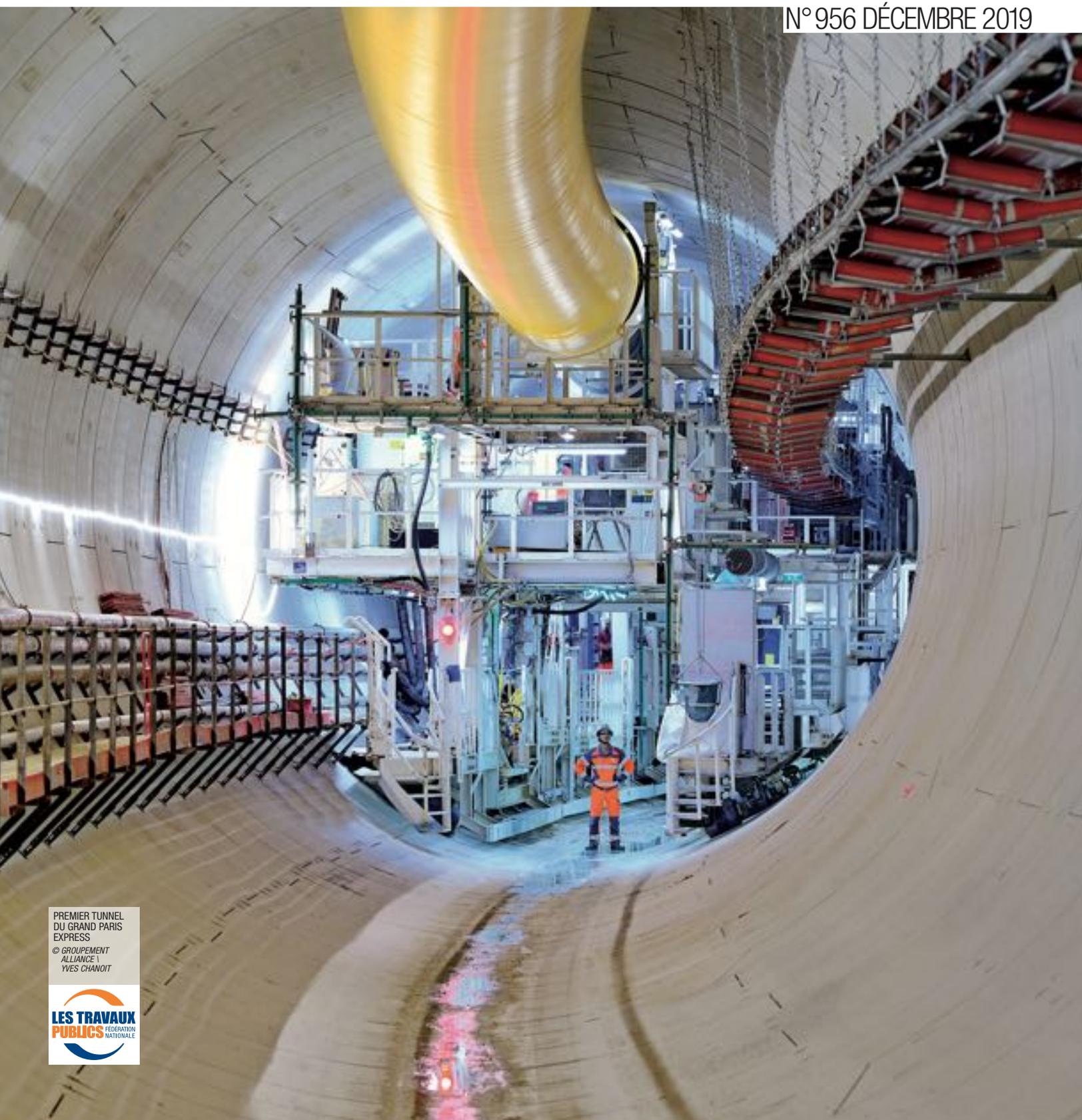


# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**TRAVAUX SOUTERRAINS.** CERN PROJET HiLumi (HAUTE LUMINOSITE) LHC. OA1 : UN Puits DE RECEPTION DE TUNNELIER LIGNE 18 - AEROPORT PARIS-ORLY. AMELIORATION DE LA BUTEE DES PAROIS MOULEES - TRAMWAY DE NICE. GALERIE DES JANOTS. EXTENSION DE LA LIGNE 14 AU SUD DE PARIS. SECURISATION DU TUNNEL FERROVIAIRE DE MEUDON. PREMIER TUNNEL DU GRAND PARIS EXPRESS. RER EOLE : LA GARE PORTE-MAILLOT. LIGNE 14 : CONGELATION POUR PASSAGE SOUS LA GARE DE SAINT-OUEN

N° 956 DÉCEMBRE 2019



PREMIER TUNNEL  
DU GRAND PARIS  
EXPRESS

© GROUPEMENT  
ALLIANCE |  
YVES CHANOIT





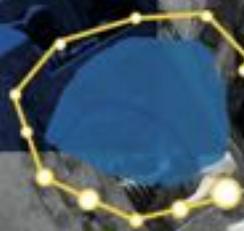
SEFI-INTRAFOR

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](http://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 Calatozzo (Systra), Jean-Bernard Datry (Setec tpi), Olivier de Vriendt (Spie Batignolles), Philippe Gotteland (Fnfp), Florent Imberty (Razel-Bec), Romain Léonard (Demathieu Bard), Claude Le Quéré (Egis), Véronique Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Solène Sapin (Bouygues Construction) 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),  
Marc Montagnon

**Service Abonnement et Vente**

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

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

**Publicité**

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

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

Site internet : [www.revue-travaux.com](http://www.revue-travaux.com)

**Édition déléguée**

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

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

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

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

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



## DOUBLEMENT DE LA LIGNE A DU MÉTRO DE TOULOUSE. UN PROJET XXL POUR LA MOBILITÉ DES TOULOUSAINS



© DR

En 1993, lors de l'inauguration de la ligne A du métro toulousain, il était prévu à terme une fréquentation de 130 000 voyageurs par jour. Cet objectif a été atteint dès le premier jour. Aujourd'hui, la ligne historique étant saturée, nous avons décidé de rallonger les quais de toutes les stations pour permettre le passage de doubles rames. Un chantier hors-norme pour des "bénéfices voyageurs" essentiels : fluidité, sécurité, confort, espace. Aujourd'hui, ce sont 220 000 voyageurs en moyenne qui empruntent chaque jour la ligne A. Demain, avec l'acquisition de nouvelles rames, les quais rallongés de la ligne A pourront accueillir jusqu'à 400 000 voyageurs.

Ce projet a nécessité d'étendre le génie civil de certaines stations pour doubler la longueur des quais (de 26 m à 52 m), et d'apporter des modifications au système automatique de transport ainsi qu'au matériel roulant, pour un coût global de 180 millions d'euros.

Les spécificités de ce projet résident dans le doublement de la capacité de transport sur une ligne de métro automatique tout en maintenant en exploitation l'infrastructure de transport.

Cela a été rendu possible par la construction d'un tunnel métallique à l'intérieur du tunnel existant grâce à des cintres posés à l'intérieur du tunnel pendant la coupure de l'été 2017 puis déposés pendant celle de l'été 2018, garantissant ainsi l'isolement des voies. Il était alors possible de réaliser les travaux sous exploitation de part et d'autre du tunnel. À notre connaissance, cette technique est une première dans le domaine des tunnels pour métros urbains.

En parallèle, les travaux du système de transport ont été conduits avec notamment la modification de toutes les positions d'arrêt des rames en stations.

L'organisation du projet a permis de limiter l'arrêt total du fonctionnement du métro à 5 et 6 semaines consécutives pendant les étés 2017 et 2018. Si la conception et le phasage avaient été envisagés en arrêtant l'exploitation, il aurait fallu arrêter le métro au minimum 6 mois.

Un travail approfondi a été mené sur les méthodes de pilotage, conception, contractualisation et réalisation. Le succès de la co-activité entre deux mondes aux contraintes différentes, génie civil et système électromécanique automatisé, était un challenge et une obligation pour garantir la sécurité et le confort des usagers du métro. L'information et la communication régulières sur ce projet, la présence d'un médiateur et la prise en charge rapide des problèmes ont permis un accueil favorable par les riverains et les commerçants des quartiers impactés. En décembre 2019, après une période de test, c'est sur toute la longueur des quais des stations qu'il sera possible d'accéder aux rames de 52 m, d'une capacité de 320 voyageurs pour 160 aujourd'hui.

Grâce aux efforts conjugués des équipes de Tisséo, du Maître d'œuvre et de la centaine d'entreprises impliquées mobilisées de juin 2017 à décembre 2019, ce projet majeur pour le développement de la métropole toulousaine a été mené à bien, avec un impact significativement réduit pour les 220 000 voyageurs de la ligne A du métro.

**JEAN-MICHEL LATTES**  
PRÉSIDENT DE TISSÉO COLLECTIVITÉS  
1<sup>er</sup> ADJOINT AU MAIRE DE TOULOUSE



# TRAVAUX SOUTERRAINS

OMV, UN Puits de Réception de Tunnelier sur la Ligne 18, au Cœur de l'Aéroport Paris-Orly © Cyrillus Cornu / Société du Grand Paris



04 ALBUM

08 ACTUALITÉ



18

**ENTRETIEN AVEC THIERRY DALLARD**

GRAND PARIS EXPRESS : LA MACHINE EST LANCÉE, PLACE À L'ÈRE INDUSTRIELLE

**24 TECNITUDE : MANUTENTION EN VRAC - UN MODE DE PROSPECTION ENTIÈREMENT DÉMATÉRIALISÉ**



32

**CERN PROJET HiLumi (HAUTE LUMINOSITÉ) LHC**

Infrastructures souterraines et bâtiments techniques - Point 1 (ATLAS)



40

**OA1, UN Puits DE RÉCEPTION DE TUNNELIER**

sur la ligne 18, au cœur de l'aéroport Paris-Orly



48

**TRAMWAY DE NICE**

Amélioration de la butée des parois moulées



56

**GALERIE DES JANOTS**

Un ouvrage creusé dans un massif karstique



65

**EXTENSION DE LA L14 AU SUD DE PARIS**

Gonflement sous radier et parois moulées sous gabarit réduit



72

**SÉCURISATION DU TUNNEL FERROVIAIRE DE MEUDON**

Réalisation d'une galerie d'évacuation au tunnelier



80

**RÉALISATION DU PREMIER TUNNEL DU GRAND PARIS EXPRESS**

entre Champigny-sur-Marne et Villiers-sur-Marne



88

**RER EOLE**

Conception et réalisation de la gare Porte-Maillot dans un milieu souterrain très dense



94

**LIGNE 14**

Congélation pour le passage sous la gare du RER C de Saint-Ouen



## DU FIL À RETORDRE SUR LE TUNNEL DE MEUDON

**BESSAC** a utilisé un tunnelier à pression de terre pour réaliser une galerie de secours Ø 3,50 m sur 1 700 m le long du tunnel ferroviaire de Meudon et dans sa zone d'influence. Ce tunnel du XIX<sup>e</sup> siècle est revêtu d'une maçonnerie de moellons.

Les difficultés n'ont pas manqué. Le montage du tunnelier a été fait dans un mouchoir de poche. Le démontage également puisqu'il s'agit d'un tunnel borgne. Le seuil de nuisance acoustique était très bas. Le maintien de la trajectoire en courbe et contre-courbe a nécessité l'emploi de câbles et vérins.

(Voir article page 72).



© PHOTOTHÈQUE BESSAC



## UNE GARE EXCEPTIONNELLE POUR EOLE À LA PORTE MAILLOT

**EOLE** aura sa nouvelle gare Porte-Maillot, qui constitue un ouvrage exceptionnel par ses dimensions (225 m de longueur, 21 m de largeur et 29 m de profondeur), par le contexte urbain très dense dans lequel il s'insère et qui conditionne la conception, ainsi que par les contraintes très fortes sur les déplacements admissibles des avoisinants. Le maître d'ouvrage SNCF, le maître d'œuvre SED (Setec Egis Duthilleul) et le groupement Bouygues Travaux Publics - Razel Bec - Eiffage - Sefi Intrafor sont à la manœuvre. (Voir article page 88).



© SETEC - EGIS - DUTHILLEUL

© BOUYGUES TP - RAZEL BEC - EIFFAGE - SEFI INTRAFOR

## RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LA RÉNOVATION DU BARRAGE DE BIMONT



© IN-MEDIA/PROCO

La grue à tour était pilotée depuis le chemin de crête du barrage pour une meilleure vision du chantier.

**Anticipation, dialogue et volonté de trouver des solutions, ont fait de ce chantier exceptionnel, une réussite. Voici quelques extraits de l'analyse a posteriori.**

La rénovation du barrage de Bimont (Bouches-du-Rhône) fait l'objet d'un retour d'expérience, une première pour la Société du canal de Provence (SCP), concessionnaire de l'ouvrage de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. L'opération s'est bien passée, selon la SCP et ses partenaires.

Ce barrage de réservoir d'eau potable mesure 86,50 m de haut, 180 m de long à la crête, 4,30 m d'épaisseur en tête et 17,40 en pied, le tout avec deux courbures, en hauteur et en largeur. Construit en 1952, il montre rapidement des anomalies sur le béton de certains plots de la rive droite en aval, anomalies stabilisées. En 1983, le niveau de remplissage est abaissé de 10 m, à 330 m<sup>(1)</sup>.

« Tout le monde s'est senti très impliqué et concerné, témoigne Katia Laliche, chef de projet à la SCP. Nous avons eu face à nous des entreprises qui proposaient des solutions aux problèmes. Les compagnons y ont mis du leur. C'était des travaux uniques et jamais réalisés avant. »

### → Avis précieux du CTPBOH

Les parties prenantes liées aux contraintes réglementaires sur la sécurité et l'environnement ont été contactées très en amont, en 2013 (Dreal, Grand site, Architectes des bâtiments de France,

etc.). La SCP a invité le commissaire enquêteur sur le site, lui a expliqué le projet, d'où un avis assez rapide.

Vu la complexité du projet, la maîtrise d'œuvre était partagée entre la SCP et Tractebel chargée des études amont. Un dossier d'ouvrage très complet et des investigations poussées ont permis à la seconde de bien cadrer le volume des travaux.

L'appui d'une maîtrise d'œuvre compétente en barrage-voûte a été recommandé par le Comité technique permanent des barrages et ouvrages hydrauliques (CTPBOH), passage obligatoire vu la classe de l'ouvrage<sup>(2)</sup>. « Le CTPBOH a su identifier les manquements du projet et l'a fait progresser, constate Katia Laliche. Cela a été un apport très riche. » Dans son avis d'avril 2015, le CTPBOH a préconisé de commencer par un marché de remise à niveau de l'auscultation. Ainsi, le comportement du barrage pouvait-il être relevé avant rénovation et comparé à celui pendant le chantier et après. Les appareils ont été remis en état, complétés et testés.

### → Suivi pendant l'injection

Son aide a aussi été très précieuse sur les travaux d'injection de fissures et de joints dans la paroi aval. Cette phase a

été surveillée en permanence par un technicien de la maîtrise d'œuvre SCP qui s'était approprié les procédures et était à pied d'œuvre sur l'échafaudage. Une fois la paroi renforcée par des barres d'ancrage passives, les forages destinés au coulis qui rebouchait fissures et joints ouverts ont commencé. Le comportement du barrage pendant l'injection a été suivi par un dispositif automatique (Hyp-Arc) et par du personnel devant des instruments de mesure.

Les fissures communiquaient par endroits mais « elles avaient plutôt la forme de persiennes et aucun plot n'était coupé en deux », a conclu un expert. L'exécution des travaux, notamment de forage et d'injection, n'aurait pu être assurée sans la présence d'échafaudages. L'accès à la paroi aval était un des points techniques sur lesquels les offres des entreprises étaient jugées. Demathieu Bard qui l'a emporté avec Spie Fondations (cotraitant), a conçu un

échafaudage à base de petits modules épousant les deux courbures. Il est ancré dans la paroi et associé à une grue à tour, pilotée à distance pour mieux voir le chantier.

L'entreprise mandataire a également été pertinente sur la planification des différentes phases compte tenu de l'injection du coulis en période neutre (printemps, automne).

### → Discussions sur les prix

« Il ne faut pas hésiter à dialoguer sur les sujets qui peuvent aboutir à un contentieux », retient aussi Katia Laliche de cette expérience. Des discussions sur le prix ont eu lieu en cours de chantier. Le nombre de forages pour injection du coulis a été plus bas que prévu, d'où un manque à gagner pour l'entreprise et le montant du marché - 6,6 millions d'euros - devait être respecté.

Demathieu Bard a adapté le modèle 3D de la SCP pour en sortir coupes et élévations dont elle avait besoin pour intervenir. « Après, il fallait l'appliquer sur le terrain », a souligné Romain Guinti, directeur d'exploitation. Nous devons prouver que les forages arriveraient là où ils devaient. Nous avons dessiné des cibles de 40 cm sur la paroi amont, avons foré en traversant et sommes arrivés dans les cibles. »

### → Remise en eau très progressive

Côté réserve d'eau, un géocomposite étanchéifié 3100 m<sup>2</sup> de paroi. Il comprend un géodrain qui évacue les eaux qui s'infiltrèrent malgré tout et une géomembrane en PVC (Carpi). Trois forages dirigent ces eaux vers l'aval. Demathieu Bard s'est engagée sur un débit au-dessus duquel elle intervient.

Les travaux se terminent en 2020. Suivra la remise en eau à la cote 342,50 m, progressive et surveillée. ■

<sup>(1)</sup> Cf. Travaux janvier-février 2018, n°939, page 9, et septembre 2018, n°944, pp 68-73.

<sup>(2)</sup> Avec l'Irstea et l'Ifsttar.

## CONGRÈS BARRAGES À MARSEILLE EN 2021

La réunion annuelle du Comité français des barrages et retenues et le 27<sup>e</sup> congrès de la Commission internationale des grands barrages (CIGB) se tiennent du 5 au 11 juin 2021 à Marseille (Bouches-du-Rhône).

<http://cigb-icold2021.fr/fr>



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

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

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

### NOUS CONTACTER

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

## 576 MW DE PLUS EN ÉOLIEN

Les 20 projets éoliens de l'appel d'offres de 2017 (4<sup>e</sup> période) totalisent 576 MW de puissance électrique. Ils ont été désignés le 8 octobre par la ministre de la Transition écologique et solidaire.

Dans le Grand-Est, la proposition d'Eole Sud Marne cumule 111 MW à elle seule. Toujours dans la région qui regroupe l'Alsace, la Champagne-Ardenne et la Lorraine, deux parcs éoliens au village de Richebourg (Aube) atteignent 109,20 MW. Au total, la Région se dote de plus de 314 MW éoliens supplémentaires en six implantations.

En 2<sup>e</sup> place de la sélection de cet appel d'offres du ministère, figurent les Hauts-de-France avec près de 190 MW en 9 sites.

La ministre a également dévoilé les résultats du dernier appel d'offres des projets photovoltaïques sur bâtiment (8<sup>e</sup> période).

Il regroupe 268 dossiers pour 129,4 MW au total. Les puissances installées se situent entre 100 kW et 8 MW.

Ces installations éoliennes et photovoltaïques fourniront l'équivalent de l'électricité nécessaire à 350 000 foyers et contribuent à atteindre 40 % d'électricité renouvelable en 2030.

### Liste lauréats :

[www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/laureats\\_eoliens\\_4e\\_periode.pdf](http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/laureats_eoliens_4e_periode.pdf).

## LES ÉOLIENNES INTÈGENT L'UFE

France énergie éolienne qui représente les professionnels de la filière en France (300 membres) adhère désormais à l'Union française de l'électricité (UFE) comme membre associée.

Y adhèrent déjà le Syndicat des énergies renouvelables, France Hydro Électricité (petite hydroélectricité 15 kW-12 MW), Voies navigables de France, etc.

