE PATRIMOINE HISTORIQUE DANS LE RESPECT DES NORMES.



© SOTRAISOL FONDATIONS

UN MONUMENT HISTORIQUE À PRÉSERVER

Au 26/30 rue de la Tombe Issoire, la SNC de la Tombe Issoire (Soferim) propriétaire du terrain, projette la construction de plusieurs bâtiments. D'après L'Atlas des Carrières de la ville de Paris, le terrain est miné par d'anciennes carrières de Calcaire Grossier, exploitées sur un niveau en totalité et sur deux niveaux localement (2 poches distinctes) ; ces exploitations font partie des carrières de Port-Mahon qui intègrent aussi l'ossuaire des Catacombes. Ce site, ancienne carrière d'extraction

souterraine de pierre à bâtir, serait l'unique site restant à Paris montrant le panorama complet de l'exploitation de la pierre au Moyen-âge (figure 1). Pour la mise en sécurité des futures constructions, l'Inspection Générale des Carrières, au travers du permis de construire, prescrit le confortement des carrières par comblement total par injection, ou par confortement ponctuel par piliers maçonnés. Compte tenu du caractère patrimonial des carrières, c'est cette dernière technique qui a été retenue. Afin de satisfaire aux impératifs de sauvegarde d'un patrimoine

1- Vue d'une partie de la carrière supérieure.

1- View of upper part of the quarry.

classé, la Soferim s'est fait assister par un représentant des Monuments Historiques, par un représentant de l'Inrap (Institut National de Recherches Archéologiques Préventives) et a choisi

l'Ineris (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) pour assurer la maîtrise d'œuvre. Un inventaire des zones à caractère historique a été établi avec rédaction d'un cahier des charges pour leur protection (figure 2).

IMPÉRATIFS ARCHÉOLOGIQUES ET SOLUTIONS TECHNIQUES

Sur ce chantier, les difficultés majeures ont été de concilier les impératifs de construction en respect des obligations réglementaires et la conservation d'un

patrimoine classé monument historique. Les différentes campagnes de reconnaissance ont permis de dresser un bilan de l'état de conservation de la carrière classée :

- Niveau supérieur de la carrière de Port-Mahon en bon état, mais certains piliers de confortement présentaient des anomalies majeures ;
- Niveau inférieur, côté Villa Saint-Jacques, en très mauvais état et très dangereux ;
- Trois zones de fontis (effondrement des carrières) répertoriées ;
- Confirmation de la présence d'une poche (côté RER) dans le niveau inférieur, partiellement comblée, et inaccessible.

Les solutions retenues pour satisfaire tous les impératifs de construction et de conservation du patrimoine ont été les suivants :

RECRÉER DE NOUVEAUX ACCÈS DEPUIS LA PARCELLE

Avant les travaux, l'accès aux carrières se faisait depuis le circuit de visite des Catacombes. Dans une première étape, il a été décidé de créer de nouveaux accès en débarrassant deux puits existant sur le site, un puits à eau et un puits d'extraction (figure 3). Compte tenu du caractère archéologique de l'opération, le débarrasement des puits s'est fait sous le contrôle du représentant de l'Inrap. Les déblais sortis des puits étant scrupuleusement stockés, répertoriés et analysés. Une fois l'accès en carrière facilité, les galeries ont été instrumentées avec un système de cannes de convergence reliées à une alarme, pour contrôler leur stabilité pendant les travaux.

SÉCURISER LES ZONES RECONNUES COMME DES FONTIS (EFFONDREMENT)

Les trois zones de fontis repérées ont été confortées par injection, en appliquant scrupuleusement les prescriptions émises par l'Inspection Générale des Carrières. Cette opération n'a pas eu d'impact sur le caractère patrimonial de la carrière, mais a nécessité une surveillance accrue de l'étanchéité des murs ceinturant les fontis.

CONFORTER LA POCHE INFÉRIEURE, DITE « POCHE RER »

Cette poche, inaccessible, a fait l'objet d'une inspection par caméra ; elle apparaissait en mauvais état, partiellement remblayée avec présence de hagues (murs en pierres sèches) et de piliers maçonnés.



© SOTRAISOL FONDATIONS

2- Contrôle du représentant de l'Inrap.

3- Puits d'accès au niveau supérieur à 20 mètres de la surface.

2- Inspection by the Inrap representative.

3- Access shaft to the higher level 20 m from the surface.

Compte tenu de son inaccessibilité mais avec un potentiel patrimonial révélé, il a été décidé de combler cette poche avec un mortier de comblement « réversible ».

Pour permettre une extraction du mortier de comblement au cours d'une future campagne d'investigation archéologique, le mortier de comblement, fabriqué sur le site, a été faiblement dosé en ciment. Cette adaptation, non conforme aux prescriptions habituelles, a reçu l'accord de l'Inspection Générale des Carrières.



© SOTRAISOL FONDATIONS

CONFORTER LE NIVEAU INFÉRIEUR, CÔTÉ « VILLA SAINT JACQUES »

C'est la zone du chantier qui a été la plus problématique à traiter. Située aux abords d'un fontis, les éléments de confortement existants étaient fortement dégradés (piliers fissurés, ciel de carrière très fracturé, cales à bras écrasées, etc.). L'accès à ce niveau inférieur se faisait sous une parcelle voisine, par l'intermédiaire d'un trou d'homme creusé dans le sol du premier niveau et débouchant dans le niveau inférieur. Une galerie d'accès creusée dans la masse permettait d'accéder à la poche, côté « Villa Saint Jacques ». L'état de conservation de ces galeries ne permettant pas un travail en toute sécurité, plusieurs solutions de confortement ont été envisagées (figure 4) :

- Traiter la poche, côté « Villa Saint Jacques » comme la poche côté « RER », par une mise en œuvre de mortier de comblement réversible ;
- Conforter les galeries par des maçonneries supplémentaires, réalisées après la mise en place de soutènement provisoire.

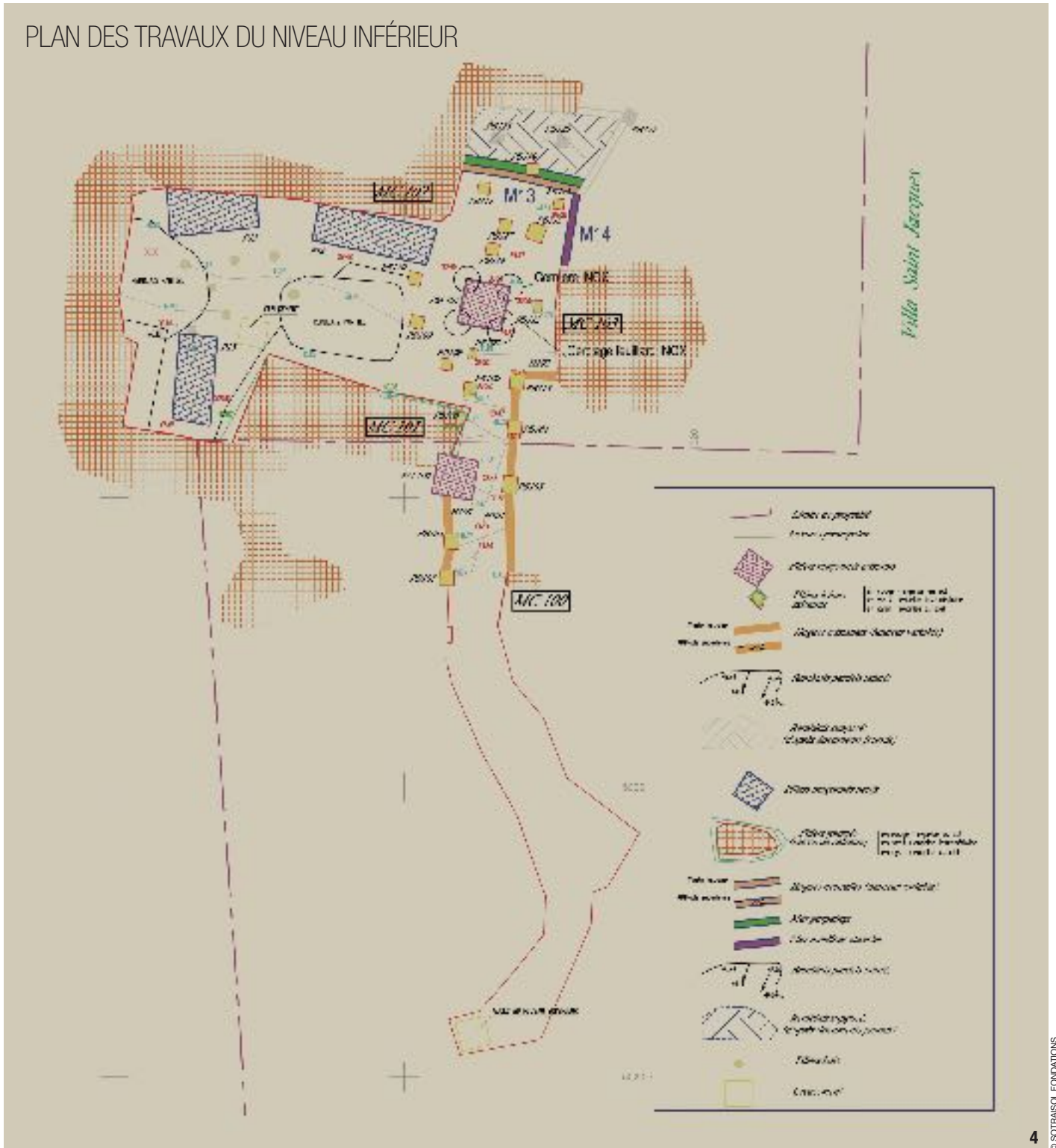
Compte tenu de la dangerosité du site, la première solution a reçu l'aval de tous les intervenants techniques (IGC, Bureau de Sol, Bureau de Contrôle, SPS...), mais la valeur historique du site et la possibilité d'accès ont fait choisir la deuxième solution.

Il a donc fallu aménager le trou d'homme pour permettre un accès aisé et poser un soutènement provisoire, composés de rondins et de bastaings, afin de soutenir le ciel de la galerie d'accès. Au niveau de la poche, le ciel de la galerie a été étayé avec des rondins, les piliers maçonnés existants et fissurés ont été frettés par des cerclages et des cornières en inox (figures 5 et 6). Pour permettre la réalisation de piliers de confortement supplémentaires, il a fallu dégager des remblais en terre existants. Le dégagement des zones remblayées a permis de mettre à jour un ancien atelier d'extraction, non répertorié, datant des origines de l'exploitation, confirmant ainsi l'intérêt patrimonial du site (figures 7 et 8).

CONFORTER LE NIVEAU SUPÉRIEUR ET RENDRE LA PARCELLE CONSTRUCTIBLE

Hormis les trois zones de fontis, le niveau supérieur sous-minait la parcelle en totalité. C'est ce niveau de carrières exploitées qui a généré le classement du site à l'inventaire supplémentaire des Monuments Historiques.

PLAN DES TRAVAUX DU NIVEAU INFÉRIEUR



4

© SOTRAISOL-FONDACTIONS

En effet, on y retrouve les différents types d'extraction de la pierre (figure 9) :

- Par piliers tournés (les carriers tournaient autour de la roche pour laisser des zones non creusées servant de soutien) ;
- Par hagues et bourrage (toute la roche était extraite, des murs en pierres sèches « hagues » étaient érigés de part et d'autre des galeries de circulations et les remblais

étaient mis en place jusqu'au ciel des galeries, derrière les murs « bourrages ») ;

- Afin de soutenir localement le ciel de l'exploitation, les carriers emplaçaient des pierres sèches « cales à bras » jusqu'au ciel des galeries.

Sur le site, plusieurs traces datant de l'origine de l'extraction, étaient encore visibles (traces des chariots de transport, frottements sur les angles

4- Plan des travaux du niveau inférieur.

4- Work plan for the lower level.

des piliers, cales à bras...), ainsi que d'autres vestiges datant de confortations anciennes (piliers maçonnés construits au XVIII^e siècle). L'objectif du chantier a été d'intégrer les nouvelles confortations nécessaires au projet, dans un site chargé d'histoire.

La position et la taille des piliers ont été définies pour tenir compte des contraintes mécaniques et patrimoniales. Bien que le projet n'apporte



5



6



7

aucune surcharge sur le toit de la carrière, les critères de sécurité actuels n'étaient pas obtenus sans confortements. Il a fallu aussi intégrer les piliers maçonnés neufs dans une harmonie architecturale.

De plus, certains piliers existant présentaient des déformations et des fissurations prononcées.

Un premier diagnostic a répertorié 5 piliers sur les 15 reconnus, comme présentant des désordres majeurs.

Une seconde auscultation par caméra

endoscopique des piliers a permis de cibler deux types de piliers présentant des désordres :

→ Des piliers présentant une structure interne homogène (moellons + liant) ;

→ Des piliers présentant une structure interne désagrégée (moellons, terre, vides résiduels).

De plus, un sondage manuel, réalisé dans les remblais de pied de carrière, a permis de vérifier la bonne assise des piliers. Certains piliers reposaient sur le bon sol, d'autres reposaient sur les remblais de carrières (figure 10).

Deux solutions de réparation ont été retenues :

→ Les piliers de structure homogène et reposant sur le bon sol ont été

« soulagés », en construisant un pilier supplémentaire à proximité du pilier « malade », réduisant ainsi la charge à reprendre et diminuant la contrainte dans le pilier ;

→ Les piliers de structure hétérogène, ou reposant sur les remblais de carrières, ont été déposés après mise en place d'un étalement provisoire, et reconstruits à l'identique sur la base de photos et de repérage des pierres.

La reconstruction de piliers ou la construction de nouveaux piliers a nécessité une adaptation des règles constructives appliquées actuellement. Les piliers ont été reconstruits en utilisant la pierre venant des carrières de la région de Saint Maximin (60), un

matériau comparable à la pierre extraite dans la carrière de Port-Mahon.

Pour le hourdage des moellons de calcaire, l'Inspection Générale des Carrières préconisait l'emploi d'un ciment résistant aux eaux séléniteuses, de type PMES. Ce ciment a la particularité de bleuir en vieillissant, faisant apparaître des joints entre les moellons de construction des piliers, incompatibles avec un monument datant du XIV^e siècle. La solution retenue a été de construire les piliers avec du mortier à base de ciment PMES, en réalisant des joints en retrait. Les joints ont ensuite été finis avec un mortier à base de chaux, rendant l'aspect final des piliers plus conforme à l'ensemble des confortements conservés (figure 11). ▷

5- Pilier fretté par des cerclages et des cornières en inox.

6- Ciel de la galerie étayé avec des rondins.

7- Réalisation d'un pilier de confortement.

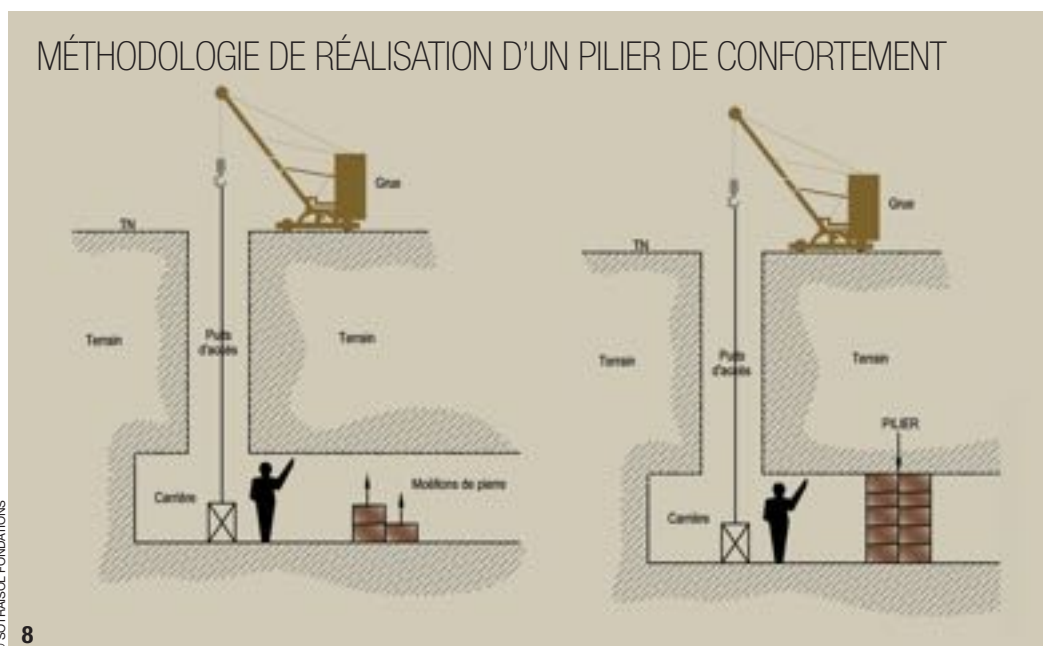
8- Méthodologie de réalisation d'un pilier de confortement.

5- Pillar hooped with stainless steel straps and brackets.

6- Gallery roof propped up by round timbers.

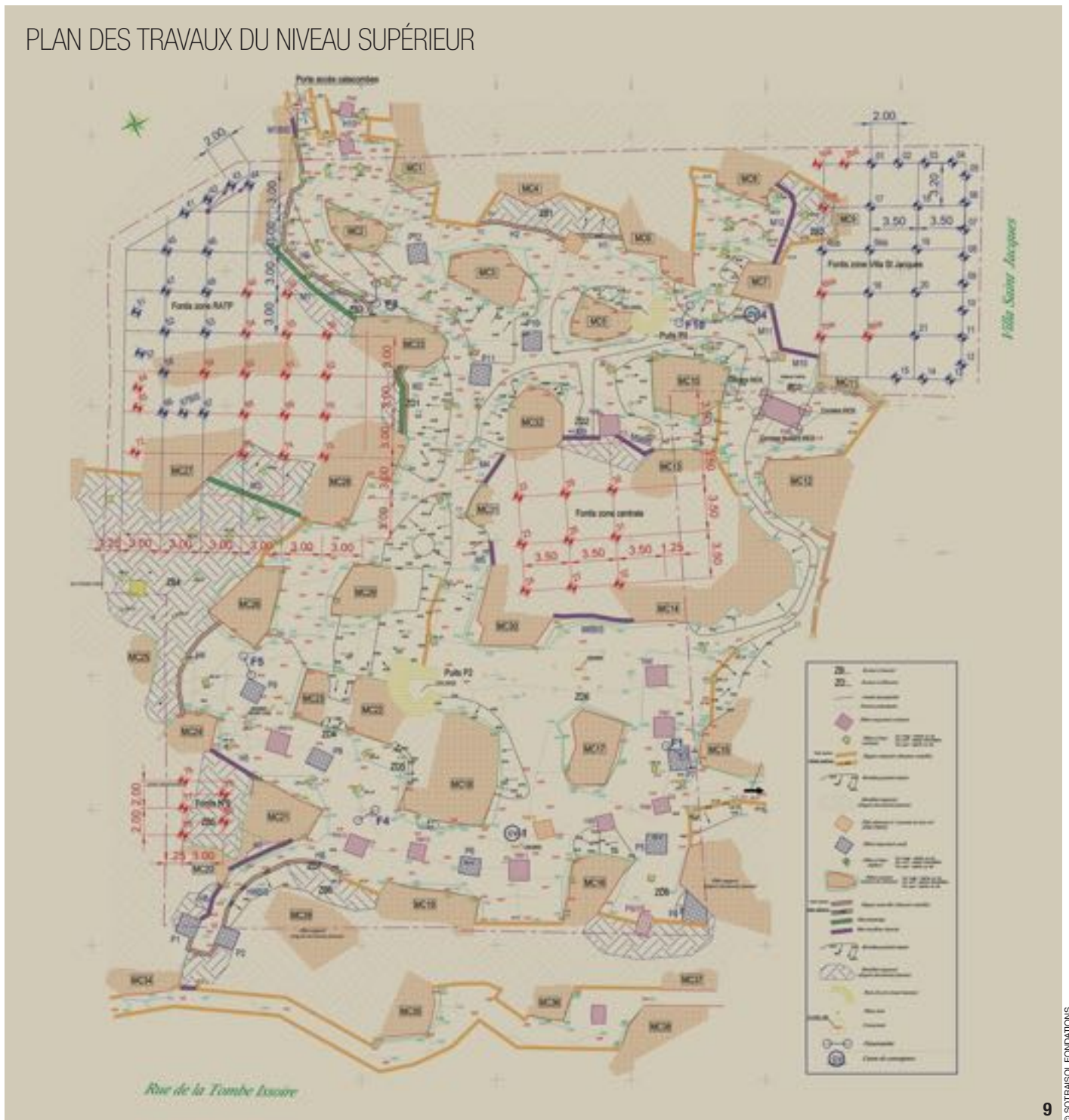
7- Execution of a reinforcement pillar.

8- Methodology for execution of a reinforcement pillar.



8

PLAN DES TRAVAUX DU NIVEAU SUPÉRIEUR



9

© SOTRANSOL FONDATIONS

METTRE EN VALEUR LE CARACTÈRE PATRIMONIAL DU SITE

Tous les travaux précédemment décrits avaient pour but de garantir la stabilité de la carrière, même après une construction en surface. Une autre caractéristique du chantier a été de mettre en valeur l'ensemble de la carrière en dégagant des zones remblayées, en comblant d'autres zones sans intérêt et en créant un cheminement aisé dans la carrière.

Dans ce but de mise en valeur de la carrière inscrite aux Monuments Historiques, la Drac (Direction Régionale des Affaires Culturelles) a localisé plusieurs zones d'intérêt patrimonial qui ont été conservées en l'état, pour servir de réserves archéologiques, ou « débourées » pour rendre au site son caractère historique initial :

→ Conservation et protection d'un remblai situé à l'aplomb d'un puits daté du XIX^e siècle. Cet endroit pouvant contenir des éléments arché-

logiques sert de réserves pour de futures investigations ;

- Dégagement des remblais autour du chemin de roulement des chariots afin de mettre en valeur cette particularité ;
- Dégagement des piliers tournés afin de redonner une perspective de l'ensemble de l'exploitation ;
- Création des espaces de circulation, en vue de futures visites.

Afin de limiter les évacuations de terres vers les décharges publiques, des

9- Plan des travaux du niveau supérieur.

9- Work plan for the upper level.



10



11



12

zones de remblais ont été créées afin de recevoir les excédents de terrassement. Des murs de hagues, réalisés « à l'ancienne » par empilement de pierres sèches, ont été construits en retrait des piliers et les terres excédentaires ont été stockées derrière ces murs (figure 12). Enfin, une zone impactée par le déversement d'un mortier de comblement venant d'une parcelle voisine et donc sans intérêt patrimonial a servi de stockage de terres excédentaires, absorbant ainsi une grande partie des déblais.

LE FUTUR DU SITE

La carrière classée de Port-Mahon est ainsi consolidée dans les règles de l'art. Suite aux travaux menés par Sotraisol Fondations, l'IGC et les Monuments Historiques ont donné leur validation, ce qui permet au projet de ce site de la Tombe Issoire de suivre son cours.

Réhabilitation de la Grange historique par la ville de Paris, et projet immobilier de Soferim (logements, jardin, commerces...) sont donc au programme de ce site dorénavant consolidé. □

10- Vérification de l'assise d'un pilier.

11- Pilier de confortement fini.

12- Création des murs de hague.

10- Verification of the stability of a pillar.

11- Finished reinforcement pillar.

12- Creation of murs de hague.

PRINCIPALES QUANTITÉS

2 puits de 17 m débourrés et équipés pour l'accès en carrière

14 nouveaux piliers maçonnés créés

3 piliers existants confortés

760 m³ de remblais déplacés ou évacués

3 fontis traités : 800 m de forages et 850 m³ de coulis d'injection

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Soferim

ASSISTANTS AU MAÎTRE D'OUVRAGE : Architecte en Chef des Monuments Historiques + Inrap

MAÎTRE D'ŒUVRE : Ineris

BUREAU DE CONTRÔLE : Socotec

GÉOTECHNICIEN : Botte Sondages

SPS : Btp Consultants

CONFORTEMENT DE CARRIÈRES : Sotraisol Fondations

ABSTRACT

ANCESTRAL TECHNIQUE FOR AN HISTORICAL HERITAGE

PHILIPPE SAVOUROUX, SOTRAISOL FONDATIONS

In the 14th arrondissement of Paris, an historical heritage dating from the 14th century is located beneath our feet, 20 metres from the surface. This ancient limestone quarry has been included in the "Supplementary Inventory of Historical Monuments" since January 1994. On the surface, a real estate project requires the consolidation of these quarries in accordance with the recommendations of the quarry inspectorate 'Inspection Générale des Carrières'. Sotraisol Fondations consolidated this historical heritage in accordance with the standards. □

TÉCNICA ANCESTRAL PARA PATRIMONIO HISTÓRICO

PHILIPPE SAVOUROUX, SOTRAISOL FONDATIONS

En París, en el distrito 14, a 20 metros de profundidad, se encuentra un patrimonio histórico del siglo XIV. Esta antigua cantera de caliza está inscrita en el inventario suplementario de Monumentos Históricos desde enero de 1994. En la superficie, un proyecto inmobiliario requiere la consolidación de estas canteras respetando las recomendaciones de la Inspección General de Canteras. Sotraisol Fondations ha consolidado este patrimonio histórico respetando las normas. □

LIGNE 14 - LES FONDATIONS SPÉCIALES DE LA NOUVELLE STATION PONT CARDINET

AUTEURS : FRÉDÉRIC LAMOTTE, DIRECTEUR DE TRAVAUX, SEFI-INTRAFOR -
PIERRE JULLIEN, RESPONSABLE DU MARCHÉ DU LOT 1 DE LA LIGNE 14, SYSTRA

LE PREMIER CHANTIER DU NOUVEAU GRAND PARIS A DÉMARRÉ L'ÉTÉ DERNIER PAR LA STATION PONT CARDINET DANS LE CADRE DU LOT 1 POUR LE PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14. CETTE STATION EST UN POINT STRATÉGIQUE DU PROJET PUISQUE C'EST LE POINT DE DÉPART DU TUNNELIER QUI DEVRAIT ÊTRE LANCÉ À L'AUTOMNE 2015. CE PROJET DONNE À SEFI-INTRAFOR L'OCCASION DE METTRE À EXÉCUTION, SUR L'ENSEMBLE DU TRACÉ DU FUTUR TUNNEL, TOUT UN ENSEMBLE DE TECHNIQUES DE FONDATIONS SPÉCIALES TELLES QUE PAROIS MOULÉES, INJECTIONS, JET GROUTING ET PAROIS BERLINOISES.

PRÉSENTATION DU PROJET DU LOT 1

Le lot n°1 du prolongement de la ligne 14 au nord (figure 3) est le premier lot d'infrastructures du Nouveau Grand Paris.

Il comprend la construction de 3,6 km de tunnel, entre les stations Saint-Lazare et Clichy-Saint-Ouen, ainsi que les deux nouvelles stations Pont-Cardinet et Porte-de-Clichy.

La station Pont-Cardinet (figure 4) assure la desserte du nouveau quartier des Batignolles et la correspondance avec la ligne P du Transilien.

Elle est située sous le parc Martin Luther King dans le XVII^e arrondissement de Paris. Son volume intérieur est de 120 x 20 m.

Les travaux comportent également 2 ouvrages d'accès et 2 ouvrages pour les postes électriques.

Les travaux sont réalisés en parallèle du réaménagement de la ZAC des Batignolles, ce qui constitue un environnement complexe du fait de la multitude des projets concomitants (centre de maintenance SNCF, réalisation d'un pont, de parkings souterrains et de nombreux bâtiments).

PRINCIPE CONSTRUCTIF DE LA STATION PONT CARDINET

Préalablement à la réalisation des soutènements de la station, Sefi-Intrafor a réalisé une campagne d'injections gravitaires de comblement des vides de dissolution de gypse décelés sur l'emprise de la station dans les marnes et caillasses (figure 5).

Ensuite, le soutènement de la station a été réalisé par la méthode des parois moulées relativement étanches d'une épaisseur de 102 cm. Les parois ont une fiche hydraulique dans les marnes et caillasses à 40 m de profondeur pour

limiter les débits d'exhaure lors des terrassements.

La fiche mécanique des parois moulées, nécessaire au soutènement, est constituée de cages d'armatures de 33 m de profondeur (figure 2).

La limitation du débit d'exhaure en fond de fouille est assurée par la réalisation d'un radier injecté en coulis bentonite-ciment de 5 m d'épaisseur dans les marnes et caillasses, encagé entre les parois moulées (figure 6).

Lors des terrassements à l'intérieur de la station jusqu'à 23 m de profondeur, les parois moulées sont stabilisées par



- 1- Vue générale du chantier.
- 2- Ateliers de parois moulées.
- 3- Plan du tracé du lot 1 de la station St-Lazare à la station Clichy Saint-Ouen.

- 1- General view of the site.
- 2- Diaphragm wall equipment.
- 3- Plan view of the alignment of work section 1 from St-Lazare station to Clichy - Saint-Ouen station.



© SEFI-INTRAFOR
2

PLAN DU TRACÉ DU LOT 1
de la station St-Lazare à la station Clichy Saint-Ouen



3
© STIF

deux lits de butons provisoires (figure 7) permettant d'assurer un déplacement maximal du soutènement de 35 mm en tout point et de 15 mm en partie supérieure.

Les terrassements se déroulent sous rabattement de la nappe à l'aide de 4 pompes installées dans des puits, le débit actuel est d'environ 5 m³/h pour une prévision de 100 m³/h.

Le fond de fouille reçoit un radier en béton armé d'une épaisseur de 1 m pour bloquer les arrivées d'eau, reprendre les sous-pressions en phase définitive et stabiliser le soutènement. L'étanchéité des entrées en terre et des arrivées du tunnelier au niveau des tympans des 2 stations est assurée par un sas de tunnelier associé à des rideaux de traitement réalisés en colonnes de jet grouting dans les cal-

caires de Saint-Ouen et les sables de Beauchamp.

Dès que le tunnelier aura entamé sa progression vers la gare Saint-Lazare, le groupement procédera à la réalisation du génie civil de la station tout en conservant des accès pour l'approvisionnement des voussoirs et pour l'extraction des déblais de forage. Progressivement, les parois moulées seront stabilisées par les planchers béton de façon définitive et les butons provisoires seront déposés.

LES TRAVAUX D'INJECTION PRÉALABLES SUR LE TRACÉ DU TUNNEL, EN DEHORS DES STATIONS

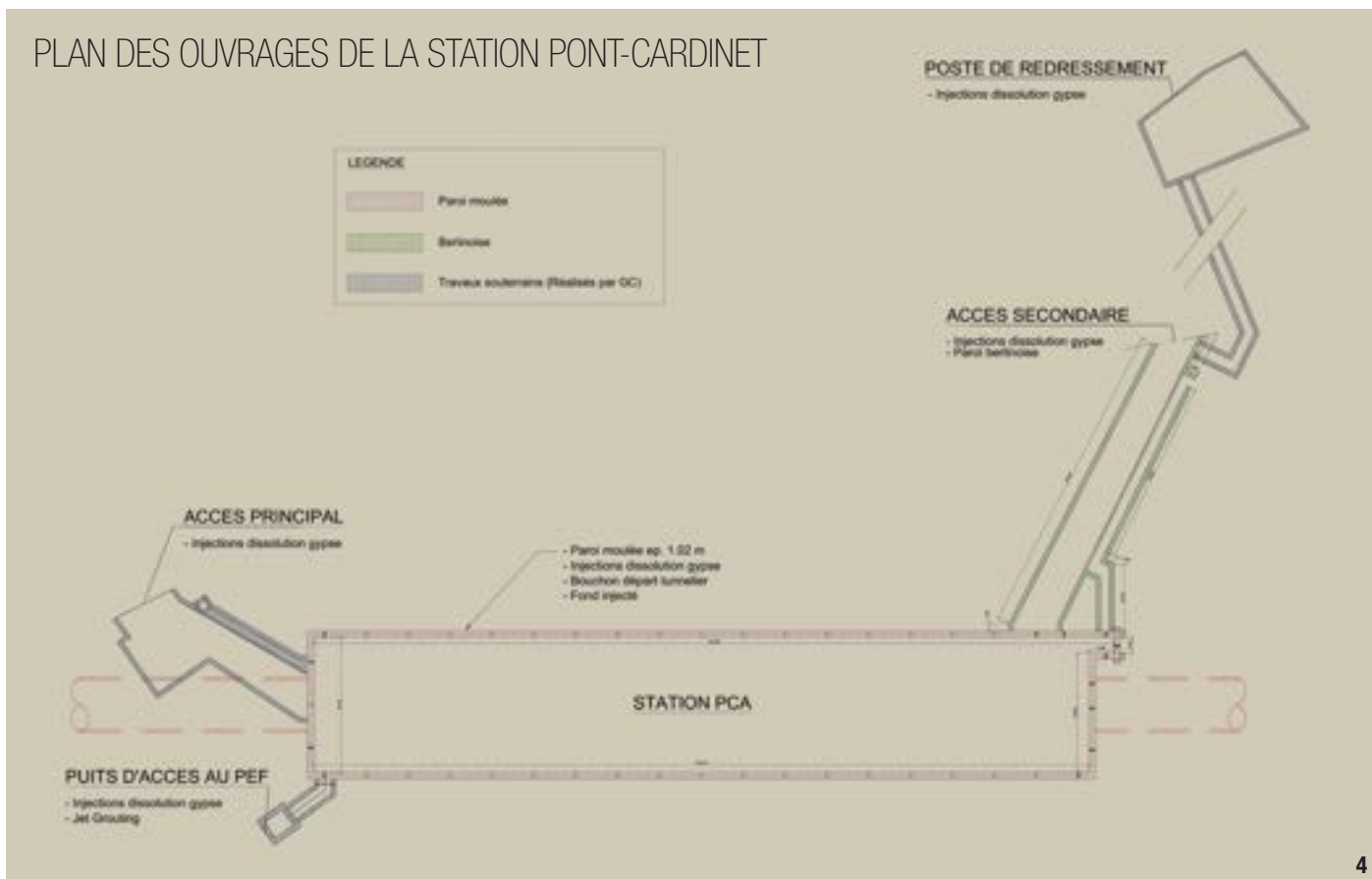
Le lot 1 comprend également des travaux d'injection sur des points dits singuliers sur le tracé du tunnel.

