

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

TRAVAUX SOUTERRAINS. LIGNE 5 DU METRO DE BUCAREST. OA P13, PUIITS DE LANCEMENT DE TUNNELIER SUR LA LIGNE 15. MISE EN SECURITE DES TUNNELS DU BOULEVARD PERIPHERIQUE NORD DE LYON. TUNNEL ROUTIER D'ISMAILIA SOUS LE CANAL DE SUEZ. EXTENSION DES STATIONS COURTES DE LA LIGNE A DU METRO DE TOULOUSE. LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS. LE BIM POUR LES INFRASTRUCTURES. PROLONGEMENT LIGNE 14 AU SUD - LA CONCEPTION DES STRUCTURES SOUTERRAINES

N° 947 DÉCEMBRE 2018



TRANSPORT DE
VOUSSOIRS, GALERIE
DU LYON-TURIN
© ALINE BORDS

**LES TRAVAUX
PUBLICS**
FÉDÉRATION
NATIONALE



SEFI-INTRAFOR

NOS FONDATIONS AUJOURD'HUI, CE SONT EUX

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

REJOIGNEZ-NOUS POUR LE GRAND PARIS

FONDATIONS.FAYAT.COM



Directeur de la publication
Bruno Cavagné**Directeur délégué**
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fnfp.fr**Comité de rédaction**
Erica Calatizzo (Systra), Jean-Bernard
Datry (Setec tpi), Philippe Gotteland
(Fnfp), Jean-Christophe Goux-Reverchon
(Fnfp), Florent Imberty (Razel-Bec),
Nicolas Law de Lauriston (Léon Grosse),
Romain Léonard (Demathieu Bard),
Claude Le Quéré (Egis), Véronique
Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau
(Soletanche Bachy), Jacques Robert
(Arcadis), Claude Servant (Eiffage tp),
Philippe Vion (Vinci Construction Grands
Projets), Nastaran Vivian (Artelia),
Michel Morgenthaler (Fnfp)**Ont collaboré à ce numéro****Rédaction**
Monique Trancart (actualités
et page Rwanda Setec),
Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente**
Com et Com**Service Abonnement TRAVAUX**
Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.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**Directeur de clientèle**
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.fr**Site internet : www.revue-travaux.com****Édition déléguée**Com'1 évidence
2, chemin dit du Pressoir
Le Plessis
28350 Dampierre-sur-Avre
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.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).Éditions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0218 T 80259
ISSN 0041-1906

ANTICIPATION ET MAÎTRISE DES RISQUES, CLÉS DE LA RÉUSSITE DU GRAND PARIS EXPRESS



© DR

40 mois ! C'est le temps qui s'est écoulé entre la déclaration d'utilité publique de la ligne 15 Sud en décembre 2014 et le lancement du premier tunnelier du Grand Paris Express, le 3 avril 2018. Cet exploit souligne l'extraordinaire mobilisation de toutes les parties prenantes autour du nouveau métro. L'aventure souterraine est en marche : deux tunneliers creusent le sous-sol de la ligne 15 Sud. 11 viendront s'ajouter en 2019. Au total, ce sont 21 tunneliers qui avanceront simultanément au plus fort des travaux du Grand Paris Express. Du jamais vu en Europe !

Le défi à relever est immense, d'autant plus que la construction du Grand Paris Express s'inscrit dans un environnement urbain très dense et un contexte géologique complexe. Le rôle de la Société du Grand Paris, en tant que maître d'ouvrage, consiste à conduire le projet à son terme dans le respect des coûts et du calendrier fixés par le gouvernement. Pour y parvenir, nous avons une obsession : l'anticipation et la maîtrise des risques.

Pour préparer le lancement des chantiers, nous avons réalisé plus de 6000 sondages dans le sous-sol permettant de constituer une somme de données jamais collectée à l'échelle de la métropole,

cette métropole qui n'avait pas encore livré tous ses secrets. Nous avons ainsi pu mieux connaître l'ampleur du phénomène de dissolution du gypse dans le nord-est de Paris ou encore le comportement instable des argiles plastiques dans le sud et le sud-ouest de Paris.

On trouve également de nombreux réseaux et de multiples carrières dans le sous-sol francilien. Avant chaque chantier, nous sécurisons la zone en procédant à des travaux de déviations de réseaux de concessionnaires dans l'emprise des futurs ouvrages du Grand Paris Express et procédons à des travaux de confortement dans les zones à risques comme les carrières qui s'étendent sur presque 6 km dans le secteur sud-ouest de la Ligne 15 Sud.

Nous avons aussi recours à des dispositifs inédits pour gérer une autre spécificité de ce chantier : près de 80% du Grand Paris Express est en interface avec des ouvrages existants (infrastructures ferroviaires, réseaux routiers et aéroportuaires...). Afin de préserver ces équipements, la Société du Grand Paris a déployé un dispositif d'auscultation des mouvements de sol et des bâtis existants. Il repose sur une surveillance satellitaire depuis la phase de conception du projet jusqu'à la mise en service du nouveau métro.

Toutes ces initiatives prises pour permettre au chantier de se dérouler dans des conditions optimales mobilisent tout un écosystème d'acteurs réunis autour de la Société du Grand Paris. Sociétés de reconnaissance géologique, hydrogéologique, géophysique, géotechniques, entreprises d'ingénierie et acteurs des travaux publics sont à pied d'œuvre chaque jour de l'année pour faire du Grand Paris Express la vitrine du savoir-faire français en matière de conduite de projet.

THIERRY DALLARD
PRÉSIDENT DU DIRECTOIRE
DE LA SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS



TRAVAUX SOUTERRAINS

BIM © ANDRA 2018



04 ALBUM

08 ACTUALITÉ



20

**ENTRETIEN AVEC
JOANA GASSUAN**
LE SOUTERRAIN PAR PASSION

26 SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL -
LE SOUTERRAIN PAR EXCELLENCE

34 MIRE/AURIGAMI -
TOPOGRAPHIE : L'INTERFÉROMÉTRIE
RADAR SATELLITAIRE EN PLUS



40

**LA LIGNE 5 DU MÉTRO
DE BUCAREST**
Conception et
suivi des travaux



48

OA P13
Un puits de lancement de tunnelier
sur la Ligne 15 au cœur du site
protégé de l'île de Monsieur



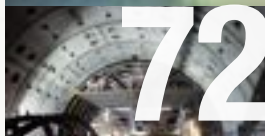
54

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mise en sécurité des tunnels
du Boulevard Périphérique Nord
de Lyon



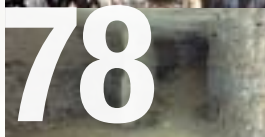
62

**UN TUNNEL SOUS
LE CANAL DE SUEZ**
Le tunnel routier d'Ismailia



72

**EXTENSION DES STATIONS
COURTES DE LA LIGNE A**
du Métro de Toulouse



78

**LA LIGNE 15 SUD
DU GRAND PARIS EXPRESS**
Conception et enjeux
du tronçon T3C



86

**LE BIM POUR LES
INFRASTRUCTURES...**
Déjà le bout du tunnel ?



92

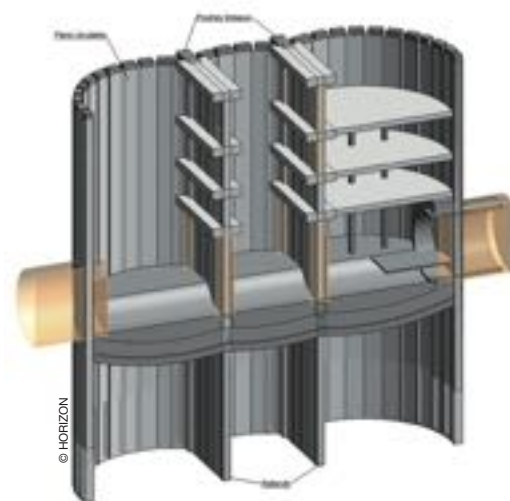
**PROLONGEMENT
DE LA LIGNE 14 AU SUD**
Conception des structures
souterraines (tunnel,
ouvrages annexes et gares)



PAROI MOULÉE TRILOBIQUE HORS NORME DANS L'ÎLE DE MONSIEUR

HORIZON (Bouygues TP, Soletanche Bachy France, Bessac, Soletanche Bachy Tunnels) a choisi une paroi moulée trilobique de 55 m pour le puits de départ OA P13 terrassé à 30 m de profondeur du tunnelier de la Ligne 15 Sud dans l'Île de Monsieur, à proximité du pont de Sèvres, en site protégé. C'est un ouvrage hors norme, tant par ses dimensions qu'au regard de son calcul et de sa réalisation. Il a fait l'objet d'une auscultation renforcée.

(Voir article page 48).







QUAND ON DOUBLE LES RAMES IL FAUT DOUBLER LES STATIONS

ARCADIS mandataire d'un groupement de maîtrise d'œuvre et Eiffage mandataire d'un groupement d'entreprises ont réalisé l'allongement de trois stations de la Ligne A du métro de Toulouse pour qu'elle puissent accueillir des rames de longueur double. Ces travaux de génie civil délicats ont été réalisés en deux périodes d'interruption du trafic. (Voir article page 72).



© PHOTOTHÈQUE TISSEO

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

LA MÉTROPOLE DU GRAND PARIS A SÉLECTIONNÉ 27 NOUVEAUX SITES À RÉAMÉNAGER



Le Fort de Villiers à Noisy-le-Grand (Seine-Saint-Denis) situé au milieu de 5,5 ha de bois.

Les 27 sites que les communes de la Métropole du Grand Paris ont retenu pour les transformer, s'ajoutent aux 54 choisis en 2016 et dont le réaménagement est engagé.

Le Grand Paris Express tire dans son sillage des opérations d'urbanisme, pas toujours situées à ses abords. L'émulation vient des maires réunis depuis 2016 dans la Métropole du Grand Paris (EPCI). Le premier appel à projets "Inventons la Métropole du Grand Paris" organisé en 2016⁽¹⁾ par l'EPCI, se concrétise. Les équipes lauréates des 54 sites à réaménager ont jusqu'à avril 2019 pour signer les promesses de vente avec les porteurs de projet. Les permis de construire suivront. Cela représente un investissement privé de 7,2 milliards d'euros pour développer 2 millions de mètres carrés. Le 2^e appel à projets est déjà lancé : la Métropole a publié à la mi-octobre la liste des 85 finalistes, sélectionnés parmi

224 candidats, qui vont plancher sur 27 sites dans 21 communes (cf. tableau). La remise de leurs dossiers est close le 1^{er} mars. Le jury fera part de ses choix en mai-juin.

→ Bâtiments à démolir

Le plus souvent, trois ou quatre équipes ont été retenues par site. Néanmoins, pour certains comme le Fort de Villiers à Noisy-le-Grand (Seine-Saint-Denis), près de l'autoroute A4 mais mal desservi par les transports en commun, une seule, celle de Sopic Paris, va affiner son projet. Ce fort, au milieu de 5,5 ha de bois, est un de ceux édifiés autour de Paris par Thiers en 1840. Même timidité des investisseurs vis-à-vis du délaissé du Chemin du Grosloy au

date de 1970 et est désaffectée depuis 2003. L'école Louis Lumière (cinéma) à Noisy-le-Grand a été conçue et réalisée entre 1986 et 1988.

→ Entonnement en souterrain d'une halle

D'anciennes friches industrielles ont déjà été arasées pour être réaménagées. C'est le cas de la halle McNeil Akron Repiquet, fabricant de machines pour le caoutchouc et le plastique, au Bourget (Seine-Saint-Denis). La parcelle de 1 ha est prête pour accueillir en souterrain un ouvrage d'entonnement du Grand Paris Express - raccordement de 2 tunnels à une voie de la Ligne 17 - et en surface "de nouveaux usages" à déterminer (agriculture urbaine, etc.).

Liste des équipes sur www.inventonslametropoledugrandparis.fr/sites.html. ■

⁽¹⁾ Cf. *Travaux* n°929, décembre 2016, page 9.

21 COMMUNES D'ÎLE-DE-FRANCE SONT IMPLIQUÉES

Département	Commune	Site
Essonne	Corbeil-Essonne	• hôpital Gilles
Hauts-de-Seine	Asnières	• Gare Lisch • Patinoire Courtilles
	Bourg-la-Reine	• La faïencerie
	Clichy-la-Garenne	• centre Léon Blum
	Nanterre	• hôpital • École d'architecture
	Rueil-Malmaison	• écoquartier de l'Arsenal
	Ville-d'Avray	• centre-ville
Paris	Paris 15 ^e	• quai d'Issy
	Paris 18 ^e	• puces de Clignancourt
Seine-et-Marne	Chelles	• secteur Castermant
Seine-Saint-Denis	Bagnolet	• pôle Gallieni
	Bondy	• centre-ville (PRU1) • chemin du Grosloy
	Épinay-sur-Seine	• zac Intégral
	Le Bourget	• Entonnement Est (ex-halle McNeil) • Site Abbé Niort
	Noisy-le-Grand	• fort de Villiers • École Louis Lumière
	Pantin	• secteur Candale-Méhul
	Saint-Ouen	• stade Bauer
	Villemonble	• conservatoire
Val-d'Oise	Argenteuil	• parc des Berges de Seine
Val-de-Marne	Cachan	• friche libre
	Vitry-sur-Seine	• zac Rouget-de-Lisle (D)

* Cette liste de la Métropole ne comprend que 26 sites.

MÉTROPOLE DU GRAND PARIS : 4 COMPÉTENCES

La Métropole du Grand Paris, qui organise l'appel à projets "Inventons la métropole du Grand Paris" (cf. ci-contre) est un établissement public de coopération intercommunale créé début 2016. Elle regroupe 209 représentants de 131 communes d'Île-de-France : 123 de la "petite couronne" - Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et Val-de-Marne - et 7 d'Essonne et du Val-d'Oise, départements limitrophes.

Ses compétences portent sur 4 domaines et touchent 7,5 millions d'habitants : aménagement de l'espace métropolitain, développement et aménagement économiques, protection et mise en valeur de l'environnement et politique locale de l'habitat.

www.metropoledugrandparis.fr



MACCAFERRI POLIMAC®

Nouveau revêtement
PoliMac®

Galvanisation
longue durée

Fil d'acier à faible
teneur en
carbone



PRÉSERVONS L'AVENIR



Les infrastructures que nous utilisons sont soumises à des conditions opérationnelles de plus en plus exigeantes. Pour répondre à ces besoins, Maccaferri a développé PoliMac®, un nouveau revêtement polymère pour les produits à base de grillage double torsion.

Le nouveau revêtement **PoliMac®** est un composant polymère inerte qui démontre une résistance élevée à l'abrasion. Il est capable de supporter des conditions d'exposition les plus sévères, comme des agressions chimiques et mécaniques extrêmement importantes, des rayons ultraviolets sur le long terme et les effets des basses températures. De plus, il est respectueux de l'environnement car il ne contient pas de métaux lourds.

MACCAFERRI

www.maccaferri.com/fr

PLANTER LES FRICHES UNE FOIS DÉPOLLUÉES

Replanter les friches industrielles, une fois dépolluées, vaut mieux que laisser faire la nature. "Naturellement", croissent des espèces exotiques dites envahissantes, des boisements rapides mais peu intéressants comme le bouleau, et d'autres variétés qui peuvent même pénaliser les futures opérations immobilières, selon l'Établissement public foncier Nord/Pas-de-Calais (État).

La recherche pendant quatre ans des meilleures plantations sur friches, a valu à l'EPF le prix du génie écologique dans la catégorie "aménagement des espaces publics et privés". Le prix, remis début novembre, a été organisé par l'Association fédérative des acteurs de l'ingénierie et du génie écologiques, l'Agence pour la biodiversité et le ministère de la Transition écologique et solidaire.

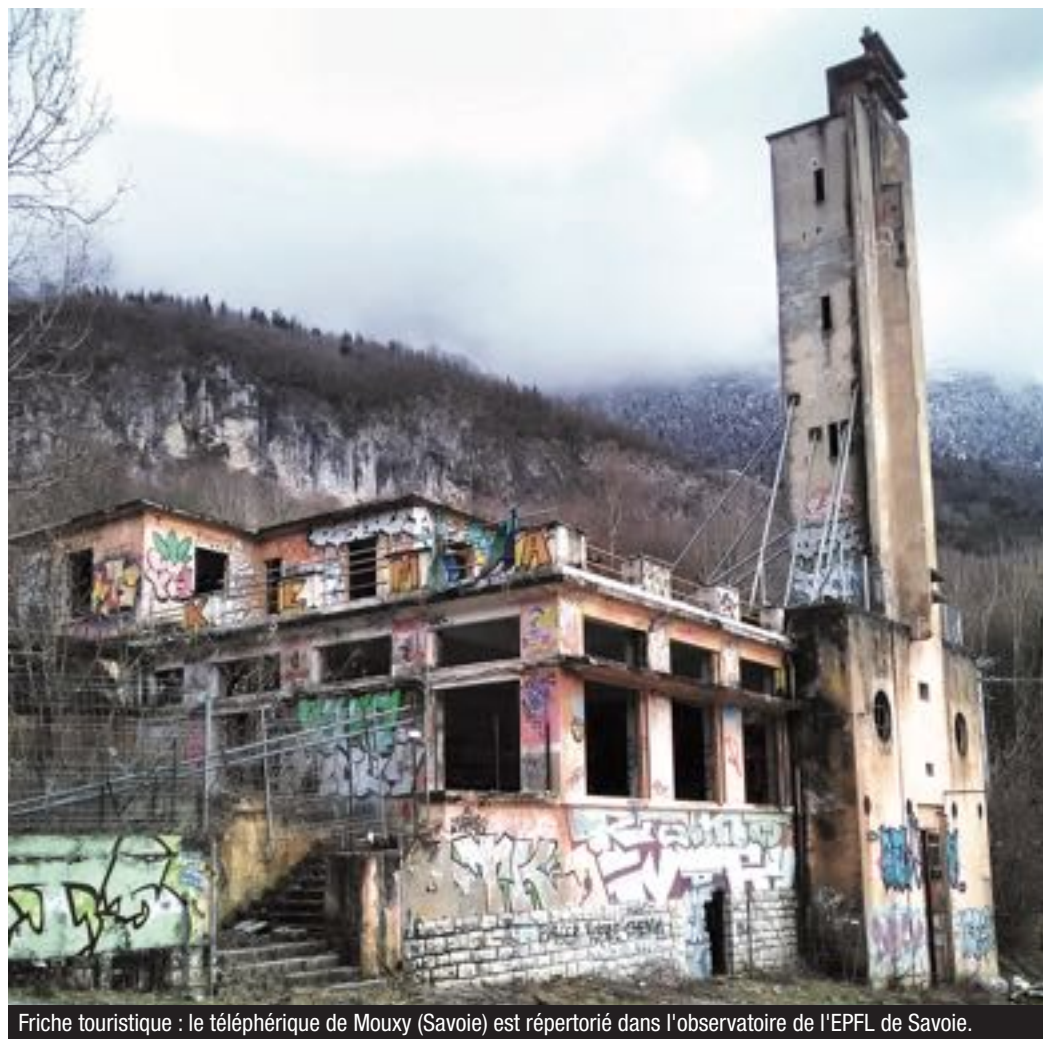
→ **Grande marguerite, bleuet, trèfle**

Les premiers terrains d'observation de l'EPF, à Arques (Pas-de-Calais) et à Wattrelos (Nord), ont été ensemencés avec des espèces locales et mellifères, par exemple de la grande marguerite, de la centaurée (bleuet), du trèfle rampant ou cornu (lotier corniculé).



Les plantes sur un terrain d'Arc international, ont été soigneusement choisies.

LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES AIDE À RECONVERTIR DES FRICHES



Friche touristique : le téléphérique de Mouxy (Savoie) est répertorié dans l'observatoire de l'EPFL de Savoie.

© EPFL DE SAVOIE

Les sports d'hiver génèrent des friches. Le téléphérique de Mouxy, au nord d'Aix-les-Bains (Savoie), a été abandonné en 1969. Il menait à la station de ski de Renard. Ce bâti a été répertorié dans l'observatoire des friches économiques dressé par l'Établissement public foncier local (EPFL) de Savoie. Sur 67 communes, 132 sites ont été repérés. L'inventaire sur leur état et leur possible reconversion reçoit 100 000 euros de la région Auvergne-Rhône-Alpes.

La Région a baptisé IDfriches la partie des fonds européens Feder destinée à la requalification de sites abandonnés. À la mi-octobre à Lyon, elle a réuni pour la 1^{re} fois plus de 300 personnes concernées : représentants des établissements publics fonciers d'État ou locaux, de collectivités locales, d'entreprises, du pôle de compétitivité Axelera (chimie et environnement), du Centre d'échanges et de ressources foncières

et du cluster Indura (infrastructures durables).

→ **Chiffrer les travaux avant décision**

L'EPFL de Savoie a aussi mené des études sur la Papeterie des Deux-Guiers (Entre-Deux-Guiers, Isère), site très dégradé et dangereux (fosses, déchets), en 2017. Il a fourni un état des lieux et chiffré les travaux pour que les collectivités décident quoi en faire. L'emplacement n'est pas très attractif.

La Papeterie des Alpes à Domène, à 10 km de Grenoble (Isère), est mieux située. L'EPFL du Dauphiné y a consacré une dizaine d'années et 1,7 million d'euros dont la dépollution et la mise en sécurité. La vente des différents lots à la commune est presque terminée.

→ **Projet : reconstruire un centre hospitalier**

Rappelons que les établissements publics fonciers se chargent des friches les plus polluées puis les cèdent aux communes.

L'Établissement public foncier de l'Ouest Rhône-Alpes (Epora) a ainsi en portefeuille plusieurs usines à l'abandon. Deux sont situées à Saint-Symphorien-sur-Coise (Rhône). Les Tanneries Ronzon (1903-2009), qui accueillent depuis une dizaine d'années une maison des services au public, ont encore de la surface pour autre chose. Quant à la parcelle des Roches (meubles, 1904), la Communauté de communes des Hauts de Lyonnais y a commencé le chantier d'une résidence d'entreprises et prévoit d'y reconstruire le centre hospitalier, situé à côté.

→ **24 millions d'euros sur cinq ans**

Les vingt opérations pour lesquelles une aide IDfriches a été actée, sont décrites dans des fiches. La Région leur dédie 11 millions d'euros sur un total de 24 décidés pour la période 2015-2020.

www.idfriches-auvergnerrhonealpes.fr ■



CRÉATEURS DE SOLUTIONS



- PAROIS MOULÉES / SOUTÈNEMENTS
- PIEUX DE FONDATIONS / MICROPIEUX
- CLOUS / TIRANTS D'ANCRAGE
- REPRISE EN SOUS-CŒUVRE
- COMBLEMENT DE CARRIÈRES
- TRAITEMENT DE TERRAINS
- SONDAGES DE RECONNAISSANCE
- JET GROUTING
- CONGÉLATION DE SOL
- FONDATIONS DE PYLÔNES / ÉOLIENNES

BOTTE Fondations
 ZAC du Petit Lerzy - 5 rue Ernest Flammarion
 94659 RUNGIS Cedex
 Tél. : 01 49 61 48 00
bottefondations@vinci-construction.fr // www.botte-fondations.fr



ARCHITECTURE EN ACIER : TRANSPARENCE, COULEUR ET PROTECTION

Construiracier a décerné 7 trophées Eiffel d'architecture acier pour des réalisations de 2016 ou 2017, en octobre. La passerelle de Saint-Omer (Pas-de-Calais) de DVD a été distinguée dans la catégorie Franchir, notamment pour sa discrétion (Cf. *Travaux* n°942, juin 2018, p. 11).

L'École nationale de la statistique et de l'administration économique, réinstallée à Paris-Saclay, comporte une structure en acier qui laisse passer la lumière et le paysage (trophée Apprendre). Conception : Cab Architectes et Batiserf ; charpente : Vilquin (cf. *Travaux* n°929, décembre 2016, p. 9).

La salle de basket de Calais (Pas-de-Calais) est recouverte d'une toiture tendue en acier (trophée Divertir, Bureau face B). Les charges du toit sont reportées sur les gradins.

→ Résille nervurée

Dans la catégorie Voyager, Construiracier a retenu le parking silo de l'aéroport

de Bâle-Mulhouse (trophée Voyager, DeA architectes), caché derrière une fine résille nervurée qui laisse passer la lumière.

Tout en couleurs, le siège de la métropole de Rouen Normandie, conçu par Jacques Ferrier, trône au bord de la Seine (trophée Travailler). La structure métallique soutient des écailles en verre coloré.

→ Immeubles mixtes

Enfin, deux immeubles ont reçu le trophée Habiter pour leur intégration dans l'environnement urbain.

La Cité internationale Paul Ricœur à Rennes réunit derrière une enveloppe en aluminium et verre une résidence pour chercheurs et des équipements (Hérault Arnod Architectures). L'immeuble Gambetta à Nantes (Philippe Dubus) regroupe, lui aussi, des logements et des équipements, avec vue sur un espace vert et des bâtiments anciens. L'acier est employé en bardage, bandeaux de façade, claustras et persiennes. ■



Le trophée Travailler de Construiracier a été attribué au siège de la métropole de Rouen tout en couleurs.

© LUC BOESLY

ATTIRER LES 14-18 ANS

Le secteur des travaux publics a besoin de recruter 200 000 personnes sur cinq ans.

Or, la moitié des entreprises déclarent qu'elles ne peuvent pas développer leur activité par manque de personnel.

La Fédération nationale des travaux publics (FNTP) lance donc une campagne de promotion de ces métiers en direction des jeunes de 14-18 ans. L'orientation commence dès le collège, lors du choix des stages.

La campagne qui s'étale sur trois ans, s'affiche sur le web et les réseaux sociaux. Le film #Franchementrespect promeut l'intérêt du travail, la fierté de ceux qui réalisent les ouvrages d'intérêt général, à travers une chanson rap. Des affiches prennent le relais lors d'événements.

En 2018-2019, 16 000 collégiens seront accueillis en stage



Des affiches accompagnent la campagne sur internet.

© FNTP

dans des entreprises de travaux publics. La fédération s'est engagée à faire passer le nombre d'apprentis d'ici à 2023, de 8 000 à 12 000.

Par ailleurs, la FNTP lance une étude sur l'évolution des emplois et des métiers dans le cadre du plan d'investissement dans les compétences 2018-2022.

DES ÉTUDIANTS RANIMENT DES SITES EN PÉRIL

La reconversion de la passerelle Eiffel de Bordeaux (Gironde) en pôle culturel a remporté le 1^{er} prix du concours Acier de Construiracier, qui récompense des travaux d'étudiants en architecture et ingénieurs. Hugo Lebrunet de l'École nationale supérieure d'architecture (Ensa) de Nantes propose de greffer à l'endroit des piles de la passerelle SNCF désaffectée, de grands volumes de métal et verre, libres d'occupation culturelle.

→ Agriculture urbaine

C'est aussi une "friche" SNCF qui a inspiré Paul Huguet (Ensa, Paris Val-de-Seine), 2^e prix. Il transforme d'anciens ateliers à la Plaine-Saint-Denis (Seine-Saint-Denis) en ferme agricole. Elle pourrait abriter, dans d'anciennes halles, de la permaculture, des buttes, du bois, du compostage, etc.

3^e prix : la transformation de la maternité Adolphe Pinard de Nancy (Meurthe-et-Moselle) en pôle social et culturel. Emeline Di Carlo, Damien Martrille,

Romain Mazzucotelli-Bertrand de l'Ensa Nancy, la chapeautent d'une structure métallique.


→ Reconstruire Alep (Syrie)

Enfin, le jury du concours a décerné un prix spécial à une autre équipe de l'Ensa Nancy : Erwin Arnoux, Alexandre Bigot, Mehdi Redda. Ils "remontent" provisoirement les immeubles détruits par la guerre à Alep (Syrie) grâce à des échafaudages posés sur les ruines et qui portent des modules intégrables à la construction définitive. ■




1^{er} prix Concours acier : greffes de métal et verre sur la passerelle Eiffel à Bordeaux (Gironde).

© ENSA NANTES




Suite de logiciels pour analyse de vos projets géotechniques
Semelles / Pieux / Murs / Soutènements / Stabilités

Programme Stratigraphie



Nouveauté 2018 !
Import des essais in-situ
Création du modèle géologique
Rapports de logs

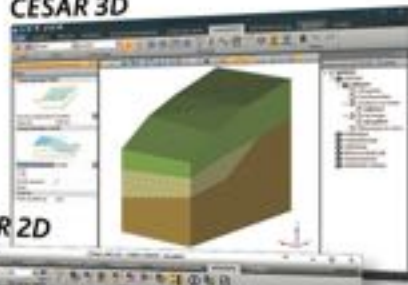


**2 logiciels à associer
pour créer votre BIM**

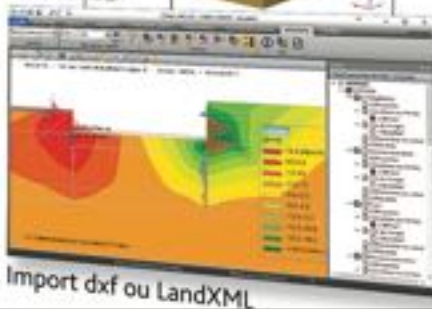


Logiciel Eléments Finis 2D & 3D
Géotechnique / Tunnels / Hydrogéologie


CESAR 3D



CESAR 2D



Import dxf ou LandXML



Editeur de logiciels pour le Génie Civil

8 qual Bir-Hakeim, F-94410 Saint-Maurice
Tél: +33 1 49 76 12 59

www.cesar-lcpc.com
contact@itech-soft.com

GRAND PARIS EXPRESS : 11 TUNNELIERS DÉMARRENT EN 2019



© GÉRARD ROLLANDO

La gare de Saint-Maur-Créteil (Val-de-Marne) se trouve à 52 m de profondeur.

Fort-d'Issy-Vanves-Clamart (Hauts-de-Seine). En 2020 : ce sera 4 de plus sur la ligne la plus avancée.

À signaler aussi en 2019, l'arrivée d'un engin pour creuser un tunnel vertical sans parois moulées (Vertical Shaft Sinking Machine, Herrenknecht) sur l'ouvrage annexe Malleret-Joinville à Malakoff (Hauts-de-Seine).

→ **Adapter la méthode constructive**

Toutes les gares de la ligne 15 sud sont au stade du génie civil. Parmi elles, citons la gare de Saint-Maur-Créteil (Val-de-Marne) située à 52 m de profondeur. Elle a fait l'objet d'études complémentaires, à cause du voisinage du RER A dont la station a été renforcée par un mur de soutènement avec suivi de déformations. La méthode constructive a dû être adaptée de façon à faire passer le tunnelier avant l'achèvement de la gare. ■

Les chantiers mis en route sur le tracé du Grand Paris Express dépassent la centaine dont les deux tiers en génie civil. Parmi les derniers marchés signés en octobre, citons celui du centre d'exploitation des lignes 16 et 17 au nord-est de l'agglomération, situé sur Aulnay (Seine-Saint-Denis) et Gonesse (Val-d'Oise). Les travaux de 54,8 millions d'euros sont confiés au groupement piloté par Quintoli avec NGE Génie Civil et EHTP. Il comprend la plateforme, les voiries et réseaux divers. Le centre abritera le poste de commandement des deux lignes.

Le génie civil du 2^e lot de la ligne 16 a été remporté par Salini Impregilo. Montant : 718,8 millions HT pour 11,1 km de voies en tunnel, 4 gares - Aulnay, les deux à Sevran et Clichy-Montfermeil - et 11 ouvrages annexes. Rappelons que l'entreprise italienne est déjà impliquée, avec Nouvelles générations d'entrepreneurs, dans le prolongement de la ligne de métro 14 vers l'aéroport d'Orly.

Enfin, le centre d'exploitation de la ligne 15 à Champigny-sur-Marne (Val-de-Marne) a été attribué au groupement mené par Spie Batignolles avec Demathieu Bard Île-de-France, Spie Batignolles Fondations, Atlas Fondations, Valerian, Colas IFDN et Eurovert. Marché : 125 millions d'euros HT.

→ **Un tunnel vertical à creuser**

L'emploi de tunneliers va s'intensifier en 2019 avec onze mises en route. Sur la ligne 15 sud, cinq vont s'ajouter aux deux déjà au travail. Le premier démarre sur le tronçon de Bagneux à



© AXEL HEISE

Les parois moulées ont été terminées en septembre à la station Le-Vert-de-Maisons (Val-de-Marne), ligne 15 sud.

CREUSEMENT D'UNE GALERIE DE SÉCURITÉ

Le tunnel ferroviaire de 3 km entre les gares de Chaville-Vélizy et Meudon-Val-Fleury (RER C, Hauts-de-Seine) n'était pas doté d'une galerie de sécurité pour évacuer les voyageurs.

Les travaux de creusement du tronçon parallèle de 1,7 km ont commencé fin octobre. Bessac a fourni le tunnelier Gaia et, à cette occasion, a reçu le label Origine France garantie.



© BESSAC

Tunnelier d'origine française garantie.

EGIS RÉCOMPENSÉ

Egis remporte deux prix au Global Light Rail Awards, concours britannique qui a reçu 120 dossiers cette année. Le prix "projet de l'année de plus de 50 millions d'euros" a été décerné au groupe, mandataire pour le tramway de Luxembourg (maîtrise d'ouvrage : Luxtram). La ligne, pour partie déjà en route, sera en correspondance avec le bus, le train et un funiculaire. Ce tramway comprend 3,6 km sur lesquels la rame se recharge à chaque station par le sol. Même principe avec stockage d'électricité pour les sections en surface du tramway de Nice (fin 2019) qui a valu à Egis le prix "félicitations du jury".

VICAT CROÎT AU BRÉSIL

Vicat envisage de devenir majoritaire dans la société brésilienne Cimento do Planalto (Ciplan). Le groupe a signé un accord début octobre qui devait être validé. Ciplan, cimenterie près de Brasilia qui produit 3,2 millions de tonnes par an, dispose de réserves minérales.

LE MÉTRO DE SANTIAGO DU CHILI S'ÉTEND

Colas Rail poursuit sa participation à la construction du métro de Santiago (Chili). La ligne 2 est en cours d'extension sur 5,1 km en tunnel. Sur cette ligne, le groupement Colas Rail avec ETF va fournir et poser la voie ferrée et le 3^e rail, et agrandit un dépôt de maintenance (36 millions d'euros). Colas Rail a aussi gagné le lot électrification (20 millions). Ces travaux représentent trois ans d'activité. La filiale de Colas avait collaboré aux lignes 3 et 6 (2017-2018) et assure la maintenance des voies sur 140 km.



Travaux d'un tunnel de la ligne 6 (2018).

© COLAS RAIL

SUEZ À CHANGSHU EN CHINE

Suez NWS va construire et exploiter une usine de traitement des eaux usées dans le district de Chengdong à Changshu (nord-ouest de Shanghai, Chine). Le contrat signé par l'intermédiaire de la joint-venture Jiangsu Sino French Water (Suez 35%) se monte à 413 millions d'euros sur trente ans. Suez NWS a aussi remporté le marché d'exploitation-maintenance du centre de traitement de déchets du district de Jianghe Tiarong dans la même ville. Contrat signé par la joint-venture Changshu Suez NWS Environmental Management (Suez 35%).

LE GESTE D'OR DISTINGUE DES OPÉRATIONS DU PATRIMOINE ET DE L'AMÉNAGEMENT



Travaux au Convent des Jacobins à Rennes, chantier 2014-2017 couronné d'un geste d'or.

© WILLY BERRE

Le Palais de justice de Strasbourg, le Théâtre de Chaillot à Paris et la galerie d'art Marengo à Bordeaux ont en commun le mariage de la modernité et de l'ancien, lors de leur réhabilitation. Les trois ont reçu un geste d'or, catégorie architecture, urbanisme et société, de l'association du même nom qui récompense des opérations du patrimoine bâti, de l'aménagement urbain et paysager de l'association du même nom qui récompense des opérations du patrimoine bâti, de l'aménagement urbain et paysager pour leur traitement durable, la gestion des constructeurs et des usagers, et un financement équilibré.

Le concours inclut une audition des maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises.

Le Geste d'or se décline en une vingtaine de catégories. La seule récompense en "chantier" a été attribuée à la réfection du Couvent des Jacobins à Rennes conduite par Sogea Bretagne BTP avec Degaine (Vinci Construction France).

D'autres filiales de Vinci - Adim Lyon, Citinéo, Compte et Bourgeois - ont remporté le seul geste d'or en "projet amont" pour le Cloître des sœurs Saint-Joseph d'Annecy (Haute-Savoie).

→ Château d'eau sur une maison

C'est encore un édifice religieux qui a remporté un geste d'or, catégorie financement et mécénat : la Chartreuse de Neuville-sous-Montreuil (Pas-de-Calais). La restauration de la villa Hennebique

à Bourg-la-Reine (Hauts-de-Seine), a obtenu un geste d'argent, en stratigraphie. C'était la maison de François Hennebique qui l'avait conçue et construite en béton armé, début XX^e siècle. Elle comporte une tour-château d'eau de 40 m pour l'arrosage des serres et jardins suspendus, sur place.

Le prix architecture, innovation sociale et économique a été remis à deux opérations : le nouveau site de l'Université régionale des métiers et de l'artisanat à Bruay-sur-l'Escaut/Saint-Saulve (Nord)

et la démolition-reconstruction d'un hôtel particulier du Marais de Paris (GTM Bâtiment).

→ Réaménagement du centre-ville de Vincennes

Le geste d'or en paysage et aménagement urbain est revenu au centre-ville de Vincennes (Val-de-Marne) et le geste d'argent, à la cité historique de Castelnau-de-Lévis (Tarn).

Toutes les opérations sur : www.legestedor.com. ■



Palais de justice de Strasbourg, geste d'or architecture, urbanisme, société.

© NICOLAS FUSSIER

À LA RECHERCHE D'INFRASTRUCTURES MARITIMES PROPICES À LA BIODIVERSITÉ



© UNIVERSITÉ DE BOURNEMOUTH (ANGLETERRE)

Les rockpools, alvéoles de 30-40 cm accrochées sur le mur d'un quai, retiennent l'eau à marée basse, ce qui favorise la biodiversité marine.

Prendre les infrastructures maritimes plus accueillantes à la faune et à la flore est l'objet du projet Marineff, officiellement lancé le 25 octobre. L'École supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction (Esitc Caen) en est à l'origine. Y participent : l'Université Caen Normandie, le Museum national d'histoire naturelle, Ports normands associés, Travaux publics du Cotentin, Vinci Construction maritime et fluvial, avec trois universités anglaises : Southampton, Bournemouth et Exeter.

Le projet s'intègre dans le programme de coopération transfrontalière européen, Interreg V. Il dispose de 4,6 millions d'euros sur quatre ans dont une aide du Fonds européen de développement régional.

→ Imiter la nature

L'Esitc Caen a déjà travaillé sur les récifs artificiels à travers Recif (Interreg IV 2011-2015). « *Nous nous sommes dit pourquoi ne pas étendre la démarche à l'ensemble des infrastructures maritimes,* » précise Mohamed Boutouil,

coordinateur de Marineff et directeur de la recherche à l'Esitc Caen.

Les infrastructures maritimes et le réchauffement climatique fragilisent les écosystèmes marins et côtiers.

Les équipes vont élaborer quatre types d'infrastructures artificielles imitant au mieux le milieu naturel : blocs de digues, habitat à huîtres, dispositifs de mouillage, alvéoles piscines accrochées aux parois des quais (gardent l'eau à marée basse).

→ Trouver un béton bioréceptif

Première phase du projet : les essais en laboratoire pour choisir les bons matériaux et les bonnes formes. Il s'agit, par exemple, de déterminer la composition d'un béton "bioréceptif". Contiendra-t-il plus de silice, de calcaire ou d'autre chose ? Quelle doit être la forme des dispositifs et leur rugosité de surface pour convenir à la faune ou à la flore marine ?

Ces choix seront appliqués sur six sites expérimentaux dans le sud de l'Angleterre - baie de Bournemouth/Ile de Wight et sur la rivière Beaulieu en baie de Solent, voisine - et en Normandie à Cherbourg (Manche), Luc-sur-Mer et Ouistreham (Calvados), et en baie de Dinard (Ille-et-Vilaine).

→ Sur une digue en travaux

Puis viendront deux opérations pilotes à plus grande échelle, à l'automne 2019. Dans le Grand port maritime de Cherbourg (Ports normands associés), partenaire du projet, une digue en réfection recevra des blocs biomimétiques.

Des habitats artificiels pour attirer davantage d'huîtres plates seront immergés dans le Solent. ■

18 CAISSONS DE 10 000 TONNES

À fin décembre, 18 caissons en béton armé auront été fabriqués dans le port de Marseille à destination de l'extension par la mer de Monaco.

Ces blocs de 26 m de haut, 10000 tonnes chacun, sont utilisés par Bouygues Travaux Publics pour former la ceinture de protection du terre-plein du futur écoquartier de l'Anse du Portier*. Ils ont été, dans un premier temps, acheminés par remorqueur. Toutefois, à cause de la durée du trajet et du risque de chavirement, ils sont maintenant déplacés sur bateau-plateau.

Une fois arrivés à destination, les caissons creux sont remplis d'eau pour couler, puis de ballast.

Cemex s'est associé à Lafarge pour fournir le béton adéquat. Les caissons sont fabriqués dans un dock flottant "à casiers" de 56 m de long, 50 de large et 27 de haut. Le béton est à prise lente et doit monter rapidement en résistance.

Une production de froid et de chaud ajuste la température de l'eau de production pour obtenir la plasticité la meilleure.

* Cf. Travaux n°937, novembre 2017, pp 50-55.



© PORT NORMANDS ASSOCIÉS

Le port de Cherbourg (Manche) met à disposition une digue en réfection pour expérimenter des blocs biomimétiques, en 2019.



© CEMEX

À Monaco, les caissons sont remplis d'eau puis de ballast.

SALON DES MAIRES 2 PRIX DE L'INNOVATION BTP-VOIRIE

Madroris est un système de gestion des routes rurales. Il s'utilise en plusieurs phases. Les voies sont identifiées, classées et cartographiées. Puis leur état est filmé et géolocalisé à partir d'un véhicule. Les données recueillies servent à dresser un diagnostic, évaluer les travaux et à les suivre. Toutes ces informations sont communiquées à la collectivité.

Helpilot qui l'a conçu, l'a expérimenté sur le territoire de la communauté de communes Conques-Marcillac (Aveyron). Le dispositif a reçu un des deux prix de l'innovation du Salon des maires (20-22 novembre) dans la catégorie BTP-voirie, ex-æquo avec le Grrep (ci-dessous).

La jeune société a été créée par Rouquette TP, Sol-Labo-Concept et ACT Pesage (numérique).

→ S'immerger dans l'espace urbain

Second prix de l'innovation dans la même catégorie : Grrep - Gestion du réseau routier et des espaces publics - plateforme internet qui regroupe, après scannage dynamique, tout ce qui figure sur l'espace public, en surface, avec visualisation en 3D et en immersion, et intégration dans un système d'information géographique.

La coopérative TT-géomètres experts l'a mise au point.



Madroris comprend un relevé sur le terrain.

ROUTES : CONCILIER SÉCURITÉ, BIODIVERSITÉ ET PAYSAGE



Dans le Doubs, des glissières conduisent les batraciens vers les passages sous voirie, expérience dont s'inspire la Savoie.

Pour éviter que les crapauds ne se fassent écraser sur la route en période de reproduction, le département de Savoie a décidé d'installer un dispositif qui les guide vers des tunnels sous la chaussée, à l'automne 2019, sur la RD916 au col de la Crusille. Ce projet a reçu une mention spéciale au prix Infrastructures pour la mobilité, biodiversité et paysage (IMBP) de l'Institut des routes, rues et infrastructures pour la mobilité⁽¹⁾.

→ Guider crapauds et grenouilles

Ce guidage de petite faune s'inspire de l'expérience du Doubs. Neufs passages espacés de 40 m, "reliés" entre eux par des glissières en métal, ont été implantés en 2012-2013, sur 350 m de la RD 14, à Geneuille. Aucun écrasement n'a été constaté à ces endroits depuis.

Le grand prix IMBP va à la mise en sécurité de la RD914 entre Banyuls et Cerbère (Pyrénées-Orientales), route côtière et de montagne. Commencée en 2017, elle se terminera en 2021. Dix ans ont été nécessaires au Conseil départemental pour la préparer (études, autorisations, mesures compensatoires, etc.).

→ Que les secours puissent passer

Sur 6,3 km, la chaussée est élargie de 6,30 m à 8 m - 6 m et 2 accotements de 1 m. Les véhicules de secours pourront passer en 3^e position en cas d'incendie ou d'accident, et les cyclistes, rouler plus en sécurité. Les virages serrés

sont redessinés, les carrefours, réaménagés, et la visibilité, dégagée.

Second grand prix ex-æquo : la transformation de l'entrée de la ville du Havre (Seine-Maritime), côté ancienne RN 15, à l'est. Grâce aux contre-allées, l'espace a été redistribué en faveur des piétons et des cyclistes. Pont, passages souterrains ou en hauteur sont supprimés.

→ Voie verte raisonnable

Une mention spéciale génie écologique va à la reconversion d'une route fermée

en 2008 après une tempête, à Cayeux-sur-Mer (Somme) mais fréquentée depuis de façon anarchique, ce qui a dégradé les dunes. D'où le projet de voie verte "raisonnée et raisonnable" par le Syndicat mixte Baie de Somme-Grand littoral picard afin de restaurer le biotope. ■

⁽¹⁾ Partenaires : ministère de la Transition écologique et solidaire, Assemblée des départements de France, FNTP, Routes de France et Terrassiers de France.



La route entre Banyuls et Cerbère (Pyrénées-Orientales) a été élargie, la vue dégagée, avec des mesures compensatoires vis-à-vis du milieu naturel.

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 22 JANVIER

Hydrogénies (trophées de l'hydrogène)
Lieu : Dunkerque (Nord)
<http://hydrogenium.eu>

• 30 ET 31 JANVIER

Carrefour des gestions locales de l'eau
Lieu : Remes (Ille-et-Vilaine)
www.idealconnaissances.com/carrefour-eau/

• 6 ET 7 FÉVRIER

Colloque annuel du Syndicat des énergies renouvelables
Lieu : Paris (Unesco)
www.enr.fr

• 7 FÉVRIER

Enerj meeting
Lieu : Paris (Bourse)
www.enerj-meeting.com/conference

• 11 AU 13 MARS

12^e rencontres géosynthétiques
Lieu : Nancy
www.rencontresgeosynthetiques.org

• 18 AU 20 MARS

Vulnérabilité et résilience des réseaux de transport
Lieu : Montrouge (Hauts-de-Seine)
www.biennaledesterritoires.fr

• 20 ET 21 MARS

Génie civil au cœur des mutations techniques et numériques
Lieu : Cachan (Val-de-Marne)
www.afgc.asso.fr

FORMATIONS

• 10 ET 11 JANVIER

Dimensions juridiques du Bim
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 29 JANVIER

Réaction sulfatique interne : nouvelles recommandations de prévention
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 5 ET 6 MARS

Le chantier et le Bim
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 12 ET 13 MARS

Maintenir les ouvrages portuaires : démarche et organisation
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 18 ET 19 MARS

Méthodes rationnelles de dimensionnement et de renforcement des chaussées aéronautiques
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 20 AU 22 MARS

Fondamentaux de la technique ferroviaire
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 25 ET 26 MARS

Gestion contractuelle d'un chantier d'ouvrage souterrain
Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

NOMINATIONS

CEREMA :

Jean-Yves Gouttebel remplace Yves Krattinger au poste de

président du comité stratégique du Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

ENERGISME :

Thierry Braine-Bonnaire est nommé président du comité scientifique de la plate-forme d'agrégation de données de sources hétérogènes.

GRAND PARIS :

Thierry Dallard préside le directoire de la Société du Grand Paris depuis septembre, en remplacement de François Poupard (intérim).

TRANSITION ÉCOLOGIQUE :

Emmanuelle Wargon prend la succession de Sébastien Lecornu comme secrétaire d'État à l'écologie. M. Lecornu est ministre chargé des collectivités territoriales (ministère de la Cohésion des territoires).



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 plus de **7 500 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à près de **260 000 salariés connus**.

Nos coordonnées :

• Par courrier :

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

• Par Internet : www.cnetp.fr

• Par mail : sur www.cnetp.fr, lien *écrire un e-mail*

• 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



PAR NUMÉRO : 15€ AU LIEU DE 25€

OUVRAGES D'ART

+ SUPPLÉMENT "SPÉCIAL 100 ANS" OFFERT

932

SOLS ET FONDATIONS

933

SPÉCIAL BIM 2

934

VILLE ET PATRIMOINE

935

INTERNATIONAL

936

TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

937

SPÉCIAL GRAND PARIS

938

TRAVAUX SOUTERRAINS

939

OUVRAGES D'ART

940

SPÉCIAL INNOVATION

941

SOLS ET FONDATIONS

942

ÉNERGIE

943

MAINTENANCE DES INFRASTRUCTURES

944

INTERNATIONAL

945

TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

946

BON DE COMMANDE ■ REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

À renvoyer à : Corne et Corn - Service Abonnements TRAVAUX - Bât. Copernic - 20 av. Édouard HERRICK - 92350 Le Plessis-Robinson
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22 - Fax : +33 (0)1 40 94 22 32 - Email : revue-travaux@corne.com.fr

JE COMMANDE LES NUMÉROS

SUIVANTS (cochez les cases de votre choix en indiquant le nombre d'exemplaires) :

932 x	1 937 :	1 942 x
933 x	1 938 :	1 943 x
934 x	1 939 :	1 944 x
935 x	1 940 :	1 945 x
936 x	1 941 :	1 946 x

Soit un montant total de :

_____ numéros x 15 € = _____ €

(Pour les numéros de plus de 20 exemplaires, le prix est de 15 € à 15 € HT)

Cette revue est diffusée gratuitement à nos abonnés. Elle est publiée par CORNE ET CORN, 20 av. Édouard HERRICK, 92350 Le Plessis-Robinson, France. Toute réimpression sans autorisation est formellement interdite. Toute réimpression sans autorisation est formellement interdite. Toute réimpression sans autorisation est formellement interdite. Toute réimpression sans autorisation est formellement interdite. Toute réimpression sans autorisation est formellement interdite.

JE VOUS INDIQUE MES COORDONNÉES :

Nom _____ Prénom _____

Entreprise _____ Fonction _____

Adresse _____

Code postal _____ Ville _____

Tél. : _____ Fax : _____

Email : _____ Merci de ne pas communiquer mon adresse mail

Je joins mon règlement d'un montant de _____ € TTC par Chèque à l'ordre de **COM'1 EVIDENCE**

ATTENTION : tous les règlements doivent être libellés exclusivement à l'ordre de COM'1 EVIDENCE

Je régle à réception de la facture

Je souhaite recevoir une facture accusée

Cette signature est un acte juridique obligatoire



1 © BRIDGES TO PROSPERITY

PONT SUSPENDU FINANCÉ PAR LE MÉCÉNAT

ENQUÊTE : MONIQUE TRANCART

Setec contribue à la construction d'une passerelle au-dessus d'une rivière sujette à crues, dans le nord du Rwanda, site proposé par Bridges to Prosperity. Reste à financer le déplacement de dix personnes sur place.

Dans le nord du Rwanda, les crues de la rivière Rukarara coupent le chemin de 7 000 habitants vers les écoles, le dispensaire de Nyabimata et le marché de Kumujeni, six mois par an. Traverser à pied pendant les inondations peut s'avérer mortel.

Setec participe à la réalisation d'un pont suspendu qui remédie à cette situation. Le franchissement piéton mesure 70 m de long sur 1,50 m de large, et se situe à 10 m au-dessus de l'eau.

Bois, ciment, maçonnerie en pierres, disponibles sur place, sont employés en platelage et dans les culées et rampes. La construction nécessite aussi de l'acier pour les câbles, les suspentes et les pylônes, apportés de l'extérieur.

→ Technologie robuste et économique

L'opération résulte de la conjonction d'un appel à idées au sein du groupe Setec à l'occasion de ses 60 ans, fin 2017, et d'une proposition de Bridges to Prosperity (B2P), organisation non gouvernementale américaine. En interne, trois équipes ont été finalistes du concours "Setec d'ici 2030". Deux s'intéressent au plastique dans les océans : ramassage et réutilisation. Le jury et les collaborateurs ont retenu la troisième orientée vers le low tech, c'est-à-dire les solutions peu coû-

teuses, peu fragiles, peu énergivores, adaptées au juste besoin des futurs utilisateurs. La réutilisation de matériaux en est une facette. B2P, de son côté, avait les contacts officiels pour la construction d'un pont à Gahunga et se charge de trouver des mécènes. L'ONG a pour objectif de rompre l'isolement de certaines communautés, source de pauvreté par manque de soins, de formation et de débouchés économiques.

→ Chantier en deux temps

« Il y a une course en avant sur la technologie des ouvrages d'art qui va à l'encontre de l'appauvrissement des civilisations occidentales et n'est pas adapté au niveau de vie des pays émergents, » estime Jean-Bernard Datry, construction manager qui accompagne l'équipe de neuf personnes impliquées dans le projet et qui l'a fortement défendu. Le low tech répond mieux à des besoins modestes. Les travaux ont lieu du 12 au 27 janvier. B2P aura déjà travaillé avec du personnel local pour créer les fondations et les socles des pylônes et ancrages. Quand l'équipe Setec arrive, elle poursuit le chantier et l'encadre pour le dressage des pylônes, le montage des câbles de suspente et celui du tablier en bois. Elle forme les utilisateurs à la préservation de l'ouvrage. Auparavant, elle aura établi un

planning, distribué les rôles et préparé la sécurité de tous.

Le pont est un des trente modèles d'ouvrages conçus par B2P en différentes longueurs, qu'ils soient suspendus ou "pont de singe".

→ Trouver l'argent pour 10 personnes sur place

Le projet coûte 60 000 dollars apportés par Setec. Restent 18 000 euros qui correspondent aux frais d'une équipe de dix personnes pour aller sur place et y séjourner. Ce montant est rassemblé grâce à un appel aux dons par internet. Au 8 décembre, 10 350 euros avaient été collectés.

Dons sur : www.helloasso.com/associations/setec-as/collectes/desenclavement-de-kabere-au-rwanda ■

1- Le pont suspendu au Rwanda sera du même type que celui-ci construit à Haïti, tout en étant adapté au site.

2- Traversée à pied de la rivière Rukarara, à Gahunga au nord du Rwanda.



2 © BRIDGES TO PROSPERITY

LE SOUTERRAIN PAR PASSION

La passion du souterrain est quelque chose que l'on a en soi. Tous les professionnels qui travaillent dans ce secteur vous le confirmeront.

C'est cette passion qui anime Joana Gassuan, jeune alternante-ingénieure de 26 ans qui, non contente d'être déjà certifiée pilote de tunnelier, poursuit des études en alternance pour devenir ingénieure, de préférence dans la conduite de travaux en souterrain.

Entretien avec Joana Gassuan, pilote de tunnelier. PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



À la suite de quel parcours scolaire et universitaire en êtes-vous arrivée à choisir de devenir pilote de tunnelier ?

J'ai grandi dans le milieu des Travaux Publics.

Mon père dirigeait une entreprise de Travaux Publics, la SARL Alain Gassuan, et j'ai d'ailleurs su très jeune que je voulais travailler dans ce secteur. C'était une entreprise qui réalisait des terrassements, des VRD, des lotissements. Il avait lui-même succédé à son père à la tête de cette entreprise.

C'est un milieu qui demande énormément d'engagement physique et d'investissement personnel et il a arrêté à l'issue d'une vie bien remplie.

Sachant déjà que je voulais directement m'orienter vers le génie civil, j'attendais impatientement la fin de ma seconde générale pour me spécialiser dans une formation technique. J'ai donc passé un bac technologique STI Génie Civil⁽¹⁾ en 2011 au lycée de Cantau à Anglet, près de Bayonne.

J'ai ensuite fait un DUT Génie civil à l'IUT de Rangueil à Toulouse, que j'ai obtenu en 2013, à la suite duquel j'ai travaillé comme assistante chef de chantier et conductrice de travaux dans l'entreprise familiale. J'ai poursuivi cette première activité sur le chantier de l'élargissement de l'autoroute A63 entre Bordeaux et la frontière espagnole en tant que topographe Ouvrages d'Art, essentiellement sur des ponts.



FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © CÉLINE CLANET - FIGURE 3 © JOANA GASSUAN



© MARC MONTAGNON
4

- 1- Joana Gassuan, pilote de tunnelier.
- 2- Le tunnel de la Ligne 14 vu depuis l'arrière du tunnelier.
- 3- La plateforme du poste de conduite.
- 4- Joana Gassuan sur le simulateur de pilotage de tunnelier du Centre Gustave Eiffel.
- 5- Les dix écrans de contrôle de l'avancement de la machine.
- 6- Manutention de la roue de coupe à partir du puits commun d'entrée et de sortie.

INGÉNIEUR S'ÉCRIT AUSSI AU FÉMININ

Certains croient encore que les femmes ne sont pas représentées dans les écoles d'ingénieurs. Il n'en est rien ! Elles sont bien plus présentes qu'on ne le croit dans les métiers de l'ingénierie. Des professionnelles reconnues de l'électronique, de la chimie, de l'aéronautique... et des Travaux Publics qui font de brillantes carrières et managent des équipes...