## GRAND PRIX DE L'INGÉNIERIE AU CONSORTIUM DE LA GARE SOUS LE CNIT

Le Grand prix national de l'ingénierie a été remis au consortium regroupant Setec, l'agence Jean-Marie Duthilleul (architecte-ingénieur), Arep et Antea Group, pour la gare de la Défense sur le prolongement vers l'ouest de la ligne Eole du RER parisien.

Syntec Ingénierie qui organise le concours avec le ministère de la Transition écologique récompense ainsi la construction d'une gare sous le Cnit que fréquentent 50 000 personnes par jour (commerces, bureaux, salles de conférences).

Les études ont commencé en 2010 et le chantier se termine en 2022 pour l'ouverture du tronçon entre Saint-Lazare et la Défense-Nanterre. Le reste du tracé du RER E vers l'ouest empruntera des voies existantes, sauf la 3<sup>e</sup> voie ajoutée à l'approche de Mantes-la-Jolie (Yvelines). Le consortium a opté pour une reprise en sous-cœuvre du Cnit, voûte autoportante

en béton (1958). Parkings, bâti et commerces ont été mis sur vérins pendant cinq ans. Une faille est creusée dans le parking pour descendre au dernier niveau de la future gare. L'opération est réalisée sous Bim. Maître d'ouvrage : SNCF Réseau.

### → Échangeur restructuré

Autre distinction : le prix Construction-aménagement remis par Syntec-Ingénierie à Artelia pour la restructuration de l'échangeur du quai d'Ivry à Paris 13<sup>e</sup>.

Le projet rationalise les circulations, autorise l'insertion d'un quartier sous l'échangeur, d'où un meilleur passage entre Paris et Ivry-sur-Seine (Val-de-Marne).

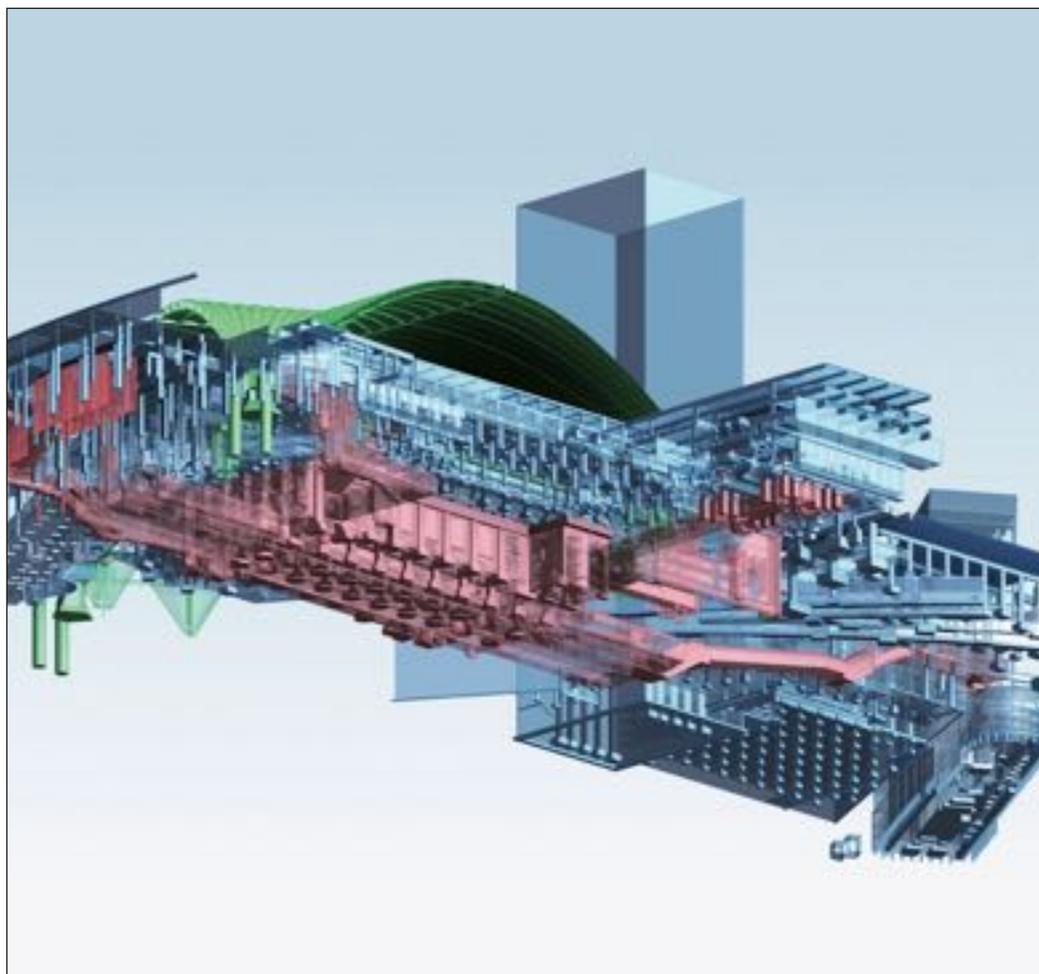
L'ouvrage relie le quai de la Seine, le boulevard des Maréchaux et le périphérique. Il franchit le faisceau de voies en provenance de la gare d'Austerlitz et l'ancienne petite ceinture ferrée.

Pour remodeler l'échangeur, Artelia a dévoyé momentanément les 8 voies du périphérique vers le côté sud (Ivry). Cette option n'a été réalisable qu'avec le concours de tous les acteurs.

Le chantier a été imaginé par les architectes Yves Lion associés et Marc Mimram pour la Société d'étude, de maîtrise d'ouvrage et d'aménagement parisienne.

### → Fuites d'eau et intelligence artificielle

Pour la 1<sup>re</sup> fois, un prix Territoires et innovation a été décerné. Il va à Altereo pour HpO, système qui prédit les risques de fuite sur les réseaux d'eau. Il recourt à de l'intelligence artificielle en se basant sur les caractéristiques du réseau, l'environnement et l'historique des défaillances. Enfin, le prix Industrie et conseil en technologies est attribué à Sofresid pour une barge de services aux navires dans les ports, notamment en électricité. ■



La gare sous le Cnit (Paris/La Défense) est réalisée sous Bim. Ici, représentation de la gare (couleur brique) et des avoisinants.

## TRAVAUX PUBLICS : BONNE ANNÉE 2019



© GÉRARD ROLLANDO / SGP

Le Grand Paris Express génère 3,2 milliards d'euros de travaux publics par an jusqu'à 2022. Ici, roue de coupe du tunnelier à Arcueil-Cachan (Val-de-Marne) sur la ligne 15 sud, en février 2019.

À u 30 octobre, la Fédération nationale des travaux publics comptait sur une hausse du chiffre d'affaires pour 2019 de 10% par rapport à 2018, à 45 milliards d'euros<sup>(1)</sup>. C'est plus qu'estimé fin 2018 (+5,5%).

À l'international, elle l'évalue à 32 milliards (30 milliards en 2017).

Selon la Fédération, cette hausse est liée au profil du mandat des maires de 2014 à 2019 qui a retardé les investissements. « La baisse des dotations s'est répercutée de façon brutale sur les investissements des collectivités tandis que dans le même temps la réorganisation territoriale - loi Maptam puis Notre<sup>(2)</sup> - freinait ou reportait de très nombreux projets sur les territoires. » Ainsi, 2016 est-elle le point le plus bas de l'activité des travaux publics. Le rattrapage s'est manifesté à partir du

second semestre 2017 et jusqu'à 2019, année pré-électorale favorable. Dans cette logique, l'activité s'annonce stable avec, toutefois, une hausse de 5% du côté des départements avant les élec-

### PRÉVISIONS 2020

Maîtrise d'ouvrage	Proportion en chiffre d'affaires	2020/2019
<b>Collectivités locales</b>	<b>41%</b>	<b>-0,5%</b>
dont communes et EPCI	<b>31,5%</b>	<b>-2%</b>
dont départements	<b>7,5%</b>	<b>+5%</b>
dont régions	<b>2%</b>	<b>+3%</b>
<b>État</b>	<b>3,2%</b>	<b>+10%</b>
<b>Grands opérateurs</b>	<b>21%</b>	<b>+5%</b>
<b>Privé</b>	<b>35%</b>	<b>+2,5%</b>
<b>Évolution de l'activité en valeur</b>	<b>100%</b>	<b>+2%</b>
<b>Évolution en volume</b>		<b>0%</b>

tions des conseillers départementaux en 2021 (dites cantonales).

#### → Prudence pour 2020

L'avenir au-delà de 2020 se dessine prudemment. Selon la FNTP, les collectivités ont de l'épargne et sont moins endettées. Le regroupement de communes inscrit les investissements dans un schéma pluriannuel moins fragile. Les besoins en réseau numérique très haut débit, en transport et distribution d'énergie, en renouvellement du réseau ferré et routier, devraient soutenir les travaux.

L'État a finalement affecté 3 milliards d'euros à l'Agence de financement des investissements de transport de France dans le projet de loi de finances 2020. Le conseil d'administration de l'Afitf a annoncé 2,44 milliards d'euros engagés au total en 2019<sup>(3)</sup>.

Le Grand Paris Express compte pour plus de 2 points de croissance de l'activité des TP en 2019 et tourne autour de 3,2 milliards en moyenne jusqu'à 2022. D'autres projets inspirent de la prudence à la FNTP : le canal Seine-Nord-Europe et la liaison ferroviaire Lyon-Turin avec son tunnel de 57,5 km.

Le plan de relance autoroutier va s'éteindre progressivement en 2021 et 2022.

La fin du taux réduit de la TICPE sur le gazole non routier en trois temps d'ici 2022, va renchérir la production de 0,5%. À partir du 1<sup>er</sup> juillet 2020, le carburant des engins coûtera plus cher ainsi que les matériaux issus de carrières. ■

<sup>(1)</sup> Cf. *Travaux* n°949, mars 2019, page 10.

<sup>(2)</sup> Loi de Modernisation de l'action publique territoriale d'affirmation des métropoles, n°2014-58 ; loi sur la nouvelle organisation territoriale de la République, n°2015-991.

<sup>(3)</sup> Cf. communiqué ministère de la Transition écologique, 31 octobre.

## NORMANDIE : RECYCLER PLUS DE DÉCHETS

*Recyclage de l'épine (RDE) à Oissel en Seine-Maritime n'accepte pas les déchets du BTP les yeux fermés.*

*Elle visite, au préalable, le chantier. Puis elle analyse les matériaux pour savoir s'ils sont acceptables au traitement. Ceux-ci sont vérifiés et enregistrés à l'arrivée sur la plateforme avant d'être triés et préparés en vue du concassage et du criblage. Après un dernier contrôle, ils sont vendus pour des sous-couches routières, du terrassement, des remblais, du réaménagement de carrière, etc. RDE produit 50 000 tonnes de matériaux réutilisables par an.*

*L'activité de cette entreprise illustre les efforts de la section Normandie de l'Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction (Unicem) sur les granulats recyclés. Dans la région, le BTP produit 5,65 millions de tonnes de déchets inertes. 82% sont recyclés ou valorisés, selon l'Unicem.*

*La demande normande s'élève à 19,19 millions de tonnes de granulats.*

*Les carrières en fournissent 16 et les granulats issus de démolition, 3,19, réaménagement de carrière exclu.*

*Sur le long terme, l'Unicem veut accroître le recyclage et la valorisation par l'information auprès des professionnels, des écoles, à travers des documents, ainsi que par le suivi et la traçabilité des déchets.*



© UNICEM NORMANDIE

Plateforme de recyclage-valorisation à Oissel (Seine-Maritime).

## SYSTRA À PARIS ET À LONDRES

La Société du Grand Paris (SGP) a confié à Systra l'assistance technique à maîtrise d'ouvrage des lignes 15 Ouest et 15 Est du futur métro automatique sous le régime de la conception-réalisation. C'est la 1<sup>re</sup> fois que la SGP procède ainsi <sup>(1)</sup>.

Le groupe d'ingénierie et de conseil va définir le programme, gérer les appels d'offres puis la réalisation. Les premières consultations sont prévues début 2020.

La ligne 15 reliera en 2030 la station Pont de Sèvres (Paris) à celle de Champigny Centre (Val-de-Marne) en passant par le nord, à Saint-Denis-Pleyel (Seine-Saint-Denis). Par ailleurs, Systra fait partie du groupe qui va construire la gare Olk Oak Common, au nord-ouest de Londres (Angleterre), sur la ligne à grande vitesse H52.

Le groupement comprend, outre Systra (16% des parts), Vinci (42%) et Balfour Beatty (42%).

Le contrat de 1 milliard de livres (1,157 milliard d'euros) comprend la conception, la construction et la mise en service de la gare dont six quais souterrains, plus huit quais pour la Great Western main line, voisine.

Les travaux préliminaires commencent cette année avec une étude géotechnique et la réalisation de pieux.

<sup>(1)</sup> Cf. Travaux n°951, juin 2019, p. 7.

## ACCORD IDEOL-TAISEI

Nouveau partenariat au Japon pour Ideol, conceptrice d'éoliennes flottantes à flotteur en béton. L'entreprise a signé le 10 octobre un accord avec Taisei, groupe de BTP pour développer et promouvoir ce type d'installations.

Taisei construit des barges en béton et des tunnels sous-marins.

\* Voir aussi Travaux n°953, septembre 2019, p. 12.

## INFRASTRUCTURES : DÉTECTER LES POINTS VULNÉRABLES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE



Rails et traverses se sont retrouvés "suspendus" après les fortes pluies en octobre, à Villeneuve-les-Béziers, sur une ligne classique entre Béziers et Sète (Hérault).

© SNCF RÉSEAU

Les effets induits par le changement climatique sur les infrastructures ouvrent de vastes champs de recherche. Egis et Autoroutes Paris-Rhin-Rhône (APRR) collaborent sur des recommandations pratiques à l'usage des gestionnaires d'ouvrages sur tracé routier. Le recueil précisera quels sont les points les plus vulnérables à l'évolution des températures, des précipitations et autres événements inhabituels, et qu'il faut surveiller. Ce sera l'aboutissement, dans une petite année, du projet "Méthodologie d'analyse de la résilience des infrastructures au changement climatique" (Mari-CC) qui a obtenu une aide financière de la Ferec (Fondation d'entreprise recherche collective pour la construction et les infrastructures) comme cinq autres projets, le 30 septembre (cf. Travaux n°955, novembre).

→ **Analyse sur un tronçon**

Mari-CC va d'abord recenser les travaux de recherche sur le sujet comme, par exemple, le projet Rimarocc (chute de blocs) ou le guide de l'AIPCR *Vulnérabilité des infrastructures géotechniques au changement climatique et mesures d'adaptation selon le contexte géographique* <sup>(1)</sup>.

Les effets induits les plus connus sont le gonflement et la rétraction des argiles, l'érosion due au ruissellement, l'abaissement du niveau des nappes, les glissements de terrain, etc. Le projet observe leurs conséquences sur les dommages routiers. Egis et APRR vont appliquer et adapter l'analyse à un tronçon du réseau autoroutier du Grand-Est qu'ils choisiront suffisamment riche en remblais renforcés, parois clouées,

remblais sur sols compressibles, etc.

→ **Interviewer des gestionnaires**

« Nous allons aussi interviewer des gestionnaires de parc d'ouvrages pour recueillir leurs constatations des événements sur leurs infrastructures qui, selon eux, sont liés aux nouveaux phénomènes météorologiques, » informe Louis Janodet (Egis). ■

<sup>(1)</sup> 2012, cf. [www.piarcc.org](http://www.piarcc.org).

## SAVOIR OÙ DÉSIMPERMÉABILISER

Les collectivités locales sont prêtes à rendre leurs sols plus perméables aux eaux de pluie mais elles ont des budgets restreints.

Road & Eau propose d'aider les collectivités à identifier les zones où c'est le plus pertinent de modifier les revêtements. Il s'agit de dresser une typologie des zones critiques, selon la pente, le terrain environnant, les obstacles en milieu urbain qui contribuent à l'accumulation sans infiltration, etc.

Le projet du Cerema et de l'Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement (Astee) a reçu une aide de la Fondation Ferec, fin septembre. L'Astee se charge de la plateforme internet où seront cartographiés les projets ayant utilisé les solutions préconisées.



**NOTRE TERRAIN DE JEU**

Nos engins BROKK surclassent aisément les méthodes de démolition traditionnelles! Rapide, économique, efficace et puissant, le BROKK vous apporte polyvalence et rentabilité sur tous vos chantiers.

Brokk France | [www.brokk.fr](http://www.brokk.fr)

**BROKK**

## TRIO D'ÉOLIENNES FLOTTANTES DANS LE MORBIHAN



© MHI VESTAS OFFSHORE WIND

Une éolienne flottante MHI Vestas Offshore Wind a été installée fin octobre, à 250 km des côtes de Galice (Espagne). Il faudra attendre 2022 en France, pour voir fonctionner les trois en projet entre l'île de Groix et Belle-Ile, à 22 km de la côte.

Le projet français, lauréat en juillet 2016 de l'appel à projets Eolflo de l'Ademe, a d'abord été présenté avec 4 éoliennes de General Electric. Après le retrait de celui-ci, le Danois MHI Vestas Offshore Wind a proposé trois machines de 9,5 MW/unité. Elles produiront 100 GWh par an, soit

l'équivalent de la consommation électrique de 47 000 habitants.

### → Flotteur en acier

L'éolienne V164 repose sur une plateforme submersible conçue par Naval Energies. Le flotteur, en acier, est constitué d'une colonne centrale pour le mât et de trois périphériques de 35 m de haut reliées par un ponton de 85 m, taille proche des 88 m du mât et des 82 m des pales. Le ballast est rempli d'eau une fois en place. La plateforme est ancrée au fond de la mer, ici à 55-70 m, par cinq câbles. Le tout sera raccordé à la côte à Plouharnel (Morbihan) sous maîtrise d'ouvrage RTE.

### → 230 millions d'euros

Maîtrise d'ouvrage, société de projet : Ferme éolienne flottante de Groix & Belle-Ile (CGN Europe Energy, Banque des territoires, Eolfi).

Coût : 230 millions d'euros. Aide de l'Ademe au titre des Investissements d'avenir.

<http://eoliennes-groix-belle-ile.com> ■

## GRAND PARIS EXPRESS : CALCAIRE RECYCLÉ

*Ciments Calcia récupère du calcaire dans les déblais des travaux du Grand Paris Express et le réutilise directement pour fabriquer du ciment.*

*En 2018, 50 000 tonnes ont ainsi été réutilisées. Il est prévu 180 000 tonnes en 2019 et plus de 250 000 tonnes en 2020.*

*Le cimentier travaille sur ce point avec la Société du Grand Paris depuis 2016. La collaboration a commencé par la caractérisation de la ressource qui s'est révélée « en tout point identique à la nature du calcaire exploité en carrières », selon Ciments Calcia, et donc répondant aux spécificités du process cimentier.*

*Le calcaire issu des déblais est utilisé dans l'usine de Gargenville (Yvelines) sans « opération préalable importante de tri et de préparation ».*



Membre du Réseau Compté Intempéries BTP

## CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

### Nos missions :

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

La CNETP regroupe plus de **7 700 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à près de **260 000 salariés**.

### Nos coordonnées :

#### · Par courrier :

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

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

#### · Par mail : sur [www.cnetp.fr](http://www.cnetp.fr), lien [écrire un e-mail](#)

#### · Par téléphone :

- pour les entreprises : 01.70.38.07.70

- pour les salariés : 01.70.38.09.00



## VIADUC SUR BAIE EN MARTINIQUE



Le pont suspendu franchit la baie en une portée de 386 m.

gis a remporté, avec l'agence Lavigne-Chéron Architectes, la maîtrise d'œuvre du viaduc de Fond Lahayé en Martinique. L'ouvrage, qui se situe sur la route nationale 2, à Shoelcher, sur la côte centre-ouest de l'île, vise à désenclaver la côte nord. Le pont suspendu de 386 m de portée entre pylônes fran-

chit la baie du quartier de Fond Lahayé. Sur ses 25,6 m de large, il abrite une route deux fois deux voies ainsi qu'une promenade pour les modes doux en balcon côté mer. La solution n'impacte ni les falaises ni le fonds marin, et a peu d'emprise sur le milieu urbain. Le viaduc est implanté en zone à risques.