Ces injections ont, selon leur localisation, des objectifs différents :

- 1- Réaliser un traitement d'étanchéité des terrains vis-à-vis de la nappe phréatique pour permettre un creusement traditionnel. C'est le cas des raccordements du nouveau tunnel aux puits de secours et de ventilation rue Klock à Clichy et rue Fillion à Paris XVII^e et du raccordement du tunnel existant au futur tunnel à la station Saint-Lazare (figure 8).
- 2- Réaliser un confortement des terrains sur le tracé du tunnel pour limiter le risque de tassement des ouvrages existants sus-jacents au passage du tunnelier. C'est le cas de deux bâtiments rue de Milan et rue Fragonard à Paris où les sondages géotechniques préliminaires ont décelé la présence de terrains décomprimés (figure 9).



PLAN DES OUVRAGES DE LA STATION PONT-CARDINET



4

© SEFINTRAFCOR

4- Plan des ouvrages de la station Pont-Cardinet.

5- Coupe de principe de la station Pont-Cardinet.

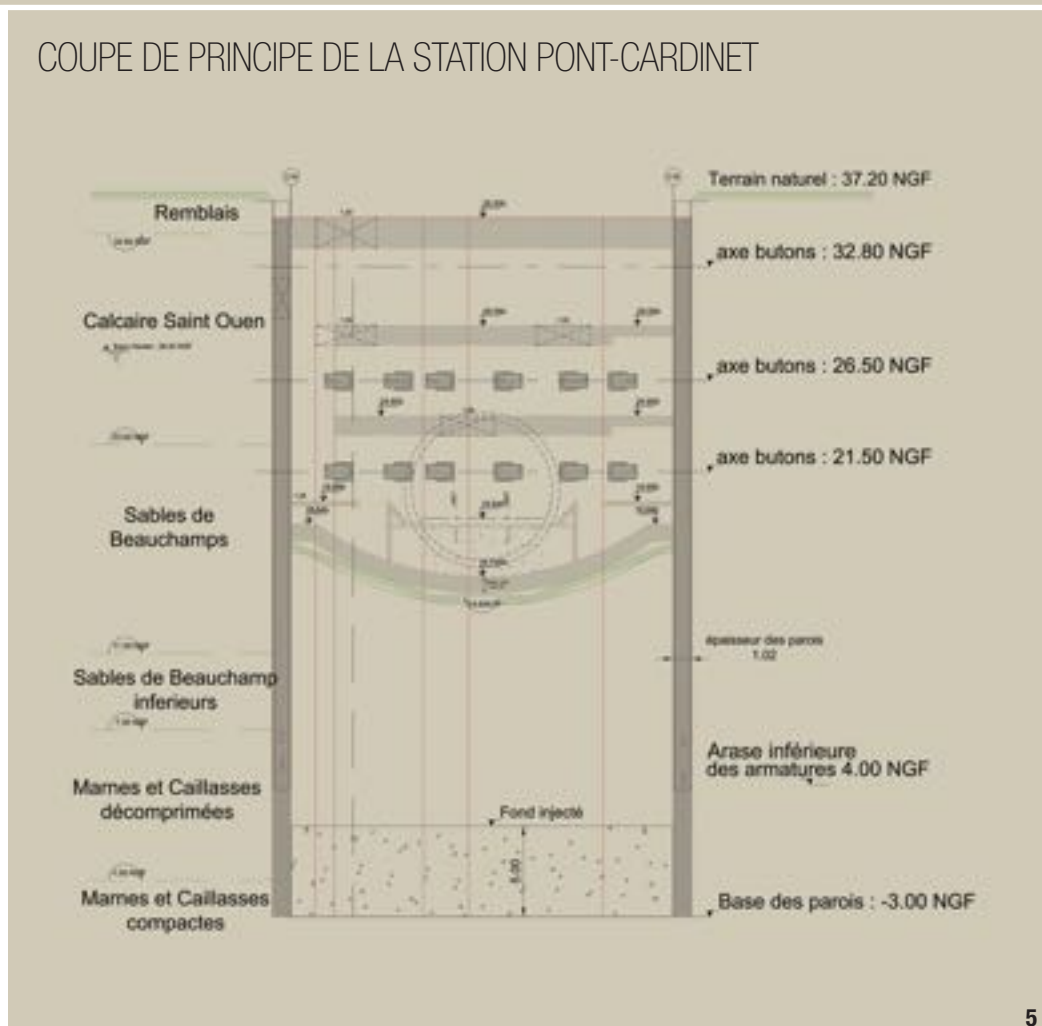
4- Drawing of the structures of Pont-Cardinet station.

5- Schematic cross section of Pont-Cardinet station.

3- Réaliser une campagne de remplissage des vides de dissolution de gypse détectés sous le tracé du tunnel, pour éviter la formation dans le temps de fontis pouvant entraîner un tassement du tunnel, c'est le cas de la rue Victor Hugo où une zone décomprimée a été constatée sur une centaine de mètres (figure 10).

Les solutions techniques retenues pour le traitement d'étanchéité, le confortement, ou le remplissage de vides sont adaptées en fonction de la nature des sols concernés. On utilisera la méthode d'injection de coulis de bentonite dans les marnes et caillasses. On utilisera la méthode du jet grouting dans les sables de Beauchamp.

COUPE DE PRINCIPE DE LA STATION PONT-CARDINET



5

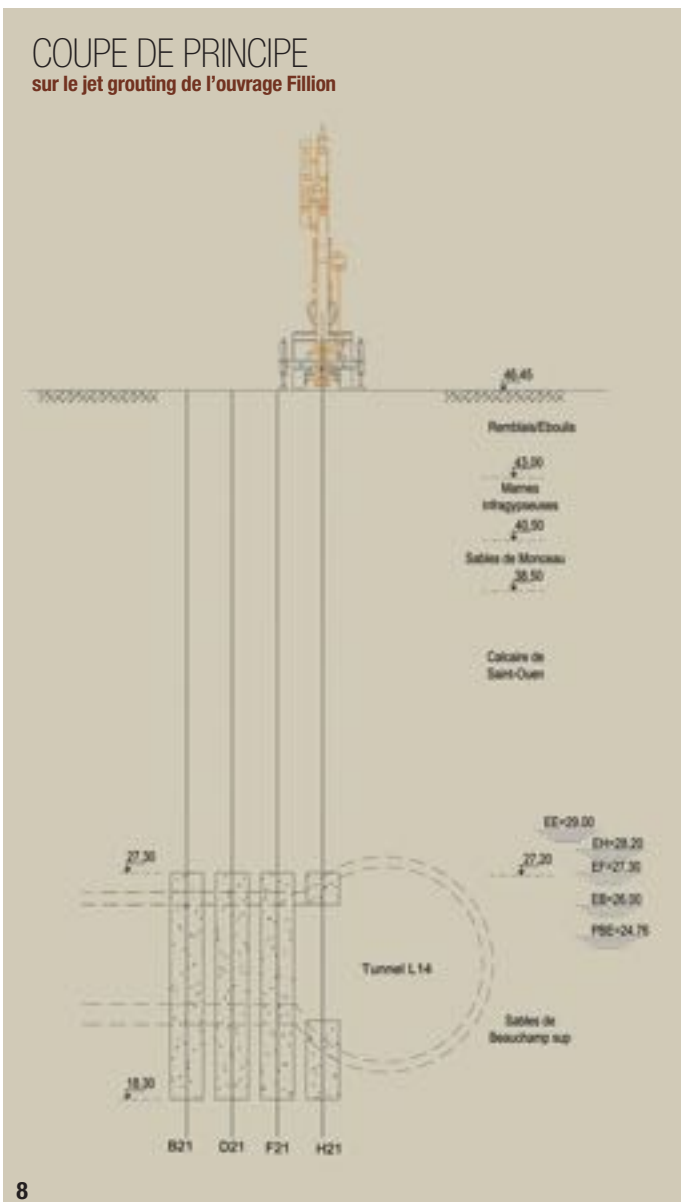
© SEFINTRAFCOR



6 © SEFI-INTRAFOR

7 © SEFI-INTRAFOR

COUPE DE PRINCIPE
sur le jet grouting de l'ouvrage Fillion



8 © SEFI-INTRAFOR

6- Ateliers de forage du radier injecté.

7- Terrassement de la station et pose des butons provisoires.

8- Coupe de principe sur le jet grouting de l'ouvrage Fillion.

6- Injected invert drilling equipment.

7- Earthworks for the station and placing temporary struts.

8- Schematic cross section of jet grouting for the Fillion structure.

LES MOYENS ET MÉTHODES POUR LA RÉALISATION DES PAROIS MOULÉES DE LA STATION PONT CARDINET MOULÉES

Le sol à excaver présente des bancs rocheux dans les marnes et caillasses et des bancs gréseux au sein des sables de Beauchamp, ce qui a orienté l'entreprise vers l'utilisation d'une haveuse.

La haveuse retenue est un cutter Bauer BC 40, qui possède des moteurs de tambour adaptés pour l'épaisseur de paroi de 1,02 m, monté sur un porteur Bauer BG 40. Le cutter a été équipé de tambours à terrain tendre à dents

à faces parallèles, qui sont un bon compromis lorsque l'on se trouve dans une alternance de bancs rocheux ou gréseux et de terrains plus ou moins tendres que sont les marnes et les sables de Beauchamp.

L'utilisation du cutter (figure 11) a impliqué la mise en place d'un second atelier de forage constitué d'une grue à flèche treillis équipée d'une benne à câble (figure 12), pour effectuer l'avant-trou de 4 m de profondeur nécessaire à l'amorçage de la pompe à boue du cutter.

Afin d'optimiser l'utilisation de cette grue de forage additionnelle, l'excavation à la benne à câble est réalisée jusqu'au refus lorsque la benne est stoppée sur un banc rocheux. Ensuite le cutter prend la relève. L'optimisation de la cadence d'excavation consiste à utiliser au maximum les deux outils de forage, qui se complètent.

La benne à câble est une benne Stein de 25 t à grande hauteur ; elle assure de bons rendements et permet de limiter les déviations de forage.

Mais elle nécessite l'utilisation de grues à flèche treillis de taille importante, en l'occurrence une Liebherr LH 885 de 110 t.

En temps réel, des inclinomètres installés dans le cutter et dans la benne à câble permettent de mesurer la position réelle de l'outil de forage par rapport à sa position théorique, et ainsi pouvoir réagir et corriger le forage avec le cutter grâce aux correcteurs hydrauliques de trajectoire, pour maintenir une verticalité respectant la tolérance de 0,5 cm par mètre exigée par le client.

L'implantation des parois moulées est définie en tenant compte de cette possible déviation des panneaux pouvant engager le gabarit de la station.

L'excavation sous boue bentonitique est rendue possible grâce à la centrale de fabrication de boue installée sur le chantier (figure 13), permettant un stockage de 3 fois le volume du plus grand panneau, soit 900 m³.

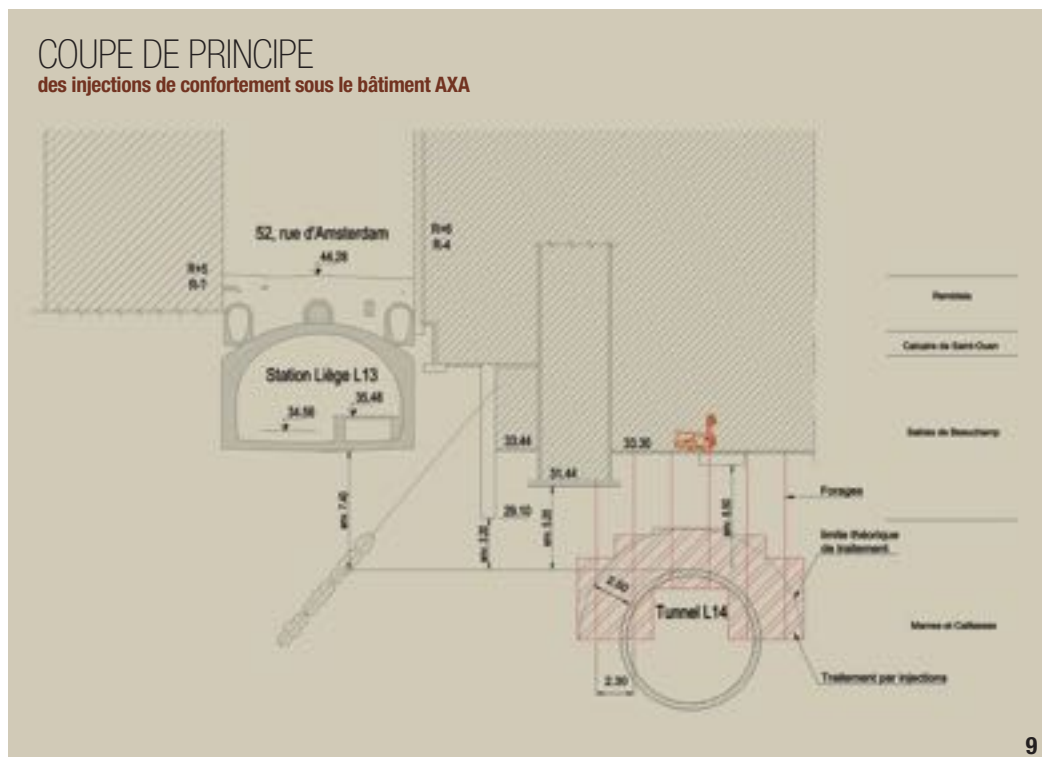
L'excavation au cutter nécessite la circulation de boue bentonitique à un débit de l'ordre de 250 m³/h pour pouvoir remonter les cuttings de forage de 40 m de profondeur jusqu'à la surface, où elle est traitée par une centrale de dessablage (figure 14). Sefi-Intrafor s'est dotée, pour l'occasion, de la dernière centrale Bauer BE 550 équipée de deux dessableurs de 275 m³/h chacun, couplés à deux niveaux d'hydrocyclonage.

Ainsi, la boue chargée dans le forage passe par la centrale pour séparer la boue des matériaux extraits du forage jusqu'à 0,5 mm de diamètre. Les fines restant dans la boue après ce traitement sont ensuite envoyées dans la centrifugeuse BD90, permettant à la boue de retrouver quasiment ses caractéristiques de densité et de viscosité initiales.

La centrale cutter est également utilisée en fin de chantier pour déshydrater les boues bentonitiques. Cette opération, qui consiste à séparer les matières solides de l'eau grâce à l'action de la centrifugeuse, de flocculants et de coagulants, est devenue indispensable car il existe aujourd'hui de moins en moins de décharges qui, en région parisienne, acceptent les boues liquides.

Comme dans la plupart des sites industriels de la périphérie parisienne, les chantiers sont confrontés à la présence de terrains pollués à faible profondeur. Selon leur emplacement au droit de la station, les déblais issus du forage ont dû être évacués, selon leur degré de pollution, dans des centres d'enfouissement ISDI, ISDI+ ou ISDND. Cette contrainte est importante dans la réalisation des parois moulées, donc le maillage de répartition des déblais pollués doit être abouti bien en amont du démarrage pour ne pas bloquer les travaux.

Du point de vue de l'organisation sur le chantier, le tri des déblais impose la création de 4 fosses pour respecter la destination des déblais : 2 fosses pour les déblais inertes ISDI, 1 fosse pour les déblais pollués ISDI+ et 1 fosse pour les déblais ISDND. La dimension des fosses dépend de la répartition des



9

© SEFI-INTRAFOR

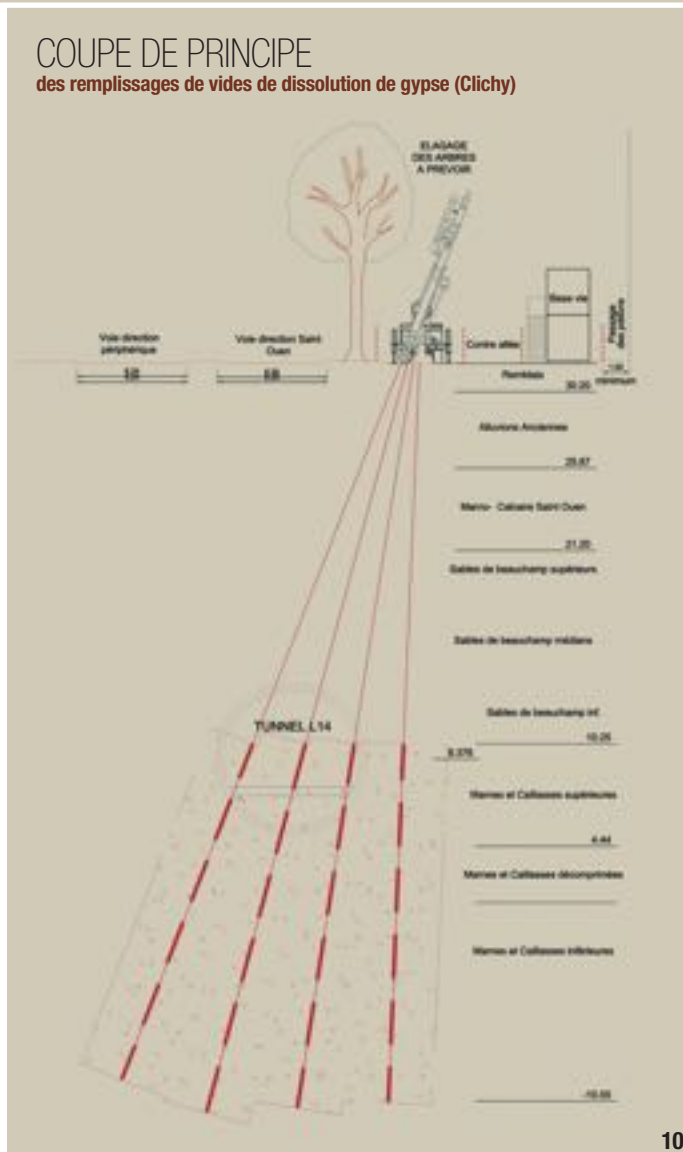
9- Coupe de principe des injections de confortement sous le bâtiment AXA.

10- Coupe de principe des remplissages de vides de dissolution de gypse (Clichy).

9- Schematic cross section of reinforcement grouting under the AXA building.

10- Schematic cross section of gypsum dissolution void filling (Clichy).

volumes de pollution. De ce fait, la présence de pollution nécessite de la place pour assurer un tri correct des déblais. L'excavation des parois moulées requiert l'intervention d'opérateurs très spécialisés et expérimentés. Il s'agit de foreurs cutter, foreurs benne à câbles, centralistes fabrication de boue, centralistes dessablage cutter, chefs d'équipe et chefs de chantier aguerris à ces travaux à grande profondeur, qui travaillent en poste de 6h30 à 14h30 et de 14h30 à 21h30.



10

© SEFI-INTRAFOR

LA RÉALISATION DES PANNEAUX DE PAROIS MOULÉES

Après la réalisation de l'excavation démarre tout un processus permettant le bétonnage des panneaux.

La fourniture des armatures :

Chaque panneau est équipé de deux cages d'armatures de longueur 32,50 m et de largeur 2,80 à 3 m. Les armatures sont livrées coupées et façonnées puis elles sont assemblées sur le chantier. Le chantier a opté pour un montage des armatures sur le chantier afin d'obtenir des cages de grande dimension qui ne pouvaient être acheminées par camion, et ainsi gagner du temps sur leur mise en place dans l'excavation et avoir une meilleure garantie dans la position des coupleurs. La manutention de telles cages d'armatures (figure 15)

d'un poids de 12 t chacune implique des dispositions particulières telles que la création d'un palonnier de 25 m de longueur pour le déplacement des armatures à l'horizontale, et le levage à la verticale (figure 16) avec un système de palonnier en tête, de câbles et poulies. Cette manutention délicate implique l'utilisation d'une grue puissante, en l'occurrence une Liebherr LH 1160 de 160 t avec une flèche de 45 m.

Pour les cages d'armatures équipées de fibre de verre pour les réservations du tunnelier, les points d'attache sont renforcés par des raidisseurs pour limiter la flexion de la cage d'armatures.

La mise en place des coupleurs en attente :

Les quatre niveaux de planchers de la station sont liaisonnés aux parois

moulées par 2 à 3 niveaux de coupleurs Fortec (diamètre 20, 25, 32 ou 40 mm), fixés dans les cages d'armatures des parois moulées et dégagés lors des terrassements, soit 7 000 coupleurs au total.

La solution de mettre en place des coupleurs (figure 17) dans les parois moulées est évidemment beaucoup plus élégante que de réaliser des scellements a posteriori dans les parois moulées dans l'encombrement des armatures existantes, mais cela implique que les études d'exécution du génie civil intérieur de la station soient abouties en même temps que les études d'exécution des parois moulées. La mise en place des coupleurs doit être réalisée avec beaucoup de précision, la tolérance de positionnement

des coupleurs étant de 5 cm verticalement et il faut en tenir compte dans le dimensionnement des planchers.

La protection des coupleurs est une étape importante à ne pas négliger, car les coupleurs sont enrobés dans le béton et devront être découverts au moyen d'un marteau-piqueur.

La mise en place des guides palplanches et joints waterstop :

La continuité des panneaux en profondeur est garantie par un système de guide-palplanches type Intrafor à nervure centrale qui sert de rail de guidage à l'outil de forage, et qui est extrait du forage lors de la réalisation du panneau adjacent.

Les palplanches servent également de support au joint waterstop qui permet l'étanchéité entre panneaux. ▽

11- Atelier cutter et atelier benne à câble.

12- Atelier benne à câble.

13- Centrale de fabrication de boue bentonitique.

14- Centrale de dessablage des boues du cutter.

11- Cutter and cable grab equipment.

12- Cable grab equipment.

13- Bentonite drilling mud production plant.

14- Cutter sludge degritting plant.





15



16



17

© SEFI-INTRAFOR

Huit guides-palplanche de 36 m de profondeur constitués de 3 éléments de 12 m, pesant 18 t chacun, ont été ainsi déplacés de panneau en panneau à l'aide de la grue de 160 t.

La fourniture du béton :

Les parois moulées sont constituées d'un béton XA1 avec 385 kg de ciment/m³, une consistance de type S4 et une rhéologie de 5 heures correspondant à la durée de bétonnage.

Le béton est testé en amont lors des essais de convenance en centrale principale et en centrale de secours. Le groupement Eiffage TP/Razel-Bec a opté pour une fabrication du béton sur le site de la station, en raison de la surface disponible, des quantités importantes nécessaires pour ce chantier, des contraintes de trafic, et des cadences de livraison de béton importantes à respecter lors des bétonnages de panneaux de l'ordre de 60 à 70 m³/h.

Les équipes de bétonnage sont constituées de chefs d'équipe, chefs béton, bétonniers, soudeurs, centralistes, grutiers de manutention, qui travaillent également en poste de 6h30 à 21h30.

15- Déplacement des cages d'armatures.

16- Mise à la verticale des cages d'armature avant insertion dans le forage.

17- Coupleurs en attente dans les cages d'armature.

15- Moving reinforcement cages.

16- Vertically placing reinforcement cages before insertion in the drill hole.

17- Couplers pending in reinforcement cages.

À l'aide de ces moyens humains et matériels, Sefi-Intrafor a réussi à bétonner 4 panneaux de 270 m³/semaine, conformément au planning prévisionnel, d'octobre à décembre 2014. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRES D'OUVRAGE : RATP - STIF

MAÎTRE D'ŒUVRE : Systra

BUREAU DE CONTRÔLE TECHNIQUE : Apave

TITULAIRE DU LOT 1 : Groupement Eiffage TP (mandataire) / Razel-Bec groupe Fayat

SOUS-TRAITANT FONDATIONS SPÉCIALES : Sefi-Intrafor

PRINCIPALES QUANTITÉS

DIMENSION DE LA STATION PONT CARDINET : 21 x 120 m

LONGUEUR TOTALE DES PAROIS MOULÉES : 298 m

VOLUME DE BÉTON DES PAROIS MOULÉES : 12 000 m³

QUANTITÉ D'ARMATURES HAUTE ADHÉRENCE DES PAROIS MOULÉES : 1 020 t

LINÉAIRE DE FORAGES DE COMPLEMENT DE DISSOLUTION : 6 400 m

LINÉAIRE DE FORAGES DU RADIER INJECTÉ : 19 700 m

VOLUME THÉORIQUE DE COLONNES DE JET GROUTING SUR TOUS LES OUVRAGES : 9 400 m³

LINÉAIRE DE FORAGE D'INJECTION DE TRAITEMENT SUR TOUS LES AUTRES OUVRAGES : 8 150 m

ABSTRACT

LINE 14 - SPECIAL FOUNDATIONS FOR THE NEW PONT CARDINET STATION

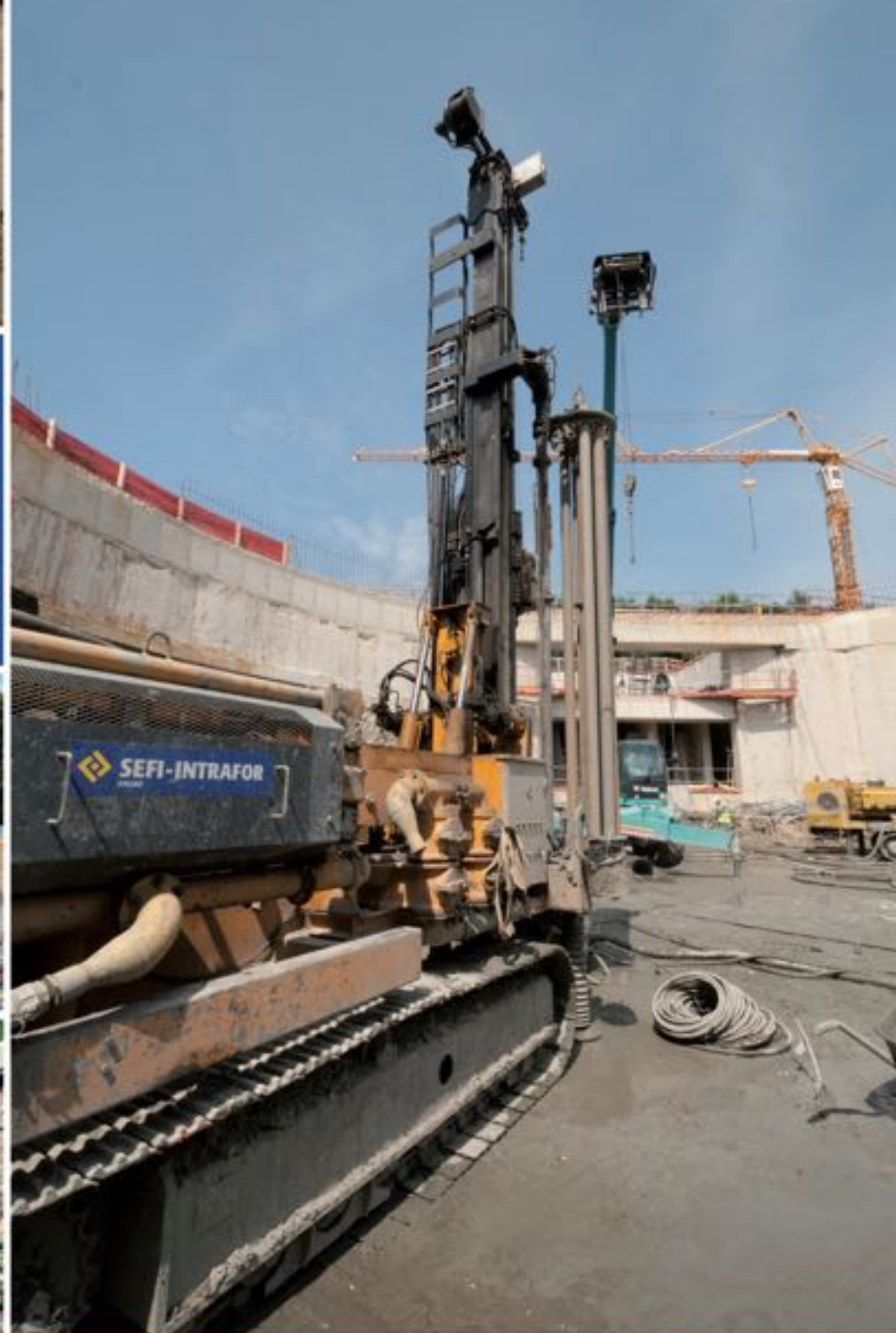
FRÉDÉRIC LAMOTTE, SEFI-INTRAFOR - PIERRE JULLIEN, SYSTRA

The first stage of the automatic metro for the "New Greater Paris" project is the extension of Line 14 from Saint-Lazare to Mairie-de-Saint-Ouen with the prime objective of desaturating Line 13. With four new stations (Pont-Cardinet, Porte-de-Clichy, Clichy-Saint-Ouen RER and Mairie-de-Saint-Ouen), Line 14 will serve the rapidly expanding north-western districts of the metropolis. Sefi-Intrafor is performing special foundation work on the extension of Line 14 to construct the first metro station, Pont-Cardinet, from which the tunnel boring machine will be launched at the end of 2015. Numerous techniques are being employed in a very dense urban environment: diaphragm walls, cement grouting, jet grouting, piles and micropiles. □

LÍNEA 14 - LAS CIMENTACIONES ESPECIALES DE LA NUEVA ESTACIÓN PONT CARDINET

FRÉDÉRIC LAMOTTE, SEFI-INTRAFOR - PIERRE JULLIEN, SYSTRA

Primera etapa del metro automático del Nouveau Grand Paris, la prolongación de la línea 14 de Saint-Lazare a Mairie-de-Saint-Ouen tiene como objetivo prioritario reducir la saturación de la línea 13. Con 4 nuevas estaciones (Pont-Cardinet, Porte-de-Clichy, Clichy-Saint-Ouen RER y Mairie-de-Saint-Ouen), la línea 14 prestará servicio a los barrios del nordeste metropolitano en pleno desarrollo. Así, Sefi Intrafor interviene en cimentaciones especiales en la prolongación de la Línea 14 para realizar la primera estación de metro Pont Cardinet donde se utilizará una tuneladora a finales del año 2015. Se utilizan múltiples técnicas en una zona urbana muy densa: muros pantalla, inyecciones de cemento, jet grouting, pilotes y micropilotes. □



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
© SEFRU-CIME

SOUTÈNEMENTS DIVERS ET FONDATIONS PROFONDES À ISSY-LES-MOULINEAUX

AUTEURS : KAREN EL BARMAKI, RESPONSABLE DU PÔLE BÂTIMENT, ARCADIS - SOLENNE GROGNET, CHARGÉ D'AFFAIRE, ARCADIS

LE PROJET RELATIF À LA CONSTRUCTION D'UN IMMEUBLE DE BUREAUX PRÉSENTE LA PARTICULARITÉ DE REGROUPER UNE DIVERSITÉ D'OUVRAGES GÉOTECHNIQUES À RÉALISER DANS LE CADRE D'UNE MÊME OPÉRATION. PAROIS MOULÉES ET VOILES PAR PASSES SONT CHOISIS EN FONCTION DES PROFONDEURS D'EXCAVATION À ATTEINDRE, DES BESOINS D'ÉTANCHÉITÉ ET DES CHARGES À REPRENDRE. LES FONDATIONS SONT ASSURÉES PAR DES PIEUX RÉALISÉS À LA TARIÈRE CREUSE. LES SOUS-SOLS BAINANT DANS LA NAPPE, UN BOUCHON INJECTÉ LIMITE LES DÉBITS D'EXHAURE LORS DE LA RÉALISATION DES TRAVAUX.

Le projet nommé « Rivergate » consiste en la construction d'un immeuble de bureaux, commerces et activité, de type R+9 sur 1 à 3 niveaux de sous-sols. Il est situé sur la commune d'Issy-les-Moulineaux (92) à 100 m de la Seine entre le quai de Stalingrad, la rue Rouget de L'Isle, la rue Camille Desmoulins et les voies du tramway T2. Ce site présentait initialement deux

bâtiments de type R+7 et R+6 à différents niveaux de sous-sols. Une opération de démolition des structures existantes a été menée afin de permettre la faisabilité du projet.

La partie Sud de la parcelle reçoit un projet similaire nommé « Les Petites Îles » qui comporte un programme de logements en cours de construction actuellement. Ces deux projets sont menés simultanément et sont assurés

**1- Immeuble
« Rivergate ».**

**1- Rivergate
building.**

par l'entreprise Spie Fondations pour la réalisation des ouvrages géotechniques. La gestion de la coactivité des 2 chantiers est un élément clé de la réussite de l'un et de l'autre des projets.

L'ensemble des phases études pour la partie géotechnique a été réalisé par Arcadis. Ces phases d'étude correspondant aux missions géotechniques G2 (phases AVP et PRO) et G4 ont comporté : la campagne de sondages

de sols sur l'ensemble de la parcelle, l'étude de démolition des bâtiments existants notamment le mode de stabilité et de confortement des voiles périmétriques existants conservés, le dimensionnement des soutènements et des fondations profondes ainsi que la supervision des travaux d'exécution des ouvrages géotechniques (Mission G4) actuellement en cours de réalisation.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Comme évoqué précédemment, la parcelle se situe à une faible distance de la Seine (figure 2).

Selon les campagnes géotechniques réalisées sur la parcelle, la stratigraphie des terrains rencontrés est composée de la succession des couches suivantes, à partir du terrain naturel (+31 NGF) :

- Remblais constitués de limons et argiles sableuses ;
- Alluvions modernes constituées de sable fin limoneux avec quelques passages de graviers de silex ;
- Alluvions anciennes constituées de sable fin à moyen avec graves et silex.

Les terrains quaternaires présentent une épaisseur globale de 13 m.

- Craie altérée constituée de craie blanche altérée à grumeleuse sur une épaisseur de 19 m. Cette craie a été dissociée en deux parties dans les modèles de calcul au vu des caractéristiques mécaniques obtenues ;



2
© GOOGLE MAP

2- Carte de la situation.

3- Plan d'implantation du projet « Rivergate ».

2- Location map.

3- Rivergate project layout plan.

- Craie blanchâtre fragmentée rencontrée jusqu'à une profondeur minimale de 40 m.

Sur le plan hydrogéologique, les sondages réalisés ainsi que les piézomètres installés sur la parcelle ont

révélé la présence d'une nappe d'eau, ce qui était prévisible compte tenu de la proximité de la parcelle avec la Seine.