Elles font des études d'ingénieur et représentent 30% des effectifs sur leurs bancs d'école, mais qui sont ces jeunes femmes ? Ce sont des femmes rigoureuses, qui excellent dans le relationnel avec une forte capacité d'innovation. Selon l'étude de la CDEFI (Conférence des Directeurs des Écoles Françaises d'Ingénieurs) sur les effectifs féminins dans les formations et les métiers d'ingénieur leur nombre a même doublé depuis quinze ans. Voilà qui reflète une vraie dynamique de parité dans les profils d'étudiants.

À l'issue de leurs études, certaines poursuivent des travaux de thèse tandis que d'autres se voient proposer un CDI. De nombreuses opportunités s'ouvrent en Île-de-France, en province et à l'étranger. Les femmes qui s'expatrient sont aussi nombreuses que les hommes.

J'ai par la suite été contactée par Bouygues Travaux Publics qui m'a présenté le projet que l'entreprise avait de former des jeunes pilotes de tunnelier, notamment en prévision des chantiers

dans le cadre du Grand Paris Express. Actuellement, en effet, le domaine des souterrains est en pleine expansion. On ne peut que constater la multiplicité des projets en France mais aussi à

l'international. Or, le secteur fait face à une pénurie de ressources et de compétences. J'ai donc choisi de suivre la formation de "pilote de tunnelier" dispensée par le Centre Gustave Eiffel en

septembre 2016. Nous avons été au nombre de dix à suivre cette première formation et, à cette époque, nous étions pour toute la France, 30 personnes reconnues "pilote de tunnelier", réparties entre l'international et la France.

Le projet de Bouygues Travaux Publics était de créer un simulateur de pilotage, former des jeunes sur ce simulateur à l'instar de ce qui est réalisé pour des pilotes d'avion et nous apporter une base de données suffisante pour être capable, en arrivant sur un chantier, de comprendre ce qui s'y passait et de le réaliser avec l'aide d'un tuteur et d'un pilote expérimenté.

Ce pilote expérimenté, en complément des compétences que nous avons acquises sur le simulateur, venait les renforcer par son expérience des chantiers. Dans un premier temps, j'ai donc suivi une formation pratique de 6 semaines, soit l'équivalent de 210 heures, de pilote de tunnelier au Centre Gustave Eiffel, sur simulateur, complétée par une formation théorique par *e-learning*. À l'issue de ces 6 semaines, j'ai été affectée au chantier du Prolongement de la Ligne 14 - Lot 2 à Saint-Ouen, attribué à Bouygues Travaux Publics, où je suis restée deux années.

Le creusement était divisé en trois tronçons de respectivement 1,4 km, 500 mètres et 350 mètres, tous trois réalisés avec un tunnelier à pression de terre NFM Technologies de 100 mètres de longueur et 8,90 mètres de diamètre et, pour chaque tronçon, un puits commun d'entrée de la machine pour trois puits de sortie différents.

Quelle était votre fonction sur ce tunnelier ?

J'étais chargée de piloter la machine sous la tutelle de pilotes expérimentés, ▷

© JOANA GASSUAN



5

© JOANA GASSUAN



6

c'est-à-dire avoir la responsabilité de l'avancement du creusement.

Sur ce chantier, nous avons une vitesse d'avance moyenne de 40 mm/minute.

→ Le fonctionnement général du tunnelier était le suivant : le tunnelier creuse 1,50 ou 1,80 mètre de terrain, puis le poseur de voussoirs intervient afin de maintenir la stabilité latérale du tunnel. Pour cela, 7 voussoirs en béton armé préfabriqués sont posés et forment alors un anneau.

→ Durant cette opération, les rôles du pilote sont la surveillance de la pression de terre au front afin d'assurer la stabilité du terrain devant la machine, et d'enregistrer sur un logiciel l'ensemble des valeurs apparues pendant le creusement et ceci, pour permettre aux conducteurs de travaux de mettre en évidence la reproduction régulière d'un événement.

→ De plus, au fur et à mesure de l'avancement, les différentes conduites et les tapis convoyeurs sont rallongés.

L'un des objectifs majeurs du pilote est de maintenir la pression de terre au front toujours à la même valeur durant l'avancement de la machine.

La rotation des équipes s'effectue en 3x8, 6 jours sur 7 pendant 3 semaines suivies d'une semaine de récupération.

On est en poste pendant 8 heures avec un roulement d'une semaine du matin, d'une semaine de nuit et d'une semaine de l'après-midi.

Sur ce chantier, nous étions trois apprentis-pilotes à avoir suivi la même formation, accompagnés par quatre pilotes expérimentés.

La vie sur ce chantier s'est achevée pour moi en juillet 2018.



© JOANA GASSUAN 7

Que s'est-il alors passé pour vous ?

J'ai toujours eu dans l'idée de devenir ingénieure conductrice de travaux dans les Travaux Publics et, plus spécialement depuis deux ans, dans les travaux souterrains.

J'ai eu en effet un coup de cœur pour ce milieu. Je m'y suis vraiment découvert une nouvelle passion.

Fin 2017, j'ai donc parlé de mon projet à l'entreprise qui m'a suivi.

7- Descente du tunnelier démonté.

8- Manutention de la roue de coupe à partir du puits commun d'entrée et de sortie.

9- Extraction d'éléments de la machine depuis le puits commun.

À l'heure actuelle, je reprends donc mes études pour faire une formation BAC+5 ingénieur Management de Projets de Construction en alternance, toujours avec Bouygues Travaux Publics et avec le Centre Gustave Eiffel. Pour ce faire, j'ai réalisé un bilan de compétences basée sur mon expérience professionnelle pour intégrer directement la deuxième année de ce cursus d'ingénieur, qui se fait généralement en trois ans. Mon parcours professionnel et mon DUT Génie Civil m'ont permis d'acquérir des compétences et de valider des acquis professionnels qui m'autorisent à rentrer directement en 2^e année.

En quoi consiste ce bilan de compétences ?

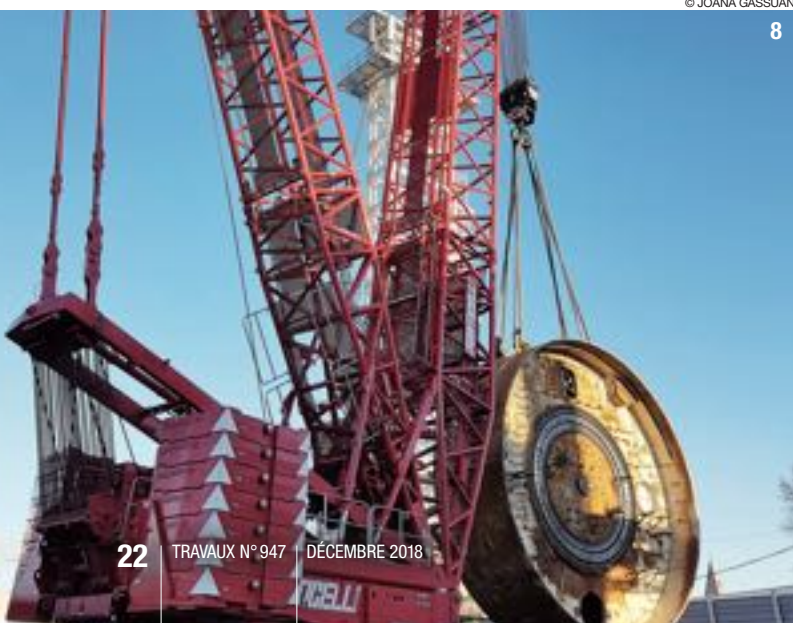
Il consiste à synthétiser les différents postes occupés, les missions confiées dans le cadre de ces postes, les compétences acquises et les domaines vers lesquels elles nous ont fait évoluer. J'ai donc démarré le cursus en fin septembre 2018 dans l'objectif d'être diplômée en juin 2020.

Comment est organisée la formation en alternance ?

L'alternance s'organise avec une succession de périodes en entreprise (en l'occurrence le chantier du lot T3A de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express) et de période au Centre Gustave Eiffel. Sur ce chantier, ce sera un tunnelier Herrenknecht pour la partie Tunnel de 4,2 km et la réalisation de deux gares - "Issy RER" et "Pont de Sèvres" - pour la partie Génie Civil.

Comment avez-vous été accueillie dans ce milieu ?

Quel que soit le poste occupé, pour ma part cela s'est toujours très bien passé. Lorsqu'on arrive sur un chantier, il y



© JOANA GASSUAN 8



© JOANA GASSUAN 9

COUPE-TYPE DU **TUNNELIER NFM TECHNOLOGIES** MIS EN ŒUVRE SUR LE CHANTIER DE PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 AU NORD

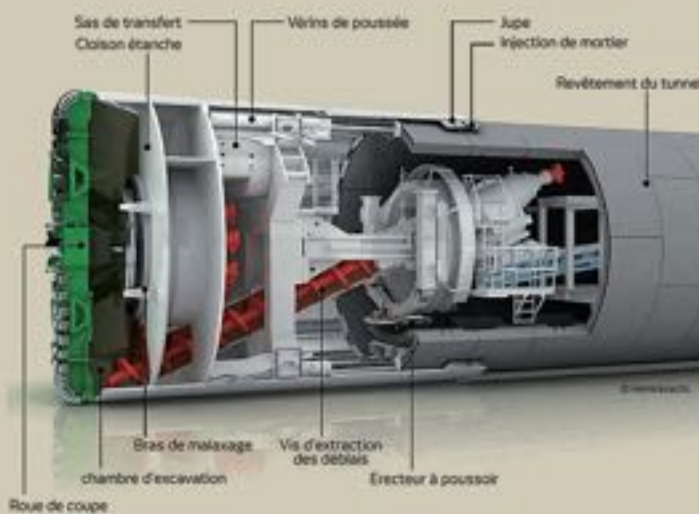


- 1 **Roue de coupe**, partie rotative qui attaque le sol grâce à des molettes et couteaux en acier durci
- 2 **Chambre d'abattage** où est provisoirement confiné puis évacué le déblai
- 3 **Dispositif de poussée** par vérins pour la progression du tunnelier
- 4 **Dispositif d'érection** et d'assemblage des voussoirs constituant les anneaux du tunnel
- 5 **Articulation** comportant un joint étanche pour autoriser les courbes dans la géométrie du forage
- 6 **Cuve et pompes de transfert du mortier**
- 7 **Cabine de pilotage**
- 8 **Alimentateur à voussoirs**
- 9 **Convoyeur à bande** d'évacuation du déblai

10

© NFM TECHNOLOGIES

LE **TUNNELIER HERRENKNECHT** UTILISÉ SUR LE LOT T3A DE LA LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS



11

© HERRENKNECHT

10- Coupe-type du tunnelier NFM Technologies mis en œuvre sur le chantier de prolongement de la Ligne 14 au Nord.

11- Le tunnelier Herrenknecht utilisé sur le lot T3A de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express.

12- L'un des éléments du train du tunnelier NFM Technologies.

13- L'arrière de la machine.

a toujours une phase d'intégration, d'adaptation à l'environnement et à l'équipe, que l'on soit un homme ou une femme. Tout "nouveau" doit faire ses preuves. Personnellement, je n'ai jamais senti de différence de traitement entre un homme et une femme.

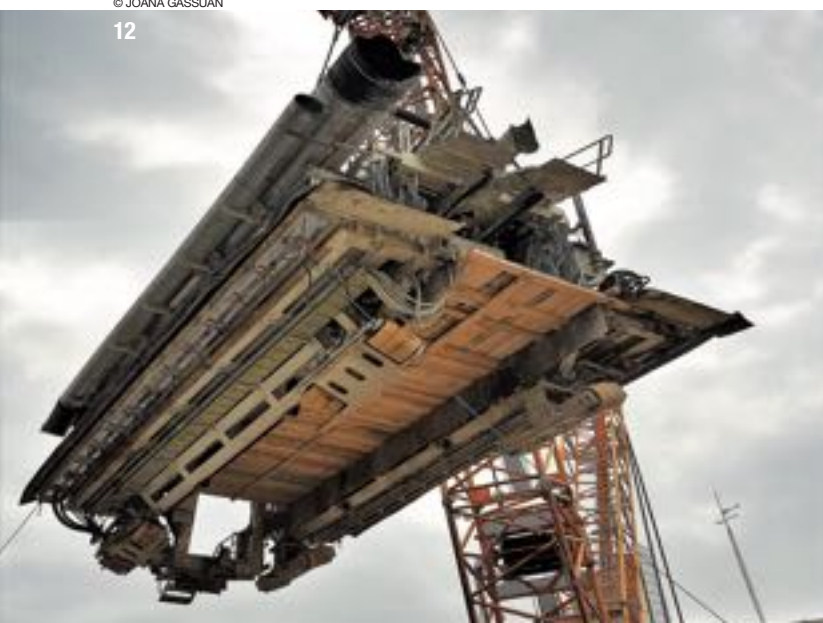
Le fait d'avoir baigné dans un milieu masculin dès mon enfance m'aurait-il aidé ? Je pense même que cela m'a beaucoup aidé.

Mais aujourd'hui, le milieu des Travaux Publics s'ouvre de plus en plus aux femmes qui à leur tour s'y intéressent plus que par le passé. Sur le terrain, le milieu est encore peu féminisé mais le changement est radical dès que l'on gravit la hiérarchie de chantier où la mixité est désormais très prononcée.

En conduite de travaux, elle est même désormais de règle : parmi les jeunes embauchés, on trouve autant de femmes que d'hommes. ▶

© JOANA GASSUAN

12



© JOANA GASSUAN

13



Dans ma formation "pilote de tunnelier" au Centre Gustave Eiffel, nous étions 3 filles pour 10 candidats. Dans celle d'ingénieur, nous sommes actuellement 5 filles pour 22 élèves en deuxième année du cursus.

Quelles sont les spécificités de la formation "pilote de tunnelier" ?

La partie pratique sur le simulateur est la plus intéressante.

La formation était dispensée par un pilote expérimenté qui nous mettait en condition au plus proche possible d'un chantier.

C'est déjà un premier exercice difficile que de comprendre et d'interpréter l'ensemble des données qui s'affiche sur les écrans, sachant que, sur la machine, la cabine de pilotage comporte une dizaine d'écrans sur lesquels défilent toutes les données techniques qu'il faut savoir analyser et à partir desquelles, il faut intervenir pour assurer le bon avancement de la machine. Sur le simulateur, les écrans sont au nombre de trois.

Il faut d'abord comprendre ce qui se passe techniquement. Ensuite, et c'est sans doute le plus important, il faut être capable de réagir avec lucidité dès qu'un incident se présente.

Les écrans du simulateur reproduisent l'ensemble des événements qui surviennent sur un chantier, par exemple, un changement de géologie du terrain. Dans le cas d'un terrain argileux, les données techniques affichées représentent les caractéristiques de ce terrain. Si, brutalement, les valeurs changent, qu'elles augmentent ou qu'elles diminuent, il faut être capable de les interpréter et d'intervenir dans la cabine de pilotage sur les différents paramètres d'avancement du tunnelier

LE CENTRE GUSTAVE EIFFEL EN BREF

Le Centre Gustave Eiffel, créé il y a plus de 20 ans à l'initiative du Groupe Bouygues et de la Chambre de Commerce et d'Industrie de Versailles, est aujourd'hui positionné sur trois secteurs d'activité : construction, énergie et tertiaire.

C'est à la fois un centre de formation en alternance (CFA) et un centre de formation professionnelle continue (FPC).

Le Centre travaille pour l'ensemble de la profession et son expérience lui permet de maîtriser l'évolution des métiers et d'accompagner ses entreprises partenaires sur leurs problématiques de formation.

Quelques chiffres clés :

- **En alternance : 13 formations CAP/titre PRO au Bac +5, +360 alternants.**
- **88% de taux d'insertion moyen dans l'emploi, 89% de taux moyen de réussite aux examens.**
- **En formation professionnelle continue : + 1 500 stagiaires, 24 300 heures de formation/an soit en modules courts formations métiers (management, prévention et sécurité, habilitations électriques et mécaniques, français - écrits professionnels), soit en titres professionnels.**

Le Centre Gustave Eiffel a développé avec ses partenaires une offre globale Tunnelier :

- **Chef de poste : 77 heures.**
- **Pilote de tunnelier : 210 heures.**
- **Opérateur de tunnelier : entre 90 et 140 heures.**
- **Chargé de la maintenance : 98 heures.**

Dans chacun de ces cursus, les domaines suivants sont abordés : environnement de chantiers, bonnes pratiques et comportement au travail, les tunnels et leur conception, pilotage du tunnelier sur simulateur et sécurité.

tout en maintenant une pression de terre en front de la machine toujours régulière. C'est cela le pilotage d'un tunnelier.

Toutes les valeurs techniques que j'avais découvertes sur les écrans du simulateur, je les ai retrouvées dans la cabine de pilotage du tunnelier du Prolongement de la Ligne 14. Elles figuraient toutes dans le simulateur.

14- Sortie de la tête de coupe à l'issue du creusement des trois sections.

15- Aspect final brut du tunnel creusé après mise en place des voussoirs préfabriqués.

Les candidats pour être pilote de tunnelier ou conducteur de travaux en souterrain sont-ils nombreux ?

Ils sont d'autant moins nombreux qu'il n'existe pas en France de formation universitaire spécifique pour le travail en souterrain.

Un ingénieur travaux est plutôt formé pour les chantiers de surface, qu'il s'agisse d'ouvrages d'art, de bâtiments de tout ordre, ou bien encore d'infrastructures routières.

En devenant ingénieure et en occupant un poste de conductrice de travaux dans les tunnels, le fait d'avoir eu en amont cette expérience de pilote va m'apporter beaucoup et constituer, je l'espère, un avantage considérable.

Quelle est votre perception du métier des Travaux Publics ?

Il s'agit d'un milieu dans lequel il faut être motivé. C'est encore plus fort dans le souterrain que dans les Ouvrages d'Art.

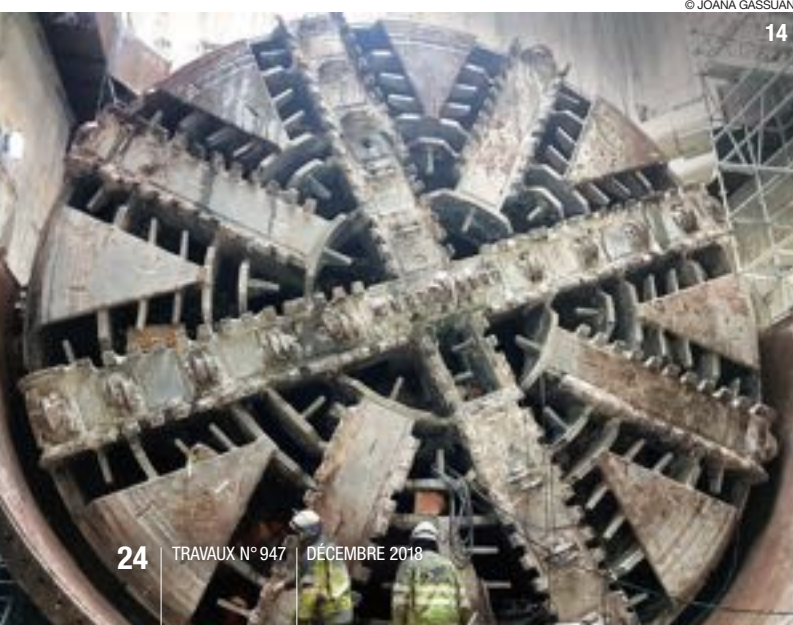
On le voit et on le vit au quotidien : on n'y rencontre que des gens passionnés par leur travail.

Sur ce type de chantier, les équipes sont très soudées afin de former une unité préoccupée par le même objectif : démarrer d'un point "A" pour arriver à un point "B" en toute sécurité.

Pour l'avenir ?

En plus de ma formation d'ingénieur, j'ai également le souhait d'avoir l'expérience d'un chantier à l'étranger. □

1- **Bac techno STI Génie Civil** : Sciences et Technologies Industrielles spécialité Génie Civil. En formation initiale, la préparation au bac techno dure deux ans en lycée : classe de première et de terminale. Pour être admis en bac STI GC, il est préférable d'avoir suivi en seconde un enseignement de détermination Initiation aux sciences de l'ingénieur/ Informatique et systèmes de production, et LV2.



© JOANA GASSUAN

14



© BOUYGUES

15



**PRO BTP,
LE MEILLEUR DE LA
PROTECTION SOCIALE**

SANTÉ

PRÉVOYANCE

RETRAITE

ÉPARGNE

ASSURANCES

ACTION SOCIALE

VACANCES

 **PRO BTP**
GROUPE



SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL

LE SOUTERRAIN

PAR EXCELLENCE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

QU'IL S'AGISSE DU GRAND PARIS EXPRESS, DES PROLONGEMENTS DE PLUSIEURS LIGNES DE MÉTRO, D'UN AMÉNAGEMENT HYDRO-ÉLECTRIQUE DANS LES ALPES OU DE LA LIAISON FERROVIAIRE LYON - TURIN, LE GROUPE SPIE BATIGNOLLES EST LARGEMENT IMPLIQUÉ DANS TOUS CES GRANDS CHANTIERS QUI ONT UN POINT COMMUN : ILS SE DÉROULENT TOUS EN SOUTERRAIN. BON SANG NE SAURAIT MENTIR !

Spie batignolles génie civil est une entité du groupe Spie batignolles, constituant avec Spie batignolles fondations la division opérationnelle génie civil et fondations spécialisée dans les travaux souterrains et de proximité, les ouvrages d'art, les projets industriels, le renforcement, etc.⁽¹⁾ Spie batignolles génie civil occupe une position déterminante sur le marché français des travaux de génie civil, laquelle s'appuie sur une forte reconnaissance de son savoir-faire par toute la profession. Elle s'illustre dans la réalisation de grands ouvrages d'art en France et en Europe, et fait partie des spécialistes de premier plan dans

1- Arrivée du premier tunnelier mis en œuvre sur le lot T3C de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express.

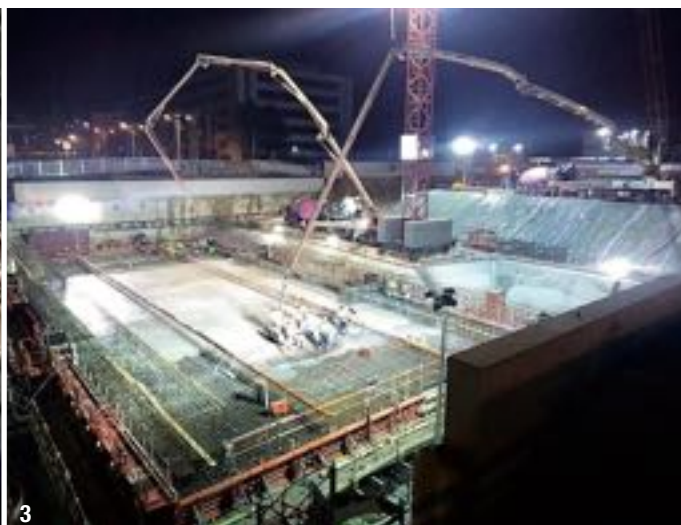
2- La VSM (Vertical Shaft Sinking Machine) fabriquée par Herrenknecht mise en œuvre sur le lot T3C.

3- Chantier du lot T2D de la Ligne 15 Sud.

le domaine des travaux souterrains. L'entité réalise un chiffre d'affaires de 228 millions d'euros et compte 770 collaborateurs. Elle est présente sur tous les grands projets en cours en France avec une concentration en Île-de-France consécutive au lancement des travaux du Grand Paris Express mais également sur la plupart des chantiers RATP, dans le cadre des prolongements de plusieurs lignes de métro et de SNCF Réseau, avec la liaison ferroviaire Lyon-Turin.

La maîtrise et la complémentarité de ses métiers et des techniques (creusement en méthode traditionnelle, tunnelier roche dure, mixte, pression

de terre ou de boue) qui y sont associées, la recherche de solutions adaptées, l'existence d'un parc matériel en propre et son expertise reconnue en management de projet sont les clés d'une réalisation sans réserve et dans le respect des délais. Impliquée dans le développement urbain et territorial, elle agit en entreprise responsable, ouverte sur le monde, soucieuse des enjeux sociaux, environnementaux et sociétaux. Rappelons pour mémoire que le groupe Spie batignolles opère dans 6 métiers : la construction (39%), les Travaux Publics (25%), le génie civil et les fondations (24%), l'énergie (8%) et immobilier/concessions (4%).





4a



4b

© ALEXANDRE SORIA

Aujourd'hui, le groupe Spie batignolles, c'est 1,8 milliard d'euros de chiffre d'affaires, 7 000 collaborateurs et 170 implantations. L'entreprise très ancrée sur le territoire français, développe actuellement son activité à l'international (Afrique, Moyen-Orient notamment).

GRAND PARIS EXPRESS : DES CONTRATS MAJEURS

Le Grand Paris Express est un projet stratégique pour l'avenir et le développement économique de l'Île-de-France. Le prolongement de la Ligne 15 fait partie intégrante de ce programme de développement du réseau de transport public francilien.

Le groupe Spie batignolles, en groupement avec Vinci, intervient sur deux lots de ce projet : Lot T3C et Lot T2D

Le montant total des marchés de génie civil sur la Ligne 15 Sud de 33 km, qui relie Pont-de-Sèvres à Noisy - Champs, s'élève à 3,7 milliards d'euros. Depuis la fin de l'année 2017, 41 chantiers ont été lancés, le premier des 10 tunneliers qui seront utilisés sur cette ligne du Grand Paris Express a commencé à creuser à Champigny et 4 000 personnes travailleront à la réalisation de cette première ligne du nouveau métro.

LOT T3C

Le lot T3C, avec 8,2 kilomètres de tunnel, 2 tunneliers actifs en simultané, 5 stations, 8 puits : représente un contrat majeur (926 millions d'euros). Il fait partie de la Ligne 15 Sud et s'étend de la gare "Fort d'Issy - Vanves - Clamart" à la gare "Villejuif - Louis Aragon".

Il comprend 5 nouvelles gares, un puits d'entrée de tunneliers situé à mi-parcours, un puits de sortie accolé et 7 ouvrages annexes de ventilation et d'issue de secours. Deux tunneliers de diamètre 9,85 m sont déployés pour le creusement du tunnel.

Les profondeurs des gares, puits et ouvrages annexes varient entre 30 et 46 m. Leurs soutènements sont réalisés avec des parois moulées allant jusqu'à 1,80 m d'épaisseur et jusqu'à 63 m de profondeur. Les travaux d'injection et de comblement d'anciennes carrières sont également prévus.

4a- Réalisation des plots du radier de la station Verdun Sud.

4b- Station Verdun de la Ligne 4 Sud.

5- Congélation partielle de la station Clichy-Saint-Ouen de la Ligne 14 Nord.

Le chantier du tronçon T3C est un projet hors norme requérant des moyens logistiques très importants. Il nécessite en effet le fonctionnement de deux tunneliers à pression de terre de près de 10 mètres de diamètre en simultanément, l'évacuation de 3,2 millions de tonnes de déblais et la mise en œuvre de plus de 470 000 m³ de béton.

La station Villejuif Gustave-Roussy (architecte Dominique Perrault), emblématique de ce tronçon par son architecture et ses dimensions (65 mètres de diamètre et 42 mètres de profondeur), permettra de relier la Ligne 15 Sud à la Ligne 14 Sud. Les travaux nécessiteront la mobilisation de près de 900 personnes en période de pointe. Le groupement en charge du lot T3C de la Ligne 15 a choisi un engin innovant pour creuser un puits d'accès de 40 mètres de profondeur : la Vertical Shaft Sinking Machine (VSM) fabriquée par Herrenknecht. Il va permettre de réaliser, en trois mois, un puits d'accès sans recourir à la technique des parois moulées.

L'équipement VSM se compose de trois éléments : une unité d'excavation, un système de séparation des déblais et une unité de fonçage. Ainsi, la machine peut mettre en place une paroi étanche et mener à bien l'excavation et la réalisation du radier du puits, sans nécessité d'abaisser le niveau de la nappe phréatique.

LOT T2D

Le lot T2D (156 millions d'euros) comprend la gare de Noisy-Champs proprement dite, de 150 m de longueur et de 31 à 45 m de largeur. Elle se situe à une profondeur de 26 m.

Le projet concerne également diverses passerelles et rampes à l'intérieur de la gare, en charpente métallique ainsi que le clos et couvert de l'Émergence de la gare constituée d'une toiture en dôme à



5

© SPIE BATIGNOLLES

SPIE BATIGNOLLES : RACCOURCI HISTORIQUE

1846 : Ernest Göüin crée la société Ernest Göüin et Cie.

1872 : Ernest Göüin et Cie devient la Société de Construction des Batignolles (SCB).

1968 : Spie et SCB fusionnent pour former Spie batignolles.

1997 : les salariés acquièrent la majorité du capital de Spie batignolles, accompagnés par le groupe britannique AMEC.

2003 : Spie batignolles choisit l'indépendance avec le rachat par ses 78 cadres dirigeants. C'est le début d'une nouvelle page dans l'histoire du groupe.

Dès lors, Spie batignolles n'a eu pour cesse de renforcer son indépendance et de mettre en œuvre une stratégie fondée sur un actionariat fort de ses dirigeants et ses salariés. Cette stratégie représente pour le groupe une garantie d'indépendance, de pérennité et de stabilité.

Le capital du groupe est détenu à 66,29% par les cadres actionnaires, 33,71% par des investisseurs financiers (Ardian France, LPI management, Salvepar) et 9,48% par les salariés.

double hélice elliptique de 101 x 62 m d'envergure et de 21 m de hauteur mélangeant charpente métallique, charpente bois, vitrage et zinc, le tout supporté par 12 poteaux métalliques de forme arborescente.

À ceci s'ajoute un ouvrage en tranchée couverte constituant l'avant-gare, de 255 m de longueur, 21,60 m de largeur et 24 m de profondeur ainsi qu'un pont routier de 29 m de portée et 18,80 m de largeur franchissant les voies du RER A. Les soutènements de ces ouvrages sont réalisés principalement en parois moulées avec mise en œuvre ponctuellement de pieux et de micropieux.

RATP : PRÉSENCE SUR PLUSIEURS LIGNES

La RATP entreprend d'importants travaux de prolongement de ses lignes

de métro, notamment au nord et au sud de Paris.

Spie batignolles génie civil est fortement investie sur plusieurs d'entre eux.

6- Les installations de congélation pour la station Clichy-Saint-Ouen.

7a- Le centre de maintenance et de remisage de la Ligne 14 à Saint-Ouen.

7b- Creusement du puits rue d'Aix de la station Goncourt du prolongement de la Ligne 11.

LIGNE 4 SUD

L'entreprise réalise les travaux de génie civil et des tunnels en souterrain de la station Verdun Sud. (lot T1) du prolongement de la Ligne 4 vers le nord. En 2013, la Ligne 4 a été prolongée de 1,4 km jusqu'à la station Mairie de Montrouge. Aujourd'hui, la seconde phase de l'extension vise à prolonger la ligne sur 1,9 km à partir de la station Mairie de Montrouge jusqu'à la commune de Bagneux. Le tracé final comprend la création de deux nouvelles stations : Verdun Sud et Bagneux le terminus. Cette extension facilitera les correspondances avec toutes les lignes de RER, le tram T3 et la quasi-totalité des lignes de métro à proximité. À terme, la Ligne 4 sera en correspondance avec le réseau de transport du Grand Paris Express, au niveau de la station de Bagneux.

Les travaux souterrains du lot T1 comprennent :

- Le tunnel Nord entre le cul-de-sac de Montrouge et l'accès principal à la station ;
- Le tunnel de liaison entre l'accès principal et la Station "Verdun Sud" ;
- La station "Verdun Sud" de 100 m de long, voûtée et entièrement réalisée en souterrain ;
- Le tunnel Sud : entre la Station "Verdun Sud" et le tunnel cadre du lot T2.

Le marché inclut également la réalisation d'un accès principal et secondaire à la station, d'une baie d'aération motorisée (BAM), d'un poste de Redressement-Ventilation (PR), d'une galerie de traitement ainsi que le traitement des marnes et caillasses.

Les emprises de chantier sont multiples et ont été mises à disposition à des dates différentes. L'ensemble des excavations est réalisé depuis des puits existants ou à créer. La présence d'anciennes carrières souterraines d'exploitation de calcaire nécessite des travaux de consolidation, par injection ou confortement à pied d'œuvre, préalablement à la réalisation des ouvrages.

LIGNE 14 SUD

Pour le prolongement de la Ligne 14 Sud, remporté par un groupement Vinci Construction - Spie batignolles, le contrat porte sur la réalisation d'un tunnel de 4,6 kilomètres entre la gare de Maison Blanche et le puits d'introduction du tunnelier à Jean Prouvé, foré avec un tunnelier à pression de terre. Il inclut également la construction de la nouvelle gare Kremlin Bicêtre Hôpital et de cinq puits de ventilation et de secours. La durée totale prévue du chantier est de 72 mois. ▷



6



7a



7b

© SPIE BATIGNOLLES

© SPIE BATIGNOLLES

Situé au cœur du sud parisien, le chantier traverse les communes de Kremlin-Bicêtre, L'Hay-les-Roses et Gentilly. Il s'inscrit également à proximité de l'hôpital du Kremlin-Bicêtre et de l'autoroute A6.

Chaînon manquant entre le centre de Paris et l'aéroport d'Orly, la Ligne 14 Sud bénéficiera à plus de 260 000 habitants de Paris, du Val-de-Marne et de l'Essonne. Elle créera une liaison rapide entre Paris et l'aéroport d'Orly, essentielle pour les Jeux Olympiques de Paris en 2024.

LIGNE 14 NORD

Dans le cadre du prolongement de la Ligne 14 du métro au nord, Spie batignolles est mandataire du groupement attributaire de la réalisation de la station Clichy-Saint-Ouen.

Cette dernière s'inscrit dans le projet de désaturation de la Ligne 13 au nord de Paris par le biais du prolongement de la Ligne 14 entre Saint-Lazare et Saint-Denis. Cette station est l'une des 4 stations du projet. Elle représente à elle seule un lot de travaux situé entre les deux lots du tunnel constituant le prolongement. Elle offrira à terme l'interconnexion entre la Ligne 14 et le RER C.

Le chantier comporte plusieurs spécificités liées à sa situation géographique ainsi qu'à la présence d'un ouvrage sous le RER C. L'emprise est particulièrement restreinte et en site urbain dense. De nombreuses interfaces existent avec les autres lots du projet de prolongement de la Ligne 14 et avec les concessionnaires. La majeure partie du génie civil est réalisée "en taube". Il est nécessaire de réaliser une congélation du terrain pour la construction de l'ouvrage se situant sous la ligne du RER C.

En effet, en parallèle aux travaux de fondations confiés à Spie batignolles fondations, Spie batignolles génie civil intervient sur la réalisation de l'ouvrage cadre (26 m de longueur x 12 m de largeur x 8 m de hauteur) réalisé sous la ligne du RER C maintenus en circulation.

Après une première phase de congélation dudit terrain, les travaux de cet ouvrage s'effectueront en méthode d'excavation traditionnelle (pelle hydraulique et fraise).

Sa réalisation est rendue complexe car l'ouvrage est creusé en 6 sections. Ce phasage est rendu nécessaire car la coque congelée autour de l'ouvrage cadre flotte dans la nappe et entraîne des contraintes ascendantes sur l'ouvrage SNCF situé au-dessus. Il est donc nécessaire de lester l'ouvrage au fur et à mesure de sa construction. Son délestage est seulement possible après congélation.

Spie batignolles génie civil assure également la construction du Site de Maintenance et de Remisage des trains de la Ligne 14 à Saint-Ouen sur un ancien site industriel ayant appartenu à Total : 16 000 m² d'ateliers et 5 000 m² de locaux techniques et sociaux semi enterrés à structure en béton sur radiers portés par des pieux. Spécificités du chantier : importants tra-

vaux de terrassement avec gestion des terres polluées et dépollution des eaux de nappe en fond de fouille, évacuation de déblais par barge sur la Seine avec utilisation d'une estacade, structure en béton radier - poteaux - poutres entièrement portée par pieux avec des charges d'exploitation élevées.

LIGNE 11 EST

Dans le cadre du prolongement à l'est de la Ligne 11 du métro parisien jusqu'à Rosny-Bois-Perrier, le marché GC03 a pour objet la construction d'un tunnel d'environ 250 m entre l'atelier de maintenance des Lilas (AMT) de la ligne existante, situé dans le cul-de-sac de la station Mairie-des-Lilas, et la future première station du prolongement "Serge Gainsbourg". Les travaux comprennent aussi le gros œuvre des locaux techniques et le second œuvre des locaux techniques, du puits et du rameau Calmette.

8 & 9- Le chantier de la station CNIT - La Défense du prolongement à l'ouest du RER E.

10- Puits Gambetta ouvert pour la station CNIT - La Défense d'Éole à l'ouest.



8 © ALINE BOROS



9



10

© ALINE BOROS

TROIS QUESTIONS

À BENOÎT MONCADE, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL

Quelle est la valeur ajoutée de Spie batignolles génie civil et quelles sont ses spécificités ?

Nous sommes parmi les experts reconnus en matière de travaux souterrains quelles que soient les techniques utilisées, qu'il s'agisse de creusement au tunnelier, d'abattage mécanique ou à l'explosif. Ce domaine est extrêmement exigeant et demande davantage de compétences pour maîtriser un environnement géologique et technique dans lequel les aléas ne manquent pas et où rien ne peut remplacer l'expérience. C'est le cas, par exemple, de la plupart des chantiers du Grand Paris Express sur lesquels Spie batignolles génie civil est présent, ou du projet du Lyon Turin où nos équipes œuvrent depuis déjà plusieurs années.

De ce fait, sans hésitation, notre valeur principale est l'expérience, le professionnalisme et l'engagement de nos équipes, qu'il s'agisse des personnels d'encadrement, de nos compagnons ou nos spécialistes matériel. Au sujet de ces derniers, dès lors que l'on parle de travaux souterrains, la mécanisation est désormais de règle et l'expertise matériel, y compris mécanique, électrique ou automation, est un domaine dans lequel nous avons, de très longue date, une très grande maîtrise, avec des équipes en propre et présentes dans l'entreprise depuis de nombreuses années.

Qu'apportez-vous à vos clients ?

Au-delà de nos références et de nos expertises techniques, je pense que nous apportons également à nos clients une approche basée sur l'humain et sur la confiance. Nous apportons toujours la solution technique.

Nous avons démontré notre capacité à travailler dans les contextes les plus extrêmes et nos clients ont confiance dans le fait que nous exécuterons leur projet, conformément à leurs attentes, quels que soient les aléas rencontrés.

Les différends financiers existent parfois, car les imprévus font partie de nos métiers. Mais nous nous fixons comme priorité la technique, la maîtrise du projet et le dialogue constructif avec nos donneurs d'ordre qui est primordial.

Quelles sont vos perspectives de développement ?

Nous avons dans nos perspectives un certain nombre de grands programmes en France : urbains, ferroviaires ou autoroutiers. Le Grand Paris Express est évidemment une opportunité de relance de l'activité dans le domaine des grands ouvrages.

Mais nous lançons également des actions spécifiques pour développer notre activité à l'international. Je rappelle que nous avons au sein du Groupe Spie batignolles la société Infra Tunnel, une filiale basée en Suisse qui, depuis 1988 construit et réhabilite des ouvrages souterrains d'infrastructures, hydrauliques, et industriels, dans toute la Suisse. Une autre implantation historique est le Portugal.

Mais il y a aussi une volonté du Groupe Spie batignolles de repartir plus largement à l'international, et Spie batignolles génie civil fait partie intégrante de cette ambition. Nous sommes actuellement dans une phase d'appels d'offre à l'international avec l'objectif des premières prises de commande en 2019.

Nous avons également enclenché une dynamique en termes d'Innovation qui nous ouvre des perspectives nouvelles grâce à la révolution numérique, de nouvelles approches managériales, de nouveaux métiers, de nouvelles façons d'interagir avec nos équipes ou nos clients. De bien belles perspectives à venir !



11
© SPIE BATIGNOLLES

Ils se déroulent sur la commune Les Lilas et incluent, plus en détail, la réalisation des ouvrages suivants :

- Construction d'un tunnel de 250 m en méthode traditionnelle entre l'Atelier de Maintenance des Trains (AMT) des Lilas et la future Station Serge Gainsbourg ;
- Travaux de gros œuvre des locaux techniques et de la dalle de couverture du puits ;
- Travaux de second œuvre comprenant la métallerie des locaux techniques et du puits ;
- Aménagement de surface sur la parcelle du puits Calmette et de la base vie.

Le tunnel est un ouvrage voûté d'une section d'environ 58 m² qui est réalisé en méthode conventionnelle dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin à l'abri d'une voûte parapluie. Il est construit à partir du puits Calmette déjà réalisé par Parengé dans le cadre d'un autre marché.

11- Benoît Moncade, directeur général de Spie batignolles génie civil.

Des locaux techniques enterrés de 160 m² contigus au puits de ventilation Calmette sont également à réaliser. Ils accueilleront un Poste Force, un local technique pour le fonctionnement de la ventilation et la mise en place d'un insonorisateur et d'un local courant faible.

En prévision de l'accroissement de la fréquentation de la Ligne 11, la RATP a lancé un programme de travaux de modernisation des stations existantes. Spie batignolles génie civil, mandataire d'un groupement, s'est vu attribuer le chantier d'adaptation des accès de la station Goncourt (lot 83), située dans le 11^e arrondissement de Paris.

En phase terrassement, près de 3 200 m³ de terres seront excavées, dont 500 m³ en souterrain. Les équipes interviendront sur 800 m³ de remblais, particulièrement hétérogènes à cet endroit.

Si la station Goncourt reste en exploitation tout au long du chantier, certains travaux sont réalisés de nuit lors de sa fermeture, notamment le percement des tympans.

En raison de l'environnement très urbain et exigü de ce chantier, caractérisé par la présence de nombreux réseaux et bâtiments sur plusieurs étages dont des niveaux de sous-sol, la RATP a prévu des travaux de reprise en sous-œuvre de ces bâtiments alentour pour assurer la consolidation du terrain en place. Pour les réaliser, Spie batignolles fondations réalise des injections de coulis, d'une quantité d'environ 1 500 m³ pour environ 1 800 m de forage, dans les alluvions anciennes (géologie sablo-graveleuse).

En matière de génie civil, les équipes de Spie batignolles génie civil interviennent sur la pose de radiers, de voiles, de poutres et de dalles, totalisant une surface supérieure à 930 m². À noter que la mise en place d'un soutènement en béton projeté, renforcé par des armatures, est nécessaire.

ÉOLE : LA GARE DU CNIT - LA DÉFENSE

Le projet Éole a pour objet de prolonger l'actuelle ligne du RER E afin de réduire la saturation des lignes RER A, B et D, soulager les pôles Châtelet-les-Halles et Saint-Lazare et mieux desservir le quartier d'affaires de La Défense et l'Ouest parisien.

À l'horizon 2022, l'actuelle Ligne E du RER sera prolongée de 55 km vers l'ouest grâce à 8 km en tunnel, de l'actuelle gare Haussmann-Saint-Lazare à La Défense, puis, grâce à 47 km de voies existantes jusqu'à Mantes-la-Jolie.



12



13

© ALINE BORGOS

Le lot DEF1, a été attribué à un groupement Spie batignolles génie civil - Vinci. Ce lot consiste à construire la nouvelle gare souterraine CNIT-La Défense. Elle est réalisée en sous-cœuvre du CNIT et inclut 1 km de tunnels ainsi que de nombreux couloirs de correspondance et émergences permettant notamment la connexion du RER E avec le RER A, les Lignes L et U du Transilien et le tramway T2. SNCF Réseau a également accordé sa confiance à Spie batignolles en lui confiant un autre projet à La Défense,

le lot DEF2, qui consiste à réaliser les ouvrages situés entre la gare de la Défense à l'est et Nanterre - La Folie à l'ouest. Plusieurs spécificités de ce chantier sont à mettre en évidence. Il s'agit d'un ouvrage d'entonnement de 78 m de longueur en méthode traditionnelle, dont 60 m réalisés selon la méthode dite "Seattle" à faible couverture sous l'immeuble Triangle. Il comporte une tranchée couverte à deux voies, d'une longueur de 318 m, réalisée entre parois moulée tandis que

l'ouvrage de tête est destiné à assurer le pontage du futur passage de la Ligne 15 du Grand Paris Express. Enfin, l'ouvrage "mutualisé" Éole/Grand Paris Express comprend une amorce

de tranchée couverte pour la future Ligne 15 du Grand Paris Express. Sur ces deux chantiers, le groupement doit évoluer dans un environnement urbain très dense et le site doit rester en exploitation pendant la durée des travaux.

12- Transport des voussoirs pour la galerie de reconnaissance de la descenderie de Saint-Martin-de-la-Porte du Lyon-Turin.

13- Réalisation des ouvrages de reconnaissance du Lyon-Turin ferroviaire.

14a- Sciage des dalles de chaussée dans le tunnel du Mont-Blanc.

14b- Portique en position de démarrage dans le tunnel du Mont-Blanc.

15- Remplacement des dalles de chaussée dans le tunnel du Mont-Blanc.



14a

© CAROLINE HOUAI



14b



15

© CAROLINE HOUAI



du futur tube Sud du tunnel transfrontalier, et près de 3,5 km de galeries excavées en méthode traditionnelle. L'objectif des travaux est de mieux connaître ce secteur à la géologie délicate, sur un tronçon important de la future ligne Lyon-Turin. Ils permettront également de compléter les reconnaissances réalisées entre 2002 et 2010 au travers des descenderies de La Praz, Saint-Martin-de-la-Porte et Modane pour le côté français. Les particularités de l'opération sont multiples.

Le tunnelier "roche dure" est monté au pied de la descenderie de Saint-Martin-de-la-Porte. L'ouvrage comporte la traversée d'une zone houillère composée de schistes carbonifères pouvant engendrer une forte convergence du terrain. Il nécessite la mise en œuvre d'un soutènement optimisé par blocs compressibles, déformables en fonction du mouvement du terrain. De nombreuses reconnaissances sont effectuées à l'avancement par sondages pour identifier les types de roches et leurs caractéristiques géotechniques et anticiper/adapter les méthodes de creusement et de soutènement.

Une partie des travaux se situe entre deux formations de roches composées de schistes, d'argillites, de grès et de charbon (front houiller). Cette géologie difficile rend ce chantier particulièrement complexe car elle provoque de fortes convergences du terrain. Pour contourner cette zone, les travaux comprennent la réalisation d'une galerie complémentaire de 1,8 km, en méthode dite "conventionnelle" (à l'explosif).

Cette galerie permet d'atteindre le 10^e kilomètre du tube Sud du futur tunnel à partir du Point Métrique 500 (PM 500), autrement dit à 500 mètres depuis l'entrée de la descenderie existante. À partir du pied de cette descenderie complémentaire, les équipes

16- Ligne b du métro de Rennes.
17- Béton de revêtement du tunnel de la Ligne b du métro de Rennes.

viennent traverser le front houiller en creusant une seconde galerie de 1,4 km. Elle permet la reconnaissance et la consolidation des données géotechniques de cette zone.

TUNNEL DU MONT-BLANC

Le GEIE-TMB⁽²⁾, maître d'ouvrage, a confié à un groupement dont Spie batignolles génie civil est mandataire, l'attribution du marché de réhabilitation de la dalle béton placée sous la chaussée du Tunnel du Mont Blanc.

Sur une portion de 555 mètres de cette dalle, les armatures subissent des effets de corrosion, et des effritements d'enrobage ont été identifiés.

Celle-ci est située sous la chaussée du tunnel recevant le flux quotidien de véhicules et au-dessus de réseaux et de gaines de ventilation servant à la diffusion de l'air frais et l'extraction de l'air vicié et des fumées.

En cas d'incendie, ces gaines sont également employées pour servir d'issues de secours aux usagers.

Compte-tenu du trafic journalier mesuré sous le Tunnel du Mont Blanc, avec plus de 5000 véhicules en circulation, sa fermeture complète pendant la réalisation des travaux n'était pas envisageable.

Le maintien en exploitation du tunnel constitue l'un des enjeux majeurs du chantier de réhabilitation de la dalle pour le maître d'ouvrage.

Les travaux se font donc lors de fermetures nocturnes de courtes durées avec de nombreuses tâches à réaliser dans un espace restreint. Une organisation minutieuse de chaque tâche a été définie afin de gérer au mieux la co-activité et d'assurer la sécurité des équipes pendant toute la durée des travaux.

Pour répondre de façon optimale et sécurisée à l'ensemble de ces enjeux, les équipes de Spie batignolles et ses partenaires ont opté pour l'utilisation de deux portiques métalliques hydrauliques réalisés sur-mesure. Ces portiques seront employés pour soulever l'ancienne dalle coupée en plusieurs parties et mettre en œuvre les nouvelles dalles préfabriquées.

EDF : L'AMÉNAGEMENT HYDRO-ÉLECTRIQUE DE ROMANCHE-GAVET

Le plus gros chantier hydraulique du moment développé par EDF permettra d'accroître la production d'électricité à partir d'énergie propre et renouvelable tandis que les travaux permettront une amélioration de la sécurité de l'exploitation et la meilleure intégration des ouvrages dans l'environnement.

Plusieurs spécificités à signaler sur ce chantier à commencer par l'utilisation de trois techniques d'excavation : explosif pour les galeries et les cavernes, deux tunneliers roche dure en parallèle pour la galerie d'amenée et excavation verticale pour la cheminée d'équilibre et le puits blindé.

Le chantier s'étend sur une longueur de 5 à 6 km avec six zones d'installation. Il est nécessaire de transporter le matériel par hélicoptère pour accéder à la cheminée d'équilibre.

Pour conclure avec cette présentation aussi complète que possible de l'activité de Spie batignolles en souterrain, bien que les travaux soient très avancés, il faut mentionner la large participation de l'entreprise, au sein d'un groupement, à la réalisation de la Ligne b du métro de Rennes tant pour le creusement des 8 km du tunnel que pour la construction des stations à l'abri de parois moulées.

La mise en service de la seconde ligne de métro automatique de Rennes Métropole est prévue pour mi-2020. Un projet emblématique qui préfigurerait les futurs travaux du Grand Paris Express. □

NDLR

Compte tenu de leur importance, la totalité des chantiers du Grand Paris Express, des prolongements des lignes RATP ainsi que ceux de SNCF Réseau et d'EDF sont attribués à des groupements d'entreprises dans lesquels Spie batignolles génie civil est, soit mandataire, soit associée.

Le reportage étant consacré essentiellement à l'activité "souterraine" de Spie batignolles génie civil, afin de ne pas surcharger inutilement le texte, nous n'avons pas fait figurer la composition détaillée de ces groupements, étant entendu qu'elle est disponible sur chacun des sites respectifs des différents maîtres d'ouvrage.

1- Ce numéro de Travaux étant consacré exclusivement aux travaux souterrains, le reportage sur Spie batignolles génie civil est exclusivement centré sur l'activité de l'entreprise dans ce domaine.

2- **GEIE-TMB** : Groupement Européen d'Intérêt Économique du Tunnel du Mont Blanc.



1

© AURIGAMI

MIRE/AURIGAMI TOPOGRAPHIE : L'INTERFÉROMÉTRIE RADAR SATELLITAIRE EN PLUS

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

SI L'ENTREPRISE MIRE EXERCE L'ENSEMBLE DES MÉTIERS LIÉS À LA TOPOGRAPHIE DEPUIS LE SOL, ELLE DISPOSE ÉGALEMENT D'UNE SPÉCIALITÉ QUI CONSTITUE UNE ENTITÉ TRÈS COMPLÉMENTAIRE - AURIGAMI - GROUPEMENT D'EXPERTS DE L'INTERFÉROMÉTRIE RADAR SATELLITAIRE ET DU MONITORING TERRESTRE, AINSI QUE D'UN OUTIL SIG PARTICULIÈREMENT PERFORMANT NOMMÉ SAISAME® QUI LIVRE EN TEMPS RÉEL UNE CARTE ACTIVE REFLÉTANT L'ENSEMBLE DES MESURES D'UN CHANTIER. CE QUE NOUS EXPLIQUE PIERRE GUSMANO, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE MIRE, CONVAINCU DU TRÈS IMPORTANT DÉVELOPPEMENT À VENIR DE L'INTERFÉROMÉTRIE EN TOPOGRAPHIE DANS LE SECTEUR DES TRAVAUX PUBLICS ET DU BÂTIMENT.

Mire, pour "Métrés, Implantations, Relevés, Études", a été créée en juin 2000 en tant que filiale de topographie de l'entreprise Desquenne et Giral. En 2007, lors de la dislocation du groupe à l'initiative de son président Jean-Louis Giral, elle devient filiale de

l'entreprise TSO, entreprise spécialisée dans la construction, le renouvellement, la pose et l'entretien de voies ferrées pour des réseaux de chemin de fer ainsi que pour les réseaux urbains. En 2011, dans le cadre du rachat de TSO par NGE, elle entre dans le Groupe NGE dont l'activité est très diversifiée

1- Installation d'un réflecteur sur le glacier d'Argentière pour observation des mouvements par interférométrie radar satellitaire.

puisque divisée en six catégories de métiers : VRD et terrassement, canalisations et réseaux, Génie civil, routes et équipements de la route, travaux géotechniques et de sécurisation, bâtiment... et qui en ajoute à cette occasion une septième : l'activité ferroviaire.
« Notre cœur de métier, c'est la topo-



PIERRE GUSMANO : PARCOURS

Diplômé de l'ESTP Paris (École spéciale des travaux publics, du bâtiment et de l'industrie) Pierre Gusmano est ingénieur géomètre (promotion 1986).

Il commence sa carrière chez Razel, entreprise de terrassement au sein de laquelle il passe huit ans avant de rejoindre Desquenne et Giral, également pendant huit ans, où il est affecté notamment au guidage d'un tunnelier sur le premier chantier d'Éole en 1995.

À l'issue de ce chantier, il propose à Jean-Louis Giral, président de l'entreprise, la création d'un département de topographie, ce qu'il accepte.

Ce département a pour charge la supervision et l'organisation des divers chantiers réalisés par le groupe : travaux souterrains, travaux ferroviaires, travaux de voies, assainissement, VRD ...

De département, la petite structure devient filiale de topographie jusqu'à la création de Mire en 2000, toujours en tant filiale de Desquenne et Giral, dont Pierre Gusmano devient directeur général.

En 2007, Mire qui était passée de 5 à 6 collaborateurs à une vingtaine est intégrée à TSO et Pierre Gusmano en demeure le directeur général.

Il en sera de même quelques années plus tard, en 2011, lors du rachat de TSO par le groupe NGE, dont Mire fait partie intégrante depuis cette date.

L'expérience de multi-métiers de la topographie emmagasinée chez Desquenne et Giral est alors mise au service du groupe NGE. Mire passe à une soixantaine de collaborateurs.

graphie, indique Pierre Gusmano, mais, depuis déjà quelques années, nous l'avons élargi à l'auscultation et l'instrumentation géotechniques, aux études ferroviaires et au développement de logiciels. À ceci s'est ajoutée en 2017, par la création du GIE Aurigami, une activité entièrement dédiée à l'interférométrie radar satellitaire ».

En 2018, Mire réalisera un chiffre d'affaires estimé à 5,5 M€. Elle emploie 60 personnes. Son siège est basé à Nanterre et elle exerce son activité partout en France et dans plusieurs pays en Europe. Elle dispose également de références significatives en Afrique, en Amérique du Sud et au Moyen Orient. Ses domaines de prédilection sont le ferroviaire et le souterrain.

SEA TOURS-BORDEAUX : UNE PRÉCISION MILLIMÉTRIQUE

Dans le domaine des travaux ferroviaires, par exemple, elle a été impliquée largement pendant près de quatre ans avec, au maximum de l'action, une douzaine d'équipes sur site, sur les travaux de topographie de l'ensemble de la ligne nouvelle SEA (Sud-Europe-Atlantique), c'est-à-dire sur une longueur de plus de 340 kilomètres de voie neuve haute vitesse entre Tours et Bordeaux. Pour ces travaux, elle disposait de deux bases fixes à Villognon, en Charente et à Nouâtre, en Indre-et-Loire.

« Ce type de travaux nécessite une maîtrise toute particulière, précise à

2- Pierre Gusmano, directeur général de Mire.

3- Un grand moment du creusement de la première ligne d'Éole en 1995, immortalisé par le peintre Edmond Gusmano : l'arrivée du tunnelier à Hausmann-Saint Lazare.

ce sujet Pierre Gusmano. Sur une voie ferrée destinée à accueillir un train à grande vitesse, un défaut de nivellement de 5 mm de la voie est susceptible de provoquer le déraillement de la rame. Sur un tel chantier, le travail est réalisé avec la même précision que s'il était effectué en usine, mais en plein air avec tous les aléas climatiques éventuels, avec des pas de mesure de 10 mètres et 20 mètres, par passes de bourrage successives, intervenant



au fur et à mesure de la pose de la voie. La précision est de l'ordre du millimètre ».

Dans le domaine des travaux souterrains, l'une de ses premières références concerne le chantier Éole (Est-Ouest Liaison Expresse) entre Gare du Nord et Gare Saint-Lazare.