Le tablier métallique et sa suspension constituée de deux nappes latérales de câbles, devront résister à des vents cycloniques. Par ailleurs, il est doté d'amortisseurs parasismiques.

#### → Pylônes inclinés

Les pylônes de 50 m de haut sont inclinés vers l'arrière et fondés profondément

dans les falaises afin qu'ils ne les déstabilisent pas. Leurs coques latérales sont en béton fibré ultra-performant.

La maîtrise d'œuvre comprend la finalisation des études d'avant-projet, les études projet, dossiers réglementaires, passation des marchés de travaux et supervision du chantier. ■

### TROPHÉES DES CANALISATEURS : LARGE ÉVENTAIL DE SOLUTIONS



© ALEXIS TOUREAU

Le gant bionique est doté d'une puissance de pression.

Les entreprises qui concourraient aux trophées de l'innovation des Canaliseurs avaient cinq minutes pour convaincre l'auditoire. Top chrono ! Le public était invité à voter pour six trophées. Le jury des Canaliseurs a décidé du prix spécial.

Ce prix spécial a été attribué à un gant doté d'une puissance de pression au bout des doigts. Cette force soulage l'effort d'un ouvrier qui soulève une charge, tire un outil, etc. Le gant "bionique" est relié à un petit sac à dos qui abrite son "cerveau". Les interviewés de la vidéo promotionnelle l'ont beaucoup apprécié. Il a été essayé par 75 salariés d'Eiffage

qui l'a proposé avec Bioservo Technologies.

Chez les prétendantes au trophée "repérage des réseaux", il a été question de réduire l'intervention des géomètres. Le lauréat, Rezo Process, le fait quand même intervenir en garantie du récolement. Il s'agit de relever par smart phone et géoréférencement les réseaux neufs et existants à fouille ouverte. Le récolement est visible par l'intervenant suivant, en réalité augmentée y compris sur chantier. Le service se paie par mètre linéaire.

En gestion patrimoniale, le trophée est allé à Canascan qui fournit l'état des

réseaux rencontrés lors d'une ouverture de tranchée. En est déduite leur durée de vie restante. Les échantillons prélevés peuvent être répartis sur une carte pour avoir une vue plus générale.

#### → Petite turbine de pilotage

En catégorie "prévention", le trophée a été décerné à un crochet de levage radiocommandé. Le Ludwighook est fixé sur le crochet de la grue. Par sécurité, il ne s'ouvre que quand la charge est posée à terre.

Deux autres trophées réfèrent davantage au développement durable. En "innovation" a été récompensée la Picogen, une petite turbine à poser dans une canalisation pour produire l'électricité nécessaire à la mesure et au pilotage d'un réseau. Une puissance de 40 W suffit.

#### → Matériaux non utilisés

Le trophée "gestion de l'entreprise" a été remis à Stockpro qui vise à réutiliser les matériaux en trop d'un chantier. Au lieu de les oublier dans un coin pour finir par les jeter, les entreprises les entrent dans une application mobile par leur code barres et précisent la quantité.

Un employé peut se réserver un produit. Ce stock peut aussi être mis en vente sur une plateforme internet dédiée. Slogan de ceux qui l'ont imaginé : « Augmenter votre trésorerie. »

Toutes les innovations sur : [www.canaliseurs.com](http://www.canaliseurs.com), rubrique actualités. ■

### CENTRALE SOLAIRE À STOCKAGE D'ÉLECTRICITÉ

Une centrale solaire thermodynamique avec stockage d'énergie fonctionne depuis mai à Llo (Pyrénées-Orientales), près de la frontière espagnole. C'est une première mondiale, selon les actionnaires de la société de projet Ello : Suncnim et la Banque des territoires (49%).

La centrale comprend 153 000 m<sup>2</sup> de miroirs à concentration du rayonnement solaire. Les rayons chauffent un tube contenant de l'eau qui devient vapeur et peut alors actionner une turbine électrique (puissance 9 MW). La vapeur non utilisée de suite est stockée dans 9 ballons, soit 1 000 m<sup>3</sup>, et correspond à quatre heures de consommation d'électricité de 6 000 foyers.

Basé sur la technologie de Fresnel, l'équipement est construit à proximité de prototypes de la même famille : fours solaires de Felix Trombe (1949) et du CNRS-Promes d'Odeillo-Via (1969) ainsi que la centrale Thémis (années 1980) dont Cnim était déjà partie prenante.

Suncnim, filiale de Cnim, exploite la centrale de Llo qui a coûté 65 millions d'euros y compris le développement. L'électricité produite bénéficie d'une garantie du tarif de rachat.



© LUDWIGHOOK

Le crochet radiocommandé ne s'ouvre qu'à la dépose de la charge.



© GÉRARD AZEVA

Montage de la centrale à Llo (Pyrénées-Orientales).

### FOREUSE EN COLOMBIE

Une foreuse est à pied d'œuvre à Ibagué (Colombie) pour creuser les piles d'un pont de 1 500 mm de diamètre à 30 m de profondeur en moyenne. Le sol est particulièrement dur car le site se situe à proximité du volcan Nevado del Tolima (5 220 m). La machine LB 36 de Liebherr fore 10 à 15 m par jour. Elle est opérée par Mincivil, une des six entreprises du groupement APP Gica.

L'ouvrage est un de ceux à construire entre Ibagué et Cajamarca sur un axe est-ouest au centre du pays. Il s'inscrit dans un grand projet latino-américain de rénovation et d'extension de 7 000 km de routes, le 4G Toll Road Concession Program qui a démarré en avril 2016 et se termine en 2024. Il se monte à 528 millions d'euros.



© LIEBHERR

La machine fore 10-15 m par jour.

### INNOVATIONS SALON DES MAIRES ET BATIMAT

Seasurge, système modulaire de protection contre la submersion marine, a remporté un des 7 prix innovation du salon des Maires (19-21 novembre, Paris), celui dans la catégorie Prévention, sécurité, sûreté.

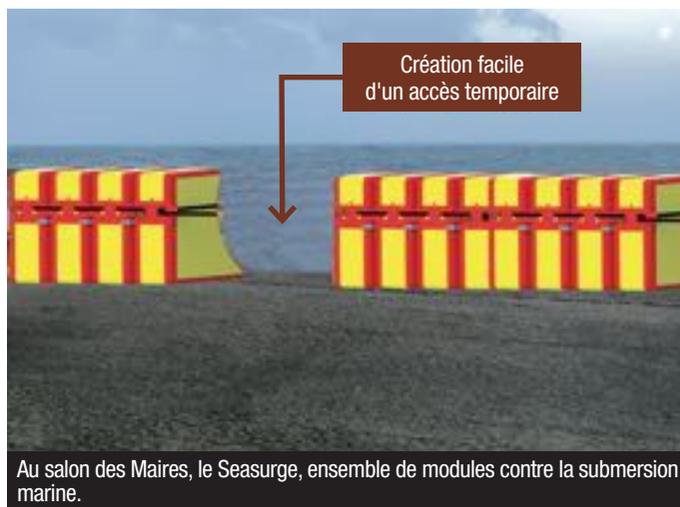
Ces blocs gonflés à haute pression puis remplis d'eau, ont été conçus et expérimentés sur le terrain par The Dam Technology, société située dans la Manche. Le dispositif peut être adapté pour servir de séparateur de voie, de protection de chantier et même contre les véhicules béliers.

Les nouvelles technologies et systèmes d'information étaient également bien représentés au salon des Maires. Citons le Vedetect, parmi les trois finalistes de cette catégorie, réseau de capteurs installés dans des lampadaires qui fournit des informations en temps réel sur le trafic. Vedecom qui l'a conçu, remporte le prix "bâtiment, travaux publics, voirie" pour un logiciel d'aide à la maintenance préventive de marquage routier rétro-réfléchissant.

Globalement, les innovations contribuent « à la cohésion des territoires entre le rural, l'urbain et le péri-urbain », selon les organisateurs du salon, l'Association des maires de France et des présidents d'intercommunalité (AMF) avec le groupe Moniteur. Le jury des prix était présidé par Pierre Jarlier, président de la commission Aménagement, urbanisme et habitat de l'AMF.

#### → Coffrages moins pénibles

Sur Batimat (4-8 novembre, Paris), 10 produits ont remporté un Award innovation.



Au salon des Maires, le Seasurge, ensemble de modules contre la submersion marine.

© THE DAM TECHNOLOGY

Hussor remporte un prix pour son projet Ergoform destiné à réduire la pénibilité des coffrages, développer la sécurité et augmenter la productivité.

Le projet supprime l'utilisation de la barre à mine, l'échelle, la clé à main, l'huile de coffrage, des lests, etc. Il développe des solutions techniques comme l'élingage au sol, les écrous à débrayage intégré, des assemblages latéraux rapides, des positionneurs de banches et des escaliers d'accès extérieur. Le pilotage automatisé de trains de coffrages complets fait gagner 25% de temps, selon le fabricant.

#### → Bim bien représenté

Notons également parmi les primés, l'appareil Leica BLK3D. L'utilisateur capture, visualise et indexe des données en 3D à partir d'une photo de l'existant. Le dispositif regroupe un logiciel, des capteurs et

une capacité de traitement des données, ce qui évite d'avoir à se raccorder, sur le terrain, à une plateforme offrant ses services.

Non primé mais finaliste et représentant du déploiement du Bim sur Batimat, Allplan a présenté une solution de calculs de sections des ponts. Le logiciel va jusqu'à planifier la fabrication des ouvrages et à séquencer la construction. Le modèle une fois élaboré avec Allplan Bridge, est transféré vers Allplan Engineering pour d'autres phases comme l'étude de détails, l'armature et les plans.

**Palmarès toutes catégories sur :**  
[www.salondesmaires.com/visiter/palmares-de-linnovation-2019/](http://www.salondesmaires.com/visiter/palmares-de-linnovation-2019/) et sur [www.batimat.com/Innovation-2019/](http://www.batimat.com/Innovation-2019/) ■



Sur Batimat : coffrage intelligent anti-pénibilité.

© HUSSOR

## AGENDA

### ÉVÉNEMENTS

#### • 22 ET 23 JANVIER

##### Rencontres de la mobilité intelligente

Lieu : Beffroi Montrouge (Hauts-de-Seine)  
<https://congres.atec-its-france.com>

#### • 28 AU 30 JANVIER

##### Assises européennes de la transition énergétique

Lieu : Bordeaux  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

#### • 4 AU 6 FÉVRIER

##### Euromaritime

Lieu : Marseille  
[www.euromaritime.fr](http://www.euromaritime.fr)

#### • 5 ET 6 FÉVRIER

##### Learning Technologies France

Lieu : Paris (Porte de Versailles)  
[www.learningtechnologiesfrance.com](http://www.learningtechnologiesfrance.com)

#### • 6 FÉVRIER

##### Colloque du Syndicat des énergies renouvelables

Lieu : Paris (Unesco)  
[www.colloque-ser.fr](http://www.colloque-ser.fr)

#### • 19 FÉVRIER

##### Fascicule 74 (2018) CCTG construction et réhabilitation des réservoirs en béton ou en maçonnerie

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

#### • 17 MARS

##### Géosynthétiques en milieu fluvial et maritime

Lieu : Orléans (Loiret)  
[www.cfg.asso.fr](http://www.cfg.asso.fr)

#### • 24 ET 25 MARS

##### Reconvertir les friches polluées

Lieu : Paris (Porte Maillot)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

#### • 31 MARS ET 1<sup>er</sup> AVRIL

##### Bim World

Lieu : Paris (Porte de Versailles)  
[www.bim-w.com](http://www.bim-w.com)

#### • 26 AU 29 AVRIL

##### 4<sup>e</sup> conférence panaméricaine des géosynthétiques

Lieu : Rio de Janeiro (Brésil)  
[www.cfg.asso.fr](http://www.cfg.asso.fr)

#### • 27 AVRIL AU 1<sup>er</sup> MAI

##### Conférence géothermie

Lieu : Reykjavik (Islande)  
[www.geothermal-energy.org](http://www.geothermal-energy.org)

#### • 20 AU 22 MAI

##### Culture et génie civil

Lieu : Wrocław (Pologne)  
[www.iabse.org](http://www.iabse.org)

#### • 15 AU 18 JUIN

##### Rocexs (protection chutes de roches)

Lieu : Sapporo (Japon)  
[www.ec-pro.co.jp/rocexs2020/](http://www.ec-pro.co.jp/rocexs2020/)

### NOMINATIONS

#### ANRU :

Nejma Monkachi a été nommée directrice générale adjointe de l'Agence nationale de rénovation urbaine. Elle est chargée des projets de transformation dont un nouveau système d'information et le passage de l'Agence à la comptabilité industrielle et commerciale. Elle remplace Sarah Lacoche qui a rejoint Action Logement. Véronique Chenail occupe le

poste de secrétaire générale, nouveau à l'Anru.

#### ENAC :

À partir du 1<sup>er</sup> janvier et jusqu'en 2024, Claudia Rebeca Binder sera la doyenne de la Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit (Enac), regroupant trois instituts d'architecture, de génie civil et d'environnement, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse).

#### ENR À L'EXPORT :

Jean-Louis Bal, président du Syndicat des énergies renouvelables, a été nommé fédérateur pour ces énergies à l'export, par le ministre de l'export et des affaires étrangères, Jean-Yves Le Drian. Il fera émerger une offre réunissant les acteurs français du domaine.

#### SNCF RÉSEAU :

Emmanuelle Saura succède à Pierre Boutier à la direction territoriale Occitanie du réseau ferré.

## LE BIM, BON POUR LA PRÉVENTION

Le Bim est « un allié de la prévention trop souvent sous-estimé », écrit l'Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics (OPPBT) qui propose un ouvrage sur ce thème.

Il apporte une meilleure compréhension et visualisation du chantier. Il réduit les risques d'ensevelissement en terrasse-

ment. Grâce à des mannequins numériques, il adapte le poste de travail à la personne et préfigure le travail en zone restreinte.

La prévention est intégrée avant le chantier. Les mouvements des engins de levage et de travail en hauteur peuvent être simulés. La cohabitation entre métiers est prise en compte.

En annexe, les collisions solidiennes, volumiques et temporelles sont expliquées en images.

Le document de 40 pages, téléchargeable gratuitement, complète le guide "Conduite de projets en Bim, le Bim pour la sécurité des chantiers", paru en mars, d'Entreprises générales de France BTP.

[www.preventionbtp.fr](http://www.preventionbtp.fr) ■



## OUVRAGES EN SOLS FINS

Le recyclage de matériaux suppose d'utiliser des matériaux disponibles sur les sites de construction. Les sols fins extraits d'ouvrages en terre (barages, digues, remblais) sont d'une réutilisation délicate et limitée.

L'ouvrage *Conception et construction des ouvrages en sols fins* répond à ces dif-

ficultés. Il propose des retours d'expérience et des outils de conception. Six personnes y ont participé au titre du projet de recherche Terredurable ou de leur activité professionnelle.

Les domaines de comportement des sols fins ont été découpés en fonction de leur degré de saturation. Sont explorés

les mécanismes à l'origine de la résistance capillaire et du coefficient  $\chi$  de Bishop, ainsi que la compréhension du compactage des sols fins. Des recommandations sur certains essais ont été rédigées.

[www.presses-des-ponts.fr/notre-librairie/](http://www.presses-des-ponts.fr/notre-librairie/) ■



# GRAND PARIS EXPRESS LA MACHINE EST LANCÉE, PLACE À L'ÈRE INDUSTRIELLE

2019 a été marquée par un développement d'une ampleur inédite des activités liées au Grand Paris Express, dans toutes leurs dimensions. Un changement d'échelle continu depuis trois ans puisqu'un million de tonnes de terre a été excavé en 2017, trois millions en 2018 et qu'en 2019 ce sont cinq millions de tonnes de déblais qui ont été extraits du sous-sol francilien. Thierry Dallard, président de la Société du Grand Paris Express fait le point sur l'avancée des travaux et l'évolution de la méthode de management du projet.

**Entretien avec Thierry Dallard, président de la Société du Grand Paris.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1

## En octobre 2019, où en est le projet du Grand Paris Express ?

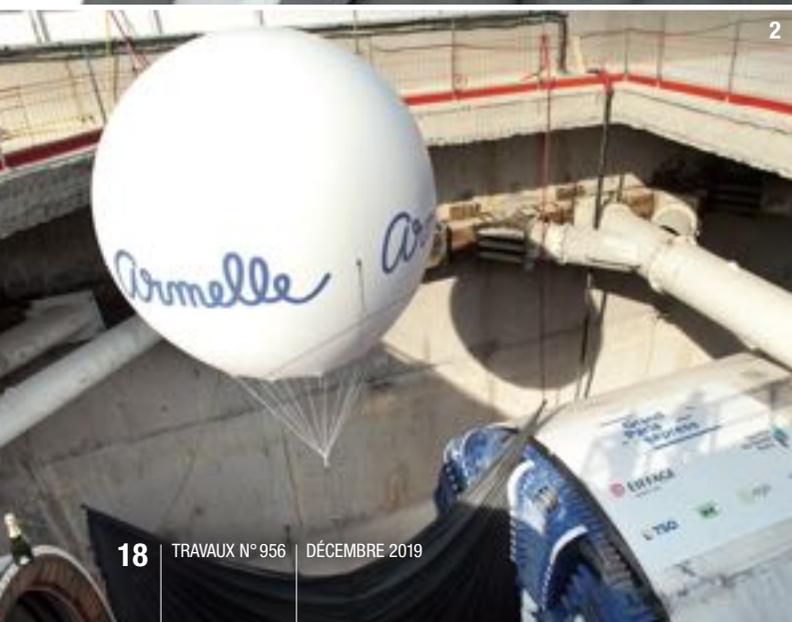
La machine est lancée. La crise de 2017/2018 est derrière nous pour plusieurs raisons. La première est la décision du premier ministre Édouard Philippe en février 2018 ayant confirmé l'intégralité du Grand Paris Express. Elle a mis fin à toutes les rumeurs et à toutes les craintes.

Elle s'est traduite, sur le terrain, par des éléments visibles. Alors que nous avions, en décembre 2018, deux tunneliers installés sur le chantier, nous en aurons quinze à la fin de l'année 2019. Ce passage à l'ère industrielle est concret et répond à toutes les interrogations : lorsqu'on a lancé quinze tunneliers, on ne s'arrête plus. Nous aurons engagé près de 20 mil-

liards d'euros à la fin de 2019. Le projet va se faire. Le débat est clos.

La question, maintenant, est d'en maîtriser les coûts et les délais.

Nous avons déjà revu et repensé l'organisation de la Société du Grand Paris pour qu'elle soit en capacité de passer de la gestion d'une ligne en travaux à toutes les lignes en travaux. Cela s'est traduit par une réorganisation qui a été débattue avec le personnel et approuvée début 2019, puis par un plan de recrutement qui nous a fait sortir du plafond qui existait antérieurement. Nous allons passer de 230 personnes en 2018 à 430 à la fin de 2019 et cela va continuer puisque la cible est plutôt de 750 personnes à la fin de 2020 pour atteindre environ 1 000 personnes fin 2021.