Une étude hydrogéologique poussée a été menée par le BET Burgeap ayant pour objectifs de :

- Définir les niveaux d'eau nécessaires pour le dimensionnement des ouvrages (EB, EH, EE) ;
- Estimer l'influence des opérations de pompage existantes sur des projets à proximité de la parcelle sur les fluctuations de la nappe ;
- Définir la perméabilité du sol et estimer le débit de pompage ;
- Définir le type de soutènement adéquat et les prescriptions nécessaires pour réduire le débit d'exhaure ;
- Prédimensionner la fiche hydraulique du soutènement ;

- Fournir les caractéristiques du bouchon injecté afin de réduire la perméabilité des sols et du débit de pompage en phase provisoire du chantier.

Par ailleurs, le site se trouve dans la zone du Plan de Prévention des Risques d'Inondations (PPRI).

La gestion de la nappe d'eau sur ce chantier constitue un véritable risque qu'il faut maîtriser tout le long des travaux.

CONTRAINTES CONSTRUCTIVES ET SOLUTIONS APPORTÉES

CONTRAINTES DU SITE

Le projet se situe au milieu d'une parcelle qui est la propriété de la SCI Issy Rivergate dont le gérant est Sefri-Cime. Au nord de cette parcelle, un projet de type IGH est prévu à terme ; actuellement cette partie de la parcelle est exempte de tous travaux.

Au sud, le projet « Les Petites Îles » relatif à un immeuble de logements est en cours de construction. À l'ouest, le projet est bordé par le quai de Stalingrad. À l'est, un talus existant supportant les voies du tramway T2 longe la limite de propriété (figure 3).

La contrainte de taille vis-à-vis des ouvrages existants est liée à la présence du talus géré par la RATP.

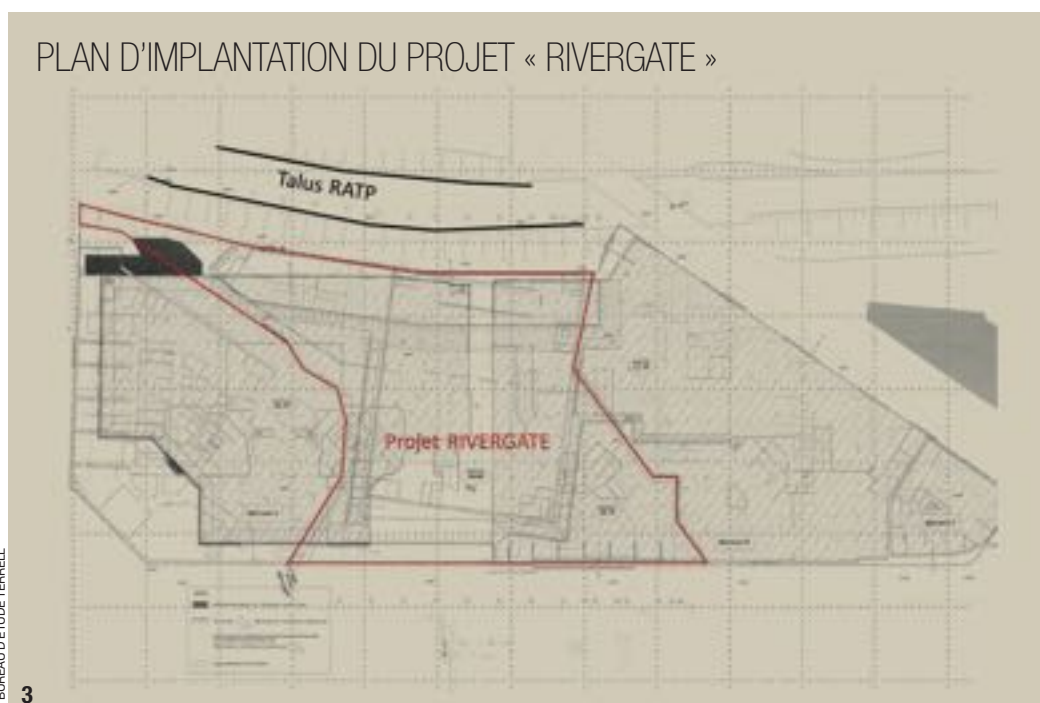
En effet, les travaux de réalisation des soutènements et d'excavation projetés à proximité de ce talus ne doivent pas entraîner des modifications de l'état actuel de l'existant.

La stabilité du talus devra être assurée lors des travaux entrepris et les déplacements maximums en pied du talus sont limités à 1 cm pour ne pas compromettre la stabilité des voies.

Le contrôle des déplacements a été assuré par la mise en place de la méthode observationnelle notamment en pied du talus le long de la limite de propriété coté Est de la parcelle.

Des cibles topographiques ainsi que des inclinomètres ont été installés en pied du talus pour suivre les déplacements induits par les travaux d'excavation.

Les prescriptions rentrant dans le cadre de la méthode observationnelle, la définition des seuils à satisfaire (seuils d'alerte et seuils d'intervention) ainsi que les mesures correctives à mettre en place en cas de dépassement de ces seuils ont fait l'objet d'une note spécifique relative à cette partie de la parcelle qui a été discutée avec le service de la RATP et approuvée par leurs soins.



3
© BUREAU D'ÉTUDE TERRELL


4

5

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

CONFORTEMENT DES VOILES PÉRIPHÉRIQUES EXISTANTS

La parcelle comportait initialement des constructions existantes présentant 1 à 2 niveaux de sous-sols partiels dans la zone concernée par le projet Rivergate. Ces constructions ont fait l'objet d'une opération de démolition et les voiles existantes périphériques ont été conservés et confortés de sorte à maintenir leur fonctionnement structurel initial. En effet, la stabilité de ces voiles était assurée par les planchers des sous-sols existants. En l'absence des plans de récolement des voiles existants, le ferrailage de ces voiles étant inconnu, les planchers ont été remplacés par des butons permettant de conserver leur fonctionnement structurel.

Les butons, nommés B1 plus loin, prennent appui en tête des voiles et sont fondés en fond de fouille sur des semelles isolées. Ce schéma répétitif concerne essentiellement la partie des ouvrages situés le long du quai de Stalingrad.

Les butons B1 seront conservés jusqu'à la réalisation des nouvelles voiles qui constitueront les voiles du projet. Ces murs seront réalisés contre les voiles existants par application de la méthode de voiles par passes.

La présence de ces butons entraîne des contraintes supplémentaires pour la réalisation des nouvelles voiles.

Un phasage de suppression des butons B1 est étudié. La dépose est prévue par passes alternées par rapport à la réalisation des voiles par passes qui seront stabilisés au fur et à mesure de leur réalisation par un système de butons provisoires, nommé B2.

En phase définitive, les butons B2 seront supprimés et la butée des voiles périmétriques sera assurée par les planchers des futurs sous-sols. Par ailleurs, les constructions existantes étaient fondées sur pieux. Ces pieux ont été pour certains localisés et arrachés dans le cas où ils se trouvaient au droit d'un ouvrage à créer. Toutefois, ces pieux sont découverts au fur et à mesure de l'avancement du forage des parois moulées et des pieux. L'entreprise a mis en place des procédures d'intervention permettant d'extraire les pieux existants et de réaliser les nouvelles fondations en l'absence de tout obstacle dans le terrain.

4- Marteau fond de trou.

5- Pieu existant rencontré à l'avancement.

6- Plan d'implantation de la paroi moulée.

4- Down-the-hole drill.

5- Existing pile found during excavation.

6- Diaphragm wall layout plan.

À titre d'exemple, un pieu a été rencontré lors de l'opération de forage de la paroi moulée, le forage à l'aide de la benne à câble provoquant l'inclinaison de la benne au contact de l'obstacle. Ce pieu a été situé à 1,5 m sous la murette-guide. Le forage de la passe a été arrêté pour procéder à l'extraction du pieu.

La murette-guide a tout d'abord été démolie au-dessus du pieu pour permettre l'accès à l'obstacle. La première tentative d'extraction consistait en une opération de trépannage du pieu avec un tube. Cependant, cette méthode ne s'est pas révélée efficace. Une seconde méthode a été mise en place.

PLAN D'IMPLANTATION DE LA PAROI MOULÉE


6

© SPIE FONDATIONS

À cet effet, une machine type DCH équipée d'un marteau-fond-de-trou a été mobilisée. Le procédé a consisté à déstructurer la périphérie du pieu puis à l'extraire à l'aide d'une pelle mécanique (figures 4 et 5).

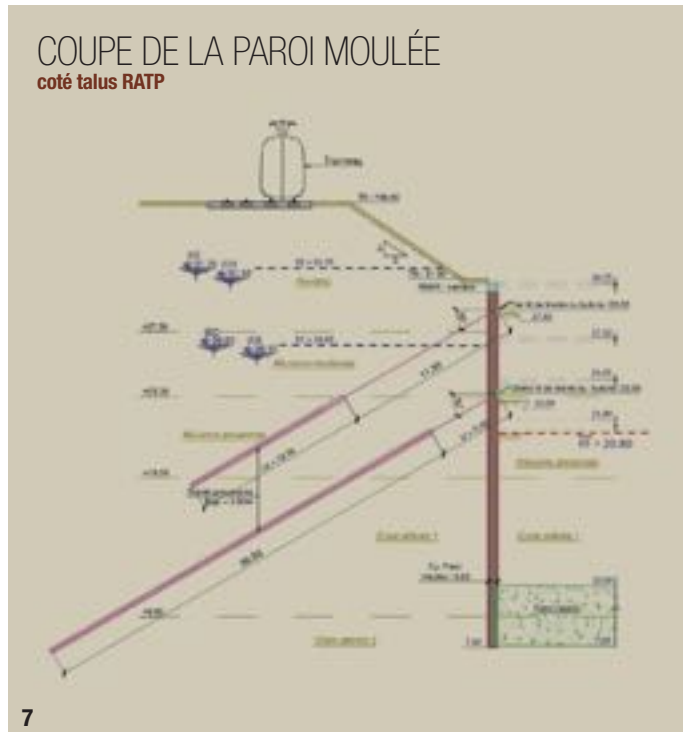
SOUTÈNEMENTS

L'infrastructure projetée comportera 1 à 3 niveaux de sous-sols. La partie à 3 niveaux de sous-sols est partielle et sera réalisée en pied du talus de la RATP.

La zone à un niveau de sous-sol est réalisée par talutage lorsque le recul par rapport à la limite de propriété le permet et par voiles par passes le long du quai de Stalingrad. Cette partie de l'infrastructure sera réalisée hors d'eau. La partie de l'ouvrage à 3 niveaux de sous-sols est réalisée dans la nappe et nécessite une fouille étanche à l'abri d'un soutènement de type paroi moulée associée à un bouchon injecté permettant de réduire la perméabilité des terrains d'assise et diminuer le débit d'exhaure (figure 6).

La fouille présentera une hauteur d'excavation de l'ordre de 10 m par rapport au TN actuel (figure 7).

La paroi moulée est prévue avec une épaisseur de 62 cm. La fiche mécanique garantissant la stabilité de la paroi notamment vis-à-vis de la butée en pied est de 6 m sous le niveau du fond de fouille fixé à 20,80 NGF. Pour répondre aux prescriptions hydrauliques définies par le BET Burgeap, cette fiche a été allongée de 8 m soit au niveau 7 NGF permettant ainsi de réduire le gradient hydraulique mais aussi la réalisation du bouchon injecté prévu entre les niveaux 10 NGF et 7 NGF. La base de la paroi moulée se trouve ancrée dans l'épaisseur de la craie altérée.



7 © SPIE FONDATIONS

7- Coupe de la paroi moulée coté talus RATP.

8- Benne à câble.

9- Assemblage des cages d'armatures de la paroi.

7- Cross section of the diaphragm wall on RATP embankment side.

8- Cable grab.
9- Assembling wall reinforcement cages.

La stabilité de la paroi moulée est assurée par des tirants d'ancrage.

En effet, lors des études de conception, deux solutions de confortement ont été étudiées : confortement par tirants ou par butons.

Au vu de la géométrie de la fouille, la solution butons présentait 2 inconvénients majeurs :

→ L'encombrement de la fouille par la présence de butons traversant s'appuyant de paroi à paroi. Cette configuration complique les interventions de terrassement mais aussi de gros œuvre pour la réalisation des planchers et des éléments verticaux structuraux ainsi que la dépose et l'évacuation des butons.

→ Le dénivelé de l'ordre de 3 m entre les arases supérieures de la paroi moulée le long du talus du tramway et les parois en retour. Cette configuration impliquerait la pose de 2 niveaux de butons prenant appui en tête des parois moulées en retour. Un problème de butée à l'arrière de ces parois serait généré au vu des efforts importants induits par les poussées des terres et la surcharge du talus. De plus, cette solution conduirait à des déplacements en pied du talus supérieurs à la limite admissible convenue avec le service technique de la RATP.

Dans ce contexte, l'entreprise Spie Fondations a privilégié la solution par tirants, solution qui a été acceptée par l'ensemble de l'équipe de la maîtrise d'œuvre. Néanmoins, les tirants allant au-delà de la limite de propriété notamment sous l'emprise du talus de la RATP, des accords de mobilisation du tréfonds ont été demandés pour la mise en place des tirants provisoires. Les accords écrits sont en attente.

La réalisation de ce soutènement est composée de deux phases principales comprenant le forage et le bétonnage. Le forage est réalisé à la benne à câble sous boue bentonitique permettant la tenue du terrain au cours de l'excavation. L'outil de forage est dirigé en tête par une murette guide implantée par un géomètre (figure 8). Les panneaux réalisés sur chantier sont majoritairement de l'ordre de 7 m de largeur. Le forage se fait par passes de largeur égale à celle de la benne à câble (2,80 m environ). Chaque panneau est donc divisé en 3 passes de forage. Les passes aux extrémités du panneau sont forés en premier lieu, puis le merlon central est excavé.



8 © PHOTOTHÈQUE ARCADIS



9

Une fois le forage réalisé, le panneau est équipé par sa cage d'armatures (figure 9) et la phase de bétonnage est enclenchée par la mise en place de tubes plongeurs permettant de bétonner le panneau de manière gravitaire, de bas en haut. (figure 10).

Les panneaux sont excavés en alterné, un panneau sur deux. Un joint étanche est prévu à la jonction de 2 panneaux pour assurer l'étanchéité à l'eau.

Le fond injecté sera réalisé une fois la paroi moulée de la zone des 3 sous-sols, terminée. Il est prévu sur 3 m d'épaisseur en pied de paroi moulée. L'objectif de perméabilité à atteindre dans le terrain est de $5 \cdot 10^{-6}$ m/s (la perméabilité de la craie est estimée en phase initiale à $1 \cdot 10^{-5}$ m/s).

Un coulis de bentonite-ciment est utilisé pour la réalisation du fond injecté. La difficulté majeure dans la réalisation de l'injection est de repérer les fractures dans la craie altérée qui permettront la dissipation maximale du coulis dans le terrain. En effet, au vu du caractère pâteux de la craie à cette profondeur, il est probable que de nombreux forages d'injections soient inopérants.

L'injection se fait au moyen de forages répartis selon un maillage de $1,5 \times 1,5$ m établi par l'entreprise. La procédure de réalisation prévoit un volume et une pression maximale au-delà desquels les forages seront arrêtés.

Un essai de pompage est prévu à la suite de l'injection pour confirmer ou infirmer l'obtention de l'objectif de perméabilité. Dans le cas, où l'objectif n'est pas atteint, le fond injecté pourra être épaissi par l'équipement des forages initiaux en tubes à manchettes sur 6 m.

FONDACTIONS PROFONDES

Au vu du terrain, du nombre de niveaux de la construction et donc des charges à reprendre, l'ensemble du projet est fondé sur des pieux à la tarière creuse. L'entreprise Spie Fondations a mis au point un procédé de forage amélioré qui a été breveté : le procédé Starforeuse. Le bâtiment est fondé sur 189 pieux. Ces pieux sont réalisés par zonage géographique en fonction de l'avancée des différents ateliers sur site.

Les diamètres des pieux prévus varient entre 0,62 m et 1,22 m en fonction des charges. Ces derniers sont ancrés dans la craie altérée.

Le forage du pieu est réalisé à l'aide d'une tarière jusqu'à atteindre la profondeur souhaitée. Les vis de la tarière sont démontables ce qui permet de changer de diamètre de forage relativement facilement.



10

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

Cette technique de forage est caractérisée par le fait que le bétonnage est réalisé avant la mise en place de la cage d'armatures.

Ce mode de fonctionnement impose une manutention des cages d'armatures et une gestion des toupies de béton irréprochables. Pour les pieux de diamètre important, la cage d'armature est généralement descendue au moyen de l'appui continu d'une pelle mécanique sur l'extrémité haute de la cage (figures 11 et 12).

Le procédé Starforeuse permet d'améliorer le contact sol/pieu par rapport aux pieux forés classiquement à la tarière creuse grâce à la présence d'un clapet rétractable hydraulique.

Les avantages d'un tel procédé sont la vitesse d'exécution, l'absence de décompression ou d'éboulement du forage et le contrôle ainsi que l'enregistrement en temps réel des paramètres de forage et de bétonnage.

10- Bétonnage de la paroi moulée par tube plongeurs.

11- Forage d'un pieu à la tarière creuse selon le procédé Starforeuse.

12- Descente de la cage d'armature du pieu.

10- Concreting the diaphragm wall with dip pipes.

11- Continuous flight auger pile drilling by the Starforeuse process.

12- Lowering the pile reinforcement cage.

Une des particularités de ce projet est que les pieux sont forés à partir d'une plateforme de travail dont le niveau altimétrique est supérieur à celui de l'arase supérieure des pieux.

Le forage à la tarière creuse entraîne un sur-bétonnage entre la cote de l'arase supérieure du pieu et la cote de la plateforme. Ces chandelles de béton présentes dans le terrain rendent le terrassement plus difficile. Des méthodes ont été mises en place pour diminuer ces volumes de béton perdus. L'une d'entre elles consiste à aspirer le béton dans une sorte de soupape cylindrique et à le rejeter sur la plateforme. Cette méthode a ses limites car selon la nature du terrain, l'éboulement en tête est plus que probable (figures 13a et 13b).

MÉTHODE OBSERVATIONNELLE

Par application des règles des Eurocodes, il est mis en place sur le chantier l'application de la méthode observationnelle. Cette méthode permet de suivre le comportement réel des ouvrages géotechniques afin de valider les hypothèses géotechniques retenues dans les notes de calcul, de vérifier les limites maximales des déplacements théoriques issus des modélisations établies lors des études de conception et de minimiser le risque d'un aléa géotechnique.

Les dispositifs d'auscultation retenus dans le cadre de l'application de la méthode observationnelle dépendent de la nature des ouvrages à réaliser mais aussi de la sensibilité des ouvrages existants mitoyens.



11



12

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS



© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

Dans le cadre de ce projet, les éléments les plus critiques sont essentiellement le talus de la RATP et les voiles par passes dont le calcul des déplacements théoriques est difficilement quantifiable. Ainsi, une note a été établie par l'entreprise Spie Fondations précisant :

- Les dispositifs d'auscultation retenus, leurs caractéristiques dimensionnelles notamment pour les inclinomètres, leur implantation ainsi que l'incertitude maximale des appareils de lecture/relevé ;
- La fréquence des relevés ;

13a & 13b-Aspiration du béton en excès entre la plateforme et la tête du pieu.

13a & 13b-Vacuuming excess concrete between the platform and the pile cap.

- Les valeurs seuils des déplacements à ne pas dépasser ;
- Les mesures correctives à mettre en place en cas de dépassement des valeurs seuils prédéfinis ;
- Un plan d'implantation des dispositifs d'auscultation ;
- Contenu du rapport relatif aux relevés d'auscultation.

Les dispositifs d'auscultation sur ce chantier sont :

- Des inclinomètres en pied du talus de la RATP, coté Est de la parcelle ;
- Des cibles topographiques sur

l'ensemble des soutènements : parois moulées, voiles par passes. Ces cibles sont placées selon des profils d'auscultation définis à l'avance par l'entreprise en commun accord avec l'équipe de la maîtrise d'œuvre. Chaque profil d'auscultation comporte a minima une cible en tête de l'écran et une cible en ventre.

Avant tous travaux de terrassement, un relevé initial est réalisé sur l'ensemble des dispositifs mis en place (inclinomètres et cibles en tête des écrans de soutènements). Ce relevé correspond au « point zéro » et permet de suivre l'évolution des déplacements dus essentiellement aux travaux d'excavation entrepris à partir de cet état zéro et d'analyser ainsi les incidences éventuelles induites par les travaux en cours. Les relevés sont menés d'une manière hebdomadaire et font l'objet d'un rapport d'analyse établi par l'entreprise Spie Fondations. Chaque rapport est transmis à l'équipe de la maîtrise d'œuvre et son contenu est analysé notamment dans le cadre de la mission géotechnique G4. À ce stade du projet, les relevés réalisés ne montrent pas d'évolution de déplacement anormale ; les déplacements sont conformes à ceux estimés par les calculs théoriques. □

QUELQUES CHIFFRES

- LINÉAIRE DE PAROI MOULÉE : 275 m**
- SURFACE DE PAROI MOULÉE : 5 600 m²**
- LINÉAIRE DE VOILES PAR PASSES : 25 m environ**
- VOLUME DE SOL À EXCAVER : 30 000 m³**
- NOMBRE DE TIRANTS PROVISOIRES : 50 u**
- LINÉAIRE DE TIRANTS PROVISOIRES : 745 m**
- NOMBRE DE PIEUX : 189 u**
- MONTANT DES TRAVAUX LIÉS AUX OUVRAGES GÉOTECHNIQUES : 7 785 000 € HT**

INTERVENANTS

- MAÎTRISE D'OUVRAGE :**
SCI Issy Rivergate représentée par Sefri-Cime
- MAÎTRISE D'ŒUVRE DE CONCEPTION :**
Loci-Anima /Arte Charpentier Architectes
- MAÎTRISE D'ŒUVRE D'EXÉCUTION :** Artelia Group
- BUREAU DE CONTRÔLE :** Socotec
- BUREAU D'ÉTUDE STRUCTURE :** Terrell
- BUREAU D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE :** Arcadis
- BUREAU D'ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE :** Burgeap

ABSTRACT

VARIOUS RETAINING STRUCTURES AND DEEP FOUNDATIONS IN ISSY-LES-MOULINEAUX

KAREN EL BARMAKI, ARCADIS - SOLENNE GROGNET, ARCADIS

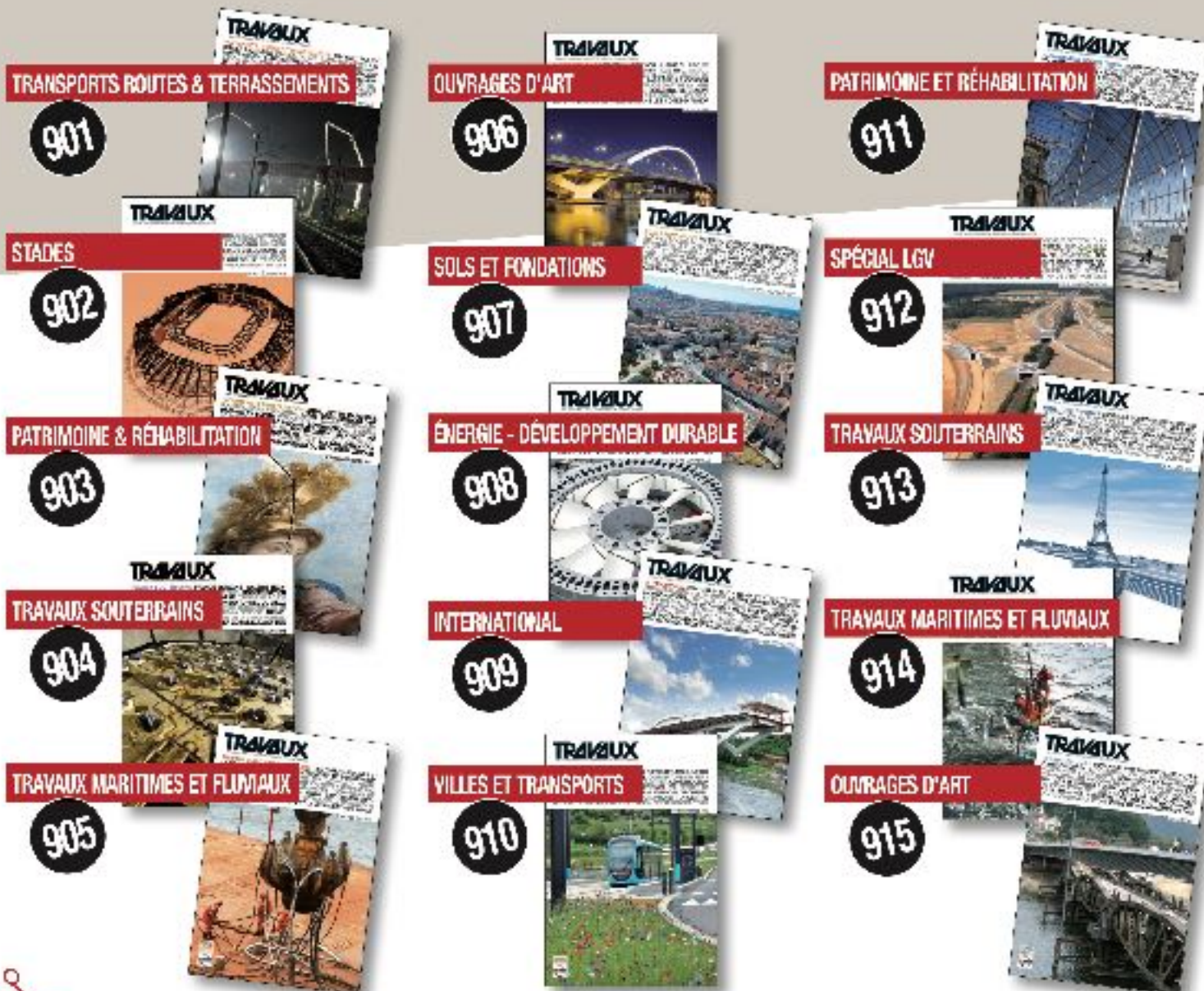
The town of Issy-les-Moulineaux is located near the Seine and passed through by a tramway line. The hydrogeological and joint ownership conditions there are problematic for new buildings such as the 'Rivergate' project consisting of office buildings with various basement levels. The retaining structures used are diaphragm walls and alternate-run stem walls. The flow rates for pumping during earthworks are controlled by a cement-grouted plug integral with the wall. The building's structural loads are absorbed by piles anchored in the chalk. An observational method is established for monitoring the movements of constructed walls and existing peripheral stem walls and sensitive adjoining structures. □

DIVERSOS APUNTALAMIENTOS Y CIMENTACIONES PROFUNDAS EN ISSY-LES-MOULINEAUX

KAREN EL BARMAKI, ARCADIS - SOLENNE GROGNET, ARCADIS

Cerca del Sena y atravesada por una línea de tranvía, la ciudad de Issy-les-Moulineaux presenta condiciones hidrogeológicas y de medianería delicadas para las nuevas construcciones como el proyecto "Rivergate" que incluye edificios de oficinas a diferentes niveles del subsuelo. Los apuntalamientos se realizan por muros pantalla y paredes tipo berlina. Los caudales a bombear durante el movimiento de tierras se controlan con un tapón inyectado asociado al muro. Las cargas de estructura del edificio se absorben con pilotes anclados en la creta. Se ha instalado un método de observación para el seguimiento de los desplazamientos de los muros realizados y las paredes periféricas existentes, así como de las estructuras intermedias sensibles. □

PAR NUMÉRO : 15€ AU LIEU DE 25€



BON DE COMMANDE ■ REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

À renvoyer à : Com et Com - Service Abonnements TRAVAUX - Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot - 92350 Le Plessis-Robinson
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22 - Fax : +33 (0)1 40 94 22 32 - Email : revue-travaux@cometcom.fr

JE COMMANDE LES NUMÉROS

SUIVANTS (cochez les cases de votre choix en indiquant le nombre d'exemplaires) :

- | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 901 x | <input type="checkbox"/> 906 x | <input type="checkbox"/> 911 x |
| <input type="checkbox"/> 902 x | <input type="checkbox"/> 907 x | <input type="checkbox"/> 912 x |
| <input type="checkbox"/> 903 x | <input type="checkbox"/> 908 x | <input type="checkbox"/> 913 x |
| <input type="checkbox"/> 904 x | <input type="checkbox"/> 909 x | <input type="checkbox"/> 914 x |
| <input type="checkbox"/> 905 x | <input type="checkbox"/> 910 x | <input type="checkbox"/> 915 x |

Soit un montant total de :

_____ numéros x 15€ = _____ €

Pour une commande de plus de 20 numéros le prix passe de 15€ à 13€ l'unité.

*Offre valable jusqu'au 31/12/12 et non cumulable avec l'offre COM'1 ÉVIDENCE. Les commandes doivent être adressées à COM'1 ÉVIDENCE, 20 av. Édouard Herriot - 92350 Le Plessis-Robinson. Les commandes doivent être accompagnées de votre règlement. Les commandes doivent être adressées à COM'1 ÉVIDENCE, 20 av. Édouard Herriot - 92350 Le Plessis-Robinson. Les commandes doivent être accompagnées de votre règlement.

JE VOUS INDIQUE MES COORDONNÉES :

Nom _____ Prénom _____
 Entreprise _____ Fonction _____
 Adresse _____
 Code postal _____ Ville _____
 Tél. : _____ Fax : _____
 Email : _____
 Mand de ne pas communiquer mon adresse mail
 Je joins mon règlement d'un montant de _____ € TTC par Chèque à l'ordre de COM'1 ÉVIDENCE

ATTENTION : tous les règlements doivent être libellés exclusivement à l'ordre de COM'1 ÉVIDENCE

Je règle à la réception de la facture

Je souhaite recevoir une facture acquittée

Cochez la case correspondante à l'ordre de COM'1 ÉVIDENCE



LIGNE 14 - FONDATIONS SPÉCIALES DE LA NOUVELLE STATION PORTE DE CLICHY

AUTEURS : PIERRE JULLIEN, DIRECTEUR DE TRAVAUX, SYSTRA - ANTOINE MARTIN, RESPONSABLE TRAVAUX, SYSTRA - AXEL DAVOUT, DIRECTEUR, EIFFAGE TP FONDATIONS - ANDREA RIGAZIO, DIRECTEUR TECHNIQUE, I.CO.P. S.P.A. - ÉRIC MATHIEU, CHEF DE SERVICE, BIEP PÔLE GÉOTECHNIQUE ET OUVRAGES SOUTERRAINS

LE CONTEXTE URBAIN ET SOUTERRAIN TRÈS DENSE DE LA PORTE DE CLICHY, ET LA CRÉATION DE 3 ACCÈS SECONDAIRES À LA FUTURE STATION, RENDENT CET OUVRAGE PARTICULIÈREMENT COMPLEXE À RÉALISER. LES TRAVAUX DE FONDATIONS COMPRENNENT DES PAROIS MOULÉES DE DIMENSIONS EXCEPTIONNELLES, LE RECOURS INTENSIF À DES TECHNIQUES VARIÉES DE TRAITEMENT DE SOL - INJECTIONS, JET GROUTING, CONGÉLATION - SELON UN PHASAGE CONTRAINT ET AVEC UNE COACTIVITÉ TRÈS IMPORTANTE.



1

© EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

PRÉSENTATION DU PROJET CONTEXTE URBAIN

Le lot n°1 du prolongement de la ligne 14 au nord est le premier lot d'infrastructure du Nouveau Grand Paris. Il comprend la construction de 3,6 km de tunnel et de deux nouvelles stations. La station Porte de Clichy assure la correspondance avec la ligne 13 et dessert le quartier des Batignolles. Elle est située le long de l'avenue de la Porte de Clichy dans le XVII^e arrondissement de Paris, entre le boulevard Bessières et le périphérique. Son volume intérieur est de 120 m x 20 m, la dalle de couverture

est destinée à recevoir un immeuble de 10 étages. Les travaux comportent 3 ouvrages d'accès, 2 en correspondance avec la ligne 13, et un accès au futur Tribunal de Grande Instance, reliés à la station par 3 couloirs souterrains. Le contexte urbain est très dense. Le gisement de la station est conditionné par son insertion entre la démission de la ligne 13, direction Asnières, et le collecteur de Clichy datant du XIX^e siècle. Sa profondeur est imposée par le passage du tunnel sous les ouvrages de la ligne du RER C au sud, et sous la boucle de la ligne 13 et les pieux

1- Vue d'ensemble des travaux de fondations dans l'emprise principale de chantier.

1- General view of foundation works on the main area covered by the project.

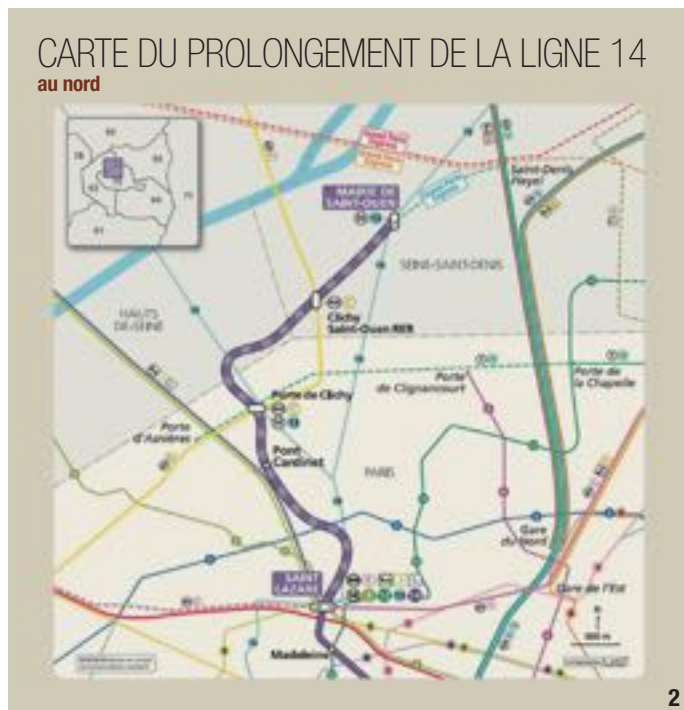
du boulevard périphérique au nord. Les réseaux concessionnaires sous l'avenue de la Porte de Clichy sont très nombreux : chauffage urbain (DN950/DN500), HTA de 225 KVA, galerie Eau de Paris, multitubulaire France Télécom, etc. Selon les méthodes de réalisation, les réseaux sont déviés ou les travaux sont adaptés à leur présence. L'établissement scolaire Honoré de Balzac est situé à quelques mètres, la station étant implantée dans le tréfonds de sa cour. Côté opposé de l'avenue de Clichy sont situés un hôtel et des logements. ▶

Le projet étant concomitant à ceux du tramway T3 et la construction de la tour du tribunal de grande instance, un phasage complexe d'emprises est mis en place.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Les formations géologiques rencontrées, courantes en région parisienne, sont les suivantes :

- Calcaire de Saint-Ouen (CSO) : alternance de marnes beige/blanchâtre/rosée plus ou moins graveleuses et de niveaux calcaires. Épaisseur de 10 m.
 - Sables de Beauchamp (SB) : sable moyen à fin vert kaki, grésifiés en partie supérieure. Partie inférieure limoneuse grisâtre avec des passages grésifiés et carbonatés. Épaisseur de 20 m.
 - Marnes et caillasses (MC) : alternance de bancs marneux, régulièrement pourvus de graviers et blocs calcaires et de bancs calcaires : une partie supérieure généralement décomprimée, une partie inférieure compacte et quasi rocheuse, avec des résistances locales de 130 MPa. Épaisseur de 15 m.
 - Calcaire Grossier (CG) : calcaire composé de 3 niveaux distincts de dureté et d'homogénéité variable.
- La nappe du bartonien baignant le CSO et le toit des SB, et la nappe du lutétien baignant la base des SB, les



2- Carte du prolongement de la ligne 14 au nord.
3- Modélisation 3D de la station et de ses ouvrages annexes.