TRAVAUX SOUTERRAINS : DE LONGUE DATE

C'est ainsi que, dès 1993, Mire était déjà impliquée dans le guidage d'un tunnelier et l'auscultation de surface et en souterrain.

« À l'époque, précise Pierre Gusmano, la technique était "manuelle" et, pour couvrir 1700 mètres de tunnel bi-tubes, nous avons installé près de 2000 repères topographiques et réalisé 200000 mesures de nivellement de surface afin d'ausculter les mouvements du bâti. Aujourd'hui, nous avons développé des techniques nouvelles et, pour réaliser les mesures, notamment celles relatives à la réalisation du Grand Paris Express et du prolongement d'Éole vers l'ouest multipliées par 20 par rapport au chantier de 1995, nous les avons entièrement automatisées, informatisées et numérisées. Nous nous sommes dimensionnés pour inclure dans le même "panier" des géomètres, des géologues et des informaticiens et proposer aux donneurs d'ordre des solutions globales et modernes avec logiciels, mesures en temps réel, plateforme web, scanner et BIM ».

Ce système global permet au maître d'œuvre de voir en permanence tout ce qui est ausculté sur son chantier et tous les mouvements que le creusement de son tunnel est susceptible de provoquer, tant en surface qu'en souterrain, avec l'incidence sur les ouvrages avoisinants, que ce soit un bâti en surface, une ligne de métro existante, une voie ferrée passant au-dessus ou en dessous de son ouvrage mais aussi à son propre tunnel pendant sa phase de construction.

À cet effet, Mire met en œuvre des techniques d'auscultation au sol permettant de réaliser des fréquences de mesure importantes et de déclencher éventuellement des alertes en temps réel ainsi que des techniques, également d'auscultation, permettant d'avoir une vision du site de haut, avec une fréquence moins élevée mais une étendue beaucoup plus grande : c'est là qu'intervient l'Interférométrie Radar Satellitaire (InSAR) réalisée par le GIE Aurigami, dont le principe est développé dans un encadré spécifique. ▶

SAISAME® EN BREF : UNE CARTE DU CHANTIER EN TEMPS RÉEL

Dans le cadre du prolongement de la Ligne 11 lot GC01, Mire S.A.S. s'est vu confier par le groupement Alliance un travail important de topographie, et de surveillance par auscultation automatisée et instrumentation pour un tracé en zone urbaine d'environ 3,8 kilomètres.

Dans cet esprit elle a développé un outil SIG nommé Saisame® qui livre en temps réel une carte active reflétant l'ensemble des mesures du chantier.

Saisame® permet à la fois une compréhension instantanée de la situation et une étude plus approfondie à l'aide d'outils d'analyse puissants.



Cette technique utilise les mesures réalisées par les radars en altitude, selon une révolution de 6 jours, avec une précision pluri-millimétrique, surtout en milieu urbain, dans des zones qui n'ont pas été équipées de capteurs au sol. L'image fournie par l'InSAR est une image complexe, qui est transformée et interprétée en valeurs de déplacement par un spécialiste d'Aurigami.

« À Paris, par exemple, poursuit Pierre Gusmano, Aurigami vient de faire l'exercice sur le prolongement de la Ligne 14 Nord dans le cadre de ses recherches. L'utilisation des images interférométriques a permis de voir les déplacements induits par le chantier grâce aux changements détectés par le satellite sur les toits d'immeubles.

L'observation de l'image transmise par l'interférométrie permet de voir exactement où passe le tunnel par le simple changement de couleur des toits à l'aplomb du tracé ».

Il arrive malheureusement que la création de nouveaux tunnels génère des troubles dans les avoisinants. Les capteurs disséminés sur le tracé, même s'ils sont nombreux, ne permettent pas toujours un échantillon suffisant de mesures permettant d'analyser les causes des désordres provoqués, d'autant que ces derniers ne se situent pas nécessairement à proximité des capteurs en place.

L'interférométrie permet de disposer de l'ensemble des images disponibles de la zone avant, pendant et à l'issue les

4- Isohypses d'un site urbanisé fournies par Saisame®.

5- La "trace" du passage d'un tunnelier dans un environnement urbanisé fournie par interférométrie radar satellitaire.

6- Interférogramme différentiel au Gabon.

travaux et de mettre ainsi en évidence l'origine, l'amplitude et la durée des désordres constatés grâce à des milliers de points de mesure.

L'EXEMPLE DE LA RUE PAPILLON : DÈS 1995

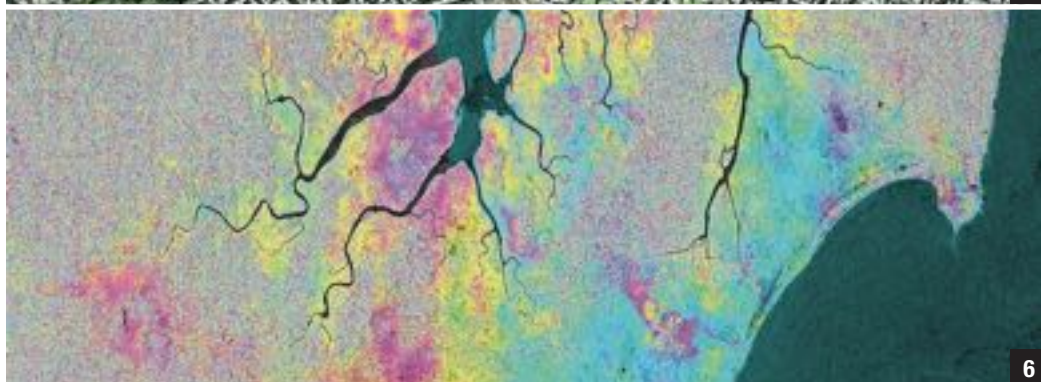
Pierre Gusmano revient à ce sujet sur un accident survenu en 1995 à Paris, dans le 9^e arrondissement.

« Un exemple de l'efficacité du système nous a été donné lors de l'apparition d'un fontis ayant provoqué l'écroulement d'un immeuble rue Papillon à la suite du creusement du tunnel d'Éole. L'utilisation de l'interférométrie qui n'en était encore qu'à ses débuts a mis en évidence, par l'observation du mouvement des toits des bâtiments, l'existence de systèmes de chauffage par géothermie dans les Grands Magasins ayant engendré des mouvements de la nappe phréatique, intempéstifs et cachés, qui ont provoqué la déstabilisation de la zone concernée ».

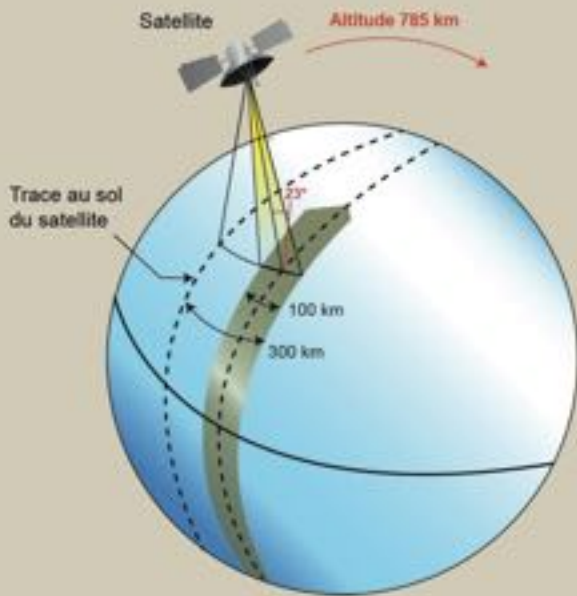
À l'époque, l'utilisation de l'InSAR était exceptionnelle. C'est d'ailleurs une des premières fois qu'elle était appliquée à un chantier pour mettre en évidence des déplacements vus du ciel.

Aujourd'hui, Mire a pour objectif de la "démocratiser" dans le secteur des Travaux Publics et du bâtiment en confrontant en permanence les auscultations au sol avec les images proposées par les satellites. Dans un environnement où plusieurs entreprises travaillent sur un même chantier, en cas d'incident, l'InSAR permet de remonter le temps et d'écrire l'histoire avec des images datées mettant en évidence les cuvettes de tassements. Il ne reste plus qu'à corrélés les images avec les interventions respectives des entreprises.

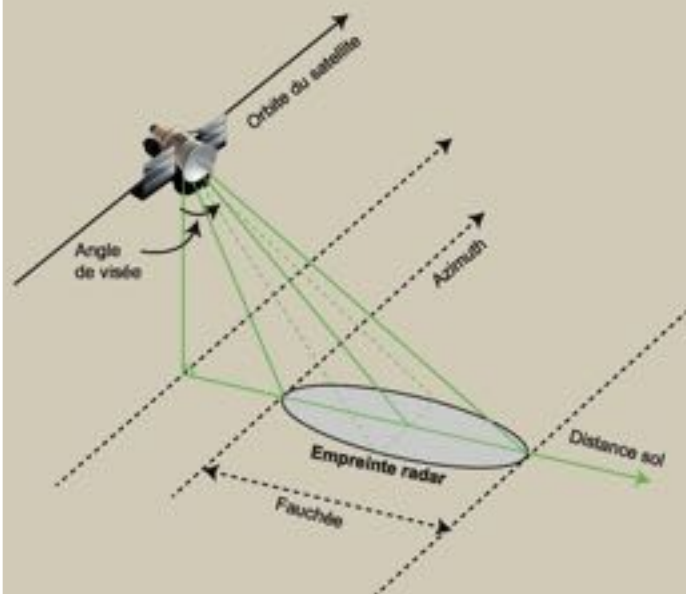
L'InSAR permet également la surveillance extrêmement précise d'une zone dans laquelle est effectué un rabattement de nappe en vue de réaliser un creusement avec les incidences qu'il peut avoir sur les avoisinants. Elle permet, par exemple, de localiser et de dissocier la zone concernée par le rabat-



© AURIGAMI



7a



7b

AURIGAMI EN BREF : L'INTERFÉROMÉTRIE PAR SATELLITE

Aurigami est un groupement original d'experts de l'interférométrie radar satellitaire et du monitoring terrestre qui propose des offres "sur-mesure" dans le suivi de déformations par imagerie radar satellitaire.

Le GIE a été créé en 2017 par Mire et Aliter Videre, entreprise de topographie d'Izernore (Ain), en partenariat avec le Listic (Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance) d'Annecy, qui ont développé un procédé interférométrique : Aurigami®.

Il permet à partir d'images satellites de mettre en évidence des déplacements éventuels du terrain, du bâti ou des ouvrages d'art. Dans la plupart des cas, aucune instrumentation in situ n'est nécessaire pour obtenir cette information.

L'interférométrie radar satellitaire (InSAR) est une solution efficace pour le suivi de stabilité des grands ouvrages (existants ou à venir) face aux risques naturels et géotechniques.

L'InSAR permet de cartographier les déformations de la surface de la Terre, centimétriques à millimétriques, par mesure satellitaire.

Il est possible de connaître les déformations qui ont eu lieu plusieurs années dans le passé grâce aux archives.

Cette technique permet de mesurer les déformations de jour comme de nuit, sans être affectée par la présence de nuages.

Les mesures correspondent à des structures, naturelles ou construites par l'homme, permettant une réflexion du signal radar vers le satellite. Si nécessaire, il est possible de rajouter des points de mesures en installant des coins réflecteurs.

Permettant de signaler des déplacements éventuels du terrain, du bâti ou des ouvrages d'art, il en résulte une mesure de vitesse moyenne de déplacement le long de la ligne de visée du satellite avec une précision centimétrique, voire millimétrique.

Lors de chaque survol de la zone surveillée, l'antenne radar émet vers le sol des signaux radar qui se réfléchissent à sa surface. Les signaux rétro-dif-

fusés sont alors captés par le satellite. L'image radar obtenue (image SAR) est composée de pixels qui sont illuminés périodiquement par le satellite. Les techniques avancées de l'interférométrie permettent de sélectionner des pixels de "références" ou réflecteurs permanents repérés comme stables servant de points de mesure pour quantifier ces déplacements avec une grande précision. Les capteurs haute résolution permettent aujourd'hui d'obtenir des pixels avec une résolution au sol allant jusqu'à 1 m x 1 m.

La comparaison de paires d'images radar d'une même zone permet de détecter la présence éventuelle de déplacement (rapprochement ou éloignement par rapport à la ligne de visée du satellite).

L'interférométrie repose sur l'étude d'une quantité qu'est la phase interférométrique, qui représente la différence de phase entre les deux images, et par conséquent, contient des informations sur le déplacement de la cible au sol.

Qu'obtient-on ?

Les résultats présentés sous forme de points de mesures, pouvant être interprétés en isolignes, permettent de mettre en évidence les zones de déformations, par une représentation cartographique intuitive colorée.

Avantages pour l'auscultation dans le domaine du BTP : La technique d'interférométrie radar satellitaire permet de mettre en place une solution de surveillance, qui présente un grand nombre d'avantages :

- Un outil tout temps, de jour comme de nuit, indépendant de la météo,
- La surveillance d'une zone géographique étendue,
- L'absence d'installation au sol et de maintenance,
- Une grande densité spatiale de points de mesure,
- Une fréquence au minimum de 6 jours,
- La possibilité de "remonter" dans le temps pour des analyses rétro-actives d'événements particuliers (fontis, éboulements, glissements de terrain...).

tement de nappe, qui peut s'étendre sur plusieurs centaines de mètres et celle affectée par le seul creusement.

MEXICO : TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION IDÉAL

Mire a travaillé sur de nombreux chantiers à Mexico, une capitale construite sur un ancien lac asséché, qui comprend des zones rocheuses en alternance avec des terrains peu compacts ce qui engendre des tassements différentiels conséquents, sans parler même des tremblements de terre. À Mexico, des tests ont révélé des tassements de l'ordre de 14 cm/an dans et autour de

la ville ce qui laisse entrevoir les effets induits sur les bâtiments, les voies ferrées, les routes, les aéroports, ... Dans l'immédiat, la technique de l'InSAR n'y a pas encore été appliquée par Aurigami mais, pour Pierre Gusmano, elle constituerait un terrain d'expérimentation idéal pour démontrer ses performances par rapport aux techniques traditionnelles de relevés par points

7a et 7b- Principe de base de l'interférométrie radar satellitaire.

fixes. L'interférométrie peut s'appliquer avec tout autant de bénéfices dans les zones de montagne soumises à des glissements de versants qu'il serait ainsi possible d'observer en permanence, au rythme d'une rotation tous les 6 jours, permettant de prévenir des risques d'avalanche.

Dans le cas de l'observation des mouvements d'un glacier, sur lequel il est difficile de localiser des points de base identifiables, elle nécessite la mise en place de réflecteurs spécifiques "reconnaisables" par le satellite. C'est d'ailleurs ce que vient de réaliser Aurigami en collaboration avec le Listic⁽¹⁾

sur le glacier d'Argentière, dans les Alpes, qui fait ainsi office d'expérimentation pour interpréter ses mouvements. À noter que ces réflecteurs ont été conçus et mis au point - forme, géométrie, matériau - par Aurigami en partenariat avec le Listic.

Dans un tout autre domaine, cette même technique a permis la découverte d'eau dans le désert du Darfour au Sahel, principalement au Tchad et au Soudan : elle a fait apparaître la modification des aspects du terrain en présence ou non d'eau souterraine par la simple observation des mouvements de surface. ▶



8 © AURIGAMI



9 © MIRE

GRAND PARIS : TOUS LES CHANTIERS SOUS SURVEILLANCE

« Convaincue de la fiabilité et des performances de la méthode, poursuit Pierre Gusmano, la Société du Grand Paris a passé des contrats de surveillance par InSAR sur le tracé des différentes lignes pour surveiller tous les chantiers en cours jusqu'à leur achèvement ».

Mire est impliquée sur plusieurs chantiers parisiens de travaux souterrains, tant en topographie qu'en auscultation traditionnelle ainsi que pour HSL, avec la méthode de l'InSAR. On peut citer :

- Prolongement de la Ligne 14 Sud vers Orly ;
- Prolongement d'Éole vers l'ouest à partir de Haussmann - Saint-Lazare (HSL) ;

→ Prolongement de la Ligne 11 entre Paris et l'Est francilien, de Mairie des Lilas à Rosny-Bois-Perrier.

Sur le chantier Haussmann - Saint-Lazare sur lequel la mesure par interférométrie a été intégrée au marché et afin de vérifier les performances du système, Mire a installé parallèlement une batterie d'une dizaine de stations totales robotisées au sol, dans un rayon de quelques rues, en interaction avec de l'ordre de 200 prismes, solidaires des bâtiments.

« Les mesures de ces systèmes au sol, ajoute Pierre Gusmano, sont mises en corrélation avec celles de l'interférométrie et la corrélation est prouvée à 95%. À noter qu'il en a été de même sur plusieurs essais réalisés sur des chantiers

8- L'un des réflecteurs expérimentaux installés sur le glacier d'Argentière par Aurigami.

9- Réglage d'appareils de voie sur la ligne Tours-Bordeaux du TGV Sur-Europe-Atlantique.

10 et 11- Relevés topographiques sur le chantier du prolongement de la Ligne 11 du métro parisien.

12- Lecture d'un inclinomètre de surveillance d'ouvrage.

de rabattement de nappe. On réussit à mesurer des déplacements de seulement quelques millimètres ».

DE L'AMONT D'UN PROJET JUSQU'À SA FIN D'EXPLOITATION

Sur des tracés de longue distance, comme par exemple la construction d'une ligne de TGV, en phase projet, l'utilisation de l'interférométrie permet de dresser une cartographie des zones instables d'après un historique des déplacements ce qui peut permettre d'affiner le tracé de la future voie en fonction de la nature plus ou moins sensible des zones à traverser. Ce qui n'empêche pas de contrôler les zones considérées comme les plus sensibles avec des techniques traditionnelles au sol.



10 © MIRE



11 © MIRE



12 © MIRE



13
© MIRE

Pendant les travaux, la poursuite des mesures autorise la vérification des mesures préliminaires et, au-delà, lorsque la ligne est en service, contribue à repérer les éventuels mouvements consécutifs au passage des rames et bénéficier d'éléments factuels et précis permettant d'organiser et de hiérarchiser les préconisations de maintenance.

« Cette technique, poursuit Pierre Gusmano, peut ainsi aider à dimensionner les grands projets tout autant qu'à les suivre pendant les travaux et, après la mise en service, à assurer le contrôle de la ligne, qu'elle soit située en site urbain, en rase campagne, dans un désert, quel que soit le pays ou le lieu dans le monde, depuis le grand

13- Travaux d'auscultation dans le cadre de l'entretien de la Ligne A du RER parisien.

14- Relevés des mesures d'un scanner 3D.

15- Relevés topographiques en tunnel.

16- Sur le prolongement de la Ligne 14 Sud vers Orly, relevés topographiques par GPS de dernière génération.

amont d'un projet jusqu'à la fin de son exploitation ».

UNE BASE DE DONNÉES EN TEMPS RÉEL

Une autre démarche de Mire mérite d'être signalée : en effet, il ne s'agit pas seulement pour l'entreprise de capter la donnée, il faut la transmettre, l'ordonner, l'archiver et la mettre à disposition sur des sites internet ou des plateformes web que ses clients peuvent consulter rapidement.

À cette fin, ses informaticiens ont créé des bases de données permettant de voir en temps réel les résultats de toutes les auscultations relatives à un chantier : cela se présente sous forme de cartes actives et de graphiques sur lesquels figurent l'ensemble des capteurs disséminés sur un chantier. Toutes les fois qu'une mesure est effectuée sur le terrain, qu'il s'agisse de mouvement, de vibration, de son, de poussière ..., elle est transmise sur ces cartes et graphiques avec des repères de couleurs - vert, orange, rouge - indiquant la gravité ou non de l'alerte éventuelle.

Ce logiciel, appelé Saisame®, assure la gestion de toute la chaîne des mesures effectuées sur un chantier jusqu'à la livraison de l'information chez le client (voir encadré). Pour que le système soit efficace, cela sous-entend que les données soient actualisées en permanence par les équipes d'informaticiens de l'entreprise.

La culture ferroviaire héritée de Desquenne & Giral est encore bien

présente dans l'entreprise, à telle enseigne qu'elle a perpétué l'activité d'un pôle chargé des études d'infrastructures et de superstructures ferroviaires qui contribue, avec les maîtres d'œuvre, à la conception de voie, l'étude de tracés, gabarits, armements et LRS pour des lignes conventionnelles, des lignes urbaines de fret ou à grande vitesse.

Sollicitée pour plusieurs grands projets en France, évoqués précédemment, auxquels il convient d'ajouter la rénovation de la Ligne A du RER, Mire a contribué et contribue encore à des réalisations complexes à l'étranger : réhabilitation de 265 km des lignes Nord et Sud au Cambodge, Blue Line de la zone côtière au Bénin, Ligne A du métro de Mexico City, Ligne L2 du métro de Panama City, tramway de Cuenca en Équateur, voie ferrée en Arabie Saoudite...

D'autres opérations sont en projet au Bénin et au Niger pour la réalisation de la boucle ferroviaire de 3000 km qui traversera également le Burkina Faso et la Côte d'Ivoire. □

1- Le Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC), reconnu par le Ministère en tant qu'équipe d'accueil (EA3703) en 2003, a un projet scientifique centré sur les systèmes de fusion d'informations. Celui-ci englobe les aspects spécification, développement, réalisation et exploitation des systèmes de fusion, en interaction avec les opérateurs ou experts humains, pour le contrôle de systèmes réels issus de quelques champs d'application privilégiés. Le LISTIC est un laboratoire de l'Université Savoie Mont-Blanc et est rattaché à Polytech Annecy Chambéry.



14
© MIRE



15
© MIRE



16
© MIRE



1
© SYSTRA

LA LIGNE 5 DU MÉTRO DE BUCAREST : CONCEPTION ET SUIVI DES TRAVAUX

AUTEUR : BARBARA BITETTI, RESPONSABLE ÉTUDES DÉPARTEMENT TSS, SYSTRA

LA LIGNE 5 DU MÉTRO DE BUCAREST JOUE UN RÔLE STRATÉGIQUE DANS L'AMÉLIORATION DU RÉSEAU DE TRANSPORTS DE LA VILLE, FAVORISANT LA CONNEXION ENTRE LE CENTRE-VILLE ET LES QUARTIERS SITUÉS AU SUD-OUEST. LE TRACÉ EST ENTIÈREMENT SOUTERRAIN. LES TRAVAUX DE CONSTRUCTION SE SONT TERMINÉS EN 2017, LORSQUE LE PASSAGE LE PLUS CRITIQUE A ÉTÉ FRANCHI : LA TRAVERSÉE SOUS FAIBLE COUVERTURE D'UNE STATION EN EXPLOITATION DATANT DE 1976.

INTRODUCTION

Le tracé de la Ligne 5 du métro de Bucarest est entièrement en souterrain. Il fait environ 6 km de long et se caractérise par la présence de 10 stations souterraines et d'un tunnel bitube (figure 2). Il s'insère dans un contexte urbain dense, caractérisé par la présence de nombreuses habitations et ouvrages existants dans la zone d'influence du projet, nécessitant la mise

en œuvre d'une conception adaptée à la nécessité de réduire tout risque d'impact sur l'existant.

Le projet prévoit la création d'un nœud d'échange entre la future Ligne 5 et les lignes existantes 1 et 2, au droit de la nouvelle station Eroilor 2 et de la station contiguë existante Eroilor 1, construite en 1976.

En accord avec le planning des travaux, les tunneliers arrivent dans la nouvelle

1- Tunnel bitube.

1- Double-tube tunnel.

station Eroilor 2 depuis la station Academia Militara, celle-ci étant utilisée comme puits de lancement des tunneliers et comme base de vie du chantier. Une fois la station Eroilor 2 traversée, ils passent sous la station Eroilor 1, puis

ils poursuivent en direction du puits de sortie.

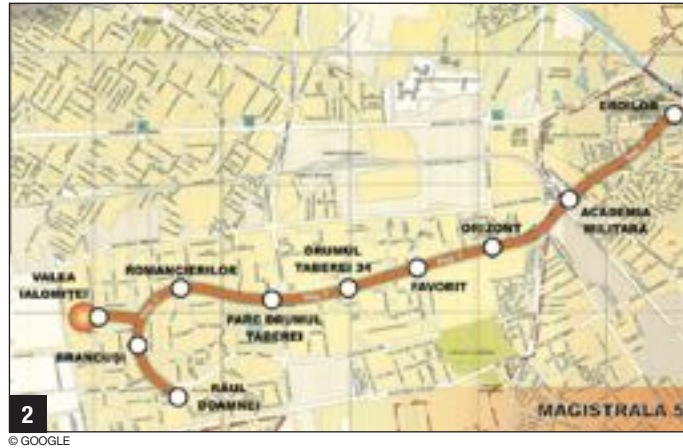
La traversée en souterrain de la station Eroilor 1 représente le point le plus critique du projet, compte tenu, entre autres, de la faible distance entre la voûte des tunnels et le radier de la station (environ 1 m) et des exigences de maintien en exploitation de la station pendant toute la durée des travaux (figure 3).

CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES OUVRAGES

La ligne est en configuration bitube (figure 1). Chacun des deux tunnels a un diamètre interne $D_{int} = 5,70$ m et un diamètre externe $D_{ext} = 6,30$ m. Le revêtement final est constitué de 5+1 voussoirs préfabriqués ayant une épaisseur de 30 cm et une longueur moyenne de 1,50 m (figures 4 et 5). Les tunnels sont creusés à l'aide de deux tunneliers à pression de terre EPB (Earth Pressure Balance) Herrenknecht (figure 6) ayant un diamètre d'excavation $D_{exc} = 6,60$ m et dont le bouclier fait environ 6 m de long.

Dans la zone du passage sous la station Eroilor 1, qui fait environ 50 m de long, les deux tubes se trouvent à une distance moyenne d'environ 16,60 m ($\approx 2.5 D_{exc}$) (figure 7).

La station existante Eroilor 1 est une station réalisée en 1976 en parois moulées, ayant une profondeur d'environ 10 m et une largeur d'environ 40 m. D'après les informations disponibles issues des plans originaux et autres archives, les parois moulées de la station ont une épaisseur d'environ 0,80 m, tandis que le radier fait environ 1,20 m.



2
© GOOGLE

2- Tracé de la Ligne 5.
3- Station Eroilor 1 - coupe transversale.

2- Line 5 alignment.
3- Eroilor 1 station - cross section.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

D'un point de vue géologique, la zone du projet se trouve dans une plaine alluviale caractérisée par la présence de sols à granulométrie variable. Cela est le résultat du chemin sinueux de l'ancien cours de la rivière Dambovita, aujourd'hui contrôlé par une canalisation artificielle.

Les sondages réalisés au droit de la station Eroilor 1 montrent une stratigraphie faite d'alternance de sols argileux et sableux.

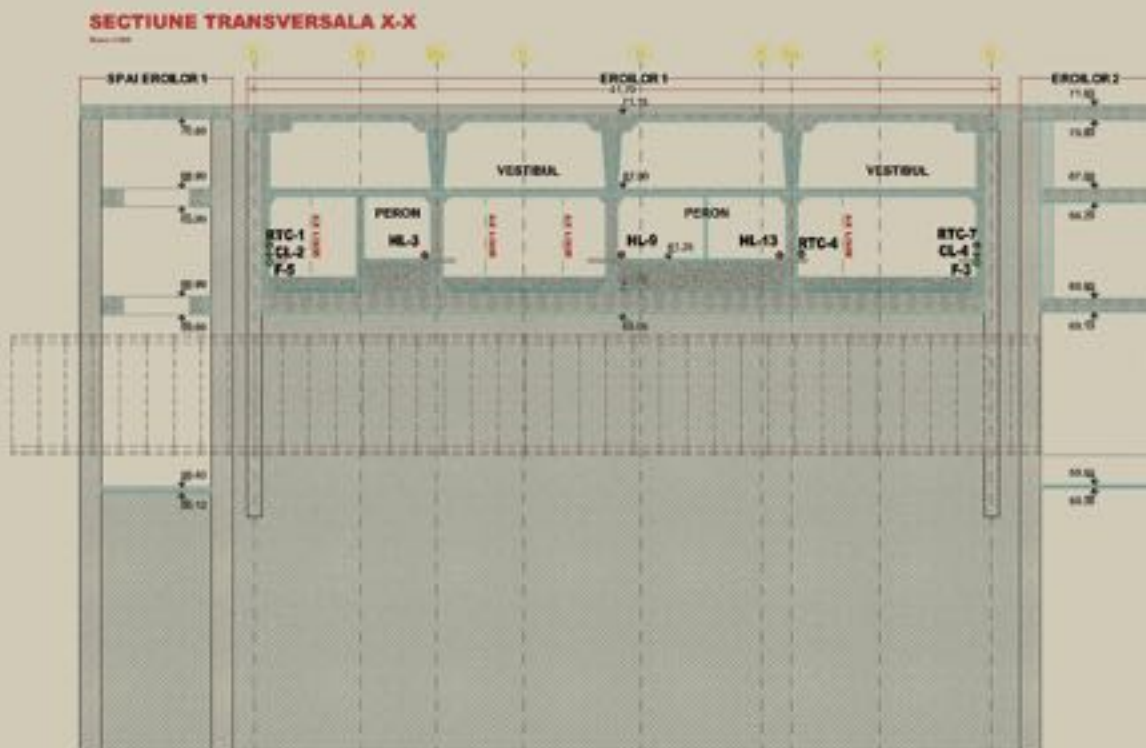
En particulier la séquence géologique suivante a été définie dans la zone du projet :

- Sables avec graviers de 3 m à 8 m de profondeur ;
- Argiles limoneuses entre 8 m et 13 m de profondeur, jusqu'à la base du radier de la station Eroilor 1 ;
- Sables fins de Mostistea à la profondeur des tunnels.

Deux aquifères ont ainsi été repérés lors de la campagne d'investigation géologique/hydrogéologique menée. Selon les mesures piézométriques collectées, une nappe est identifiée à environ 3 m de profondeur. Cela concerne l'aquifère le plus profond localisé dans la formation des Sables de Mostistea, confiné entre deux couches argileuses et identifié à la profondeur des tunnels. Sur la base de ces informations, il a été possible de conclure que les opérations de creusement des tunnels auront lieu en conditions de front mixte et sous nappe.

En conséquence, des procédures d'excavation adéquates et des traitements de terrains ont été définies, nécessaires pour réduire tout risque de venues d'eau lors de l'entrée en terre des tunneliers.

STATION EROILOR 1 - COUPE TRANSVERSALE



3
© ASTALDI



4

© SYSTRA

PLANNING DES TRAVAUX

Le planning des travaux prévoit que la station Academia Militara soit utilisée comme puits de lancement des tunneliers.

Le tronçon entre les stations Academia Militara et Raul Doamnei est réalisé en premier. Ensuite les deux tunneliers sont démontés, transportés et remontés dans la station Academia Militara pour creuser en direction du puits de sortie. Une fois le tronçon en tunnel entre les stations Academia Militara et Eroilor 2 réalisé, les tunneliers sont ripés dans la station Eroilor 2 et préparés pour le passage sous la dalle de la station Eroilor 1.

LA PHASE DE CONCEPTION ET LES MESURES DE RÉDUCTION DES RISQUES

Le passage des deux tunneliers sous la station existante Eroilor 1 représente le point le plus critique du projet compte tenu notamment de la faible distance (1 m environ) entre la voûte des tunnels et le radier de la station. En conséquence, le risque d'impacts importants sur les structures de la station et sur son exploitation a représenté le critère guide pour l'ensemble du processus de conception.

Le station Eroilor 1 a été réalisée en 1976. Elle fait environ 10 m de profondeur. Sa largeur est de 40 m.

Les tunneliers passent sous la station à une distance d'environ 1 m entre la voûte des tunnels et le radier de la

station. Compte tenu de cette faible distance et des incertitudes en ce qui concerne les conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques sous la station, la réalisation du franchissement a nécessité la mise en œuvre de mesures visant à réduire les risques vis-à-vis de la structure et de l'exploitation de la station Eroilor 1 existante.

Des procédures d'excavation spécifiques ainsi que des mesures prélimi-

naires de réduction du risque ont été définies par l'entreprise en phase de conception (figure 8) :

→ Rabattement de nappe d'environ 15 m jusqu'à environ 1 m au-dessous du radier des tunnels : un système de puits de pompage est mis en œuvre autour des parois de la station Eroilor 1, bien avant le démarrage des opérations d'excavation ;

4- Tunnel.
5- Voussoirs.

4- Tunnel.
5- Segments.



5

© SYSTRA



© SYSTRA
6

- Injections horizontales et verticales réalisées depuis la surface ou depuis les structures avoisinantes (la station Eroilor 2 et le puits SPAI), pour assurer les conditions d'étanchéité pendant les travaux ;
- Avancement des tunneliers avec une faible pression au front pour réduire tout risque de soulèvement du radier de la station ;
- Plan d'auscultation ;

**6- Tunnelier EPB.
7- Traversée Eroilor 1 - vue en en plan.**

**6- EPB tunnel boring machine.
7- Eroilor 1 crossing - plan view.**

- Suivi en continu des travaux en termes de paramètres d'excavation des machines, ainsi que d'effets induits sur le contexte environnant.

LA SÉQUENCE DE CONSTRUCTION

Pour gérer les risques liés aux opérations d'excavation sous la dalle de la station existante et en exploitation, l'entreprise a défini une procédure d'excavation consistant en :

- Réalisation des puits de pompage : 6 puits principaux plus 6 puits de secours à activer en cas de besoin et/ou de mauvais fonctionnement des 6 puits principaux ;
- Réalisation d'injections verticales depuis la surface pour traiter la zone de sol d'environ 1 m d'épaisseur entre les parois moulées de la station Eroilor 1 et celles des ouvrages contigus (la station Eroilor 2 et le puits SPAI), le but étant d'assurer les conditions d'étanchéité lors de la démolition des parois moulées pour le passage des tunneliers ;
- Activation du système de pompage et réalisation des perforations préliminaires aux injections horizontales sous la dalle de la station Eroilor 1 ;
- Désactivation des puits de pompage et réalisation des injections horizontales (de ciment et chimiques) pour créer des bouchons sous la dalle de la station Eroilor 1 ;
- Réactivation des puits de pompage, démolition des parois moulées et réalisation d'une couche de 50 cm d'épaisseur de béton renforcé avec des fibres de verre (figure 9) ;
- Création d'un bloc en béton pour le démarrage des TBM, nécessaire aussi pour assurer un bon alignement des tunneliers lors du démarrage de l'excavation ;
- Remplissage du puits SPAI par du béton maigre pour la traversée en pression des TBM ;
- Démarrage des opérations de creusement à partir de la station Eroilor 2 ;
- Désactivation des puits de pompage.

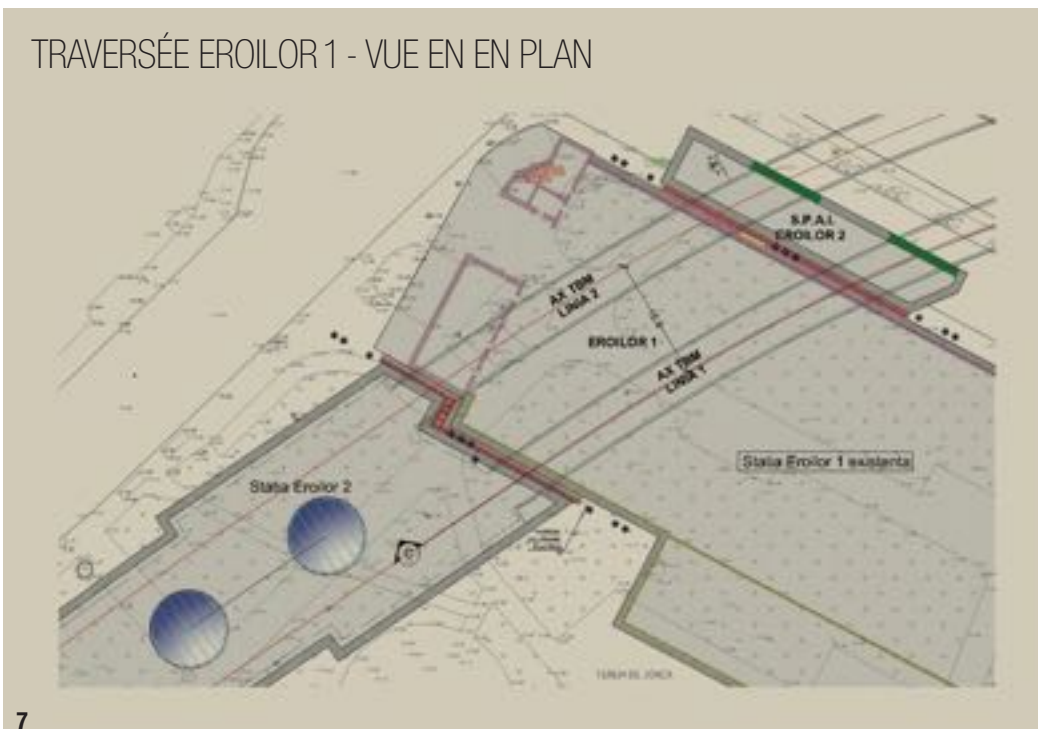
Rabattement de nappe

Pour rabattre la nappe en-dessous du radier des tunnels, un système de pompage constitué de puits de grand diamètre ($D = 700$ mm) et de drains horizontaux est mis en place. L'objectif principal du système de pompage est de réaliser toutes les opérations à suivre en conditions étanches, de réduire de cette manière tout risque de venues d'eau dans la station Eroilor 2 et de pouvoir réaliser les opérations de creusement avec une faible pression au front des TBM qui ne doit donc assurer que la stabilisation de la pression géostatique.

Le traitement des sols

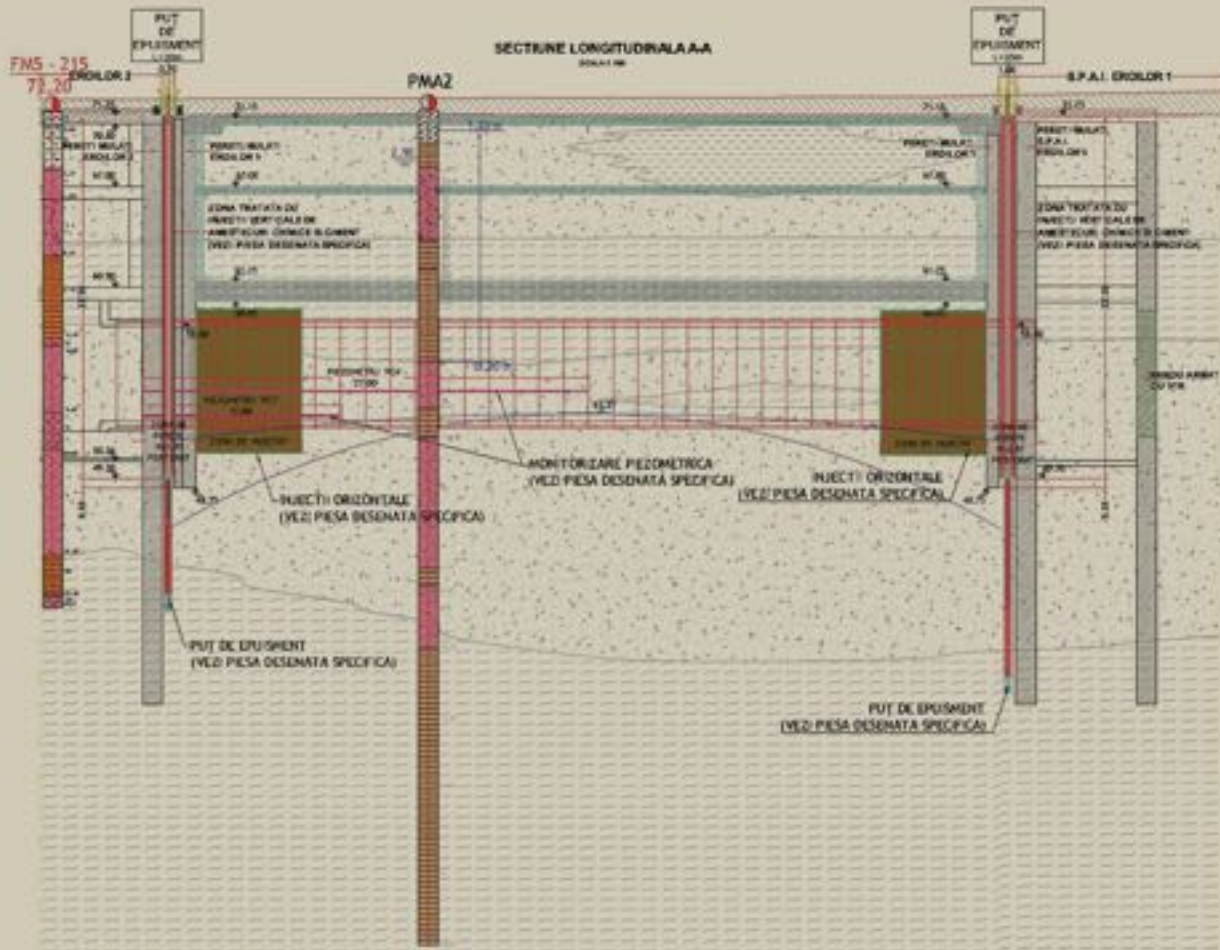
Les injections verticales et horizontales envisagées en phase de conception ont pour but de garantir des conditions étanches lors des opérations de démolition des parois moulées ainsi que de mise en terre des tunneliers.

TRAVERSÉE EROILOR 1 - VUE EN EN PLAN



© ASTALDI
7

TRAITEMENT DES SOLS



8

© ASTALDI

8- Traitement des sols.
9- Démolition de paroi moulée.

8- Soil treatment.
9- Diaphragm wall demolition.

Les injections verticales sont réalisées depuis la surface sur 22 m de hauteur, dans l'espace d'environ 1 m entre les extrados des parois moulées de la station Eroilor 1 et de celles des ouvrages contigus (la station Eroilor 2 et le puits SPAI).

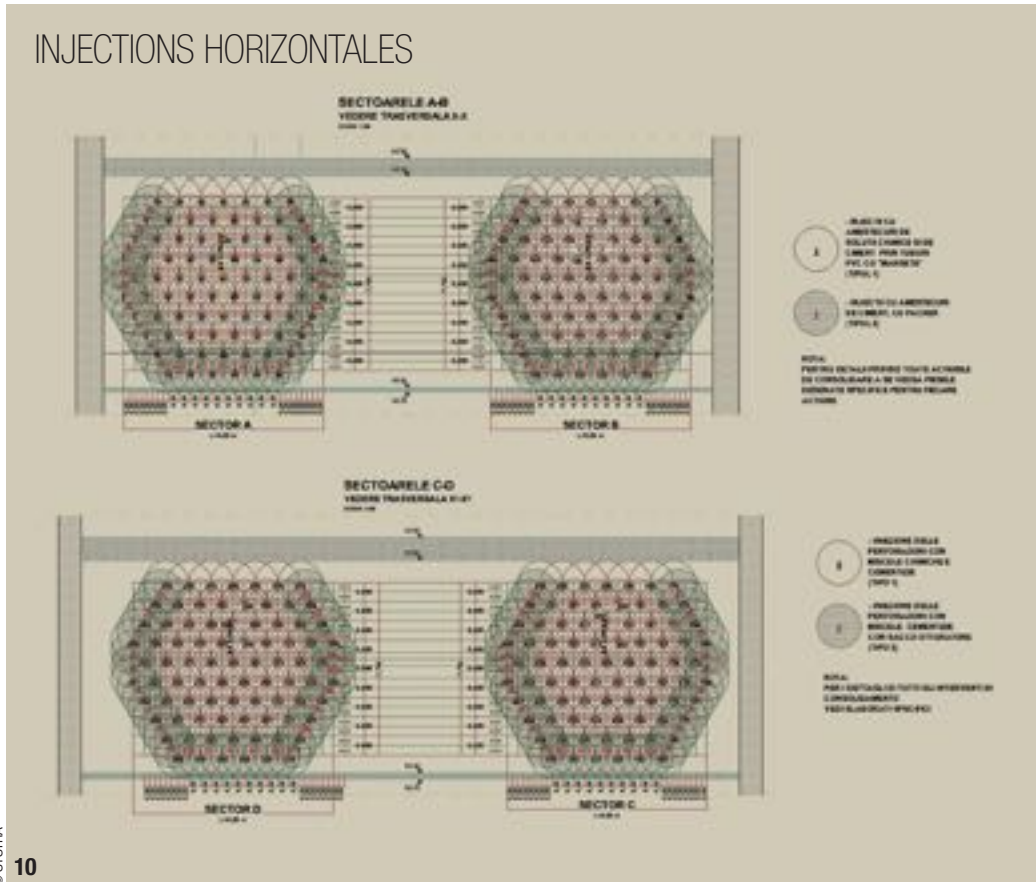
Les injections horizontales, de ciment et chimiques, sont réalisées sur une longueur de 12 m depuis la station Eroilor 2 et le puits SPAI (figure 10).



9

© SYSTRA

INJECTIONS HORIZONTALES



10- Injections horizontales.
11- Plan auscultation.

10- Horizontal jet grouting.
11- Monitoring plan.

Le plan d'auscultation et le plan de management des risques

Compte tenu de la criticité des opérations de creusement pour la traversée en souterrain de la gare Eroilor 1, ainsi que de la vulnérabilité de ses structures, un plan d'auscultation détaillé a été mis en place, dans le but de contrôler toutes les déformations induites par les opérations de creusement et de définir un plan d'intervention si nécessaire (figure 11).

Le plan d'auscultation conçu prévoit :

→ Instrumentations pour le contrôle des déformations induites sur les différentes parties de la structure de la station Eroilor 1 et des voies en exploitation :

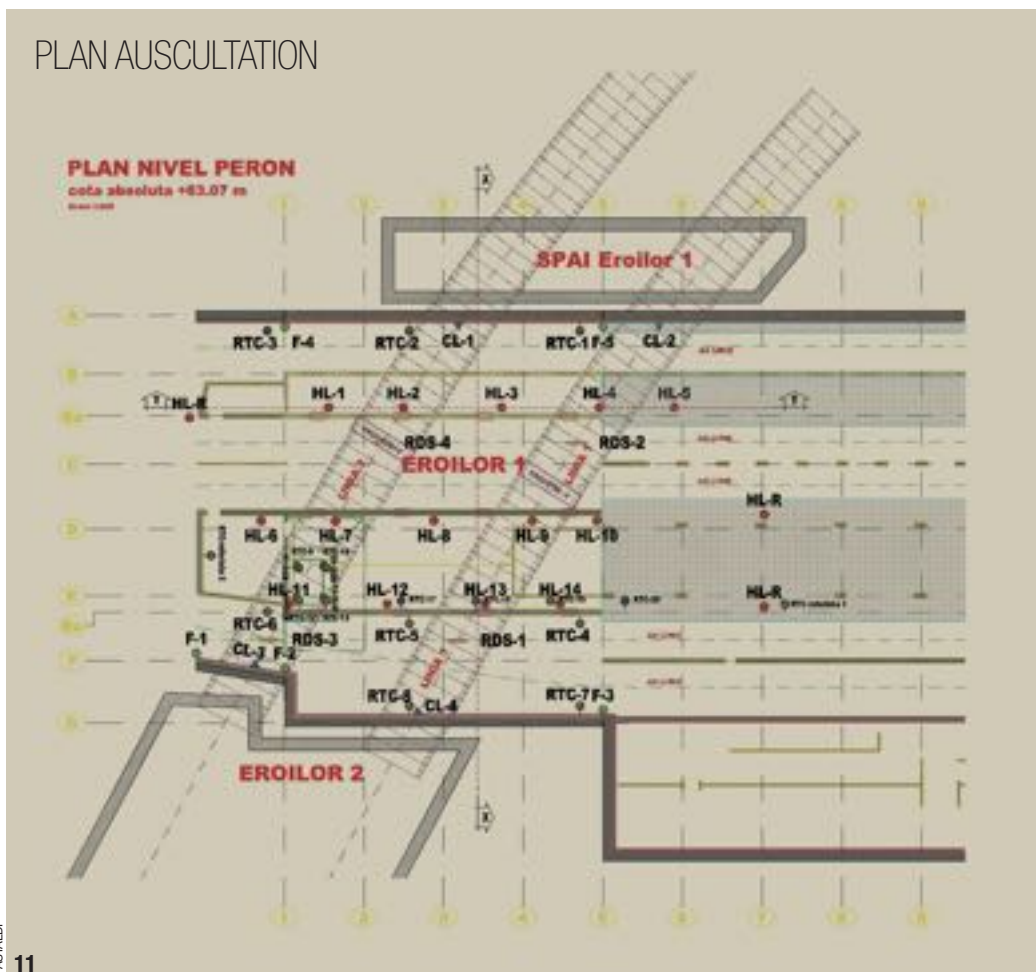
- Points de nivellement hydrauliques (HL) installés le long des trois murs principaux de la station, perpendiculairement à l'axe des tunnels. La station de lecture (HL-R) étant installée en dehors de la zone d'influence ;
- Points de contrôle des déformations des voies RDS (Rail Deformation Systems) ;
- Inclinomètres (CL) sur les murs latéraux de la station et fissuromètres (F) au droit des joints structuraux ;

→ Piézomètres pour le contrôle des niveaux de nappe, notamment pendant les opérations de rabattement, la réalisation des injections de consolidation, la démolition des parois moulées et le passage des TBM. Des deux côtés de la station Eroilor 1, 6 piézomètres verticaux ont été installés, à 25 m et 28 m de profondeur. Ainsi, 2 piézomètres horizontaux électriques ont été installés en-dessous de la dalle de Eroilor 1, pour vérifier le niveau d'eau après les perforations horizontales faites pour les injections ;

→ Instrumentation des voussoirs du tunnel.

De plus, en parallèle de l'analyse des données collectées par les instruments d'auscultation installés, un contrôle en temps réel de tous les paramètres de pilotage des TBM a été réalisé.

PLAN AUSCULTATION



LE BESOIN D'UNE VARIANTE À LA CONCEPTION

Juste avant le démarrage des opérations de creusement des tunnels, une dernière expertise technique a été réalisée par l'entreprise pour vérifier la présence d'obstacles éventuels sur le passage des tunneliers.

Cela a permis de mettre en évidence la présence des fondations d'un réservoir d'eau en béton armé interférant avec le tracé de l'un des deux tunneliers et devant pourtant être démolit préalablement au passage du tunnelier (figure 12).

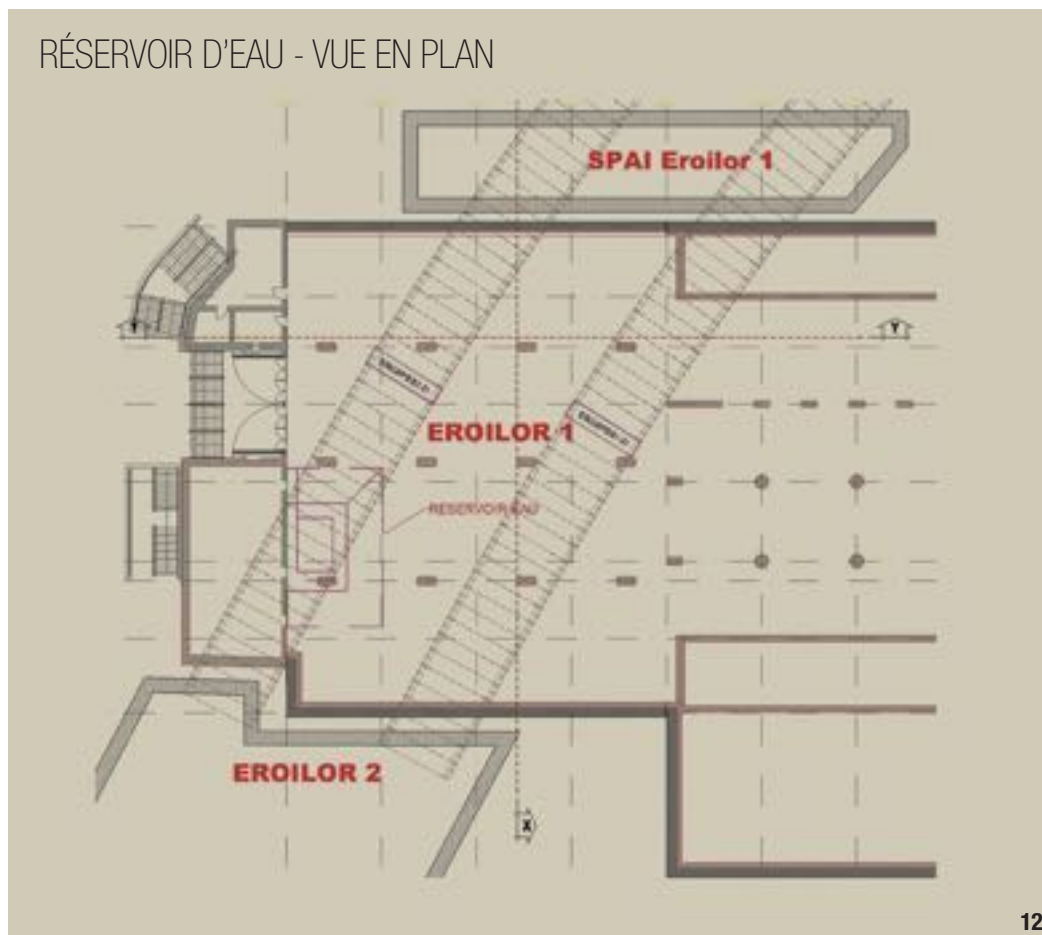
La présence de ce réservoir a obligé l'entreprise à définir une variante au projet de base. Une procédure de démolition du réservoir a été définie, selon les phases suivantes :

- Activation du système de rabattement de la nappe et réalisation des perforations (6 m de long) depuis la station Eroilor 2 dans la structure du réservoir. Ceci pour réduire le risque de venues d'eau dans la station en cas de mauvais fonctionnement du système de rabattement ;
- Injections dans la fondation du réservoir depuis l'intérieur de la station Eroilor 1, pour faciliter les opérations de démolition de sa structure, à réaliser depuis la chambre hyperbare du tunnelier ;
- Réalisation d'une nouvelle fondation du réservoir ;
- Avancement du tunnelier et vidage partiel de la chambre ;
- Réalisation des perforations dans la fondation du réservoir, découpe et extraction des barres de ferrailage depuis la chambre hyperbare du tunnelier (figure 13) ;
- Avancement du tunnelier de 15 à 20 cm et répétition des phases précédentes jusqu'au complet passage du réservoir.

LE SUVI DES TRAVAUX ET L'AUSCULTATION

Les opérations de creusement pour la traversée en souterrain de la station Eroilor 1 ont commencé en juillet 2017 et ont duré environ 20 jours, y compris les opérations nécessaires pour la démolition de la fondation du réservoir d'eau. Les puits de pompage ont été maintenus actifs pendant toute la durée des opérations d'excavation. Les données collectées par les piézomètres ont confirmé l'atteinte du niveau de nappe souhaité (1 m sous le radier des tunnel) et le maintien de celui-ci pendant toute la durée des travaux.

Une fois la nappe rabattue au niveau souhaité, les opérations de démolition



12- Réservoir d'eau - vue en plan.

13- Démolition du réservoir depuis la chambre hyperbare du TBM.

12- Water tank - plan view.

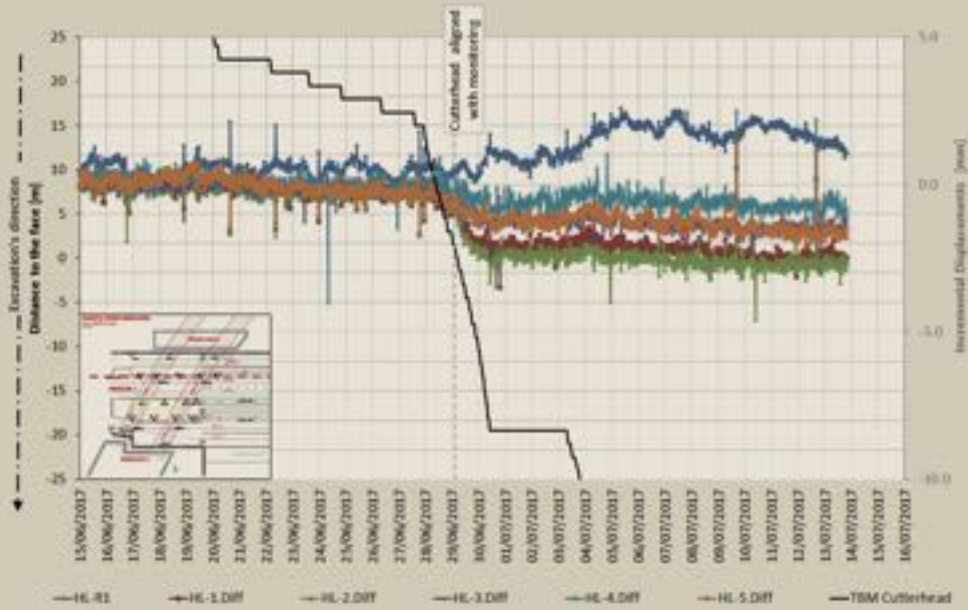
13- Demolition of the tank from the TBM's hyperbaric chamber.

des parois moulées ont été réalisées et les opérations de creusement du tunnel de la Ligne 5 ont pu débuter. Celles-ci ont duré environ 1 mois ; le ratio d'avancement du tunnelier étant d'environ 3,2 m/jour pendant les deux premières semaines, lorsque les opérations de démolition du réservoir d'eau ont été réalisées, puis d'environ 14,5 m/jour une fois que le TBM a dépassé la zone du réservoir.