2



3

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © SGP - OLIVIER BRUNET - FIGURE 3 © SGP

Ce programme de recrutement est à la hauteur de ce projet hors norme. À titre de comparaison, alors que RFF, entre 1994 et 2014, a dû investir de l'ordre de 20 milliards d'euros, la Société du Grand Paris va investir entre 35 milliards d'euros et 40 milliards d'euros en 10 ans. Il s'agit de réaliser en quinze ans seulement l'équivalent du métro parisien qu'il a fallu 60 ans à construire. Il y avait donc nécessité de s'organiser de manière industrielle pour faire face aux impératifs du projet. À côté du volet interne se situe le volet politique avec la reconstruction de liens

**1- Thierry Dallard, président de la Société du Grand Paris.**

**2- Baptême du premier tunnelier de la ligne 16 " Armelle " au puits Braque.**

**3- Descente de la roue de coupe du tunnelier "Ellen" au puits Robespierre à Bagneux (Hauts de Seine).**

**4- Chantier de la gare de "Villejuif - Institut Gustave Roussy" à l'inter-section des lignes 14 et 15.**

**5- Le lancement du troisième tunnelier du Grand Paris Express baptisé "Ellen" en référence à la navigatrice Ellen McArthur a attiré près de 6000 personnes.**

## THIERRY DALLARD : PARCOURS

**Thierry Dallard est un ancien élève de l'École Normale Supérieure (promotion 1987), docteur en mécanique des fluides de l'Université de Paris VI (1992), et diplômé de l'École des Ponts et Chaussées (1993).**

**Un corps d'origine dans lequel il s'investit puisqu'il a présidé de 2012 à 2018 l'Union des ingénieurs des ponts, des eaux et des forêts (l'UnIPEF).**

**Il a dirigé, au cours de sa carrière, plusieurs services de programmation, de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage. Passé par le CETE Méditerranée (devenu Cerema Méditerranée) au poste de chef du département Infrastructures et transports, il a rejoint en 2003 la société des Autoroutes du Sud de la France, où il a pris la direction du développement pour la France et l'international.**

**Il a ensuite été nommé sous-directeur à la direction générale des routes au ministère de l'Équipement en 2004, où il pilotait la réorganisation des services routiers. Avant de devenir l'année suivante chef de la mission stratégie et réorganisation des services, puis directeur adjoint.**

**En 2007, Thierry Dallard devenait le directeur du développement France de Meridiam Infrastructure, fonds spécialisé dans les infrastructures. Il avait été nommé, en 2016, directeur délégué France de Meridiam. Il a notamment été maître d'ouvrage ou associé à des projets majeurs comme la LGV Tours-Bordeaux, la LGV Nîmes-Montpellier, le boulevard périphérique de Marseille dit " rocade L2 ", le vélodrome de Saint Quentin-en-Yvelines, le port de Calais 2015.**

**En 10 ans, Meridiam a développé une soixantaine de projets à travers le monde pour un total de 50 milliards d'euros d'investissements.**

**La candidature de Thierry Dallard, une fois retenue par le gouvernement, a fait l'objet d'un avis du Conseil de surveillance de la SGP, le 22 mars 2018. Cette étape passée, Thierry Dallard a été auditionné par les commissions compétentes de l'Assemblée nationale et du Sénat avant d'être nommé par décret par le ministère des Transports.**

**Président de la SGP depuis le 30 mai 2018, il est le quatrième pilote de la société après Philippe Yvin, qui occupait le poste de président du directoire depuis le 20 février 2014, succédant à Étienne Guyot (septembre 2011 - février 2014) et Marc Véron qui fut dans un premier temps "préfigurateur" de l'établissement public, avant d'être nommé président du directoire le 24 septembre 2010.**

**Son parcours professionnel en a fait un spécialiste des infrastructures et des modes de financement. La maîtrise d'ouvrage est le fil rouge de son action.**

de confiance et d'instances de gouvernance apaisée. La première d'entre elle c'est le Conseil de surveillance qui s'est accompagnée de la mise en place de tableaux de bord et de *reportings* réguliers, tous les deux ou trois mois, au cours desquels il est fait un état précis de l'avancement de tous les chantiers, mais aussi des risques identifiés et des solutions envisagées pour les gérer. C'est aussi la relance au niveau territorial d'un cycle de réunions avec ce que nous appelons des "conférences de ligne" qui ajoutent un étage entre le conseil de surveillance et les réunions locales organisées avec les maires et les acteurs de terrain concernés par les chantiers. Ces conférences permettent d'associer un ensemble de communes pour leur présenter en commun l'avancement des travaux sur les tronçons qui les concernent directement. C'est enfin rebâtir pour les entreprises un calendrier d'appels d'offre clair et tangible afin de leur donner une visibilité leur permettant de s'organiser, d'investir en capital humain pour préparer ces appels d'offre et d'y répondre de la manière la plus pertinente car la maîtrise des coûts est évidemment une donnée indissociable du projet.

### Combien reste-t-il encore d'appels d'offre à lancer ?

Il en reste encore une douzaine en génie civil ou en conception-réalisation. En conception-réalisation, nous avons défini quatre lots qui seront lancés entre 2020 et 2022 avec des signatures qui s'étaleront entre 2022 et 2024.

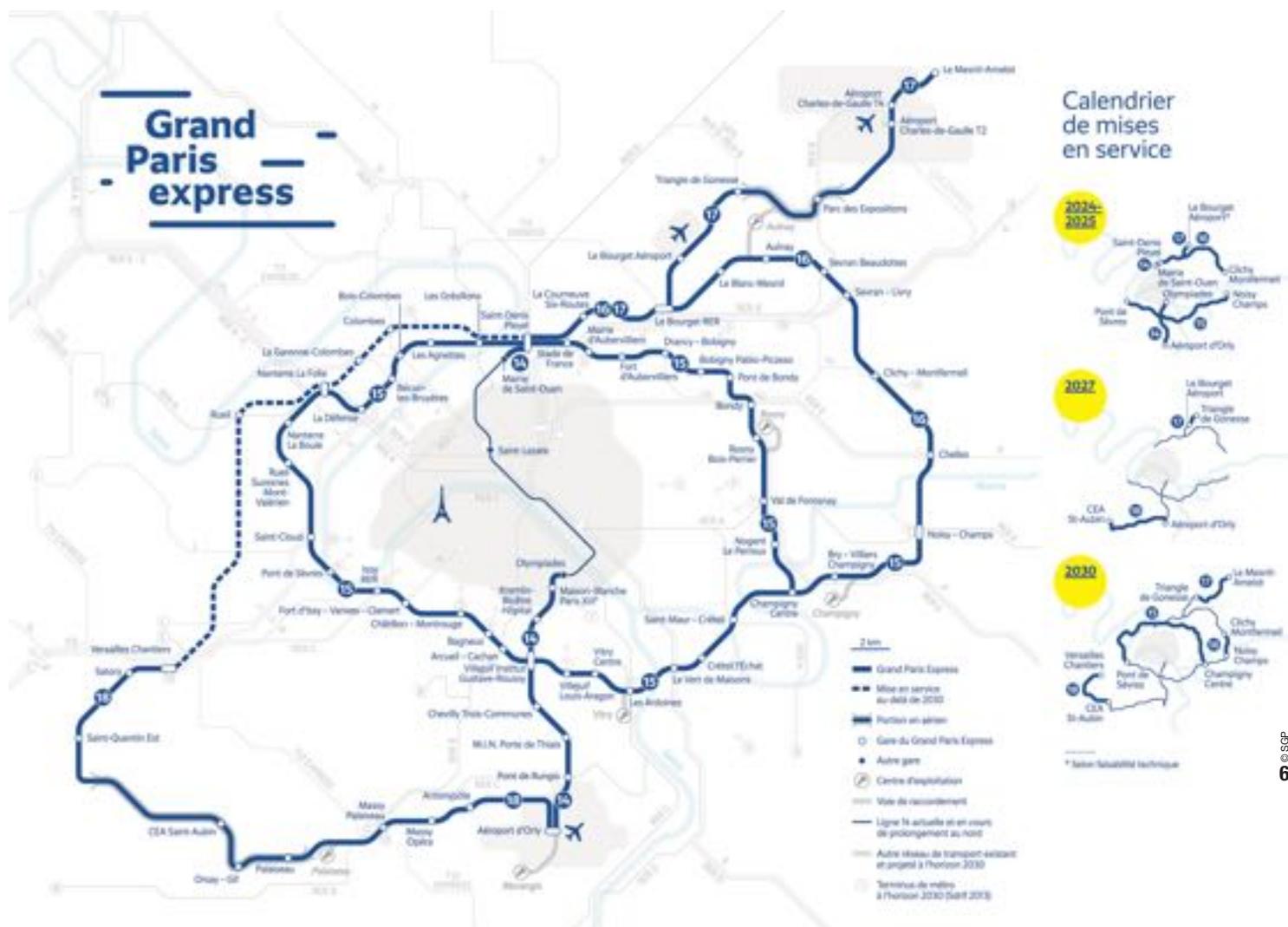
Plusieurs lots importants en matière de maîtrise d'œuvre vont être lancés ou signés : le lot 1 de la ligne 18, sera signé début 2020, le lot ouvrage d'art de la ligne 18 est en cours d'appel d'offre, ▷

© SGP



© SGP





© SGP  
6

le lot 3 de la ligne 18 - entre Orly et le plateau de Saclay - sera lancé début 2021 et signé début 2022.

Aujourd'hui, la ligne 18 est la seule sur laquelle les travaux lourds de génie civil n'ont pas encore commencé, mais les travaux de dégagement d'emprise et de déviations de réseaux sont déjà en cours.

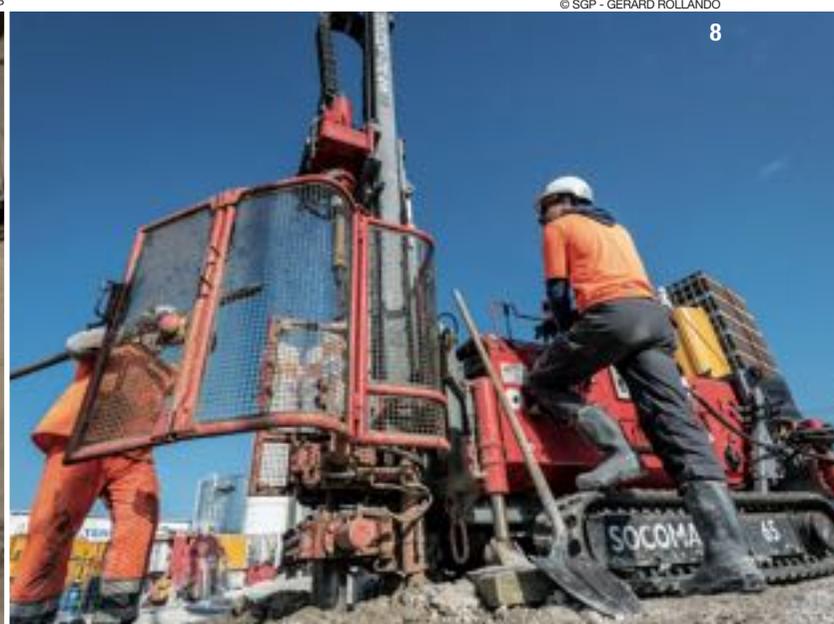
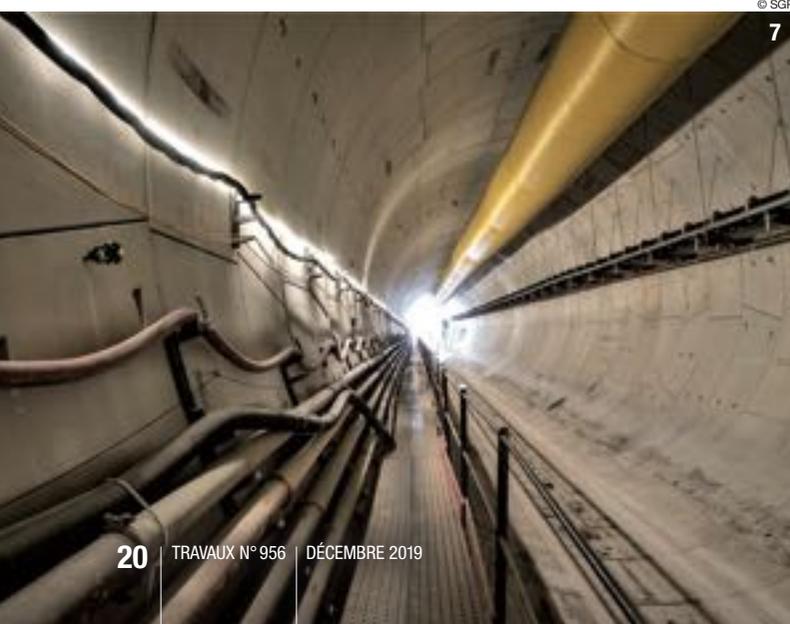
L'objectif est que les derniers lots soient signés avant le premier trimestre 2022. Sur la ligne 17, le premier lot en souterrain entre Le Bourget et le Triangle

## LE GRAND PARIS EXPRESS EN BREF

**Le Grand Paris Express consiste à construire 200 km de nouvelles lignes de métro automatique soit quatre nouvelles lignes (15, 16, 17 et 18) et le prolongement de deux autres (11 et 14). Le RER E sera aussi étendu en banlieue Ouest avec notamment une nouvelle gare à La Défense. 68 nouvelles gares seront construites sur le Grand Paris Express. Ce métro permettra de réduire les temps de transport de banlieue à banlieue mais également d'assurer une desserte plus rapide entre les trois aéroports (Roissy, Orly, Le Bourget) et Paris. À terme, deux millions de passagers devraient emprunter ces nouveaux moyens de transport.**

de Gonesse a été signé début 2019. Le deuxième lot pour le viaduc est en cours de préparation. Le troisième lot qui permettra d'achever la ligne 17 avec la desserte de l'aéroport de Roissy - Charles de Gaulle d'ici 2030 est en cours d'étude. Le troisième lot de la ligne 16 est en appel d'offre avec un objectif de signature au deuxième trimestre de l'année 2020.

Parallèlement, les travaux sont déjà engagés sur la ligne 15 Sud avec l'entrée en action de quatre tunneliers :



- Le tunnelier Aby, de Vitry - Les Ardoines à Villejuif - Louis Aragon ;
- Le tunnelier Ellen de Bagneux à Fort d'Issy Vanves Clamart ;
- Le tunnelier Amandine d'Arcueil - Cachan vers Villejuif - Louis Aragon ;
- Le tunnelier Malala de Noisy - Champs vers Bry Villiers - Champigny.

Le cinquième tunnelier - Steffie-Orbival - qui est en fait le premier à avoir été engagé a terminé son parcours entre le centre d'entretien de Champigny et la ligne 15 Sud. Il est en cours de démontage.

Sur la ligne 15 Sud, trois autres tunneliers sont en cours de montage : le premier pour aller de Créteil - L'Échat vers Champigny, le deuxième pour relier Pont de Sèvres (Île Monsieur) à Fort d'Issy - Vanves - Clamart, le troisième baptisé Marina, pour la liaison entre Vitry - Les Ardoines et Créteil - L'Échat. Le rythme est extrêmement soutenu. On n'a jamais vu en Europe, peut-être dans le monde, autant de tunneliers travailler en même temps sur le même territoire.

Pour répondre à ce défi, les entreprises ont su se mobiliser notamment pour former les équipes qui pilotent ces engins ainsi que notre partenaire Herrenknecht qui fournit la quasi-totalité des tunneliers.

Sur la ligne 16, cinq tunneliers sont en cours de montage. Le tunnelier Armelle, que nous avons baptisé en septembre 2019, partira mi-octobre et reliera Aulnay-sous-Bois au Blanc-Mesnil.

Les autres assureront la liaison depuis le Puits Mandela pour aller direction ouvrage Cachin à Saint-Denis, depuis le Puits du Canal vers l'ouvrage Finot, depuis l'ouvrage Verdun vers l'ouvrage Hugo, et depuis l'ouvrage Verdun à Puits du Canal.

Sur la ligne 14 dont la maîtrise d'ouvrage est confiée à la RATP (NB : le financement est assuré à 100 % par la Société du Grand Paris), trois tunneliers ont été baptisés en 2019 :

- "**Claire**", depuis Pont de Rungis vers Chevilly Trois-communes (l'Hay-les-Roses) ;
- "**Koumba**" depuis Morangis vers Pont de Rungis ;
- "**Allison**", de Chevilly Trois-communes (l'Hay-les-Roses) à Maison Blanche Paris 13.

C'est une grande famille prête à s'élancer pour réaliser les 200 km de tunnels du Grand Paris Express. Une vingtaine de tunnelier sera en fonctionnement au cours de l'année 2020.

**6- Carte du Grand Paris Express avec le calendrier des mises en service suite aux arbitrages gouvernementaux de février 2018.**

**7- Chantier du puits "Champigny Plateau" sur la ligne 15.**

**8- Plus de 6000 personnes travaillent aujourd'hui sur les chantiers du Grand Paris Express.**

**9- Projet "Les Lumières Pleyel" de Sogelym Dixense au cœur du quartier Pleyel à Saint-Denis.**

**10- Près de 130 chantiers sont déjà ouverts autour de Paris pour le GPE.**

## Qu'en est-il de votre vision de la maîtrise d'ouvrage ?

La maîtrise d'ouvrage a la redoutable responsabilité d'être intégratrice de toutes les demandes parfois contradictoires qui entourent le projet. Certains voudraient un projet de meilleure qualité, donc plus coûteux, d'autres un projet plus économique, certains un projet plus rapide, ou qui génère moins de nuisances. La gestion d'un projet c'est la gestion des contradictions et celle du consensus dans un contexte très contraint.

Par rapport à cela, et c'est l'un des enjeux majeurs pour la Société du Grand Paris, enjeu renforcé dans le cadre d'un projet urbain comme c'est le cas, même si le métro est souterrain, puisqu'il comporte quelque 250 ouvrages à l'air libre, il s'agit de gérer son territoire, son entourage, ses parties prenantes, que ce soient les riverains, les élus du territoire, d'être capable de les écouter, de les entendre, de trouver la solution la plus "acceptable" dans un champ de contraintes encore une fois dense, qu'elles soient réglementaires, financières ou de cohabitation avec les riverains.

Cela demande une grande souplesse pour s'adapter, pour trouver les solutions vraiment ciblées aux problèmes. C'est l'un des domaines dans lequel la Société du Grand Paris a investi dès les premiers jours puisque ces compétences étaient nécessaires dès le début pour élaborer le schéma directeur et le schéma d'ensemble et caler finalement la position des gares.

C'est une tradition ancienne ancrée dans la Société du Grand Paris.

Après, dans les parties prenantes, il y a les entreprises et, *in fine*, ce sont elles qui construisent. Pour moi, il est important de les écouter, de les entendre,

de trouver des solutions avec elles dans un contexte où le marché est particulièrement tendu, de faire en sorte qu'elles aient envie de travailler avec nous parce qu'elles savent que nous sommes un maître d'ouvrage clair, rigoureux, capable de gérer avec elles des problèmes complexes.

Je pense notamment à deux types de marché et deux types de tension. En Île-de-France, les marchés du bâtiment sont particulièrement tendus du fait du boom de l'immobilier, notamment du tertiaire.

Les marchés du génie civil et du ferroviaire, avec de très grands projets dans le monde en Europe, en Asie ou au Moyen Orient consomment également beaucoup de ressources des entreprises. Il faut l'avoir présent à l'esprit. Face à cette concurrence mondiale, nous devons donc réussir à mobiliser les meilleures entreprises, les meilleurs ingénieurs, les meilleures ingénieries pour faire le projet du Grand Paris Express.

Ce projet est à la hauteur de la concurrence mondiale dans laquelle se situe Paris.

Concernant la maîtrise d'ouvrage et les entreprises, nous avons engagé l'an dernier un changement d'approche contractuelle pour une partie du Grand Paris Express : le bouclage de la ligne 15 à l'Est et à l'Ouest, où nous avons arrêté les contrats de maîtrise d'œuvre alors que nous étions encore assez loin du lancement des appels d'offre pour les travaux.