2- Map of the northern extension of Line 14.
3- 3D model of the station and its ancillary structures.

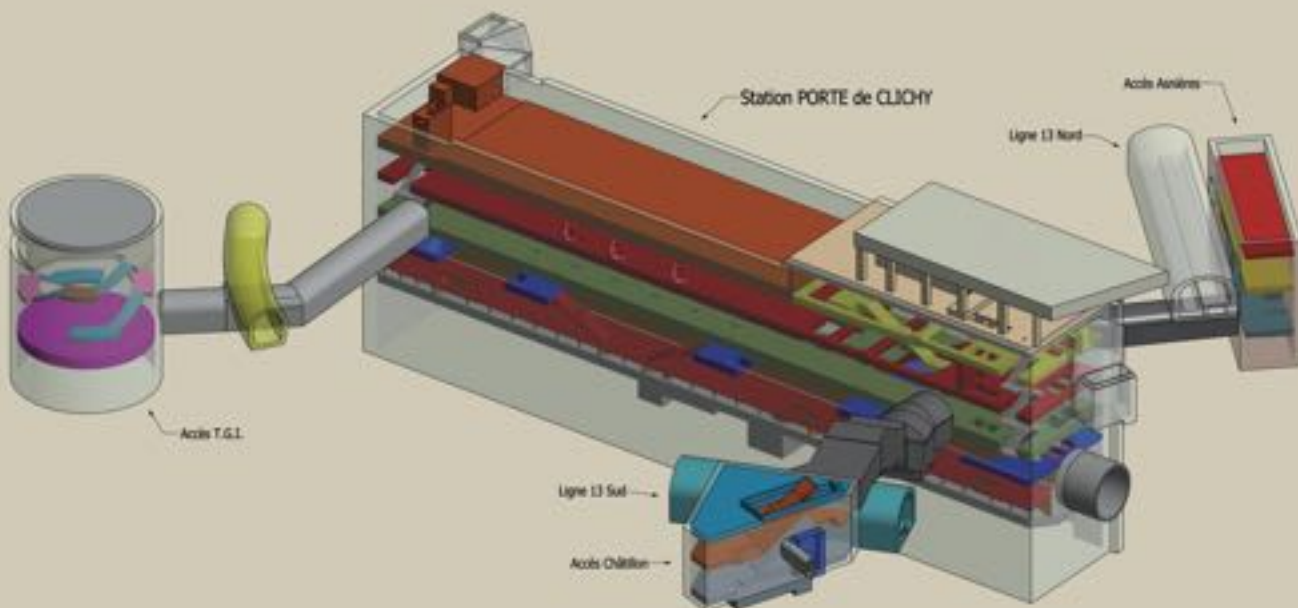
MC et le CG, sont confondues au droit de la station. Le niveau de nappe quasi permanent est à 8 m de profondeur (24 m NGF). Le projet s'inscrit en zone de dissolution du gypse selon l'arrêté inter-préfectoral du 25 février 1977. De nombreuses zones décomprimées ont été reconnues au droit de la station, attestant d'une activité ancienne ou récente de dissolution du gypse. Par conséquent, le rabattement de nappe a été écarté en phase de conception de manière à ne pas aggraver les zones décomprimées et écarté les impacts potentiels tels que la

perte de butée derrière les parois ou la remontée de fontis sous les ouvrages. Des critères de débits restrictifs ont été définis en correspondance avec les impératifs du dossier Loi sur l'Eau. Il en résulte des dispositifs de mise hors d'eau constitués de parois moulées et d'un radier injecté permettant de limiter les débits de pompage cumulés à 200 m³/h au droit de la station. La présence de la nappe implique en outre la réalisation de traitements d'étanchement au droit de l'entrée et de la sortie du tunnelier dans la station et au droit des futurs couloirs de correspondance.

TRAVAUX DE FONDATIONS SPÉCIALES

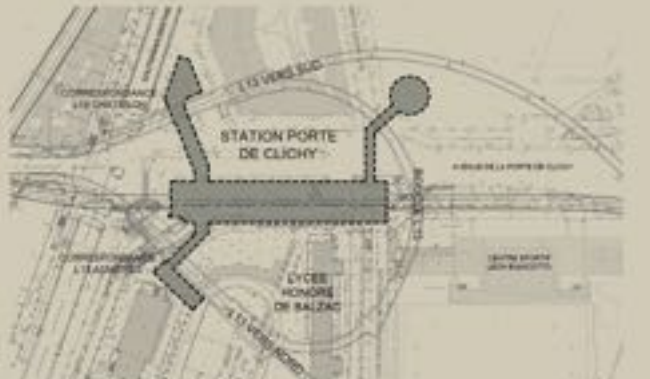
Les structures internes de la station seront construites à l'abri d'une enceinte en parois moulées d'épaisseur 1,52 m et de profondeur 57 m. La mise hors d'eau de la boîte est réalisée par le biais d'un radier injecté de 5 m d'épaisseur trouvant son équilibre à 59 m de profondeur dans le CG. L'entrée et la sortie du tunnelier dans la station nécessitent la réalisation préalable de massifs d'étanchéité en jet grouting. La nature des fondations des puits d'accès résulte de la manière dont les couloirs franchissent, par-dessus ou par-dessous, la boucle de la ligne 13. Ainsi, les puits d'accès TGI et Bessières, dont les fonds de fouille se trouvent à environ 20 m sous le TN, sont réalisés par le biais de parois moulées d'épais-

MODÉLISATION 3D DE LA STATION ET DE SES OUVRAGES ANNEXES



PLAN DE SITUATION

de la station et des principaux avoisinants



seur 1 m et de profondeur 39 m, et mis hors d'eau par des radiers injectés de 3 m d'épaisseur dans les MC. Le puits d'accès Berthier est, quant à lui, réalisé à l'abri d'une berline comprenant 34 pieux de diamètre 800 mm, pour un fonds de fouille à 14 m sous le TN. Le risque de dissolution du gypse est traité par la réalisation d'injections de comblement gravitaires préalables à la réalisation des parois moulées.

Les radiers définitifs des ouvrages sont conçus avec la prise en compte du risque de brèche.

Les galeries d'accès sont réalisées en creusement traditionnel après réalisation de traitements de terrain visant à améliorer l'imperméabilité des sols en place et à limiter à 15 m³/h les débits de pompage pendant le creusement. Les galeries étant positionnées à l'interface CSO-SB, les traitements sont mixtes : jet grouting en partie inférieure et injections de traitement en partie

supérieure. Les contraintes d'emprise et la présence des ouvrages souterrains nécessitent le recours à des techniques complémentaires pour traiter les zones d'ombre inaccessibles selon les méthodes précédentes. Ainsi, la congélation de sols est prévue pour traiter un rameau de 19 m du couloir d'accès au puits TGI situé sous la boucle de retournement de la ligne 13.

TRAVAUX DE PAROIS MOULÉES ÉTUDES DES PAROIS DE LA STATION

La station Porte de Clichy est un ouvrage particulièrement complexe dont l'étude du soutènement a nécessité une multiplication des coupes de calcul pour prendre en considération toutes ses spécificités :

→ Une profondeur de fouille de 33 m, des parois moulées approfondies en phase d'exécution à 57 m, avec une

4- Plan de situation de la station et des principaux avoisinants.

5- Vue des travaux depuis l'avenue de Clichy.

6- Coupe géologique au droit de la station Porte de Clichy.

4- Location plan of the station and neighbouring features.

5- View of the works from Avenue de Clichy.

6- Geological cross section at the level of Porte-de-Clichy station.

fiche mécanique de 12 m pour une fiche totale de 24 m ;

→ Une géologie qui varie du nord au sud ;

→ Un ouvrage constitué de deux parties, l'une réalisée sous dalle, l'autre à ciel ouvert, avec des phasages d'exécution différents ;

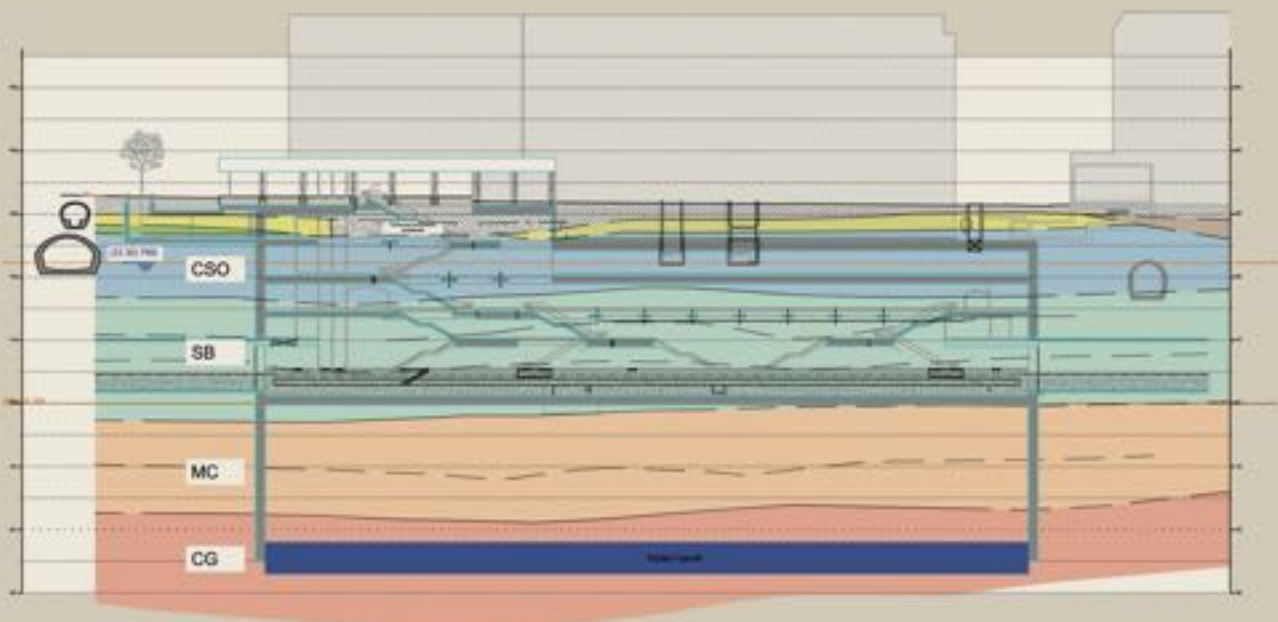
→ Des niveaux de fond de fouille variables, entre -1,1 et -3,2 m NGF ;

→ Des niveaux de dalle variables, avec des épaisseurs variables sur un même niveau et la présence de mezzanines ;

→ La présence de nombreuses ouvertures dans les parois pour permettre le passage du tunnel (2) et des galeries de connexion avec les autres ouvrages annexes (3+2) ;

→ La prise en compte de surpressions sous le radier en phase définitive avec une hauteur d'eau de 25 m qui induit une mise en traction de la fiche des parois moulées ; ▷

COUPE GÉOLOGIQUE AU DROIT DE LA STATION PORTE DE CLICHY



7- Vue en plan des travaux de fondations spéciales de la station et de ses accès.

8- Coupe transversale de la station : parois moulées, structures internes, fond injecté.

7- Plan view of special foundation works for the station and its access points.

8- Cross section of the station: diaphragm walls, internal structures, cement-grouted foundation.

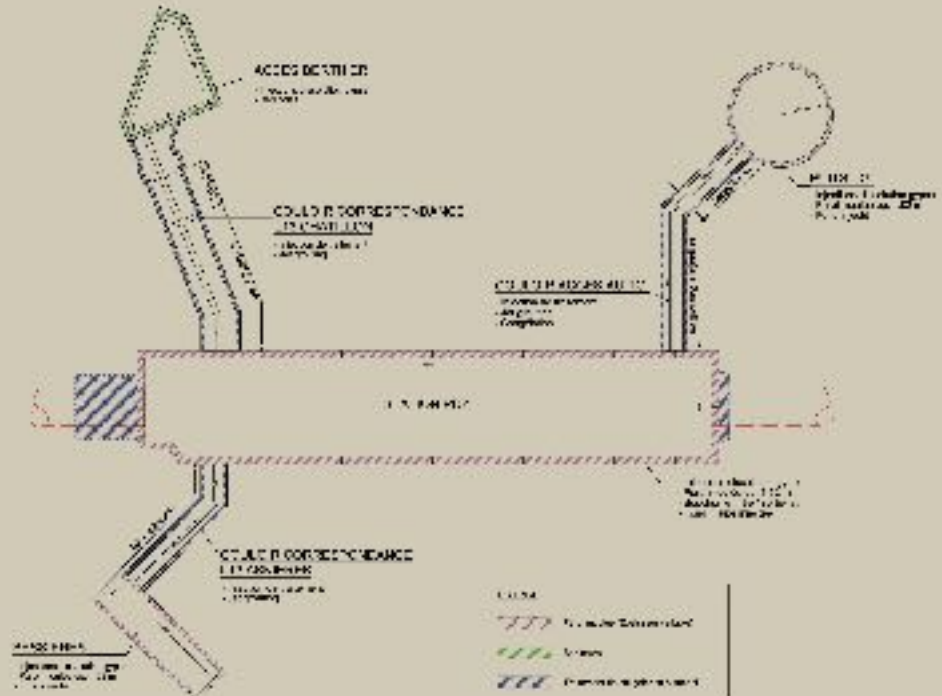
- La prise en compte, sur une grande portion de l'ouvrage, de charges verticales descendantes en tête de parois dues à la construction d'un futur immeuble dont les parois de station serviront de fondations ;
- L'équipement des fiches des parois moulées en géothermie.

Les études d'exécution des structures internes de la station ont été menées par le même bureau d'études que les parois moulées, ce qui a permis de travailler avec une plus grande efficacité et réactivité compte tenu de l'interaction sol-structure particulièrement importante pour le dimensionnement de ce type d'ouvrage.

Au total, 18 coupes de calcul ont été nécessaires à l'étude des parois de la station, avec 39 cages d'armatures différentes sur un total de 85. La justification des parois a été réalisée selon les principes de calcul des soutènements aux modules de réaction - méthode MISS, en appliquant la formule de Schmidt pour le calcul des modules de réaction. Compte tenu de l'environnant, en particulier la présence d'un collecteur 6 000 mm situé à une distance de 6 m des parois moulées, les seuils de déformation sont très faibles : 5 mm en tête, 30 mm en ventre et 10 mm pour le collecteur. Une démarche itérative a dû être menée entre les calculs classiques de soutènements et les calculs en déformation à partir d'un modèle aux éléments finis 3D (réalisé par Arcadis) pour le dimensionnement du dispositif de butons précontraints. Les moments à l'ELU sont de l'ordre de 5 600 kN.m par mètre de paroi. Le ratio moyen d'armatures est de 115 kg/m³

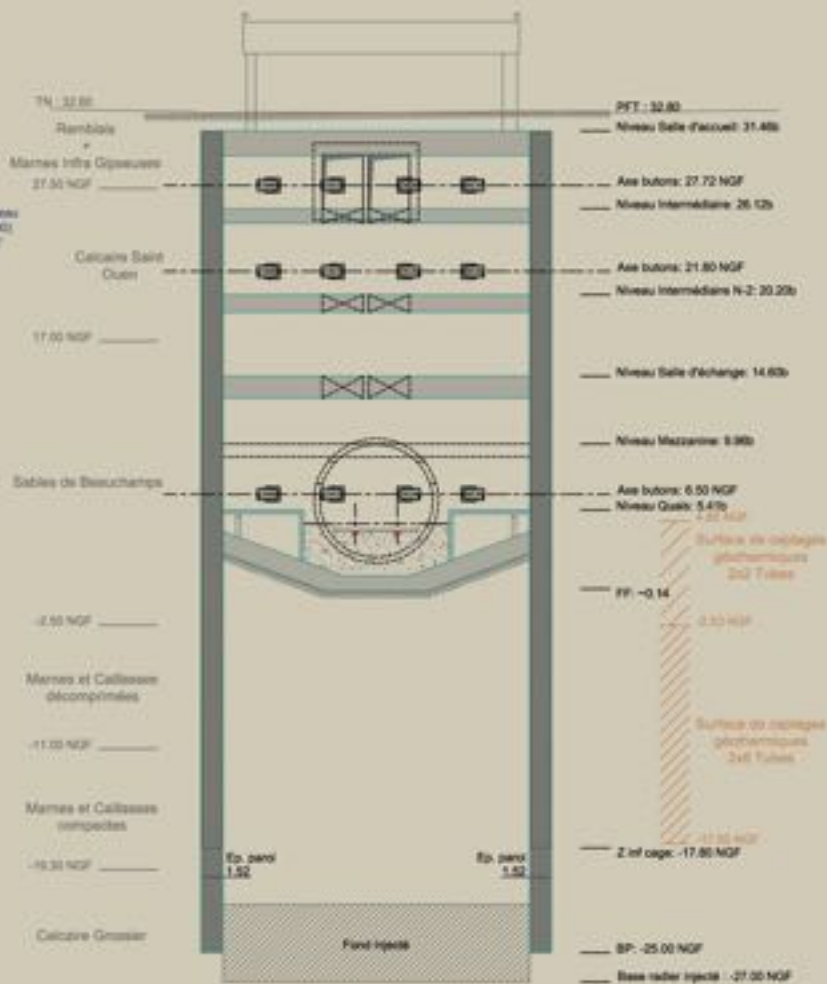
VUE EN PLAN

des travaux de fondations spéciales de la station et de ses accès



COUPE TRANSVERSALE DE LA STATION

parois moulées, structures internes, fond injecté



CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES RETENUES

pour les calculs de soutènement

	Épaisseur (m)	g (t/m ³)	C _{travaux} (t/m ²)	F _{travaux} (°)	E _m (MPa)	P ₁ * (MPa)
Remblais	1,5 à 4	2	0	25	4	0,4
Marnes infragypseuses	1,4 à 2,5	1,9	3	25	25	2
Calcaire de St-Ouen	10 à 11	1,9	4,5	25	25	2,5
Sable de Beauchamp Sup.	10	2,1	0	38	60	5
Sable de Beauchamp Inf.	7 à 10	2,1	4	25	60	5
Marnes & caillasses décomprimées	8 à 10	2	3	30	35	2,5
Marnes & caillasses saines	7 à 8	2,1	5	35	100	5
Calcaire grossier		2,2	10	40	>200	>5

9- Caractéristiques mécaniques retenues pour les calculs de soutènement.

10- Coupe types des armatures de paroi, section courante et zone fibrée du tympan sud.

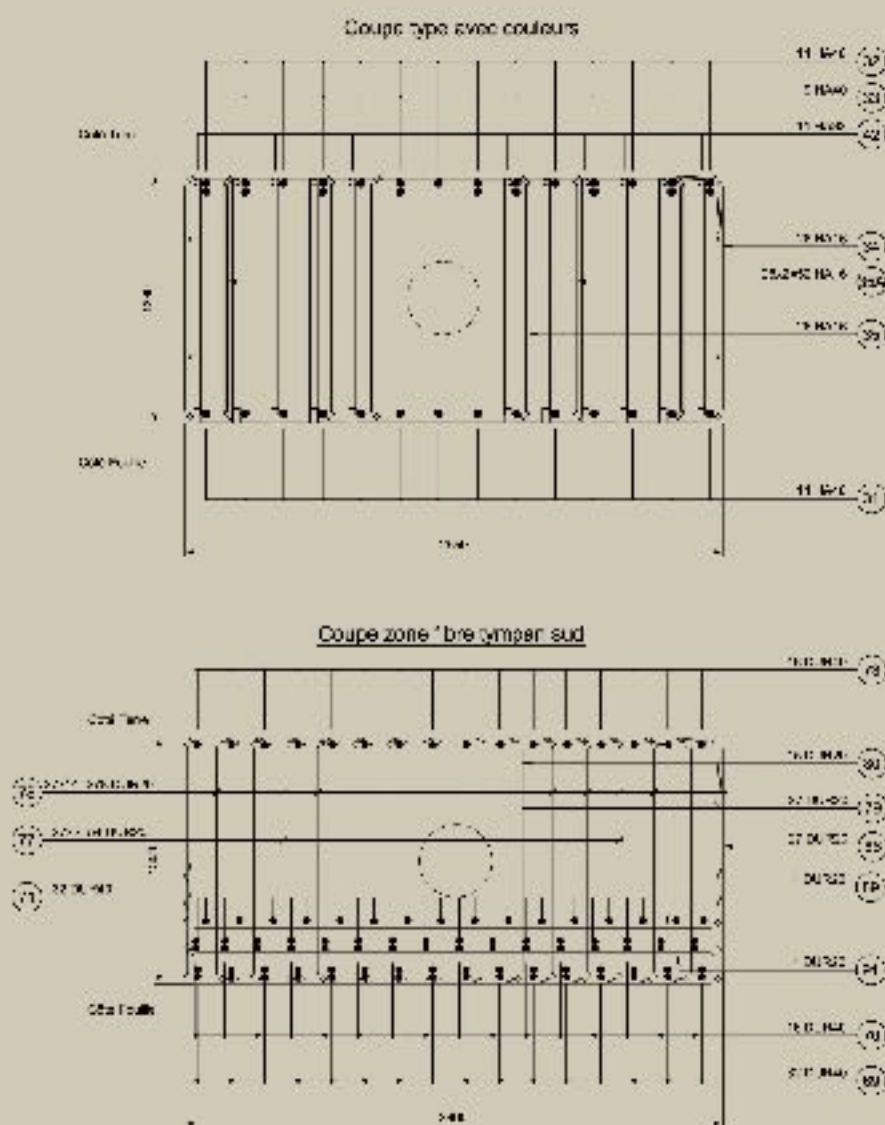
9- Mechanical properties adopted for retaining structure computation.

10- Typical cross sections of wall reinforcing bars, standard section and fibre zone on the southern front wall.

9

COUPE TYPES DES ARMATURES DE PAROI

section courante et zone fibrée du tympan sud



et présente ponctuellement des densités supérieures à 150 kg/m³ (sections d'armatures de 250 cm²/m).

MÉTHODES ET TRAVAUX

Les parois moulées de PCY sont constituées de 45 panneaux, de 7,10 m de longueur courante. Le préforage est réalisé jusqu'à une profondeur moyenne de 15 m à la benne mécanique lourde Stein de 25 t montée sur un porteur Liebherr HD 885, le reste du panneau étant excavé à l'hydrofraise. L'équipement mobilisé est un cutter Bauer BC40 monté sur un porteur MC96 HDS-T. Le temps de cycle moyen est d'un panneau foré tous les trois jours et demi, en deux postes.

La centrale de traitement des boues de forage est constituée d'une unité Bauer BE500 assurant criblage, cyclonage primaire et secondaire (coupure à 20 µm), couplée à une centrifugeuse et une unité de floculation. La capacité de stockage de bentonite de la centrale a été dimensionnée selon 3 fois le volume des plus grands panneaux (650 m³). Les déblais sont stockés dans une fosse tampon avant d'être chargés dans des semi-remorques et évacués en décharge. Les analyses de sols préalables ont permis de définir un maillage de pollution des premières couches, les déblais ISD1+ et ISDND sont stockés séparément et évacués en décharge spécialisée.

Les panneaux sont équipés de 2 cages d'armatures de 48 à 51 m de long et 2,95 m de large, de 30 t en moyenne, réalisées chacune par assemblage de 3 éléments, de 14 à 24 m, préfabriqués en usine et livrés par transport exceptionnel de nuit.

10



11

© EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

Les panneaux sont équipés de coupleurs pour les liaisons avec les dalles et le radier définitif, à raison de 10 000 unités sur l'ensemble de la station, de tubes d'auscultation sonique et inclinométriques. Les 15 derniers mètres des cages d'armatures, situés dans la fiche hydraulique de la paroi, sont équipés de 8 tuyaux de géothermie par face pour capter le gradient thermique entre le sol et l'air libre et

alimenter en chauffage ou climatisation les futurs locaux techniques. Les zones devant être démolies par la suite (passages du tunnelier dans les tympans, entrées des 3 galeries, édicules) sont équipées d'armatures en fibre de verre. Les joints entre panneaux sont réalisés par l'intermédiaire d'un coffrage d'arrêt de bétonnage (CWS de 20 t) visant à intégrer aux structures définitives un joint d'étanchéité noyé.

11- Vue d'ensemble des travaux de paroi moulée de la station PCY.

12- Mise en place des cages d'armatures.

13- Mise en place du coffrage CWS 1500 mm et blocage en tête de murette guide.

Les CWS sont décoffrés à la benne, équipée de mains de décoffrage permettant de guider la benne le long du coffrage.

Une formule de béton spécifique a été mise au point en vue d'assurer le maintien de la rhéologie pendant une durée de 10 heures (XA2 C35/45 385 CEM III/B [190 ; 240] Rhéo 10h). Deux centrales à béton sont mobilisées, simultanément si nécessaire, l'une, principale, située sur l'île Saint-Denis, l'autre sur l'emprise du projet à Pont Cardinet. Elles disposent d'une flotte de toupies d'un volume total de 150 m³. Après mise en place et aboutement des cages d'armatures le matin même, y compris raccords de géothermie, la mise en œuvre du béton est effectuée par l'intermédiaire de deux colonnes, à une cadence moyenne de 90 m³/h. Les parois moulées du puits d'accès TGI sont réalisées en simultané de celles de la station principale, nécessitant la mobilisation d'un deuxième



12



13

© EIFFAGE TP FONDATIONS



14- Excavation à l'hydrofraise du puits TGI et extraction du coffrage CWS.
15- Coupes du traitement de terrain du couloir TGI : Injections, jet et congélation.

14- Excavation of the TGI shaft by hydrofraise and removing the CWS formwork.
15- Cross sections of ground treatment for the TGI corridor: grouting, jet grouting and freezing.

© EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

14

atelier de forage à l'hydrofraise (Bauer BG 28 + BC32) et d'une deuxième station de traitement des boues de forage. Celles du puits Bessières seront quant à elles réalisées à la suite de celles de la station et avec le même équipement. Le terrassement de la station et des puits d'accès ne sera possible qu'après achèvement des radiers injectés et réalisation d'un essai de pompage. Pour la station, cet essai sera conduit avec 4 puits de pompage, et 6 piézomètres intérieurs ou extérieurs à l'enceinte.

TRAVAUX DE TRAITEMENT DE SOLS

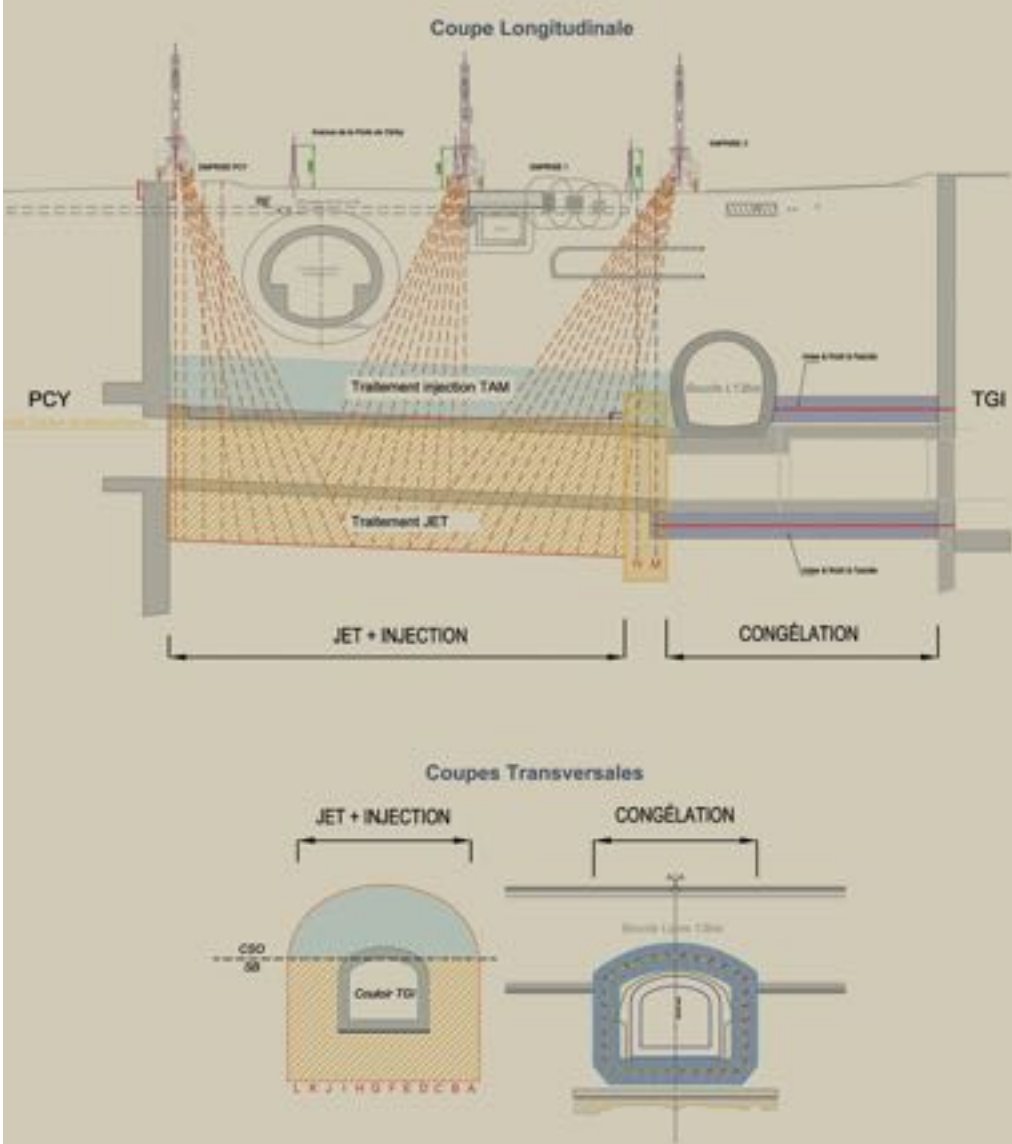
OBJECTIF DES TRAITEMENTS

Les techniques de jet grouting et d'injection de traitement sont mises en œuvre pour des raisons principales d'étanchéité :

- Break in/break out : en entrée de station, un massif en jet grouting dont les dimensions 15 x 13 x 13 m (L x l x h) découlent du diamètre d'excavation et des caractéristiques du tunnelier. Ce bouchon est évidé pour permettre un essai d'étanchéité en grand validant la continuité du traitement mis en œuvre ; en sortie, le traitement est sécuritaire et limité à deux lignes de jet puisqu'un dispositif de cloche est mis en place à l'intérieur de la station, permettant au tunnelier d'assurer avant percement une étanchéité parfaite et une pression au front optimale.
- Radiers injectés : en injection d'imprégnation du type IRS par tubes à manchettes (TAM) dans les MC et en remplissage de fissures du type MPSP dans le CG, visent à limiter les débits d'exhaure en fond de fouille lors du terrassement.
- Galeries d'accès : le traitement d'étanchéité limite les venues d'eau pendant le creusement en traditionnel. La géométrie du traitement est définie afin d'assurer un traitement périphérique de l'ordre de 3 m. La cote altimétrique de transition entre les SB et le CSO définit la transition jet/injection avec un recouvrement de 0,5 m.
- Congélation de sols pour le traitement préalable de la galerie TGI située sous la ligne 13.

Les plans de tir sont établis à partir des mailles définies à l'issue des plots d'essai et prennent en compte l'ensemble des contraintes géométriques du projet : emprises morcelées, réseaux, ouvrages souterrains (ligne 13 et collecteur de Clichy).

COUPES DU TRAITEMENT DE TERRAIN DU COULOIR TGI
Injections, jet et congélation



© EIFFAGE TP FONDATIONS

15

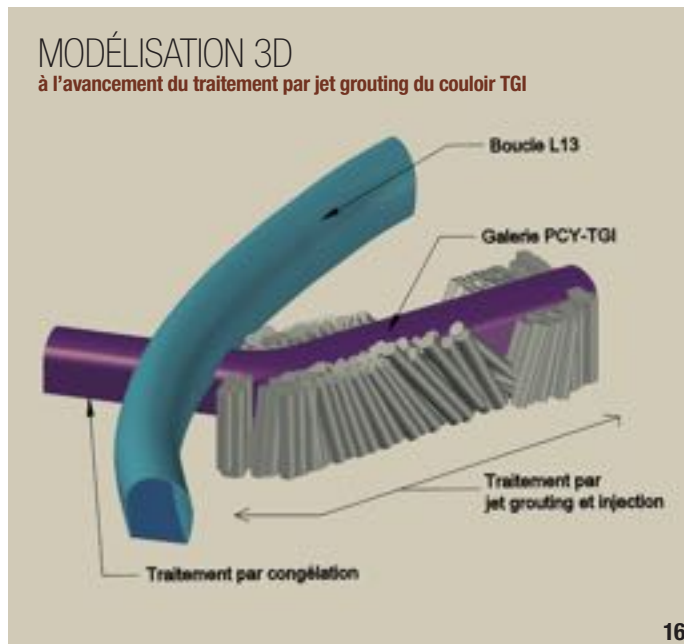
JET GROUTING

La technique de jet grouting est mise en œuvre dans les Sables de Beauchamp (SB) exclusivement. Un plot d'essai de 4 colonnes, d'énergies comprises entre 40 et 75 MJ/m, a permis de déterminer les paramètres d'exécution du jet double. Les diamètres ont été évalués par méthode indirecte de type cylindre électrique. Les mesures ont mis en évidence un diamètre moyen globalement homogène au sein des SB, à l'exception de resserrlements observés au droit des niveaux grésifiés. Le diamètre retenu pour les travaux est de 1,50 m pour une énergie de 62 MJ/m.