Une analyse des paramètres d'excavation des TBM, ainsi que des mesures



TASSEMENTS



© SYSTRA

14

collectées par les instruments d'auscultation installés, a été effectuée pendant toute la durée des travaux de creusement.

Les paramètres principaux de pilotage de la machine ont bien mis en évidence le moment du passage dans les zones de sols traités :

→ Après l'entrée en terre du tunnelier et pendant la démolition du réservoir, la force de poussée était initialement d'environ 5 MN, puis de 15 MN une fois passé le bouchon d'étanchéité ;

→ Lors de l'excavation dans la zone de sols traités le couple était d'environ 0,6 MNm à 1,3 MNm ; plus faible de celui enregistré par la suite (2,5 à 3,5 MNm) ;

14- Tassements.

14- Subsidence.

→ La vitesse d'avancement atteint la valeur de 20 mm/min lors du creusement dans la zone de sols traités ;

→ La vitesse rotationnelle était constante et égale à environ 2,5 Rpm ;

→ La pénétration varie entre 4,0 mm/R et 9,0 mm/R.

En ce qui concerne la pression au front, les données mesurées ont mis en évidence :

→ Des valeurs correspondant à une chambre partiellement remplie pendant la démolition du réservoir d'eau ;

→ Des valeurs plus élevées, jusqu'à 0,6 bar à l'axe des tunnels, après passage du réservoir et remplissage de la chambre ;

→ Une réduction de la pression au front lors du passage des TBM dans le puits SPAI.

En ce qui concerne les données d'auscultation des structures de la station Eroilor 1, à l'exception de quelques déplacements enregistrés pendant les phases de rabattement de nappe et traitements des sols, aucun effet significatif n'a été observé.

Le Rail Déformation System (RDS) installé sur les voies de la station a confirmé ces conclusions.

Les variations les plus importantes ont été enregistrées par les instruments de nivellement hydraulique, installés perpendiculairement à l'axe du tunnel, qui ont mesuré un tassement d'environ 2 mm pendant le passage des TBM sous la station Eroilor 1 (figure 14). □

QUANTITÉS PRINCIPALES DU TUNNEL

LONGUEUR TUNNEL : 6 km pour chaque tube

DIAMÈTRE INTÉRIEUR DU TUNNEL : 5,70 m

DIAMÈTRE EXTÉRIEUR TUNNEL : 6,30 m

REVÊTEMENT : 5+1 voussoirs

ÉPAISSEUR VOUSOIRS : 0,30 m

LONGUEUR MOYENNE VOUSOIRS : 1,50 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Metrorex (Bucarest, Roumanie)

AMO : Metroul, Systra

ENTREPRISE : Astaldi, Fcc

ABSTRACT

BUCHAREST METRO LINE 5: DESIGN AND WORK SUPERVISION

BARBARA BITETTI, SYSTRA

The passage underground with a thin roof covering below the existing station Eroilor 1 in service was the most critical aspect of the construction process for Bucharest metro Line 5. To mitigate the identified risk of major impacts on the station's structures and operation, detailed excavation procedures, preliminary emergency response measures and a risk management plan were defined by the contractor. Continuous monitoring of the machine management parameters and the induced effects of tunnel driving was performed during the works. The data collected showed that the conditions stipulated for all the excavation parameters were complied with, and that there were no significant impacts on the structures of Eroilor 1 station. □

LA LÍNEA 5 DEL METRO DE BUCAREST: DISEÑO Y SEGUIMIENTO DE LAS OBRAS

BARBARA BITETTI, SYSTRA

El paso subterráneo y con escasa cobertura bajo la estación existente y operativa Eroilor 1 ha constituido el punto crítico del proceso de construcción de la Línea 5 del metro de Bucarest. Para reducir el riesgo identificado de impactos importantes en las estructuras de la estación y en su explotación, la empresa ha definido procedimientos de excavación detallados, medidas de intervención preliminares y un plan de gestión de los riesgos. Durante las obras se ha llevado a cabo un seguimiento continuo de los parámetros de conducción de las máquinas y de los efectos inducidos por la perforación de los túneles. Los datos recabados han revelado que se han respetado las condiciones fijadas para todos los parámetros de excavación, así como la ausencia de efectos significativos sobre las estructuras de la estación Eroilor 1. □



1
© YVES CHANOIT

OA P13, UN Puits de Lancement de Tunnelier sur la Ligne 15, au Cœur du Site Protégé de l'Île de Monsieur

AUTEURS : MOHAMED SABBAH, RESPONSABLE TRAVAUX MOE, INGEROP - MARTIN CAHN, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, GEOS INGENIEURS CONSEILS - BENJAMIN GIACOMETTI ET MAXIME FONTY, INGÉNIEURS ÉTUDE, SOLETANCHE BACHY - PIERRE-BENOIT PASSOT, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY

SUR LE SITE PROTÉGÉ DE L'ÎLE DE MONSIEUR, À PROXIMITÉ DU PONT DE SÈVRES, LE GROUPEMENT HORIZON (BOUYGUES TP, SOLETANCHE BACHY FRANCE, BESSAC, SOLETANCHE BACHY TUNNELS) PRÉPARE LE LANCEMENT DU TUNNELIER DE LA LIGNE 15 SUD DEVANT REJOINDRE LA GARE FORT-D'ISSY-VANVES-CLAMART, ET TERRASSE ACTUELLEMENT LE Puits de Départ OA P13 JUSQU'À UNE PROFONDEUR DE 30 m. LA RÉALISATION DES PAROIS MOULÉES DE CET OUVRAGE DE FORME TRILOBIQUE, PROFONDES DE 55 m, A NÉCESSITÉ UNE ATTENTION TOUTE PARTICULIÈRE, NOTAMMENT POUR L'INTÉGRATION DU CHANTIER DANS SON ENVIRONNEMENT, POUR LA MAÎTRISE DE LA VERTICALITÉ ET LA RÉALISATION DE PANNEAUX DE JONCTION AUX DIMENSIONS HORS DU COMMUN.

Le tronçon T3A de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express (GPE) franchit deux fois la Seine en amont et en aval de l'île Seguin. Ce tronçon de 4 km en souterrain entre la gare de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart et l'ouvrage annexe du puits de l'île de

Monsieur (OA P13), comporte les gares Issy RER (ISS) et Pont-de-Sèvres (PDS), 4 ouvrages annexes et une passerelle reliant l'île Seguin à la gare PDS. La proximité de la Seine constitue un atout pour l'approvisionnement et l'évacuation des déblais, mais implique des

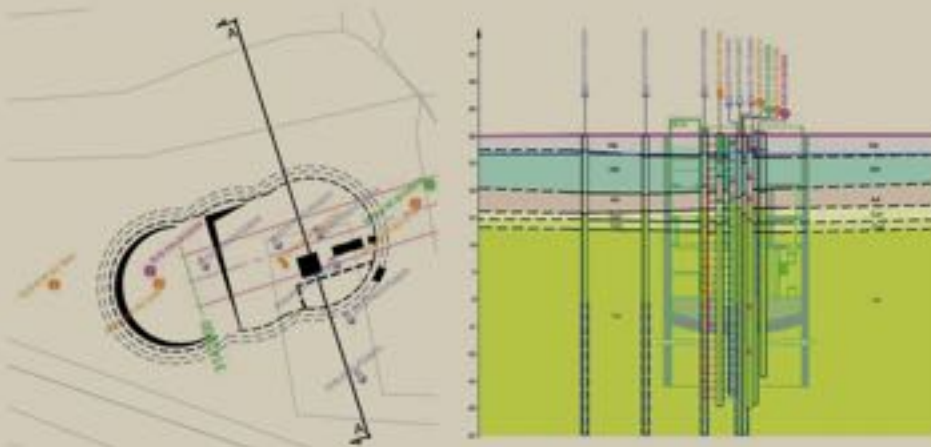
1- L'ouvrage dans son environnement.

1- The structure in its environment.

contraintes vis-à-vis des protections aux crues (figure 1).

L'OA P13 se situe entre la gare Pont-de-Sèvres et la future gare Saint-Cloud, qui fait partie du tronçon T4 de la Ligne 15 Ouest. Cet ouvrage est le point limite entre les marchés du tronçon T3

CONTEXTE GÉOLOGIQUE



© BRGM, GEOS
2

(Ligne 15 Sud à l'ouest, entre Villejuif-Louis-Aragon et l'île de Monsieur) et du tronçon T4 (Ligne 15 Ouest, entre l'île de Monsieur et le Stade de France). Il sert de point de départ du tunnelier qui réalise le secteur Ouest du tronçon T3 jusqu'à la gare de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart, soit une longueur de tunnel de 4146 m (y compris la traversée des gares Pont-de-Sèvres et Issy RER).

L'ouvrage est constitué d'un puits en parois moulées, de forme trilobée (trois parties circulaires sécantes, constituant le corps principal de l'ouvrage annexe). Le puits est axé sur le tunnel. Les dimensions en plan du puits sont les suivantes : longueur de 50 m entre nus de parois moulées (y compris la tolérance de verticalité de la paroi moulée), largeur maximale de 24 m entre nus de parois moulées et correspondant au diamètre des parties circulaires du puits. La largeur minimale

2- Contexte géologique.

2- Geological context.

du puits est de 18,4 m au niveau des jonctions des parties circulaires du puits.

Le lobe Ouest doit permettre d'intégrer la trémie de dimensions 20 m x 8 m nécessaire à l'approvisionnement des coupons de voies.

Le puits a une profondeur de 29,8 m (différence entre le TN moyen à 30,2 m NGF et le niveau du rail à 0,4 m NGF) ;

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

L'Ouvrage Annexe 13 de l'île de Monsieur (OA P13) est implanté en rive gauche de la Seine sur la commune de Sèvres.

Comme la majorité des autres ouvrages du tronçon T3A de la Ligne 15 Sud, le puits et ses parois traversent principalement la Craie Campanienne. Ainsi, après une couverture quaternaire d'environ 14 m, constituée de remblais (Rb), d'alluvions modernes (AM) et anciennes (AA), 23 m de craie sont retrouvés jusqu'au fond de fouille (figure 2).

Comparativement à la rive droite à Boulogne, l'altération de la craie sur l'île de Monsieur est réduite, avec environ 2,5 m de craie pâteuse (Ca1) et 1 m de craie fracturée (Ca2).

La craie étant un matériau particulièrement difficile à échantillonner, sensible à l'eau et au gel, présentant des caractères thixotropiques et une rupture fragile, il s'est révélé quasiment impossible de distinguer visuellement les faciès d'altération via les descriptions des carottes.

Les différents états d'altérations ont été identifiés sur la base d'une analyse des

essais in-situ, principalement pressiométriques, faite à l'échelle du tronçon. La craie saine (Cs) de l'île de Monsieur, dont la perméabilité, inférieure à 5.10^{-6} m/s a été confirmée tant en phase étude par un essai de pompage que par des essais d'eau en forage réalisés lors de la campagne G3, constitue le bouchon de l'ouvrage limitant les débits d'exhaure et la couche d'ancrage des parois moulées.

Deux nappes sont rencontrées au droit du puits : la nappe alluviale de la Seine et celle de la craie. Les deux sont en communication par le biais du réseau de fracturation de la craie, de sorte qu'un seul niveau piézométrique est retenu à 26,7 NGF pour le niveau courant. La charge hydrostatique atteint ainsi 33 m au niveau du fond de fouille.

CONCEPTION

L'ouvrage OA P13, comme les autres ouvrages du lot, a fait l'objet d'une modélisation 3D sous le logiciel Revit (figure 3), à partir de laquelle les plans d'exécution de l'ouvrage sont produits (panneautage, élévations, etc.). Cette modélisation offre également un outil d'aide à la définition des méthodes, et notamment celles relatives aux dispositions nécessaires à l'entrée et à l'exploitation du tunnelier.

Lors des études d'exécution des parois moulées, le schéma structurel suivant a été adopté pour la reprise des pressions de terre et d'eau :

- Les parois moulées circulaires des lobes sont auto-stables, uniquement appuyées sur le radier ;
- La jonction de deux lobes est traitée comme une poutre chargée par la résultante de la pression cylindrique en provenance des lobes adjacents, appuyée sur les refends, les butons centraux et le radier. La démolition du refend central sur la hauteur du tunnel est réalisée en deux temps, de manière à réaliser le radier avant que la portée maximale de la poutre linteau soit atteinte.

Les parois moulées des lobes ont ainsi pu être dimensionnées à l'aide d'un modèle aux coefficients de réaction, en considérant une rigidité cylindrique égale sur la hauteur de la paroi à $E.e/R^2$ (E, e et R étant respectivement le module d'Young du béton de paroi, l'épaisseur de la paroi, le rayon des lobes).

La vérification de la compression dans l'anneau de béton a été menée à l'ELS sur la base de l'épaisseur inscrite et à l'ELU en tenant compte des déviations conformément à l'EC2. ▷

La prise en compte des percements des tunneliers du T3A et du T4 est modélisée en annulant la rigidité cylindrique sur la hauteur de l'ouverture, avec toutefois prise en compte d'un effet gousset (annulation progressive de la rigidité, en parties supérieure et inférieure de l'ouverture).

Les poutres en jonction de lobes ont fait l'objet d'un double calcul :

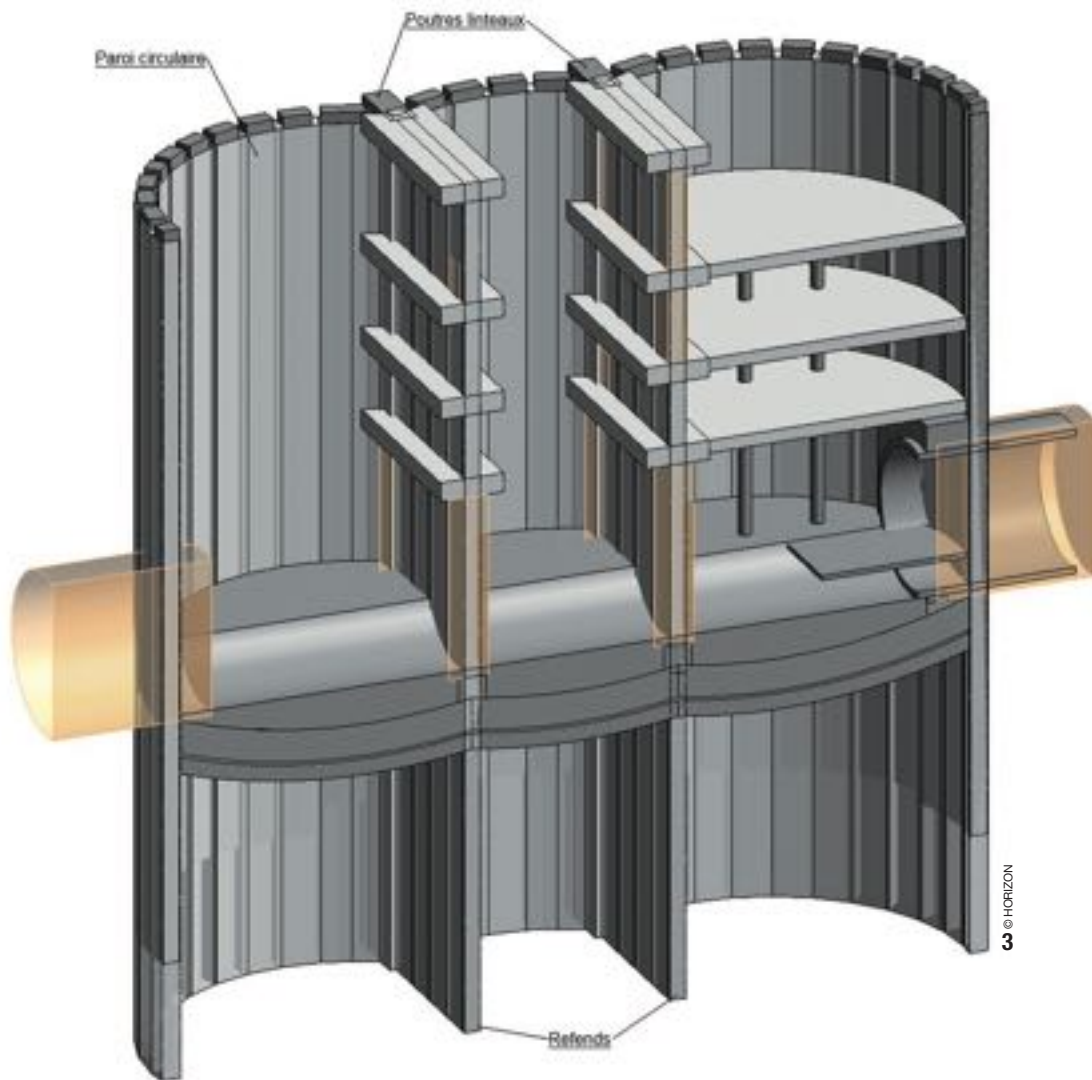
- Modèle aux coefficients de réaction, phasé, à l'aide du logiciel Paris développé par Soletanche Bachy ;
- Modèle structure aux éléments finis 3D, non phasé, à l'aide du logiciel Robot (figure 4). Un modèle au coefficient de réaction monophasé a été produit, dans le but de faire une comparaison indépendante du phasage.

Le modèle structure aux éléments finis a été produit pour appréhender de manière plus fine les redistributions d'efforts dans les butons centraux. Et en effet, si les deux modélisations convergent lorsque l'on additionne les réactions d'appui, les efforts se répartissent différemment dans les butons : les butons supérieurs sont plus chargés dans le modèle aux éléments finis (+70%) tandis que le buton immédiatement au-dessus de l'ouverture faite dans le refend est plus chargé dans le modèle aux coefficients de réaction. De plus, le modèle aux éléments finis montre des moments de flexion et efforts tranchants moindres (de l'ordre de 20%) que sur le traitement réalisé aux coefficients de réaction. Le modèle 3D permet une redistribution du chargement en amont de la poutre linteau et lisse le chargement sur la poutre linteau, conduisant à une répartition d'efforts pouvant être dimensionnante pour les butons supérieurs.

L'enveloppe des deux modèles a été retenue in fine pour le dimensionnement des structures.

Le radier, en forme de coupole inversée, est résistant aux sous-pressions. Il les transmet aux parois moulées périphériques et aux fiches des parois moulées transversales.

La capacité résistante de la paroi moulée tient compte à l'ELS QP d'un abattement conforme à la NF P EN 94-262 dans la mesure où aucun essai de portance n'est réalisé sur la paroi moulée ($F_{T,d} < 0,15 R_s$). Cet abattement conduit, pour la justification des fiches de parois moulées transversales, à suspendre l'effort de traction résultant jusqu'à leur base pour transmettre les efforts aux poutres linteaux par un schéma en bielle-tirant.



3- Maquette 3D de l'ouvrage.

3- 3D model of the structure.

Pour les phases provisoires, la mise hors d'eau est assurée à l'aide d'un réseau de drains passifs descendus jusqu'à la base de la paroi, de manière à écrêter les pressions sous le niveau du fond de fouille au fur et à mesure des terrassements (figure 5).

Ce système de drains passifs a été retenu en conception et en exécution, pour tenir compte de la faible perméabilité de la craie saine et des rayons d'action de puits de captage insuffisants. Le puits d'essai de Boulogne (Puits OA P12, diamètre 9,8 m) avait montré que seule la réalisation de drains passifs à proximité de la paroi permettait de faire chuter la pression au niveau du pied de paroi sous laquelle 3 cellules de pression interstitielle avaient pu être mises en œuvre. L'efficacité du puits central s'était avérée, quant à elle, insuffisante.

RÉALISATION DES TRAVAUX

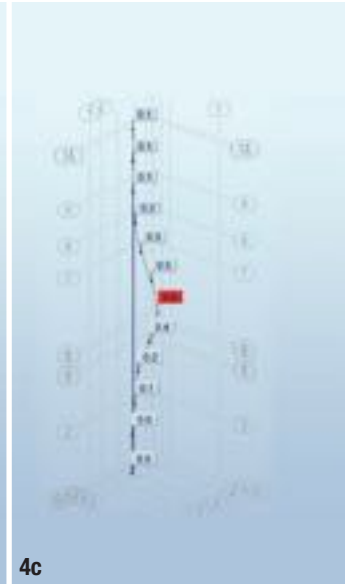
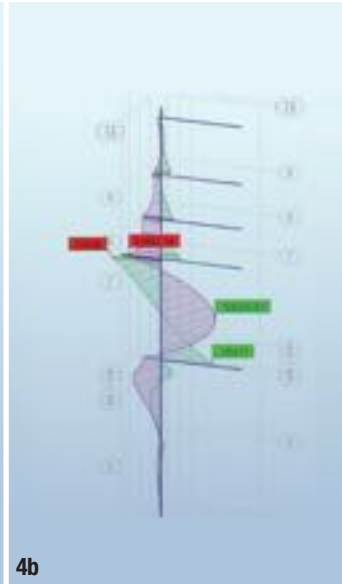
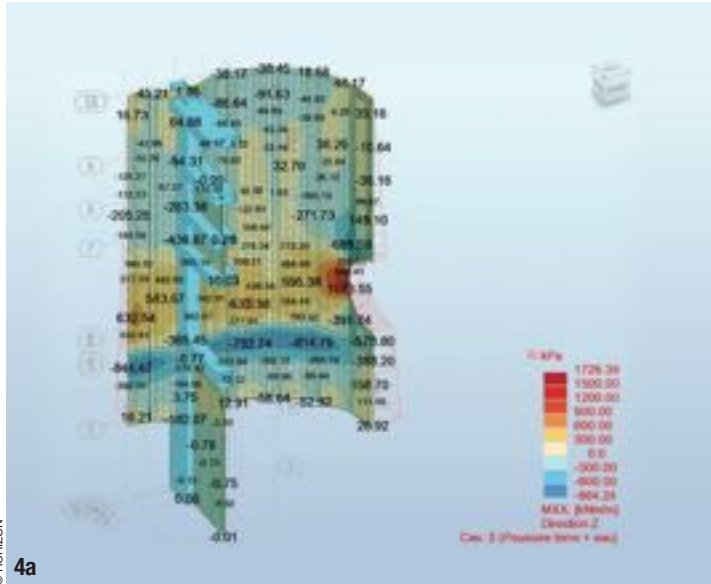
Les travaux de parois moulées ont débuté en avril 2018, après défrichage de l'emprise, sécurisation pyro-

technique et mise en place des installations de chantier. Un travail a été réalisé sur l'intégration paysagère du chantier, avec notamment la mise en œuvre de palissades bois et la peinture en vert olive de toutes les installations visibles de l'extérieur (centrale à boue, cantonnements, convoyeurs du tunnel). L'excavation a été menée avec deux ateliers équipés de bennes hydrauliques instrumentées "KS" (figure 6). Trois épaisseurs de bennes ont été mobilisées : 1,20 m pour la paroi périmétrale, 1,00 m pour les refends transversaux, et 1,80 m pour les quatre panneaux de jonction.

L'excavation conduite à 55 m de profondeur a nécessité une maîtrise de la verticalité relativement fine pour un ouvrage foré à la benne. En effet, les

bandes d'arrêt d'eau entre panneaux étant nécessaires sur toute la hauteur de la paroi, compte-tenu de la charge hydraulique importante, il a fallu descendre les coffrages porte-joint jusqu'à la base de l'excavation. Pour rendre possible le décoffrage de ces joints à grande profondeur, à la benne, la maîtrise des déviations a été particulièrement soignée (0,12% en moyenne sur l'ouvrage, ce qui représente 7 cm à 55 m). Sur la partie circulaire de l'ouvrage, les joints ont été positionnés avec un renvoi d'angle en cales de polystyrène, spitées à l'arrière du coffrage. Ils ont été guidés durant toute leur mise en place à l'aide d'un châssis construit sur mesure, pour garantir le bon positionnement sur toute leur hauteur. Ces dispositions particulières ont permis le bon décoffrage de tous les joints, sans dommage.

Un autre point particulier concerne l'excavation des panneaux de jonction entre lobes. Ces panneaux hybrides se composent d'une paroi linteau de 4,50 m de longueur et 1,80 m d'épais-



seur et des deux amorces des parois de lobes en épaisseur 1,20 m (figure 7). Leur perforation a donc nécessité le recours à plusieurs dimensions d'outils. La cage d'armature centrale du panneau de jonction, qui concentre les efforts, est significativement plus ferrailée que ses voisines (de l'ordre de 190 kg/m³). Découpée en 3 éléments préfabriqués en ateliers et livrés par convois exceptionnels, elle a été assemblée sur site et représente un poids total de 80 t. La manutention de ces cages, de 4,30 m par 1,65 m, constitue, avec l'extraction des joints, les cas de charges dimensionnants de la grue de manutention de 300 t mobilisée sur chantier. Le bétonnage de ces panneaux représente plus de 1100 m³. Il s'est déroulé de nuit, à

4a, b & c- Modèle de calcul aux éléments finis.

5- Dispositif de mise hors d'eau.

4a, b & c- Finite element calculation model.

5- Water-tightness system.

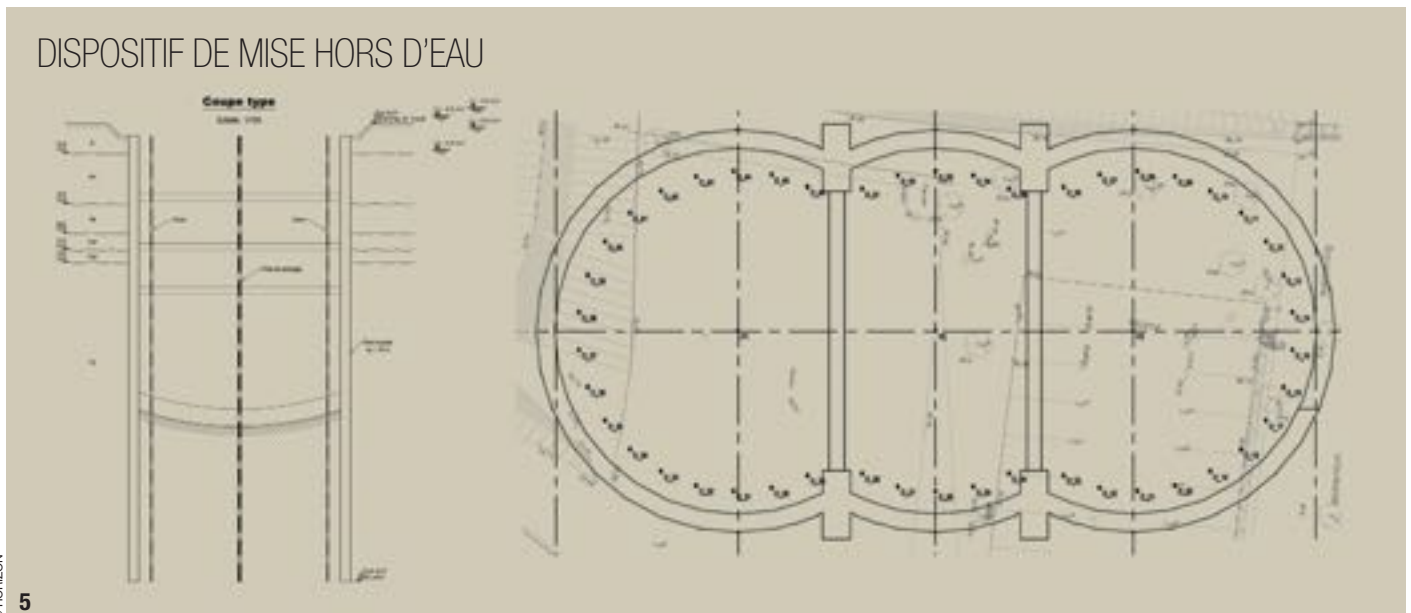
l'aide de 4 tubes plongeurs, pour une meilleure maîtrise des cadences et pour garantir une remontée rapide du béton. Une autre contrainte résidait dans le faible espace disponible sur l'emprise, au regard de l'intensité des flux de

circulation. L'entrée de chantier étant située sur la RD7 soumise à une forte circulation, il convenait de maîtriser l'entrée et la sortie des camions afin d'éviter les perturbations. Pour ce faire, le chantier s'est organisé en trois postes avec approvisionnement des cages d'armatures et évacuation des déblais de nuit.

À la suite des travaux de parois moulées, 46 drains de décharges ont été forés à 55 m, en méthode Hi'Drill, sur le pourtour de l'ouvrage. Ils ont été gravillonnés à l'abri du tubage et équipés de tubes piézométriques pour certains. Le dispositif hydraulique est complété par 3 puits (un dans chaque lobe) en diamètre 350 mm, équipés de pompes immergées. L'eau d'exhaure ainsi pompée est traitée dans une station dédiée

(séparée des eaux de pluie et des eaux de process) avant rejet à la Seine. Le terrassement a ensuite été entrepris en limitant la dissymétrie entre les lobes. Les terrains pour partie pollués ont fait l'objet d'un maillage et d'une pré-caractérisation par carottage afin de flécher l'évacuation des terres vers les exutoires adaptés. Une partie du génie civil de l'ouvrage est réalisée à la descente. Il s'agit de poutres-butons renforçant les parois refends et de certains niveaux de planchers. Les travaux comprennent également la découpe d'une partie des refends pour permettre l'assemblage du tunnelier et la réalisation du radier en coupelles.

L'ouvrage supporte également le pont roulant qui permettra l'acheminement des voussoirs en fond de puits. ▷





6

© YVES CHANOIT

Les déblais du tunnelier à pression de terre seront, quant à eux, évacués à l'aide d'un convoyeur vertical, puis d'un convoyeur secondaire qui enjambe le tramway T2 pour permettre le chargement des barges qui seront amarrées en bord de Seine.

AUSCULTATIONS

Le puits de l'OA P13, premier ouvrage du lot T3A, implanté à proximité d'ouvrages sensibles (tramway T2 et RD7) a fait l'objet d'une auscultation importante. Des contrôles renforcés de la qualité et de la continuité du béton ont été mis en œuvre avec un panneau sur six ausculté par transparence sonique. Bien qu'on attende peu de flexion des parois, le contexte urbain sensible nécessite un suivi précis des déformées et six cages ont été équipées de tubes inclinométriques. Le suivi de la déformée est également complété par des profils de convergence implantés en redondance des profils inclinométriques (figure 8).

Trois cellules de mesure de pression interstitielle ont été positionnées 50 cm sous la fiche des panneaux n° P01, P08 et P10. Ces mesures vont être utilisées en cours de chantier pour vérifier l'efficacité du dispositif de rabattement et s'assurer de la stabilité du bouchon de craie saine.

Afin d'étudier le déconfinement du terrain lors de la réalisation de la tranchée des parois moulées et le reconfinement éventuel lors du bétonnage, un extensomètre à quatre points de mesure dans un forage de 35 m a été implanté à environ 2,5 m du nu de l'ouvrage.

Il n'a pas mis en évidence de mouvements importants lors du forage des

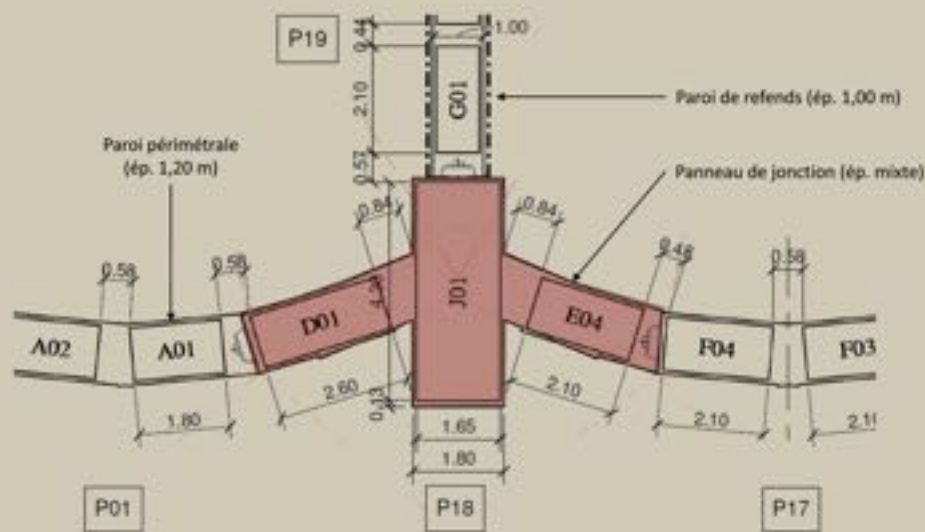
6- Travaux de parois moulées.
7- Vue de détail des panneaux de jonction.

6- Diaphragm wall works.
7- Detail view of the joining panels.

parois moulées et il sera utilisé lors des terrassements pour évaluer les tassements en profondeur.

L'impact du creusement en surface est, de plus, mesuré à l'aide d'un théodolite automatisé avec des cibles implantées sur la chaussée et plus de 350 prismes installés sur les voies du tramway. Le puits de l'OA P13 a par ailleurs fait l'objet d'une auscultation particulière

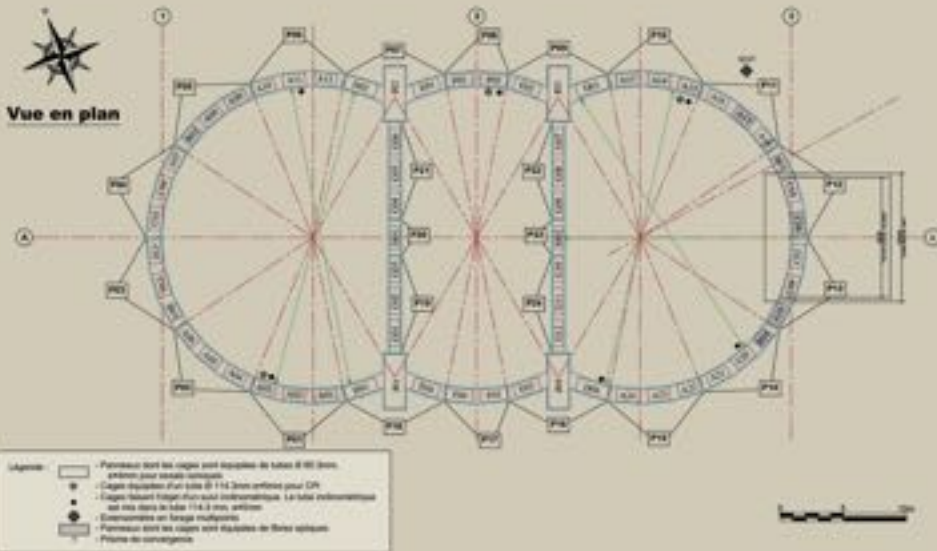
VUE DE DÉTAIL DES PANNEAUX DE JONCTION



7

© HORIZON

PLAN DES AUSCULTATIONS



© HORIZON 8

avec la mise en œuvre, dans le cadre d'un projet de recherche, de fibres optiques dans les panneaux A17, C06, A19 et B04.

L'objectif de cette instrumentation est d'étudier le comportement de l'intersection entre la paroi du puits et le tunnel au tunnelier. L'auscultation par fibres optiques noyées dans les structures permet une mesure de profils de déformation continus dans différentes directions. De manière à évaluer la diminution de rigidité cylindrique et le report de charges autour du percement, des fibres transversales ont été installées pour permettre la mesure de la déformation orthoradiale. En complément des mesures par inclinomètres,

des fibres verticales ont été mises en œuvre pour permettre la mesure de la flexion verticale.

À la date de la rédaction de l'article, les terrassements du puits de l'OA P13 démarrent et les mesures des différents dispositifs d'auscultation n'ont pas encore pu être comparées aux modèles.

8- Plan des auscultations.

8- Monitoring plan.

CONCLUSION

Après environ 6 mois de travail intense, avec notamment l'équipement des panneaux réalisés de nuit, les grues de parois moulées ont cédé la place aux engins de terrassement. Il faudra encore plusieurs mois d'excavation et de génie civil pour que le puits puisse être mis à disposition du tunnelier. Le puits OA P13 de l'île de Monsieur, du fait de sa géométrie, de ses dimensions et du contexte, est un ouvrage singulier. Cette caractéristique est commune à l'ensemble des ouvrages du tronçon T3A qui, bien que relativement court, présente des enjeux techniques majeurs. L'étroite collaboration entre le groupement d'entreprises, la maîtrise d'œuvre, l'assistant à maître d'ouvrage et la Société du Grand Paris, qui a déjà fait ses preuves sur ce premier ouvrage, se poursuit sur l'ensemble du T3A. □

LE CHANTIER EN CHIFFRES

PAROI MOULÉE (ep. 1,0 m ; 1,2 m et 1,8 m) : 11 400 m³

TERRASSEMENT : 38 100 m³

BÉTON DE GÉNIE CIVIL ET REMPLISSAGE : 10 000 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris

ASSISTANT À MAÎTRISE D'OUVRAGE : Artemis

MAÎTRE D'ŒUVRE : T3A Ingérop/Geos - Setec tpi (mandataire du T3)

COORDINATION SPS : Groupement Presents - Veritas

OCTA : Groupement Veritas - Apave

GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Horizon (Bouygues TP, Soletanche Bachy France, Bessac, Soletanche Bachy Tunnels)

ABSTRACT

STRUCTURE P13, A TBM LAUNCHING SHAFT ON LINE 15, IN THE HEART OF THE PROTECTED ILE DE MONSIEUR LOCATION

M. SABBAH, INGEROP - M. CAHN, GEOS INGENIEURS CONSEILS - B. GIACOMETTI ET M. FONTY, SOLETANCHE BACHY - P.-B. PASSOT, SOLETANCHE BACHY

The T3A project of Line 15 South includes 4,146 metres of tunnel excavated mainly in Campanian chalk. The TBM starting shaft, structure P13, located on Ile de Monsieur on the edge of the Seine River, is a trilobed structure terraced over a depth of 30 metres in the Campanian chalk, sheltered by diaphragm walls buried to 55 metres. The diaphragm walls required special attention for integration of the project into a protected site, control of panel verticality, and the execution of four joining panels of exceptional size (concreted volume of about 1,100 m³ per panel). Sizing of the diaphragm walls and calculation of forces in the staying transverse structures were conducted within a coefficient of soil reaction model and a finite element model. During earthworks, the structure will undergo intensive monitoring (inclinometers, extensometer, optical fibres). □

OA P13, UN POZO DE LANZAMIENTO DE TUNELADORA EN LA LÍNEA 15, EN PLENO CENTRO DEL ESPACIO PROTEGIDO DE LA ISLA DE MONSIEUR

M. SABBAH, INGEROP - M. CAHN, GEOS INGENIEURS CONSEILS - B. GIACOMETTI ET M. FONTY, SOLETANCHE BACHY - P.-B. PASSOT, SOLETANCHE BACHY

El proyecto T3A de la Línea 15 Sur presenta 4.146 m de túnel excavado principalmente en roca caliza campaniana. El pozo de salida de la tuneladora, el OA P13, situado en la isla de Monsieur, a orillas del Sena, es una construcción trilobada realizada a 30 m de profundidad en roca caliza campaniana, protegida por pantallas de hormigón fijadas a 55 m. Las pantallas de hormigón han requerido una especial atención en término de implantación de la obra en un espacio protegido, control de la verticalidad de los paneles y realización de 4 paneles de unión de dimensiones excepcionales (volumen de hormigón por panel de unos 1.100 m³). El dimensionamiento de las pantallas de hormigón y la determinación de los esfuerzos en las estructuras transversales ancladas se han llevado a cabo sobre la base de un modelo con coeficientes de reacción y un modelo con elementos acabados. Durante los movimientos de tierra, la obra será objeto de una auscultación reforzada (inclinómetros, extensómetro, fibras ópticas). □

MISE EN SÉCURITÉ DES TUNNELS DU BOULEVARD PÉRIPHÉRIQUE NORD DE LYON - RETOUR D'EXPÉRIENCE

AUTEURS : MICHEL MARTIN DIT SANDRE, DIRECTEUR DE PROJET DU GROUPEMENT CONCEPTEUR-CONSTRUCTEUR, RAZEL-BEC - BERTRAND BRALY, DIRECTEUR TRAVAUX GÉNIE CIVIL DU GROUPEMENT CONCEPTEUR-CONSTRUCTEUR, RAZEL-BEC - VINCENT ROBERT, DIRECTEUR DU GROUPEMENT DE MAÎTRISE D'ŒUVRE INTÉGRÉE, ARTELIA

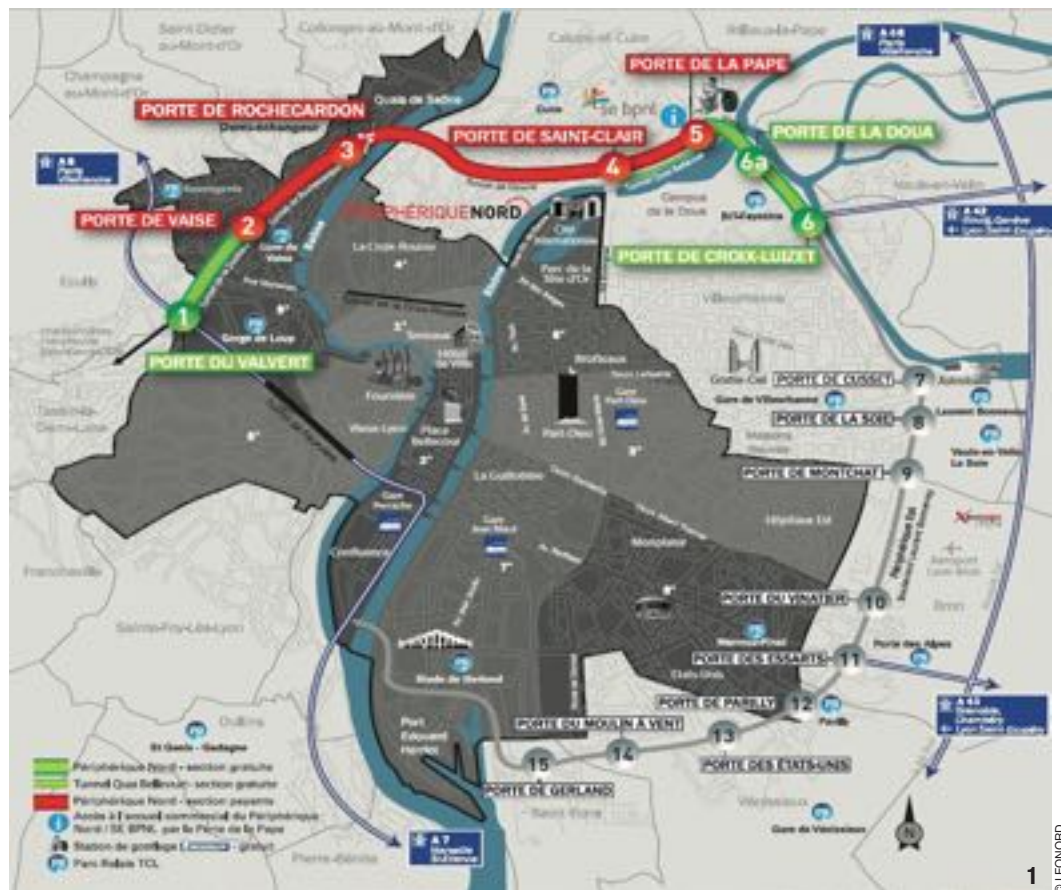
LA MISE EN SÉCURITÉ DES TUNNELS DU BPNL S'EST ACHEVÉE EN AVRIL 2018 AU TERME D'UN PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ INITIÉ PAR LA MÉTROPOLE DE LYON. RÉALISÉE SOUS CIRCULATION, ELLE A NÉCESSITÉ DE NOMBREUSES INNOVATIONS TECHNIQUES, LOGISTIQUES ET ORGANISATIONNELLES. PARMIS LES OPÉRATIONS REMARQUABLES DE CE PROJET, LA CONCEPTION ET LA POSE D'UNE GAINE D'AIR VICIÉ EN PLAFOND DU TUNNEL DE LA DUCHÈRE, RÉALISÉE DANS DES CONDITIONS D'EXPLOITATION TRÈS STRICTES.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE LE BOULEVARD PÉRIPHÉRIQUE NORD DE LYON

La Métropole de Lyon est propriétaire du Boulevard Périphérique Nord de Lyon (BPNL). Cet axe express joue un rôle essentiel pour la mobilité et le dynamisme de l'agglomération lyonnaise. Mis en service en 1997, le BPNL facilite la traversée Est-Ouest de l'agglomération en reliant l'autoroute A6 au périphérique Est. Contournant le centre-ville de Lyon par le nord, les extrémités de l'ouvrage se situent à l'ouest au niveau de l'échangeur de la porte du Valvert (Lyon 9^e) et à l'est, au niveau de l'échangeur de Croix-Luizet (Villemurbanne). D'une longueur de 10 km, le Périphérique Nord est composé de quatre tunnels, deux ouvrages d'art non courants et quatre échangeurs (figure 1).

LE PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ

Face à la complexité des travaux de mise aux nouvelles normes de sécurité à réaliser, la Métropole de Lyon a retenu et lancé une procédure de type Partenariat Public-Privé (P.P.P.). La société dédiée "Leonord" constituée des sociétés Fayat, Sanef, et Mirova représentant le fond d'investissement Fidepp2, a remporté le contrat de partenariat. Leonord (appelé "Partenaire") devient par là-même le maître d'ouvrage pour une durée de 20 ans. Suivant le principe des P.P.P., Leonord s'appuie sur ses co-contractants pour déclinier ses obligations contractuelles (figure 2) :



- Le Fidepp2 pour financer les travaux de mise aux normes qui doivent durer 4 ans ;
- La société SE BPNL, filiale de Sanef, pour exploiter l'ouvrage à péage pendant 20 ans ;

1- Synoptique du BPNL.

1- Block diagram of the 'BPNL' project.

- Le groupement d'entreprises Razel-Bec et Satelec, filiales du groupe Fayat, pour réaliser la Conception et la Réalisation des travaux de mise aux normes des tunnels du BPNL ;

→ La société Razel-Bec pour assurer le Gros Entretien Renouvellement (GER) du génie civil de l'ouvrage pendant 20 ans.

Au sein du Groupement Concepteur-Constructeur, la maîtrise d'œuvre intégrée a été confiée au groupement Artelia/Lombardi/Ferrand-Sigal avec l'organisation présentée en figure 3.

CONTEXTE ET PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE MISE EN SÉCURITÉ

Les tunnels du BPNL font l'objet de travaux importants de mise en sécurité, de

2- Organisation contractuelle du projet BPNL.
3- Organisation de la maîtrise d'œuvre intégrée.

2- Contractual organisation of the 'BPNL' project.
3- Organisation of integrated project management.

façon à se conformer à l'évolution de la réglementation suite à la catastrophe du tunnel du Mont-Blanc. Ces travaux sont complexes et délicats à réaliser. Ils sont réalisés en optimisant la disponibilité des ouvrages.

Une fermeture totale prolongée du BPNL sur plusieurs mois n'est pas envisageable, aussi, le contrat impose-t-il le cadre ci-dessous :

→ Réalisation des travaux de nuit en semaine sous fermeture totale de l'ensemble des ouvrages du BPNL avec une obligation de réouverture chaque matin des tunnels à

la circulation des usagers tout en garantissant un niveau de sécurité optimal.

→ Réalisation des travaux les plus délicats sous fermeture prolongée de l'ensemble des ouvrages du BPNL sur une période de 6 semaines pendant la période estivale 2016 et 2017. Ces 2 fermetures complètes des ouvrages sont nécessaires pour les travaux qui ne permettent pas de ré-ouvrir chaque matin les ouvrages dans le respect des Conditions Minimales d'Exploitations (CME).

OBJECTIFS DES TRAVAUX DE MISE EN SÉCURITÉ

Dans le cadre du périmètre des travaux, et dans l'objectif d'augmenter le niveau de sécurité des ouvrages et de robustesse des systèmes d'exploitation, le Partenaire a apporté aux ouvrages du BPNL les principales modifications suivantes :

- Amélioration de l'évacuation des usagers en réalisant 13 nouvelles communications entre tubes (galerie creusées entre les tubes existants) et en rendant accessibles aux Personnes à Mobilité Réduite certaines communications entre tubes existantes ;
- Amélioration très forte des systèmes d'évacuation des fumées en cas d'incendie des tunnels de la Duchère, de Rochedardon et de Caluire afin de protéger les usagers et les services de secours ;
- Augmentation du niveau de tenue au feu des structures existantes afin de résister à des incendies de grande ampleur ;
- Ajout et remplacement d'équipements attachés à la sécurité des ouvrages ;
- Ajout et rénovation des systèmes d'exploitation pour le Gestionnaire.

LE LIEN FORT ENTRE MAÎTRISE D'ŒUVRE INTÉGRÉE ET GROUPEMENT CONCEPTEUR-CONSTRUCTEUR

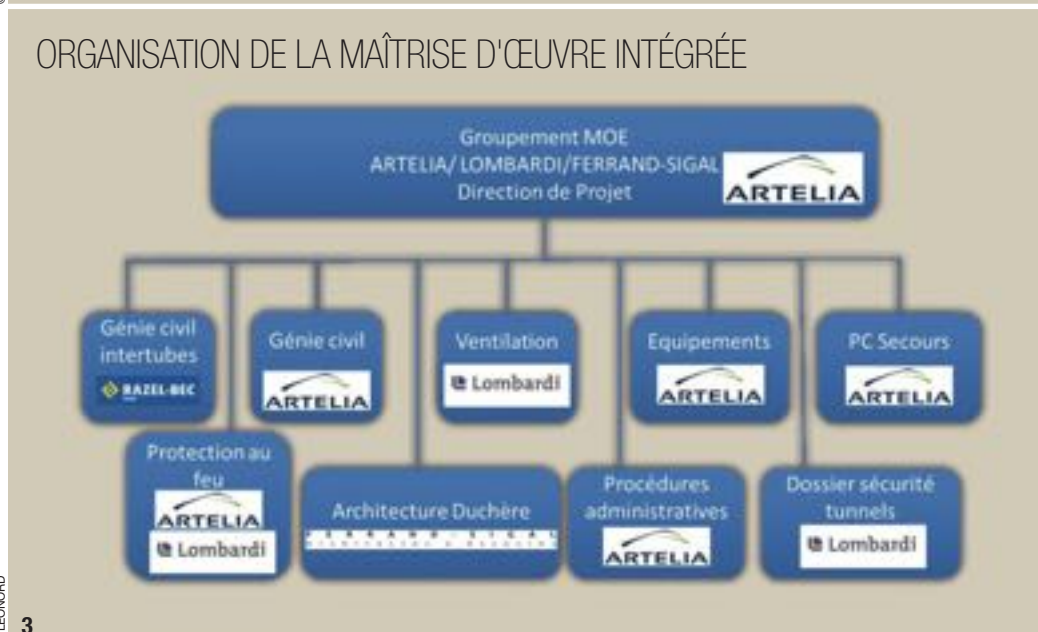
LES MISSIONS DE LA MAÎTRISE D'ŒUVRE INTÉGRÉE

Lors de la signature du contrat de partenariat, le groupement concepteur-constructeur, piloté par les équipes de Razel-Bec :

→ Dispose d'une conception de niveau avant-projet pour l'ensemble des travaux de mise en sécurité, élaborée en partenariat avec le groupement de maîtrise d'œuvre intégrée lors de la phase de remise de l'offre. ▷



© LEONORD
2



© LEONORD
3

→ Confié au groupement de maîtrise d'œuvre intégrée les missions suivantes :

- Les études de conception détaillée de niveau Projet pour une durée de 8 mois,
- Le contrôle externe des études d'exécution,
- Le contrôle externe des travaux,
- L'Assistance lors des Opérations de Réception,
- L'établissement et l'accompagnement des dossiers administratifs : Dossier Préliminaire de Sécurité (DPS), Dossier de Sécurité (DS), Dossier d'Exploitation Sous Chantier (DESC), PIS Travaux (PIS), porté à connaissance, etc.

LA PHASE PROJET

L'année 2015 a été principalement consacrée au développement des études de niveau Projet (PRO). La spécificité du partenariat a permis d'associer constructeurs et concepteurs pour développer des solutions techniques et méthodologiques en parfaite conformité avec les Programmes Fonctionnels des Besoins (cahier des charges listant les données d'entrée) et les engagements de performance du contrat de partenariat.

Les procédures administratives ont été rédigées par le groupement concepteur-constructeur pendant le développement du dossier PRO, et instruites au cours du second semestre 2015 afin d'obtenir les autorisations ad hoc avant le démarrage des travaux fixé au 2 jan-



© RAZEL-BEC

vier 2016. Ainsi la préparation du dossier préliminaire de sécurité et du plan d'intervention et de secours ont été conduites en parallèle de la conception détaillée sous le pilotage de Lombardi, partenaire d'Artelia. Ceci a permis de vérifier la compatibilité des travaux avec les conditions minimales d'exploitation.

LA PHASE TRAVAUX

À partir de la fin d'année 2015, la direction technique du groupement concepteur-constructeur a lancé les études d'exécution via les bureaux internes et/ou externes. Les équipes de maîtrise d'œuvre intégrée ont alors fait évoluer

leur positionnement vers le contrôle externe, le visa final étant délivré par le directeur technique du groupement concepteur-constructeur. Cette transition a été accompagnée en premier lieu par des ateliers thématiques permettant aux équipes de conception de présenter leur projet aux bureaux d'études qui prenaient le relais. Les principaux enjeux et contraintes/interfaces ont pu être partagés en identifiant précisément les attendus spécifiques en termes de niveau d'études d'exécution.

Entre 2016 et 2017 les études d'exécution et la phase opérationnelle de travaux ont été portées par le groupement concepteur-constructeur. Durant cette période, le rôle principal dévolu au directeur de la maîtrise d'œuvre intégrée était d'assurer au directeur technique du groupement concepteur-constructeur que les travaux en cours respectent en tout point les engagements de performances fixés au contrat et dans le dossier Projet.

Outre le contrôle documentaire (document d'exécution, rapport de contrôle interne ou externe, ...), cet objectif a mobilisé une équipe pluridisciplinaire de surveillants de travaux pour lever les points d'arrêt, superviser les démarrages de prestations sensibles, effectuer les recettes en usines et sur sites des équipements mais aussi accompagner en réel partenariat les directions de travaux, permettant ainsi d'assurer la traçabilité de la construction de l'ouvrage et de l'ensemble du processus qualité (figure 4).

4- Contrôle externe de pose des plaques de protection au feu par tablette.

5- 21h : Entrée du train travaux.

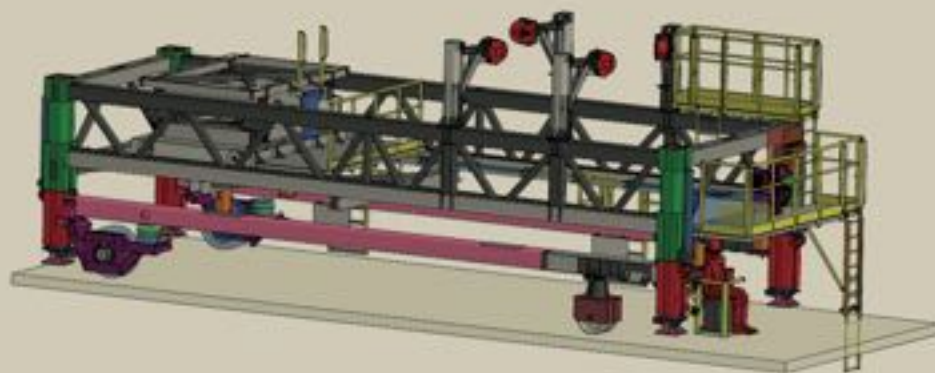
4- External inspection of the installation of fire guard plates by tablet.

5- 9.00 pm: Entry of the work train.



© NYS - AIR TECH PHOTO

PORTIQUE DE POSE DE LA GAINÉ DE VENTILATION DU TUNNEL DE LA DUCHÈRE



© RAZEL-BEC

6

LES OPÉRATIONS DE RÉCEPTION

Entre octobre 2017 et avril 2018, les opérations de réception se sont déroulées en deux phases sous le pilotage du groupement de maîtrise d'œuvre intégrée :

- Des opérations préalables à la réception formalisées par un procès-verbal (PV) et une liste de réserves entre le groupement concepteur-constructeur, l'exploitant et le partenaire Leonord ;
- Des audits de la personne publique et la signature du PV d'achèvement des travaux regroupant à fin avril 2018 l'ensemble des réserves restant à lever.

Après trois ans de collaboration, il ressort principalement que les clés de la réussite du partenariat concepteur-concepteur réside dans :

6- Portique de pose de la gaine de ventilation du tunnel de la Duchère.

7- Pièce préfabriquée équipée de ses dispositifs de sécurité.

6- Gantry crane for installing the Duchère tunnel ventilation duct.

7- Prefabricated part fitted with its safety systems.

- L'échange et l'anticipation dans la recherche permanente de solutions ;
- La continuité, la formalisation et la traçabilité dans les missions et responsabilités de chacun ;
- L'implication forte et totale des équipes dans un climat de partage et de transparence.