Nous leur avons substitué quatre contrats de conception-réalisation que nous sommes en train de préparer afin de mobiliser les entreprises plus tôt dans la conception, d'avoir de leur part une responsabilisation et un engagement plus importants. ▷

© SGP - SOGELYM DIXENSE

9



© SGP - GÉRARD ROLLANDO

10



### Pour quelle raison ?

Tout simplement parce qu'à travers le monde, ce montage de type conception-réalisation est le plus fréquent pour les grands projets complexes et que c'est aussi le plus efficace. La France est un peu un cas singulier avec la loi MOP. Au fil des décennies, les entreprises ont concentré beaucoup de compétences dont on se prive en n'ayant autour de la table que des ingénieries pour élaborer un projet.

Associer les entreprises plus tôt, c'est permettre d'avoir une expertise particulièrement riche et de mieux les responsabiliser sur les choix qui seront faits en matière de conception et de réalisation. L'interface entre les travaux et la conception sont souvent au cœur des difficultés que l'on peut avoir, contractuellement parlant, dans la vie d'un chantier. Je pense que cette solution sera mieux adaptée au cas présent et nous l'abordons avec le souci de trouver un transfert de risques qui soit adapté à ce que chacun peut porter. Dit autrement, ce n'est pas parce qu'on est en conception-réalisation que tous les risques sont transférés aux entreprises. Il s'agit de transférer aux entreprises le risque qu'elles savent gérer et qu'il est intéressant financièrement pour l'opération de transférer.

Ce changement ne concerne que les appels d'offre qui seront lancés pour les lignes 15 Est et Ouest qui représentent environ 20% du réseau.

Pour les autres lignes, les projets étaient trop avancés pour qu'un tel changement puisse être réalisé sans entraîner une perte de temps. Les marchés des lignes 16, 17 et 18 étaient trop avancés pour bénéficier de cette formule jugée plus rapide et plus économique. Soit les chantiers étaient en cours, soit les dossiers de consulta-

tion des entreprises étaient lancés, et revenir en arrière aurait fait perdre du temps.

Les appels d'offre conception-réalisation intègrent désormais les entreprises de génie civil et d'équipements ferroviaires. L'intérêt d'un tel montage est visible : il limite les interfaces, il donne l'occasion aux entreprises d'exprimer leur savoir-faire, surtout pour celles qui ont l'expérience de projets de ce genre. C'est aussi une façon pour nous, non seulement de mieux maîtriser les coûts et les délais, mais de viser la cible de 2030 qui est la date fixée par le Premier ministre dans sa feuille de route du 22 février 2018 pour la livraison de l'intégralité du Grand Paris Express.

### Comment les aléas techniques sont-ils gérés sur ce chantier ?

Ces aléas techniques, nous avons déjà essayé de les identifier au préalable au maximum par des campagnes de reconnaissance géotechnique très ambitieuses puisque nous avons réalisé plus de 6500 sondages de reconnaissance depuis 2012.

Cela ne suffit pas toujours. Il faut effectivement en permanence être capable de faire face à ce que le chantier nous révèle, être capable de changer de mode de réalisation et de mode opératoire. C'est l'un des enjeux de la conception-réalisation de pouvoir être plus rapide dans cette capacité à changer de méthode.

Aujourd'hui, dans le système de la loi MOP, on trouve une somme d'acteurs dont les intérêts ne sont pas toujours identiques : maître d'ouvrage, assistant au maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprises. Il est clair que, lorsqu'un aléa se produit, il faut aller très vite et ce mode à trois ou quatre acteurs n'est pas le plus efficace pour réagir.

### La gestion du chantier vis-à-vis des riverains fait-elle l'objet de dispositions particulières ?

Les interférences du chantier vis-à-vis des riverains sont évidemment nombreuses. Cela peut être les poids lourds qui approvisionnent le chantier en matériel ou ceux qui évacuent les déblais, cela peut être des nuisances liées au bruit ou à l'organisation du chantier lors des interventions nocturnes. C'est une mobilisation de tous les instants. Pour rendre les choses le plus acceptables, nous avons essayé le plus possible de réduire ces nuisances par l'installation de palissades anti-bruit ou la protection des équipements pouvant générer des bruits de moteur pour en réduire l'impact. Nous sommes à l'écoute de tous les cas particuliers qu'il faut évidemment intégrer dans l'action. Nous avons notamment développé une unité "riverains" qui est chargée

d'assurer le lien entre l'équipe projet et l'environnement pour réagir au plus vite lorsqu'une difficulté est signalée.

Nous avons également recherché des solutions pour réduire la part du trafic poids lourds en utilisant au mieux la voie fluviale ou la voie ferroviaire. Même si c'est notre priorité, ce n'est pas pour autant simple de le faire partout. Il faut que le fleuve ne soit pas trop loin du projet pour que l'on puisse, par tapis convoyeurs, transporter les matériaux. Il en est de même des embranchements ferroviaires. Là aussi, il faut être assez proche du lieu d'embarquement. Mais il y a d'autres contraintes. Il faut aussi que l'endroit où la barge ou le train apporte les matériaux ne soit pas trop loin de l'exutoire où on va les déposer.

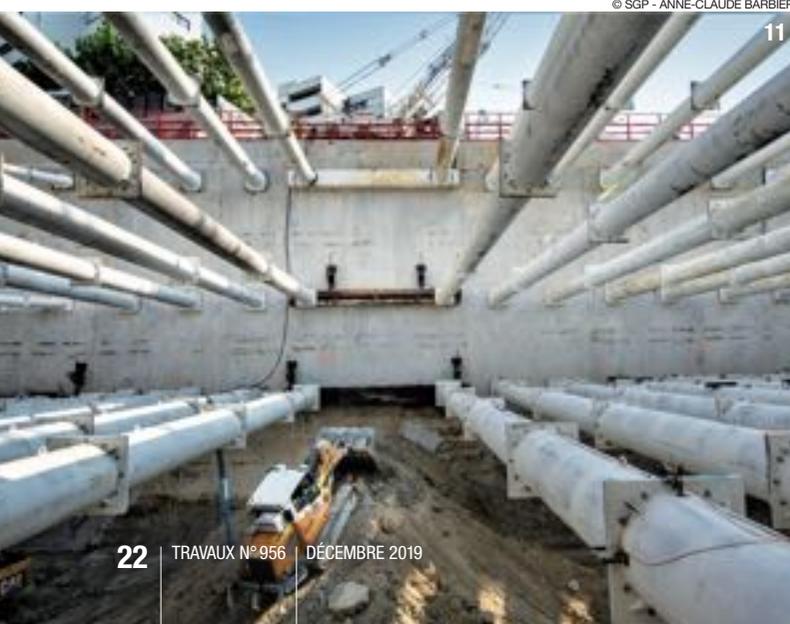
### Combien de personnes travaillent déjà ou vont travailler pour ce projet ?

Aujourd'hui plus de 6000 personnes travaillent sur les chantiers du GPE répartis sur près de 130 chantiers. Au pic d'activité, c'est-à-dire courant 2021, le nombre d'emplois devrait atteindre près de 15000.

Par ailleurs, grâce aux arbitrages du Premier ministre rendus en 2018, la Société du Grand Paris a pu se réorganiser, comme je vous l'indiquais précédemment, va pouvoir tripler ses effectifs d'ici 2022 et ainsi se structurer pour faire face à l'accélération des chantiers. À ce jour, près de 380 personnes travaillent à la Société du Grand Paris.

### Le Grand Paris Express peut-il être considéré comme un projet écologique ?

Le Grand Paris Express est l'un des plus importants projets écologiques en France pour plusieurs raisons : parce qu'il va permettre de lutter



11



12

massivement contre le réchauffement climatique et l'artificialisation des sols, parce que le réseau va transporter 2 à 3 millions de voyageurs par jour... ça sera autant d'automobilistes en moins, parce que ses 68 nouvelles gares vont permettre d'engager une véritable révolution urbaine pour reconstruire la ville sur elle-même et construire massivement des logements. La zone urbaine impactée autour des gares est immense : c'est l'équivalent d'une fois et demie la superficie de Paris intramuros qui va pouvoir se transformer grâce aux bénéfices des nouvelles mobilités.

Le Grand Paris Express va relier, en rocade, des territoires qui ne sont pas connectés entre eux aujourd'hui, et sans passer par le centre de Paris. Il va offrir des opportunités inouïes en matière d'accès à l'emploi, aux équipements de santé ou d'éducation par exemple. Un exemple concret : en 45 minutes aujourd'hui, un habitant de Clichy-Montfermeil a accès à 300 000 emplois. Demain avec le Grand Paris Express, la même personne accèdera, toujours en 45 minutes, à plus de 3 000 000 d'emplois. Le Grand Paris Express agit comme un levier puissant en faveur de la cohésion sociale. Notre projet, c'est un projet qui permettra à 8 millions de personnes de mieux vivre en Île-de-France.

C'est aussi un projet utile pour la France parce que les retombées économiques seront immenses : les meilleurs économistes estiment à 10 milliards par an le PIB qui sera généré par la mise en service du réseau au projet de tout notre pays.

Le projet du Grand Paris favorise également la recherche, l'innovation et la valorisation industrielle. Sept territoires (ou "clusters") ont ainsi été identifiés

## 2019 : CHANGEMENT D'ÉCHELLE

**Cette année, une quinzaine de tunneliers ont été déployés, huit sont déjà en train de creuser. De nombreux chantiers préparatoires ont basculé en chantiers de génie civil, marquant ainsi le déploiement ou la consolidation de 130 chantiers sur les territoires du Grand Paris.**

**À noter qu'en moyenne, une gare du nouveau métro représente un chantier équivalent à celui d'un immeuble de dix étages creusé dans le sol, de 100 mètres de long et de 70 mètres de large... Face à ces défis, les équipes de la Société du Grand Paris sont totalement mobilisées pour la mise en œuvre de la feuille de route décidée par le Premier ministre le 22 février 2018, qu'il s'agisse des travaux de la ligne 15 Sud ou des lignes dites "olympiques" dans le nord de la Capitale actuellement en chantier, mais également pour toutes les autres lignes encore en étude.**

**Pour soutenir ce rythme, la Société du Grand Paris a programmé en 2019 un budget s'élevant à 3,9 milliards d'euros de dépenses et qui prévoit un recours à l'emprunt à hauteur de 3,3 milliards d'euros. Le succès de sa première émission obligataire 100% verte en octobre dernier permet à l'entreprise d'aborder les deux prochaines émissions à réaliser en 2019 avec optimisme. La SGP entend capitaliser sur les atouts et sur les immenses bénéfices économiques, sociaux et environnementaux du projet pour s'assurer des meilleures conditions de financement auprès des investisseurs internationaux.**

**L'attribution de marchés publics, essentiellement en génie civil et en systèmes, s'est donc amplifiée après une année 2018 déjà très active. Vingt-trois marchés de travaux d'aménagement de gares et d'ouvrages annexes seront lancés dans les deux années à venir.**

**L'enjeu en 2019, pour les équipes, c'était aussi de préparer le passage des lignes 15 Est et 15 Ouest sous le régime de la conception-construction ainsi que le lancement du marché pour les matériels roulants de la ligne 18.**

**En quelques années seulement, l'activité de la SGP a généré un impact économique et social considérable.**

**Au 1<sup>er</sup> juillet 2019, plus de 3200 entreprises bénéficiaient des travaux du Grand Paris Express, dont près de 2300 TPE/PME pour un montant de 996 millions d'euros. Une activité qui profite à l'économie locale puisqu'au total 1 426 TPE/PME franciliennes ont été mobilisées sur les chantiers du Grand Paris Express, dont 1 659 sur la ligne 15 Sud et 440 sur la ligne 16. La dimension sociale des chantiers du Grand Paris Express est aussi notable puisqu'en moyenne, sur dix salariés, une personne et demie est en parcours d'insertion. Ainsi au 1<sup>er</sup> juillet 2019, plus de 6 400 personnes travaillaient sur les chantiers du Grand Paris et, depuis le début des chantiers, 1264 personnes en insertion réalisant 836 182 heures au total. Une dynamique qui va encore s'amplifier avec le changement d'échelle du projet.**

comme pôles de développement stratégiques : Saclay (pôle de l'Innovation et la Recherche), Villejuif - Évry (pôle de la Santé), La Défense (pôle économique et financier), Saint-Denis - Pleyel (pôle de la Création), Roissy CDG (pôle des Échanges internationaux et de l'Évènementiel), Le Bourget (pôle de l'Aéronautique), et Descartes - Marne-la-Vallée (pôle de la Ville Durable).

## En ce qui concerne la feuille de route du projet, qu'en est-il des délais ?

Le gouvernement a dévoilé le 22 février 2018 le nouveau calendrier du Grand Paris Express. L'ensemble du réseau est sanctuarisé et le chantier s'achèvera définitivement en 2030.

Édouard Philippe a non seulement confirmé la réalisation de l'intégralité du nouveau métro, mais aussi ses ambitions pour les Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024.

**En 2024** : la ligne 14 Nord et le tronçon commun des lignes 16 et 17 entre Saint-Denis Pleyel et Le Bourget RER, l'extension de la ligne 14 Sud jusqu'à l'aéroport d'Orly.

**En 2025** : la ligne 15 Sud de Pont de Sèvres à Noisy-Champs ; la ligne 16 entre Aulnay et Clichy - Montfermeil. En 2027 : la ligne 17 jusqu'à la gare Triangle de Gonesse et la ligne 18 d'Orly jusqu'à la gare CEA Saint-Aubin.

**En 2030** : la ligne 15 Ouest, de Pont de Sèvres à Saint-Denis Pleyel et la ligne 15 Est, de Saint-Denis Pleyel à Champigny Centre ; la ligne 16, de Clichy - Montfermeil à Noisy - Champs ; la ligne 17, de la gare Triangle de Gonesse jusqu'à Mesnil-Amelot et la ligne 18, de CEA Saint-Aubin à Versailles Chantiers.

Ce nouveau calendrier est réaliste, tenable, mais tendu. □

© SGP

13



© SGP - L'AUTRE IMAGE

14





© TECNITUDE

# TECNITUDE MANUTENTION EN VRAC : UN MODE DE PROSPECTION ENTIÈREMENT DÉMATÉRIALISÉ

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

TECNITUDE EST UNE WEB-ENTREPRISE AYANT POUR ACTIVITÉ LA CONCEPTION, LA FABRICATION, LA VENTE ET LA LOCATION DE CONVOYEURS À BANDE MODULAIRES. SON ORIGINALITÉ : ELLE RÉALISE SON APPROCHE COMMERCIALE EN FRANCE ET À L'INTERNATIONAL EXCLUSIVEMENT PAR E-CONTACTS : [www.tecnitude.com](http://www.tecnitude.com). L'INTÉRÊT DE SES PRODUITS : UNE MODULARITÉ QUI LEUR PERMET DE S'ADAPTER À TOUS TYPES DE CHANTIER, QUEL QUE SOIT LE DOMAINE CONCERNÉ (TRAVAUX PUBLICS ET BÂTIMENT, INDUSTRIE, BIOMASSE, SECTEUR PORTUAIRE, DOMAINE FERROVIAIRE...). ÉRIC KOENIG, PRÉSIDENT ET FONDATEUR DE L'ENTREPRISE, PRÉSENTE L'ORIGINALITÉ DE SA DÉMARCHE.

Tout a commencé en 2001 en Alsace, avec une idée originale à l'époque et qui le demeure en grande partie aujourd'hui, d'organiser un nouveau *business model* basé essentiellement sur des relations commerciales développées par le biais d'in-

ternet : prendre contact avec des clients sans devoir obligatoirement se déplacer. Éric Koenig est issu de l'ingénierie "génie mécanique" et a passé l'essentiel de sa carrière à concevoir et mettre en œuvre des process industriels lourds.

Après quinze années passées dans ce secteur avec des voyages à répétition un peu partout dans le monde, anticipant sur le développement de la "toile" encore émergente, l'idée lui vient d'organiser un business sans avoir à se déplacer pour prospecter : créer un

mode d'approche inversée, basé sur des contacts utiles, en l'occurrence avec des clients qui viennent à lui pour trouver une solution à un besoin. « *Nous ne prospectons pas, indique-t-il, mais la démarche présente malgré tout un énorme avantage. Internet n'a*

pas de frontière et le résultat est, qu'en 2019, Tecnitude intervient et livre ses produits dans près de 30 pays dans le monde, de la Mongolie aux États-Unis, en passant par l'Afghanistan, le Soudan, l'Afrique du Sud, la Russie, les pays européens... et la France. Nous exportons depuis 2005 et cette activité représente en moyenne de 30 à 50 % de notre chiffre d'affaires. »

Depuis sa création en 2001 et jusqu'en 2014, l'entreprise a connu une croissance régulière uniquement grâce à son positionnement sur la toile, avec une démarche dématérialisée et un développement de ses compétences techniques à distance.

Ceci a été également facilité par le fait que, par ses activités précédentes en tant que maître d'œuvre de projets, Éric Koenig avait l'habitude de gérer des dossiers à distance, avec des moyens de communication qui étaient loin d'être aussi sophistiqués qu'ils ne le sont devenus : « Dès le début des années 2000, j'avais obtenu que les quelques 25 intervenants avec lesquels j'étais en contact pour le développement d'une usine, soient capables de gérer à distance des fichiers autocad, ce qui n'était pas évident il y a une vingtaine d'années. Grâce à cette expérience, je me suis rendu compte qu'il y avait véritablement un nouveau métier à développer, avec une assistance à maître d'œuvre, voire à maître d'ouvrage, à distance. »

« Lorsque j'ai créé Tecnitude avec mes associés de l'époque, précise Éric Koenig, nous avons initié un site internet qui nous permette de proposer des produits tout en les mettant en adéquation avec l'idée de départ : il fallait qu'ils soient facilement compréhensibles, que les images correspondent bien aux besoins et surtout qu'ils s'inscrivent dans un système "lego", c'est-à-dire faciles à monter et à utiliser. »



## ÉRIC KOENIG : PARCOURS

**Avant de créer Tecnitude, Éric Koenig a exercé en tant qu'ingénieur d'affaires puis de directeur Industriel pendant une quinzaine d'années, au sein de l'entreprise Perrotin, une activité de conception de projets dans le secteur de l'industrie extractive pour la plupart des groupes présents dans ce domaine et notamment Eiffage, Vicat, Holcim, Lafarge, Colas, Vinci. Il s'agissait pour l'essentiel de concevoir et créer des installations de traitement de matériaux (concassage, criblage, lavage).**

**Puis il s'est dirigé vers des projets à structuration industrielle destinés à l'industrie minérale en France et à l'étranger pour Areva, BRGM, Veolia, Imerys, mais aussi au grand export dans des pays tels que le Soudan, le Niger, la Mongolie, la Guyane française.**

**Tecnitude est membre du réseau Idée Alsace et partage ses valeurs d'éco-citoyenneté. Elle s'engage au quotidien dans le développement durable par des opérations de tri et de recyclage de ses déchets, par une limitation de ses déplacements commerciaux, par son adhésion à diverses associations qui permettent d'entrer dans une démarche active d'éco-consommateur et de producteur plus responsable.**

**L'entreprise est d'ailleurs cohérente avec ses idées : elle chauffe ses locaux au bois avec un poêle canadien Bullerjan®, parraine des ruches d'abeilles, cueille les fruits de son jardin et cultive un potager à l'arrière de son siège social.**

**1- Éric Koenig, fondateur et président de Tecnitude.**

**2- Le chauffage des locaux de Tecnitude est assuré par un poêle à bois.**

**3- Le jardin potager à l'arrière du siège social de l'entreprise.**

Les premiers convoyeurs que développe Tecnitude sont mécanosoudés, volumineux, et il est possible d'en faire varier la longueur par ajout ou retrait d'éléments. Le système modulaire était né bien qu'encore un peu figé au niveau de sa polyvalence.

Les débuts sont un peu difficiles en raison des connexions encore aléatoires sur Internet.

Le véritable essor se produit dès 2007/2008 avec l'arrivée du haut débit

et son accessibilité à tous les acteurs qui entraîne une très grande démultiplication des contacts.