Pour s'assurer de la continuité du traitement, les déviations des forages de jet grouting sont mesurées à l'aide d'un Tigor en pied de forage. Le plan de tir tel que réalisé est ensuite reconstitué en 3D afin d'identifier d'éventuelles discontinuités et les traiter par des colonnes supplémentaires.

Le planning d'exécution, dense et très séquencé, nécessite la mobilisation de 3 ateliers simultanément. Les foreuses sont de marque Casagrande, C6, C8, C14 choisies en fonction de la profondeur, des inclinaisons des tirs et des emprises à disposition, et équipées jet et Tigor. Les pompes HP sont de marque Metax et Techniwel, avec des puissances de 600 Ch. Chaque atelier mobilise 4 personnes en 2 postes de 8 h et produit en moyenne 3 colonnes par jour.

La gestion des spoils, mélange de coulis de ciment et de terrain résurgant en surface, est particulièrement contraignante. Les trois ateliers produisent jusqu'à 200 m³ de spoils par jour, qui doivent être stockés et évacués rapidement avant leur prise. Les fosses à spoils sont réalisées avec des murs



© EIFFAGE TP-FONATIONS

en L préfabriqués en béton ou en terre pour celles devant être déplacées en cours de chantier. Elles sont mélangées pour disposer d'un matériau ni trop liquide ni trop solide, et évacuées quotidiennement avec la rotation d'une quinzaine de camions sur le chantier.

INJECTIONS D'IMPRÉGNATION PAR TUBES À MANCHETTES

Les injections d'imprégnation à cadence lente par tubes à manchettes (TAM) sont mises en œuvre dans les MC pour les radiers injectés des ouvrages d'accès et dans le CSO pour l'étanchement des galeries. Elles sont réalisées en deux phases distinctes :

→ Remplissage de l'espace annulaire entre tubes et parois du forage : réalisation du coulis de gaine, à l'aide d'un coulis riche en ciment.

→ Injection sous pression en plusieurs passes, réalisées sélectivement au droit de toutes les manchettes espacées de 33 cm. Des critères d'arrêt pression et volume sont définis, et conditionnent le déroulement des opérations de traitement. Les critères de volume se basent sur un volume d'absorption compris entre 15 et 20%, avec une pression d'arrêt de 10 bars.

Les travaux ont fait l'objet d'un plot d'essai grandeur nature, avec réalisation de deux mailles hexagonales permettant d'évaluer l'influence de différents paramètres : injectabilité, maillage, ciment et formule du coulis. Une analyse approfondie des diagrammes d'injection a permis d'identifier le coulis d'injection présentant la meilleure pénétrabilité et la maille pré-

16- Modélisation 3D à l'avancement du traitement par jet grouting du couloir TGI.

17- Jet incliné depuis emprise secondaire située sur l'avenue de Clichy, au pied des immeubles.

18- Au premier plan : forages pour radier injecté PCY ; au second : forages pour injections TAM couloir TGI ; au troisième : forages pour jet grouting couloir TGI.

16- 3D model of progress on jet grouting treatment of the TGI corridor.

17- Inclined jet from a secondary location on Avenue de Clichy, at the base of the buildings.

18- In the foreground: drilling for Porte-de-Clichy cement-grouted invert; further back: drilling for TAM grouting of TGI corridor; third level back: drilling for jet grouting of TGI corridor.



© EIFFAGE TP-FONATIONS

sentant l'efficacité maximale en termes de réduction de la perméabilité, pour atteindre 10⁻⁶ m/s. Le coulis retenu est basé sur un ciment CEM III 52.5, et mis en œuvre selon une maille rationnelle de 2,15 m x 1,85 m. La pression de refus est réduite à 5 bars à proximité d'ouvrages sensibles et la maille est resserrée en conséquence.

Les ateliers de forage sont les mêmes que ceux utilisés pour le jet grouting. Ces travaux mobilisent également 2 centrales de fabrication Lodos 30 et 2 centrales d'injection containerisées équipées chacune de 10 presses d'injection Elena 10 et d'un système de contrôle automatique Lutz Cinaut.

INJECTIONS DE TYPE MPSP AU SEIN DU CALCAIRE GROSSIER

La technique d'injection de traitement avec sacs séparateurs type « Multi Packer Sleeved Pipe » (MPSP) est mise en œuvre pour réalisation du radier injecté de la station Porte de Clichy dans le CG, la non déformabilité de la formation rocheuse rendant inopérante la technique classique de l'injection au tube à manchettes avec coulis de gaine. La hauteur de 5 mètres à traiter est scindée en deux par des sacs séparateurs positionnés à l'extérieur du tube d'injection, gonflés au coulis de ciment préalablement à l'injection.

Un phasage particulier est mis en œuvre, avec forages périphériques/centraux, et primaires/secondaires, afin de confiner le volume du terrain injecté et garantir la qualité du traitement effectué.

La pression de refus est de 20 bars, avec des critères d'arrêt volume définis sur la base d'un volume d'absorption de 10 % en fonction de la présence de zones productives localisées.

19- Sacs séparateurs installés sur tube à manchettes pour injections MPSP.

19- Separator bags installed on sleeve pipe for MPSP grouting.



© EIFFAGE TP FONDATIONS

PLANNING

L'OS du lot 1 a été donné le 31 mars 2014 pour un délai global du GC de 60 mois et un démarrage des travaux le 1^{er} août 2014.

Au 15 juillet 2015, les ouvrages de parois moulées de la station principale et de l'accès secondaire TGI devront avoir été achevés, y compris essais de pompage.

Les traitements de terrain sont réalisés sur la période novembre 2014 à décembre 2015. La congélation du couloir TGI est prévue sur la période septembre 2015 à décembre 2015. Le chantier de fondations est de 18 mois avec 85% de l'activité réalisée la première année. Il représente approximativement 100 000 heures travaillées dont 5% en insertion. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROIS MOULÉES 1 520 MM : 16 800 m², 25 200 m³

PAROIS MOULÉES 1 020 MM : 6 000 m², 6 000 m³

PIEUX 800 MM : 34 unités, 550 m

INJECTIONS DE COMPLEMENT : 12 700 m de forage, 2 500 m³ de mortier

INJECTIONS D'IMPRÉGNATION PAR TUBES À MANCHETTES : 10 000 m de forage, 2 000 m³ de coulis

INJECTIONS DE REMPLISSAGE DE FISSURES DE TYPE MPSP : 11 500 m, 1 000 m³ de coulis

JET GROUTING : 43 000 m de forage, 1 400 colonnes, 17 000 m³ de jet

DÉBLAIS PM ET SPOILS JET GROUTING : 55 000 m³

POMPAGE : 7 puits, 10 piézomètres

CONGÉLATION : 19 m de couloir, section d'excavation de 30 m²

MONTANT DES TRAVAUX DE FONDATIONS DE PCY : ~34 M€

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : RATP - STIF

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Systra

TITULAIRE : Groupement Eiffage TP / Razel-Bec

SOUS-TRAITANT FONDATIONS PCY : Groupement Eiffage TP Fondations / I.CO.P. S.P.A.

BUREAU D'ÉTUDES FONDATIONS PCY : Eiffage TP (Biep pôle Gos)

ARMATURES : Sendin

BÉTON : Béton Solutions Mobiles (BSM)

DÉBLAIS FONDATIONS : Atm

ABSTRACT

LINE 14 - SPECIAL FOUNDATIONS FOR THE NEW PORTE-DE-CLICHY STATION

P. JULLIEN, SYSTRA - A. MARTIN, SYSTRA - A. DAVOUT, EIFFAGE TP FONDATIONS - A. RIGAZIO, I.CO.P. S.P.A. - É. MATHIEU, BIEP

Work section 1 on Line 14 of the Paris metro is the first major sub-project of the "New Greater Paris" project. Construction of the new Porte de Clichy station requires the large-scale use of various special foundation techniques:

- Diaphragm walls by mechanical grab and hydrofraise, of thicknesses 1.02 and 1.52 metres, down to a depth of 57 m in limestone, equipped at various points with glass-fibre reinforcements, geothermal power pipes and waterstop seals installed with CWS formwork;
- 800 mm piles forming a Berlin-type retaining wall;
- Double-jet air-grout jet grouting, sleeve pipe treatment grouting, MPSP crack filling grouting and ground freezing to improve in-situ soil permeability. □

LÍNEA 14 - CIMENTACIONES ESPECIALES EN LA NUEVA ESTACIÓN PORTE DE CLICHY

P. JULLIEN, SYSTRA - A. MARTIN, SYSTRA - A. DAVOUT, EIFFAGE TP FONDATIONS - A. RIGAZIO, I.CO.P. S.P.A. - É. MATHIEU, BIEP

El Lote 1 de la línea 14 del metro parisino representa la primera obra de envergadura del Nouveau Grand Paris. La construcción de la nueva estación Porte de Clichy requiere la utilización, a gran escala, de varias técnicas de cimentaciones especiales:

- Muros pantalla con cuchara mecánica e hidrofresa, con espesores de 1,02 y 1,52 m hasta una profundidad de 57 m en la caliza, equipadas puntualmente con estructuras de fibra de vidrio, tubos de geotermia y juntas waterstop instalados con encofrado CWS;
- Pilotes de 800 mm formando un encofrado entre pilotes;
- Jet grouting doble jet aire-lechada, inyecciones de tratamiento mediante tubos manguitos, inyecciones de relleno de grietas MPSP y congelación para mejorar la permeabilidad de los suelos in situ. □

LIGNE D DU TRAMWAY DE STRASBOURG CONSTRUCTION D'UN PONT SUR LE RHIN

AUTEURS : DIDIER GUTH, DIRECTEUR MÉTIER, ARCADIS - MATTHIEU BORT, MANAGER DE PROJET, ARCADIS

LE NOUVEAU PONT SUR LE RHIN, OUVRAGE TRANSFRONTALIER PLACÉ SOUS MAÎTRISE D'OUVRAGE DE LA COMPAGNIE DES TRANSPORTS STRASBOURGEOIS (CTS), FAIT PARTIE DES TRAVAUX D'EXTENSION EST DE LA LIGNE D DU TRAMWAY DE STRASBOURG VERS KEHL, EN ALLEMAGNE. L'OUVRAGE RETENU, DANS LE CADRE D'UN MARCHÉ DE CONCEPTION-RÉALISATION, EST UN OUVRAGE DE TYPE BOW-STRING. SA CONCEPTION ET SA RÉALISATION ONT ÉTÉ ATTRIBUÉES AU GROUPEMENT BOUYGUES TPRF/VICTOR BUYCK/LINGENHELD/FRÜH IB/ARCADIS ET MARC BARANI ARCHITECTES.



1

© CYRILLE THOMAS / ATELIER MARC BARANI

CONTEXTE GLOBAL DE L'OPÉRATION

Le nouveau Pont sur le Rhin fait partie des travaux d'extension Est de la ligne D du tramway de Strasbourg vers Kehl, en Allemagne, (figure 2) et sera dédié au tramway et aux circulations douces, piétons et cycles.

Cette extension comprend un tronçon d'environ 1 950 m sur le territoire de la

ville de Strasbourg et un tronçon d'environ 800 m situé sur le territoire de la ville de Kehl.

L'ouvrage transfrontalier, financé à parts égales par l'Allemagne et la France, a été placé sous maîtrise d'ouvrage de la Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS).

Sa conception et sa réalisation ont été attribuées au groupement composé

1- Perspective architecturale de l'ouvrage.

1- Architect's perspective view of the bridge.

de Bouygues Travaux Publics Régions France, Victor Buyck Steel Construction, Lingenheld Travaux Publics, Früh Ingenieurbau, Arcadis et Marc Barani Architectes à l'issue d'une consultation dans le cadre d'un marché de conception-réalisation qui s'est déroulée d'août 2012 à décembre 2012.

Le montant prévisionnel des travaux est de 25 millions d'euros HT.



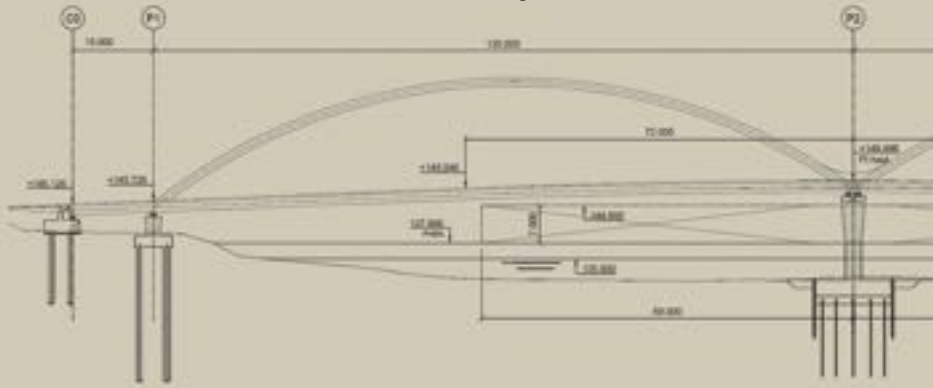
- 2- Extension Est des lignes du tramway.
- 3- Élévation de l'ouvrage côté français.
- 4- Élévation de l'ouvrage côté allemand.

- 2- Eastern extension of tramway lines.
- 3- Elevation view of bridge on French side.
- 4- Elevation view of bridge on German side.

© EUROMETROPOLE DE STRASBOURG

2

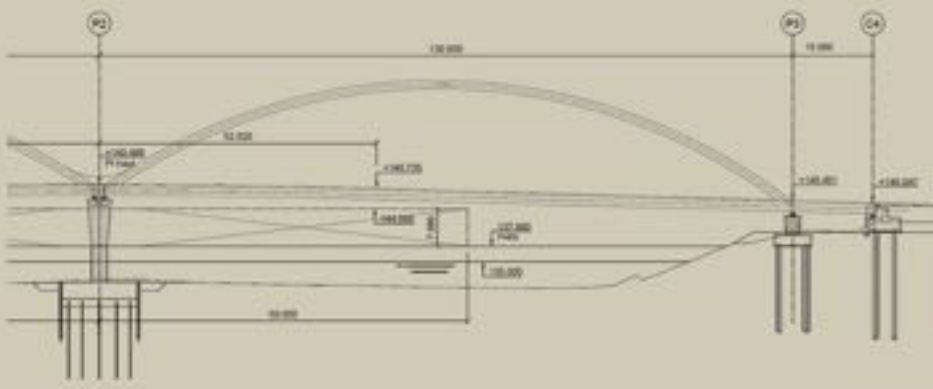
ÉLÉVATION DE L'OUVRAGE CÔTÉ FRANÇAIS



© BOUYGLUES

3

ÉLÉVATION DE L'OUVRAGE CÔTÉ ALLEMAND



© BOUYGLUES

4

Le projet d'ouvrage présenté par le groupement (figure 1) est un ouvrage de type bow-string (arc auto-ancré) métallique, quasi symétrique, comportant 4 travées de 15-130-130-15 m. La réglementation qui s'applique, pour le dimensionnement et la justification de l'ouvrage, est la réglementation française, à savoir les Eurocodes. L'ouvrage a été dimensionné pour supporter les

trams-trains qui l'emprunteront dans le futur. Il sera situé entre les actuels Pont de l'Europe (franchissement routier) et Pont de Kehl (franchissement ferroviaire). L'année 2013 a été dédiée aux essais complémentaires, notamment géotechniques, et à la finalisation des études de projet. Les travaux sur site ont démarré au printemps 2014.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE CONTEXTE RÉGIONAL

À l'origine, le Rhin était divisé en de multiples bras qui serpentaient dans un lit majeur large de plusieurs kilomètres. De 1842 à 1876 son cours a été concentré dans un lit mineur moins sinueux déterminé par des « digues de correction ». C'est ce lit mineur que franchira l'ouvrage.

L'aménagement des zones portuaires de Strasbourg et de Kehl a par la suite considérablement modifié le lit majeur du Rhin, les anciens bras du fleuve ayant été comblés en vue de l'aménagement de plateformes industrielles et lors de l'aménagement des berges. Au cœur de la plaine alluviale rhénane, le site se trouve au droit d'importants dépôts quaternaires constitués par les alluvions du Rhin.

Leur épaisseur est supérieure à 100 m dans ce secteur.

Sous les alluvions récentes sableuses et limoneuses dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs mètres au droit d'anciens chenaux comblés, il s'agit d'une succession et d'une intercalation de dépôts lenticulaires constitués de galets, graviers et sable en proportion variable. Ces dépôts peuvent être recoupés par des lentilles argileuses en profondeur.

CONTEXTE LOCAL

Les différentes campagnes d'investigations géotechniques ont comporté : 16 forages pressiométriques (profondeur maximale de 37 m), 7 sondages carottés (profondeur maximale de 44 m), 3 sondages au pénétromètre statique, 14 puits de reconnaissance à la pelle mécanique et des essais d'identification en laboratoire. Elles ont permis de mettre en évidence la succession de couches suivante, de haut en bas :

→ Des remblais situés au niveau des berges sur une épaisseur très variable. Ils sont de nature hétérogène, le plus souvent sablo-limoneux et incorporent quelques graviers et des débris divers (briques, fer, ...);



5

© ARCADIS

→ Les alluvions anciennes jusqu'en pied des sondages (30 m). De par leur nature lenticulaire, la proportion des éléments qui les composent (sable, graviers, galets) peut varier sur de courtes distances, aussi bien latéralement qu'en profondeur. Toutefois, il est observé une augmentation globale des caractéristiques mécaniques de ces sols avec la profondeur. Une analyse des diagrammes de compacité a ainsi permis de découper cette formation en trois horizons distincts : des alluvions lâches, des alluvions de compacité irrégulière et des alluvions régulièrement compactes. Des lentilles à dominante argileuse ont été localement mises en évidence en profondeur.

Les alluvions sont baignées par l'importante nappe phréatique de la plaine alluviale rhénane qui est sujette à fluctuation saisonnière en liaison avec le Rhin.

CONCEPTION ET TRAVAUX DES FONDATIONS DES APPUIS

L'ouvrage comportant 4 travées repose sur 5 appuis (figures 3 et 4) :

- La culée C0 et la pile P1, sur la berge côté français,
- La pile P2, dans le Rhin,
- La pile P3 et la culée C4, sur la berge côté allemand.

Le mode de fondation a dû être adapté aux contextes géotechniques mis en évidence au droit de ces cinq appuis.

FONDATIONS PROFONDES SUR LES BERGES

Conception des appuis

Sur les berges, compte-tenu de la présence de remblais et d'un horizon d'alluvions lâches en tête des alluvions anciennes, le mode de fondation s'est orienté vers la réalisation de pieux forés-tubés (pieux FTR classe 1, catégorie 4 au sens de la norme NF P94-262). Le dimensionnement a conduit à des pieux de 1200 mm de diamètre dont la profondeur d'ancrage a été adaptée aux hétérogénéités des alluvions anciennes au droit de chaque appui afin de solliciter en pointe les alluvions anciennes régulièrement compactes. Ainsi, au droit de la berge française, les pieux de la culée C0 présentent une

5- Début des travaux de préchargement côté France.

6- Forage des pieux de P1.

7- Élévation de la pile P2.

5- Start of soil preloading works on French side.

6- P1 pile drilling.

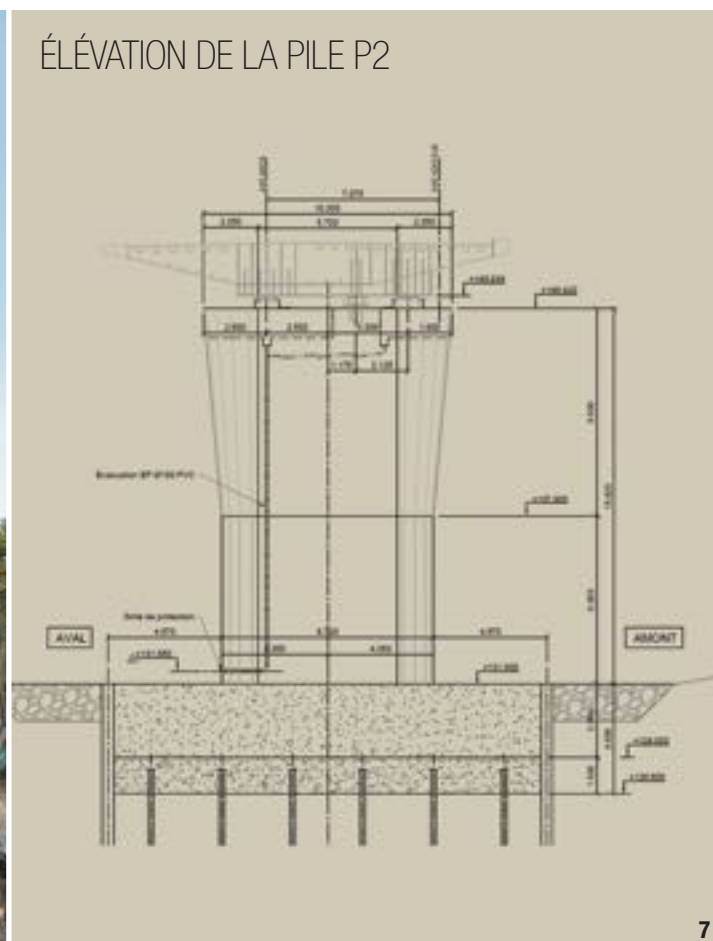
7- Elevation view of pier P2.



6

© ARCADIS

ÉLÉVATION DE LA PILE P2



7

© BOUYGUES



© BOLYGUIES

8

longueur de 13 m alors que pour ceux de la pile P1, il était prévu une longueur de 25 m. Cet allongement a été justifié par la présence en profondeur d'une lentille argileuse de deux mètres d'épaisseur présentant des caractéristiques mécaniques médiocres, après vérification du critère de poinçonnement en tête de cette lentille.

Au droit de la berge allemande, c'est une surprofondeur localisée du toit des alluvions anciennes régulièrement compactes qui a conduit à retenir une longueur de pieux plus importante en C4 par rapport à P3 (longueur respective de 20 et 16 m). Pour les pieux des culées, une attention particulière a été attachée à éviter les

phénomènes parasites consécutifs au tassement des sols sous l'effet de la surcharge apportée par les remblais d'accès contigus dont la hauteur finale varie de 4 à 6 m. En effet, la présence de remblais hétérogènes, de caractéristiques mécaniques médiocres (module pressiométrique E_M de l'ordre de 4 à 7,5 MPa) laissait craindre que

ne se produisent des tassements pluricentimétriques pouvant se répercuter sur les pieux par frottement négatif et déplacement horizontal de la couche de remblai (g(z)).

Un préchargement des remblais d'accès à 120% de la charge finale a donc été prévu préalablement à la réalisation des fondations profondes. L'équipement des remblais d'accès par profilomètres hydrostatiques a permis de s'assurer que les tassements mesurés restaient du même ordre de grandeur que ceux estimés (inférieurs à 10 cm) et que les tassements étaient stabilisés au bout d'un mois.

Travaux de préchargement

Les travaux de préchargement (figure 5) ont débuté côté français en juin 2014 et, côté allemand, en septembre 2014 afin de permettre au Biergarten⁽¹⁾ de Kehl situé usuellement sur l'emprise du chantier d'effectuer une ultime saison estivale.

Travaux de fondations profondes

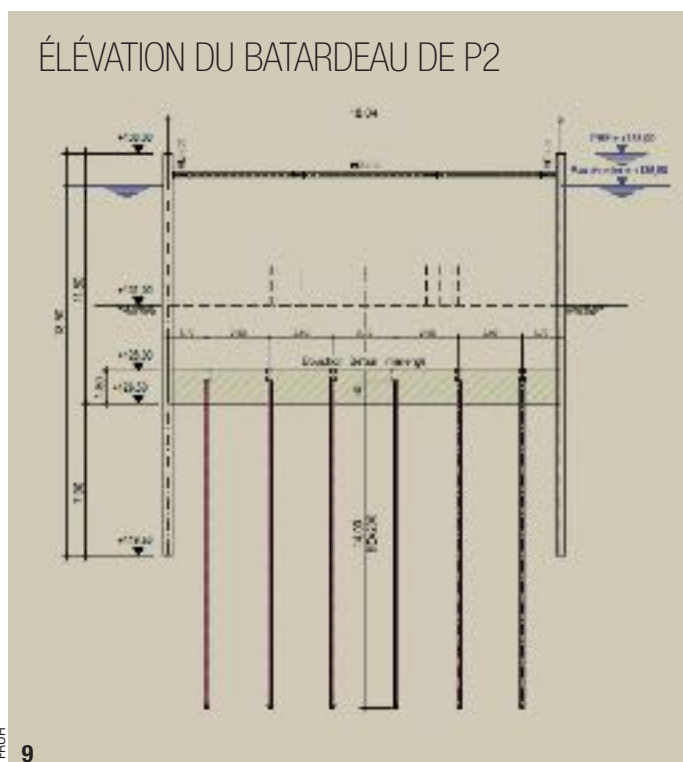
Les travaux de fondations profondes en France ont démarré en octobre 2014 par les pieux de la pilette P1, suivis par ceux de C0.

Les travaux côté allemand ont débuté par les pieux de P3 en février 2015, suivis par ceux de C4.

Les pieux ont été forés à l'aide d'une tarière, montée sur une machine Liebherr LB 28, à l'abri d'un chemisage temporaire sur toute la hauteur de forage.

8- Vue d'ensemble du chantier. Pile P2, estacade d'accès, plateforme et appuis côté allemand.
9- Élévation du batardeau de P2.

8- General view of the project. Pier P2, access breakwater, platform and supports on German side.
9- Elevation view of P2 cofferdam.



© FRÜH

9

**FONDATION SUPERFICIELLE
DANS LE RHIN**

**Conception de l'appui et étude
du mode de réalisation**

Dans le Rhin, les alluvions anciennes régulièrement compactes ont été rencontrées 2,5 m environ sous le fond du fleuve qui se trouve à 7 m sous le niveau des Plus Hautes Eaux. Le mode de fondation de la pile P2 s'est donc orienté vers une solution de semelle superficielle sollicitant directement les sols de bonne compacité ($P_{1^*} = 4,2 \text{ MPa}$ et $E_M = 55 \text{ MPa}$). Les dimensions de semelle résultant des études d'exécutions sont de 18 x 14,5 m et 3 m d'épaisseur.

La construction hors d'eau de la semelle nécessite la réalisation d'un batardeau métallique et d'un bouchon en béton immergé. Dès la phase de l'appel d'offre, le groupement, sur la base de l'expérience de l'entreprise Früh Ingenieurbau a opté pour une solution de bouchon en béton non armé de faible épaisseur avec clouage passif dans le fond du Rhin. Le choix de cette solution permet de s'affranchir d'un bouchon de forte épaisseur (de l'ordre de 10 m sous le niveau de la semelle) venant contrer par son poids propre les poussées d'eau. Malgré une certaine complexification technique de réalisation, l'économie réalisée en termes de longueur de palplanches, de terrassement et de béton s'avère tout à fait intéressante.

Les calculs justificatifs ont été menés en prenant en compte, bien entendu, le phasage de construction, mais également l'effet du courant dans le Rhin et le risque d'affouillement devant les palplanches. Le niveau d'eau maximal pour les calculs a été pris égal à 136,50 m, soit +10 m au-dessus du fond de fouille. En cas de montée des eaux au-delà de cette cote le batardeau aurait été rempli.

Ceci a conduit à un batardeau constitué de profils Larssen L607, en nuance S355 de longueur 18,50 m, fichés de 11,50 m dans le fond du Rhin. Ses dimensions en plan sont 18 m x 14,50 m. Les angles du batardeau ont été cassés pour favoriser les écoulements hydrauliques. La stabilité du batardeau a nécessité un lit de butons et liernes disposé à 10,50 m du fond de fouille. Les liernes sont constituées de profilés HEB 700 et les butons de HEB 280. La forme du butonnage a été conçue de manière à ne pas interférer avec le coffrage de la pile P2 comme on peut le voir sur la vue en plan (figure 12).



10

© ARCADIS



11

© ARCADIS



12

© FRÜH

10- Mise en place du premier demi-cadre de butonnage.

11- Tubes de la future estacade et première moitié du batardeau lors des crues de l'été 2014.

12- Vue en plan du batardeau de la pile P2.

10- Putting in place the first staying frame half.

11- Tubes of the future breakwater and first half of the cofferdam during floods in the summer of 2014.

12- Plan view of the cofferdam of pier P2.



© ARCADIS

13



© ARCADIS

14



15

Les palplanches ont été étanchées à l'aide d'un joint bitumineux de type Beltan. Une connexion via des aciers passifs avec la future semelle a été prévue de manière à ce que le batardeau puisse remplir son rôle de parafouille.

Travaux

Les travaux fluviaux ont démarré en juin 2014. L'ensemble des travaux effectués pour la réalisation de la pile P2 a été facilité par le fait que la passe navigable côté France est neutralisée depuis les travaux du pont ferroviaire situé en aval de l'ouvrage. La mise en fiche et le battage des palplanches ont été effectués selon la technique du battage libre. Des tubes métalliques ayant servi de support pour un gabarit ont préalablement été mis en fiche par vibrofonçage. Un demi-cadre de butonnage a ensuite été fixé sur ces tubes afin d'assurer le guidage des palplanches.

13- Travaux d'enrochements.
14- Vibrofonçage des clous.

15- Bétonnage du bouchon à l'aide du mât.

13- Rockfill works.
14- Installing nails by vibration.
15- Plug concreting with mast.

D'importantes crues, exceptionnelles pour la saison, ont interrompu à plusieurs reprises les travaux, le débit du Rhin passant de 800 m³/s à plus de 3000 m³/s (figure 11). Le vibrofonçage des palplanches s'est effectué sans

encombre jusqu'à la cote théorique, sauf pour 1 paire pour laquelle cette cote n'a pas pu être atteinte, suite à la rencontre d'un obstacle à 7 m de profondeur sous le lit du Rhin. Les crues ont provoqué un creusement de l'ordre de 4 m à l'avant du batardeau, ce qui a nécessité de mettre en œuvre des enrochements supplémentaires pour stopper l'affouillement. Par la suite, le niveau du fond autour du batardeau a fait l'objet d'un relevé hebdomadaire, sans montrer de reprise ou de poursuite du phénomène. Conformément aux préconisations du projet, un tapis d'enrochements a été mis en œuvre sur 5 m de large et 1 m de profondeur autour du batardeau (figure 13). La granulométrie des enrochements mis en œuvre est constituée de LMB 10/60, LMB 40/200 et CP 90/250 suivant la norme EN 13383. Du point de vue du matériel, les travaux ont nécessité l'utilisation d'un ponton de

dimension 30,50 m x 12,20 m équipé d'une grue flèche treillis Sennbogen 655HD, d'un conteneur à matériel et d'un bungalow vestiaire. Concernant les travaux spécifiques de palplanches, la grue a été équipée d'un vibreur Müller MS24-HFV ou d'un marteau trépiedeur Menck SB 270 et SB 400.

Bouchon cloué

Le bouchon cloué, d'un mètre cinquante d'épaisseur, est constitué d'un béton C25/30, non armé et de 26 clous passifs en profilés HEA 200 de longueur 14 m, munis d'une platine de 350 x 350 mm² en tête. Chaque clou reprend ainsi les sous-pressions relatives à environ 9 m² de bouchon, soit un effort maximal de 1040 kN aux ELUs. Les clous sont équipés de manchettes d'injection de diamètre 32 mm. Le béton non armé a été justifié à l'aide d'un calcul aux éléments finis de type

Avant démarrage du terrassement, il a été décidé par le groupement de surcreuser le fond de fouille de 20 cm minimum, de manière à être certain d'obtenir l'épaisseur minimale requise par le calcul, en toutes circonstances. Les clous ont été vibrofoncés après le terrassement du fond de fouille, à l'aide d'un vibreur Müller MS16-HFV (figure 14) Le coulis de ciment injecté à partir de la centrale Unigrout 200-100E-02n au fur et à mesure du vibrofonçage des clous était constitué de ciment Portland PZ CEM II/BS 32,5 R avec un rapport C/E de 2.

Bétonnage du bouchon

Le bouchon a été bétonné le 23 octobre 2014, par les équipes de Bouygues TP RF, à l'aide d'un mât de bétonnage situé à l'extrémité de l'estacade provisoire (figure 8) reliant le Pont de l'Europe existant au batardeau.

Le béton livré au niveau de la base vie sur la berge française a ainsi dû être pompé sur une longueur de près de 220 m. Le bétonnage a nécessité l'intervention de plongeurs pour guider la chaussette de bétonnage 10 m sous le niveau du Rhin.

La mise à sec du batardeau a ensuite pu être faite sans encombre et après rattrapage du niveau de l'arase supérieure du bouchon à l'aide d'un BRH (figure 16) les travaux de ferrailage de la semelle ont pu démarrer.