UNE ORGANISATION LOGISTIQUE MILLIMÉTRÉE

Les tunnels étant ouverts à la circulation le jour, c'est donc la nuit en semaine que se déroulent exclusivement les travaux sur le créneau 21h-06h. La plage de travaux fixe de 9 heures ne tolère aucun dépassement d'horaire. Tout doit donc être minuté et orchestré afin de permettre le passage du premier véhicule dès 06h du matin.

Ainsi, outre la technicité du projet, le chantier fait face à des contraintes d'accès aux tunnels et de déplacement des engins. Cela impose une amenée et un repli quotidiens de tout le matériel, via notamment des porte-chars et des remorques pour laisser la chaussée libre de tous matériels chaque matin. À 21h, les tunnels sont disponibles pour le chantier (figure 5). Afin de pénétrer en bon ordre en tunnel, chaque atelier dispose d'un numéro de passage en fonction de son positionnement sur les 13 km de tunnels. À 4h30, l'heure de sortie est sonnée. Nettoyage, inspection des voies et déballisage débutent. À 6h, le premier usager pénètre.

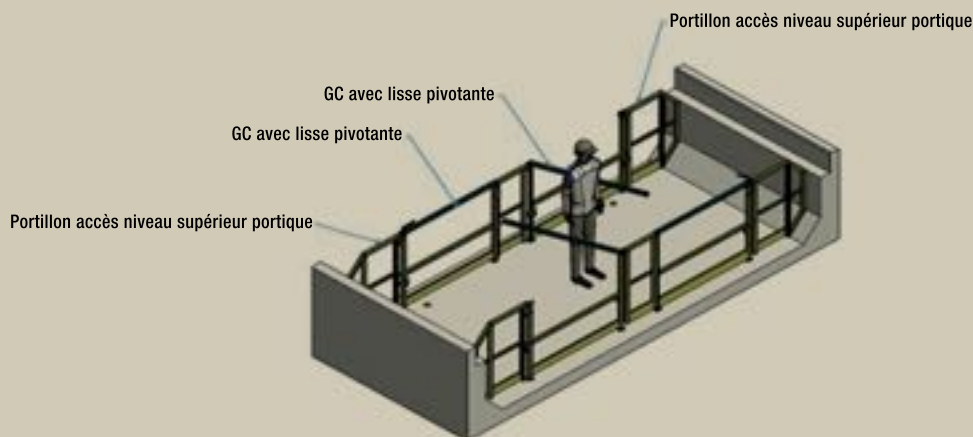
LES TRAVAUX DE POSE DE LA GAINÉ D'AIR VICIÉ DU TUNNEL DE DUCHÈRE

Une des opérations importante du projet BPNL consiste à équiper le tunnel de la Duchère d'une gaine qui permettra l'évacuation des fumées en cas d'incendie. La gaine est composée d'éléments unitaires en forme de U en béton armé préfabriqués de 5,70 m de longueur, à fixer au plafond du tunnel sur une distance de deux fois 900 m. Chacune des 733 pièces à poser pèse environ 10 t.

CAHIER DES CHARGES

Le tunnel de la Duchère est un ouvrage bi-tube monodirectionnel à trois voies de 1 000 m de longueur ; il voit transiter plus de 80 000 véhicules par jour. La plage de travail allouée dans ce tunnel se déroule uniquement sous fermeture nocturne, dans le créneau 21h-06h, avec une réouverture impérative aux usagers tous les matins. Il est impossible de réduire le gabarit routier, ainsi aucun matériel ne peut rester en tunnel en journée. Le tunnel de la Duchère est également soumis la nuit à une importante co-activité avec des travaux souterrains (creusement d'intertubes) et de pose d'équipements (accélérateurs d'air, câblages, ...), ce qui impose de laisser en permanence une voie de passage libre de 3 m de largeur au droit du chantier. Cette voie est également dédiée aux services de secours en cas de besoin d'intervention. La manutention et la pose de ces pièces préfabriquées auraient pu être envisagées par des moyens standards type élévateurs ou grues. Cependant, la somme des contraintes de ce projet - avec en priorité la réouverture aux usagers chaque matin - a conduit à imaginer un outil spécifique dédié répondant à un cahier des charges précis qui s'articule autour de quatre axes : ▷

PIÈCE PRÉFABRIQUÉE ÉQUIPÉE DE SES DISPOSITIFS DE SÉCURITÉ



© RAZEL-BEC

7

- Sécuriser le cycle de pose pour ne pas compromettre la réouverture du tunnel aux usagers chaque matin ;
- Manutentionner plusieurs pièces sans déplacement de l'outil, ce qui est un réel gain de temps ;
- Laisser en permanence une voie de passage libre dans le tunnel (pour les secours ou les autres ateliers du chantier) ;
- Adapter le design de l'outil pour tenir compte des contraintes de gabarit et équipements existants en tunnel.

Cet outil a nécessité huit mois de travail par les ingénieurs du projet, depuis sa conception jusqu'à sa livraison sur le chantier, avant que la pose du premier élément n'engage concrètement ces travaux, en octobre 2016, après une phase de tests et d'essais.

CONCEPTION DÉTAILLÉE

L'outil est un portique métallique marqué CE, qui se déplace de façon autonome à l'aide de moteurs hydrauliques. Il intègre groupe électrogène, projecteurs et racks de stockage de petits

L'ORGANISATION LOGISTIQUE DES TRAVAUX DU BPNL EN QUELQUES CHIFFRES

- 409 nuits de fermeture
- 5 400 commandes passées
- 9 600 demandes d'interventions (DI) traitées et validées par le gestionnaire (soit en moyenne 80 DI par semaine, sur 120 semaines)
- 120 véhicules en tunnel par nuit en moyenne
- 200 véhicules en tunnel par nuit en pointe
- 150 personnes en tunnel en moyenne chaque nuit
- 300 personnes en tunnel en période de pointe

matériels. Le poste de travail se met en place et se replie quotidiennement très rapidement, ce qui fait gagner à l'équipe de précieuses minutes de production.

Une fois en place sur sa zone de travail, le semi-remorque qui achemine les pièces préfabriquées recule à l'intérieur de l'outil.

Les pièces de 5,70 m de longueur sont stockées parallèlement aux voies de circulation et ne bloquent jamais le pas-

sage des autres ateliers qui travaillent dans le tunnel.

Chaque pièce est soulevée par l'outil et déposée sur la table de pose qui assure la rotation des pièces de 90° en hauteur, au-dessus des voies de circulation (figure 7). La table de pose est équipée de multiples vérins qui permettent de régler et de positionner précisément chaque pièce dans toutes les directions. La table de pose soutient les pièces par le dessous, ce qui limite les conflits

8- Sabot métallique assurant la jonction entre la tige fixée en voûte et la pièce préfabriquée.

9- Sabots métalliques sur une pièce en attente de pose.

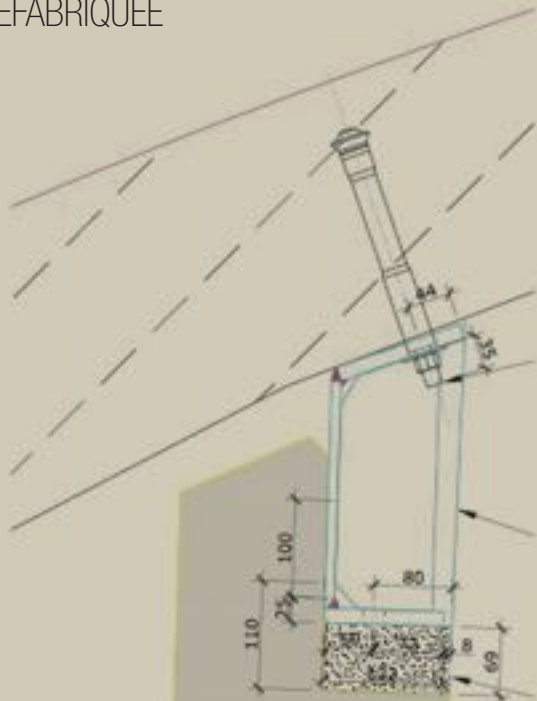
10- Sabot métallique fixé en voûte (jeu de pose vertical).

8- Metal shoe joining the rod fastened to the roof and the pre-fabricated part.

9- Metal shoes on a part pending installation.

10- Metal shoe fastened to the roof (vertical placing rig).

SABOT MÉTALLIQUE ASSURANT LA JONCTION ENTRE LA TIGE FIXÉE EN VOÛTE ET LA PIÈCE PRÉFABRIQUÉE



8



9



10

© FAZEL-BEC

© FAZEL-BEC



11



12



13



14

11- Portique en fonctionnement - Déplacement de l'outil jusqu'à la zone de pose.

12- Portique en fonctionnement - Livraison des pièces.

13- Portique en fonctionnement - Soulèvement et rotation d'une pièce pour sa pose.

14- Portique en fonctionnement - Fixation d'une pièce à la voûte du tunnel.

11- Gantry crane in operation - Moving the tool up to the installation area.

12- Gantry crane in operation - Parts' delivery.

13- Gantry crane in operation - Raising and rotating a part for installation.

14- Gantry crane in operation - Fastening a part to the tunnel roof.

avec les équipements du tunnel, tels que des panneaux de signalisation, ventilateurs, flèches lumineuses, câbles et capteurs, et qui sont par ailleurs nécessaires à l'exploitation en journée. Tous les mouvements de l'outil sont opérés, à l'aide d'une radiocommande, par un opérateur positionné en hauteur dans une zone sécurisée.

Les zones de travail et de cheminement sont clairement identifiées sur l'outil afin de sécuriser au maximum tous les compagnons qui travaillent sur cet atelier. Enfin, en cas de panne de l'outil, un transport d'évacuation d'urgence est prévu afin de garantir la réouverture de l'ouvrage aux automo-

bilistes le matin. L'outil a alors la possibilité, tout en respectant le gabarit du tunnel, de se reposer et d'être évacué sur une remorque de camion qui opère en temps normal l'approvisionnement des pièces.

LA FIXATION DE LA GAINÉ

Le tunnel de la Duchère est une voûte en béton non ferraillée de 30 cm d'épaisseur. Les pièces en béton sont fixées dans la voûte à l'aide de chevilles mécaniques (figure 8). Un système fixation mécanique a été préféré à un scellement chimique qui perd sa résistance en cas de forte élévation de température. La liaison entre la cheville fixée

en voûte et la pièce béton est assurée par un élément métallique appelé sabot (figure 9). Ce sabot est liaisonné à la pièce préfabriquée à l'aide de tiges filetées ce qui permet un réglage en hauteur en fonction des aspérités du tunnel existant. En fin de pose, les sabots métalliques sont enduits d'un flocage coupe-feu.

Les chevilles mécaniques sont posées directement au travers de l'alésage en partie supérieure du sabot. Cette conception mécanique présente une très bonne résistance aux efforts de cisaillement induits notamment par la dilatation de la pièce en béton en cas de contact avec les fumées chaudes. De façon sécuritaire, le nombre de fixations a été doublé, chaque pièce est donc maintenue par quatre chevilles de chaque côté, là où le dimensionnement en justifie deux (figure 10).

La mise en place des chevilles de fixation en voûte à l'avancement ne permet pas d'anticiper les éventuels aléas ou impossibilité de mise en place, par exemple des fixations, en cas de vides dans le béton de la voûte. Pour garantir une réouverture systématique du tunnel aux usagers chaque matin en toute sécurité, un système complémentaire de fixation provisoire a été installé. ▷

LA MAÎTRISE D'ŒUVRE INTÉGRÉE DU BPNL EN QUELQUES CHIFFRES

- 300 interventions de nuit
- 750 constats de travaux
- 35 collaborateurs mobilisés en 3 ans
- Plus de 3 000 jours*hommes en 3 ans
- 3 000 documents contrôlés lors de l'exécution des travaux
- La reprographie de l'équivalent de 150 000 feuilles et 500 classeurs durant la phase DOE

Il s'agit de chevilles provisoires mises en place au préalable en voûte et qui maintiennent la pièce à l'aide d'élingues métalliques.

Une fois les chevilles définitives posées et testées, les élingues provisoires de sécurité sont enlevées.

LES TRAVAUX DE POSE

Les équipes ont réussi à poser en toute sécurité huit pièces chaque nuit, tout en amenant et repliant l'ensemble du matériel quotidiennement (figures 11 à 14).

La réouverture du tunnel aux usagers n'a jamais été retardée et les autres ateliers de travail n'ont pas été gênés la nuit par l'emprise au sol de l'atelier de pose de la gaine (figure 15).

CONCLUSION

Le projet de mise en sécurité des tunnels du BPNL a été exceptionnel de par son cadre contractuel, technique et organisationnel.

Il s'agissait pour le concepteur-constructeur de traduire une exigence régle-



15

© INVS - ARTTECHPHOTO

mentaire afin de concevoir avec la Métropole, l'Exploitant, les Services de l'État, et les pompiers, des équipements électromécaniques, des systèmes commandes, des travaux de voiries, des travaux de génie-civil, des travaux de souterrains, des travaux d'injection de sol, ... Le repli systématique de chaque poste de production en fin de nuit était un défi permanent et un véritable enjeu !

15- Tunnel de Duchère avec gaine d'air vicié achevée.

15- Duchère tunnel with completed foul air duct.

La conception et les procédures administratives ont tenu Razel-Bec en haleine pendant plus d'une année. Le partenariat étroit entre la maîtrise d'œuvre intégrée et le groupement concepteur - constructeur piloté par les équipes de Razel-Bec a permis de préparer dans le moindre détail les travaux et de livrer l'ouvrage en temps et en heure, laissant la place aux équipes d'exploitation et de maintenance. □

LE PROJET EN QUELQUES CHIFFRES

DÉLAI DES ÉTUDES ET TRAVAUX DE MISE EN SÉCURITÉ DES TUNNELS DU BPNL : janvier 2015 - avril 2018 : 39 mois

DURÉE DE LA PHASE PROJET (PRO) : 8 mois

DURÉE DES TRAVAUX DE MISE EN SÉCURITÉ, Y COMPRIS ESSAIS ET VSR : 27 mois

COÛT DES TRAVAUX DE MISE EN SÉCURITÉ DES TUNNELS : 100 M€

EFFECTIFS MOYENS SUR LA DURÉE DE L'OPÉRATION :

- Cellule Encadrement et Production : 70 personnes
- Maîtrise d'œuvre intégrée : 35 personnes
- Personnels de chantier : 150 personnes

PRINCIPAUX INTERVENANTS

PROCÉDURE : Partenariat Public Privé (P.P.P)

MAÎTRISE D'OUVRAGE (MOA) : Leonord

PERSONNE PUBLIQUE : Métropole de Lyon

GROUPEMENT CONCEPTEUR-CONSTRUCTEUR EN CHARGE DE LA CONCEPTION ET DE LA RÉALISATION DES TRAVAUX DE MISE EN SÉCURITÉ DES TUNNELS DU BPNL : Razel-Bec – Satelec

GROUPEMENT DE MAÎTRISE D'ŒUVRE INTÉGRÉE : Artelia / Lombardi / Architecte Ferrand-Sigal

GESTIONNAIRE DE L'OUVRAGE : SE BPNL (filiale de Sanef)

ABSTRACT

IMPROVING THE SAFETY OF THE TUNNELS ON THE LYON NORTHERN RING ROAD - POST-PROJECT ANALYSIS

MICHEL MARTIN DIT SANDRE, RAZEL-BEC - BERTRAND BRALY, RAZEL-BEC - VINCENT ROBERT, ARTELIA

Works to improve the safety of the tunnels on the Lyon northern ring road ('BPNL' project) were carried out from 2015 to 2018 under a public-private partnership initiated by the Lyon Metropolis. These works form part of the retrofitting work on all French tunnels following the Mont Blanc tunnel disaster. The designer-constructor consortium in charge of the project had to allow for severe technical and logistic constraints, performing the safety improvement works at night and returning the tunnels to traffic each morning. We focus on the operations to install a foul air duct on the ceiling of one of the tunnels, the Duchère tunnel. An installation tool was specially designed for safe handling and installation of the 733 prefabricated concrete elements of unit weight 10 tonnes forming the 1800 metres of ducting. □

PROTECCIÓN DE LOS TÚNELES DE LA RONDA PERIFÉRICA NORTE DE LYÓN - CONCLUSIONES

MICHEL MARTIN DIT SANDRE, RAZEL-BEC - BERTRAND BRALY, RAZEL-BEC - VINCENT ROBERT, ARTELIA

Las obras de protección de los túneles de la ronda periférica norte de Lyon se han llevado a cabo de 2015 a 2018, de la mano de una asociación público-privada impulsada por la metrópolis de Lyon. Estas obras se inscriben en el marco de la adecuación a las normas del conjunto de los túneles franceses tras la catástrofe del túnel del Mont Blanc. El consorcio diseñador-constructores responsable de la operación ha tenido que integrar fuertes restricciones técnicas y logísticas dado que las obras de seguridad se realizan abriendo los túneles a la circulación cada mañana. Se ha hecho especial hincapié en las operaciones de instalación de un conducto de aire de escape en el techo de uno de los túneles, el túnel de la Duchère: se ha creado una herramienta de instalación específica para permitir la manipulación y la instalación con total seguridad de los 733 elementos de hormigón prefabricados de 10 t cada uno que forman los 1.800 m de conducto. □



C'est le métier qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

www.btp-banque.fr



UN TUNNEL SOUS LE CANAL DE SUEZ : LE TUNNEL ROUTIER D'ISMAILIA

AUTEURS : MARTIN DOLL, MANAGER DE PROJET, ARCADIS - OLIVIER GIVET, DIRECTEUR TECHNIQUE, ARCADIS - RÉMI HAVY, CHEF DE PROJET, ARCADIS - EVERT SONKE, DIRECTEUR DE PROJET, ARCADIS

LE TUNNEL ROUTIER D'ISMAILIA FAIT PARTIE D'UN GRAND PROJET ÉGYPTIEN DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE ET INDUSTRIEL DE LA RÉGION DU CANAL DE SUEZ, ACCOMPAGNANT L'AUGMENTATION RÉCENTE DE LA CAPACITÉ DU CANAL. CET OUVRAGE EXCEPTIONNEL FRANCHISSANT LES DEUX BRANCHES DU CANAL À PLUS DE 50 m DE PROFONDEUR EST RÉALISÉ DANS LE CADRE D'UN CONTRAT DE CONCEPTION-CONSTRUCTION EN SUIVANT UN CALENDRIER TRÈS SERRÉ.

CONTEXTE GÉNÉRAL

Le tunnel routier d'Ismaïlia est un tunnel bitube réalisé au tunnelier, de 4800 m de longueur, franchissant le Canal de Suez, récemment doublé à cet endroit, au nord de la ville d'Ismaïlia (figure 3). Il fait partie d'un projet de développement de la zone du Canal prioritaire pour l'Égypte, visant à dynamiser la croissance économique de la région. D'autres tunnels sont en cours de construction à Port-Saïd et à Suez ou en projet. Cet ensemble d'ouvrages permettra de relier la péninsule du Sinaï plus étroitement au pays en améliorant les connexions routières actuellement assurées par un unique tunnel (Ahmed Hamdi Tunnel à Suez) et quelques traversiers.

TRACÉ

Le tracé en plan du tunnel épouse un arc de cercle de 13600 m de rayon permettant de se tenir à distance suffisante d'une canalisation repérée en surface dans la partie centrale du tracé (figure 4).

Un profil en long en W (deux points bas) a été adopté pour limiter la profondeur maximale de l'ouvrage : un seul point bas aurait conduit à approfondir le tunnel de 5 m environ. La déclivité des branches principales est de 3,3% et celle des branches comprises entre les points bas est de 1%.

Actuellement le fond du Canal est à 24 m sous le niveau moyen de la mer (MSL - 24) et la voûte du tunnel a été calée à 16 m sous ce niveau (MSL - 40) en prévision d'une future



1- Dispositif de congélation d'un rameau.
2- Vue de l'intérieur d'un des deux tunnels.

1- Ground freezing device for a connecting gallery.
2- Interior view of one of the two tunnels.

augmentation de gabarit du Canal. Un futur approfondissement de 3 m (fond à MSL - 27) laisserait l'ouvrage à l'abri de tout risque de flottaïson et à l'abri de l'impact d'un vaisseau qui viendrait à s'échouer en ce point (il a été calculé que la contrainte qu'exercerait un navire du type Suezmax échoué au fond du Canal était de l'ordre de 150 à 200 kPa). Côté ouest du Canal, le tracé recoupe par 35 m de profondeur une voie fer-

rée puis, par 35 à 55 m de profondeur, une zone résidentielle constituée d'immeubles type R+5.

GÉOLOGIE

Le profil en long géologique est caractérisé par la présence continue de sables moyennement denses vers la surface à très denses en profondeur, dans les horizons où s'inscrit le tunnel. Dans ces sables s'intercalent des lentilles d'argiles raides à dures pouvant être très plastiques. La plus épaisse de ces lentilles a été rencontrée côté Ouest au démarrage des creusements ; son franchissement a nécessité d'apporter quelques adaptations aux outils d'abattage (figures 5 et 6).

Quelques bancs rocheux peu épais ont également été reconnus.

On a observé que le niveau de la nappe baignant les sables était plus élevé que le niveau du canal de Suez, soumis à l'influence conjointe des marées en Méditerranée (0,7 m d'amplitude maximale à Port Saïd) et en Mer Rouge (2 m d'amplitude maximale à Suez).

La surélévation du niveau de la nappe côté Ouest du Canal atteint 4 à 5 m. Elle est principalement causée par les fuites des canaux d'irrigation de la région, alimentés par le Nil.

Côté Est la nappe a été identifiée à un niveau beaucoup plus élevé, jusqu'à 17 m au-dessus du niveau de la mer. La zone contient en effet les produits de dragage de la deuxième branche du canal de Suez récemment réalisée et ces matériaux étaient en cours d'es-



La salinité de l'eau souterraine en profondeur est proche de celle de l'eau de mer (maximum mesuré à 42 g/l à comparer à 37 g/l pour l'eau de mer).

SECTION TRANSVERSALE

Le diamètre intérieur des tubes est de 11,4 m et le diamètre excavé de 13,02 m. La distance entre les deux tubes est constante et égale à un diamètre excavé sur toute la longueur de l'ouvrage soit un entraxe 2-D = 26 m (figure 7). Cette distance est un compromis entre une interaction structurelle acceptable entre les revêtements des tubes et des rameaux de longueur réduite pour la mise en œuvre efficace du traitement par congélation.

La section transversale du tunnel se compose d'un plan de roulement à deux voies de circulation, limité par des barrières en béton coulées contre le revêtement. Il n'y a pas de trottoir surélevé par rapport à la chaussée.

La galerie située en partie inférieure de la section sous le plan de roulement a une double fonction de galerie technique abritant tous les réseaux nécessaires au fonctionnement du tunnel et de galerie de sécurité. On y accède depuis l'espace de circulation par des escaliers précédés d'un sas et disposés tous les 250 m (figure 8).

Des bassins de récupération des eaux de drainage du tunnel, des liquides accidentellement répandus sur la chaussée, des eaux d'extinction d'incendie et les chambres de pompage associées sont disposés en chacun des points bas à côté de la galerie.

LES TUNNELIERS

Deux tunneliers Herrenknecht à pression de boue ont été utilisés.

Le premier tunnelier a été ralenti dans les premières centaines de mètres du creusement par le franchissement de la couche argilo-limoneuse repérée

3- Localisation du projet.

4- Tracé du tunnel.

3- Project location.

4- Tunnel alignment.

entre les cotes MSL -3 et MSL -18, qui a nécessité de nombreuses interventions pour nettoyer la tête de coupe. Une modification des outils de coupe a finalement été nécessaire pour réduire le colmatage et augmenter la productivité. Malgré ces arrêts, ce tunnelier a creusé les 4830 m de tube entre juin 2016 et décembre 2017 avec un avancement moyen de 270 m/mois (mise en cadence et arrêts pour maintenance compris). Un record d'avancement jour-

nalier pour un tunnelier à pression de boue de grand diamètre a été atteint à cette occasion : 34 m. La meilleure performance hebdomadaire a été de 206 m d'avancement.

Le deuxième tunnelier a réalisé le percement en 16 mois soit un avancement moyen de 300 m/mois.

PUITS DE DÉPART

L'ouvrage de départ des tunneliers (figure 9), en tête Ouest du tunnel, est conçu comme une boîte rectangulaire en parois moulées d'une centaine de mètres de longueur et de 45 m de largeur. Il est dimensionné pour pouvoir accueillir les tunneliers et leurs trains suiveurs complets. Les 25 premiers mètres à partir du tympan d'attaque comprennent une forte dalle en béton armé reposant sur des barrettes. Cette dalle supporte le poids des tunneliers et transfère une partie des efforts de poussée des tunneliers aux parois

TRACÉ DU TUNNEL



moulées longitudinales. L'autre partie des efforts de poussée est transmise à la dalle butonnante supérieure via les bâtis de poussée.

Le "sas" devant assurer la pénétration des tunneliers dans le terrain avec la pression de confinement requise est constitué d'une virole de démarrage comportant 3 joints caoutchouc et un joint Bullflex® ainsi que d'un massif en béton à faible résistance ($5 \text{ MPa} < f_c < 10 \text{ MPa}$) réalisé par assemblage avec interpénétration de panneaux primaires et secondaires excavés avec l'outil utilisé pour les parois (trench cutter).

5- Profil en long géologique.

6- Principales caractéristiques géotechniques des sables et des argiles.

5- Longitudinal geological profile.

6- Main geotechnical properties of the sands and clays.

La longueur de ce massif dépasse de 4 m la longueur du bouclier de sorte que l'entrée en terre de la roue s'effectue après que deux anneaux ont été scellés.

PUITS D'ARRIVÉE

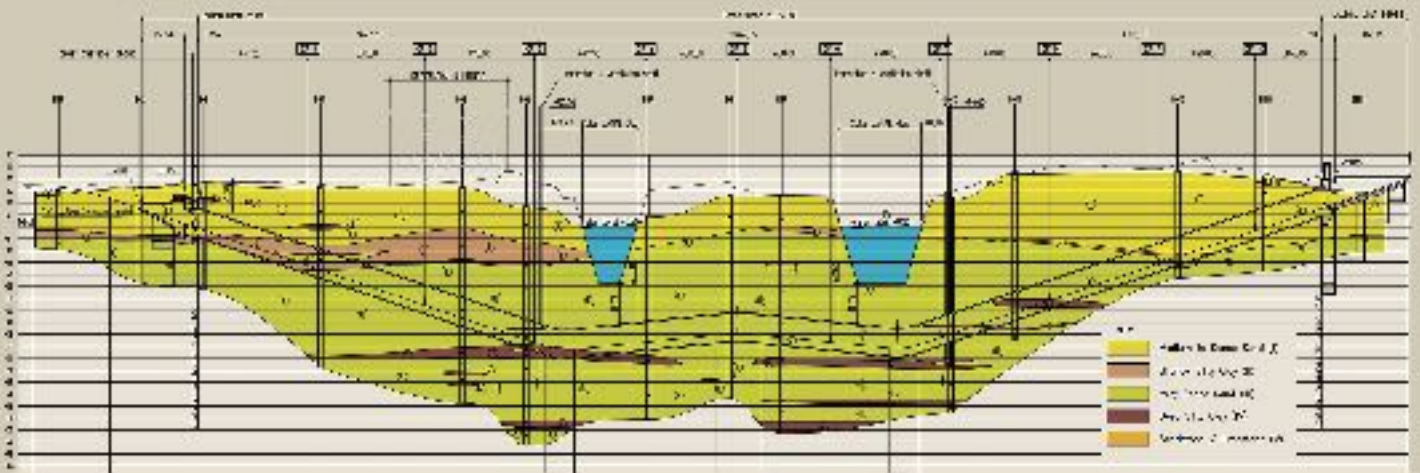
Avant de déboucher dans le puits d'arrivée, les tunneliers traversent une enceinte étanche en paroi au coulis de ciment scellée dans une couche d'argile profonde. Le puits est noyé avec un niveau d'eau correspondant au niveau de la nappe ce qui permet le percement (figure 10).

LES PUIITS D'INSPECTION DES TUNNELIERS

En raison des fortes sollicitations des organes des tunneliers (13 m de diamètre excavé, 70 m de hauteur d'eau), le maître d'ouvrage et les constructeurs ont souhaité que les machines fassent l'objet d'une inspection et d'une maintenance juste avant et juste après leurs parcours sous le canal, soit au tiers et aux deux tiers environ de la longueur totale creusée. En ces points la profondeur et la charge d'eau sont maximales et des interventions hyperbares auraient été très longues et délicates. ▷

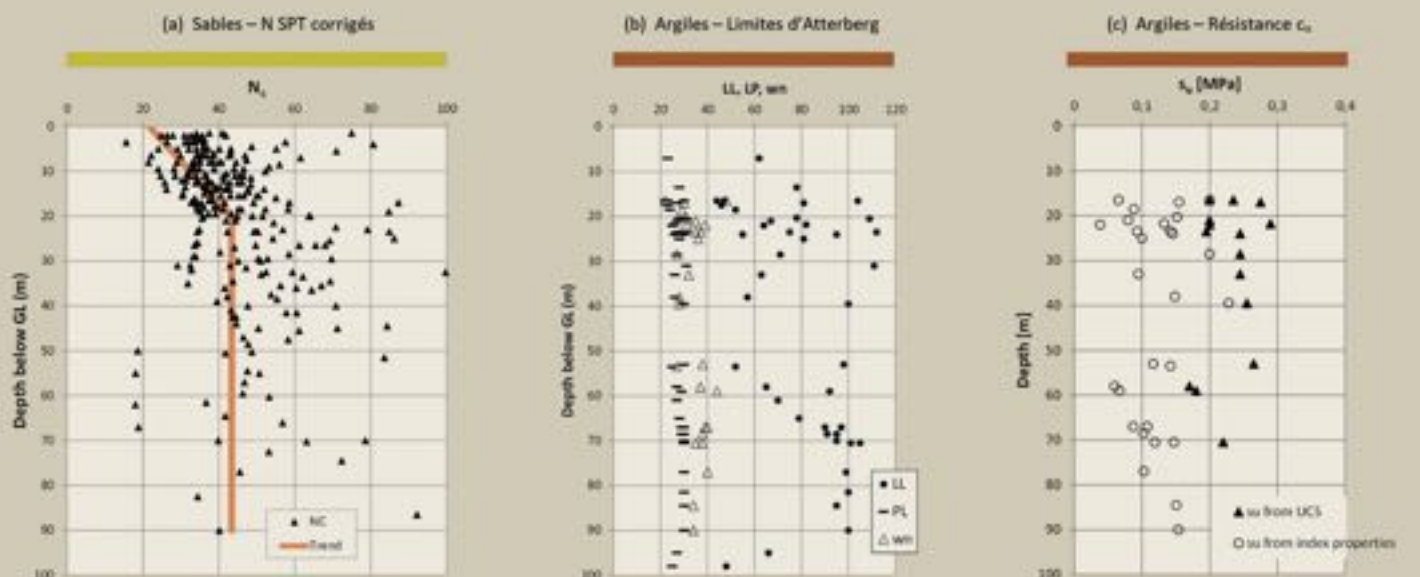
© ARCADIS & CONSULTING ENGINEERING OFFICE DR ABDELSALAM SALEM

PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE



5

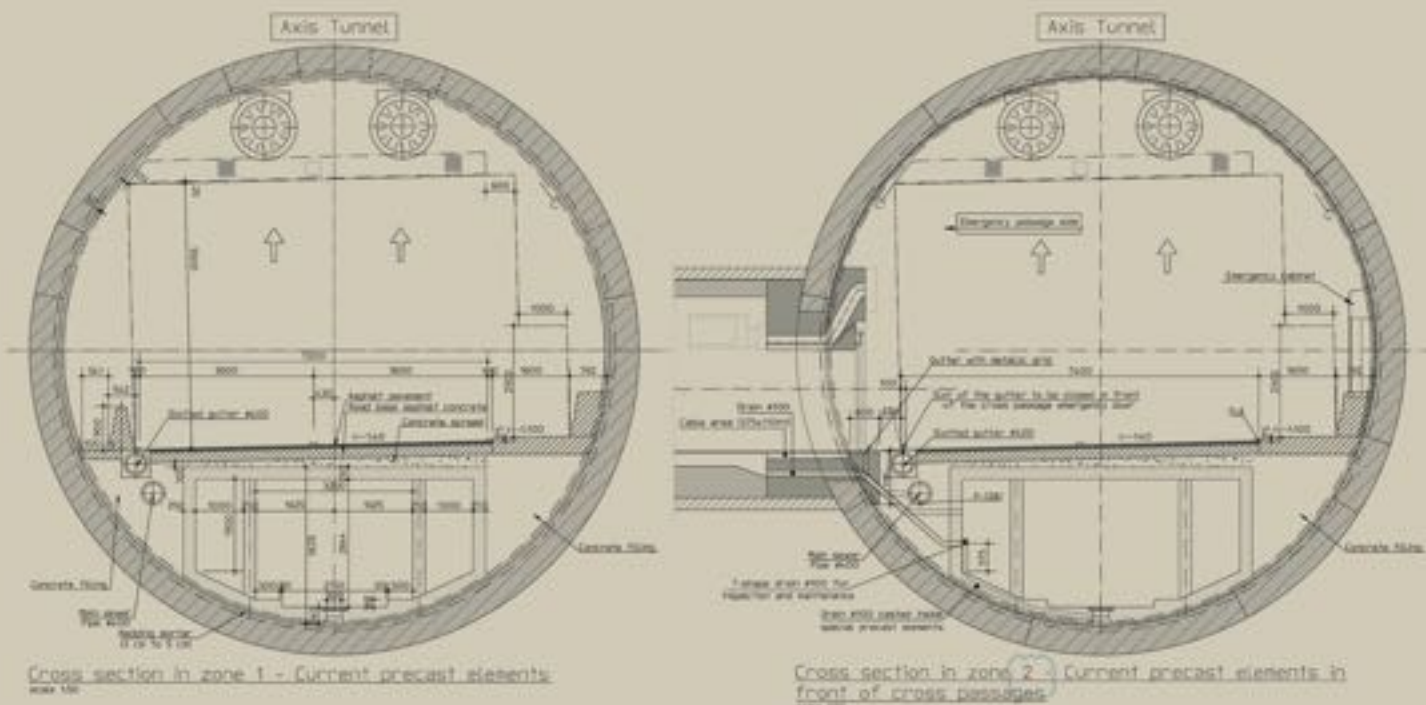
PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES DES SABLES ET DES ARGILES



6

© ARCADIS

COUPES TYPES DU TUNNEL



7

© ARCADIS

Le parti a donc été pris de réaliser des puits dans lesquels ces interventions ont pu être faites à la pression atmosphérique. Les quatre puits sont identiques (à la profondeur près qui varie de quelques mètres de l'un à l'autre, 70 m en moyenne) et présentent une section circulaire de 23 m de diamètre intérieur afin d'accueillir les tunneliers

et de procéder aux opérations en toute sécurité (figures 11 et 12).

Dans ces puits seront ensuite installés des conduits destinés à la ventilation du tunnel.

Pour assurer la stabilité du fond de fouille de tels puits creusés à ciel ouvert, il aurait fallu compter sur la présence d'une épaisse couche d'argile (on n'en

7- Coupes types du tunnel.

8- Issues de secours.

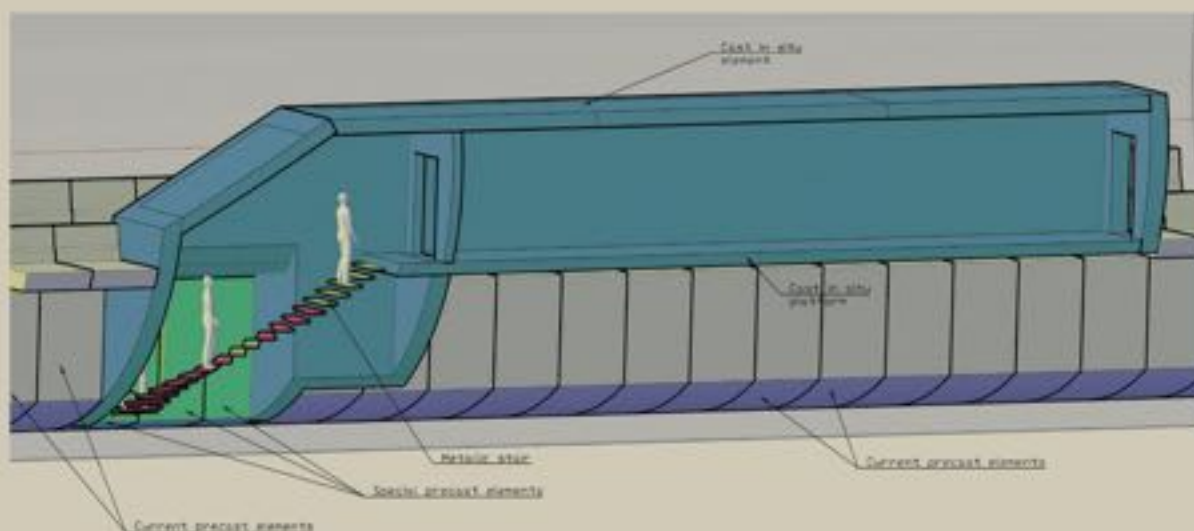
7- Typical tunnel cross sections.

8- Emergency exits.

a pas repéré) ou créer un bouchon artificiel par injection à très grande profondeur - au-delà de 140 m - hors d'atteinte des technologies actuelles. D'autres options ont été retenues et les puits ont donc été réalisés selon le passage suivant :

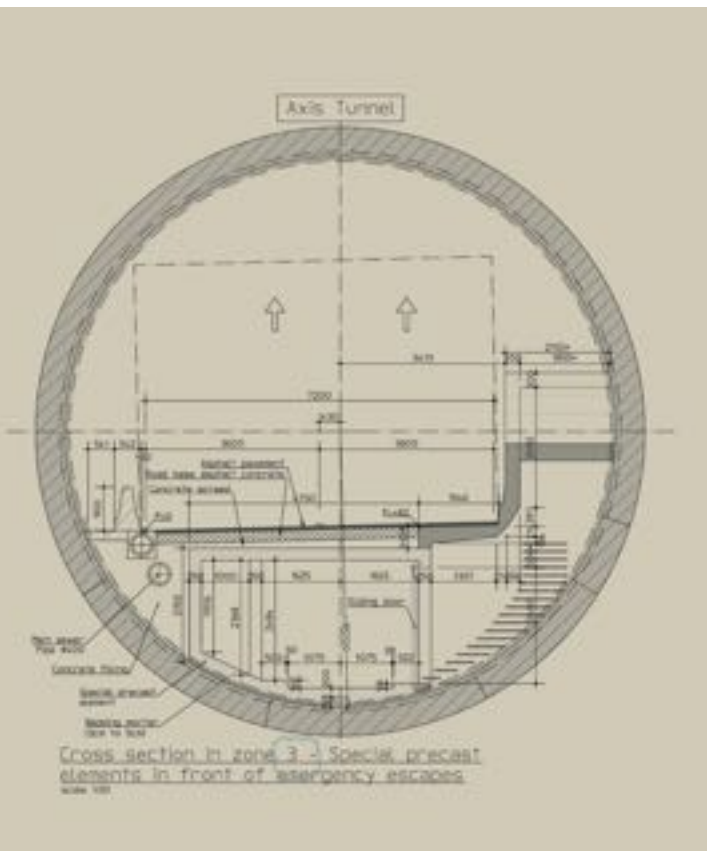
1- Réalisation de l'enceinte en paroi moulée. Les panneaux de 1,50 m

ISSUES DE SECOURS



8

© ARCADIS



x 2,80 m sont réalisés à la fraise (trench cutter de Bauer) avec "remordu" des panneaux pairs dans les panneaux impairs. Les panneaux sont faiblement armés ; au droit du tunnel en entrée dans le puits les panneaux sont armés de barres en fibre de verre mais en sortie ils ne sont pas armés pour ne pas prendre

9- Ouvrage de lancement du tunnelier.

9- TBM launching structure.

le risque de devoir dégager de la roue de coupe et du circuit de marirage des restes de barres après la sortie du puits. Les parois s'arrêtent à quelques mètres sous le niveau du fond de fouille.

- 2- Excavation en maintenant le niveau d'eau dans le puits quelques mètres au-dessus du niveau de la nappe de façon à éviter tout risque d'entraînement de sable vers la fouille.
- 3- Nettoyage des parois au jet d'eau haute pression pour garantir l'adhérence du bouchon en béton aux parois (figure 13).
- 4- Nettoyage du fond de fouille (laitance) et coulage d'un béton de propreté.
- 5- Installation d'un châssis métallique support de tuyaux pour injections d'étanchéité ultérieures et mise en œuvre d'une couche de graviers.
- 6- Coulage d'une dalle béton C25 de 4 m d'épaisseur puis du bouchon en sable-ciment $f_c = 5^{10}$ MPa d'accueil du tunnelier.
- 7- Injection de la couche de gravier pour parfaire l'étanchéité au contact paroi-bouchon.
- 8- Remblaiement du puits jusqu'au niveau intermédiaire assurant l'équilibre du bouchon en phase de réalisation des puits de ventilation (avec un bouchon allégé du volume du tunnel et la vidange du puits) ; ce remblai sableux comporte une couche de gravier à la base pour faciliter son drainage lors du pompage pour évacuation de l'eau lors des phases ultérieures de construction.

Toutes ces opérations ont été faites sous eau (niveau d'eau à quelques mètres au-dessus du niveau de la nappe régnant dans le terrain).

La pénétration des tunneliers s'est faite en scellant les anneaux de voussoirs posés dans le puits au mortier actif afin de résister au gradient de pression d'eau entre l'extérieur du puits (jusqu'à 70 m de hauteur d'eau en radier) et l'intérieur à la pression atmosphérique.

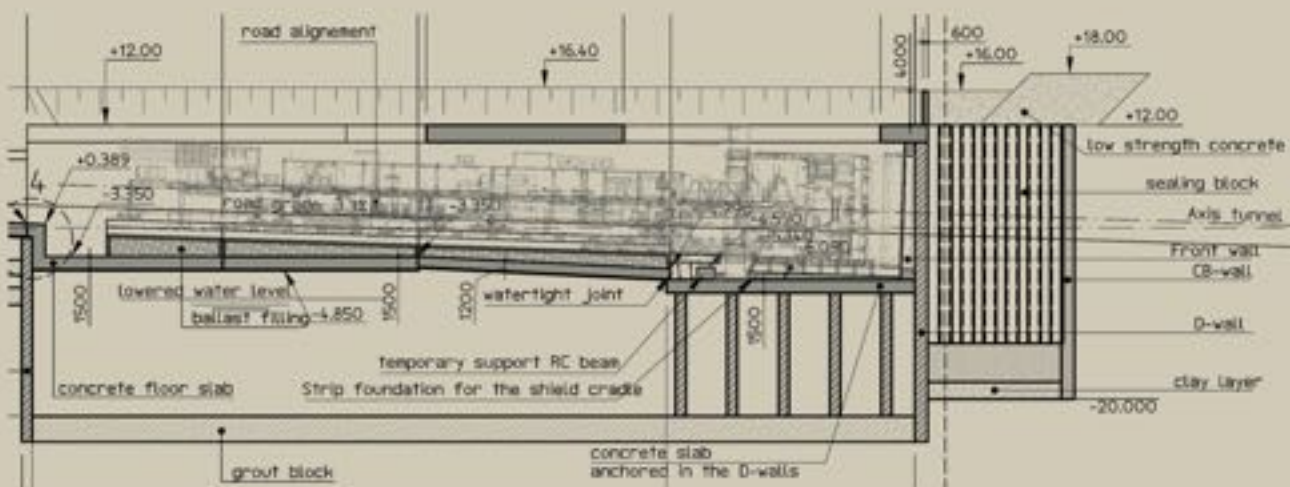
Ces scellements ont été renforcés par injections depuis les tunnels, puis testés par forages de drainage avant abaissement de la pression de confinement jusqu'à la pression atmosphérique et inspection des machines.

La conception des puits de maintenance s'est appuyée sur l'utilisation de modèles aux éléments finis Plaxis 2D axisymétriques et 3D pour évaluer les efforts dans les parois moulées et les contraintes dans le bouchon aux différents stades de pénétration du tunnelier dans celui-ci. Il a été tenu compte de la déviation maximale des panneaux de parois qui s'est avérée être très faible.

LES PUIITS DE VENTILATION

Les puits de ventilation sont réalisés en deux phases à partir du niveau intermédiaire de remblaiement des puits de maintenance. Avant démarrage des travaux des puits de ventilation, ce remblai a été densifié par vibroflottation puis mis hors d'eau à partir de 2 ou 3 puits de pompage (pompes installées en partie supérieure du bouchon, sous la couche de graviers). ▷

OUVRAGE DE LANCEMENT DU TUNNELIER



La partie inférieure est réalisée par havage sur toute la hauteur du remblai sableux d'un soutènement constitué d'anneaux de voussoirs en béton armé assemblés en tête des puits (figure 14). Le havage est arrêté au toit du bouchon en béton et l'excavation dans le bouchon est poursuivie jusqu'au tunnel par des moyens traditionnels (brise roche) les parois étant peu ou pas soutenues. La partie supérieure est réalisée par assemblage des mêmes anneaux en remontant et remblaiement à l'avancement.

Ce soutènement est doublé par un revêtement définitif en béton coulé en place maintenant un complexe d'étanchéité présent sur toute la hauteur des puits de ventilation.

La jonction puits-tunnel (figure 15) est réalisée de façon telle que la connexion soit assurée en pratiquant des ouvertures de dimensions réduites dans le revêtement avant ouverture complète



10 © ECAF

10- Arrivée du tunnelier 1.
11- Puits de maintenance des tunneliers et puits de ventilation.

10- Arrival of TBM 1.
11- TBM maintenance shaft and ventilation shaft.

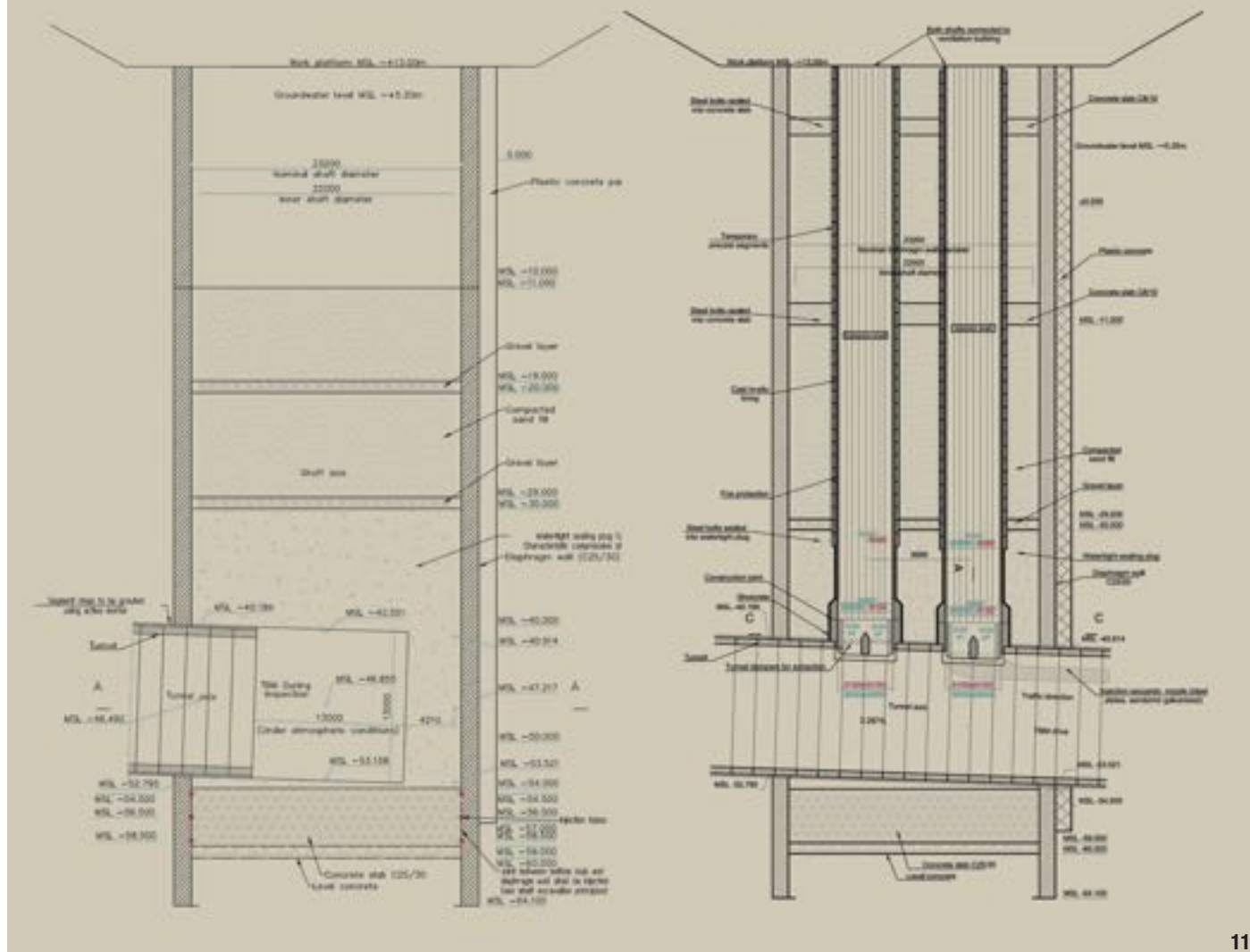
des anneaux concernés et renforcement par un buton en béton armé transversal pour la reprise des efforts à long terme (rétablissement de la pression d'eau en extrados des structures de revêtement).

LE REVÊTEMENT DU TUNNEL

Le revêtement du tunnel est constitué d'anneaux droite-gauche à 9 voussoirs pleins (6 voussoirs courants, deux voussoirs de contre-clé et un voussoir de clé). La longueur des anneaux est

de 2 m. Le diamètre intérieur est de 11,40 m et l'épaisseur est de 0,60 m. L'assemblage des voussoirs entre eux est assuré par des tirefonds traversant chacune des 4 faces, des barres de guidage aux joints longitudinaux et des

PUITS DE MAINTENANCE DES TUNNELIERS ET Puits DE VENTILATION





© ARCADIS

12



13

12- Soutèment en parois moulées des puits de maintenance des tunneliers.

13- Préparation du bétonnage sous eau du bouchon des puits de maintenance.

14- Puits de ventilation construits dans les puits de maintenance.

12- Diaphragm-wall retaining structure for TBM maintenance shafts.

13- Preparation for underwater concreting of the maintenance shaft plug.

14- Ventilation shafts built in the maintenance shafts.



© ARCADIS

14

cônes de cisaillement aux joints circon-férentiels.

Les voussoirs sont produits dans une usine de préfabrication dédiée installée sur le site en tête Ouest. La préfabrication se fait à postes fixes. Une solution classique de renforcement du béton par cages d'armatures en acier a été retenue. La composition du béton a été mise au point pour satisfaire aux exigences de durabilité et de résistance au feu. La résistance à la pénétration des ions chlorures sur la durée de vie de 120 ans est obtenue grâce à un béton de classe C40/50 élaboré avec un ciment CEM III-A à 60% de laitier (470 kg/m³) et de la fumée de silice (40 kg/m³), l'enrobage des aciers à l'extrados étant de 60 mm.

Pour satisfaire aux exigences de résistance au feu d'un incendie et limiter l'écaillage sous la sollicitation de référence de la courbe RWS pendant deux 2 h, le béton contient 2 kg/m³ de fibres de polypropylène (18 µm/6 mm).

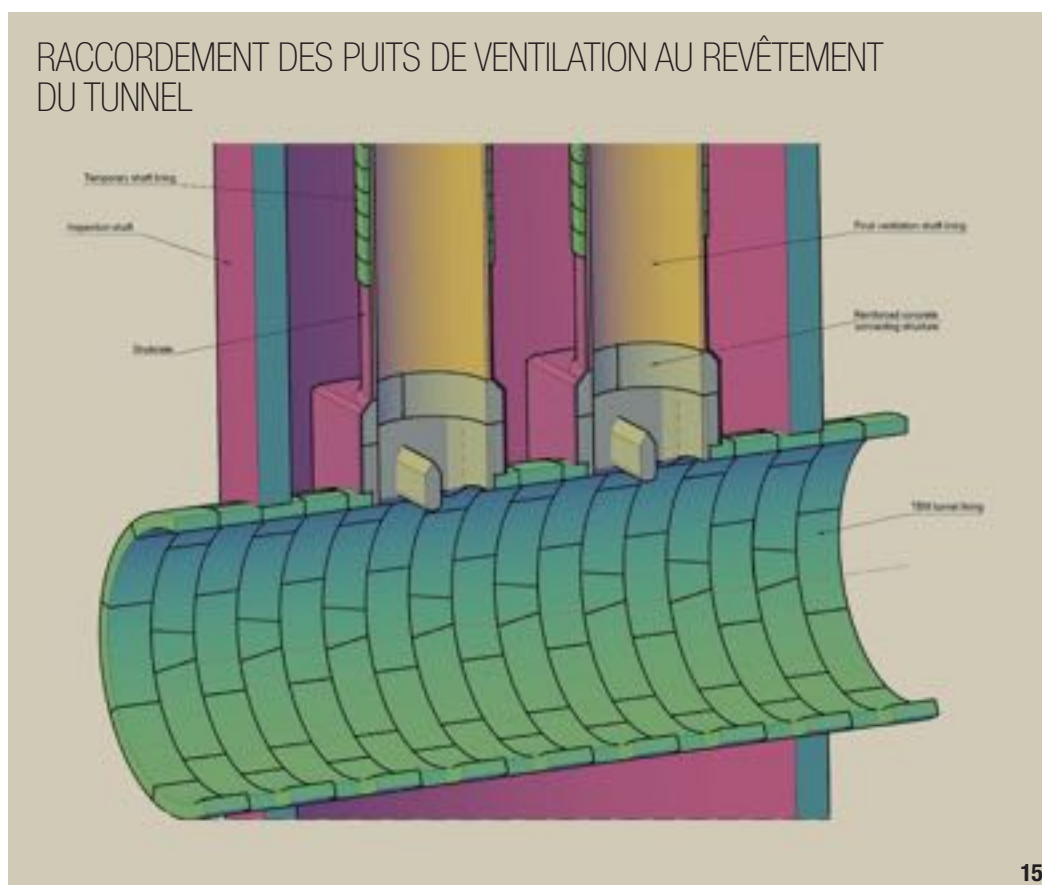
La résistance au feu de voussoirs directement issus de la production et préalablement équipés de thermocouples a été testée sur l'installation Vulcain du Cstb à Marne-la-Vallée (figure 16). Le four Vulcain peut accueillir des échantillons de très grande dimensions (7 m par 9 m) et dispose de brûleurs d'une puissance totale de 13,5 MW. ▷

En plus des essais effectués sur des voussoirs entiers, plusieurs essais ont été effectués sur des couples de demi-voussoirs afin de tester la résistance des joints longitudinaux qui sont des singularités concentrant les contraintes circonférentielles et en conséquence, des densités d'armatures élevées (figure 17).

Les contraintes de compression dans l'intrados sont l'un des principaux paramètres influençant le risque d'écaillage. Les voussoirs ont été testés en reproduisant au laboratoire l'état de contraintes le plus défavorable estimé le long du tunnel par une combinaison de charge horizontale et verticale appliquées avec des excentricités adéquates.

Des jauges de contrainte installées à l'intrados du voussoir ont permis de s'assurer que le chargement défini initialement reproduisait de façon satisfaisante l'état de contraintes souhaité. La mise sous contrainte des échantillons, particulièrement des couples de demi-voussoirs qui forment un mécanisme à deux blocs, est une étape délicate de l'essai puisqu'elle nécessite d'augmenter simultanément les charges horizontales et verticales de façon que le joint reste toujours entièrement comprimé.

L'état de contrainte souhaité étant atteint, le chargement est maintenu pendant toute la durée de l'essai qui dure 4 h : courbe RWS pendant 2 heures avec pic de température à 1350°C puis décroissance linéaire à 20°C pendant 2 heures.