L'activité de Tecnitude à l'exportation connaît alors un développement très important. Le site est traduit en cinq langues : français, anglais, espagnol, allemand et flamand. Un essai en cyrillique n'ayant pas donné les résultats escomptés, il est rapidement abandonné.

Tecnitude couvre aujourd'hui quasiment la planète entière grâce aux contacts que génère son site.

Une autre démarche appelle un commentaire : le *business model* ainsi mis en place est totalement transparent. Il montre, explique et publie son idéologie et sa méthodologie dans le monde du transport en vrac. Il aide également, grâce à des outils en ligne, des concepteurs, des utilisateurs, des techniciens à mettre en œuvre ou à améliorer une installation de manutention.

« Toutes les réalisations sont par ailleurs publiées sur le site, précise Éric Koenig, y compris celles relevant de la location, de façon à mettre en évidence le caractère multisectoriel de l'entreprise et sa capacité à répondre à tous types et toutes problématiques de chantier. Le site internet a permis de quasiment dématérialiser la démarche commerciale qui se fait en arrière-plan, grâce à un travail très collaboratif avec les clients qui sont partenaires, dans 95 % des cas, dans l'élaboration du cahier des charges et dans le choix de la finalité de la fonction. »

La conception modulaire et modulaire des produits, quasiment en kits, permet par ailleurs de toucher à tous les secteurs ayant des problèmes de manutention : biomasse, agriculture, industrie du béton, plasturgie, domaines portuaire et ferroviaire, tri des métaux et bien sûr, bâtiment et travaux publics. ▶





4

© TECNITUDE

L'accès au site se fait par des mots-clés rattachés soit au produit, soit à un domaine sectoriel : chargement de barges, chargement de grains, chargement de glace, chargement de béton... soit quelques 200 mots-clés qui peuvent être mis en avant en fonction de la saisonnalité, de la typicité des chantiers visés, des secteurs d'activité recherchés... Le site est positionné sur des mots-clés ou des familles de mots-clés qui sont mis en avant plutôt que d'autres pendant certaines périodes de l'année, en fonction des saisons pour les travaux publics et l'agriculture, des investissements pour les collectivités locales...

La gamme de convoyeurs et d'accessoires aujourd'hui disponible permet d'adapter tous les produits à tous les métiers.

#### LA MANUTENTION EN VRAC DE A À Z

La manutention continue comprend deux grandes familles : la manutention en vrac et la manutention de charges isolées.

La première est destinée à un flux continu que l'on transfère d'un point d'alimentation vers un point d'évacuation. Le monde de la manutention de charges isolées déplace un volume clairement identifié et l'achemine vers un autre point.

Tecnitude est spécialisée dans la manutention de produits en vrac. Elle part toujours d'un point d'alimentation,

d'une usine, d'un poste de traitement ou d'un contenant pour faire de la mise en tas, de la mise en décharge ou pour alimentation d'une barge, Le contenant est généralement une trémie d'alimentation qui constitue le poste-clé dans l'outil de production d'une chaîne.

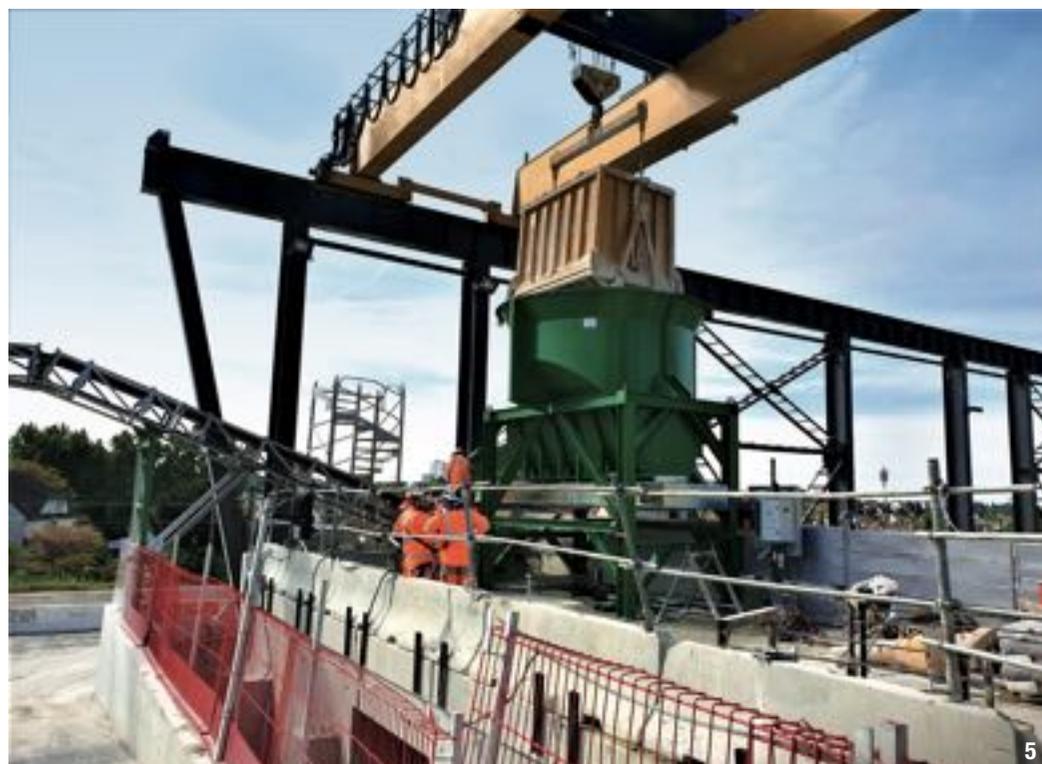
Par exemple, sur l'un des chantiers de la ligne 15 du Grand Paris Express,

**4- Trémie et extracteur à bande du chantier de la ligne 15 du Grand Paris Express.**

**5- Les bennes Secatol sur le chantier NGE de la ligne 15 du Grand Paris Express.**

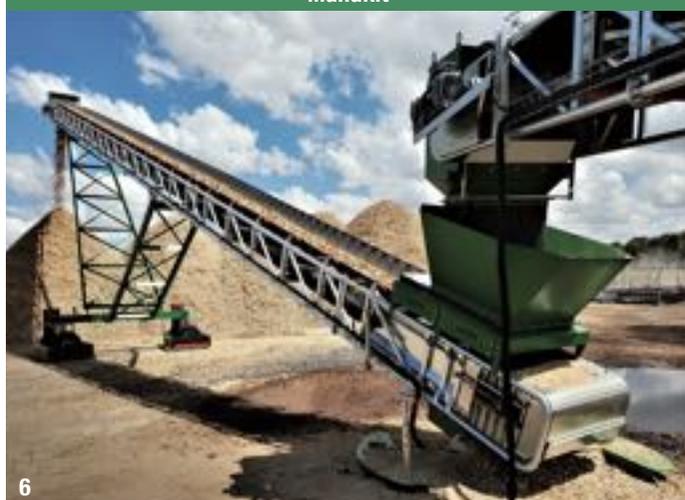
l'évacuation des matériaux est réalisée à partir d'une trémie circulaire de Tecnitude alimentée par des bennes Secatol à ouverture automatique. Sous la trémie, un extracteur à bande régule le flux et alimente une installation de mise en tas. Tecnitude fabrique également ce type d'extracteur.

Il faut noter à ce sujet que tous les produits et installations Tecnitude sont



5

© TECNITUDE

**Manukit**

6

© TECNITUDE

**Manubloc**

7

© TECNITUDE

**Manuplat**

8

© TECNITUDE

**Manuproject**

9

© TECNITUDE

**Manuextract**

10

© TECNITUDE

de conception modulaire. Ils sont ainsi en permanence paramétrables pour d'autres métiers et restent évolutifs dans le temps. Ils ne sont pas conçus pour un usage unique mais remanufacturables afin de leur attribuer d'autres fonctions, de répondre à d'autres projets voire d'autres métiers.

### TROIS GAMMES DE TRANSPORTEURS

Dans cette chaîne de production s'insèrent les transporteurs à bandes qui sont proposés en trois grandes gammes : Manukit, Manubloc, Manuplat. À ceci s'ajoutent le Manuproject, le Manuextract et les trémies de stockage.

**6- Manukit :** des convoyeurs industriels.

**7- Manubloc :** des convoyeurs "sauterelle" à ossature légère.

**8- Manuplat :** des tables de tri manuel compactes de conception modulaire.

**9- Manuproject :** pour la mise en tas de produits agricoles.

**10- Manuextract :** des organes de soutirage sous trémie d'alimentation.

Les **Manukit** sont des convoyeurs industriels permettant de transporter des charges lourdes à débit important. Leur structure à modularité tridimensionnelle est robuste et s'adapte à tous les secteurs d'activité tels que : bâtiment et travaux publics, domaine portuaire, recyclage, filière bois, indus-

trie minérale et extractive, transfert des matériaux de forte granulométrie, industrie métallurgique et extractive. Ils sont équipés de stations à trois rouleaux porteurs Ø 89 mm thermolaqués. La structure est du type treillis tubulaire en acier galvanisé, peint ou thermolaqué. La motorisation peut être hydraulique ou électrique par moto-réducteur de 3 à 30 kW, la bande caoutchouc est généralement livrée jonctionnée sans fin. Leur assemblage et leurs contrôles sont réalisés dans l'usine de Riedishheim. Les **Manubloc** sont des convoyeurs "sauterelle" à ossature légère disposant d'une bande en auge à deux ou trois rouleaux porteurs, la largeur de bande est comprise entre 300 à 1200 mm. Facilement modifiables, ces convoyeurs s'adaptent à toutes les applications et au contexte de chaque chantier. Paramétrables, à modularité tri-dimensionnelle, ils peuvent être déplaçables, orientables et réversibles. Préassemblés pour les contrôles, les essais et les réglages en usine, les convoyeurs Manubloc peuvent être livrés assemblés ou en modules séparés et repérés. ▷



11

© TECNITUDE

Les **Manuplat** sont des tables de tri manuel très compactes et de conception modulaire, ils s'insèrent souvent au milieu d'un process ou entre deux machines, par exemple, dans une usine de recyclage, dans l'industrie minérale, dans une usine de tri ou la dépollution.

Les **Manuproject** permettent la mise en tas notamment de produits agricoles ou d'engrais à des vitesses très élevées proches de 10 m/s. Modulaires et paramétrables, ils sont généralement suspendus à un transporteur à bande. Les **Manuextract** sont les organes de soutirage sous trémie d'alimentation. Ils sont à la fois extracteur, alimentateur et régulateur de débit, ils permettent non seulement d'effectuer du soutirage et de l'extraction mais également de la gestion de débits sous des trémies et des silos ou en sortie de ceux-ci. Souvent appelés "bande de dosage", les extracteurs à bande assurent un débit d'écoulement à la fois stable et précis, ils sont souvent équipés d'un moteur variateur voire d'organes de pesage.

**Les trémies d'alimentation ou de stockage forment la fin de la chaîne.** Ces contenants d'alimentation d'installation ou de stockage intermédiaire peuvent être équipés de plaques en PEHD, de plaques en inox, de blindages intérieurs, de moteurs vibrants, de percuteurs, de trappes manuelles ou mécaniques ; tous ces équipements sont modulaires et à paramètres variables.

#### DES CHANTIERS SUR MESURE

Les chantiers réalisés par Tecnitudo depuis sa création sont évidemment très nombreux. Certains mettent en évidence ses spécificités mieux que d'autres, étant entendu que sur tous les chantiers présentés dans ce reportage, l'entreprise en a effectué la totalité des prestations, de la définition du process à la conception-réalisation et en adéquation avec la problématique du chantier et du produit manutentionné.

#### SUR LE LAC LÉMAN

À Montreux, en Suisse, il s'agissait d'évacuer par barges 70 000 m<sup>3</sup> de

matériaux collants dont la granulométrie allait jusqu'à 400 mm. Pour la manutention de déblais et gravats issus de terrassements depuis les berges du Lac Léman pour le remplissage de barges - pendant une année - Tecnitudo a mis en place une trémie avec extracteur et un convoyeur à bande d'une longueur de 35 mètres dont le porte

à faux important était lié à l'implantation de l'installation de chargement sur la berge. La forte granulométrie (0/400 mm) et le produit colmatant ont sérieusement complexifié la mise en œuvre du projet. La tête du convoyeur a été équipée d'une goulotte de maintien de flux par manchette souple en caoutchouc.



12

© TECNITUDE

11- Dépollution pyrotechnique sur la LGV Paris-Strasbourg à Duntzenheim.

12- Convoyeur à bande Tecnitudo sur les marches du parvis de l'Arche de La Défense.

13- Chargement de barges à Montreux, en Suisse.



13

© TECNITUDE

Les produits à manutentionner étaient des plaques de marbre 0,36 m x 1,40 m d'un poids unitaire de 85 kg.

« La problématique était la recherche de gains de temps par la mécanisation du transfert des plaques de marbre, indique Éric Koenig. Pour des raisons sécuritaires, de phasage et d'accessibilité aux engins de chantier, le convoyeur à bande devait être facilement déplaçable et démontable, chaque composant devant être manipulable à la main. L'étude du poste de travail et de l'accessibilité à cette table de transfert inclinée était un des éléments clé du dossier. »

La solution a été la mise en œuvre d'un convoyeur à bande Manubloc E.A 22 m x 500 mm avec bande spéciale à plat, ensemble monté sur roues pneumatiques transversales reposant sur les marches. Y était associée la fourniture de commandes de mise en service déportées, équipées de potentiomètres afin d'accélérer ou de ralentir la vitesse d'acheminement des plaques.

## EN BREF ET EN CHIFFRES, TECNITUDE C'EST :

- Plus de 900 convoyeurs à bande en service
- Plus de 12 kilomètres de transporteurs à bande en fonctionnement
- Plus de 40 000 tonnes de produits manutentionnés par heure
- Plus de 800 mètres de convoyeurs à bande disponibles en permanence
- Export dans 30 pays
- Labellisation ISO 26000
- Démarches RSE (Responsabilité Sociale et Environnementale des Entreprises) et EFC (Économie de la Fonctionnalité et de la Coopération)

**14- Système de manutention pour la rénovation des toitures du Château de Vincennes.**

**15- Chantier du barrage de Sarrans, près de Rodez.**

**16- Chargement de barges en Mauritanie.**

## DÉPOLLUTION PYROTECHNIQUE

Sur le chantier de la LGV Paris-Strasbourg, à hauteur de Duntzenheim, lors des travaux de terrassements, est apparue la nécessité de réaliser la dépollution pyrotechnique de tout-venant argileux sur une ancienne décharge de munitions datant de la deuxième guerre mondiale. Pour la réaliser, Tecnitude a conçu un outil sur la base d'un dossier méthode réalisé avec la sécurité civile (DGSC). Les volumes

à traiter annoncés étaient de 350 m<sup>3</sup> environ d'un mélange constitué d'argiles plastiques, de terres et de munitions. Le débit souhaité était de 3 m<sup>3</sup>/h. (durée du chantier : 5 semaines).

La dépollution consistait à extraire des munitions d'un poids allant de 100 g à 20 kg contenues dans une terre très argileuse. Une grande partie du volume contenait des mottes de glaise compacte. Il fallait concevoir une chaîne complète de dépollution pyrotechnique entièrement automatisée, prendre en charge l'amenée, le montage, l'assemblage et le démontage des différents constituants de la chaîne ainsi qu'organiser le raccordement aux réseaux d'eau et d'électricité.

« La solution proposée par Tecnitude, indique Éric Koenig, a été la mise en œuvre d'un ensemble de traitement par lavage et de manutention composé d'une trémie, d'un extracteur à bande Manuextract, d'un tube laveur avec trommel de ciblage, d'un appareil de séparation magnétique et d'une chaîne de 3 convoyeurs Manubloc 500 de mise en tas. Le projet comprenait ▷



© TECNITUDE

14

15

© TECNITUDE

16

© TECNITUDE

également la conception d'une trémie et d'un convoyeur d'alimentation spécialement étudiés pour le soutirage de produits argileux et très colmatants. Sur ce chantier, Tecnitudo a été en charge du procédé et a réalisé l'ensemble des plans de configuration, de génie civil et de montage. »

### CHARGEMENT DE BARGES

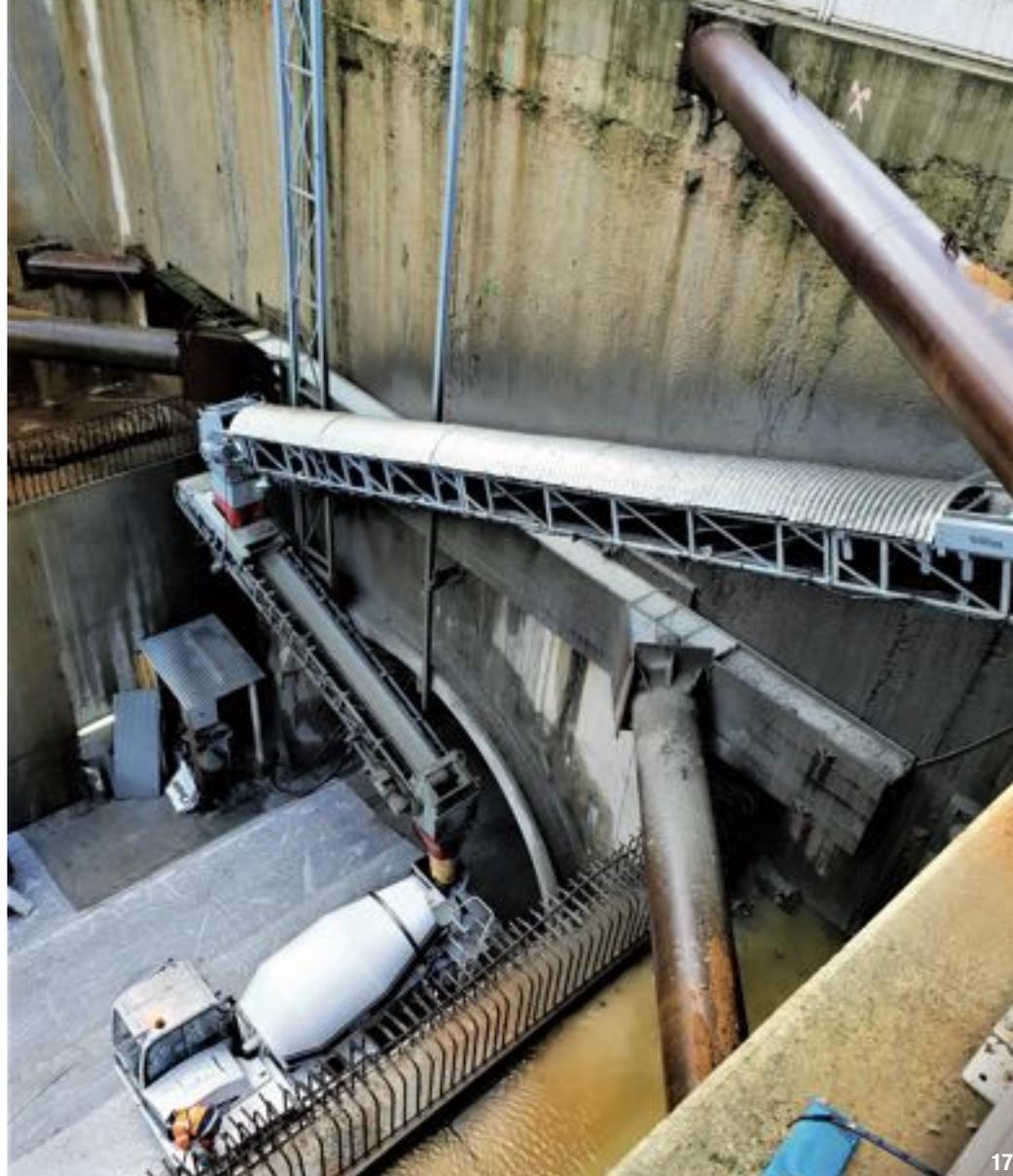
Pour le groupe Imerys, lors d'une prospection en Mauritanie pour la recherche de galets de quartz, Tecnitudo a mis en œuvre une installation complète de chargement sur le port de Nouakchott. Elle était composée d'un convoyeur de 20 mètres de longueur, monté sur roues et doté à son extrémité d'une colonne spéciale de descente pour la maîtrise de la vitesse du flux afin d'éviter la fragmentation du quartz et de la poussière.