À la date de parution de cet article, tous les appuis ont été réalisés et le premier tablier est en cours d'assemblage sur la plateforme située sur la rive allemande. □

⁽¹⁾ Biergarten : littéralement « jardin à bière » = terrasse en plein air où ledit breuvage peut être consommé.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Compagnie des Transports Strasbourgeois

ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE : Egis Jmi

MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉNÉRALE DES EXTENSIONS : GETAS

GROUPEMENT DE CONCEPTION-RÉALISATION

MANDATAIRE, EN CHARGE DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL : Bouygues TP RF

CO-TRAITANT, EN CHARGE DES TRAVAUX DE CHARPENTE MÉTALLIQUE : Victor Buyck Steel Construction

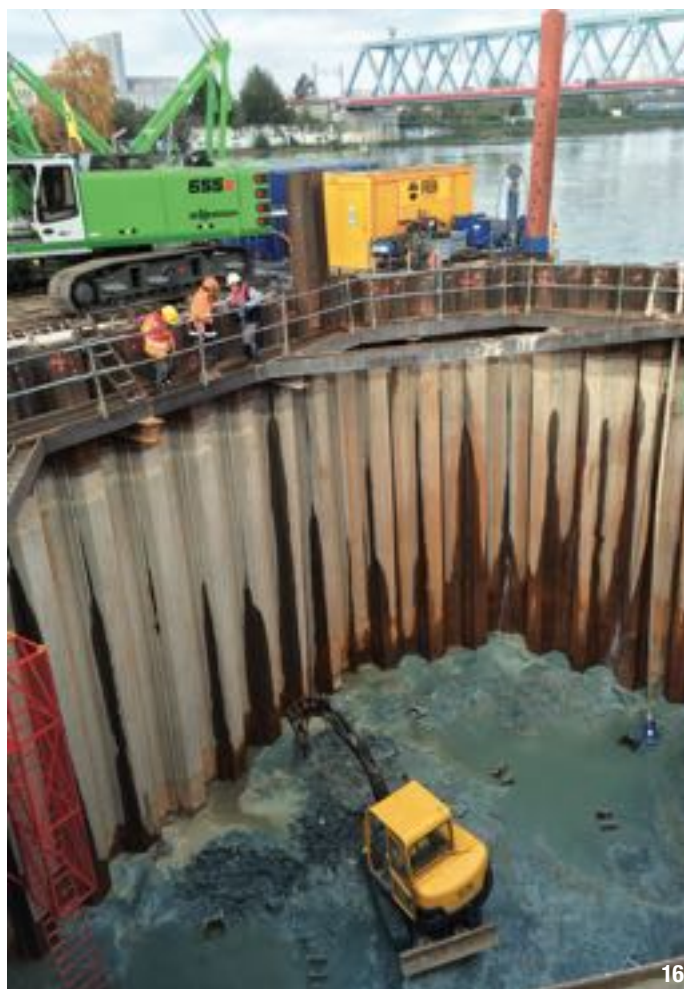
CO-TRAITANT, EN CHARGE DES TRAVAUX DE TERRASSEMENT ET D'ASSAINISSEMENT : Lingenheld

CO-TRAITANT, EN CHARGE DES FONDATIONS SPÉCIALES ET DES TRAVAUX FLUVIAUX : Früh Ingenieur Bau

CO-TRAITANT, MAÎTRE D'ŒUVRE INTÉGRÉ, EN CHARGE DE LA CONCEPTION, DU VISA ET DU SUIVI DES TRAVAUX : Arcadis

CO-TRAITANT, MAÎTRE D'ŒUVRE, EN CHARGE DE LA CONCEPTION, DU VISA ARCHITECTURAL ET DU SUIVI DES TRAVAUX :

Marc Barani Architectes



16

© ARCADIS

16- Mise à niveau de l'arase supérieure du bouchon à l'aide d'un BRH.

16- Levelling the plug's top levelling course with a hydraulic rock breaker.

PRINCIPALES QUANTITÉS

PALPLANCHES : 205,6 t

CLOUS : 19,64 t

BÉTON DE BOUCHON : 365,5 m³

BÉTON DE PIEUX : 651,4 m³

ARMATURES DE PIEUX : 53,1 t

ABSTRACT

STRASBOURG TRAMWAY LINE D BUILDING A BRIDGE OVER THE RHINE

DIDIER GUTH, ARCADIS - MATTHIEU BORT, ARCADIS

The new bridge over the Rhine, for the client Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS), forms part of the extension works on Strasbourg tramway in the direction of Kehl, in Germany. Its design and construction were awarded to the consortium formed by Bouygues TPRF, Victor Buyck SC, Lingenheld TP, Früh IB, Arcadis and Marc Barani Architectes, following a request for proposals for a Design and Build contract. The four supports located on the banks are supported by pile foundations, while the central support in the eastern Rhine has a shallow foundation. Its execution required a cofferdam with a plug formed of ordinary concrete 1.50 m thick, nailed by cement-grouted metallic sections. □

LÍNEA D DEL TRANVÍA DE ESTRASBURGO CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE SOBRE EL RÍO RIN

DIDIER GUTH, ARCADIS - MATTHIEU BORT, ARCADIS

El nuevo puente sobre el río Rin, cuyo promotor es la Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS), forma parte de las obras de ampliación del tranvía de Estrasburgo hacia Kehl, en Alemania. Su diseño y realización se han atribuido a la agrupación formada por Bouygues TPRF, Victor Buyck SC, Lingenheld TP, Früh IB, Arcadis y Marc Barani Architectes, después de una consulta en el marco de un contrato de diseño realización. Los 4 apoyos situados en las márgenes se asientan sobre pilotes mientras que el apoyo central en el Rin se asienta superficialmente. Su realización precisó una ataguía cuyo tapón está constituido por hormigón sin armar de 1,50 m de grosor, clavado con perfiles metálicos inyectados. □



1
© PHOTMRW ZEPPELINE BRETAGNE

STATIONS, PUIITS ET TRANCHÉES COUVERTES DE LA LIGNE B DU MÉTRO DE RENNES

AUTEURS : DOMINIQUE BLANC, DIRECTEUR TECHNIQUE, GROUPE DACQUIN - JÉRÔME SIMON, CHEF DE PROJETS ÉTUDES, GROUPE DACQUIN - ROBIN PRUNEL, CHEF DE PROJETS ÉTUDES, GROUPE DACQUIN - THOMAS LE COR, INGÉNIEUR-DOCTEUR ÉTUDES, GROUPE DACQUIN

LES TRAVAUX DE CONSTRUCTION DE LA DEUXIÈME LIGNE DU MÉTRO DE RENNES, ACTUELLEMENT EN COURS, NÉCESSITENT LA RÉALISATION DE NOMBREUX OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT POUR LA CONSTRUCTION DES DOUZE STATIONS ENTERRÉES, DES DEUX TRANCHÉES COUVERTES ET DES SIX PUIITS PRÉVUS AU PROJET. LA FORTE VARIABILITÉ DES CONDITIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES RECONNUES SUR LA LONGUEUR DU TRACÉ A CONDUIT À LA MISE EN ŒUVRE DE MULTIPLES TECHNIQUES DE SOUTÈNEMENT.

LE PROJET

La deuxième ligne du métro de Rennes, dont les travaux sont en cours, s'étend sur environ 14 km, en traversant l'agglomération rennaise dans un axe sud-ouest/nord-est, et prévoit

deux interconnexions avec la première ligne. Les travaux de construction de la ligne, enterrée sur la majeure partie de son tracé, ont été segmentés en quatre principaux lots avec les stations associées, ainsi qu'un garage atelier.

Le lot 1 correspond à la section centrale dont le creusement est réalisé au tunnelier, les lots 2 et 3 correspondent aux zones en tranchée couverte et le lot 4 concerne la partie aérienne en viaduc.

Dans le cadre du projet, le Groupe Dacquin intervient, pour le compte des différents groupements adjudicataires, sur chacun des trois lots enterrés ainsi que sur les fondations du garage atelier et d'une station aérienne (figure 2). ▷

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Les terrains rencontrés sur le bassin rennais peuvent être grossièrement décomposés en deux ensembles : les couches superficielles, dont l'épaisseur varie de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres, constituées de remblais, limons et alluvions, surplombant le substratum rocheux du Briovérien qui présente une très grande hétérogénéité (allant de la siltite très fine au grès grossier, en passant par les inclusions granodioritiques).

Les sédiments du Briovérien (dépôts entre -610 Ma et -530 Ma) ont subi un plissement et un métamorphisme de faible niveau durant la phase hercynienne (à partir de -330 Ma), avant d'être soumis à un phénomène d'altération et d'érosion conduisant, d'une part, à une très grande hétérogénéité des terrains regroupés au sein de cette formation et, d'autre part, à un comportement mécanique fortement conditionné par l'orientation de sa schistosité et la fracturation qui y est associée. La société Arcadis, en charge des différentes campagnes d'études géotechniques des lignes a et b du métro de Rennes, a proposé une classification échelonnée des schistes du Briovérien (notée de A à D ; A correspondant aux formations les plus compactes et D aux formations les plus altérées et fracturées), plus pertinente vis-à-vis des travaux de soutènement et de terrassement que la classification géologique traditionnelle (figures 3 et 4).

Leur retour d'expérience concernant la réalisation des ouvrages de soutènement de la ligne a du métro de Rennes dans ces terrains a permis de mettre en évidence différentes problématiques liées aux schistes du Briovérien : problèmes de déviation des outils de forage (dus à la schistosité très redres-



sée de ces formations sur le bassin rennais), refus prématurés au forage du fait de la dureté des terrains (adaptation en paroi clouée au niveau des horizons les plus durs), voire de poches d'altérites entraînant des poussées sur les ouvrages de soutènement supérieures à celles anticipées.

Ces problèmes ont également été rencontrés par Dacquin au cours des dix dernières années sur certains de ses chantiers de soutènement réalisés sur le bassin rennais et cela indépendamment des techniques de soutènement mises en œuvre. C'est dans ce contexte et dans le but de mieux appréhender ces problématiques aussi bien en phase de conception que d'exécution, que l'entreprise a lancé en 2011 des travaux de recherche sur les formations du Briovérien, sous la forme d'une thèse de doctorat en collaboration avec

2- Tracé de la ligne b du métro de Rennes.

3- Variation latérale de faciès sur la station Saint-Jacques-Gaîté (schistes BRD).

4- Faciès très rocheux sur le Lot 3 (schistes BRB).

2- Route of Rennes metro line B.

3- Lateral facies variation on Saint-Jacques-Gaîté station (BRD shales).

4- Very rocky facies on work section 3 (BRB shales).

l'INSA de Rennes. Ces travaux qui se sont étalés sur 3 années, en parallèle de la phase d'appel d'offres de la ligne b, ont permis d'améliorer les connaissances de l'entreprise sur les formations du Briovérien.

La mise en place d'une instrumentation réfléchie (profils de paroi complètement instrumentés : suivi des déformations et des contraintes dans les appuis) des ouvrages de soutènements de la ligne b du métro via des outils complémentaires (inclinomètres, suivi topographique, jauges extensométriques sur les butons, cales dynamométriques sur les tirants et clous) permet un suivi en continu des ouvrages afin de détecter tout comportement non anticipé.

A posteriori, les quantités importantes de données accumulées par l'entreprise sur les différents lots du métro permettront la réalisation de rétro-analyses avancées afin de compléter les travaux de recherches déjà menés et permettre au Groupe Dacquin de proposer des solutions toujours mieux adaptées aux projets réalisés sur le bassin rennais.

LES OUVRAGES DU LOT 2

L'intervention du Groupe Dacquin, dans le cadre d'un groupement avec Sefi-Intrafor et pour le compte du groupement Legendre-Angevin a consisté en la réalisation des soutènements des deux stations Saint-Jacques-Gaîté et La Courrouze ainsi que d'une partie de la paroi moulée de la tranchée couverte Sud.

STATIONS SAINT-JACQUES-GAÎTÉ ET LA COURROUZE

Les stations Saint-Jacques-Gaîté et La Courrouze sont réalisées en fouilles ouvertes avec des hauteurs soutenues maximales de 14 à 15 m.



© PHOTOTEQUE DACQUIN

© PHOTOTEQUE DACQUIN



5

© PHOTMRW ZEPPELINE BRETAGNE

5- Vue aérienne du butonnage de la station Courrouze.

6- Coupe de calcul type sur station Saint-Jacques-Gaîté.

5- Aerial view of Courrouze station stying.

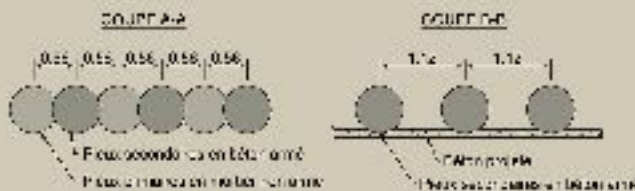
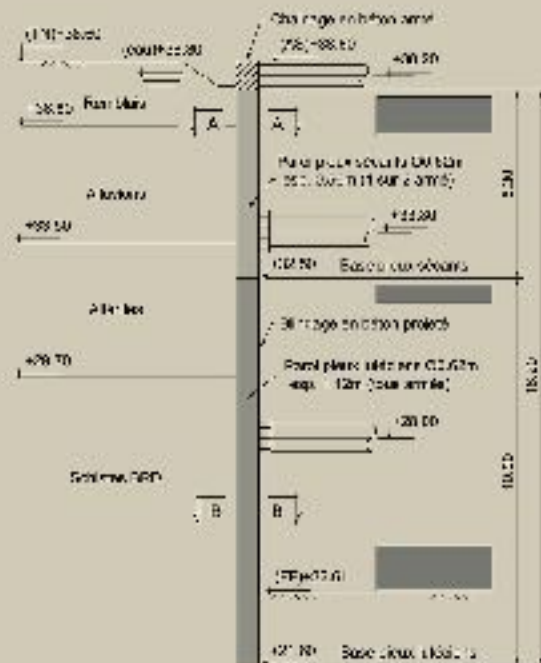
6- Standard design cross section on Saint-Jacques-Gaîté station.

Le contexte géologique et hydrogéologique, rencontré au droit des deux stations, est caractérisé par la présence d'une nappe alluviale perchée dans les horizons superficiels, surplombant les formations relativement étanches de la frange supérieure altérée du Briovérien (altérites, puis schistes BRD).

Dans cette configuration, un principe de conception mixte a été retenu pour les soutènements provisoires des deux stations (figure 6).

Le soutènement de la partie supérieure des fouilles est réalisé en paroi continue étanche de type pieux sécants, forés à la tarière creuse en diamètre 620 mm,

COUPE DE CALCUL TYPE SUR STATION SAINT-JACQUES-GAÎTÉ



6

© DR

afin de s'affranchir des venues d'eau sur la hauteur des alluvions. L'étanchéité est assurée par des pieux primaires en mortier non armé, recoupés par des pieux secondaires en béton armé. Les pieux primaires, non structurels, sont arrêtés dans le toit de la couche des altérites avec un ancrage hydraulique de 1 m. Les pieux secondaires sont réalisés jusqu'à la base du soutènement, prolongeant ainsi la paroi de pieux sécants en paroi discontinue de type lutécienne sur la partie inférieure de la fouille. Le blindage entre les pieux lutéciens est réalisé en béton projeté. Les soutènements sont stabilisés par deux à trois niveaux d'appuis constitués de butons et liernes métalliques (figure 5).

Le butonnage de la partie Nord de la station Saint-Jacques-Gaîté, d'une largeur supérieure à 40 m, a constitué un point technique prépondérant, tant en phase de conception que d'exécution des travaux. Ce butonnage a été réalisé en étoile sur trois niveaux autour de deux poteaux préfondés métalliques de type HEB 400 (figure 7). Chacun des six nœuds de liaison entre butons et poteaux est constitué d'un dé en béton coulé en place entre les quatre platines d'extrémité des tubes (figure 8).

Ce mode constructif a nécessité une précision centimétrique lors de l'assemblage du système de butonnage sur site.



7 © PHOTOTEQUE DACQUIN

TRANCHÉE COUVERTE SUD

La tranchée couverte Sud s'étend sur un linéaire d'environ 1 280 m, entre le garage atelier et le puits d'introduction du tunnelier du lot 1. Les soutènements sont intégralement réalisés en paroi moulée d'épaisseur 62 cm et 82 cm et jouent le rôle de piédroits pour la structure définitive de l'ouvrage.

La tranchée couverte présente la particularité d'être réalisée en taube sur la totalité de son tracé. Un niveau de butons provisoires, positionné en tête

de la paroi moulée, est nécessaire pour stabiliser le soutènement durant la phase d'excavation jusqu'en sous-face de la dalle de couverture. Les terrassements sont ensuite menés jusqu'au fond de fouille à l'abri de la dalle de couverture, liaisonnée à la paroi moulée au moyen de scellements.

L'entreprise a réalisé environ 13 000 m² des 40 000 m² de paroi moulée du lot 2. L'intervention s'est concentrée sur la partie Nord de l'ouvrage, avec des hauteurs soutenues allant jusqu'à 16 m

7- Vue aérienne du butonnage de la station Saint-Jacques-Gaîté.

8- Détail sur dés de liaison butons-préfondés.

7- Aerial view of Saint-Jacques-Gaîté station staying.

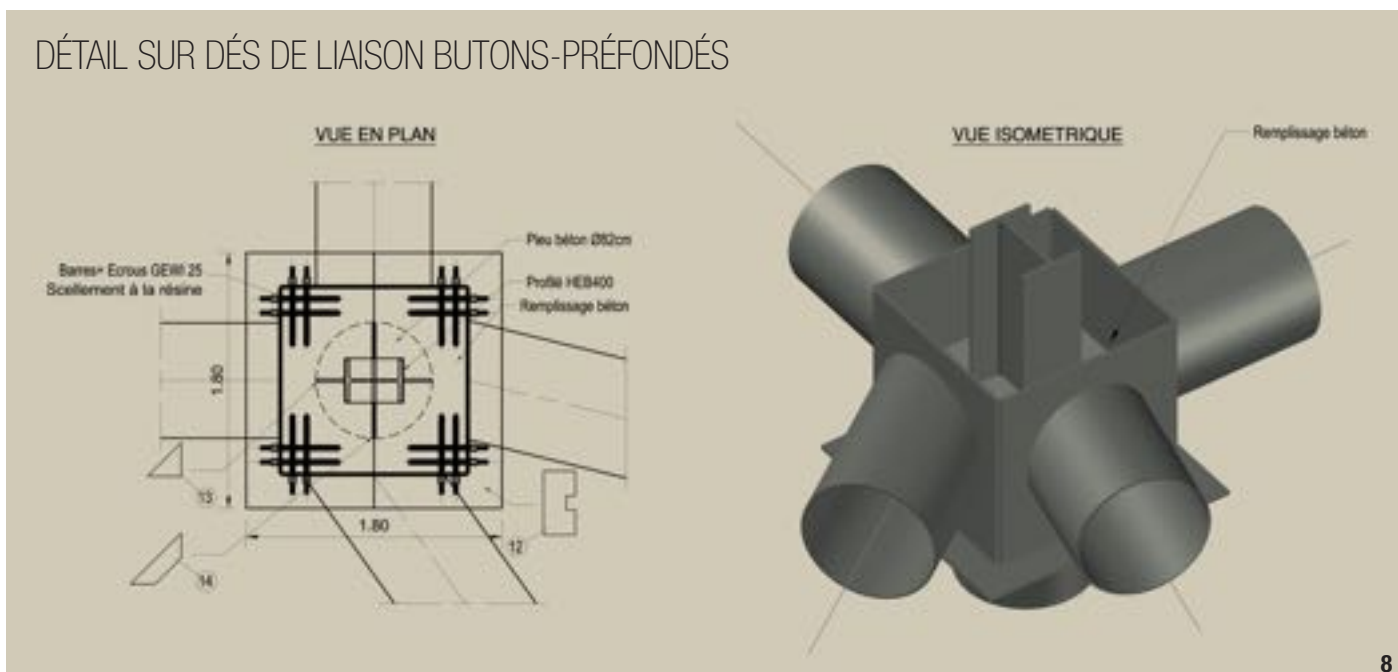
8- Detail of stays/drilled-shaft connection blocks.

à proximité du puits d'introduction, et dans une zone où la forte courbure du tracé de la tranchée a nécessité l'exécution de l'intégralité des panneaux en géométrie non-linéaire (figure 9).

LES OUVRAGES DU LOT 3

Sur le lot 3 le Groupe Dacquin réalise, pour le compte du groupement Demathieu&Bard-Cardinal-Etpo-Dtp, les soutènements de la station Irène-Joliot-Curie, de la tranchée couverte Nord et du puits de sortie du tunnelier.

DÉTAIL SUR DÉS DE LIAISON BUTONS-PRÉFONDÉS



8

© DR



9

© PHOTMRW ZEPPELINE BRETAGNE

Les formations du Briovérien rencontrées sur le lot 3 présentent un faciès très rocheux, adapté à l'utilisation de la technique de la paroi berlinoise pour les soutènements.

STATION IRÈNE-JOLIOT-CURIE ET TRANCÉE COUVERTE NORD

Le soutènement provisoire de la station Irène-Joliot-Curie est réalisé en paroi berlinoise avec blindage en béton projeté. Les profilés mis en place, de type HEA 220 et HEA 240, sont espacés de 2 à 2,5 m. La paroi, stabilisée par trois à quatre niveaux de tirants passifs auto-forants, permet de soutenir les terrains sur une hauteur allant jusqu'à 14 m. La mise en œuvre de tirants, combinée à des bandes noyées réalisées entre les profilés, a permis d'éliminer tout pro-

blème d'interaction entre le soutènement provisoire et la structure de génie civil (notamment pour la mise en place de l'étanchéité et la levée des piédroits) (figures 10 et 11).

Les travaux sont découpés en quatre phases, l'enchaînement de ces phases étant conditionné par la mise à disposition des emprises de chantier, notamment dans l'enceinte du lycée Chateaubriand.

La mise en place d'un encadrement adapté a permis de respecter des tolérances d'exécution strictes (vide de 5 cm maximum entre le nu extérieur des piédroits et la surface du béton projeté) tout en atteignant les cadences d'exécutions élevées, aussi bien en forage qu'en blindage, requises par le passage du projet.

9- Tranchée couverte Sud.

10- Vue aérienne de la station Irène-Joliot-Curie.

11- Vue depuis la grue de la station Irène-Joliot-Curie.

9- South cut-and-cover tunnel.

10- Aerial view of Irène-Joliot-Curie station.

11- View of Irène-Joliot-Curie station from crane.

Les soutènements provisoires de la tranchée couverte Nord sont exclusivement de type paroi berlinoise avec blindage bois en tête et béton projeté sur le reste de la hauteur soutenue. La tranchée, d'une longueur totale d'environ 940 m, présente une hauteur soutenue maximale de 16 m. La paroi est stabilisée par un à trois lits de butons positionnés au-dessus de la future traverse du génie civil. L'espacement courant des profilés berlinois est de 3 m (ce qui est rendu possible par la bonne tenue des faciès rocheux du Briovérien dans la partie Nord de Rennes) (figure 12).

PUITS DE SORTIE DE VITRÉ

Les ouvrages de soutènement provisoires du puits de sortie du tunnelier, ▷



10

© PHOTMRW ZEPPELINE BRETAGNE



11

© PHOTOTÉQUE DACQUIN

initialement prévus exclusivement en paroi berlinoise, ont fait l'objet d'une adaptation en paroi lutécienne (pieux de diamètre 1000 mm, forés au Kelly à 22 m de profondeur) avec cages d'armatures mixtes acier/barres fibres de verre au droit du tympan de sortie. Cette modification a été rendue nécessaire, afin d'éviter un phasage complexe de découpe de la paroi berlinoise pour permettre la sortie du tunnelier. La hauteur soutenue est d'environ 20 m et nécessite la réalisation de quatre lits de tirants autoforants, à l'exception des ancrages situés dans l'emprise du futur tunnel qui sont réalisés en fibres de verre.

Au niveau de la paroi berlinoise, le principe de bandes noyées mis en place sur la station a été reconduit, et un système de liernes métalliques pouvant être déposées avant le passage du tunnelier a été retenu au droit de la paroi lutécienne (figure 13).

LES OUVRAGES DU LOT 1

Le Groupe Dacquin intervient, pour le compte d'un groupement comprenant des entités des groupes Vinci, Spie et Legendre, sur la réalisation des soutènements des stations Colombier, Jules-Ferry et Gayeulles, ainsi que ceux du puits Voltaire.

STATION COLOMBIER ET PUIVS VOLTAIRE

Pour la station Colombier et le puits Voltaire situés en partie Sud du Lot 1, les soutènements sont constitués de pieux sécants et lutétiens de diamètre 520 à 620 mm, de 15 m de profondeur en tête de soutènement. La station et le puits de ventilation s'inscrivent dans des contraintes de chantier importantes : emprise réduite pour le puits Voltaire, contexte urbain dense et phasage de réalisation complexe pour la station Colombier (réalisée en partenariat avec l'entreprise Charier GC) (figures 14 et 15).

STATIONS JULES FERRY ET GAYEULLES

Les faciès rocheux rencontrés dans cette zone, présentant des caractéristiques mécaniques élevées (majoritairement BRB et BRC), ont rendu possible le recours aux tirants et à la technique de paroi clouée pour la réalisation des soutènements.

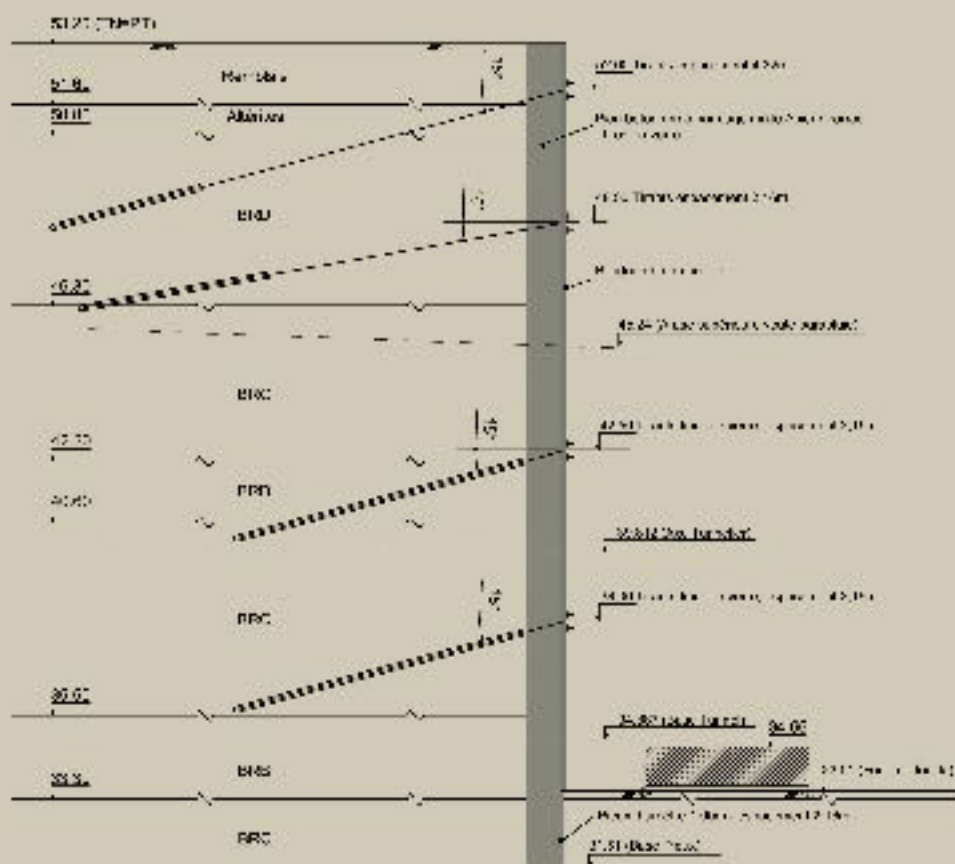
Le comportement du massif est gouverné principalement par la schistosité et la fracturation associée (glissement, basculement, ...). (figure 16). Pour ces deux stations situées au nord



12

© PHOTOTEQUE DACQUIN

COUPE DE CALCUL TYPE SUR PUIVS DE SORTIE DE VITRÉ



13

© DR

du lot 1, les soutènements réalisés jusqu'à 22 m de profondeur consistent en une berlinoise tirantée sur la hauteur des terrains meubles, poursuivie par une paroi clouée sur la hauteur des terrains rocheux de type schistes Briovérien avec intrusions granodioritiques. Le blindage de la berlinoise est un boisage en tête, poursuivi en partie inférieure par du béton projeté. Les clous et les tirants passifs sont de type autoforés. Comme sur le lot 3,

12- Tranchée couverte Nord.
13- Coupe de calcul type sur puits de sortie de Vitré.

12- North cut-and-cover tunnel.
13- Standard design cross section on Vitré exit shaft.

les têtes de tirants sont noyées dans le voile en béton projeté.

POURSUITE DES TRAVAUX

À ce jour, environ 60% des ouvrages présentés ont été réalisés (stations Colombier, Saint-Jacques-Gaîté, La Courrouze et Irène-Joliot-Curie, puits Voltaire et tranchée couverte Sud). Les travaux de la tranchée couverte Nord, du puits de sortie Vitré et de la station Jules-Ferry sont en cours, et ceux des



14

© PHOTOTÈQUE DACQUIN



16

© PHOTOTÈQUE DACQUIN



15

© VIGOUROUX PERSPECTIVE

14- Station Colombier.
15- Puits Voltaire.
16- Station Jules Ferry.

14- Colombier station.
15- Voltaire shaft.
16- Jules-Ferry station.

stations Gayeulles et Atalante démarrent prochainement. Au total le Groupe Dacquin aura réalisé en propre plus de 50 000 m² de soutènements sur le projet de la ligne b en intervenant sur les deux tranchées couvertes, la moitié des stations enterrées, un tiers des puits, les fondations du Garage Atelier (mandataire Legendre) et une station aérienne (Atalante pour Angevin) en faisant appel à toute la gamme des techniques applicables. □

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

SURFACE PAROI MOULÉE : 13 000 m²
SURFACE BÉTON PROJETÉ : 30 500 m²
SURFACE PIEUX SÉCANTS : 6 500 m²
PIEUX : 33 000 m
ACIER (ARMATURES / BUTONS / LIERNES) : 2 800 t
BÉTON : 22 500 m³
CLOUS/TIRANTS : 12 000 m
CHIFFRE D'AFFAIRES TOTAL : 25 M€

LES INTERVENANTS DU PROJET

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Rennes Métropole
MAÎTRISE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉE : Semtcar
MAÎTRISE D'ŒUVRE : Egis Rail - Egis Bâtiment - Arcadis - L'Heude
BUREAU DE CONTRÔLE : Socotec
DONNEURS D'ORDRE DU LOT 1 : Vinci - Spie - Legendre
DONNEURS D'ORDRE DU LOT 2 : Legendre-Angevin
DONNEURS D'ORDRE DU LOT 3 : Demathieu & Bard - Cardinal - Etpo

ABSTRACT

STATIONS, SHAFTS AND CUT-AND-COVER TUNNELS OF LINE B OF THE RENNES METRO

DOMINIQUE BLANC, GROUPE DACQUIN - JÉRÔME SIMON, GROUPE DACQUIN - ROBIN PRUNEL, GROUPE DACQUIN - THOMAS LE COR, GROUPE DACQUIN

The second line of the Rennes metro, about 14 km long, involves the construction of fifteen stations, twelve of them underground, six shafts and two cut-and-cover tunnels on either side of the section executed by tunnel boring machine. Groupe Dacquin is working on the project for the execution of six underground stations, the two cut-and-cover tunnels and two shafts, executing more than 50,000 m² of retaining structures in all. The significant variability of local geotechnical conditions required the use of numerous retaining structure techniques: diaphragm walls, Lutecian type retaining walls, secant pile walls, Berlin-type retaining walls and soil-nailed walls. □

ESTACIONES, POZOS Y FALSOS TÚNELES DE LA LÍNEA B DEL METRO DE RENNES

DOMINIQUE BLANC, GROUPE DACQUIN - JÉRÔME SIMON, GROUPE DACQUIN - ROBIN PRUNEL, GROUPE DACQUIN - THOMAS LE COR, GROUPE DACQUIN

La segunda línea del metro de Rennes, con una longitud de unos 14 km, incluye la realización de quince estaciones, de las cuales doce subterráneas, seis pozos y dos falsos túneles a ambos lados del tramo, ejecutado con tuneladora. El Grupo Dacquin interviene en el proyecto para la ejecución de seis estaciones subterráneas, dos falsos túneles y dos pozos, lo que totaliza más de 50.000 m² de apuntalamientos. La gran variabilidad de las condiciones geotécnicas locales condujo a la aplicación de múltiples técnicas de apuntalamiento: muros pantalla, pantallas parisinas, pantallas de pilotes secantes, encofrado entre pilotes y paredes clavadas. □



OUVRAGES EN SOL RENFORCÉ MACRES® SUR LE CONTOURNEMENT DU PUY-EN-VELAY (43)

AUTEUR : ALEXANDRE PLASTRE, DIRECTEUR TECHNIQUE, FRANCE MACCAFERRI

LA DÉVIATION DU PUY-EN-VELAY VOIT LE JOUR AVEC UN TRACÉ DANS LES COLLINES SURPLOMBANT LA VILLE. LA TOPOGRAPHIE VALLONNÉE DU SITE OBLIGE LA RÉALISATION DE TRAVAUX DE TERRASSEMENTS DE GRANDE AMPLEUR. PARMI LES NOMBREUX OUVRAGES GÉOTECHNIQUES, LE PROJET PRÉVOIT LA RÉALISATION DE 4 MURS EN SOL RENFORCÉ À PAREMENT BÉTON POUR UNE SURFACE DE PAREMENT D'ENVIRON 8 000 M². LA TECHNIQUE RETENUE POUR RÉALISER CES OUVRAGES EST LE SYSTÈME MACRES® DÉVELOPPÉ PAR LA SOCIÉTÉ FRANCE MACCAFERRI AVEC DES RENFORCEMENTS EN BANDES GÉOSYNTHÉTIQUES. FOCUS SUR LE PLUS GRAND MUR, SURNOMMÉ « SNCF 2 » PRÉSENTANT UNE SURFACE DE 4 200 M² (figure 1).

PRINCIPE

Le système Macres® (figure 2) est constitué d'un parement en panneaux béton préfabriqués de section 1,50 x 1,50 m, d'épaisseur minimale de 14 cm et d'éléments de renfort linéaires sous formes de bandes géosynthétiques à haute résistance à la traction Paraweb®, reliées au parement béton par une amorce synthétique Paraloop®. La stabilité du massif est assurée par

l'interaction entre les bandes de renfort et le remblai structural mis en place à l'arrière du parement.

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Surplombant la voie ferrée, le mur SNCF 2 est adossé à la colline située à l'entrée nord du Puy-en-Velay. D'une hauteur variant entre 2,50 m et 15 m sur un linéaire de 450 m, il sou-

tient la bretelle de sortie de la RN88 située entre l'OA6 et l'OA7.

En tête de mur, le dispositif de sécurité de type GBA sur dalle de frottement est surmonté d'un écran acoustique.

Deux panneaux de signalisation de type portique et haut mât sont situés à l'arrière immédiat du mur et présentent une fondation ancrée de 70 cm ne permettant pas la mise en place des ancrages.

LES ÉTUDES

Les études de stabilité externe et interne ont été menées par France Maccaferri selon la norme NFP 94-270 traitant du dimensionnement des ouvrages en sol renforcé.

Ces études ont permis de définir avec précision et pour chaque section caractéristique la résistance, la longueur et la densité de renforts nécessaires pour soutenir la chaussée.