15

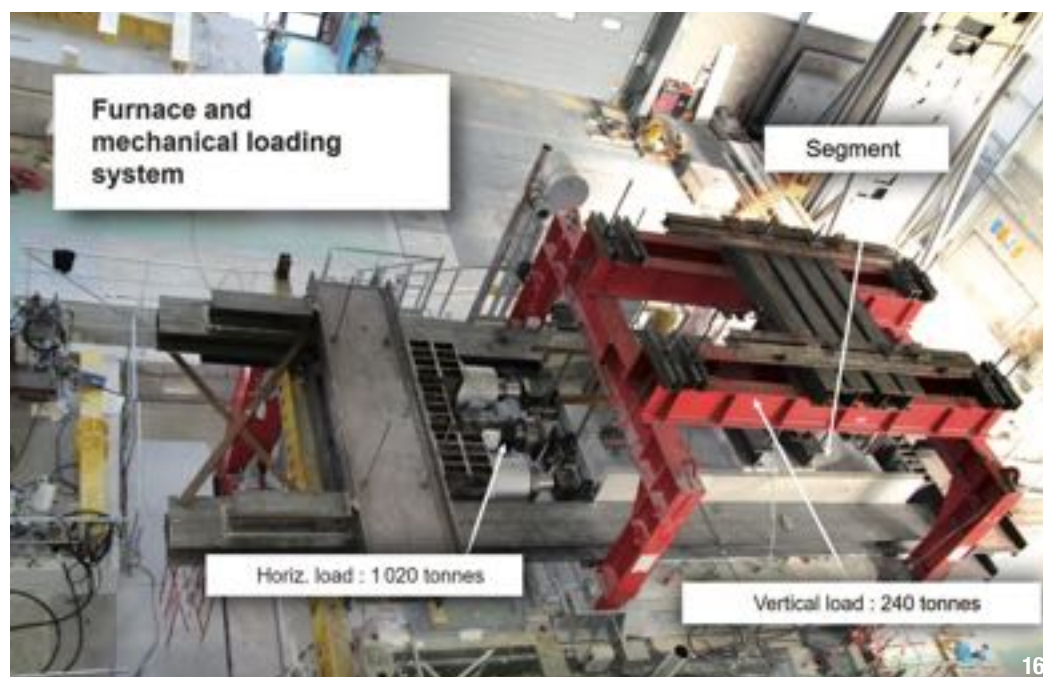
© ARCADIS

RAMEAUX INTERTUBES

Les 4 rameaux intertubes ont été construits à l'abri d'un anneau de terrain préalablement congelé à la saumure (figure 1). Leur forme générale est circulaire avec un diamètre d'excavation de 5 m et un diamètre intérieur fini de 3,80 m. Le soutènement provisoire

de 25 cm d'épaisseur est constitué de cintres HEB et de béton projeté et le revêtement définitif d'un anneau de béton de 35 cm d'épaisseur coulé en place. Les dimensions des ouvertures pratiquées dans le revêtement du tunnel ont été optimisées et axées sur un joint circonférentiel pour ne découper aucun

anneau complet et affecter le moins possible la résistance structurelle du revêtement en voussoirs. Les cadres d'extrémités définitifs prennent largement en sandwich les voussoirs impactés et une partie des voussoirs des anneaux adjacents et assurent une grande robustesse aux connexions tunnels-rameaux.



15- Raccordement des puits de ventilation au revêtement du tunnel.

16- Dispositif d'essai au feu des voussoirs du CSTB (four Vulcain).

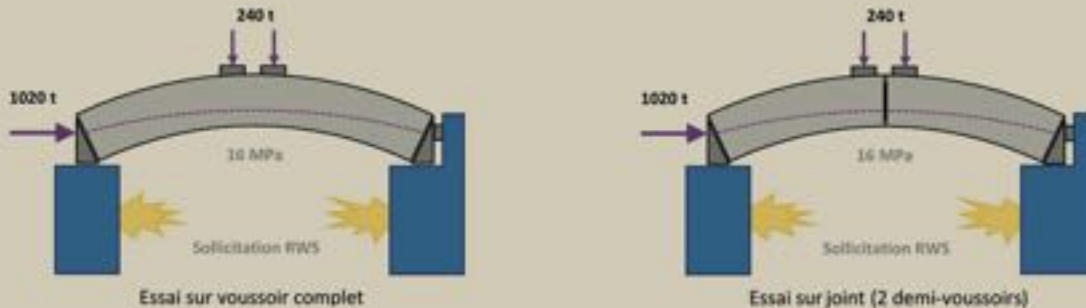
15- Joining ventilation shafts to the tunnel lining.

16- Segment fire test apparatus at building research centre CSTB (Vulcain furnace).

16

© CSTB

ESSAIS AU FEU D'UN VOUSOIR COMPLET ET D'UN COUPLE DE DEMI-VOUSOIRS



© ARCADIS

17

LES RAMPES D'ACCÈS

Les structures des rampes d'accès aux têtes Est et Ouest sont similaires, le contexte étant analogue (sables, nappe peu profonde). Il s'agit pour les sections les plus profondes de cadres en béton et pour les sections les moins profondes de structures ouvertes en U.

Ces structures définitives ont été construites dans des tranchées soutenues par des parois moulées provisoires dont les plus hautes sont ancrées par des tirants. L'imperméabilisation du fond de fouille par injection a dû être conduite en l'absence d'horizons argileux proches.

La stabilité au soulèvement hydraulique est assurée par le poids propre des structures, éventuellement complété par lestage : remblai de couverture pour les cadres, béton de ballast pour les parties en U.

CONCLUSION

Moins de trois ans se sont écoulés entre les premières esquisses du projet et le percement des deux tubes du tunnel routier d'Ismailia. Mener à bien la

17- Essais au feu d'un voussoir complet et d'un couple de demi-voussoirs.

17- Fire testing of a complete segment and a pair of half-segments.

réalisation dans ces délais n'était possible que grâce à une étroite collaboration entre le client, les constructeurs, le contrôleur et le concepteur, permettant des prises de décision efficaces. Une part importante des travaux (ouvrages de lancement et de réception des tunneliers et leur puits de maintenance) a été réalisée alors que le projet de l'ouvrage final continuait d'être élaboré.

D'une façon générale, des solutions techniques robustes ont été choisies, celles-ci étaient peu susceptibles de causer des retards. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

TUNNELS : deux tubes de 4827 m et 4835 m ; diamètre excavé 13,02 m ; diamètre intrados 11,40 m ; anneaux D-G 1+2+6 de 2 m de longueur et de 0,60 m d'épaisseur ; 4 rameaux intertubes.

PUITS DE MAINTENANCE DES TUNNELIERS : diamètre intérieur 23 m ; profondeur 67 à 74 m ; parois de 1,50 m ; volume des bouchons en béton d'accueil des TBM : 12500 m³.

PUITS DE VENTILATION : deux puits (un puits d'injection d'air frais et un puits d'extraction d'air vicié) de 5,00 m de diamètre intérieur construits à l'intérieur des puits de maintenance.

OUVRAGES DE TÊTE : tranchées couvertes puis tranchées ouvertes de 36,60 m de largeur intérieure et de 240 m (côté ouest) et 320 m (côté est) de longueur.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ministry of Defense - Engineering Authority of Armed Forces

CONSTRUCTEUR : Consortium Concord - Petrojet

GROUPEMENT D'ENTREPRISES EN CHARGE DE LA CONSTRUCTION DES TUBES : Ismailia Tunnels Joint-Venture

TUNNELIERS : Herrenknecht

CONTRÔLEUR : Groupement CDM Smith - Arab Consulting Engineers

INGÉNIERIE : Arcadis

ABSTRACT

A TUNNEL UNDER THE SUEZ CANAL: THE ISMAILIA ROAD TUNNEL

MARTIN DOLL, ARCADIS - OLIVIER GIVET, ARCADIS - RÉMI HAVY, ARCADIS - EVERT SONKE, ARCADIS

The Ismailia road tunnel is a double-tube tunnel passing under the Suez Canal, recently doubled at this location, north of the city of Ismailia. It is part of a canal area development project of highest priority for Egypt, aiming to stimulate the region's economic growth. Other tunnels are undergoing construction at Port Said and Suez, or are on the drawing board. There are several remarkable aspects to the tunnel and its construction: insertion in sand under more than 60 metres depth of water, more than 1200 metres of tunnel driven under the two canal branches, daily record of 34 metres progress for a large-diameter slurry shield TBM, and an inspection shaft for large TBMs. □

UN TÚNEL BAJO EL CANAL DE SUEZ: EL TÚNEL VIARIO DE ISMAILIA

MARTIN DOLL, ARCADIS - OLIVIER GIVET, ARCADIS - RÉMI HAVY, ARCADIS - EVERT SONKE, ARCADIS

El túnel viario de Ismailia es un bitubo que cruza el canal de Suez, recientemente duplicado en ese lugar, al norte de la ciudad de Ismailia. Forma parte de un proyecto de desarrollo de la zona del canal prioritaria para Egipto, cuyo objetivo es dinamizar el crecimiento económico de la región. Se están construyendo otros túneles en Port-Saïd y Suez, y hay otros en proyecto. El túnel y su realización presentan varios aspectos excepcionales: inserción en la arena bajo más de 60 m de altura de agua, más de 1.200 m de túnel perforados bajo dos secciones de canal, récord de avance diario de 34 m para un túnel de gran diámetro a presión de lodo, pozos de inspección de los TBM de grandes dimensiones. □



1
© PHOTOTHÈQUE TISSEO

EXTENSION DES STATIONS COURTES DE LA LIGNE A DU MÉTRO DE TOULOUSE

AUTEURS : AGNÈS MARCON, RESPONSABLE DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL, ARCADIS - ANNE-LAURE BRAZIER, CHEF DE PROJET, MOAD, TISSEO INGENIERIE - DOMINIQUE DZIK, DIRECTEUR DE PROJET, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

DEPUIS LES MISES EN SERVICE DES 2 LIGNES DU MÉTRO DE TOULOUSE EN 1993 ET 2007, LE SUCCÈS DE CE MOYEN DE TRANSPORT N'A CESSÉ DE CROÎTRE, NÉCESSITANT UNE AUGMENTATION DE SA CAPACITÉ EN DOUBLANT LA LONGUEUR DES RAMES DE LA LIGNE A. POUR CELA, DE NOMBREUSES INSTALLATIONS ET OUVRAGES DE GÉNIE-CIVIL DOIVENT ÊTRE ADAPTÉS POUR PERMETTRE LA CIRCULATION DE RAMES DE 52 m (4 VOITURES) AUX HEURES LES PLUS CHARGÉES.

CONTEXTE GÉNÉRAL DES TRAVAUX

Les travaux d'extension de trois stations dites "courtes souterraines" de la Ligne A du métro de Toulouse (figures 2 et 3) ont pour objectif de permettre l'allongement des quais existants qui pourront accueillir à fin 2019 des rames d'une longueur de 52 m, contre 26 m actuellement, dans le but d'accroître la capacité de la ligne. Une présentation de la phase conception de ce projet a

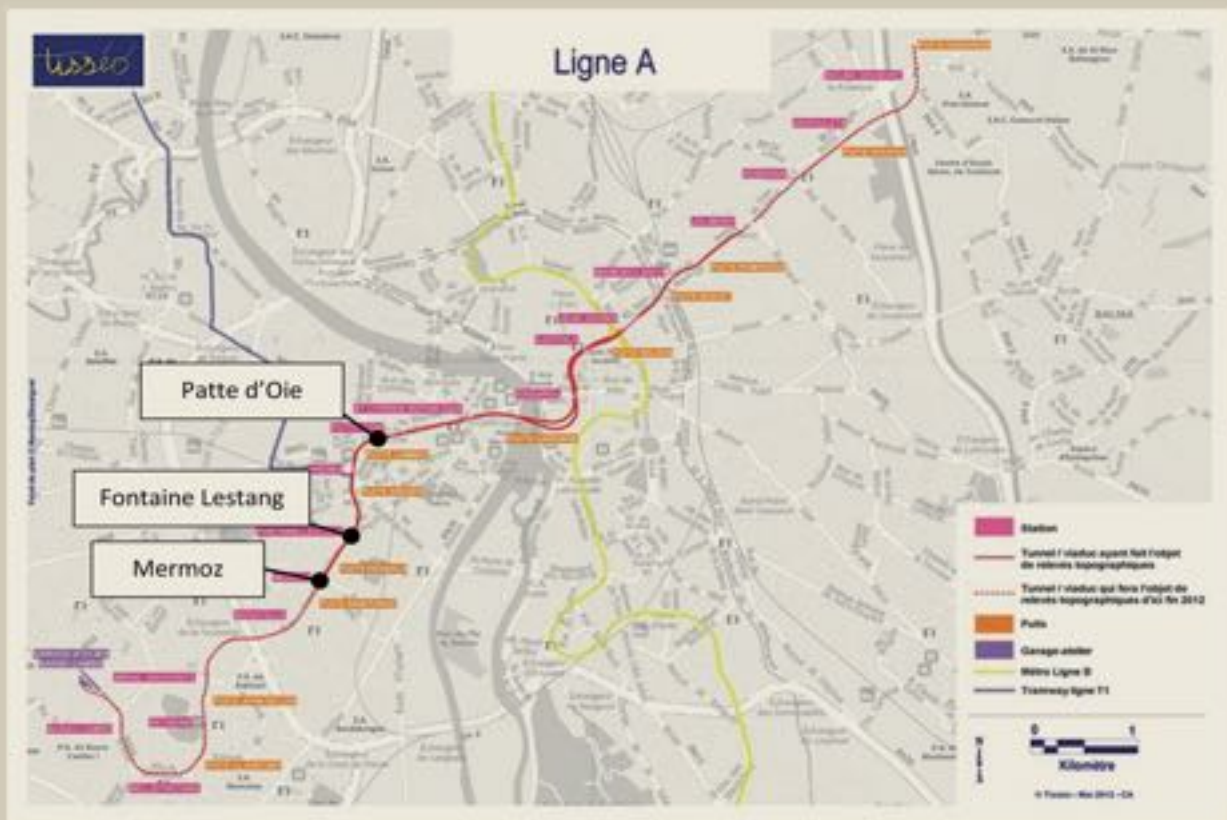
fait l'objet d'un article publié dans la revue *Travaux* n°931 de mars 2017. La complexité de cette opération résidait, en plus du contexte urbain des travaux, dans la nécessité absolue de limiter la gêne des usagers du métro de la Ligne A qui accueille actuellement 210 000 usagers par jour, tout en garantissant les exigences de sécurité du système en exploitation. Les travaux en interface avec l'exploitation du métro ont donc été réalisés :

1- Terrassement et dégagement des voussoirs.

1- Earthworks and clearing of segments.

- De nuit pendant les arrêts de circulation du métro, offrant ainsi une plage horaire de travail de 4 h ;
- Durant deux périodes de coupure estivales, respectivement de 5 semaines en 2017 et de 6 semaines en 2018, afin de permettre la réalisation des opérations de grande envergure en interface directe avec l'exploitation du métro. L'optimisation des travaux au regard de ces différentes contraintes, ainsi

PLAN DES LIGNES DU MÉTRO TOULOUSAIN



© PHOTOOTHÈQUE TISSECO

2

que la volonté de fiabiliser la faisabilité technique du projet relativement tôt en phase de conception, en s'appuyant sur l'expertise technique des entreprises sur ce type précis de travaux souterrains en milieu urbain très contraint qui doivent être conduits sous exploitation tout en respectant des contraintes de sécurité, ont conduit le maître d'ouvrage à opter, dès la phase de consultation de la maîtrise d'œuvre, pour une consultation anticipée des entreprises en application des dispositions de l'article 26 du décret n°93-1268 du 29 novembre 1993 et à l'annexe IV de l'arrêté du 21 décembre 1993, textes

2- Plan des lignes du métro toulousain.

3- Vue en coupe de la station Fontaine-Lestang avant et après les travaux d'extension.

2- Map of the Toulouse metro lines.

3- Cross-section view of Fontaine-Lestang Station before and after extension works.

portant sur les modalités d'application de la loi n°85-704 du 12 juillet 1985 modifiée dite "loi MOP".

Cette procédure consiste à consulter les entreprises sur la base d'un avant-projet établi par le maître d'œuvre, les études de projet étant également menées par ce dernier sur la base de la solution technique proposée par l'entreprise retenue.

Le marché de travaux a ainsi été attribué au groupement Eiffage Génie Civil/I.Co.P Spa/Bg Ingénieurs Conseils/Forézienne d'entreprises/Fontanie au mois de décembre 2016. Les études de projet ont été menées au cours du

premier trimestre 2017, permettant une mise au point du marché et une notification au printemps 2017, pour un démarrage des travaux de mise en sécurité du tunnel à l'été 2017, nécessitant une première coupure estivale de la Ligne A.

DESCRIPTIF DES TRAVAUX

Le besoin d'allongement des quais varie en fonction des stations :

- 16,3 m environ pour la station Mermoz ;
- 26 m environ pour la station Fontaine-Lestang ;
- 13,4 m environ pour la station Patte-d'Oie.

▷



© PHOTOOTHÈQUE ARCADIS

3a

3b

Ces extensions nécessitent de plus la création de nouveaux dégagements pour répondre aux exigences du règlement de sécurité incendie (arrêté du 24 décembre 2007).

Le gros œuvre, le second œuvre et les Équipements Non Liés au Système VAL (ENLS) ont donc été reconfigurés pour atteindre ces objectifs.

Préalablement aux travaux de gros œuvre, le tunnel au droit de la future extension a été conforté par la mise en place de cintres métalliques adossés à l'intrados des voussoirs (figure 4). Cette ossature, revêtue d'une tôle de 3 mm d'épaisseur et ancrée à sa base sur les voussoirs, permettait de créer la séparation physique indispensable entre la zone en travaux et le tunnel en exploitation. Lors des opérations de découpe et de dépose des voussoirs, ces cintres constituaient autant de points d'appui provisoires permettant de garantir la stabilité du tunnel et le maintien de la circulation du métro.

Cette mise en sécurité préalable a nécessité le déplacement des équipements ENLS présents dans le tunnel (réseaux électriques, radio, colonne sèche, etc.) durant la coupure estivale 2017.

Les travaux d'extension des stations ont été réalisés depuis la surface, à ciel ouvert, au-dessus du tunnel du métro en exploitation, à l'abri de soutènements de type parois moulées de 22 à 25 m de profondeur et de 0,8 m d'épaisseur, les fouilles atteignant une profondeur de l'ordre de 16 m. Ces parois ont été réalisées à l'hydrofraise afin de limiter les vibrations en franchissant les bancs raides molasiques (figure 5).

L'exiguïté de la zone de travail ainsi que les contraintes de phasage imposées pour maintenir l'équilibre mécanique apporté par la poussée des terres sur les voussoirs ont rendu complexes les terrassements de part et d'autre du tunnel (figure 6) qui ont été réalisés avec des engins de taille et de puissance réduite.

La découpe des voussoirs (figure 1) s'est effectuée à l'avancement du terrassement suivant un calepinage qui limitait les phases de sciage mais maintenait autour du tunnel le volume de sol nécessaire à sa stabilité.

La mise en place des outils de découpe a nécessité au préalable le retrait du mortier de bourrage mis en place en extrados du tunnel lors de son creusement. L'ensemble des tirefonds de liaison entre voussoirs encore présents dans le tunnel a été retiré avant la mise



© PHOTO THEQUE ARCADIS 4

en place des cintres, lors de la coupure estivale 2017.

Pour chaque phase de découpe (trois au total), un sciage longitudinal était réalisé de part et d'autre du tunnel. Ces traits de scie, horizontaux et transversants, sectionnaient la base des voussoirs mis au jour par le terrassement. Insuffisants pour permettre la décompression des voussoirs entre eux,

4- Mise en place des cintres.

5- Exécution des parois moulées.

4- Placing centring.

5- Execution of diaphragm walls.

ils ont été complétés par une double coupe radiale en V de 10 cm de largeur, permettant de dégager un tronçon de voussoirs et, avec lui, l'espace nécessaire pour le retrait des suivants.

Après découpe, la stabilité des voussoirs était assurée par les cintres de confortement sur lesquels ils venaient reposer. Leur dépose a été organisée de manière à équilibrer en permanence



© PHOTO THEQUE ARCADIS 5

le report de charges sur ce dispositif et éviter ainsi un déversement d'ensemble.

La découpe des voussoirs (figure 7) se déroulait de jour. Le retrait de ceux situés en voûte et au-dessus de voies a été réalisé de nuit hors exploitation du métro.

Parallèlement aux travaux de terrassement et de dépose du revêtement du tunnel, se déroulaient les travaux de création d'une poutre-voile de 0,8 m d'épaisseur venant doubler le tympan de la station existant. Jumelée à celui-ci par le biais d'ancrages passifs, cette poutre-voile devait assurer in fine un transfert de charges de l'extension mais aussi de celles transitant dans le tympan existant, ce dernier devant être partiellement démolé à sa base pour permettre, sur la hauteur du

6- Terrassement de l'extension.

7- Découpe et enlèvement des voussoirs.

8- Sciage au câble des parois moulées existantes.

9- Dépose de la mise en sécurité.

6- Extension earthworks.

7- Cutting out and removal of segments.

8- Cable sawing of existing diaphragm walls.

9- Removal of safety guards.

niveau des quais, une liaison entre station existante et extension.

Après avoir été morcelé par un sciage au câble (figure 8) respectant un calepinage précis, ce tympan de 0,8 m d'épaisseur et de près de 5 m de hauteur a été extrait par blocs de près de 3 t et ramené à l'aplomb de la grue du chantier pour être évacué.

Les travaux se sont poursuivis par la réalisation du radier des quais, des dalles intermédiaires et de la couverture.

La réalisation des quais s'est faite en deux phases :

- Une première phase coulée en place à l'arrière des cintres ;
- Une seconde à l'aide de prédalles mises en place après l'enlèvement des cintres lors de la coupure de l'été 2018 (figures 9 et 10).

Les dalles ont été construites avec un mètre en exploitation, à la même cote et avec les mêmes épaisseurs que les planchers existants. Leur ferrailage prolongeait les connecteurs laissés en attente dans les parois moulées.

Pour la dalle haute des quais, la poutre-dalle préfabriquée a été préférée, lorsque possible, à un cintre support de coffrage enjambant le dispositif de mise en sécurité du métro.

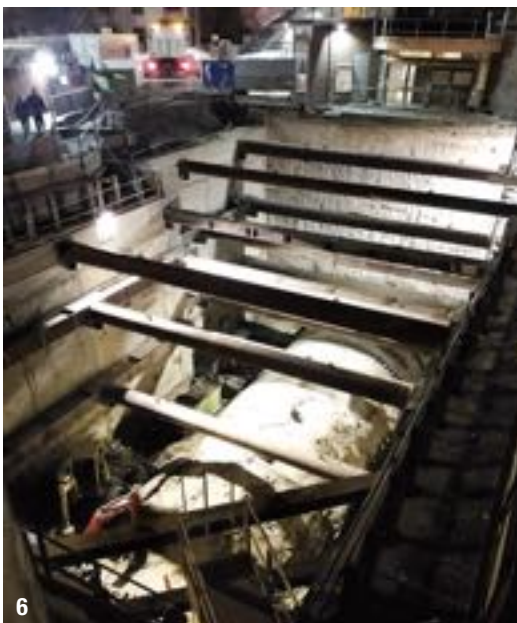
Les autres dalles ont été réalisées sur étalement.

Avant remblaiement et restitution des emprises de surface, la dalle de couverture a été revêtue d'une étanchéité bitumineuse adhérente, protégée par une couche de béton.

PHÉNOMÈNES REDOUTÉS ET OBSERVÉS

De par la nature des travaux des extensions (excavation dans les molasses autour des anneaux puis découpe des anneaux), les phénomènes suivants étaient redoutés :

- La remontée du fond de fouille par décompression du terrain allégé des matériaux extraits, associée à un rapprochement des parois moulées non butonnées en fond de fouille ;
- Le relâchement de l'effort normal existant dans les voussoirs dû à la charge du terrain sur les anneaux complets, la structure actuelle du tunnel étant composée de voussoirs en béton armé fonctionnant principalement en compression dans le sens transversal. L'ensemble des charges et surcharges est transmis au terrain par le béton de remplissage et les voussoirs.



FIGURES 6, 7 & 8 © PHOTOOTHÈQUE ARCADIS - FIGURE 9 © PHOTOOTHÈQUE TISSÉO



© PHOTO THÉQUE ARCADIS

Ces phénomènes pouvaient avoir des conséquences sur le comportement de l'existant (voussoirs et anneaux du tunnel restants, béton de remplissage, béton de voie et éléments de voie) et donc sur la sécurité des usagers.

Dès la conception, des études spécifiques ainsi qu'une campagne de reconnaissance géotechnique ont été menées afin d'évaluer ces déformations.

Des essais pressiométriques cycliques, des essais dilatométriques et des essais de gonflement à l'œdomètre ont donc été réalisés dans la molasse avec pour objectif de définir le module de déchargement de ces terrains en fond de fouille.

L'analyse de ces essais a permis de définir des paramètres de sol (module de déchargement-rechargement du terrain) à intégrer dans des modèles d'interaction sol/structure. Associés au phasage de construction, ces modèles élasto-plastiques ont permis d'évaluer dans le sens transversal et dans le sens longitudinal des extensions une remontée du fond de fouille de l'ordre de 1 cm.

Ces déformations ont un impact sur les équipements de la voie et donc sur l'exploitation.

Dans le tunnel, le radier se compose d'un béton de remplissage non armé, et d'un béton de voie non armé également sur lequel reposent les éléments de voie (blochets et traverses). Sous l'effet des déformations, ces éléments pouvaient se déchausser, entraînant ainsi une instabilité locale et des sollicitations dynamiques dans le béton sous le battement de la voie au passage des convois.

Les principales conséquences directes étaient les suivantes :

→ Déformée anormale des éléments de voie en dehors des tolérances d'acceptation de la voie définies par l'IT VAL ;

→ Fissuration excessive du béton de radier non armé (voie et remplissage) avec phénomène de dégradation sous l'effet des charges roulantes.

Devant le comportement incertain des éléments de voie (notamment les blochets et les traverses) et du béton existant en réponse aux déplacements du terrain, le principe de la méthode observationnelle s'est imposé.

Les principes suivants ont été adoptés :

- 1- Mise en œuvre de dispositions préventives :
 - Comblement des caniveaux ;
 - Ancrage du fond de fouille avec des clous de 8 m de profondeur et inclinés ;

10- Vue des travaux d'extension des quais de la station Patte-d'Oie.

11 - Instrumentation des voies.

12- Évolution du soulèvement du radier.

10- View of extension works on the platforms of Patte-d'Oie Station.

11 - Track instrumentation.

12- Evolution of foundation uplift.

- Réalisation de puits de décompression raccordés au radier drainant sous les quais.

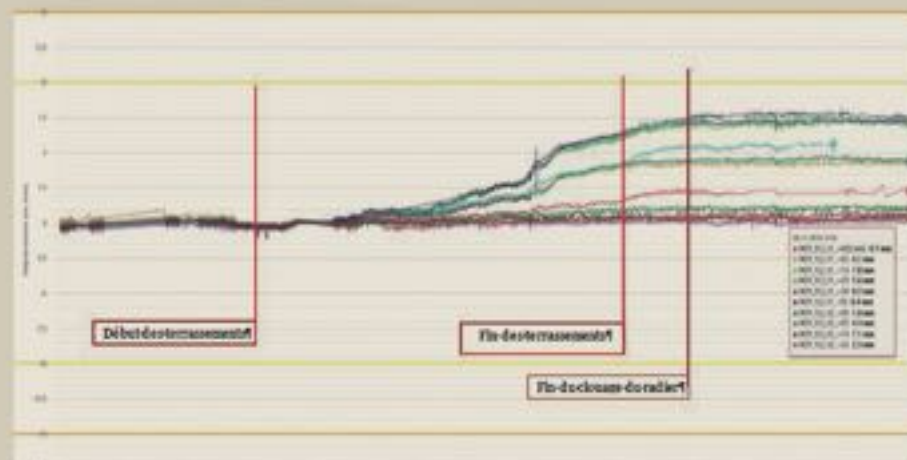
2- Surveillance des structures en phase travaux (jusqu'à stabilisation) avec définition de seuils d'alerte, de vigilance et d'intervention :

- Suivi topographique des éléments de voies et du radier par un système automatisé mis en place par l'entreprise ;
- Suivi par comparateur posé par l'ensemblier ;
- Inspection périodique du radier.

3- Mise en œuvre de solution palliative si nécessaire (définie préalablement) allant de l'injection de fissures à la reconstruction du radier.

Cette méthode nécessite également de définir, préalablement au démarrage des travaux, les dispositions constructives à mettre en œuvre en

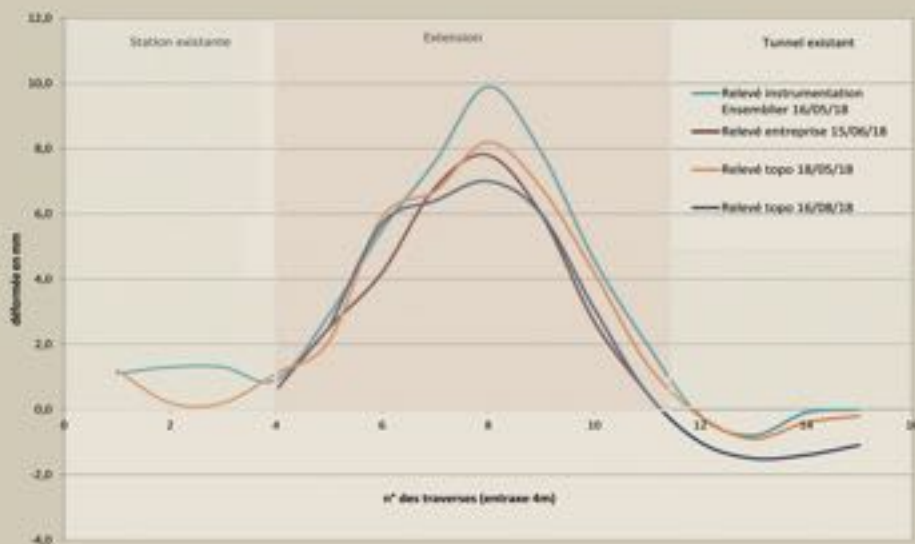
ÉVOLUTION DU SOULÈVEMENT DU RADIER



12

© PHOTO THÉQUE ARCADIS

PROFIL EN LONG DU SOULÈVEMENT DU RADIER APRÈS TERRASSEMENT



© PHOTO THÉÂTRE ARCADIS

13

face de chaque dépassement de seuil, en accord avec les conditions d'exploitation et les possibilités d'intervention sur les voies.

Un logigramme décisionnel a été pré-établi et validé par la maîtrise d'ouvrage, l'exploitant, l'ensemblier, le contrôleur technique et la maîtrise d'œuvre : il a été appliqué en phase travaux.

Lors des travaux de terrassement, l'instrumentation mise en place (figure

13- Profil en long du soulèvement du radier après terrassement.

13- Longitudinal profile of foundation-raft uplift after earthworks.

PRINCIPALES QUANTITÉS RÉPARTIES SUR LES 3 STATIONS

9000 m³ de déblais excavés

3500 m² de parois moulées

2500 m³ de béton structurel

620 t d'acier

120 t de cintres et tôles pour la mise en sécurité de l'exploitation

50 anneaux de voussoirs à découper et évacuer

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Tisséo Collectivité (Syndicat Mixte des Transports en Commun de l'Agglomération Toulousaine)

MAÎTRE D'OUVRAGE MANDATAIRE AGISSANT AU NOM ET POUR LE COMPTE DE TISSÉO COLLECTIVITÉ : Tisséo Ingénierie (Société de la Mobilité de l'Agglomération Toulousaine)

MAÎTRE D'ŒUVRE : Groupement Arcadis (mandataire) / Betem / Ppa

ENTREPRISES :

- Lot 1 - Gros œuvre : Eiffage Génie Civil (mandataire) / I.Co.P Spa / Bg Ingénieurs Conseils / Forézienne d'entreprises / Fontanie
- Lot 02 - Création Accès provisoire FLE : Construit 31
- Lot 03 - Parachèvement : Gbmp
- Lot 04 - Électricité / CVC / Plomberie / Faux plafonds : Fontanie / Eiffage Énergie Thermie Sud-Ouest
- Lot 05 - Ventilation / Désenfumage : Axima Concept
- Lot 06 - VRD : Eiffage Route Sud-Ouest

CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Socotec

OPC : Egis Rail

COORDONNATEUR SPS : Bureau Veritas

OQA : Bureau Veritas

ENSEMBLIER : Siemens Mobility SAS

ABSTRACT

EXTENSION OF THE SHORT STATIONS OF TOULOUSE METRO LINE A

AGNÈS MARCON, ARCADIS - ANNE-LAURE BRAZIER, MOAD, TISSEO INGENIERIE - DOMINIQUE DZIK, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

The civil engineering extension works on the three short underground stations of Toulouse metro Line A were carried out in a very dense urban environment, with the metro in operation, but taking advantage of two summer break periods, and with the absolute imperative of ensuring user safety. The work methods were adapted to cope with all the constraints and comply with the objectives set by the contracting authority while consolidating the robustness of the existing structures. □

AMPLIACIÓN DE LAS ESTACIONES CORTAS DE LA LÍNEA A DEL METRO DE TOULOUSE

AGNÈS MARCON, ARCADIS - ANNE-LAURE BRAZIER, MOAD, TISSEO INGENIERIE - DOMINIQUE DZIK, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

Las obras de ampliación de la ingeniería civil de tres estaciones cortas subterráneas de la Línea A del metro de Toulouse se han desarrollado en un contexto urbano muy denso, con el metro operativo (aunque con 2 períodos de interrupción estival) y con la absoluta necesidad de garantizar la seguridad de los usuarios. Los métodos de trabajo se han adaptado para responder al conjunto de restricciones y respetar los objetivos fijados por el contratista, reforzando a la vez la solidez de las construcciones existentes. □

LA LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS : CONCEPTION ET ENJEUX DU TRONÇON T3C

AUTEURS : GUILLAUME PONS, DIRECTEUR DE PROJET L15 SUD, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - HERVÉ LE BISSONNAIS, DIRECTEUR GÉNÉRAL DÉLÉGUÉ, TERRASOL - GILLES CHAPRON, INGÉNIEUR PRINCIPAL, TERRASOL - PIERRE LOÏC VEYRON, DIRECTEUR, SETEC TPI

LONGUE DE 33 km, LA LIGNE 15 SUD RELIE LES GARES DE PONT-DE-SÈVRES ET NOISY-CHAMPS EN TRAVERSANT 22 COMMUNES. TOUTES SES GARES SERONT EN CORRESPONDANCE AVEC DES LIGNES DE TRANSPORTS EN COMMUN EXISTANTES. PREMIER TRONÇON EN TRAVAUX DU GRAND PARIS EXPRESS, LA LIGNE SERA MISE EN SERVICE AU PREMIER SEMESTRE 2025. CET ARTICLE PRÉSENTE PLUS PARTICULIÈREMENT LES ENJEUX GÉOTECHNIQUES DU LOT TRAVAUX T3C ENTRE LES GARES DE FORT-D'ISSY-VANVES-CLAMART ET VILLEJUIF-LOUIS-ARAGON.



© ANNE-CLAUDE BARBIER POUR SETEC TPI

La ligne 15 Sud reliant la gare Pont-de-Sèvres à Boulogne et la gare de Noisy-Champs est le premier tronçon en travaux du Réseau de Transport du Grand Paris. Le lot de travaux T3C relie la gare de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart et la gare de Villejuif-Louis-Aragon sur un linéaire de 8 km de tunnel dans un contexte très urbanisé. 5 gares et 8 ouvrages annexes seront réalisés (figure 2).

LES RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

Les reconnaissances géotechniques ont été lancées par la maîtrise d'ouvrage SGP et son assistance à maîtrise d'ouvrage en matière de géotechnique (Arcadis) dès 2011, permettant au maître d'œuvre de disposer des résultats des premières reconnaissances au démarrage de l'AVPa en 2013. Celles-ci ont été découpées et réali-

1- Gare d'Arcueil-Cachan : terrassement en cours de la boîte Est.

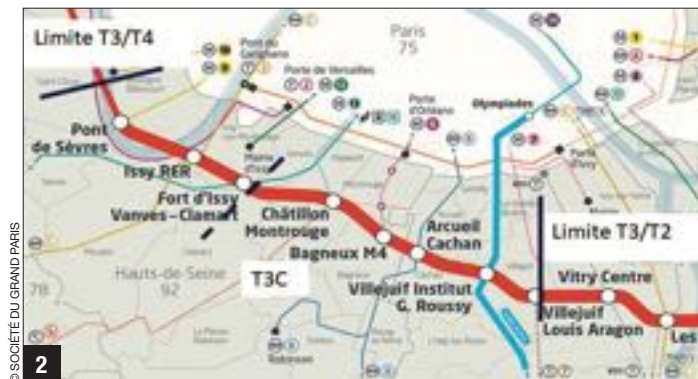
1- Arcueil-Cachan Station: earthworks underway on the eastern box.

sées en trois phases (G11 avant l'AVP, G12 en phase AVPa et G2 en phase AVPb selon l'ancienne norme 94-500), permettant une adaptation des reconnaissances aux contraintes mises en évidence pendant les phases d'étude du maître d'œuvre.

Au lancement des DCE travaux, 318 sondages auront été réalisés sur cette section : 124 sondages carotés, 108 sondages pressiométriques,

2- Tracé de la Ligne 15 Sud (tronçon 3 situé à l'ouest de l'ensemble de la Ligne 15 Sud).
3- Log stratigraphique.

2- Alignment of Line 15 South (section 3 in the western part of Line 15 South).
3- Stratigraphic log.



69 sondages destructifs et 17 essais au pénétromètre statique. Ceci représente, pour 8350 m de tunnel, un sondage tous les 26 m avec une concentration de points de reconnaissance au niveau des 5 gares.

Ce sont donc des reconnaissances relativement classiques pour un projet de tunnel qui ont été réalisées. La réalisation d'un puits d'essai à Arcueil a néanmoins été l'occasion de réaliser des essais plus exceptionnels.

LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE

Les tunnels de la Ligne 15 Sud-tronçon 3 interceptent l'ensemble des formations géologiques du bassin Parisien (figure 3), en partant de la

craie du Campanien dans la vallée de la Seine, jusqu'aux sables de Fontainebleau en arrivant sur le plateau de Villejuif.

On rencontre ainsi des formations rocheuses (essentiellement des roches tendres comme la craie, le Calcaire Grossier, les Marnes et Caillasses, le Calcaire de Brie), des sols indurés comme les Marnes de Meudon, le Marno-Calcaire de Saint-Ouen, les Marnes supra gypseuses (Marnes d'Argenteuil et Marnes de Pantin), des formations argileuses (Argiles Plastiques, Argile Verte), et des terrains à dominante sableuse (Sables de Beauchamp et de Fontainebleau).

Le premier tunnel reliant le puits d'entrée du Parc Robespierre et la gare de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart est excavé dans le contexte du plateau de Vanves/Bagneux/Arcueil en interceptant essentiellement en front mixte le Calcaire Grossier et les Argiles plastiques, et localement les Marnes de Meudon et la craie du Campanien.

Le deuxième tunnel entre le Parc Robespierre et la gare Villejuif-Louis-Aragon traverse également le Calcaire Grossier et les Argiles Plastiques, puis interceptera la vallée de la Bièvre avec une faible couverture de Marnes et Caillasses et d'éboulis pour remonter sur le plateau de Villejuif en interceptant la série de l'Éocène Supérieur et de l'Oligocène jusqu'aux Sables de Fontainebleau.

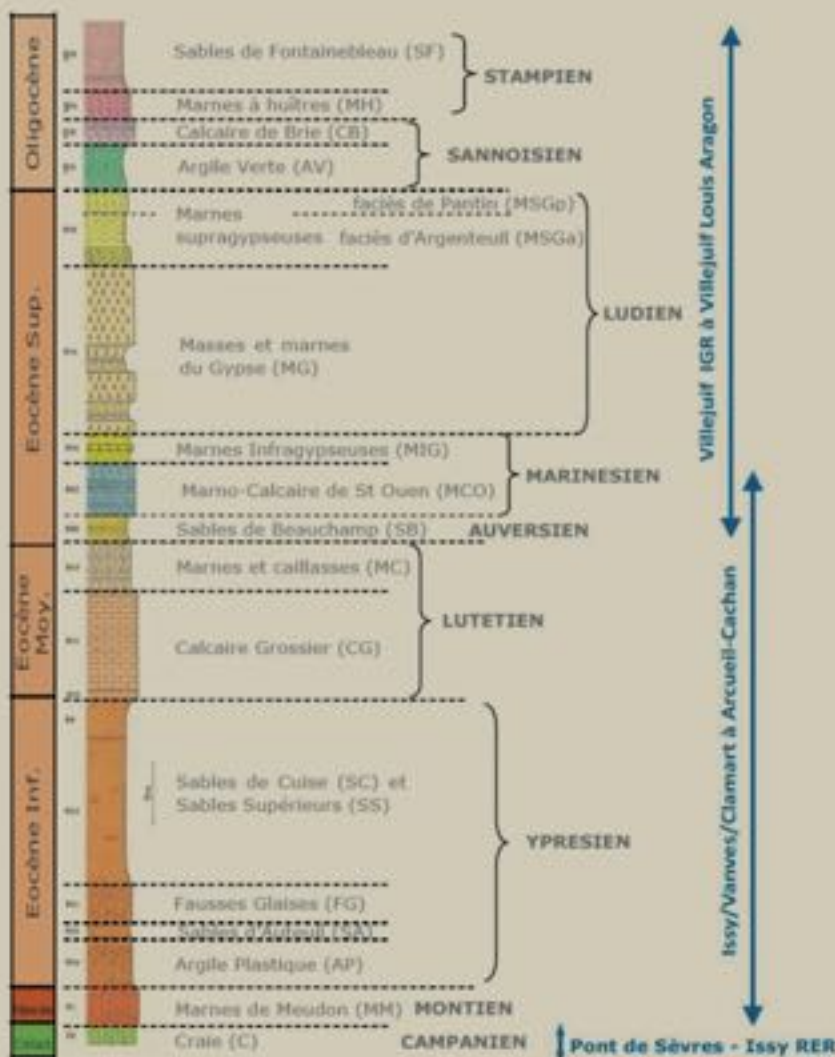
On est donc en présence d'une grande hétérogénéité de formations allant du sable sans cohésion (Sables de Fontainebleau) à une roche de résistance relativement importante (résistance en compression des bancs durs du Calcaire Grossier pouvant atteindre plus de 100 MPa), en passant par des argiles fortement plastiques et déformables (Argile Plastique, Argile Verte).

LES ENJEUX HYDROGÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES

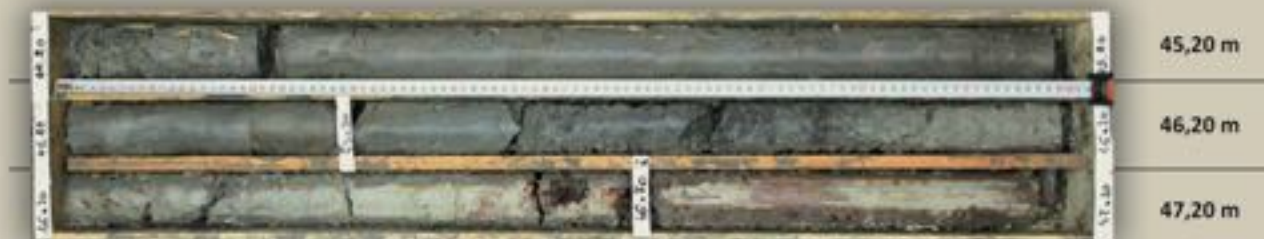
LE CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Les difficultés hydrogéologiques du tronçon T3 sont plutôt localisées dans la vallée de la Seine entre le Pont de Sèvres et la gare Issy RER avec une nappe alluviale mettant en communication la nappe de la Seine et la nappe de la craie (charge pouvant atteindre 30 m d'eau avec un tunnel excavé dans la craie, et trois passages sous la Seine).

LOG STRATIGRAPHIQUE



CAROTTES PRÉLEVÉES DANS LES ARGILES PLASTIQUES



4

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS / SETEC TERRASOL

Sur le plateau de Vanves/Clamart, on est en présence d'une nappe dans le Calcaire Grossier portée par les Argiles Plastiques. La charge est relativement réduite (10 m d'eau). La nappe de la craie est le plus souvent située sous le radier du tunnel, sauf en se rapprochant de la vallée de la Bièvre où on peut rencontrer une nappe légèrement en charge sous les Argiles Plastiques. Au passage de la vallée de la Bièvre, la charge est de l'ordre de 10 m d'eau. Sur le plateau de Villejuif, les difficultés sont liées à la présence de plusieurs nappes superposées séparées par des horizons plus ou moins étanches (Sables de Beauchamp médians, Marnes d'Argenteuil, Argile Verte, Marnes à Huîtres). Globalement, les perméabilités des horizons aquifères sont relativement faibles avec des charges hydrauliques également réduites.

4- Carottes prélevées dans les Argiles Plastiques.

5- Les Argiles Plastiques dans le puits d'essai de Cachan.

6- Localisation des carrières.

4- Core samples taken in plastic clays.

5- Plastic clays in the Cachan test shaft.

6- Quarry location.



5

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS / SETEC TERRASOL



6

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS / INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES



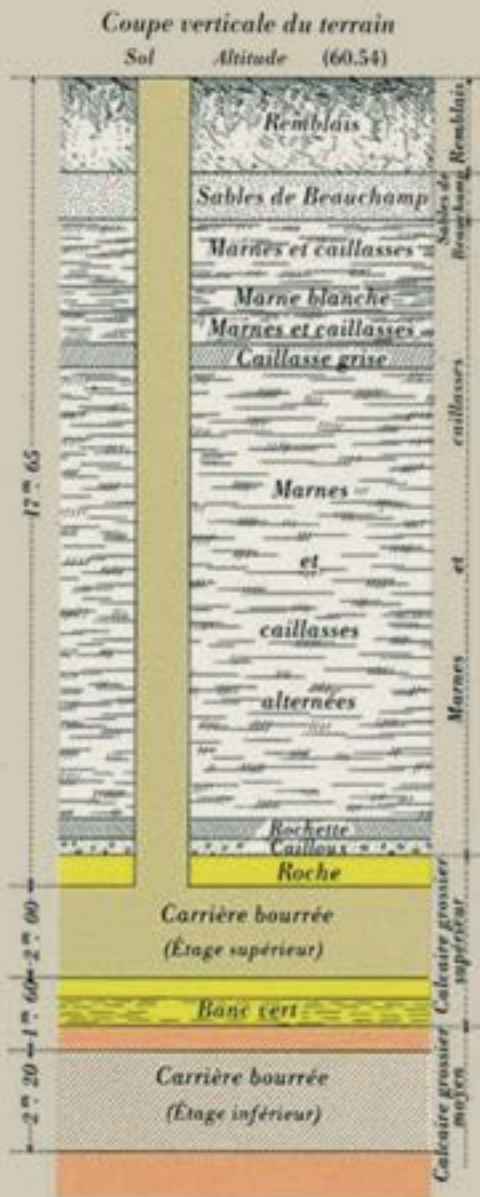
7



8

seuses) des circulations superficielles à l'origine du phénomène de dissolution. Cette configuration favorable s'atténue toutefois entre la station de Villejuif-Institut-Gustave-Roussy et la vallée de la Bièvre, où l'érosion expose les niveaux concernés à une éventuelle dissolution du gypse. Des niveaux décomprimés à l'approche de cette zone ont en effet été détectés sur quelques forages mais sur des hauteurs limitées. Néanmoins, aucun vide significatif n'a été mis en évidence. Ce risque sera géré par l'utilisation du système de reconnaissance à l'avancement du tunnelier par méthode géophysique de type Beam.

EXTRAIT DES CARTES DE L'IGC



9a

7- Pilier à bras.
8- Galerie entre hagues et bourrage.

9- Extrait des cartes de l'IGC.

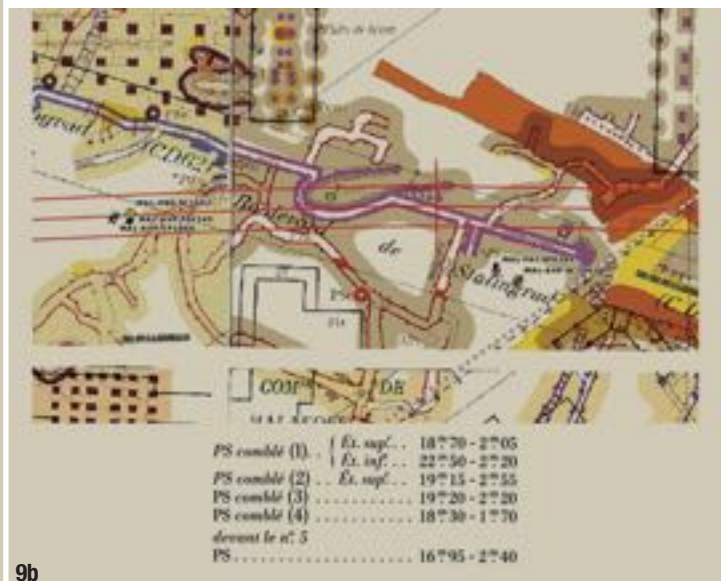
7- Stacked pillar.
8- Gallery between stone-walling and back-filling.
9- Excerpt from IGC maps.

LE RISQUE DE DISSOLUTION DE GYPSE

Le secteur entre le puits Robespierre et la gare Fort-d'Issy-Varves-Clamart n'est pas affecté par ce risque. Pour le tunnel Est, la majeure partie du linéaire n'est également pas affectée par le risque de dissolution du gypse. En effet, une couverture relativement importante (30 à 45 m) et imperméable (présence continue d'Argile Verte) isole les formations gypsifères (essentiellement Masses et Marnes de Gypse et Marnes Infra Gyp-

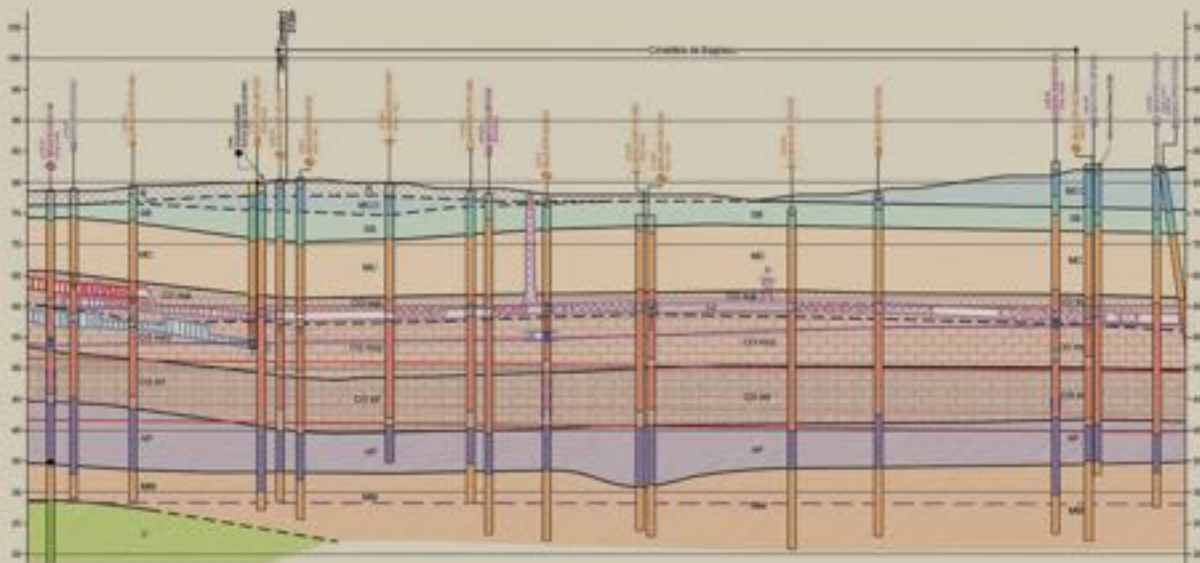
LA PRÉSENCE DES ARGILES PLASTIQUES

Le plateau de Vanves/Clamart/Arcueil se caractérise par la présence de l'horizon des Argiles Plastiques (base de l'Yprésien située sous le niveau de Calcaire Grossier du Lutétien). Il s'agit d'une argile très plastique de teinte grise sur quelques mètres puis devenant bariolée (bleuâtre, verdâtre, rouille à lie de vin). Son épaisseur peut atteindre 18 m à l'ouest de la gare d'Arcueil, avec une épaisseur moyenne plutôt de l'ordre de 8 m (figure 4). On note également la présence de lentilles ou de niveau de sables moyens à grossiers gris, noirs sur des épaisseurs parfois plurimétriques, au sein des Argiles Plastiques. Ces niveaux de sables sont relativement atypiques dans le contexte parisien, et rarement décrit dans la littérature. Il s'agit a priori d'une variation latérale de faciès. On notera également le fort potentiel de gonflement de ces argiles impactant la conception des radiers des gares situées dans cet horizon. ▷



9b

EXTRAIT PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE SECTEUR BAGNEUX



10

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS / SETEC TERRASOL

Le puits d'essai réalisé à Cachan a également permis de recalculer les paramètres de déformabilité à partir d'une rétro-analyse basée sur les mesures réalisées lors du creusement d'une galerie d'essai, et de la réalisation d'essais à la plaque rigide (figure 5).

LA PRÉSENCE DE CARRIÈRES SOUTERRAINES

Le projet est directement concerné par la présence d'anciennes exploitations du Calcaire Grossier, à la fois à ciel ouvert et en souterrain, et ce depuis le coteau d'Issy jusqu'à celui de la vallée de la Bièvre, soit sur plus de 6 km. L'importance de leur étendue et leur forte sensibilité en font l'un des risques majeurs de ce projet. L'intégralité du tunnel est concernée par la présence de ces carrières (figure 6). Le Calcaire Grossier (couche sédimentaire datant du Lutétien Inférieur-Tertiaire) est un horizon caractérisé par une alternance de bancs durs (résistance en compression pouvant dépasser 100 MPa) et de bancs tendres. Il est souvent distingué en trois sous-divisions :

- Calcaire Grossier supérieur : alternance de petits bancs durs et tendres ;
- Calcaire Grossier moyen : banc massif relativement tendre ;
- Calcaire Grossier inférieur : niveau plus sableux avec présence de glauconie à la base.

L'épaisseur totale de la formation varie sur la région parisienne entre 18 et 25 m (puissance moyenne de l'ordre

de 20 m dans le secteur du projet). Les niveaux supérieurs et moyen du Calcaire Grossier (CG) ont été largement exploités pour la construction de Paris jusqu'au 19^e siècle. Seuls les matériaux de certains bancs étaient extraits pour servir de pierre de taille. Les types d'exploitation rencontrés par le projet sont :

- Des carrières à ciel ouvert, où le Calcaire Grossier affleure, remblayées par du tout venant, et principalement les rejets de l'exploitation ; la qualité des terrains au niveau de ces zones est donc relativement médiocre ;



© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

10- Extrait profil en long géologique secteur Bagneux.

11- Relevé topographique des carrières.

10- Excerpt of longitudinal geological profile of Bagneux sector.

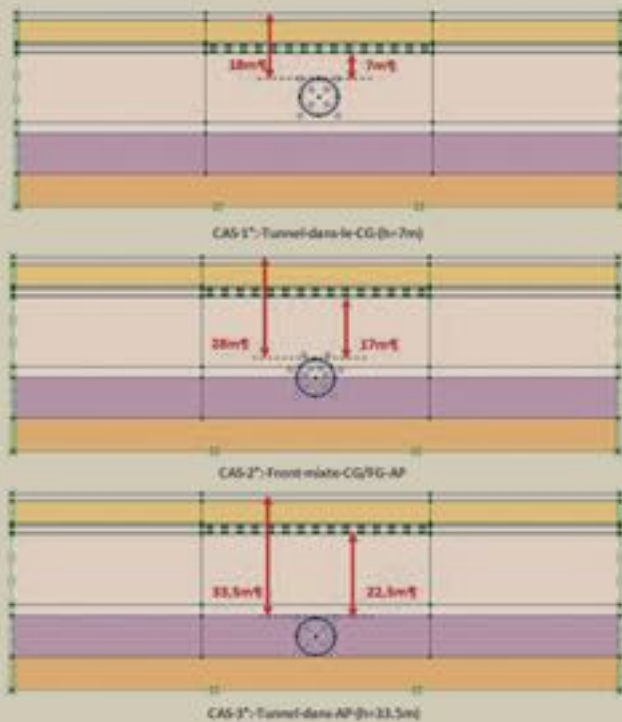
11- Quarry topographic survey.

- Des carrières souterraines, exploitées sur 3 niveaux (les niveaux supérieur et moyen intéressent le Calcaire Grossier supérieur, le niveau inférieur est situé dans le Calcaire Grossier moyen) à partir de puits verticaux par la technique dite des "hagues et bourrages" : l'intégralité de la masse du Calcaire Grossier est terrassée sur 1 à 2 niveaux superposés, dont la hauteur varie de 1 à 2 m ; le toit des carrières est soutenu par des "piliers à bras" constitués de blocs non utilisés (figure 7), et les déchets d'exploitation des bancs médiocres sont "bourrés" derrière des "hagues" (murs en pierres sèches, figure 8). Des galeries vides sont conservées pour accéder depuis les puits au front de taille ; à l'arrière de l'exploitation, la dalle du ciel vient progressivement et ponctuellement s'appuyer sur les hagues et bourrages (conduisant à sa fracturation partielle et éventuellement à la décompression des terrains sus-jacents).