### RÉHABILITATION D'OUVRAGES

Dans le cadre de travaux de rénovation d'une durée de 1 an du château de Vincennes, dans la région parisienne, Tecnitudo a mis en œuvre pour l'entreprise Lefevre Rénovation 100 mètres de convoyeurs en déblai/remblai pour la réfection de l'étanchéité d'une partie des toitures. Les convoyeurs à bande devaient acheminer et évacuer les terres et les gravats dans les deux sens de fonctionnement.

### ACHEMINEMENT DE GRAVE-CIMENT

Le barrage de Sarrans, près de Rodez, dans l'Aveyron, a fait l'objet d'importants travaux de génie civil consistant notamment à remplacer le dispositif de vidange de fond de l'ouvrage. Pour ce chantier de courte durée (4 semaines) et d'accès très difficile, l'entreprise GTM a fait appel à Tecnitudo pour concevoir



17

© TECNITUDO

l'installation provisoire d'approvisionnement en matériaux. Le chantier présentait une particularité : le niveau des ouvrages construits s'élevait au fur et à mesure de l'avancement du chantier, en l'occurrence de la montée des remblais en grave-ciment. Il fallait donc mettre en œuvre deux convoyeurs à bande de grande portée - 50 et 25 mètres dont un orientable - et capables de s'adapter à la promiscuité sur le site, comportant notamment des piles provisoires destinées à accueillir ultérieurement un pont de passage pour les camions.

### 17- Chantier de la ligne B du métro de Rennes.

### 18- Système d'approvisionnement du chantier du barrage des Plats, dans la Loire.

### 19- Convoyeur d'alimentation des bassins de potasse de Virat, en Bourgogne.

### ACHEMINEMENT DE BÉTON

Tecnitudo est également intervenue pour DTP Terrassements sur le chantier de réparation du barrage des Plats, dans la Loire. Il s'agissait de neutraliser une fissure traversante en pied de l'ouvrage apparue près de 50 ans après sa construction et mettant en cause son comportement mécanique.

Deux convoyeurs, d'une longueur cumulée d'une cinquantaine de mètres, alimentaient en béton le poste de travail situé en contrebas.



18

© TECNITUDO



19

© TECNITUDO



© TECNITUDE

20

## LA LOCATION AUSSI

Tecnitude s'en est fait une spécialité - une idée nouvelle lors de son lancement - de la location de transporteurs à bande et de leurs accessoires. Éric Koenig explique les raisons de cette démarche : « *Nous nous sommes rendu compte, lors de la crise de 2008/2009, que si le besoin en convoyeurs demeurait plein et entier, il s'opérait une transformation dans le monde industriel avec la suspension des investissements. C'est de là qu'est née l'idée de recourir à la location afin de continuer à répondre aux besoins sans qu'ils s'accompagnent nécessairement d'investissements pour nos clients, ce qui nous a d'ailleurs été facilité par notre stock important de matériels. Nous avons dédié à la location une partie de ce parc qui nous permettait de répondre rapidement à des demandes d'internautes, pour atteindre depuis 2015 jusqu'à 600/800 mètres de convoyeurs disponibles. Nous sommes aujourd'hui premier loueur de convoyeurs à bande et de systèmes de manutention en vrac en France, tant pour les petits chantiers avec des appareils de 400 mm de largeur que pour les grands avec des convoyeurs de 800 mm de largeur et des débits de quelques tonnes/heure à 500 t/h.* »

Toutes les grandes entreprises qui ont un besoin de manutention en location font désormais appel à Tecnitude. Parmi les chantiers locatifs, l'un des plus importants a été, en 2012, la réalisation par Vinci d'un bassin-tampon provisoire, nécessitant la manutention de 160 000 m<sup>3</sup> de déblais pour l'usine hydro-électrique de La Bathie, en Savoie. Ce chantier a demandé la mise en œuvre de 200 mètres de convoyeurs couverts avec un poste d'alimentation. L'installation comprenait notamment un passage sous voie ferrée et un franchissement de route. Le transport par convoyeurs des matériaux était la seule solution envisageable et d'ailleurs la seule autorisée par EDF. L'opération a permis à Vinci de gagner un mois sur le chantier dont la durée a pu être réduite de 22 semaines à 16 semaines.

**20- Une partie du parc des matériels en location.**

**21- L'installation Tecnitude sur le chantier de La Bathie a permis à Vinci de gagner un mois.**

## TRAVAUX SOUTERRAINS

L'entreprise est présente dans les travaux souterrains. Elle est intervenue par exemple, pour le compte de Colas Rail, entre septembre 2018 et juin 2019 sur le chantier de la ligne B du métro de Rennes. Il s'agissait d'approvisionner en béton de type S1/S2 des micro-toupies circulant vers un poste de travail situé dans une galerie en contrebas d'une vingtaine de mètres par rapport au sol. Pour ce chantier, Tecnitude a mis en place pendant une année deux convoyeurs à bande en ciseaux afin de s'adapter à la configuration du puits.

## ALIMENTATION DE BASSINS EN POTASSE

Pour Total, enfin, qui est amené à remplir des cavités souterraines dans la région de Viriat, en Bourgogne, il était nécessaire de constituer des bassins de mélange d'eau destinées à ces cavités. Leur alimentation en potasse devant être réalisée impérativement par le centre, seul le recours à un convoyeur à bande - de 35 m de longueur - s'avérait à la fois le plus économique et le plus efficace. L'opération s'est déroulée avec succès. À noter que sur un tel chantier, alors que le temps d'usage proprement dit du convoyeur a été de quatre jours, le montage et le démontage de l'installation ont demandé respectivement cinq jours. Un bon exemple de l'intérêt de la location pour ce type de matériel mais aussi de celui de l'ergonomie totalement modulaire des produits, en adéquation avec la typicité des chantiers et leur usage sectoriel. □



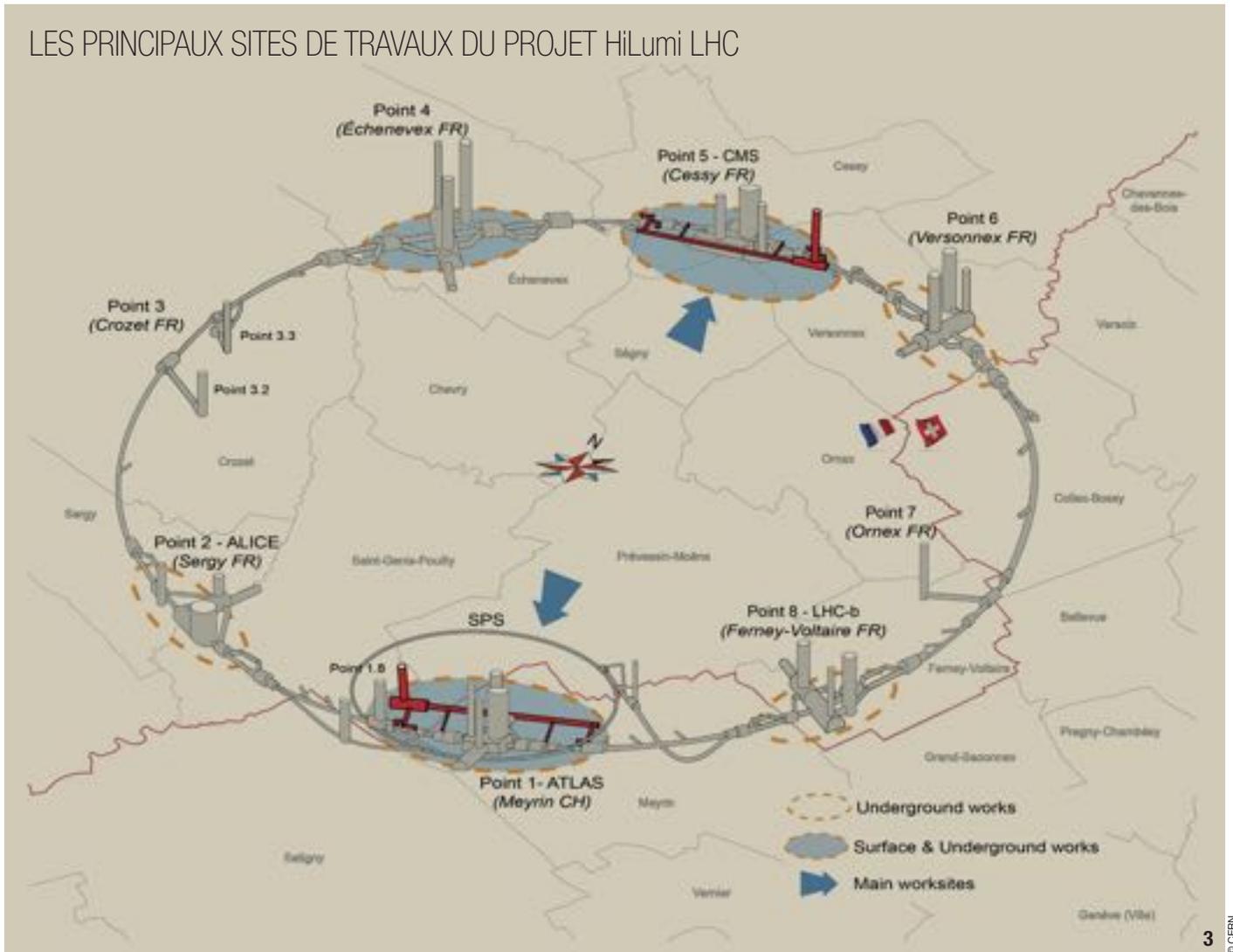
21

© TECNITUDE





## LES PRINCIPAUX SITES DE TRAVAUX DU PROJET HiLumi LHC



3

3- Les principaux sites de travaux du Projet HiLumi LHC.

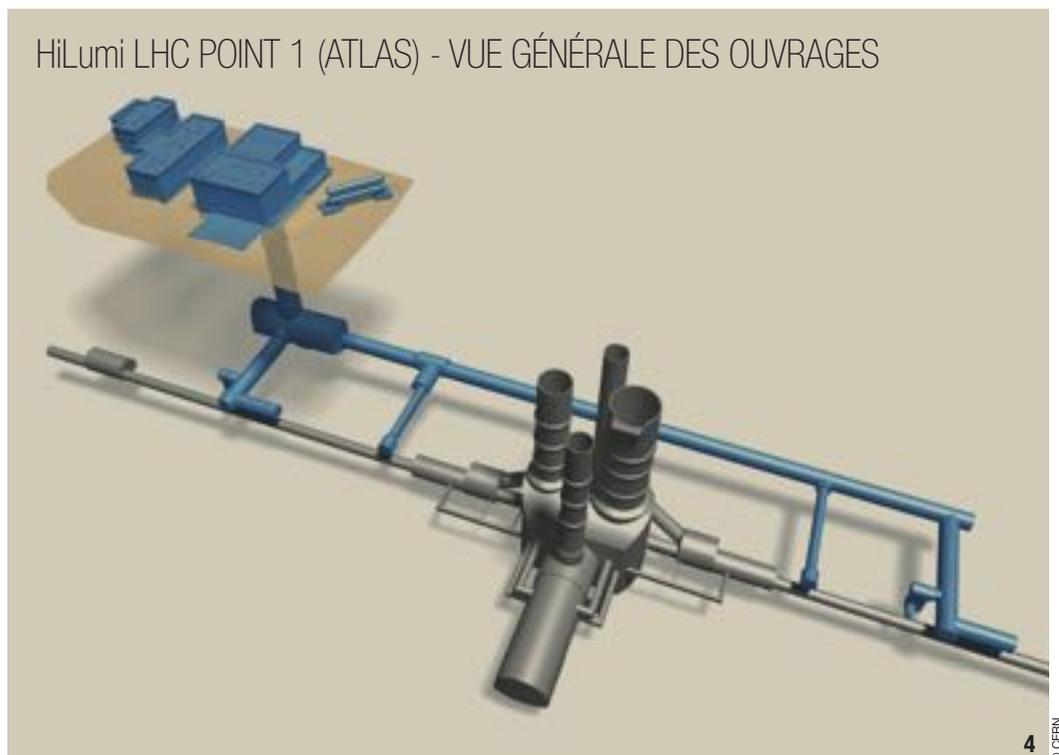
4- HiLumi LHC Point 1 (ATLAS) - Vue générale des ouvrages.

3- Main worksites of the HiLumi LHC project.

4- HiLumi LHC Point 1 (ATLAS) - General view of the works.

L'accélérateur LHC existant est installé dans un tunnel de 27 km de circonférence, à une profondeur moyenne de 100 m. Son infrastructure a été reprise du tunnel initialement construit entre 1984 et 1989 pour le "Grand collisionneur électron-positon" (LEP), avec la création d'infrastructures souterraines et de surface supplémentaires.

## HiLumi LHC POINT 1 (ATLAS) - VUE GÉNÉRALE DES OUVRAGES



4

D'importantes cavernes accueillent les détecteurs ATLAS et CMS notamment, construits entre 1998 et 2005. Le projet haute luminosité du LHC (HL-LHC ou HiLumi LHC) est une amélioration majeure du LHC, devant entrer en service à l'horizon 2026.

Le collisionneur ainsi renforcé sera capable de générer 10 fois plus de collisions de particules qu'auparavant, pour permettre de nouvelles avancées scientifiques.

Pour atteindre cet objectif des nouvelles infrastructures techniques doivent être créées afin d'accueillir les nouveaux équipements destinés à alimenter et faire fonctionner l'accélérateur.

Les améliorations d'équipements se répartissent en divers points de l'anneau, mais les infrastructures nouvelles de génie civil concernent essentiellement les Point 1 - ATLAS à Meyrin (Suisse) et Point 5 - CMS à Cessy (France). La figure 3 ci-après indique les infrastructures souterraines existantes du CERN en grisé, et les deux principaux sites des travaux en cours, adjacents aux sites d'expérimentation existants ATLAS and CMS, avec les nouvelles infrastructures souterraines en rouge.

Le CERN est un environnement atypique pour les ingénieries et entreprises chargées de ces travaux souterrains. Les principales parties prenantes du projet sont des physiciens chargés de travaux de recherche, et les nouvelles infrastructures de génie civil doivent être conçues pour accueillir des équipements hautement sophistiqués, et faits sur mesure.

Compte-tenu des contraintes de programmation du projet, la conception des ouvrages souterrains devait être menée à bien alors que les équipements du nouvel accélérateur n'étaient que partiellement définis ou en cours de prototypage.

En comparaison avec des infrastructures routières, ferroviaires ou hydrau-

liques, les ouvrages souterrains de génie civil ne représentent ici qu'une part relativement faible de l'investissement global.

## LE PROJET LES TRAVAUX AU POINT 1

Les travaux au Point 1 comprennent 5 nouveaux bâtiments industriels en surface, un puits, une caverne, et des galeries d'une longueur totale d'environ 550 m. La figure 4 représente les infrastructures existantes en grisé, et les nouvelles infrastructures en bleu.

## GÉOLOGIE

La lithologie au droit du projet est composée de gisements morainiques Würmiens qui recouvrent la Molasse Rouge du Chattien Inférieur. Cette dernière, de nature très hétérogène, peut atteindre plusieurs centaines de mètres de profondeur. Elle est constituée d'une succession de couches sub-horizontales argileuses à gréseuses de 0,5 à 5,0 m d'épaisseur et reconnues selon les qualifications suivantes : marne grumeleuse, marnes sableuses à gréseuses, grès. Elle présente une très faible perméabilité, mais peut être tout de même sujette à quelques infil-

trations d'eau souterraines très limitées, essentiellement dues à des fissures et des joints locaux.

## STRUCTURES EN SOUTERRAIN

Les travaux souterrains sont réalisés en méthode traditionnelle dans la molasse, à proximité immédiate de la caverne d'un des deux principaux détecteurs du LHC (ATLAS), et du tunnel existant LHC. Ces nouvelles infrastructures doivent se connecter au tunnel LHC.

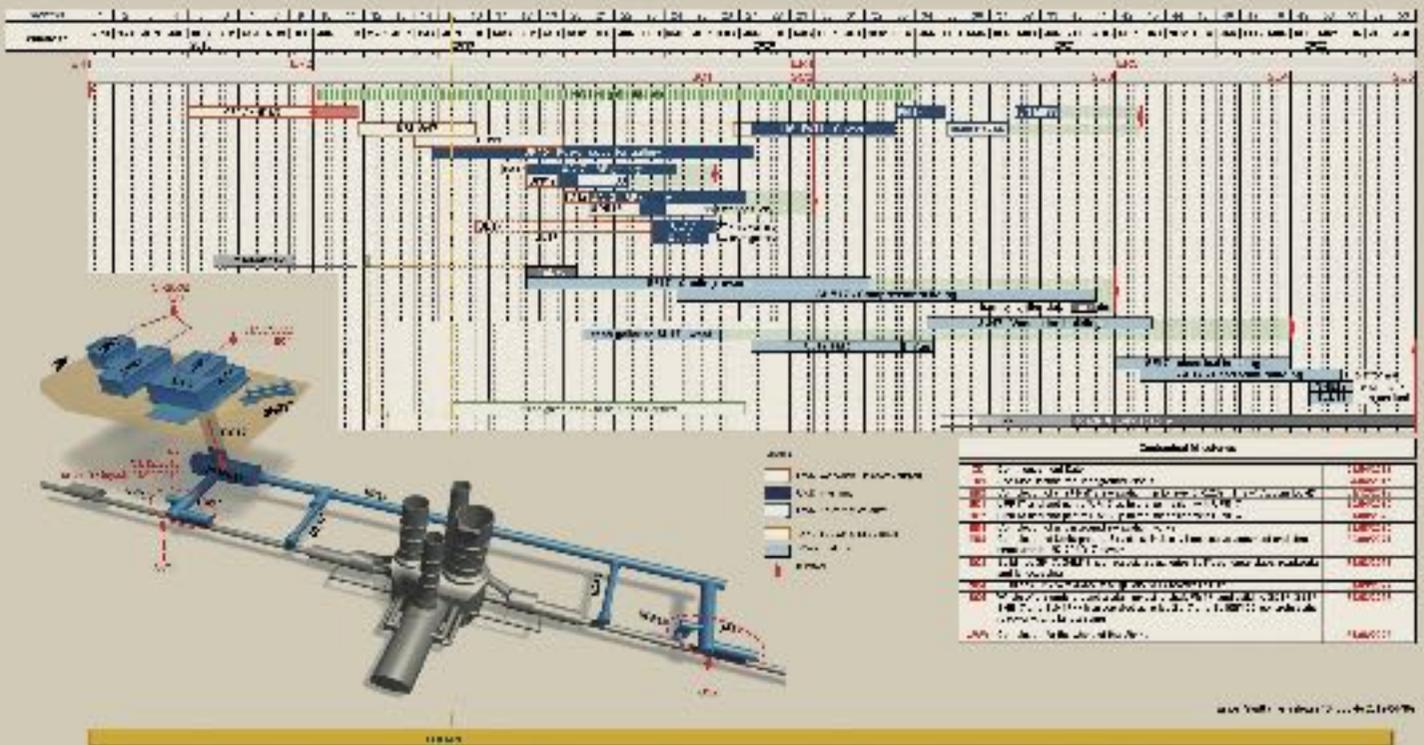
Les nouvelles structures en souterrain comprennent :

- Un puits de diamètre intérieur 10 m environ, et de 60 m de profondeur.
- La caverne, sous l'axe du puits, de 18 m de diamètre, 14 m de hauteur, et 47 m de longueur. Elle accueillera entre autres les équipements cryogéniques, répartis sur le sol de la caverne et des niveaux intermédiaires en charpente métallique.
- Galerie des transformateurs : la galerie (ou tunnel principal) est d'une largeur de 6 m environ et de 300 m de longueur. Elle accueillera les équipements de transformation et d'alimentation des supraconducteurs de l'accélérateur.