1

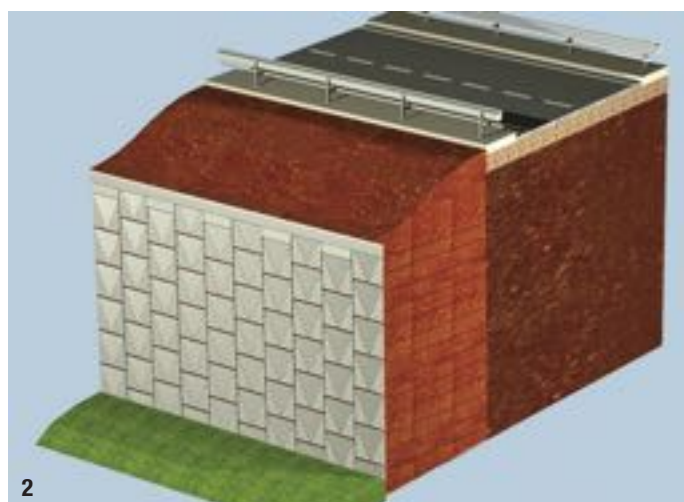
© FRANCE MACCAFERRI

En parallèle des calculs, les plans d'exécution de l'ouvrage ont été réalisés en tenant compte de la topographie et de l'implantation de l'ouvrage. Ainsi, la fondation de l'ouvrage présente des niveaux variables entre les cotes 629,56 m et 641,56 m alors que la tête de mur a un niveau variable entre 632,73 m et 643,98 m.

Les écailles étant posées horizontalement, les différences de niveau en fondation ont été traitées par des redans de 75 cm de hauteur (correspondant à l'espacement vertical entre renforts) et en tête par des redans de 19 cm. Près de 2000 écailles pour 54 références ont été nécessaires pour réaliser l'ouvrage.

LES RENFORTS PARAWEB®

Les renforts Paraweb® (figures 3a et 3b) sont des bandes constituées d'un faisceau de fibres en polyester à haute ténacité encapsulé dans une gaine protectrice en polyéthylène. Cette association apporte au renfort d'excellentes performances à long terme, ce qui lui permet de bénéficier d'un coefficient de réduction global (incluant le coefficient de réduction au fluage, à l'endommagement et à la dégradation chimique) le plus faible du marché. Les efforts appliqués sur l'ouvrage sont transmis aux renforts par frottement de ces derniers avec le remblai structural. Pour chaque niveau de renfort, il convient donc de vérifier que le renfort a la capacité structurelle de résister aux efforts appliqués (vérification de la résistance du renfort) mais également



2

© FRANCE MACCAFERRI

1- Vue d'ensemble du mur Macres® SNCF 2.
2- Vue 3D du système Macres®.

1- General view of the SNCF 2 Macres® wall.
2- 3D view of the Macres® system.

que l'effort transmis peut bien être mobilisé par frottement avec le remblai structural (vérification à l'adhérence). Trois types de renforts ont été sélectionnés afin de répondre au mieux aux contraintes dans l'ouvrage et présentent les caractéristiques suivantes :

- **Paraweb® MD 27** : utilisé principalement sur les 10 m supérieurs d'ouvrage, il présente une résistance à la traction de 27 kN et une largeur de 47 mm ;
- **Paraweb® MD 45** : utilisé en pied d'ouvrage pour les fortes sollicitations, il présente une résistance à la traction de 45 kN pour une largeur de 48 mm ;
- **Paraweb® 2D30** : il présente une résistance à la traction de 30 kN pour une largeur de 83 mm permettant de mobiliser plus de frottement avec le remblai que les renforts de type MD. Il est utilisé localement en tête d'ouvrage pour pallier la présence d'un dispositif de sécurité en tête d'ouvrage induisant des efforts importants sur les renforts de tête.

Les renforts sont espacés verticalement de 75 cm, le premier niveau de renfort étant situé à 37 cm de la fondation. Ils se présentent sous forme de rouleaux de 100 m de longueur et sont disposés de façon continue entre l'arrière du parement de l'écaille et leur positionnement dans le remblai prévu par le dimensionnement. Ainsi, si la longueur de l'ancrage est de 5 m, un rouleau permettra de réaliser 10 allers/retours entre le parement et les 5 m à l'arrière du parement.

Sur le chantier, la longueur des renforts varie suivant les hauteurs entre 2,50 m et 8 m. Certaines sections de calcul présentent des longueurs de renfort variables.

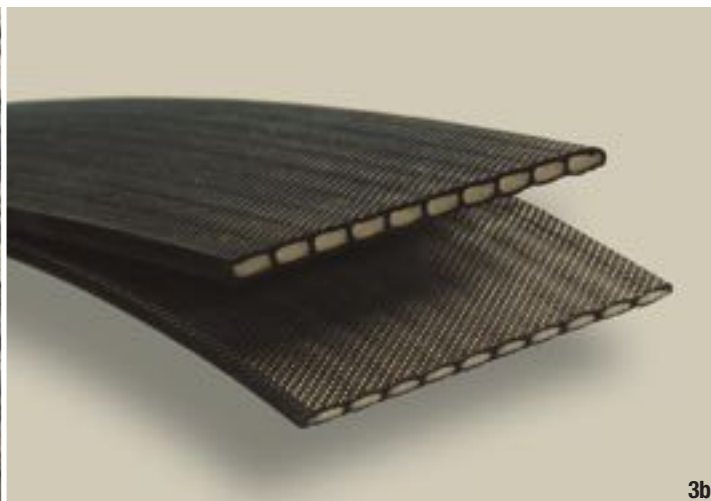
LE PAREMENT EN ÉCAILLES BÉTON

Les écailles en béton du système Macres® ont une section standard de 1,50 x 1,50 m. En élévation, la disposition s'effectue en quinconce et nécessite des écailles de base de section 1,50 de large par 0,75 m de hauteur. En tête d'ouvrage, des écailles de hauteur variant entre 0,545 m et 1,855 m par pas de 19 cm permettent d'ajuster la hauteur du mur aux besoins du chantier.

En plan, les écailles présentent aux extrémités une forme en tenon/mortaise, permettant l'emboîtement et le guidage des écailles lors de la pose. Conformément au marché, les écailles en béton du système Macres® se sont adaptées à un cahier des charges technique et esthétique exigeant. ▷



3a



3b

© FRANCE MACCAFERRI



4

© FRANCE MACCAFERRI



5

© FRANCE MACCAFERRI

Le béton retenu est un XF4-XC4 G+S selon la norme NF EN 206 de résistance à la compression C35/45.

Les agrégats utilisés devaient impérativement être issus de roche massive, ce qui a fortement limité la sélection de l'usine de préfabrication susceptible de produire les écaïlles. Les écaïlles en béton, ferrallées pour les besoins du

chantier, ont été certifiées CE selon le Règlement des produits de la Construction n° UE n°305/2011 en conformité avec la norme EN 15258, assurant la production d'un niveau de contrôle et de respect des procédures conforme aux exigences de la norme.

Pour répondre aux rendements du chantier, une quarantaine de moules

ont été nécessaires pour une cadence journalière de production variant entre 50 m² et 80 m².

Le rendu esthétique de l'ouvrage défini par l'architecte s'est traduit par un patchwork utilisant trois finitions distinctes, deux matrices Reckli, l'une de type Marne 2/69 donnant un aspect bouchardé à l'écaïlle et l'autre de type Mayenne 2/79 donnant un aspect « pierre rustique » au parement et une finition lisse. Certaines écaïlles de transition ont dû être conçues et fabriquées avec deux finitions différentes (figure 4). Les matrices ayant des épaisseurs différentes, il a fallu adapter le système afin de conserver un emboîtement entre écaïlles cohérent tout en préservant les épaisseurs minimales de béton (14 cm) pour assurer la résistance structurelle du système.

La connexion avec les renforts est assurée par une amorce Paraloop® coulée en partie dans le béton. Elle est constituée d'un renfort Paraweb® enroulé sur lui-même trois fois associé à une poignée plastique avec un bord plat autour de laquelle le renfort Paraweb® est disposé (figure 5).

Le dimensionnement a conduit à utiliser des panneaux standard ayant un nombre d'amorces variant entre 4 et 8 unités.

POINTS PARTICULIERS

La présence ponctuelle en tête de mur de panneaux de signalisation de type haut mât et portique a nécessité une adaptation de la tête de mur. La fondation de ces panneaux, ancrée d'environ 80 cm par rapport à l'arase supérieure des écaïlles de tête, empêchait la mise en place des renforts Paraweb® et l'écaïlle de tête ne se trouvait plus retenue. Conjointement avec la direction technique et méthodes de Razel-Bec,

3a & 3b- Renfort synthétique Paraweb®.

4- Détail des finitions lisse, Mayenne et Marne.

5- Amorce Paraloop®.

3a & 3b- Paraweb® synthetic reinforcement.

4- Detail of smooth finishes, Mayenne and Marne.

5- Start of Paraloop®.

une solution permettant de retenir les écaïlles de tête en posant une longrine béton préfabriquée entre la fondation des panneaux de signalisation et les écaïlles en béton a été mise au point. Les écaïlles en béton ont été conçues avec des fers de reprise. Du béton coulé en place connecte la longrine préfabriquée aux écaïlles, qui remplissent alors un simple rôle esthétique d'habillage. Afin de dissocier cette zone « en habillage » de la zone « structurelle », l'ensemble des écaïlles à la frontière entre ces deux zones a été muni de joints verticaux et horizontaux pour éviter tout risque d'épaufrures en cas de légers tassements différentiels entre les deux zones.

L'INSTALLATION

La fondation de l'ouvrage est constituée d'une semelle en béton maigre de section 35 x 15 cm disposée sous l'écaïlle en béton et servant de réglage à la pose. La parfaite planéité de la semelle est fondamentale pour le montage de l'ouvrage afin d'assurer l'emboîtement et l'alignement des panneaux les uns par rapport aux autres.

Les écaïlles du rang de base sont disposées en quinconce, par alternance d'une écaïlle de base de 75 cm de hauteur et une écaïlle standard de 1,50 m de hauteur.

Avant remblaiement du premier rang de renfort, elles sont retenues à l'aide

6- Rangée inférieure maintenue par les tirants poussant.

7- Cales en bois de connexion entre écaïlles.

8- Mise en place du géotextile.

6- Lower row held in position by the pushing tie anchors.

7- Wooden blocks for connection between scales.

8- Placing geotextile.

de tirants poussants et de serre-joints (figure 6). Un léger fruit côté remblai est assuré pour tenir compte d'un redressement lors du montage et du compactage du remblai.

Le calage des écaïlles les unes par rapport aux autres est assuré par la mise en place de cales en bois permettant la connexion latérale des écaïlles entre elles tout en évitant les contacts béton/béton (figure 7). Ce calage assure également l'alignement des écaïlles entre elles.

Le remblaiement s'effectue avec un remblai technique de type 0/150 mm issu du criblage des déblais du site au lieu-dit la Garde-d'Ours. Il est caractérisé par une faible fraction fine (passant à 80 microns inférieur à 12%), un coefficient d'uniformité $C_u = D_{60}/D_{10}$ supérieur à 2 et un angle de frottement supérieur à 35°. Le système Macres® présentant un espacement vertical entre renforts de 75 cm, le remblaiement s'effectue généralement par passes de 37,5 cm.

Un compactage léger est réalisé aux abords du parement à l'aide d'une plaque vibrante type PQ4 (sur une

bande d'environ 2 m adjacente au parement) afin de ne pas déplacer l'écaïlle. Au-delà, un compactage plus lourd de type V3 est appliqué.

Pour éviter le passage de fines à travers les joints, des bandes de géotextile non tissé de 200 g/m² sont disposées à l'arrière des écaïlles au niveau des joints horizontaux et verticaux. Pour faciliter la pose, Razel-Bec a encollé les lés de géotextile afin de les coller sur les écaïlles et les maintenir plaqués durant les phases de remblaiement. Une astuce qui a fait gagner un temps précieux (figure 8).

La mise en place des renforts s'effectue dès que le niveau du remblai atteint la première amorce. L'extrémité de la bande Paraweb® est positionnée à l'arrière du massif renforcé. Pour la maintenir fixe pendant les phases de remblaiement, la bande est repliée sur elle-même sur 2 m de longueur, les 2 brins étant connectés par deux fers en forme de S. La bande est alors enroulée autour d'un fer à béton placé horizontalement en butée contre 2 fers à béton fichés dans le remblai et espacés de 10 cm (figures 9a et 9b). ▷



6



8



7



© FRANCE MACCAFERRI

La bande peut alors être déroulée vers le parement et être passée autour de l'armure Paraloop®. Elle est ensuite étendue vers l'arrière du massif renforcé et à nouveau passée autour du fer à béton horizontal.

Près de 15 000 fiches ont ainsi été foncées dans le remblai sur une profondeur d'environ 40 cm pour retenir les renforts à l'arrière du massif renforcé. Devant l'étendue de la tâche, le chef de chantier a inventé un embout spécial à placer sur son marteau piqueur afin de foncer mécaniquement les fiches.

Ces opérations sont répétées jusqu'à l'autre extrémité du rouleau.

La connexion entre deux rouleaux est assurée par recouvrement sur une longueur de 2 m des deux extrémités des rouleaux Paraweb® à l'aide de deux fers en acier en forme de S (figure 10). Une fois le remblaiement d'une hauteur de 75 cm effectué, il est alors possible d'installer la rangée supérieure avec des écailles standard. Des joints EPDM de 2 cm d'épaisseur sont disposés à l'interface horizontale entre deux panneaux pour éviter le contact béton/béton.

En tête de mur, des écailles de tête présentant des différences de hauteur de 19 cm ont été prévues conformément au plan d'exécution.

9a & 9b- Installation des renforts Paraweb®.

10- Fers en S de jonction entre rouleaux Paraweb®.

9a & 9b- Installation of Paraweb® reinforcements.

10- S-shaped iron joining parts between Paraweb® rolls.

LES CONTRAINTES DE CHANTIER

Le démarrage de la pose d'écailles Macres® est conseillé à partir de points singuliers (raccordement à un ouvrage d'art, à une traversée hydraulique...) et dans le sens de la montée, c'est à dire du niveau de fondation le plus bas vers le niveau de fondation le plus haut.

L'élévation du mur se prêtait bien à ce principe, puisque le mur est intercepté par un ouvrage d'art au niveau de sa fondation la plus basse.

Cependant, pour des contraintes d'emprise sur chantier, l'extrémité sud du mur - dont le niveau de fondation est le plus élevé - devait être réalisée dans une première phase et permettre le raccordement futur des écailles des autres phases.

L'entreprise Razel-Bec a donc commencé la pose du mur en son milieu, à une distance de 160,50 m de son extrémité sud et de 251,50 m de l'ouvrage d'art.

En ce point, la hauteur finale de l'ouvrage atteint 11 m.

La liaison entre la phase 1 et la phase 2 s'est réalisée par la mise en œuvre des écailles selon une pente en tête de 2H/1V, pente rendue facilement possible par la mise en quinconce des écailles (figure 11).

La mise en place de la phase 1 s'est faite rang par rang, ces derniers ayant une longueur croissante à mesure que le niveau de fondation augmentait.

La phase 2 était quant à elle plus compliquée car les écailles devaient être installées en descendant.

Contrairement à certains systèmes ayant un parement avec des rebords latéraux, les écailles carrées du système Macres® peuvent se mettre en place du niveau de fondation le plus



© FRANCE MACCAFERRI



11

11- Zone de transition entre la phase 1 et la phase 2.

12- Raccordement nord (à gauche) et sud (à droite) de l'OA6.

11- Transition zone between phase 1 and phase 2.

12- Transition zone North (on the left) and South (on the right) of OA6.

1,50 m, l'espace de 1,70 m ne pouvait être comblé que par la réalisation de 2 écailles, dont une spécialement coupée sur ses deux extrémités.

Au nord de l'ouvrage d'art, le matriçage du béton n'ayant pas été fait sur une distance de 30 cm, le raccordement du mur Macres® avec l'OA s'est réalisé par une écaille placée à la fois contre le remblai sur 90 cm de longueur et en façade de l'OA sur 30 cm (figure 12).

Un ferrailage spécifique et un décalage des amorces ont été spécialement conçus pour que l'écaille remplisse cette double fonction.

L'interaction permanente entre le chantier et l'usine de préfabrication a permis la fabrication de ces pièces spéciales dans des délais très courts sans occasionner de retard. □



12

LE MUR SNCF 2 EN CHIFFRES

SURFACE :

4 200 m²

AMORCES PARALOOP® :

7 394 u

RENFORTS PARAWEB® :

120 000 m

REMBLAI STRUCTUREL :

33 000 m³

haut vers le niveau le plus bas, aucun débord latéral n'empêchant le coulisement des écailles entre elles.

L'ensemble du rang de base a alors été posé jusqu'au raccordement avec l'ouvrage d'art.

Cependant, au moment de poser la dernière écaille de liaison, l'espace à combler avait une distance supérieure

de 50 cm à ce qui était prévu, passant de 1,20 m à 1,70 m.

L'écart constaté est dû à un décalage des joints de 3 mm sur les 165 écailles posées.

Insignifiant à l'échelle d'un joint, ce léger décalage reporté à toutes les écailles a généré un espace important. La largeur des moules étant de

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : DREAL Auvergne

MAÎTRE D'ŒUVRE : DIR Massif Central

ENTREPRISE : Razel-Bec

FOURNISSEUR DU SYSTÈME MACRES® : France Maccaferri

CABINET D'ARCHITECTURE : Soberco (69)

ABSTRACT

MACRES® REINFORCED SOIL STRUCTURES ON THE PUY-EN-VELAY BYPASS

ALEXANDRE PLASTRE, MACCAFERRI

The Macres® reinforced soil system with precast concrete panel cladding developed by the Maccaferri group was selected for the execution of four retaining structures on the Puy-en-Velay bypass. The technique chosen was the use of synthetic band reinforcements with high tensile strength, offering high durability. The process was able to adapt to the architect's requirements by manufacturing panels having three different finishes. □

ESTRUCTURAS EN SUELO REFORZADO MACRES® EN LA CIRCUNVALACIÓN DE PUY-EN-VELAY (43)

ALEXANDRE PLASTRE, MACCAFERRI

Para la realización de 4 estructuras de apuntalamiento en la circunvalación de Puy-en-Velay se ha optado por el sistema de suelo reforzado con paramento de paneles de hormigón prefabricado Macres® desarrollado por el grupo Maccaferri. La opción técnica consistió en refuerzos con bandas sintéticas de alta resistencia a la tracción, que presentan una elevada durabilidad. El procedimiento se adaptó a las exigencias arquitectónicas mediante la fabricación de paneles con tres acabados diferentes. □

SOUTÈNEMENT EN DSM TRIPLE POUR LA RÉALISATION D'UN ENSEMBLE IMMOBILIER À VOIRON (38)

AUTEUR : JEAN-SÉBASTIEN DIDIER, DIRECTEUR D'AGENCE RHÔNE-ALPES - AUVERGNE, KELLER FONDATIONS SPÉCIALES

PLURIMMO, PROMOTEUR EN RHÔNE-ALPES, CONSTRUIT UN ENSEMBLE IMMOBILIER AVEC UN NIVEAU DE SOUS-SOL, PROCHE DU CENTRE-VILLE DE VOIRON. LE NIVEAU DE FOND DE FOUILLE SE SITUE JUSQU'À 2,5 M SOUS LE NIVEAU DE LA NAPPE. DANS LE CADRE DE CE PROJET, KELLER FONDATIONS SPÉCIALES RÉALISE UN SOUTÈNEMENT ÉTANCHE TYPE DSM (DEEP SOIL MIXING) POUR PERMETTRE D'EXÉCUTER LE RADIER ET DE LIMITER LE POMPAGE.



© DR

LES INTERVENANTS DU PROJET

La construction d'un ensemble immobilier à Voiron consiste en la réalisation de 4 bâtiments sur 6 niveaux avec un sous-sol commun débordant sur la quasi-totalité de la parcelle. Le promoteur de cette opération de 82 logements en deux tranches est Plurimmo, dont le siège est à Grenoble. Ce projet d'envergure en proche centre-ville de

Voiron a d'abord été lancé avec un appel d'offres en entreprise générale qui s'est avéré infructueux. L'appel d'offres a été relancé en février 2014 en lots séparés.

L'équipe de maîtrise d'œuvre est constituée de la SCP Grange Scrittore en tant qu'architecte et responsable du suivi et de la coordination du chantier, Eseb est l'économiste du projet, Socotec le

bureau de contrôle, Soraetec le bureau d'étude structure, enfin, la maîtrise d'œuvre géotechnique comprenant la totalité du déroulé des missions géotechniques (G1, G2 AVP, G2 PRO et G4) est confiée à EG Sol.

À l'issue de l'appel d'offres, Keller Fondations Spéciales a la mission de réaliser le soutènement périphérique de la fouille.

LES CONDITIONS DE SOL DU PROJET

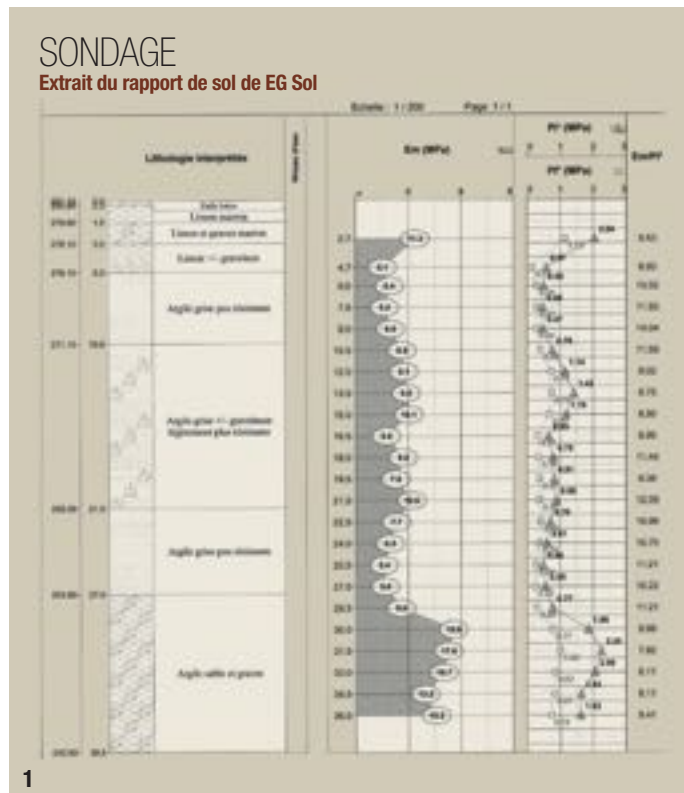
Le programme de reconnaissance géotechnique d'EG Sol est constitué de dix sondages à la pelle mécanique, quatre essais au pénétromètre statique/dynamique 10 t, deux sondages destructifs à 35 m avec essais pressiométriques (figure 1), la pose de deux piézomètres, quatre essais de type Lefranc et deux

tests d'infiltration à niveau variable. Le site est globalement constitué des différents horizons géotechniques suivants :

- Remblais sablo-graveleux de couverture renfermant, au droit des anciens bâtiments, des éléments de démolition (brique, béton, ferraille, etc.) reconnus jusque vers 0,5 à 1,5 m/TN puis limon sableux et +/- graveleux marron pas toujours présent.
- Passage de galets, de graviers et de sable de bonne perméabilité et gorgé d'eau, reconnus jusque vers 2,5 à 4,0 m/TN environ ; ce faciès est compact à très compact, il présente des valeurs de résistance de pointe au pénétromètre statique pouvant aller jusqu'à 45-50 MPa.
- Argile ou limon marron à gris bleuté, de résistance faible, devenant médiocre à partir de 10-11 m/TN, ce faciès est présent jusque vers 27-29 m/TN et localement jusqu'à 34 m/TN.
- Faciès de résistance moyenne à bonne, a priori argilo-sablo-graveleux.

Sur la hauteur du soutènement ont été retenues en synthèse les valeurs de sols suivantes : un module pressiométrique moyen de 5 MPa pour la première couche de remblais limono-graveleux et de limons avec une cohésion de 1 kPa et un angle de frottement de 28°, un module de 12 MPa pour le passage graveleux avec une cohésion de 1 kPa et un angle de frottement de 35°, et enfin un module de 5 MPa pour l'argile avec une cohésion de 2 kPa et un angle de frottement de 27°.

Dans le cadre de sa mission G2 PRO, EG Sol a déterminé les paramètres géotechniques (figure 2) pour le dimensionnement des ouvrages de soutènement. Le niveau d'eau retenu pour le dimensionnement de la paroi en phase provisoire est compris entre 279,20 NGF et 279,70 NGF, il est donné pour chaque coupe de calculs.



1 © PHOTOTHÈQUE EG SOL

1- Sondage extrait du rapport de sol de EG Sol.

2- Synthèse géotechnique retenue.

1- Borehole excerpted from the EG Sol soil report.

2- Geotechnical synthesis adopted.

LES PRINCIPALES CONTRAINTES DE SITE

Pour la réalisation du sous-sol sur la parcelle, différentes contraintes ont dû être prises en compte :

- Un niveau de sous-sol enterré d'une surface de 2 400 m² environ

engendrant des terrassements de l'ordre de 2,5 à 4,5 m de hauteur en bord de voirie ;

- Présence d'une nappe qui recoupe l'emprise du sous-sol ;
- Terrains argileux très sensibles à l'eau pouvant poser des problèmes de traficabilité en fond de fouille ;
- Présence d'une nappe artésienne dans le faciès graveleux profond ;
- Des bâtiments existants situés dans un proche périmètre de la fouille.

Pour répondre à ces problématiques, un soutènement périphérique étanche s'est avéré nécessaire pour la construction du sous-sol.

Différentes solutions ont été étudiées : palplanches, pieux sécants et DSM. Cette dernière présente la meilleure synthèse technico-économique sur ce projet. En effet cette solution présente les avantages suivants :

- Parement semi-étanche permettant de bloquer les venues d'eau latérales ;
- Pas de surconsommation de béton liée au comblement des creux d'ondes ;
- Aucun risque de vibration sur les bâtiments situés à proximité ;
- Coffrage une face avec pose d'une membrane étanche.

LE PRINCIPE DU DSM

Dans la méthode Keller, on utilise un outil spécial pour mélanger le sol au liant. Il est constitué d'un tube central, de « couteaux » transversaux et d'une pointe de forage. Le forage ne cause pas de vibrations et il est facilité par l'injection simultanée de coulis de ciment par les buses situées à l'extrémité de la tarière. Dès que la profondeur prévue est atteinte, commence la réalisation de la colonne de DSM.

Les diamètres varient généralement de 0,40 m à 2,40 m, en fonction du but recherché. Ici le diamètre choisi est de 0,60 m. L'outil de malaxage, qui est également soumis à des mouvements successifs ascendants et descendants, assure le mélange homogène du coulis avec le sol. La formulation et le volume du coulis injecté sont adaptés au résultat souhaité, en considérant les critères de résistance à la compression et/ou d'étanchéité. L'étanchéité peut être améliorée grâce à divers adjuvants comme la bentonite. La reprise de moments fléchissants par les colonnes de DSM est assurée par la mise en place d'armatures dans les colonnes fraîchement réalisées. Le DSM en voie humide est également réalisable à l'intérieur d'un tubage. Cette technique appelée TSM (Tubular Soil Mixing) est principalement utilisée pour la réalisation de colonnes de grande qualité en soutènement de fouilles de forte hauteur. Sur le chantier de Voiron la solution choisie a été le DSM triple sans tubage, la hauteur de fouille étant au maximum de 4,5 m. Le DSM triple est souvent utilisé pour la réalisation de grands linéaires de DSM de type voile d'étanchéité pour digue, ou grands linéaires de soutènement.

On détermine la résistance à la compression R_c et la contrainte admissible q_a à partir des enregistrements de paramètres, ainsi que des essais réalisés in situ ou en laboratoire. Sur la fiche de chaque colonne, on peut voir : date et heure de réalisation, longueur du fût, nombre de malaxages en descente et en montée, pression et débit du coulis, consommation totale de coulis pour la colonne.

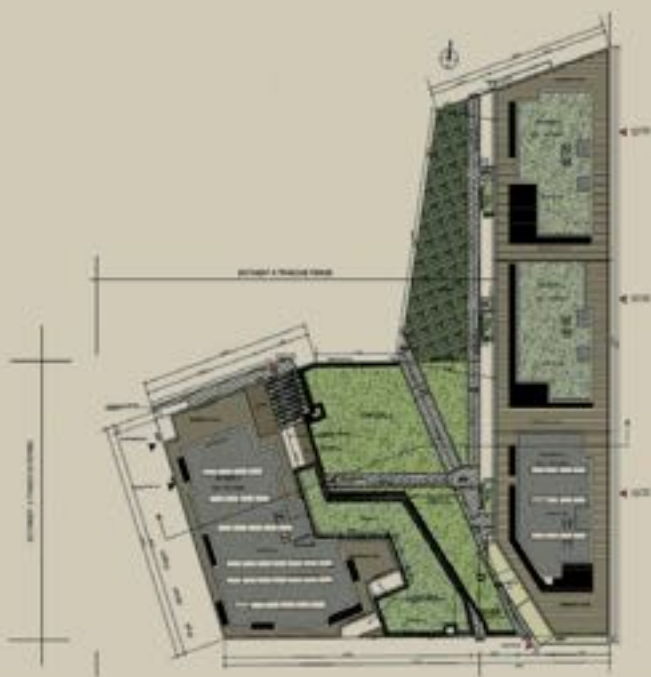
2	Faciès	γ_h	C'	φ'	E_{50}	α	$\delta a/\phi$	$\delta p/\phi$	q_a tirant
	[-]	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[kPa]
	Remblais limono-graveleux et limon	20	1	28	5,0	1/2	1/3	-1/3	0
	Passage graveleux	20	1	35	12,0	1/3	2/3	-2/3	200
	Argile peu résistante	20	2	27	5,0	2/3	1/3	-1/2	40
	Argile médiocre +/- graveleuse	21	2	32	8,0	2/3	1/3	-1/2	60

VUE GÉNÉRALE DU PROJET ET DES NIVEAUX DE FOND DE FOUILLES



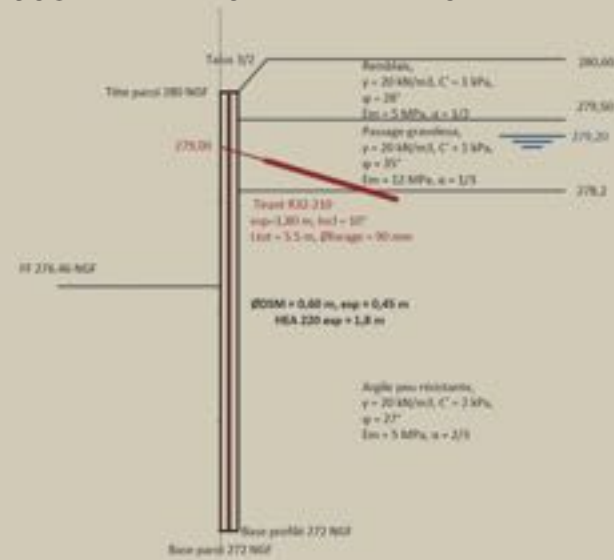
3

PLAN MASSE DU PROJET AVEC REPÉRAGE DE LA TRANCHE FERME



5

COUPE DE PRINCIPE DE LA PAROI



4

3- Vue générale du projet et des niveaux de fond de fouilles.

4- Coupe de principe de la paroi.

5- Plan masse du projet avec repérage de la tranche ferme.

3- General view of the project and bottom-of-excitation levels.

4- Schematic cross section of the wall.

5- Block plan of the project with identification of the firm work phase.

DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

À partir des synthèses de sol établies par EG Sol dans le cadre de sa mission G2 PRO, le bureau d'étude de Keller Fondations Spéciales réalise les notes de calculs et les plans d'exécution.

Le logiciel utilisé dans le cadre de ce projet est le logiciel K-Réa. Les différentes épaisseurs et niveaux du banc de sables et graviers au début des sondages et les différents niveaux de voirie ont conduit à devoir établir sept coupes types différentes (figures 3 et 4) sur le projet pour adapter le soutènement aux paramètres de sols.

Le diamètre des colonnes de DSM et leurs entraxes sont les mêmes pour tout le projet, par contre les longueurs et le type de fers et les longueurs des tirants varient pour chaque coupe de calculs. Les surcharges prises en compte pour les voiries sont de 1,2 t/m². Les déplacements de la paroi sont limités à 1 cm en tête de paroi et 2,5 cm en ventre conformément au cahier des clauses techniques particulières.

Suivant les coupes de calculs, sont alternativement dimensionnantes, soit les valeurs de déplacements en tête soit celles en ventre de la paroi.

La prise d'échantillons pour réaliser des essais se fait à la profondeur souhaitée dans la colonne fraîche. Des procédés plus perfectionnés tels que le carottage ou des méthodes de test in situ peuvent être utilisés pour obtenir des échantillons ou pour le contrôle de la continuité, de l'homogénéité ou du module des colonnes. En fonction de leur pertinence, leur précision ou leur adaptation au but recherché, on sélectionnera les meilleures méthodes de

contrôle du sol renforcé. La conception des DSM fait appel à l'estimation des caractéristiques futures du sol stabilisé dans des conditions précises (soil-mix), ainsi qu'à la sélection de la géométrie et de l'implantation les mieux adaptées en fonction du but recherché (géotechnique). La résistance à la compression visée est en général fixée en fonction des caractéristiques

physiques et chimiques du sol à traiter et des eaux souterraines, du type et de la quantité de ciment prévus, et d'autres importants paramètres de travail comme le rapport eau/ciment et le nombre de passes de malaxage. Le but de la partie géotechnique de la conception est de satisfaire aux critères requis pour les dimensions et la disposition du sol stabilisé, en fonction des critères dimensionnants de l'ouvrage projeté.



6



7

6- Vue de la foreuse avec triple outil en début de forage.
7- Mise en place d'un fer avec la foreuse.
8- Vue de la plateforme re-terrassée.

6- View of the driller with triple tool, at start of drilling.
7- Putting an iron section in place with the driller.
8- View of the re-excavated platform.