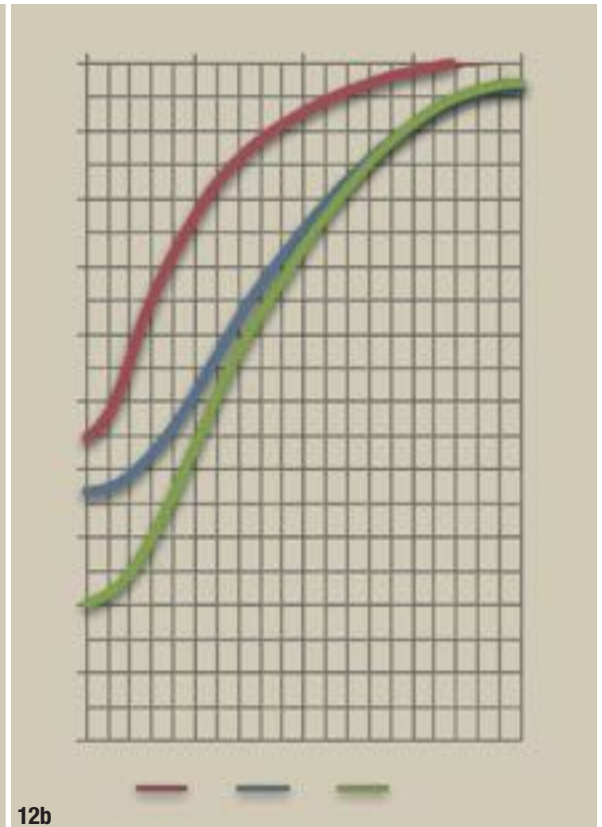
Dans un premier temps, les niveaux de carrières attendus ont été relevés sur les cartes historiques de l'Inspection Générale des Carrières (IGC, figure 9). Leurs archives font état de 1 à 3 niveaux d'exploitation souterraine, dont le bourrage n'est pas toujours observé (les niveaux supérieurs et moyens en particulier ont localement été laissés en l'état).

Ces zones d'exploitation ont, par la suite, pu être en partie confirmées par les sondages de reconnaissances qui

CHOIX DU PROFIL EN LONG



12a



12b

ont de plus permis de mettre en évidence des zones de carrières non cartographiées (notamment pour la gare Arcueil-Cachan, au droit des Coteaux d'Issy et sous le Fort d'Issy), en profondeur ou à ciel ouvert.

À ce risque majeur des carrières dans le Calcaire Grossier, s'ajoutent ceux :

- Des carrières de craie, a priori en dehors du tracé, mais proches au droit de la correspondance de la gare d'Issy RER ;
- Les glaisières (puits jusqu'aux Argiles Plastiques) identifiées très localement sur les cartes de l'IGC le long du tracé, notamment vers Malakoff et Vanves.

12- Choix du profil en long.

13- Modèle 3D avec prise en compte des carrières, front dans les Argiles Plastiques.

12- Choice of longitudinal profile.

13- 3D model taking into account quarries; tunnel face in plastic clays.

LA VALLÉE DE LA BIÈVRE

Après la gare d'Arcueil-Cachan et avant de remonter sur le plateau de Villejuif, le tunnel intercepte la vallée de la Bièvre, ancienne rivière maintenant canalisée traversant la banlieue Sud puis Paris pour se jeter dans la Seine.

Le fond de la vallée et le pied de versant sont occupés par des matériaux alluvionnaires et des éboulis de compacité relativement faible et sur une épaisseur de l'ordre d'une quinzaine de mètres. Les contraintes de tracé (altitude des gares, pente maximale du tunnel) impliquent le passage du point bas avec une couverture de l'ordre de 10 m (soit un diamètre de tunnel) avec une

voûte dans les terrains alluvionnaires, heureusement dans un environnement peu urbanisé.

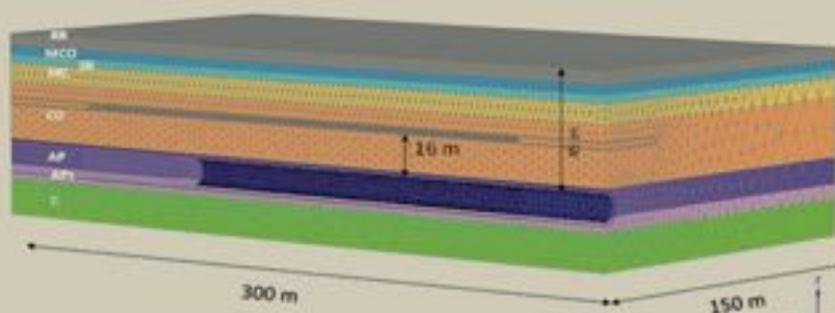
LA PRISE EN COMPTE DES ENJEUX GÉOTECHNIQUES SUR LE TRACÉ DES TUNNELS

La présence des carrières sur le plateau de Vanves conduisait à trois possibilités de tracé :

- Un tracé situé au-dessus des carrières : la présence de nombreux réseaux et fondations ou sous-sols de bâtiments et la couverture fréquemment insuffisante entre le toit des carrières et le TN ne permettait pas physiquement un tel tracé.
- Un tracé interceptant les carrières :

même si cette solution apparaissait techniquement possible, les risques ont rapidement été jugés très importants. En effet, même si les carrières sont actuellement globalement stables, il est quasiment impossible de définir leur état d'équilibre et notamment les reports de charges sur les piliers et hagues, et donc d'évaluer le niveau de sécurité existant. De ce fait, toute modification de ce schéma d'équilibre, inévitable lors de la traversée des carrières par un tunnelier, présente un risque de déstabilisation qu'il est très difficile d'apprécier. ▷

MODÈLE 3D AVEC PRISE EN COMPTE DES CARRIÈRES, FRONT DANS LES ARGILES PLASTIQUES



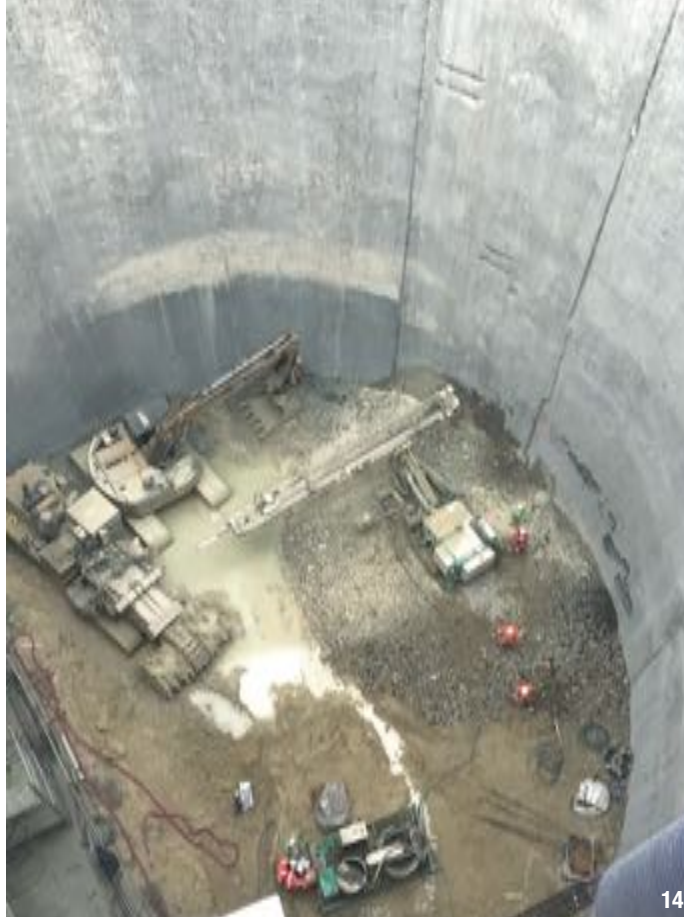
13

De plus, les différentes visites de carrières ont montré qu'il est très probable d'y trouver des objets abandonnés à la fin de l'exploitation et en particulier des objets métalliques : brouettes, pioches, éléments de soutènement (cintres, boulons, ...), échelles, ou des objets métalliques perdus lors des travaux ultérieurs de reconnaissance ou d'injections : tubes métalliques, outils de forage, etc. L'interception de tels objets par le tunnelier pourrait bloquer la roue de coupe et l'endommager. Seule une excavation en méthode conventionnelle permettrait d'éliminer complètement ce risque.

→ Un tracé sous les carrières : les analyses ont montré que le risque de déstabilisation des carrières était très nettement réduit dès que la couverture entre le tunnel et le plancher des carrières dépassaient quelques mètres. Un confortement des carrières par injection sur une certaine largeur permettait une réduction supplémentaire du risque. Il a finalement été retenu sur les 6 km concernés par les carrières un tracé quasi intégralement situé sous le dernier niveau, sauf à proximité immédiate de la gare de Bagneux où les carrières seront interceptées sur une longueur très réduite du fait de la remontée du profil en long de cette gare en correspondance avec la Ligne 4 du métro parisien (figure 10).

Ce choix a été associé à différentes mesures afin d'améliorer la connaissance du comportement des carrières :
→ Étude approfondie des cartes de l'Inspection Générale des Carrières (figure 9) avec prise en compte de toutes les indications concernant les puits de sortie et les fontis (remontant ou pas en surface), complétée par de nombreux échanges avec les techniciens de l'IGC (discussions autour des traitements proposés, validation des galeries à conserver ou à renforcer et des accès à reconstruire).

→ Réalisation de campagnes de reconnaissance géotechnique complémentaires (sondages carottés et sondages destructifs) et réinterprétation des sondages carottés et destructifs déjà réalisés. Il est en effet parfois délicat, à partir des carottes ou de paramètres de forage, de distinguer les niveaux de carrières des niveaux de calcaire altéré. Certains niveaux de carrière identifiés sur les coupes de sondages ont ainsi été



14

© PHOTOTHÈQUE SETEC

requalifiés en niveau de calcaire en place, analyse confirmée lors de l'ouverture du puits d'essai d'Arcueil avec une vision en grand du calcaire et de ses niveaux dégradés.

- Relevé topographique de précision des carrières visitables en 3 dimensions (figure 11).
- Analyse des mesures interférométriques permettant d'identifier la présence éventuelle de fontis historiques et d'évaluer leurs évolutions (peu d'indices détectés sur ce tronçon).

LA DÉFINITION DE LA PRESSION DE CONFINEMENT DU TUNNELIER

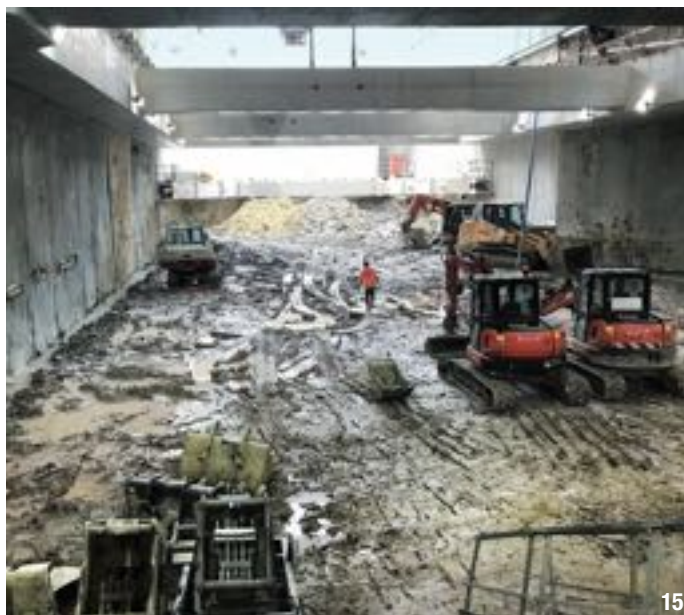
Le choix d'un tracé sous les carrières impliquait néanmoins une influence

14- Puits Robespierre (tunnelier Ouest) : réalisation du radier.

15- Gare de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart (T3B) - terrassement dans les Argiles Plastiques.

14- Robespierre shaft (West TBM): execution of foundation raft.

15- Fort-d'Issy-Vanves-Clamart Station (T3B) - earthworks in plastic clays.



15

© PHOTOTHÈQUE SETEC

plus forte de la présence des Argiles Plastiques : en effet, l'épaisseur résiduelle de calcaire sous le dernier niveau de carrières est de 10 m environ.

Avec un tunnelier de 10 m de diamètre, un front du tunnel pénétrant dans les Argiles Plastiques était inévitable. De nombreuses études et modélisations ont été réalisées afin d'identifier le positionnement idéal vis-à-vis des carrières :

- Soit s'éloigner le plus possible des carrières en privilégiant un tracé profond ;
- Soit s'en rapprocher afin de réduire la section excavée dans les Argiles Plastiques (figure 12).

Les premières approches par calculs aux éléments finis bidimensionnels ont montré que l'excavation du tunnel conduisait à une forte plastification des Argiles Plastiques, avec des déformations importantes et la mise en contact rapide du terrain avec la jupe du tunnelier.

Les volumes perdus (*volume loss*) obtenus dépassaient nettement les valeurs communément admises en première approche pour un creusement au tunnelier : ce sont en effet des volumes perdus de l'ordre de 2 à 3% qui sont calculés lorsque le front est entièrement dans les Argiles Plastiques sous une couverture de 30 à 45 m d'épaisseur. Ce niveau de plastification a conduit à mener une étude paramétrique à l'aide de plusieurs modèles 3D (tunnel entièrement dans les argiles ou en front mixte) permettant la prise en compte des carrières (modélisées de manière simplifiée en considérant un réseau de piliers avec ou sans remplissage de remblai ou injection entre les piliers), et une meilleure prise en compte des effets de voûte lorsque la plastification des argiles est forte.

Ces différents modèles (figure 13) ont montré que la deuxième solution était préférable : en effet, l'approfondissement du tracé en s'éloignant du plancher des carrières, avec une section plus importante excavée dans les Argiles Plastiques et des contraintes géostatiques fortes conduisait à une augmentation des déformations au niveau du plancher des carrières et une cuvette de tassements plus large, d'où un impact sur une largeur importante de carrière.

En se rapprochant des carrières, les tassements étaient légèrement réduits en pied de carrière mais surtout la cuvette était plus étroite.

L'analyse a également porté sur l'impact du creusement sur les déforma-



© PHOTO THÉRIE SETEC 16

CARACTÉRISTIQUES DU TUNNEL ET DES TUNNELIERS

- 7884 m de tunnel foré (hors gares) par deux tunneliers de conception similaire :
 - Tunnel Ouest du puits Robespierre jusqu'à la gare Fort-d'Issy-Vanves-Clamart (3 908 m)
 - Tunnel Est de la gare Arcueil-Cachan jusqu'à Villejuif-Louis-Aragon (Tir 1, 3 394 m) et de la gare Arcueil-Cachan jusqu'au puits Robespierre (tir 2, 667 m)
- 8 ouvrages annexes, dont trois réalisés à l'aide d'un tunnelier vertical (*Vertical Shaft Machine*)
- Diamètre intrados du tunnel : 8,7 m
- Diamètre extrados : 9,8 m
- Anneau composé de 7 voussoirs (épaisseur 40 cm) de largeur 2 m
- Tunneliers à pression de terre (diamètre de creusement 9,87 m)
- Puissance : 4 200 kW couple nominal de 16 353 kNm
- Poussée maximale du bouclier : 60 344 kN (350 bars de pression hydraulique) par l'intermédiaire de 28 vérins
- Pression maximale de confinement : 0,5 MPa dynamique à l'axe du tunnel (régulation automatique par injection d'air comprimée en calotte)
- Dispositif d'injection de boue bentonitique au travers de la jupe du tunnelier (trois rangées de six points d'injection)

16- Tunnelier en cours de réception en usine en juillet 2018 - démarrage prévu en janvier 2019 au puits Robespierre.

16- TBM during in-plant acceptance testing in July 2018 - start-up planned in January 2019 in the Robespierre shaft.

chettes, soit traitement à pied d'œuvre lorsque les emprises en surface ne sont pas disponibles.

Les modélisations ont également montré qu'une pression de confinement relativement élevée au niveau du front du tunnelier (type pression de terre) était nécessaire pour limiter les tassements au niveau des carrières et en surface. Il a ainsi été préconisé des pressions de confinement relativement fortes pouvant atteindre 200 à 250 kPa en voûte, nécessitant également une injection de bentonite le long de la jupe.

L'AVANCEMENT DES TRAVAUX EN OCTOBRE 2018 :

Les puits de départ des tunneliers sont creusés et en cours de préparation :
 → Puits Robespierre (tunnelier Ouest) : réalisation du radier (figure 14) ;
 → Gare d'Arcueil-Cachan : terrassement en cours de la boîte Est (puits de départ du tunnelier Est, figure 1).

Les gares sont en cours de terrassement, comme par exemple la gare de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart (figure 15) ou en cours de réalisation des parois moulées (Châtillon-Montrouge notamment). □

tions horizontales des piliers (cisaillement), avec ou sans traitement par injection. Il a finalement été retenu, lorsque cela était possible, un tracé conservant quelques mètres de calcaire entre la voûte du tunnel et le plancher des carrières (front mixte Argiles Plastiques/ Calcaire Grossier avec la voûte dans le Calcaire), associé à un traitement des carrières sur une bande de trente mètres de large.

En fonction de la sensibilité des avoisinants et de l'accessibilité des carrières, le traitement est de type soit comblement gravitaire plus clavage, soit injection sous pression avec tubes à man-

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris

MAÎTRISE D'ŒUVRE : groupement Setec (mandataire) - Ingerop et six architectes

COMPOSANTE GÉOTECHNIQUE DE LA MAÎTRISE D'ŒUVRE : Terrasol, Geos

ENTREPRISES : Groupement CAP (Vinci Construction Grands Projets ; Vinci Construction France, Dodin Campenon Bernard, Spie Batignolles Tpci, Botte Fondations, Spie Fondations)

AMO GÉOTECHNIQUE PHASES PRO ET TRAVAUX : Antéa

AMO GÉNÉRALE : Artemis

ABSTRACT

LINE 15 SOUTH OF THE 'GRAND PARIS EXPRESS' PROJECT: SECTION T3C DESIGN AND CHALLENGES

GUILLAUME PONS, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - HERVÉ LE BISSONNAIS, TERRASOL - GILLES CHAPRON, TERRASOL - PIERRE LOÏC VEYRON, SETEC TPI

Line 15 South is 33 km long and passes through 22 districts, linking the Pont-de-Sèvres and Noisy-Champs stations. All its stations will have connections with existing public transport lines. The line, which is the first work section of the 'Grand Paris Express' project, will come into service in the first half of 2025. This article describes more specifically the geotechnical challenges of work package T3C between Fort-d'Issy-Vanves-Clamart and Villejuif-Louis-Aragon stations. □

LA LÍNEA 15 SUR DEL GRAND PARIS EXPRESS: DISEÑO Y DESAFÍOS DEL TRAMO T3C

GUILLAUME PONS, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - HERVÉ LE BISSONNAIS, TERRASOL - GILLES CHAPRON, TERRASOL - PIERRE LOÏC VEYRON, SETEC TPI

De 33 km de longitud, la Línea 15 Sur une las estaciones de Pont-de-Sèvres y Noisy-Champs, atravesando 22 municipios. Todas sus estaciones estarán enlazadas con líneas de transporte público existentes. La línea, primer tramo en obras del proyecto de red de transporte Grand Paris Express, entrará en servicio durante el primer semestre de 2025. Este artículo hace especial hincapié en los desafíos geotécnicos del lote de obras T3C entre las estaciones de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart y Villejuif Louis Aragon. □



1
© ANDRA 2018

LE BIM POUR LES INFRASTRUCTURES... DÉJÀ LE BOUT DU TUNNEL ?

AUTEURS : MICKAEL BEAUFILS, RESPONSABLE INTEROPÉRABILITÉ DES SYSTÈMES D'INFORMATION, BRGM - NICOLAS DELRIEU, CHEF DE SERVICE MAQUETTE NUMÉRIQUE, SYNTHÈSE ET INFOGRAPHIE, ANDRA - CLAUDE DUMOULIN, PRÉSIDENT, DUMOULIN CONSEIL - FLORENT ROBERT, CHEF DU PÔLE PROCÉDÉS DE CONSTRUCTION, MARCHÉS ET EXÉCUTION, CETU - MICHEL RIVES, DIRECTEUR ASSOCIÉ, VIANOVA SYSTEMS

MINⁿD EST UN PROJET NATIONAL DE RECHERCHE COLLABORATIVE ET LE CHAPITRE FRANÇAIS DE *BuildingSMART INTERNATIONAL* POUR LES INFRASTRUCTURES, DONT ON POURRAIT RÉSUMER L'OBJET DE RECHERCHE EN : « LE BIM POUR LES INFRASTRUCTURES ». CE PROJET A DÉMARRÉ EN 2014 ARRIVE À SON ÉCHÉANCE FIN 2018, L'HEURE D'UN PREMIER BILAN A SONNÉ. PRÉSENTATION DES PREMIERS TRAVAUX, POUR L'UN DES NOMBREUX SUJETS TRAITÉS : LE BIM POUR LES INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES.

La première saison du projet Minⁿd arrive à son terme fin 2018. Avant d'entamer les épisodes de la nouvelle saison 2, faisons un point sur les premiers résultats de l'un des nombreux groupes de travail dénommé UC8, pour Use Case n°8, qui s'intéresse à la description des infrastructures souterraines et de l'environnement dans lequel elles se développent.

NOUS PARTÎMES 26... NOUS ARRIVÂMES 71

Les adhérents de ce projet national de recherche collaborative (figure 3), constitué des différents acteurs du secteur des travaux publics, tels que des maîtres d'ouvrage, exploitants d'infrastructures, ingénieries, industriels, éditeurs de logiciels, entreprises



Modélisation des INformations INteropérables
pour les INfrastructures Durables

2
© MINⁿD 2018

1- Coupe illustrant voussoirs et couche géologique extraite de la maquette numérique.

2- Le projet national Minⁿd : <https://www.minnd.fr/>.

1- Cross section illustrating segments and geological layer extracted from the digital model.

2- The Minⁿd national project: <https://www.minnd.fr/>.

71 PARTENAIRES



© MIN'D 2018

3

de travaux, organismes de recherches, bureaux de contrôle, etc. ont grandement contribué à faire "monter en maturité BIM" les acteurs du secteur des travaux publics, mais ils tentent également d'apporter des réponses concrètes et opérationnelles, dans la mise en œuvre du BIM pour les infrastructures. Cela consiste, notamment, à faire progresser la structuration et l'utilisation des informations à échanger dans les projets, pendant leur cycle de vie complet : conception, construction, exploitation et maintenance. Les différents résultats devraient être publiés durant l'année 2019.

Au travers de ses groupes de travail et des différents échanges qu'ils ont occasionnés, le projet national Min'd

3- Les 71 partenaires de la saison 1 du projet national Min'd.

4- Illustration tirée d'un film immersif réalisée à partir de la maquette numérique.

3- The 71 partners of season 1 of the Min'd national project.

4- Illustration taken from an immersive film produced based on the digital model.

n'a cessé de rassembler les acteurs représentatifs du monde de l'infrastructure, de les accompagner pour exprimer leurs besoins, de les comprendre, de leur faire connaître les besoins des autres acteurs et d'agréger leurs compétences et expériences respectives, afin d'aboutir au meilleur consensus possible.

En faisant contribuer l'ensemble de ces acteurs et l'ensemble des métiers, qui les composent, le projet national Min'd a fait de la France l'un des pays les plus impliqués dans les travaux de pré-normalisation. Il apporte une contribution majeure dans les tous les domaines de la norme *Industry Foundation Classes* (IFC) : Bridge, Road, Rail, Tunnel et Geotech.

LE BIM NE SE RÉSUME PAS AU BÂTIMENT... OUI, MAIS CONCRÈTEMENT POUR UN TUNNEL CELA DONNE QUOI ?

Les domaines ou disciplines ont été abordés, successivement et suivant les différents besoins exprimés par l'ensemble des adhérents du projet Min'd.

Au travers des divers manques identifiés et de l'ordre des priorités établis par le comité de pilotage du projet, c'est en juillet 2017 que le projet national a pris la décision de constituer un groupe de travail spécifique pour les infrastructures souterraines (figure 4). L'une des spécificités qui caractérise les projets d'infrastructures réside dans l'intégration et l'interface entre les ouvrages construits et l'environnement, qu'elles traversent.

Une infrastructure ne peut se concevoir ni se réaliser sans prise en compte du territoire dans lequel l'ouvrage viendra s'intégrer.

C'est vrai pour une route ou un pont, c'est encore plus vrai pour un tunnel, pour lequel le sol qui l'environne est très structurant, tant au niveau de son dimensionnement, qu'en terme de méthodes constructives.

NON PLUS : DU SOL AU PLAFOND... MAIS DE LA SCIENCE DES SOLS AU GÉNIE CIVIL

L'action du groupe de travail UC8 vise à proposer une pré-normalisation d'un ensemble d'entités susceptibles de décrire les composants de tels projets, comme les tunnels, puits, rameaux - génie civil et les équipements, mais aussi l'environnement au sens général : sol, sous-sol naturel et avoisinants (figure 1) avec un focus sur la partie



© ANDRA 2018

4



setec



5 © DR

avant-projet et projet aboutissant à la formalisation des pièces de marché pour le choix des entreprises de construction.

Ces sujets sont traités par deux sous-groupes : le groupe UC8-GC pour les aspects Génie Civil et Équipements ; le groupe UC8-GT pour la géotechnique et l'environnement. L'interaction entre les deux groupes étant gérée de manière bilatérale.

**DES RÈGLES DE L'ART...
AUX MÉTHODOLOGIES
DE DÉVELOPPEMENT DE L'IFC**

Le groupe UC8-GC (figure 5), représente aujourd'hui 20 personnes issues de 10 organismes.

La première partie du travail de l'UC8-GC a consisté à définir, à défaut de

référence existante, une décomposition d'une infrastructure souterraine équipée d'un transport guidé en un ensemble de 12 sous-systèmes fonctionnels regroupés en 2 catégories (figure 6) :

→ Le génie civil : soutènement, revêtement, étanchéité, espaces des circulations, dispositions constructives ;

→ Les équipements : assainissement, géothermie, ventilation, énergie, défense incendie, secours-évacuation, équipements énergisés de gestion.

Le cheminement suivi par l'UC8-GC pour expliciter et consolider la description de ces sous-ensembles fonctionnels a consisté à suivre un cycle en V passant par les étapes suivantes (figure 7) :

5- Les membres du groupe de travail UC8-GC.

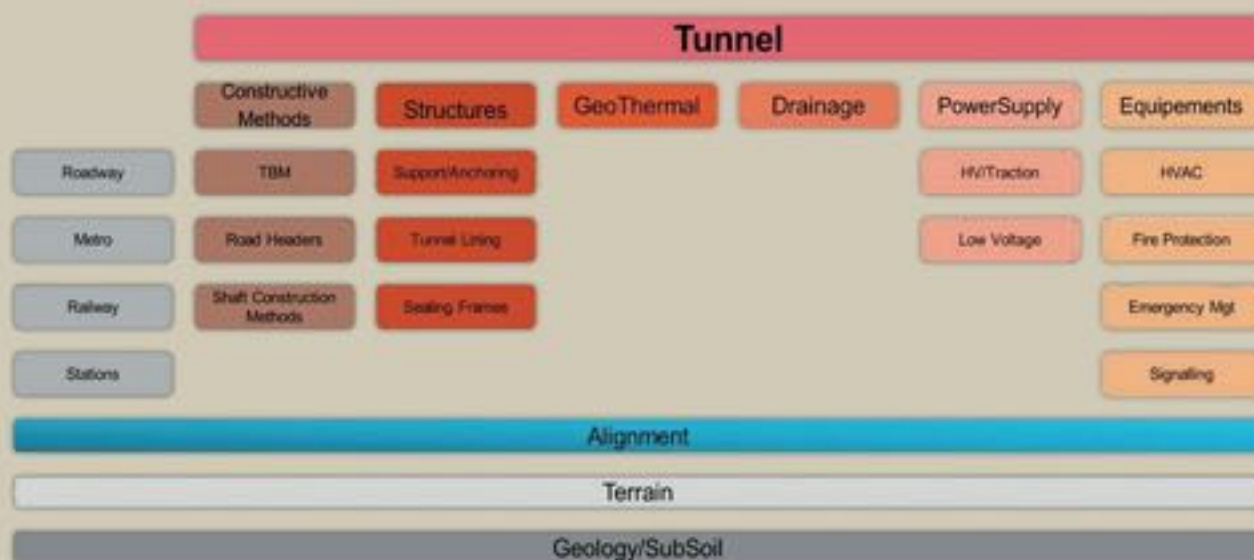
6- Décomposition d'une infrastructure souterraine équipée d'un transport guidé en 12 sous-systèmes.

5- Members of working group UC8-GC.

6- Breakdown of an underground infrastructure equipped with a guided transport system into 12 sub-systems.

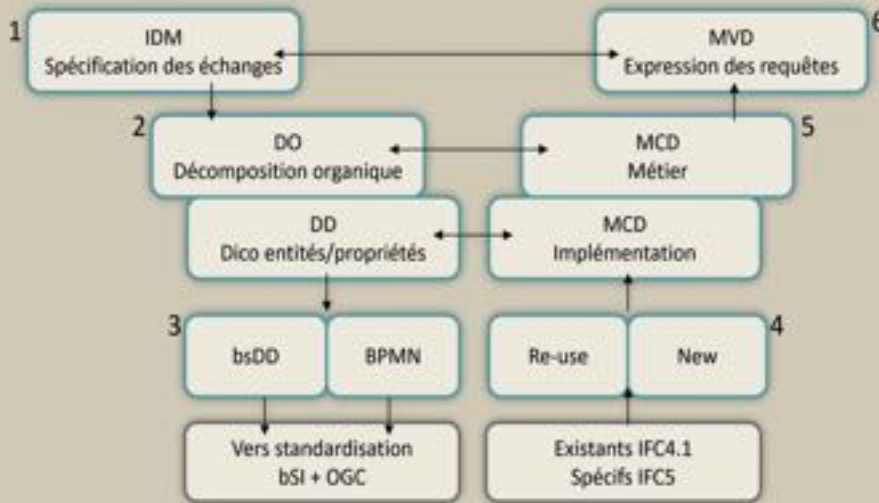
- 1- Description des échanges entre concepteurs de chacun des sous-systèmes ;
- 2- Production du *Information Delivery Manual* (IDM) ;
- 3- Décomposition organique de chacun des sous-systèmes et analyse de leur cohérence avant compilation en une décomposition organique globale ;
- 4- Description des échanges inter-phases au niveau des entités et caractérisation de leurs propriétés (y compris leur typologie spatiale) ;
- 5- Production d'un dictionnaire de données (DD) depuis la décomposition organique globale pour la préparation du reversement dans le bsDD (DD au format *BuildingSMART International* (BSI) via un script développé pour Min'd).

DÉCOMPOSITION D'UNE INFRASTRUCTURE SOUTERRAINE ÉQUIPÉE D'UN TRANSPORT GUIDÉ EN 12 SOUS-SYSTÈMES



6 © MIN'D 2018

LE CYCLE EN V DE LA MÉTHODOLOGIE SUIVIE POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'IFC



IDM : décomposition des échanges :

- Pourquoi (vue opérationnelle)
- Quoi (vue fonctionnelle)
- Comment (vue organique)

DO : décomposition système(s) funct :

- Composants
- Propriétés
- Relations

**DD : dictionnaire des entités
bSDD : DD au formalisme bSI**

MCD : organisation des entités

- Utilisation de classes existantes
- Création de nouvelles classes

MVD :

- Expression du besoin métier
- Rédaction de la requête IFC

© MIND 2018
7

Au-delà du jargon spécifique à la méthodologie imposée par BSI, la démarche consiste, à partir d'une expression de besoin métier, à franchir toutes les étapes nécessaires pour obtenir une réponse informatique satisfaisant le besoin métier exprimé. À l'issue de cette phase, plusieurs sessions tripartites ont été organisées pour soumettre et recueillir l'avis d'experts (génie civil et équipements) appartenant à d'autres organismes majeurs, tels que le Cetu, le Cerib, l'Andra, la Ratp, et Snfc Réseau ; ce faisant nous avons consolidé au fil

7- Le cycle en V de la méthodologie suivie pour le développement de l'IFC.

8- Les membres du groupe de travail UC8-GT.

7- The V cycle of the methodology followed for the development of IFC.

8- Members of working group UC8-GT.

de l'eau la production de l'UC8-GC. La seconde partie du travail, démarrée en biseau avant la fin de la précédente, porte d'une part sur la spécification des classes d'objets IFC manquants pour assurer la production d'échanges en capacité de porter les entités et leurs caractéristiques identifiées aux dictionnaires d'objets et d'autre part sur le portage du sujet IFC Tunnel au niveau international (BSI). Elle comporte 2 volets : un volet technique qui consiste à produire des recommandations selon le formalisme IFC pour être en capacité d'argumenter avec

les développeurs des prénormes de chez BSI ; un autre volet consistant à rechercher des adhésions d'organismes à l'international autour de nos préconisations.

Sur le premier volet, a été développé un *process map global* (au formalisme BPMN) des étapes, des acteurs et des échanges associés au développement d'un projet d'infrastructure souterraine, d'une part, et monté un certain nombre de typologies d'échanges, d'autre part, tels que *Model View Definition (MVD)* qui sont autant de filtres via lesquels les échanges entre les concepteurs d'un



© DR
8

sous-système ou d'un projet sont susceptibles d'être réalisés via les futurs transcodeurs à implémenter dans les outils de design.

Sur le second volet, nous avons mis sur pied un plan d'action visant à rencontrer les homologues internationaux de l'Andra, de la Ratp et de SnCF Réseau, pour monter un certain consensus international autour de nos préconisations. L'étape initiale de ce volet a permis de recueillir l'adhésion - en ressources techniques comme en apport financier - des chemins de fer suisses (Cff/Sbb). Ce plan d'action court sur toute la fin 2018 et d'autres partenaires ont déclaré leur intérêt pour la démarche.

**DE LA GÉOLOGIE...
AU DIMENSIONNEMENT
DES OUVRAGES**

Le groupe UC8-GT (figure 8), représentée aujourd'hui 40 personnes issues de 15 organismes. La plupart sont des géotechniciens, travaillant en bureau d'études, avec un cursus initial en géosciences. Il est à noter que

le nombre de participants à l'initiative est croissant depuis le début du projet, tous démontrant un fort intérêt pour la standardisation des données géotechniques.

Les principales sources d'inspiration et les retours d'expérience des participants viennent de leur contribution aux projets de grands tunnels (type Lyon-Turin), aux grands projets urbains (type Grand Paris) et d'infrastructures souterraines complexes, principalement équipés de rail, le tout aussi bien en France qu'à l'étranger.

La première action a visé à définir le périmètre dit "de la géotechnique".



© ogc
9

9- Logo de l'Open Geospatial Consortium (OGC).

10- Cycle de vie d'un ouvrage.

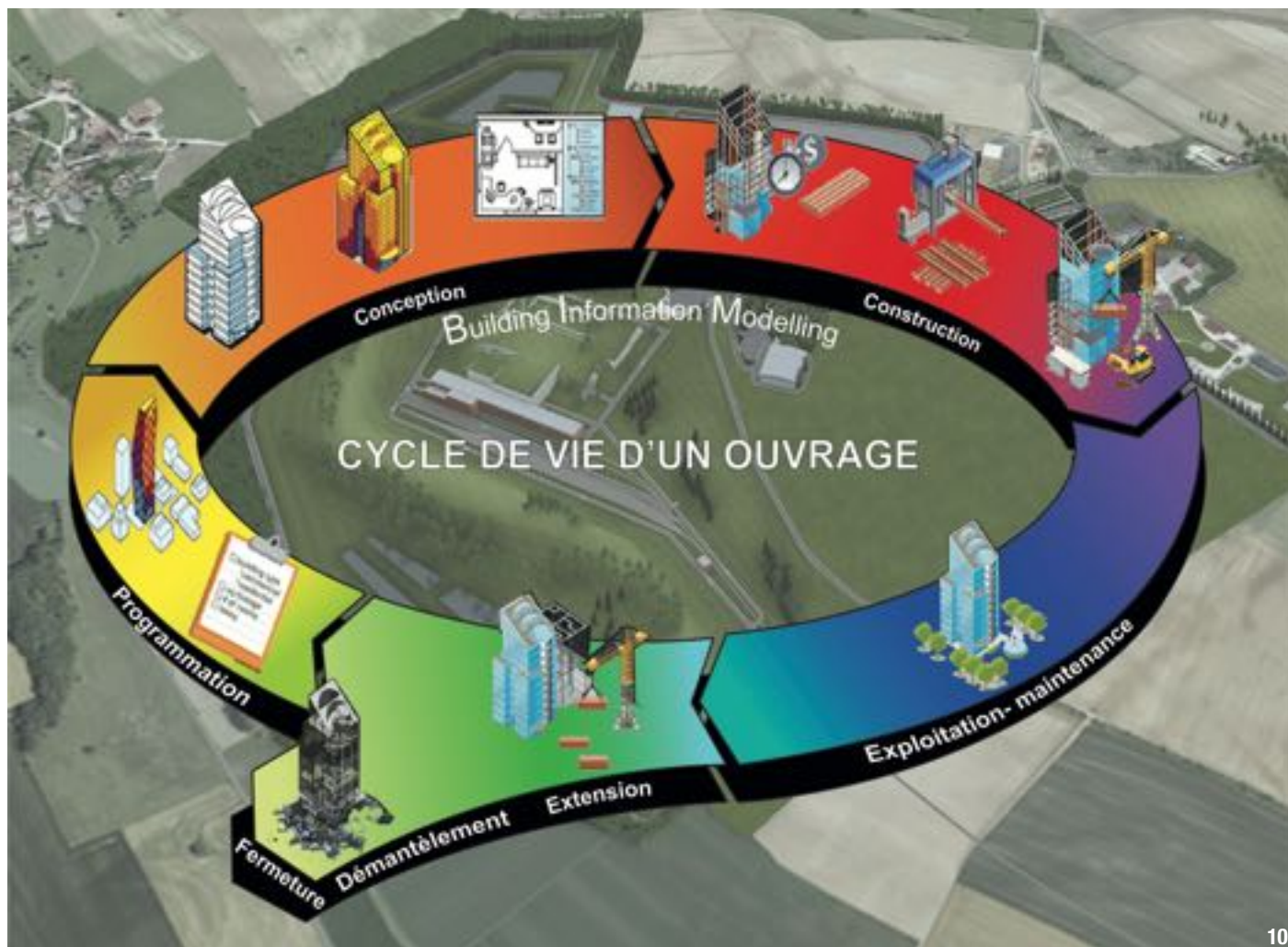
9- Logo of the Open Geospatial Consortium (OGC).

10- Life cycle of a structure.

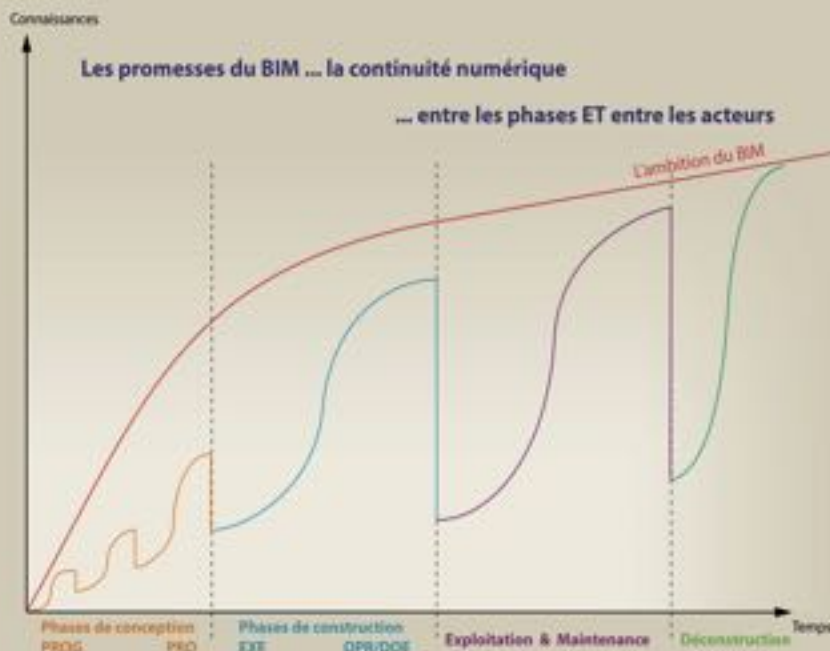
Le groupe s'appuie ainsi sur la norme NFP 94-500 et les guides d'application associés venant de l'Aftes. Neufs sujets ont alors été identifiés : reconnaissances de terrain, modélisation géologique, hydrogéologique et géotechnique, dimensionnement des infrastructures, choix des méthodes de construction, détermination de la pollution du sol et gestion des terres excavées, impact sur les avoisinants, gestions des risques. Des *Information Delivery Manuals (IDM)* incluant une *process map* couplée à un glossaire ont été réalisés pour chacun des sujets listés.

Les IDM ont permis d'identifier les échanges de données entre les différents acteurs. Les actions en cours visent à définir un Modèle Conceptuel de Données (MCD) mettant en relation les informations décrites.

Un effort tout particulier est fait sur l'inscription des travaux dans les initiatives existantes pour la standardisation des données pour les géosciences, menées notamment au sein de l'*Open Geospatial Consortium (OGC)* (figure 9).



LA CONTINUITÉ NUMÉRIQUE "INTERPHASES "



© ANDREA 2018

11

Des discussions sont en cours afin d'étendre le travail de l'UC8-GT à l'international et ainsi aboutir à une description standardisée des données géotechniques. Les échanges se font via l'*Integrated Digital Built Environment* (IDBE), groupe joint entre OGC et BSI.

ENFIN LE BOUT DU TUNNEL ?... LA BOUCLE EST BOUCLÉE ?

Durant les années 2017 et 2018, le groupe de travail UC8, a bien avancé sur la partie programmation et conception d'un projet d'infrastructure souterraine, mais il reste de nombreuses choses à faire. Pour répondre aux promesses enthousiasmantes du BIM et se saisir réelle-

ment des opportunités, qu'il pourrait offrir, il faudra couvrir l'ensemble du cycle de vie (figure 10), d'une part, et s'assurer qu'au niveau opérationnel, de la possibilité de passer des usages envisagés à une utilisation au quotidien du BIM pour la gestion de projet et ce

11- La continuité numérique "interphases".

11- "Interphase" digital continuity.

pour la totalité des acteurs concernés, d'autre part.

Sur le sujet "reste à faire" pour l'ensemble du cycle de vie, les partenaires de l'UC8 sollicitent au travers de cet article, l'ensemble des acteurs français souhaitant contribuer à l'avancée du BIM pour les tunnels, à venir renforcer les équipes de contributeurs actifs. Le groupe de travail recherche plus particulièrement des équipes de fabricants de tunneliers, des équipes de suivi de chantier, des équipes supports aux chantiers d'entreprise de réalisation, ainsi que des équipes d'exploitant-mainteneur d'ouvrages souterrains. Au-delà des sujets spécifiques traités par l'UC8, le projet national Min'd reste

ouvert à toutes les entités qui cherchent à faire évoluer la filière des travaux publics au travers du BIM. Il apparaît nécessaire qu'un plus grand nombre de donneurs d'ordre, de maîtrises d'ouvrage publiques et d'exploitants-mainteneurs, se réunisse au sein du projet Min'd pour qu'il soit le plus représentatif possible de l'ensemble de la filière et afin d'assurer une transition pragmatique et pérenne de la gestion contractuelle "traditionnelle" type loi MOP à la gestion de projet en BIM.

Il est important de partager les points de vue et de dégager de véritables consensus au niveau de la filière TP, sur ce qu'il est raisonnable de demander aujourd'hui et ce qui le sera demain. Se dégagent plus particulièrement différents enjeux liés à la revue de projet numérique, à la synthèse technique, au suivi d'avancement aussi bien en phase de conception qu'en phase de réalisation, à la continuité numérique interphases (figure 11), au gros travail de passage de témoin du DOE numérique au démarrage de l'exploitation.

Il convient d'ajouter des sujets primordiaux tels que le suivi des plannings "4D" (projet et contractuels), des coûts "5D" et l'approbation des "livrables BIM" au regard des performances attendues.

Ce sont de grandes ambitions avec de nombreux défis à relever. Les membres de l'équipe UC8-GT veulent être des acteurs de la transition numérique du secteur et inventer les Travaux Publics de demain. Le BIM et les transformations qu'il engendre ne doit pas faire peur mais, au contraire, être considéré comme une réelle opportunité pour tous. À l'occasion de la deuxième saison du projet national Min'd qui démarrera au deuxième trimestre 2019, ils invitent de nouveaux partenaires à les rejoindre. □

ABSTRACT

BIM FOR INFRASTRUCTURE... END OF THE TUNNEL ALREADY?

MICKAEL BEAUFILS, BRGM - NICOLAS DELRIEU, ANDRA - CLAUDE DUMOULIN, DUMOULIN CONSEIL - FLORENT ROBERT, CETU - MICHEL RIVES, VIANOVA SYSTEMS

The first season of the Min'd project was completed at the end of 2018.

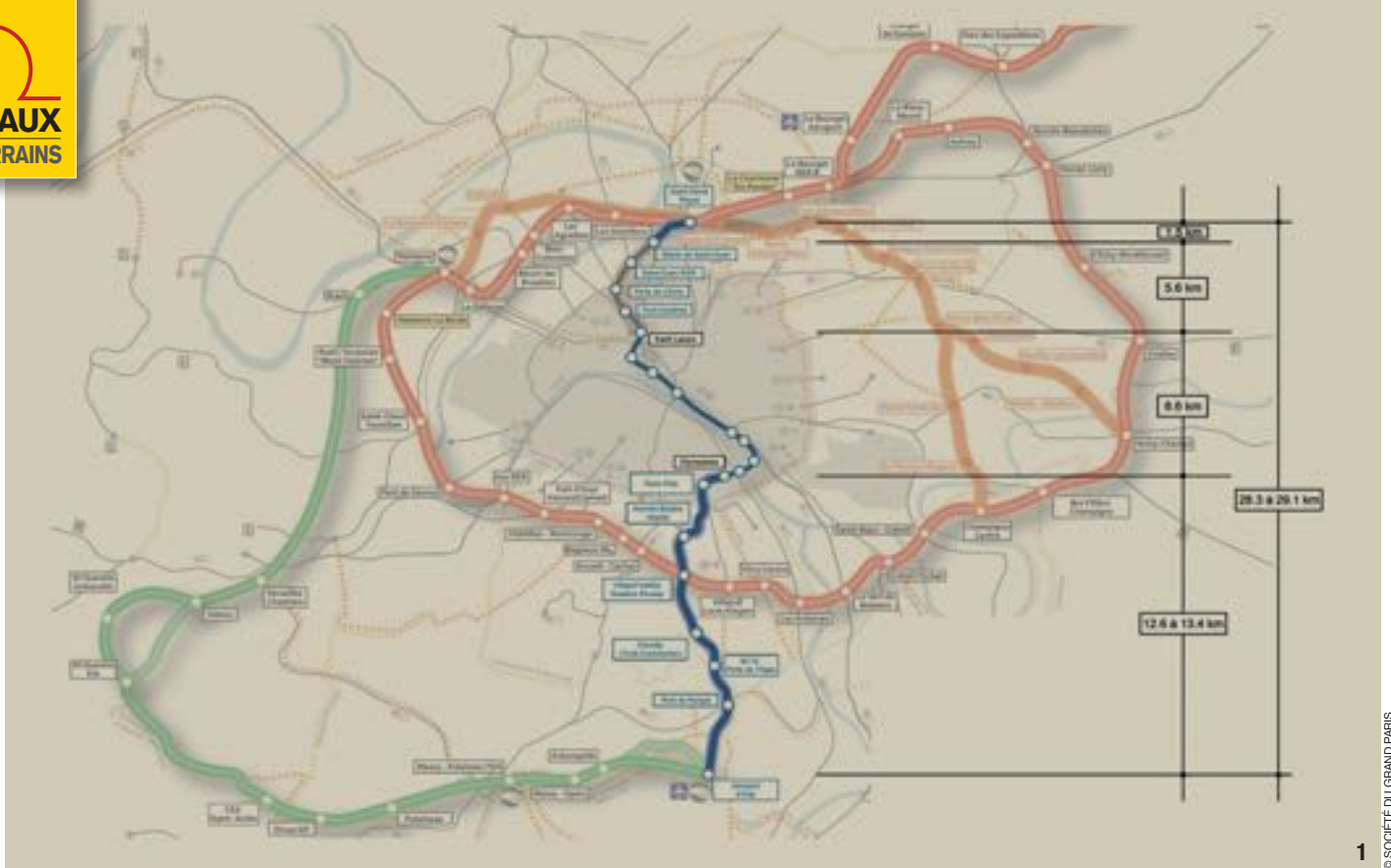
It aimed to "heighten the BIM maturity" of construction players, to contribute operational solutions in the implementation of BIM for infrastructure, and to achieve progress in the organisation and use of information to be exchanged in projects, during their complete life cycle. This article reviews the initial results of one of the working groups called Use Case No. 8: Underground infrastructure and its environment. The second season of the Min'd collaborative research project is expected to start in the second quarter of 2019. It is hoped to attract new partners. □

EL BIM PARA LAS INFRAESTRUCTURAS... ¿AL FINAL DEL TÚNEL?

MICKAEL BEAUFILS, BRGM - NICOLAS DELRIEU, ANDRA - CLAUDE DUMOULIN, DUMOULIN CONSEIL - FLORENT ROBERT, CETU - MICHEL RIVES, VIANOVA SYSTEMS

La primera temporada del proyecto Min'd concluye a finales de 2018.

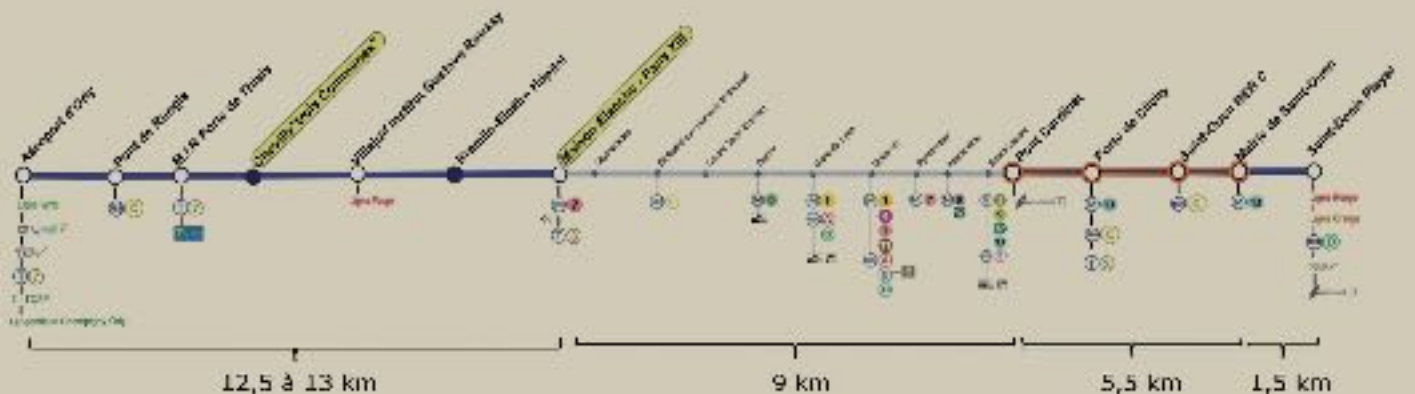
Ha consistido en reforzar las competencias en BIM de los actores del transporte público, aportar soluciones operativas en la implementación del BIM para las infraestructuras y avanzar en la estructuración y el uso de la información intercambiada durante los proyectos a lo largo de todo su ciclo de vida. Este artículo analiza los primeros resultados de uno de los grupos de trabajo, denominado Use Case n°8: infraestructuras subterráneas y su entorno. La segunda temporada del proyecto de investigación colaborativa Min'd debería comenzar en el segundo trimestre de 2019. Sus responsables desean atraer a nuevos colaboradores. □



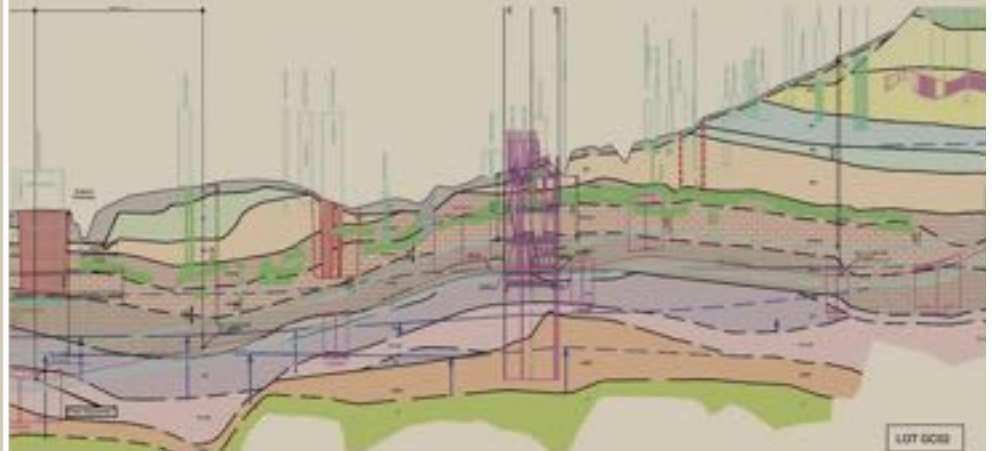
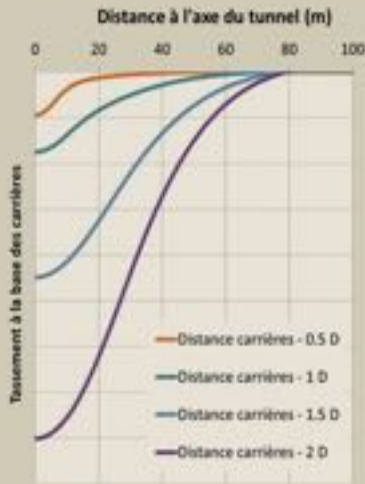
PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 AU SUD - CONCEPTION DES STRUCTURES SOUTERRAINES (TUNNEL, OUVRAGES ANNEXES ET GARES)

AUTEURS : FRANCIS LANQUETTE, RESPONSABLE MAÎTRISE D'ŒUVRE TUNNEL ET OUVRAGES ANNEXES, SETEC TPI -
DANIEL PRATS, RESPONSABLE MAÎTRISE D'ŒUVRE GARES, SETEC TPI

L'ARTICLE TRAITE DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 AU SUD, ET PLUS PARTICULIÈREMENT DES OUVRAGES DE CONCEPTION TECHNIQUE SETEC, MANDATAIRE DU GROUPEMENT ELIOS EN CHARGE DE LA MAÎTRISE D'ŒUVRE DE CE PROLONGEMENT. CELA CONCERNE LE TRONÇON NORD QUI PART DE L'OUVRAGE ANNEXE JEAN-PROUVÉ INCLUS JUSQU'À LA GARE DE MAISON-BLANCHE-PARIS-XIII (MBP) EXCLUE, QUI COMPREND 4,6 km DE TUNNEL, 5 OUVRAGES ANNEXES ET LA GARE DE KREMLIN-BICÊTRE-HÔPITAL (KBH), ET 2 GARES DU TRONÇON CENTRE-CHEVILLY-TROIS-COMMUNES (C3C) ET MIN-PORTE-DE-THIAIS (PDT).



PROFIL EN LONG DU TUNNEL - PASSAGE SOUS LES CARRIÈRES



PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

LA LIGNE 14 AUJOURD'HUI

La Ligne 14 du métro, entièrement automatique, a été mise en service progressivement en plusieurs phases depuis 1998. À ce jour, la Ligne s'étend de la gare Saint-Lazare à la station Olympiades. Longue de 8,6 kilomètres et comptant 9 stations, son inter-station moyenne est d'environ 1 km. Cela lui confère une vitesse commerciale élevée (39 km/h contre 20 km/h en moyenne pour les autres lignes du réseau de métro), ce qui contribue à son attractivité.

LA LIGNE 14 DANS LE RÉSEAU DE TRANSPORT DU GRAND PARIS

Le Grand Paris Express prévoit le prolongement de la Ligne 14 du métro parisien, au nord et au sud, dans le cadre du programme de la Ligne "bleue". Au terme des prolongements Nord et Sud, la longueur de la Ligne 14, entre Saint-Denis-Pleyel et Orly, sera d'environ 28 km. Elle comportera 21 gares et 2 sites de maintenance et de remisage. Les rames sur pneus, mesurant 120 m de long, auront un intervalle de passage de 85 secondes (figures 1 et 2).

LA LIGNE 14 SUD (L14S)

Le prolongement de la Ligne 14 au sud relie Paris à l'aéroport d'Orly par un tunnel de 12,5 km environ. Il comporte les 7 nouvelles gares suivantes :

- Maison-Blanche-Paris-XIII (MBP) ;
- Kremlin-Bicêtre-Hôpital (KBH) ;
- Villejuif-Institut-Gustave-Roussy (IGR) - sous maîtrise d'œuvre Setec (MOA SGP) dans le cadre de la Ligne 15 ;
- Chevilly-Trois-Communes (C3C) ;
- M.I.N.-Porte-de-Thiais (PDT) ;
- Pont-de-Rungis (PDR) ;
- Aéroport-d'Orly (ORY) - sous conception ADP.

Il est relié à son extrémité Sud par une tranchée couverte à un site de maintenance et de remisage, situé à Morangis.

1- Insertion de la Ligne 14 dans le Réseau de Transport du Grand Paris.

2- Synoptique de la Ligne 14 à terme.

3- Calcul des tassements en pied de carrières en fonction de la couverture du tunnel.

4- Profil en long du tunnel - passage sous les carrières.

5- Vue 3D de l'ouvrage annexe République.

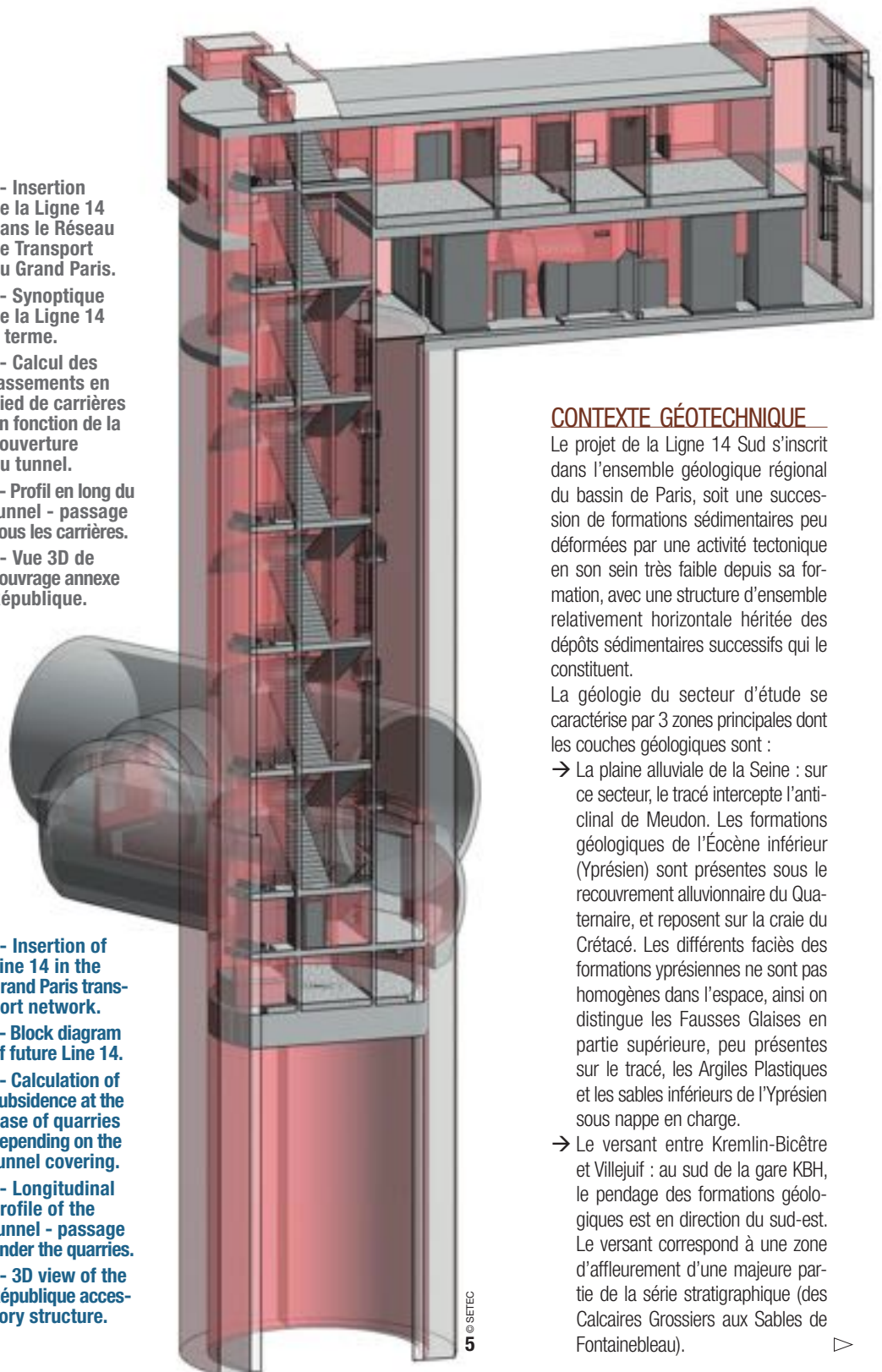
1- Insertion of Line 14 in the Grand Paris transport network.

2- Block diagram of future Line 14.

3- Calculation of subsidence at the base of quarries depending on the tunnel covering.

4- Longitudinal profile of the tunnel - passage under the quarries.

5- 3D view of the République accessory structure.



CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Le projet de la Ligne 14 Sud s'inscrit dans l'ensemble géologique régional du bassin de Paris, soit une succession de formations sédimentaires peu déformées par une activité tectonique en son sein très faible depuis sa formation, avec une structure d'ensemble relativement horizontale héritée des dépôts sédimentaires successifs qui le constituent.

La géologie du secteur d'étude se caractérise par 3 zones principales dont les couches géologiques sont :

- La plaine alluviale de la Seine : sur ce secteur, le tracé intercepte l'anticlinal de Meudon. Les formations géologiques de l'Éocène inférieur (Yprésien) sont présentes sous le recouvrement alluvionnaire du Quaternaire, et reposent sur la craie du Crétacé. Les différents faciès des formations yprésiennes ne sont pas homogènes dans l'espace, ainsi on distingue les Fausses Glaises en partie supérieure, peu présentes sur le tracé, les Argiles Plastiques et les sables inférieurs de l'Yprésien sous nappe en charge.
- Le versant entre Kremlin-Bicêtre et Villejuif : au sud de la gare KBH, le pendage des formations géologiques est en direction du sud-est. Le versant correspond à une zone d'affleurement d'une majeure partie de la série stratigraphique (des Calcaires Grossiers aux Sables de Fontainebleau).

→ Le plateau Tertiaire de Villejuif à Orly : les formations de l'Oligocène surmontent les couches géologiques citées précédemment. Leurs épaisseurs relativement constantes sur tout le plateau en fait un milieu uniforme le long du tracé.

LE TUNNEL NORD

LE TRACÉ

Le tracé du tronçon Nord du tunnel est déterminé par les trois principales contraintes suivantes :

- Au sud de la gare MBP, la présence du déversoir d'orage de la Bièvre impose une pente maximale de 43 mm/m pour que le tunnelier puisse passer avec une couverture suffisante (d'environ 2,50 m) sous le réseau.
- La présence des anciennes carrières de Calcaire Grossier, sur 1,6 km ; ce point sera développé par la suite.
- Le passage dans la gare IGR, réalisée sous maîtrise d'ouvrage SGP dans le cadre de la Ligne 15 Sud, qui fixe le tracé en plan et le profil en long de la ligne.

La partie Nord du tracé située sous les communes de Paris et du Kremlin-Bicêtre sont densément bâties, toutefois les conflits avec les fondations profondes des bâtiments ont pu être évités sans impact majeur sur le tracé. En particulier, des essais sismiques menés sur les fondations profondes de certains bâtiments ont permis de lever l'incertitude sur la longueur des pieux potentiellement dans la trace du tunnel.

LA RÉALISATION DU TUNNEL

L'ensemble du linéaire de tunnel du prolongement Sud est excavé à l'aide de 3 tunneliers, dont la cinématique est la suivante :

- Le tronçon Nord, d'une longueur de 4,6 km, est foré depuis l'ouvrage annexe Jean-Prouvé jusqu'à la gare Maison-Blanche-Paris-XIII, où le tunnelier n'est que partiellement démonté ;
- Le tronçon central, d'une longueur de 3,9 km, est foré depuis la gare Pont-de-Rungis jusqu'à l'ouvrage annexe Jean-Prouvé ;
- Le tronçon Sud, d'une longueur de 3,9 km, est foré depuis le puits de service Morangis jusqu'à la gare Pont-de-Rungis.

En gare, les tunneliers sont ripés sur les radiers définitifs, hormis pour les gares de Porte-de-Thiais et Aéroport-d'Orly, où ils traversent les boîtes gare en pleine terre.

Sur chaque tronçon, l'emploi d'un tunnelier à pression de terre est le plus adapté, en particulier en raison des horizons karstiques et de la proximité des carrières sur le tronçon Nord.

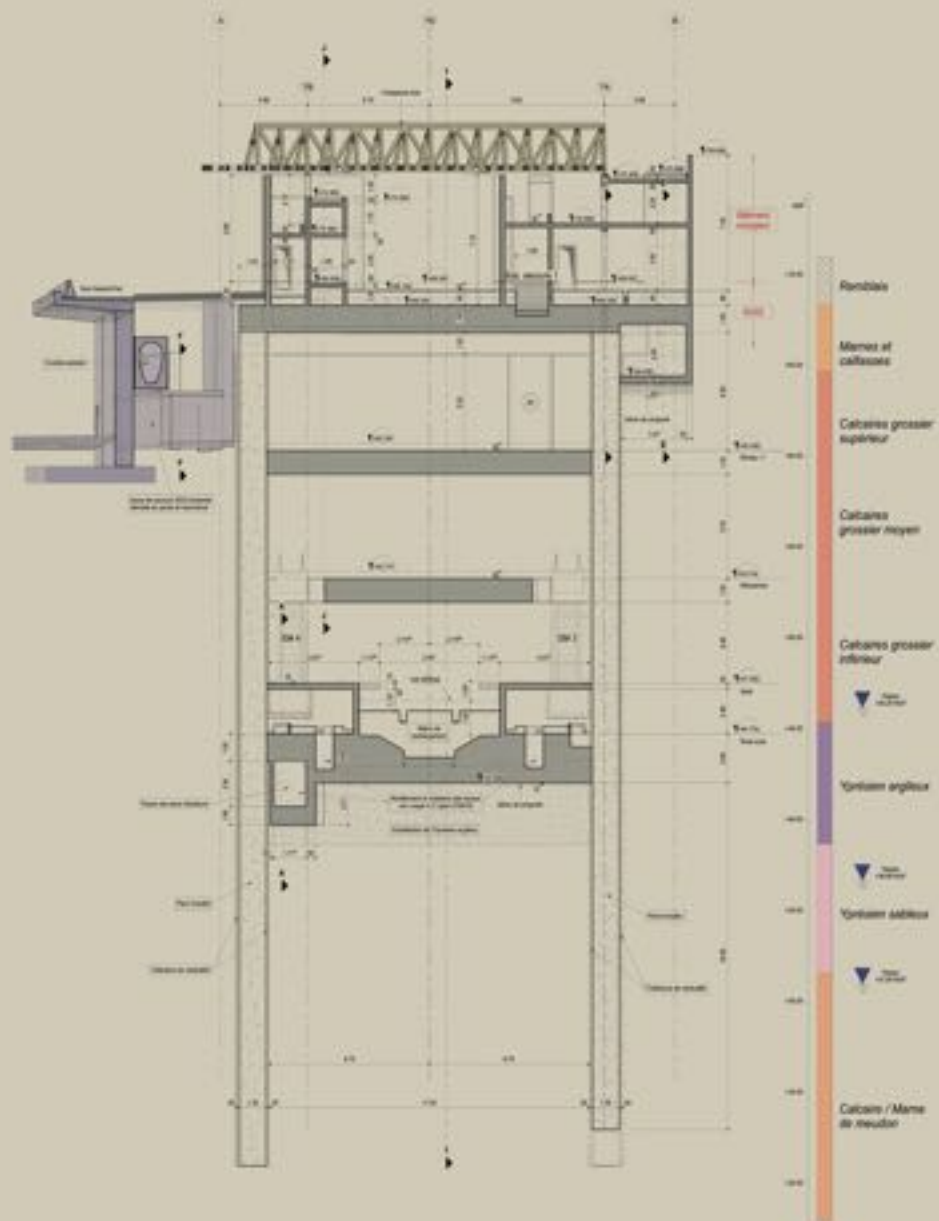
6- KBH - Implantation.
7- KBH - Coupe géotechnique.

6- KBH - Layout.
7- KBH - Geo-technical cross section.



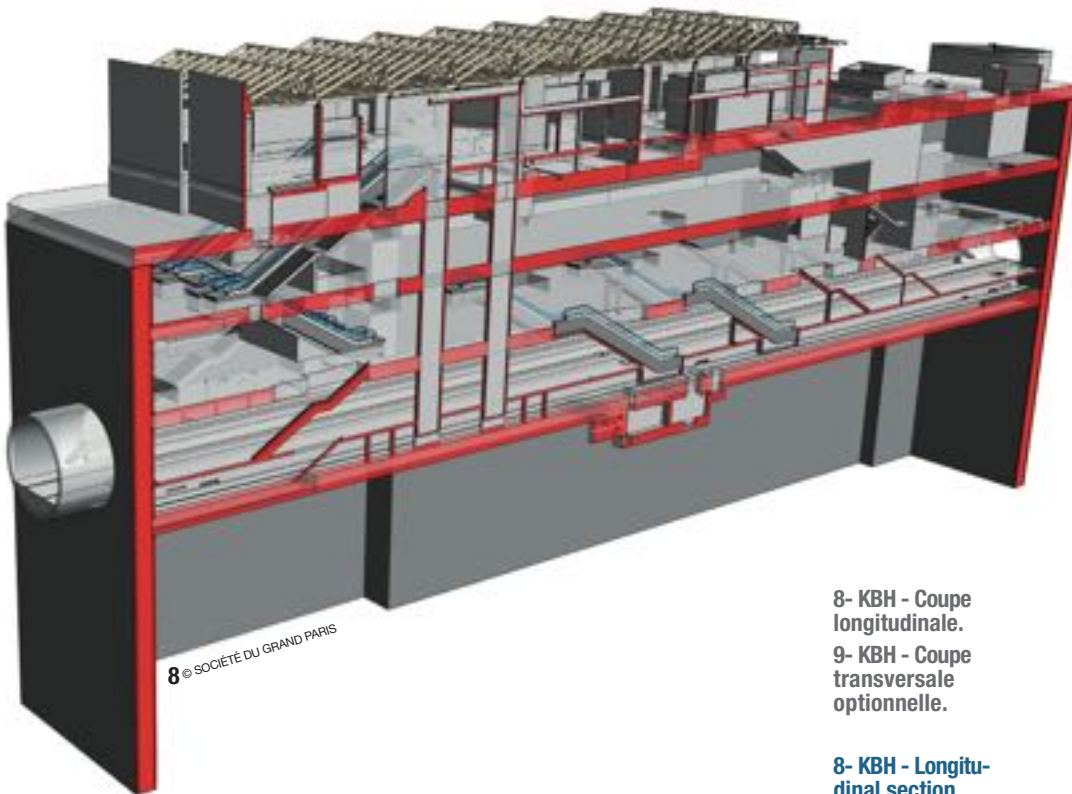
© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

KBH - COUPE GÉOTECHNIQUE



7

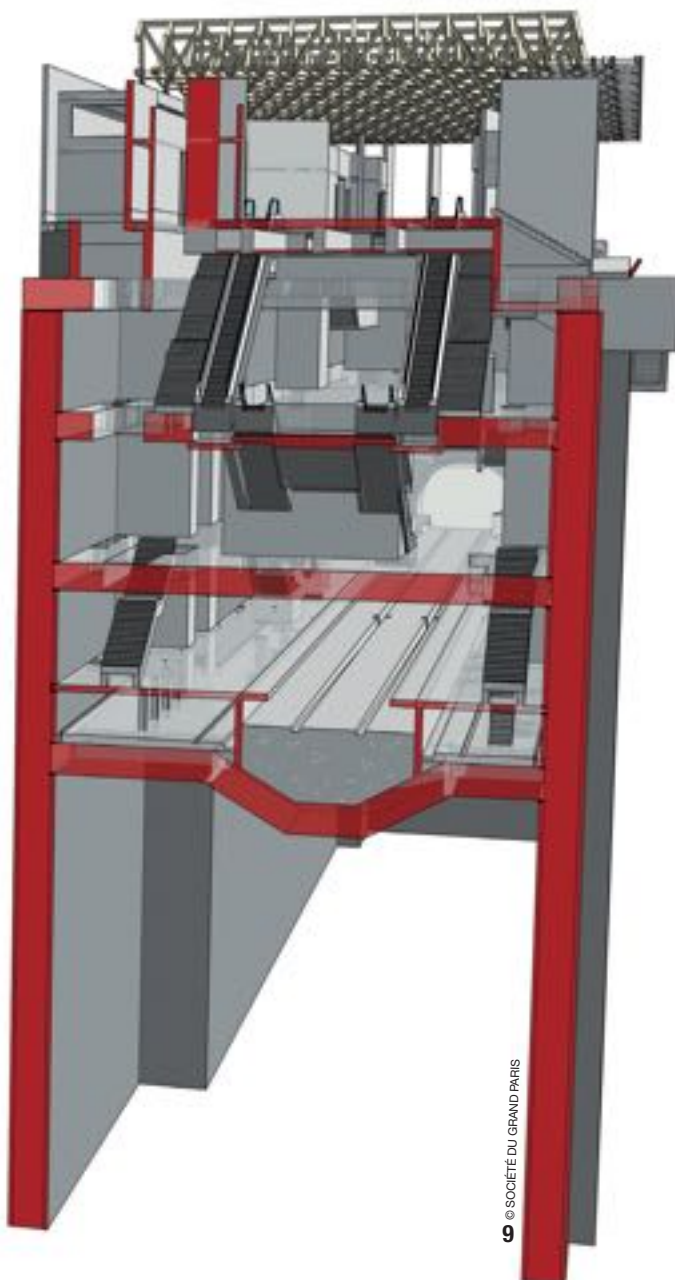
© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS



8 © SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

8- KBH - Coupe longitudinale.
9- KBH - Coupe transversale optionnelle.

8- KBH - Longitudinal section.
9- KBH - Optional cross section.



9 © SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

Le diamètre intérieur du tunnel est de 7,75 m (7,55 m de diamètre utile + 2x10 cm de tolérance). L'épaisseur des voussoirs retenue sur le tronçon Nord est de 35 cm.

LES ENJEUX MAJEURS DU TRONÇON NORD DU TUNNEL

Le passage sous les carrières

Sur une longueur de 1,6 km, le tracé du tunnel intercepte une zone d'exploitation ancienne du Calcaire Grossier, sous la commune du Kremlin-Bicêtre. Les carrières, présentes sur un à trois niveaux, sont répertoriées sur des cartes établies par l'Inspection Générale des Carrières.

L'exploitation de ces cartes a permis, à l'issue des études d'avant-projet et après une campagne de reconnaissance dense dans le coteau de Villejuif, de concevoir un tracé de tunnel évitant l'interception des niveaux de carrières. En altimétrie, le tunnel est implanté de manière à conserver une couverture minimale de 3 m du plancher du niveau de carrière le plus bas en supposant la présence de 3 niveaux d'exploitation sur le linéaire concerné, permettant ainsi de réduire le risque lié à l'incertitude sur l'altimétrie des exploitations. Le profil en long a été défini de façon à avoir un front plein dans les Calcaires Grossiers, autant que possible. En effet, les calculs aux éléments finis (réalisés en 2D et 3D avec différentes configurations de front d'excavation) montrent que les tassements imposés aux carrières

sont minimisés lorsque le front est principalement situé dans les Calcaires Grossiers, malgré la réduction de couverture. Dès que la proportion d'Argiles Plastiques dans ce front augmente, les tassements en pied de carrière s'accroissent en valeur absolue (figure 3). Afin d'éviter tout risque d'une déstabilisation des carrières liée aux déformations et aux vibrations induites par le passage du tunnelier, les niveaux situés à l'aplomb du tunnelier sont systématiquement comblés par des injections gravitaires, sur une largeur de 20 à 30 m, selon la configuration du profil en long (type de front, couverture par rapport au plancher des carrières, ...). Cette largeur a été déterminée en limitant les tassements absolus à 10 mm et les mises en pente à 0,7 ‰ en bordure de la bande comblée.

Afin de garantir l'opérabilité des travaux de comblement dans le milieu urbain dense du Kremlin-Bicêtre, l'ensemble du linéaire à traiter est divisé en 14 zones, dans lesquelles des emprises travaux permettant de réaliser le chantier de comblement tout en minimisant la gêne aux riverains ont été minutieusement déterminées (figure 4).

La traversée de la gare IGR

La gare Institut-Gustave-Roussy (IGR) présente une intermodalité entre la Ligne 15 Sud et la Ligne 14 Sud. Ces deux lignes se croisent perpendiculairement, les quais de la Ligne 14 se situant au-dessus de la mezzanine de la Ligne 15. L'enceinte de la gare est circulaire avec un diamètre de 62,30 m, les extrémités des quais des deux lignes sont réalisées dans des tunnels voûtés (sur 2x27,70 m de long) excavés en méthode conventionnelle.

La gare IGR est sous maîtrise d'ouvrage SGP et est réalisée dans le cadre du tronçon 3 de la Ligne 15. Le planning des travaux de la gare est tel que lors de l'arrivée du tunnelier de la Ligne 14, la gare est terrassée en totalité et le radier est bétonné. Le tunnelier doit donc être ripé sur un ouvrage permettant de ponter le vide dans l'enceinte de la gare (sur les 62,30 m de diamètre de la gare).

Les interfaces majeures au niveau de la gare IGR sont :

→ Le dimensionnement de l'ouvrage définitif : la Ligne 15 a utilisé les hypothèses issues des systèmes de la Ligne 14 (matériel roulant et portes palières) afin de dimensionner un ouvrage compatible avec les contraintes d'exploitation de la Ligne 14.

→ La traversée du tunnelier de la Ligne 14 dans la gare : pour ce faire, la Ligne 15 met à disposition de la Ligne 14 un ouvrage permettant de ripier le tunnelier. La Ligne 14 Sud met en œuvre les dispositifs d'entrée/sortie dans les parties souterraines. Les autres travaux (réalisation du puits et des parties souterraines de la gare) sont réalisés par la Ligne 15.

→ La coordination des plannings d'exécution : le séquençement des travaux des Lignes 14 et 15 doit être conçu de manière à ce qu'aucun des chantiers n'interrompe l'autre, compte-tenu des contraintes fortes de délais soumises à chacune des lignes.

Cette interface complexe nécessite un travail important de coordination depuis les études, d'abord de la part des deux maîtrises d'ouvrage et de deux maîtrises d'œuvre, et désormais avec la participation des titulaires des marchés L15 T3 et L14S GC02 (lot correspondant au tronçon Nord du tunnel).

LES OUVRAGES ANNEXES

Le prolongement de la L14 Sud compte en tout 12 ouvrages annexes. Sur le tronçon Nord, 5 ouvrages annexes sont nécessaires, du nord au sud : Jules-Guesde et Marcel-Sembat situés sur la commune du Kremlin-Bicêtre, Cuchets et République situés sur la commune de Villejuif, et Jean-Prouvé situé sur la commune de L'Hay-les-Roses.

Ils servent principalement d'ouvrages de ventilation et de puits d'accès des secours. Les ouvrages Cuchets et Jean-Prouvé sont aussi utilisés comme ouvrages d'approvisionnement de la voie. Ces deux ouvrages sont de section constante (circulaire pour Cuchets et rectangulaire pour Jean-Prouvé) jusqu'au niveau du tunnel, qui les traverse.

À noter que ces ouvrages, bien que qualifiés d'"annexes", constituent en soi des défis techniques : par exemple, l'ouvrage Cuchets a un diamètre intérieur de 22 m, avec un radier situé à 60 m de profondeur, et des parois moulées de 1,50 m d'épaisseur et 68 m de profondeur. Les trois autres ouvrages sont constitués d'une boîte en sub-surface sur 2 niveaux, d'un puits circulaire et d'un rameau connectant le puits au tunnel.

L'enjeu majeur de leur conception a été de parvenir à insérer dans des sites urbains très exigus, et soumis à de nombreuses contraintes, des ouvrages les plus compacts possibles, assurant

cependant un grand nombre de fonctionnalités.

Ainsi, pour exemple, l'ouvrage annexe Jules-Guesde, d'une surface de 380 m², est réalisé dans une emprise de 1670 m², devant accueillir un atelier de rotoforeuse (figure 5).

10- C3C - Implantation.

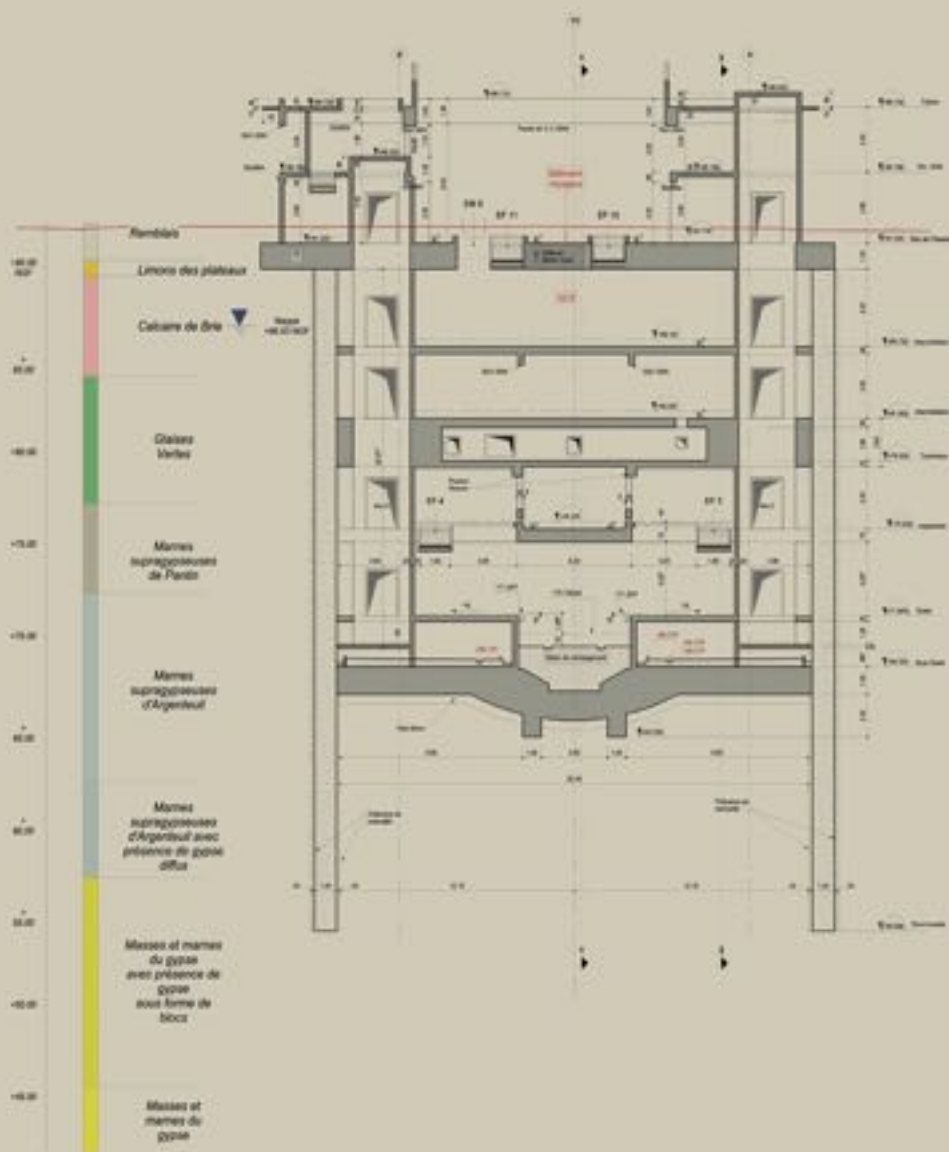
11- C3C - Coupe géotechnique.

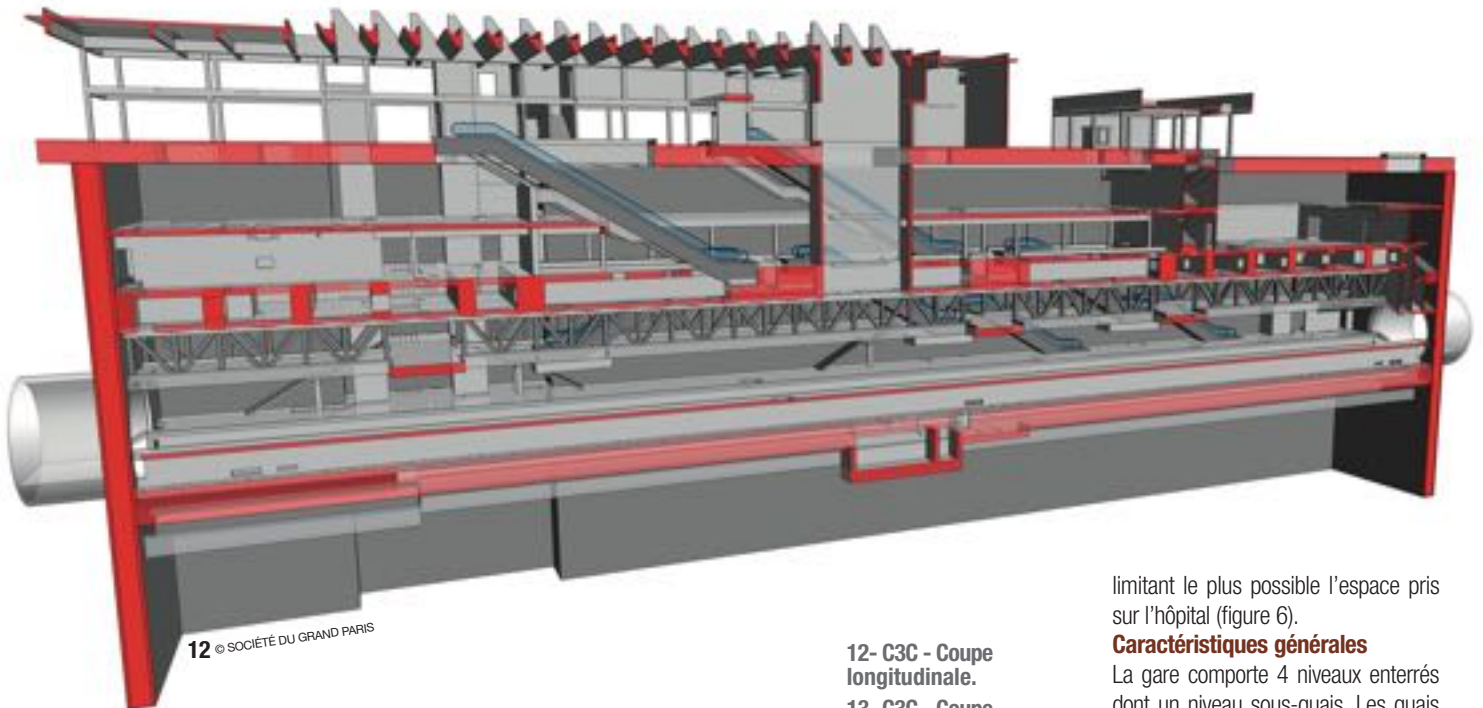
10- C3C - Layout.

11- C3C - Geotechnical cross section.



C3C - COUPE GÉOTECHNIQUE

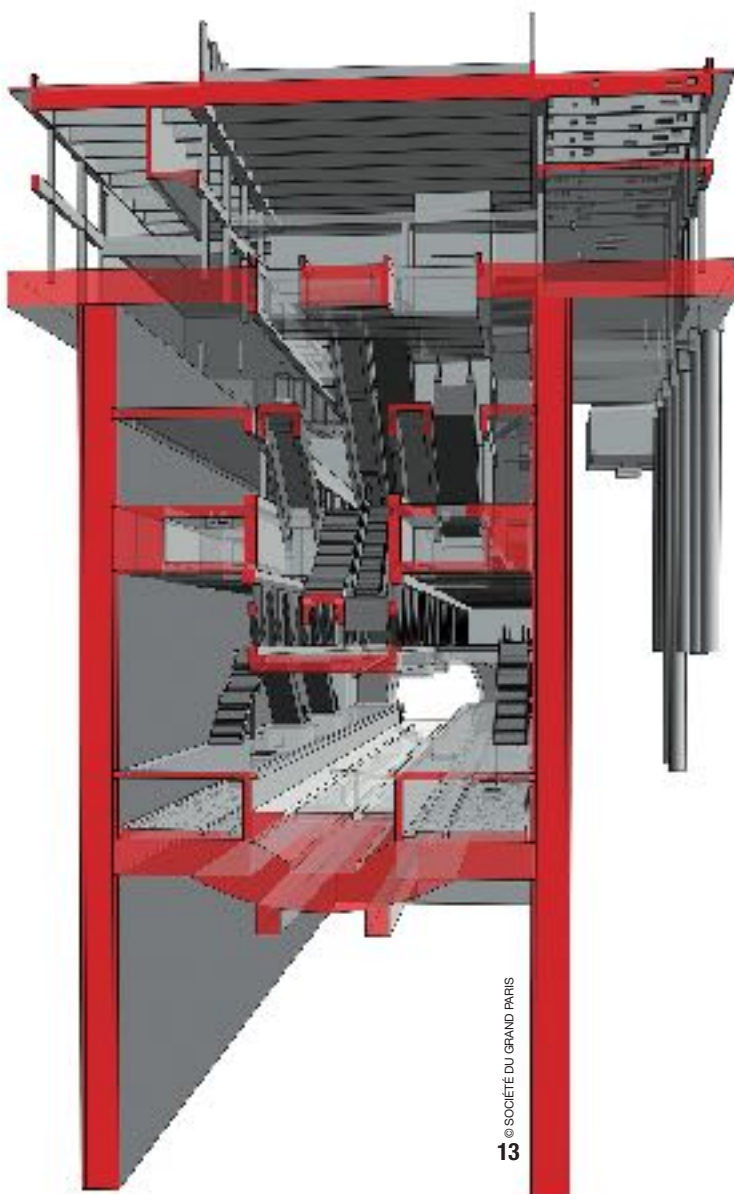




12 © SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

12- C3C - Coupe longitudinale.
13- C3C - Coupe transversale optionnelle.

12- C3C - Longitudinal section.
13- C3C - Optional cross section.



© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS
13

LES GARES

SIGNATURE DE LIGNE

La conception des 7 gares associe des architectes différents, aussi nonobstant des parcours et des volumes particuliers à chaque contexte, un travail de cohérence et de transversalité au travers d'une "signature de ligne" a été entrepris. Cette ligne commune est prise en compte dans chacun des projets architecturaux.

Le volume quai est l'espace privilégié de l'expression de cette cohérence.

GARE DE KREMLIN-BICÊTRE-HÔPITAL (KBH)

Contraintes techniques d'implantation

La future gare KBH se trouve sur la commune du Kremlin-Bicêtre. Elle est implantée dans l'enceinte de l'hôpital du même nom, le long de la tranchée de l'autoroute récemment couverte. Une issue de secours de l'A6b, qui se trouve dans l'emprise de la future gare, est à rétablir.

L'enceinte souterraine de la gare débord sur la rue Séverine et sur une parcelle privée de l'immeuble d'habitat collectif I3F. Elle est calée de façon à éviter l'ovoïde longeant l'A6b tout en

limitant le plus possible l'espace pris sur l'hôpital (figure 6).

Caractéristiques générales

La gare comporte 4 niveaux enterrés dont un niveau sous-quais. Les quais de 118 m de long sont situés au niveau N-3. La gare est accessible de plain-pied principalement par le parvis Sud. La toiture de l'émergence couvre l'ensemble des locaux du bâtiment voyageur avec un plénum de hauteur importante.

Géotechnique

Les couches géotechniques rencontrées sont du remblai, des Marnes et Caillasses, des Calcaires Grossiers avec présence de carrières, une couche d'Yprésien Argileux à potentiellement gonflantes, de l'Yprésien Sableux sous nappe, des Calcaires et Marnes de Meudon (figure 7).

La gare intercepte des nappes perchées.

La présence d'argile gonflante et d'anciennes carrières sont des sujets à risque important. Pour cette raison, il est prévu d'injecter les carrières et de substituer la couche d'argile sous radier.

Structure

L'enceinte souterraine de la gare est réalisée en parois moulées d'épaisseur 1,50 m. Sur une grande partie de la gare, le niveau mezzanine n'est pas butonnant du fait des trémies des escaliers d'accès aux quais.

Cette enceinte a une longueur de 120,6 m et sa largeur varie du nord au sud de 21,9 m à 13,90 m.

Le fond de fouille se situe à environ -32 m/TN à son point le plus bas et le niveau du rail est d'environ -22 m/TN. Les parois moulées ont une fiche mécanique de 17 m environ, ancrée dans les marnes de Meudon (figures 8 et 9).

La structure intérieure est en béton armé alors que la toiture de l'émergence est une structure bois tridimensionnelle.

Méthodologies de réalisation

Les nombreux réseaux impactés par l'enceinte de la gare ont été déviés préalablement aux travaux. Les travaux de la gare nécessitent la démolition de bâtiments de l'hôpital et occupent aussi l'espace de la rue Gabriel-Péri (sens vers Paris) dont la circulation est basculée provisoirement de l'autre côté de la tranchée autoroutière.

Les carrières sont injectées depuis la surface préalablement aux travaux de parois moulées. Les travaux de terrassement se font à ciel ouvert, en partie sous la dalle de couverture, jusqu'au fond de fouille avec butonnage provisoire des parois. Vu l'épaisseur limitée de la couche d'Argile Plastique sous radier il est retenu de la substituer pour éviter les effets de gonflement sous radier, ce qui approfondit la fouille. Les différents niveaux de la gare sont construits ensuite en remontant, à l'exception du niveau mezzanine réalisée seulement après passage du tunnelier.

GARE DE CHEVILLY-TROIS-COMMUNES (C3C)

Contrainte technique d'implantation

La gare de Chevilly-Trois-Communes est située à la frontière des communes L'Hay-les-Roses, Chevilly-Larue et Villejuif, dans un territoire en forte évolution. Elle est implantée sur une parcelle bordée de trois voies existantes et d'un groupe scolaire, dans une zone de construction hétérogène entre immeubles de logement et pavillons résidentiels (figure 10).

Caractéristiques générales

La gare de C3C comporte 5 niveaux enterrés dont un niveau sous-quais et une émergence en surface R+1.

Les quais sont situés au niveau N-4. La gare est accessible de plain-pied au niveau parvis.

Le projet de la gare Chevilly-Trois-Communes intègre des mesures conservatoires pour des projets connexes.

Géotechnique

Les couches géotechniques rencontrées sont du remblai, du Limon des Plateaux, du Calcaire de Brie, des Marnes et Caillasses, des Calcaires Grossiers avec présence de carrières, une couche de Glaise Verte à pouvoir gonflant, des Marnes Supragypseuses de Pantin, des Marnes Supragypseuses d'Argenteuil à pouvoir gonflant et des Masses et Marnes du Gypse. Il est noté

une présence de gypse diffus sur une partie des Marnes d'Argenteuil et sous forme de blocs dans les Masses et Marnes du Gypse (figure 11).

Le sous-sol est le siège d'une nappe perchée, la nappe de Calcaire de Brie, dont le mur est constitué par les Argiles vertes.

14- PDT - Implantation.

15- PDT - Coupe géotechnique.

14- PDT - Layout.

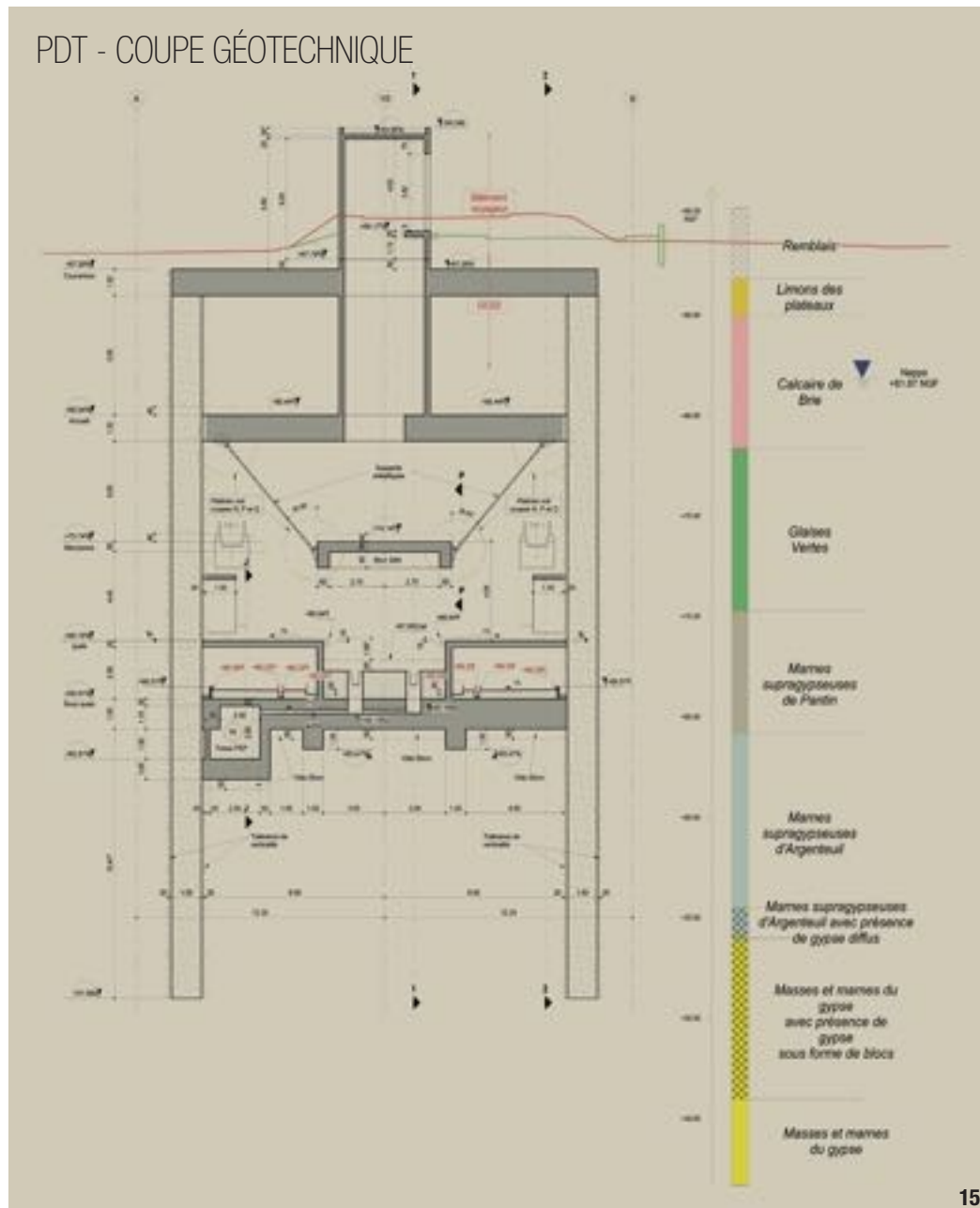
15- PDT - Geotechnical cross section.



14

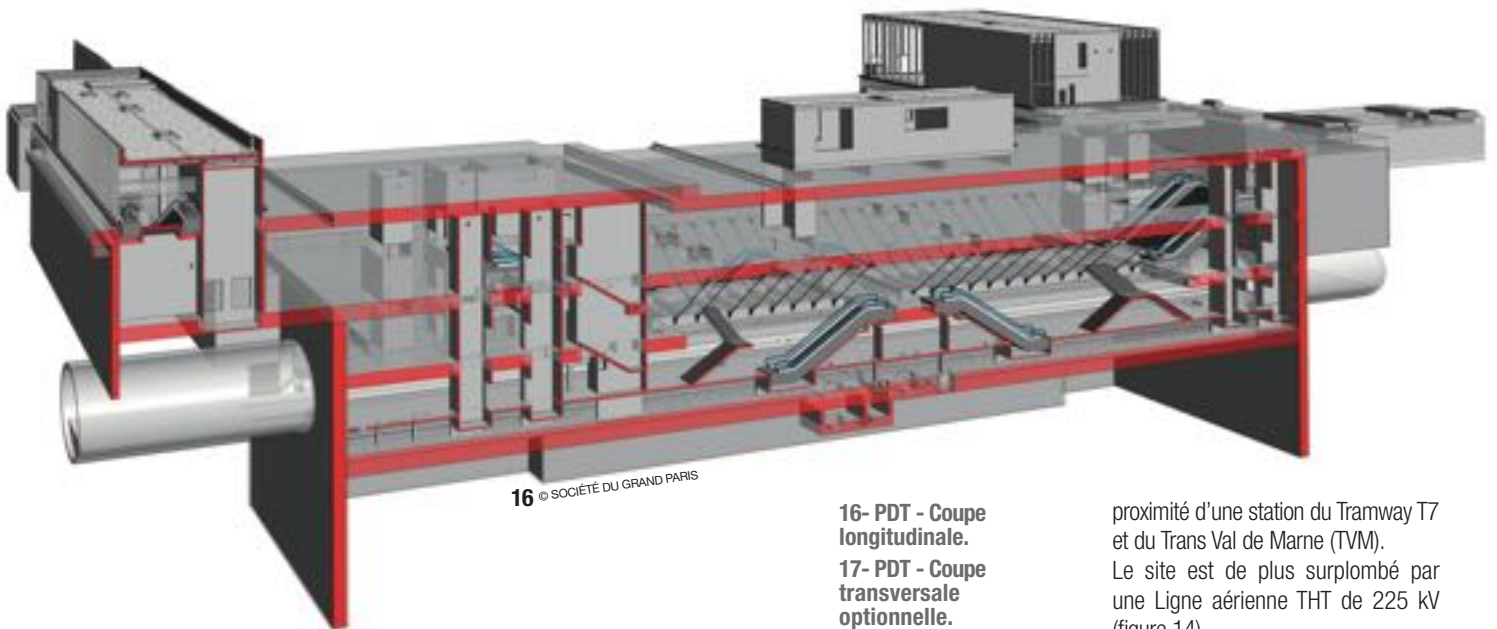
© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

PDT - COUPE GÉOTECHNIQUE



15

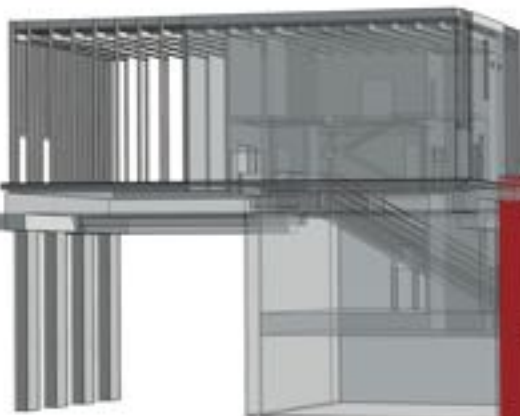
© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS



16 © SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

16- PDT - Coupe longitudinale.
17- PDT - Coupe transversale optionnelle.

16- PDT - Longitudinal section.
17- PDT - Optional cross section.



17 © SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

Pour éviter l'impact du gonflement des Marnes Supragypseuses d'Argenteuil il est prévu un vide de 50 cm sous radier. Deux longrines filantes faisant office d'appuis intermédiaires soulagent le radier. Par ailleurs pour éviter un risque de perte de boue lors de la réalisation des parois moulées du fait d'éventuel vide de dissolution du gypse, le sol autour de la paroi moulée est injecté.

Structure

L'enceinte souterraine de la gare est réalisée en parois moulées d'épaisseur 1,20 m.

Le fond de fouille se situe à -25,7 m/TN environ. Les parois moulées présentent une fiche de 13 m, ancrée de l'ordre de 4 m dans les Marnes et Masses du Gypse.

La longueur intérieure de la boîte est de 120,8 m pour une largeur de 17,8 m avec une surlargeur à 25,80 m au droit des ascenseurs (figures 12 et 13). La structure intérieure est en béton armé.

Le niveau mezzanine est suspendu au niveau supérieur N-2 par un treillis béton faisant office de pont pour franchir les 15 m d'ouvertures des escaliers dans le N-2. L'épaisseur du niveau N-2 est importante (poutres et liernes de

hauteur 2,60 m) pour, à la fois, soutenir la mezzanine suspendue, porter le niveau N-1 et faire office de seul niveau intermédiaire butonnant de la gare.

Méthodologies de réalisation

Les travaux de la gare nécessitent la démolition préalable de bâtiments.

Les Masses et Marnes du Gypse sont injectés préalablement à la réalisation des parois moulées afin de se traiter d'éventuels vides susceptibles d'engendrer des pertes de boue pendant les phases de forage et bétonnage. Les travaux de terrassement se font à ciel ouvert jusqu'au fond de fouille

avec butonnage provisoire des parois. Les différents niveaux de la gare sont construits ensuite en remontant, à l'exception du niveau mezzanine réalisée seulement après passage du tunnelier.

GARE DE M.I.N.-PORTE-DE-THIAIS (PDT)

Contrainte technique d'implantation

La gare MIN-PDT est située sur la commune de Chevilly-Larue. C'est une zone de forte densité de trafic, dominée par le fonctionnement du Marché d'Intérêt National (M.I.N) de Rungis. Elle est à

proximité d'une station du Tramway T7 et du Trans Val de Marne (TVM). Le site est de plus surplombé par une Ligne aérienne THT de 225 kV (figure 14).

Sont considérés le projet de la Cité de la Gastronomie et la valorisation associée au sud, ainsi que celui de la ZAC des Meuniers au nord.

De par la configuration du site, deux accès sont prévus avec deux émergences auxquelles s'ajoute une émergence technique centrale.

L'émergence Nord est positionnée au plus proche des quais du tramway T7, de façon à intercaler l'émergence Nord entre le Tramway et la rue de Thiais. Cette émergence implique un remaniement important de la rue de Thiais et des quais du TVM devant le péage du MIN de Rungis ainsi qu'un reprofilage en déblais de la rampe vers le pont sur la D7.

Caractéristiques générales

La gare comporte 4 niveaux enterrés dont un niveau sous-quais et trois émergences.

Les quais sont situés au niveau N-3. Compte tenu du faisceau routier à franchir, les émergences Nord et Sud ne communiquent pas entre elles.

Les toitures des émergences sont végétalisées.

Géotechnique

Les couches géotechniques et nappes rencontrées sont similaires à celle de la gare C3C (figure 15).

Pour éviter l'impact du gonflement des Marnes Supra-gypseuses il est prévu de ménager un vide sous radier. Comme pour C3C le sol autour de la paroi moulée est injecté pour éviter d'éventuelles pertes de boue.

Structure

Le fond de fouille se situe à -25 m/TN à son point le plus bas. L'épaisseur de parois moulées est de 1,20 m dans les zones où la mezzanine est considérée butonnante (zones élargies) et de 1,50 m en zone centrale. La fiche de 14 m est ancrée de l'ordre de 4 m dans les Masses et Marnes du Gypse. L'épaisseur de paroi moulée des excroissances de la gare est 0,60 m (figures 16 et 17). ▷

La longueur intérieure de la boîte est de 122 m.

Les calculs de dimensionnement fonctionnel ont conduit à une largeur de 18 m dans la zone centrale de la gare et de 23 m dans les zones d'extrémités. La mezzanine en partie centrale est suspendue au niveau N-1 par des suspentes métalliques inclinées par rapport à la verticale. Les suspentes sont protégées du feu par peinture intumescente et il est prévu une redondance permettant le démontage de suspente pour leur maintenance sans altérer le fonctionnement de la gare.

La structure souterraine est en béton armé à l'exception des suspentes de la mezzanine.

La structure enveloppe des émergences Nord et Sud est composée de poteaux de section rectangulaires en acier selon un espacement de 1,35 m en cohérence avec la façade vitrée.

La toiture est une structure mixte acier béton.

Méthodologies de réalisation

Les nombreux réseaux impactés par l'enceinte de la gare sont déviés au préalable des travaux, et deux bâtiments sont démolis.

Le phasage des travaux est prévu pour limiter l'impact sur l'exploitation du MIN de Rungis et son accès. Les travaux à proximité du tramway T7 en service nécessitent des mesures particulières de sécurité.

La présence de la Ligne THT aérienne à l'aplomb des travaux est une contrainte forte qui limite la hauteur des engins utilisés notamment pour les parois moulées.

Le positionnement des emprises de chantier est contraint par le site et par les différentes voies de circulation qui couvrent la future gare. Cela implique un morcellement des travaux par tron-

çon afin d'assurer la continuité de la circulation en surface par des déviations provisoires et des basculements de circulations. Pour chaque tronçon la dalle de couverture est faite tout de suite après les parois moulées. Les terrassements de la gare et la structure intérieure sont ensuite exécutés en taube. Le niveau N-1 est réalisé sur un fond de fouille intermédiaire.

Après que le tunnelier est passé en pleine terre et que le tunnel est achevé, les terrassements reprennent jusqu'au fond de fouille. Les anneaux du tunnel sont alors démolis pour permettre la réalisation du radier puis de la mezzanine.

DE LA CONCEPTION À L'EXÉCUTION

Après une phase de consultation durant l'année 2017, les travaux de génie civil ont été attribués au groupement Dodin Campenon Bernard/Vinci/Spie Batignolles/Botte fondations pour le lot GC02 correspondant au tronçon Nord du prolongement Sud, et au groupement Eiffage/Razel Bec/Sefi Intrafor pour le lot GC03 correspondant au tronçon central. La fin des travaux de génie civil est prévue pour 2022.

L'enjeu majeur du prolongement Sud est d'être en service dès juin 2024, pour les Jeux Olympiques de Paris. □

PRINCIPAUX ACTEURS DU PROJET

MOA L14 SUD : Ratp

MOE SYSTÈME : Ratp

MOE INFRA : Elio

TRONÇON NORD : Setec

TRONÇON CENTRE ET SUD : Systra

GARE MBP : Architecte Group-6 et Systra

GARE KBH : Architecte Jean Paul Viguier et Setec

GARE C3C : Architecte Franklin Azzi et Setec

GARE PDT : Architecte Brunet Saunier Architecture et Setec

GARE PDR : Architecte Valode & Pistre et Systra

MOE SMR MORANGIS : Ratp

MOA DE LA GARE D'ORLY : Adp

MOE DE LA GARE D'ORLY : Adp

MOA DE LA L15 T3 - GARE D'IGR : Sgp

MOE DE LA L15 T3 - GARE D'IGR : Setec

PRINCIPALES QUANTITÉS

GARE KBH INFRASTRUCTURE

PAROIS MOULÉES : 20 700 m³

DÉBLAIS : 42 800 m³

BÉTON STRUCTURE HORS PM ET SUPERSTRUCTURE : 20 000 m³

GARE C3C INFRASTRUCTURE

PAROIS MOULÉES : 13 650 m³

DÉBLAIS : 60 000 m³

BÉTON STRUCTURE HORS PM ET SUPERSTRUCTURE : 17 100 m³

GARE MIN-PDT INFRASTRUCTURE

PAROIS MOULÉES : 18 900 m³

DÉBLAIS : 85 200 m³

BÉTON STRUCTURE HORS PM ET SUPERSTRUCTURE : 22 900 m³

TUNNEL TRONÇON NORD

LINÉAIRE : 4 588 m

DÉBLAIS : 282 000 m³

COMPLEMENT DES CARRIÈRES

LINÉAIRE DE FORAGE : 98 400 m

COULIS : 42 400 m³

ABSTRACT

EXTENSION OF LINE 14 TO THE SOUTH - DESIGN OF UNDERGROUND STRUCTURES (TUNNEL, ACCESSORY STRUCTURES AND STATIONS)

FRANCIS LANQUETTE, SETEC TPI - DANIEL PRATS, SETEC TPI

Line 14 of the Paris metro will be extended as far as Orly Airport, in order to improve the link between the airport and the centre of Paris. Setec, leader of the project management consortium for the South extension, designed in particular the northern section of the extension, including 4.6 km of tunnel, a station (Kremlin-Bicêtre-Hôpital) and five accessory structures and a station. On the central section, Setec has designed two stations (Chevilly-Trois-Communes and Porte-de-Thiais). The major challenges for the tunnel are the 1.6 km passage under the Lutetian limestone quarries, and the Institut-Gustave-Roussy station crossing, interlinking with Line 15. Each station has its specific features, although their common feature is that they are integrated in environments incorporating numerous man-made constraints, in geological horizons having a major impact on their structural design. □

PROLONGACIÓN DE LA LÍNEA 14 SUR - DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS (TÚNEL, OBRAS ANEXAS Y ESTACIONES)

FRANCIS LANQUETTE, SETEC TPI - DANIEL PRATS, SETEC TPI

La Línea 14 del metro de París se prolongará hasta el Aeropuerto de Orly para mejorar la conexión del aeropuerto con el centro de París. Setec, representante del consorcio que dirige las obras de prolongación Sur, ha diseñado el tramo Norte de la prolongación, que incluye 4,6 km de túnel, una estación (Kremlin Bicêtre Hôpital), 5 obras anexas y una estación. En el tramo central, Setec ha dispuesto dos estaciones (Chevilly-Trois-Communes y Porte-de-Thiais). Los principales retos del túnel son el paso bajo canteras de piedra caliza gruesa a lo largo de 1,6 km y el cruce de la estación Institut-Gustave-Roussy, en interconexión con la Línea 15. Cada estación presenta sus especificidades, aunque todas tienen en común estar insertadas en entornos con numerosas restricciones antrópicas, en horizontes geológicos con un fuerte impacto en su diseño estructural. □

Drones
BIM
Cyberattaques



Bienvenue dans un monde qui se construit autrement.

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

Notre métier : assurer le vôtre.

www.groupe-sma.fr

SMABTP - Société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics.
Société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances
RCS PARIS 775 884 764 - 8 rue Louis Armand - CS 71201 - 75738 PARIS CEDEX 15



SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

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



Build on Solid

Grand Paris Express – Ligne 15, lot T3A
Puits de départ du tunnelier
sur l'île de Monsieur



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.

Construire sur du solide

www.soletanche-bachy.com



SOLETANCHE BACHY