8

PHASAGE ET RÉALISATION DES TRAVAUX

Le projet présente la particularité de se faire en deux phases : une tranche ferme et une tranche conditionnelle (figure 5). Toutefois, pour optimiser les coûts d'amenée et repli de l'atelier pour la réalisation des soutènements, le parement étanche est réalisé en une seule phase. Seuls les tirants sont réalisés lors du terrassement en tranche conditionnelle. Le phasage

des travaux est donc le suivant :

- Préparation de la plateforme de travail ;
- Réalisation des colonnes de DSM depuis la plateforme de travail et mise en place des profilés métalliques dans les colonnes de DSM fraîchement réalisées ;
- Terrassement jusqu'à - 0,5 m/niveau du lit de tirants et mise en place de barbacanes en tranche ferme ;

- Mise en œuvre des tirants en tranche ferme ;
- Terrassement jusqu'au fond de fouille en tranche ferme ;
- Remblaiement côté fouille de 0,7 m pour le bâtiment A et de 0,3 m pour le parking en tranche ferme ;
- Construction du bâtiment A ;
- Terrassement jusqu'à - 0,5 m/niveau du lit de tirants et mise en place de barbacanes en tranche conditionnelle ;

- Mise en œuvre des tirants en tranche conditionnelle ;
- Terrassement jusqu'au fond de fouille en tranche conditionnelle ;
- Remblaiement côté fouille de 0,7 m pour les bâtiments B à D ;
- Construction des bâtiments B à D. Le chantier commence par l'installation d'une centrale à coulis avec silo. La centrale à coulis est constituée d'un silo à ciment, d'un bac tampon à coulis, d'une cuve à eau de 8 m³, ▷


9

10

© PHOTO THÉQUE KELLER


11

© PHOTO THÉQUE KELLER

9- Vue de la paroi après rabotage.
10- Vue du fond de forme et de la paroi du bâtiment A.
11- Vue du fond de forme avec membrane étanche posée.
9- View of the wall after planing.
10- View of the foundation level and wall of building A.
11- View of the foundation level with water-tight membrane installed.

d'une centrale d'injection automatisée Keller type AKM1200 D, d'une pompe d'injection ainsi que d'un groupe électrogène dédié à l'alimentation de la centrale. Le DSM est réalisé avec une foreuse équipée d'une triple table de rotation permettant d'entraîner concomitamment, avec des sens de rotation différents, trois outils de forage (figure 6). La foreuse est également utilisée pour la mise en place des fers de grandes longueurs (figure 7).

La réalisation du DSM avec une tarière triple permet de réaliser avec une seule mise en station et un seul forage trois colonnes de DSM sécantes et donc d'obtenir des gains de productivité. Étant donné la présence du banc graveleux très compact et comprenant des galets, un léger pré-forage a dû

être réalisé pour permettre le passage de l'outil de DSM.

Après l'installation et la planche d'essai réalisée en fin d'année 2014, les travaux se sont déroulés aux mois de janvier et février 2015. Les 550 colonnes de DSM ont pu être réalisées en quatre semaines puis la partie tranche ferme des tirants a été réalisée en deux semaines, soit 80 tirants en deux semaines. Le linéaire total de forage pour le Deep Soil Mixing est de 4 880 m. La longueur moyenne des colonnes de DSM était de 8 m.

Les conditions hivernales n'ont pas engendré d'arrêt de chantier, elles ont juste obligé à une gestion plus rigoureuse des spoils et des déblais de forage. En effet, la nature argileuse des terrains pouvait entraîner une tra-

ficabilité plus difficile sur la plateforme de travail (figure 8).

Keller Fondations Spéciales a réalisé ses travaux en totale autonomie pendant son intervention (gestion des spoils et des déblais assurée par ses soins). Les travaux ont permis de soutenir les terres et bloquer les venues d'eau latérales et ainsi, après le rabotage (figure 9) et la pose de la membrane étanche (figure 10), de réaliser le radier dans de bonnes conditions (figures 11 et 12).

CONTRÔLES

Les points de contrôles sont mis en œuvre à chaque phase de la production. Trois colonnes d'essais sont réalisées au démarrage du chantier pour valider les paramètres d'exécution. Puis

les contrôles s'effectuent, lors de la réalisation de la colonne, par le contrôle des paramètres de forage en lecture directe dans la cabine de la machine, le contrôle de la densité du coulis injecté qui permet de vérifier la qualité de celui-ci et sert également à la détermination du volume de sol découpé (voir point précédent), le contrôle de la viscosité du coulis d'injection à l'aide du cône de Marsh permettant par corrélation un second contrôle de la qualité du coulis (la densité et la viscosité dépendant énormément de la propreté des instruments de mesures). L'enregistreur de paramètres Keller M5 permet un contrôle continu, à l'exécution et a posteriori.

Les enregistrements permettent de mesurer :



© PHOTO THÉO KELLER
12

- La profondeur de l'outil,
- Les vitesses d'avancement et autres paramètres de forage,
- Les vitesses de remontée,
- Les vitesses de rotation de l'outil,
- La pression d'injection,
- Le débit d'injection,
- Le volume injecté.

Des prélèvements d'éprouvettes de coulis et de mélange sol-coulis avec écrasements des éprouvettes à sept jours et vingt-huit jours permettent de vérifier le bon dosage du coulis et de valider les paramètres de résistance de la paroi pris dans les calculs. Les valeurs obtenues étaient supé-

rieures à celles attendues dans la note de calculs. Un suivi topographique est également réalisé pendant le terrassement et jusqu'à la réalisation du radier pour suivre et valider les déplacements

12- Vue générale du radier en cours de coulage sur bâtiment A.

12- General view of the foundation raft during casting on building A.

calculés. Les déplacements mesurés sont restés inférieurs au centimètre toléré dans le cahier des clauses techniques particulières.

MOYENS MIS EN ŒUVRE

Une équipe de cinq personnes réalise les travaux de Deep Soil Mixing.

Le matériel mis en œuvre pour la bonne exécution des travaux est le suivant :

- Une foreuse Liebherr type LRB 25 avec tarière triple Keller,
- Une station de malaxage automatique de coulis Keller type AKM,
- Un bac tampon d'une capacité de 1 000 litres,

- Une pelle 15 t pour la manutention et l'évacuation des déblais,
- Un groupe électrogène 100 kVA.

CONCLUSION

Les travaux de soutènement par DSM ont permis de réaliser le gros-œuvre à l'abri de venues d'eau très difficiles à pomper, et de soutenir les voiries et terrains autour de la fouille.

De plus, dans un contexte urbain, ils n'ont pas généré de nuisance pour les avoisinants.

Cette technique de soutènement est adaptée pour créer une barrière étanche dans des contextes délicats. □

ABSTRACT

RETAINING STRUCTURE BY TRIPLE DSM FOR THE CONSTRUCTION OF A REAL ESTATE COMPLEX AT VOIRON

JEAN-SÉBASTIEN DIDIER, KELLER

For the execution of a project for 82 housing units with an underground basement level 2.5 m below the aquifer in the district of Voiron, Keller Fondations Spéciales, the French subsidiary of Keller Group plc, produced a watertight retaining structure by DSM (Deep Soil Mixing). This process involves mechanically creating a soil-cement mixture using triple augers to create a watertight barrier. Metallic sections are then inserted in the Deep Soil Mixing columns and then tensioned in order to absorb thrust forces. This technique blocks the lateral infiltration of water, shores up the ground, and thereby allows execution of the foundation raft in satisfactory conditions. □

APUNTALAMIENTOS CON DSM TRIPLE PARA LA REALIZACIÓN DE UN COMPLEJO INMOBILIARIO EN VOIRON (38)

JEAN-SÉBASTIEN DIDIER, KELLER

En el marco de la realización de un proyecto de 82 viviendas con un nivel de subsuelo a 2,5 m bajo la capa freática del municipio de Voiron, Keller Fondations Spéciales, filial francesa de Keller Group plc, realizó un apuntalamiento estanco con DSM (Deep Soil Mixing). Este procedimiento consiste en crear mecánicamente una mezcla suelo-cemento con barrenadoras triples para crear una barrera estanca. Después, se insertan perfiles metálicos en las columnas de Deep Soil Mixing y posteriormente se atirantan para absorber los esfuerzos de empuje. Esta técnica bloquea las avenidas de agua laterales y contiene la tierra, permitiendo la realización de la solera en buenas condiciones. □



1
© EGIS

FONÇAGE D'OUVRAGES ÉCOLOGIQUES SOUS L'A89

AUTEURS : MARIE-CHRISTINE MONTANO, CHEF DE PROJET, EGIS ENVIRONNEMENT - PIERRE COSTE, CHEF DE PROJET, EGIS GÉOTECHNIQUE - GABRIEL BLANCHARD, CONDUCTEUR D'OPÉRATIONS, VINCI AUTOROUTES

VINCI AUTOROUTES AMÉLIORE LA TRANSPARENCE ÉCOLOGIQUE DE SON RÉSEAU AU SEIN DES CORRIDORS BIOLOGIQUES LOCAUX PAR LA RÉALISATION D'OUVRAGES ASSURANT UN MEILLEUR FRANCHISSEMENT PAR LA FAUNE SAUVAGE. AFIN DE MINIMISER L'IMPACT DES TRAVAUX SUR L'EXPLOITATION DE L'INFRASTRUCTURE ET SUR L'ENVIRONNEMENT, IL EST FAIT APPEL AUX TECHNIQUES DE RÉALISATION SANS TRANCHÉE AVEC UNE GESTION RENFORCÉE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT EN PHASE TRAVAUX. EGIS, EN TANT QU'AMO, ASSURE LA SUPERVISION DE LA QUALITÉ TECHNIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DE L'EXÉCUTION.

INTRODUCTION

L'autoroute A89 Est (Clermont-Ferrand/Lyon) traverse plusieurs zones d'intérêt écologique dans les départements du Puy-de-Dôme et de la Loire, en particulier entre les villes de Thiers et Feurs. Dans ce contexte, Vinci Autoroutes, en tant qu'exploitant, s'est fixé pour objectif la requalification de l'infrastructure en faveur de la biodiversité et a, pour ce faire, lancé l'étude et la

réalisation de plusieurs ouvrages écologiques (écoducs) devant permettre, à terme, d'améliorer le franchissement de l'autoroute par la faune. Ce type d'aménagement participe pleinement aux plans d'actions déclinés par les régions Auvergne et Rhône-Alpes dans les Schémas Régionaux de Continuité Écologique, en améliorant le rétablissement de la transparence écologique des infrastructures.

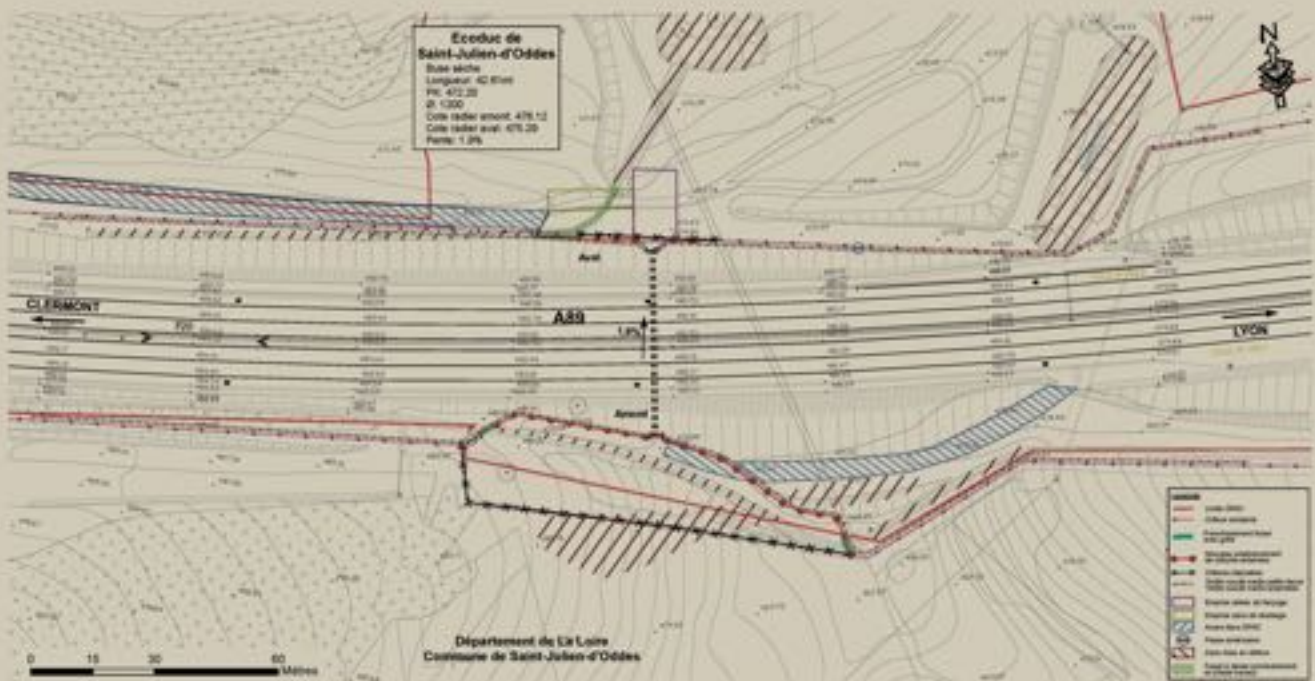
1- Atelier de fonçage sur Feuillassières.

1- Pipe ramming equipment on Feuillassières.

LES OBJECTIFS DU PROJET

Vinci Autoroutes a mandaté une première étude auprès du groupement Écosphère/Hydrosphère en 2013, ayant pour objet la requalification de l'A89 en faveur de la biodiversité. Cette étude devait permettre de définir, sur les deux départements du Puy-de-Dôme et de la Loire, s'il était nécessaire de réaliser des mesures d'amélioration du franchissement de l'autoroute par

PLAN DE DÉTAIL DE L'AMÉNAGEMENT (AVP ECODUC DE ST-JULIEN-D'ODDES)



© EGIS
2

COUPE LONGITUDINALE DE L'AMÉNAGEMENT (AVP ECODUC DE ST-JULIEN-D'ODDES)



© EGIS
3

les espèces animales présentes, les possibilités existantes et adaptées de traverser l'autoroute n'étant pas suffisantes. Les secteurs géographiques identifiés à l'issue de cette expertise écologique sont des habitats naturels présentant un intérêt écologique important et abritant une faune abondante (mammifères dont renard, sanglier, chevreuil, mustélidés, micromammifères, chat forestier et amphibiens).

LA CHRONOLOGIE

Egis (marques Environnement et Géotechnique) a été missionné par Vinci Autoroutes pour l'étude technique de la faisabilité des écoducs projetés. Ces écoducs correspondent à des buses sèches d'un diamètre compris entre 800 et 1200 mm permettant le passage de la petite et moyenne faune en vue d'assurer la continuité écologique

2- Plan de détail de l'aménagement (AVP Ecoduc de St-Julien-d'Oddes).

3- Coupe longitudinale de l'aménagement (AVP Ecoduc de St-Julien-d'Oddes).

2- Detail drawing of the project (preliminary design of St-Julien-d'Oddes ecoduct).

3- Longitudinal section of the project (preliminary design of St-Julien-d'Oddes ecoduct).

des espèces de part et d'autre de l'autoroute (figure 2).

Cette étude a consisté à analyser des plans de récolement et à réaliser des visites de terrain afin d'étudier les conditions d'accès et les contraintes techniques et environnementales des ouvrages (figure 3).

Cette analyse a été suivie d'une étude de niveau Avant-Projet menée par Egis pour permettre à Vinci Autoroutes de définir son programme de consultation des groupements d'entreprise avec MOE intégrée dans le cadre d'une conception - réalisation.

Egis a continué sa collaboration avec Vinci Autoroutes en tant qu'assistant à Maîtrise d'Ouvrage en apportant une assistance technique, pour les questions environnementales et géotechniques, dans le cadre de la finalisation des études (rédaction du CCTP,

documents d'EXE, etc.) et le suivi des travaux sur site.

LE CHOIX DES SITES ET LE CALAGE DES OUVRAGES

Les sites suivants ont été retenus pour l'implantation des ouvrages sur le secteur du district d'A89 Est soit d'ouest en est (figure 4) :

- Villemonteix (pK 324.0), commune de Bromont-Lamothe (63) ;
- Feuillassières (pK 424.2), commune d'Orléat (63) ;
- Machabré (pK 460.57), commune de Champoly (42) ;
- St-Julien-d'Oddes (pK 472.1), commune de St-Julien-d'Oddes (42).

Les emplacements de ces ouvrages ont été répertoriés suite études préalables des experts biodiversité de Vinci Autoroutes pour accueillir petite et moyenne faune.

LOCALISATION DES OUVRAGES ÉCOLOGIQUES (ÉCODUCS) SUR L'A89

Ensuite les contraintes ci-dessous ont été prises en compte pour caler chaque ouvrage :

- Profil de l'autoroute strictement en remblai ;
- Maintien d'une charge minimale de 1,5 m entre le bord de la Bande d'Arrêt d'Urgence (BAU) et la génératrice supérieure de la buse ;
- Absence de remblai de très grande hauteur car l'écoduc doit être positionné au plus proche du terrain naturel, ce qui risque de conduire à des ouvrages extrêmement longs et donc peu fonctionnels ;
- Maintien d'un biais de la buse de 100 grades ;
- Absence de risbermes intermédiaires, du côté du forage, qui rendent techniquement très difficile le fonçage de la buse car l'atelier de fonçage manque d'appui pour reprendre les forces de poussée ;
- Emprise du Domaine Public de l'Autoroute Concédée (DPAC) suffisante pour l'installation de l'atelier de fonçage ;
- Recherche de la pérennité fonctionnelle des ouvrages en les calant hors d'eau, en continuité des trames végétales existantes, et dans un environnement foncier non soumis si possible à des projets d'aménagement ;
- Absence de milieu naturel sensible aux abords, où la probabilité d'impacts sur des espèces protégées est forte en phases travaux, avec des incidences réglementaires fortes sur le planning général de l'opération ;
- Absence d'incohérence avec d'autres infrastructures proches (routes, rail, ...).



4

© GEOPORTAL

LES MÉTHODES DE RÉALISATION DU FONÇAGE

L'autoroute étant en exploitation, les études se sont rapidement orientées vers les méthodes de réalisation sans tranchée qui impactent nettement moins la circulation en évitant notamment des interruptions et des basculements de chaussée. La méthode retenue a donc été de foncer sous la chaussée les buses composant les ouvrages. Si le fonçage permet d'éviter les interventions sur la chaussée, cette technique nécessite toutefois de se pencher sur les problématiques de forage, de stabilité du front de taille et des tassements induits en surface. La donnée essentielle pour ces sujets est la connaissance des terrains dans lesquels le fonçage doit être réalisé. Une campagne de reconnaissances géotechniques a été réalisée en phase AVP afin de caractériser les matériaux devant être rencontrés lors du fonçage. Les sondages ont été réalisés depuis le niveau de la chaussée afin de reconnaître les matériaux composant les

4- Localisation des ouvrages écologiques (écoducs) sur l'A89.

5- Massif d'appui avec grave ciment sur Machabré, installation en cours.

6- Attaque du fonçage dans le remblai pour Machabré.

4- Location of ecological structures (ecoducts) on the A89.

5- Supporting foundation with cement treated base material on Machabré, installation in progress.

6- Working face for pipe ramming in the embankment for Machabré.

remblais ainsi que les sols d'assise. Chaque écoduc a fait l'objet d'au moins 2 sondages carottés, implantés au droit des BAU de chaque côté de la chaussée, afin de minimiser l'impact sur le trafic et d'obtenir un échantillonnage aussi représentatif que possible des matériaux. Sur certains ouvrages les sondages carottés ont été complétés par un sondage à la pelle mécanique dans le but d'avoir une meilleure vision des matériaux constituant les remblais et notamment des blocs pluri-décimétriques difficilement identifiables par les sondages. Des essais en laboratoire ont permis d'identifier la nature des matériaux et notamment la dureté et l'abrasivité des blocs qui sont des paramètres significatifs pour la définition des méthodes et des outils de forage. Les contextes géotechniques rencontrés sur les différents ouvrages varient significativement compte tenu de leur dispersion sur plusieurs centaines de kilomètres le long du tracé de l'A89. Les matériaux composant les remblais ont toutefois été généralement identi-



5



6

© EGIS

fiés à dominante graveleuse avec des teneurs variables en sable et limon sauf sur un ouvrage où le remblai est constitué d'argiles sableuses à graves éparses. Mais le trait le plus notable mis en lumière par les reconnaissances est la présence de blocs pluri-décimétrique de tuf, d'andésite et de granite en couverture des talus mais également au sein du corps des remblais de l'autoroute. Les essais en laboratoire ont montré que ces blocs sont composés de roches dures et abrasives.

Il existe plusieurs méthodes de fonçage dont la faisabilité dépend de la nature des terrains, des dimensions de l'ouvrage à foncer, de la sensibilité des ouvrages avoisinants ou encore de la précision d'exécution recherchée. Dans le cas de ces écoducs, compte-tenu du diamètre important des ouvrages à foncer (1 200 mm) et de la relativement faible épaisseur de couverture (3 à 5 m pour l'ouvrage le moins profond, soit 2 à 4 diamètres), la méthode de réalisation devait assurer la tenue des terrains tout au long du forage.

Une première solution envisageable était donc le fonçage avec mise en place des tubes définitifs à l'avancement et forage à la tarière depuis l'intérieur des tubes en restant en retrait de la trousse coupante pour garantir la stabilité du front de taille. Cette méthode n'est toutefois pas bien adaptée à la présence de blocs de taille importante car ces derniers empêchent le poinçonnement des terrains par la trousse coupante à l'avant de l'outil de forage. De plus, les blocs durs nécessitent des outils de forage adaptés à la résistance et à l'abrasivité de ces matériaux.

Une alternative au forage à la tarière est le creusement au micro-tunnelier qui permet la mise en place des tubes



© EGIS

7- Contrôle topographique de la chaussée sur Machabré.

8- Forage finalisé sur Feuillassières (tête Nord) - finition des abords en cours.

9- Forage finalisé sur Feuillassières (tête Sud) - finition des abords en cours.

7- Topographic monitoring of the roadway on Machabré.

8- Drilling completed on Feuillassières (northern head) - surroundings finishing in progress.

9- Drilling completed on Feuillassières (southern head) - surroundings finishing in progress.

à l'avancement comme avec la tarière mais qui assure en plus le confinement du front de taille garantissant ainsi la stabilité du forage et la maîtrise des déformations en surface. Il est en outre possible d'adapter l'outil de coupe aux différents matériaux rencontrés notamment les blocs durs et abrasifs identifiés par les reconnaissances. Le micro-tunnelier est toutefois une solution nettement plus coûteuse et lourde à mettre en œuvre. De plus les ouvrages à réaliser sont tous, de par leur fonction, situés hors nappe ce qui pose d'inévitables problèmes de maintien de la boue de confinement notamment dans des terrains relativement perméables comme ceux identifiés dans les remblais de l'A89.

Dans le cadre de sa mission de conception-réalisation, l'entreprise a retenu pour les deux premiers ouvrages (Feuillassières et Machabré) la solution de fonçage à la tarière (figure 1) en proposant une procédure adaptée en cas de rencontre de blocs et de points durs. Les fonçages étant réalisés depuis le

terrain naturel, des massifs d'appui sont créés afin de fournir une poussée suffisante (de l'ordre de 100 t) pour traverser toute la largeur des remblais. Ces massifs sont obtenus au moyen de rideaux de palplanches fichés dans le terrain naturel afin de mobiliser la butée nécessaire et complétés d'une poutre de couronnement en béton pour permettre l'appui du matériel de forage. Sur l'ouvrage de Machabré, les sols en place n'ayant pas permis une mise en fiche suffisante du rideau de palplanche, le massif d'appui a été complété par un remblaiement en grave ciment à l'arrière du rideau (massif poids) afin de fournir une capacité de poussée suffisante (figures 5 et 6).

Le risque principal lors de la réalisation de ces travaux est de générer des tassements et des désordres au niveau de la chaussée de l'autoroute. Sous réserve de bonne exécution du fonçage, les déformations attendues sont toutefois très faibles. Afin de contrôler ce risque, un suivi topographique de la chaussée est mis œuvre en continu tout au long des opérations de fonçage (figure 7) avec un critère d'alerte défini à partir de 1 cm de tassements.

Le fonçage du premier ouvrage de Feuillassières a été finalisé en avril 2015 avec une cadence de 4 à 5 m par jour (figures 8 et 9). Le fonçage du deuxième ouvrage de Machabré est en cours.

LES PRESCRIPTIONS ENVIRONNEMENTALES EN PHASE TRAVAUX

Vinci Autoroutes est engagée dans une démarche volontariste et responsable pour le respect de la réglementation environnementale et la prévention des pollutions et dispose d'un Système de Management Intégré :



© EGIS



- Certifications ISO 9001 et 14001 pour son activité de conception et de réalisation d'aménagements de sections nouvelles, d'investissements complémentaires et d'opérations de maintenance lourde au sein de sa Direction de la Construction et de la Maintenance de l'Infrastructure.
- Certifications 14001 pour ses activités d'exploitation.

Vinci Autoroutes a ainsi défini un haut niveau d'exigence en matière de suivi environnemental des chantiers de fonçage des écoducs en demandant notamment l'élaboration et l'application d'un Plan pour le Respect de l'Environnement (PRE) avec présence d'un « Chargé d'Environnement » au sein du groupement et en s'adjoignant les services d'Egis en la personne d'un écologue expérimenté dans le cadre de la mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage.

Les principales recommandations en phases travaux sont les suivantes :

- Pistes et emprises limitées et conformes aux plans de détail des aménagements issus de l'AVP (respect des mesures d'insertion, balisage, mise en défens (figure 10), ...);
- Pistes, zones de stockage de matériaux et plateforme de travail à réaliser en totalité sur géotextile avec apport de matériaux, le géotextile favorisant l'enlèvement et la remise en état du site;
- Plateforme de travail clôturée (type barrières Héras) avec remontée du géotextile sur la clôture sur 1 m de hauteur afin d'éviter la fuite de matériaux vers le milieu naturel et l'intrusion de la petite faune sur la zone de travail (risque de destruction d'espèces protégées);
- Installation de dispositifs de filtration adéquats au droit de la zone



- de travail si présence en aval du chantier de zones humides ou de cours d'eau;
- Création des accès et déboisement prévus en dehors de périodes écologiques sensibles (avril à septembre environ).

SÉCURITÉ

Vinci Autoroutes s'est engagée à réduire les accidents et les dysfonctionnements nuisant à la santé et à la sécurité de l'ensemble des intervenants et des tiers impactés par les opérations dont elle assure la maîtrise d'ouvrage. Ces opérations s'inscrivent dans la politique sécurité « Maîtrise d'Ouvrage - Zéro accident » de Vinci Autoroutes précisant les exigences en la matière, qui complètent celles issues de la réglementation.

L'attente du maître d'ouvrage vis-à-vis de l'attitude et des actions menées par l'entreprise en matière de sécurité et de santé est donc très forte. Elle comprend un engagement de sa direction, la mise à disposition des ressources spécifiques humaines et matérielles nécessaires, des formations et sensibilisations auprès des salariés autant que nécessaire, une analyse systématique des risques encourus et des mesures de prévention décidées pour les éliminer, des contrôles de la bonne application des dispositions prévues.

10- Mise en défense des zones sensibles.

10- Protection of sensitive areas.

CONCLUSIONS

Le suivi, entre autre photographique, des ouvrages écologiques sur l'A89 va permettre de valoriser cette expérience, menée également dans d'autres départements et de faire progresser la connaissance sur l'efficacité de ces ouvrages.

La réalisation de ces aménagements met en avant l'intérêt des techniques sans tranchées pour la traversée d'ou-

QUANTITÉS DU CHANTIER

OUVRAGES ÉCOLOGIQUES :
4 u
LINÉAIRE DE FONÇAGE :
180 m

vrages existants en exploitation. Les techniques de fonçage sont toutefois très dépendantes de la nature des terrains traversés qui réservent souvent des surprises malgré les reconnaissances préalables et qui nécessitent une bonne capacité d'adaptation allié à une grande réactivité de la part de tous les acteurs du projet.

Ces travaux illustrent également la possibilité de minimiser le plus possible l'impact environnemental des travaux grâce à l'application rigoureuse des prescriptions de protection de l'environnement et à la mise en place d'intervenants dédiés à cette problématique. Cette démarche permet de s'assurer que le gain environnemental apporté par la création des ouvrages écologiques ne soit pas fortement diminué par l'impact des travaux. □

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE / INDUSTRIEL : Vinci Autoroutes

ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE : Egis Structures et Environnement

ENTREPRISE TITULAIRE DU MARCHÉ CONCEPTION-RÉALISATION : Razel-Bec

MAÎTRE D'ŒUVRE INTÉGRÉ : C2i

SOUS-TRAITANT FONÇAGE : Smce

ABSTRACT

PIPE RAMMING FOR ECOLOGICAL ENGINEERING STRUCTURES UNDER THE A89

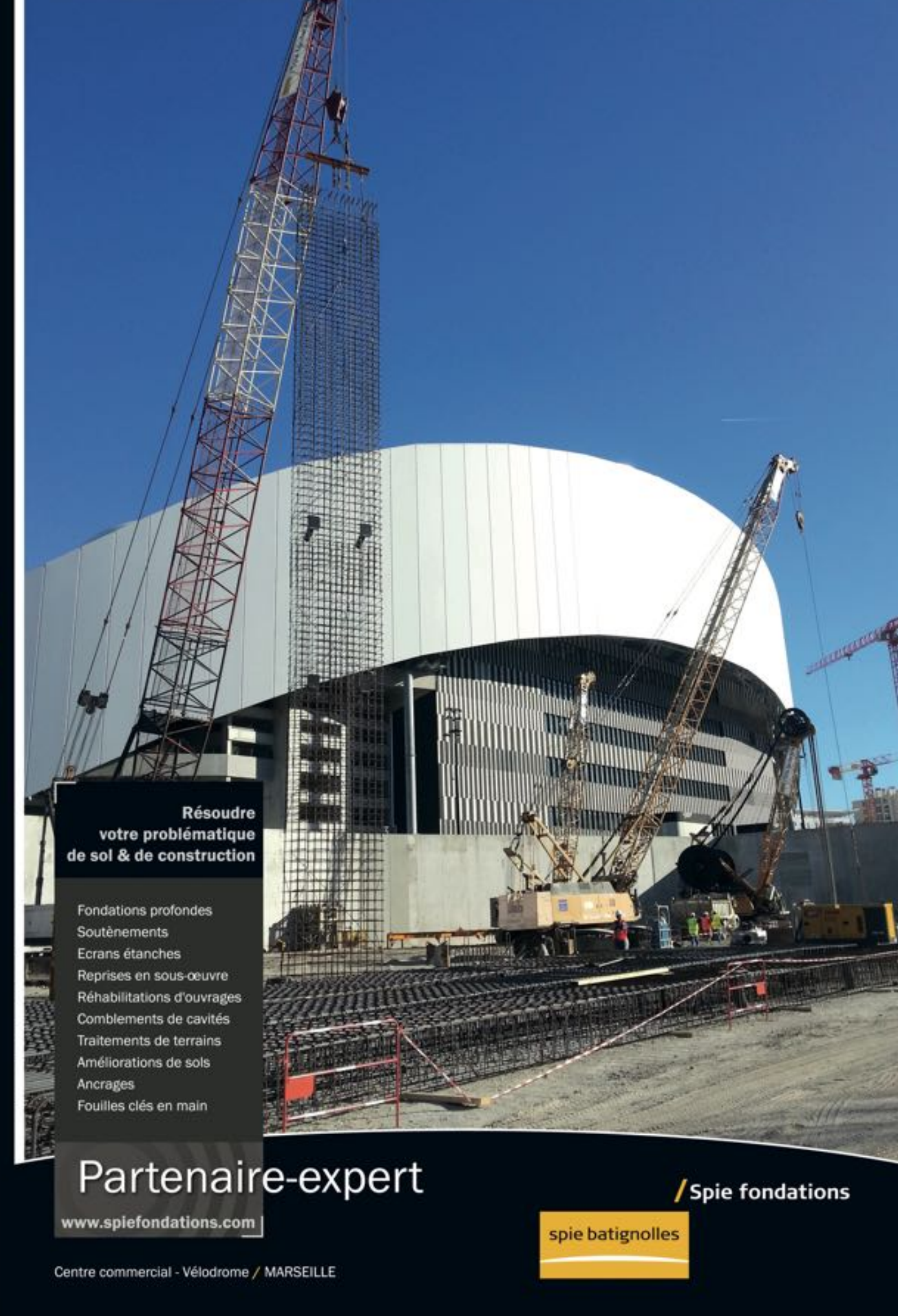
MARIE-CHRISTINE MONTANO, EGIS - PIERRE COSTE, EGIS - GABRIEL BLANCHARD, VINCI

In order to improve ecological continuity on its network, Vinci Autoroutes is building crossing structures for fauna (ecoducts), including four with "geotechnical, environmental and work monitoring" assistance from Egis. The Design and Build contract for these structures was awarded to the C2i/Razel-Bec consortium. The works, in progress, consist of auger drilling, from the inside of the tubes, and placing the permanent tubes in position as work progresses. The tubes, 1200 mm in diameter, are made of steel and are 38 to 50 metres long depending on the shape of the embankments to be crossed. Since the motorway is in use, topographic monitoring of the roadway is performed continuously during the pipe ramming operations, with a predefined alert criterion shared with all those involved in the project. □

PERFORACIÓN DE ESTRUCTURAS ECOLÓGICAS BAJO LA A89

MARIE-CHRISTINE MONTANO, EGIS - PIERRE COSTE, EGIS - GABRIEL BLANCHARD, VINCI

Con objeto de mejorar la continuidad ecológica en su red, Vinci Autoroutes realiza estructuras de paso para la fauna (ecoductos o puentes verdes) de los cuales 4 con asistencia "geotécnica, medioambiental y seguimiento de las obras" de Egis. El contrato de diseño-realización de estas estructuras se ha confiado al grupo C2i/Razel-Bec. Las obras en curso, consisten en una perforación con barrenadora, desde el interior de los tubos, con instalación de los tubos definitivos, a medida que avanzan las obras. Los tubos, con un diámetro de 1.200 mm, son de acero y tienen una longitud de 38 a 50 m según la geometría de los terraplenados a cruzar. Dado que la autopista se mantiene abierta al tráfico, se realiza de forma continua un seguimiento topográfico de la calzada durante las operaciones de perforación con un criterio de alerta previamente definido y respetado por el conjunto de los participantes. □



**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

/ Spie fondations

spie batignolles



BUILD ON US

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.



| Villiers-sur-Marne | FRANCE |

Bassin enterré de la « Bonne Eau » (capacité 28 000 m³).

Première utilisation en France de la nouvelle Hydrofraise compacte HC05.



SOLETANCHE BACHY