5- HiLumi LHC Point 1 (ATLAS) - Planning général.

5- HiLumi LHC Point 1 (ATLAS) - Overall schedule.

## HiLumi LHC POINT 1 (ATLAS) - PLANNING GÉNÉRAL



- Galeries de service et d'évacuation : 4 galeries perpendiculaires au tunnel principal, de 3 à 6 m de largeur, et de 50 m de longueur chacune, permettent les raccordements au tunnel LHC existant. Elles assurent la distribution électrique et cryogénique de l'accélérateur dans sa configuration future. Les deux galeries à chaque extrémité des nouveaux ouvrages se connectent verticalement au LHC, via des escaliers, pour constituer des ouvrages d'évacuation et de secours.
- 12 puits verticaux de faible diamètre (*cores*, 1 m de diamètre intérieur, hauteur 7 m) viendront compléter ces ouvrages, pour assurer les raccordements de réseaux et d'équipements entre les extrémités des 4 galeries et le tunnel LHC.

### TRAVAUX DE SURFACE

Les 5 nouveaux bâtiments de surface sont des ouvrages industriels constitués de structures principales en béton (pour trois d'entre eux) et en charpente métallique (pour les deux autres). Ils sont interconnectés par des galeries, et complétés de dalles extérieures pour accueillir les réservoirs d'hélium et d'azote, et des aménagements de surface associés (voiries, réseaux divers). Les bâtiments ont pour fonction :

- Bâtiment en tête de puits, pour l'accès aux ouvrages et la manutention lourde ;
- Bâtiment ventilation associé aux ouvrages souterrains créés ;
- Bâtiment électrique ;
- Bâtiment des tours de refroidissement ;
- Bâtiment accueillant les compresseurs associés au circuit cryogénique.

Les galeries assurent le cheminement des réseaux d'alimentation, réseau cryogénique et de refroidissement.

Les matériaux d'excavation pouvant être réemployés en remblai sont utilisés pour réaliser la plateforme associée aux bâtiments et aménagements de surface.

### MONTAGE CONTRACTUEL, ALLOTISSEMENT DEUX PROJETS EN PARALLÈLE

Les travaux des deux principaux sites (Point 1 en Suisse, Point 5 en France) sont quasi identiques, mais le CERN a opté pour la conduite de deux projets distincts, compte-tenu des spécificités nationales (réglementaires notamment). Cette approche s'inscrit également dans les Règles d'achat du CERN,



© CERN

6

**6- HiLumi LHC Point 1 (ATLAS) - Vue aérienne du site.**

**7- Bâtiment et installations de chantier du puits.**

**6- HiLumi LHC Point 1 (ATLAS) - Aerial view of the site.**

**7- Building and site facilities for the shaft.**



7

© ANTONINO PANTÉ (www.antoninopante.com)

en tant qu'organisation internationale, vis-à-vis des entreprises des différents états membres.

Pour ces raisons, le CERN a passé des contrats d'ingénierie (maîtrise d'œuvre études et travaux) et de construction propres à chacun des deux sites Point 1 (ATLAS) et Point 5 (CMS).

La langue utilisée pour les contrats d'ingénierie et de construction est l'anglais, pour faciliter l'accès aux entreprises des différents états membres. Le français est la langue utilisée spécifiquement pour les questions liées à la coordination en matière de sécurité et de protection de la santé (règles calquées sur la réglementation française et la réglementation suisse), et les procédures liées au permis de construire délivré dans le canton de Genève.

### CONTRAINTES DU PLANNING

Le planning est dicté par les cycles d'exploitation du LHC, marqué par des arrêts techniques longs (LS - *Long Shutdown*), ponctuant des périodes d'expérimentation de plusieurs années. Le démarrage des études de génie civil du HL-LHC fut confirmé à l'automne 2015, avec comme objectif un début des travaux en 2018. Les principaux travaux d'excavation doivent être réalisés durant la période d'arrêt 2019-2020 (LS2), en vue de préserver le LHC en exploitation des effets des vibrations. Les galeries d'évacuation créées doivent par ailleurs se raccorder au tunnel existant du LHC avant sa remise en service en janvier 2021, et même avant que la phase de refroidissement préalable ne soit engagée.

Les derniers raccordements par puits de petit diamètre au LHC (*cores*) ne seront quant à eux réalisés que lors du prochain arrêt (LS3), en 2024. C'est également lors de cet arrêt que les nouveaux équipements du HL-LHC seront installés.



© SEECTPI  
8

L'accélérateur dans sa configuration améliorée "HL-LHC" générera donc ses premières collisions de particules en 2026.

La figure 5 résume le planning des travaux de génie civil sur la période 2018-2022.

### CONTRAT D'INGÉNIERIE POUR LE POINT 1

Le contrat d'ingénierie prend en compte le retour d'expérience du CERN sur le précédent projet LHC. Il couvre les phases études et travaux, et a été rédigé de manière à être compatible avec le rôle d'ingénieur (*Engineer*) supervisant un contrat de Construction FIDIC Red Book.

Les études conduites par le groupe Origin ont démarré en juin 2016, et le Dossier de Consultation des Entreprises a été livré en juillet 2017, avec comme objectif un démarrage des travaux en avril 2018, objectif effectivement atteint.

### CONTRAT DE CONSTRUCTION

Les deux procédures d'appel d'offre relatives aux Points 1 et 5 ont été menées de front ; les deux contrats ne pouvaient être attribués au même concurrent. Le contrat de construction est basé sur le contrat type FIDIC Red Book (Édition 1999), avec des spécificités apportées par le CERN en vue d'adapter le contrat à son statut d'organisation gouvernementale, avec l'assistance d'un cabinet d'avocats anglais et Origin en tant que maître d'œuvre.

Il s'agit donc d'un contrat au bordereau et au quantitatif, pour des ouvrages dont la conception est faite par l'ingénieur pour le compte du maître d'ouvrage. Ce modèle permet d'assurer une certaine latitude au CERN, qui peut opérer certaines modifications de la concep-

**8- Anneau renforcé à la base du puits et éléments compressibles à l'interface des soutènements puits / caverne.**

**9- Vue de la caverne, et amorce du tunnel principal (UR15) dans l'axe de la caverne.**

**8- Reinforced ring at the base of the shaft and compressible elements at the interface of the shaft/cavern supporting structures.**

**9- View of the cavern, and start of the main tunnel (UR15) on the axis of the cavern.**

tion en cours de travaux, vis-à-vis de l'intégration des équipements notamment.

L'originalité de ce contrat ainsi mis au point par le CERN et Origin tient à son mécanisme d'ajustement des délais, mécanisme non prévu dans le contrat FIDIC Red Book standard. Ce mécanisme s'inspire largement de la norme Suisse SIA 118/198, mise en œuvre sur les tunnels alpins. Il s'appuie sur une décomposition analytique du chemin critique des ouvrages souterrains linéaires, pour permettre d'ajuster le délai contractuel d'exécution, en fonction d'un certain nombre de paramètres incluant notamment :

- Les sections type d'excavation et de soutènement ;
- Les données et aléas (ou risques identifiés) géologiques et géotechniques (*known-unknown*) : hors-profil d'origine géologique, arrivées d'eau, gaz, etc.

Associé à ce dispositif le contrat comprend également un *Geotechnical*

*Baseline Report (GBR)* qui définit les intervalles de variation prévisibles des paramètres géotechniques déterminants. Pour les variations à l'intérieur de ces intervalles, le mécanisme précité s'applique. En dehors de ceux-ci les risques relèvent de la clause d'événements imprévisibles du contrat FIDIC (*Unforeseeable Physical Conditions*). La mise au point du contrat de construction aura donc été une occasion unique pour le CERN et les ingénieries parties prenantes de formaliser un "état de l'art" sur ces sujets (gestion des risques en souterrains et des incidences coûts et délais), prenant largement en compte les textes et retours d'expérience français (fascicule 69) et suisses notamment.

Qui plus est, ce contrat, grâce aux adaptations mentionnées précédemment et à son exécution, constitue un véritable prototype du tout nouveau contrat type FIDIC "Emerald Book", présenté au World Tunneling Congress à Naples en mai 2019.

### AVANCEMENT DES TRAVAUX ET SPÉCIFICITÉS

La vue aérienne (figure 6) présente les installations du chantier HiLumi au Point 1, devant les bâtiments existants de l'actuel site Atlas du LHC (ou Point 1).

Les travaux d'excavation du puits, démarrés à l'été 2018 avant le long arrêt du LHC (LS2), ont pu être conduits de manière anticipée comme prévu, sans impact sur le fonctionnement du LHC. L'excavation a été réalisée avec une pelle hydraulique alimentée électriquement, fonctionnant avec brise-roche hydraulique et fraise.

L'originalité de la conception du puits tient notamment à la réalisation d'un anneau renforcé en fond de puits, ▷



9  
© RockSoil S.p.A

## TUNNEL UR15, PRINCIPES INITIAUX DE CONSTRUCTION



10

© MARTI TUNNEL AG

boulonné au massif, visant à limiter les déformations et les zones de plastification du sol avant le démarrage de l'excavation de la caverne.

Le soutènement provisoire de la caverne consiste en une coque en béton projeté fibré, avec boulonnage. Cette solution a été largement optimisée par l'insertion d'éléments compressibles en voûte à l'axe de la caverne et à l'interface avec le puits (figures 1, 8 et 9).

Une autre originalité du projet consiste en la réalisation des travaux du tunnel principal (300 m de long), enchaînant excavation et soutènement, et la réalisation du revêtement définitif (voûte et contre-voûte, armée partiellement ou en pleine section).

La figure 10 présente l'organisation de principe telle que prescrite par le contrat, et décrite par l'entreprise dans son offre.

Cette organisation a été modifiée en cours d'exécution du contrat, sur proposition de l'entreprise (clause de Value-Engineering du contrat FIDIC), par la réalisation de la contre-voûte avec des éléments préfabriqués en béton renforcé de fibres métalliques (figure 11).

### GESTION DES MATÉRIAUX D'EXCAVATIONS

On retrouve dans les matériaux d'excavation molassiques issus de la base du puits, et d'une partie de la caverne

et des tunnels, des concentrations en hydrocarbures volatiles C5-C10 ainsi qu'en hydrocarbures C10-C40 supérieurs aux seuils réglementaires en vigueur dans le canton de Genève (Ordonnance sur la Limitation et l'Élimination des Déchets - OLED, 814.600 du 04/12/2015). Cette pollution naturelle de la molasse par les hydrocarbures peut être détectée olfactivement et visuellement (traces d'huiles) (figure 12).

Un plan de gestion des matériaux potentiellement pollués aux hydrocarbures a donc été mis en œuvre par

**10- Tunnel UR15, principes initiaux de construction.**

**11- Contre-voûte préfabriquée, béton renforcé de fibres métalliques.**

**10- Tunnel UR15, initial construction principles.**

**11- Precast inverted arch, steel fibre reinforced concrete.**

l'entreprise et le maître d'œuvre. Les matériaux excavés font l'objet d'un premier tri selon des critères olfactifs et visuels. En cas de doute suite à cette première analyse, ils sont stockés provisoirement dans un espace couvert dédiée à cet usage, pour faire l'objet d'analyses in situ par des essais PetroFLAG® (Système d'analyse des hydrocarbures pétroliers totaux dans le sol), puis d'essais de laboratoire spécialisé. En fonction des résultats de ces essais de laboratoire, les matériaux pollués sont évacués hors du site (selon leur degré de pollution tel que défini au



11

© RockSalt S.p.A

règlement OLED), et revalorisés ou mis en décharge sur des sites approuvés par l'autorité compétente. Les matériaux considérés comme non pollués font l'objet d'essais de laboratoire plus classiques pour confirmer leur réemploi en remblai sur le site.

## RETOUR D'EXPÉRIENCE APRÈS UN AN D'EXÉCUTION DES TRAVAUX

### INGÉNIERIE

La mise en parallèle de la conception des deux sous-projets Point 1 et Point 5, confiés à deux groupements d'ingénierie distincts et chacun multinational, aura constitué une situation favorable à l'émulation, aux échanges, et à la recherche des solutions optimales entre le CERN et ses deux ingénieries. Les travaux en cours permettent de confirmer les avantages respectifs des différentes solutions, notamment en termes de facilité d'adaptation aux conditions géologiques et géotechniques rencontrées.

L'emploi du BIM aura également constitué un point fort dans la conduite des



© SETEC TPI

**12- Matériaux molassiques potentiellement pollués aux hydrocarbures.**

**12- Molassic materials potentially contaminated by hydrocarbons.**

études. Les modèles produits dans Revit par le maître d'œuvre étant transférés dans l'environnement Catia du CERN, permettant ainsi des revues efficaces de validation de l'intégration des équipements au génie civil.

### GESTION DU CONTRAT FIDIC

L'objectif du CERN, dans la préparation du contrat de construction et la mise au point d'ajustements significatifs au contrat FIDIC type, était de garantir un partage des risques juste entre le maître d'ouvrage et l'entreprise, pour

les travaux souterrains en particulier. Cet objectif est considéré comme atteint par les parties concernées (CERN, maître d'œuvre, entreprise). Le mécanisme d'ajustement du délai d'exécution a fonctionné correctement, mais présente un intérêt limité pour les ouvrages courts, ou dont l'excavation n'est pas parfaitement linéaire (galeries courtes, caverne).

### GÉOLOGIE & GÉOTECHNIQUE

L'application directe de la méthode observationnelle s'est basée sur un dispositif d'auscultation conséquent couvrant tous les ouvrages souterrains. Pour la caverne en particulier, elle a permis de mettre en évidence la bonne réponse du sol suite aux travaux d'excavation effectués par phases (excavation de la voûte en demi-section, suivie de l'excavation de la demi-section inférieure en deux phases).

Cette analyse associée au suivi géologique en continu a permis de valider le bon fonctionnement du soutènement, et de l'optimiser en cours de travaux. Les passes d'excavation ont ainsi été augmentées de 2 m à 4 m, et le boulonnage initialement prévu a été graduellement réduit, de l'ordre de 70 %. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**DURÉE DU CONTRAT DE CONSTRUCTION : 53 mois**

**DÉBUT DES TRAVAUX : avril 2018**

**COÛT DE CONSTRUCTION (POINT 1) : 60 millions d'euros**

**LONGUEUR TOTALE DES OUVRAGES SOUTERRAINS : 600 m environ (puits, caverne, tunnel et galeries)**

**DIAMÈTRES D'EXCAVATION DES OUVRAGES : 3 à 18 m**

**VOLUMES EN PLACE EXCAVÉS : 58 700 m<sup>3</sup>**

**BÉTON PROJETÉ : 7 200 m<sup>3</sup>**

**BÉTON DE REVÊTEMENT DÉFINITIF : 13 900 m<sup>3</sup>**

**ÉTANCHÉITÉ : 16 800 m<sup>2</sup>**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**CLIENT / MAÎTRE D'OUVRAGE :**

**CERN (European Organisation for Nuclear Research)**

**MAÎTRE D'ŒUVRE :**

**Groupeement Origin (Setec tpi, Csd Ingénieurs SA, Rocksoil S.p.A)**

**ENTREPRISE :**

**Groupeement Marti Meyrin (Marti Tunnel AG, Marti GmbH Deutschland, Marti GmbH Österreich)**

## ABSTRACT

### HiLumi (HIGH LUMINOSITY) LHC PROJECT AT CERN. UNDERGROUND INFRASTRUCTURE AND UTILITIES BUILDINGS - POINT 1 (ATLAS)

P. MATTELAER, CERN - P. FREUDIGER, MARTI TUNNEL AG - J.-B. AMIOT, GROUPEMENT SETEC TPI / CSD INGENIEURS SA / ROCKSOIL S.P.A - V. MEYER, GROUPEMENT SETEC TPI / CSD INGENIEURS SA / ROCKSOIL S.P.A - J. VOIRON, GROUPEMENT SETEC TPI / CSD INGENIEURS SA / ROCKSOIL S.P.A

**The High-Luminosity Large Hadron Collider project (HiLumi LHC) aims to push the performance of the LHC to its maximum in order to increase the potential for discovery post-2025. Engineering firms and contractors from Switzerland, France, Italy, Austria, Germany and the United Kingdom have performed work or are working with the CERN community of engineers of all nationalities, to write this new chapter in the history of accelerators at the CERN (European Organization for Nuclear Research). The civil engineering work got under way in April 2018 and is to be completed by mid-2022. It includes the creation of significant additional underground infrastructure (shaft, cavern, tunnels/galleries) executed in the Geneva basin, and surface buildings. □**

### CERN PROYECTO HiLumi (ALTA LUMINOSIDAD) LHC. INFRAESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS Y EDIFICIOS TÉCNICOS - PUNTO 1 (ATLAS)

P. MATTELAER, CERN - P. FREUDIGER, MARTI TUNNEL AG - J.-B. AMIOT, GROUPEMENT SETEC TPI / CSD INGENIEURS SA / ROCKSOIL S.P.A - V. MEYER, GROUPEMENT SETEC TPI / CSD INGENIEURS SA / ROCKSOIL S.P.A - J. VOIRON, GROUPEMENT SETEC TPI / CSD INGENIEURS SA / ROCKSOIL S.P.A

**El proyecto de gran colisionador de hadrones de alta luminosidad (LHC de alta luminosidad, HiLumi LHC en inglés) pretende mejorar al máximo las prestaciones del LHC para aumentar el potencial de descubrimientos a partir de 2025. Ingenieros y empresas de Suiza, Francia, Italia, Austria, Alemania y Reino Unido han colaborado o colaboran con la comunidad de ingenieros de todas las nacionalidades del Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) para escribir este nuevo capítulo de los aceleradores del CERN. Las obras de ingeniería civil comenzaron en abril de 2018 y deberían finalizar a mediados de 2022. Éstas incluyen la creación de importantes infraestructuras subterráneas adicionales (pozos, caverna, túneles/galerías), realizadas en el área de Ginebra, y edificios en superficie. □**



1  
© CYRUS CORNUT/SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

# OA1, UN Puits de Réception de Tunnelier sur la Ligne 18, au Cœur de l'Aéroport Paris-Orly

AUTEURS : FLORIAN BOZONNET, INGÉNIEUR DET MOE, ARCADIS - KARIM ZIDOUH, CHEF DE PROJET MOE, ARCADIS

EN PLEIN CŒUR DE L'AÉROPORT PARIS-ORLY, MAINTENU EN EXPLOITATION, LE GROUPEMENT D'ENTREPRISES CHANTIERS MODERNES CONSTRUCTION - BOTTE FONDATIONS RÉALISE LE Puits de RÉCEPTION DU TUNNELIER DU LOT 1 DE LA LIGNE 18 DU GRAND PARIS EXPRESS EN PROVENANCE DE MASSY. LE CONTEXTE AÉROPORTUAIRE IMPOSE DES CONTRAINTES DE CHANTIER INHABITUELLES DEVANT ÊTRE ANTICIPÉES DÈS LA PHASE DE CONCEPTION AVEC L'EXPLOITANT DE L'AÉROPORT ET OBLIGE LES ENTREPRISES À FAIRE PREUVE D'UNE CAPACITÉ D'ADAPTATION DANS LE CHOIX DE SES MÉTHODES DE RÉALISATION.

## PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE

L'aéroport Paris-Orly constitue le terminus du prolongement Sud de la Ligne 14 sous la maîtrise d'ouvrage RATP et de la Ligne 18 du Grand Paris Express (GPE) sous la maîtrise d'ouvrage Société du Grand Paris (SGP). La future double gare accueillant les deux lignes de métro se situe au niveau des terminaux de l'aéroport. Le tunnel

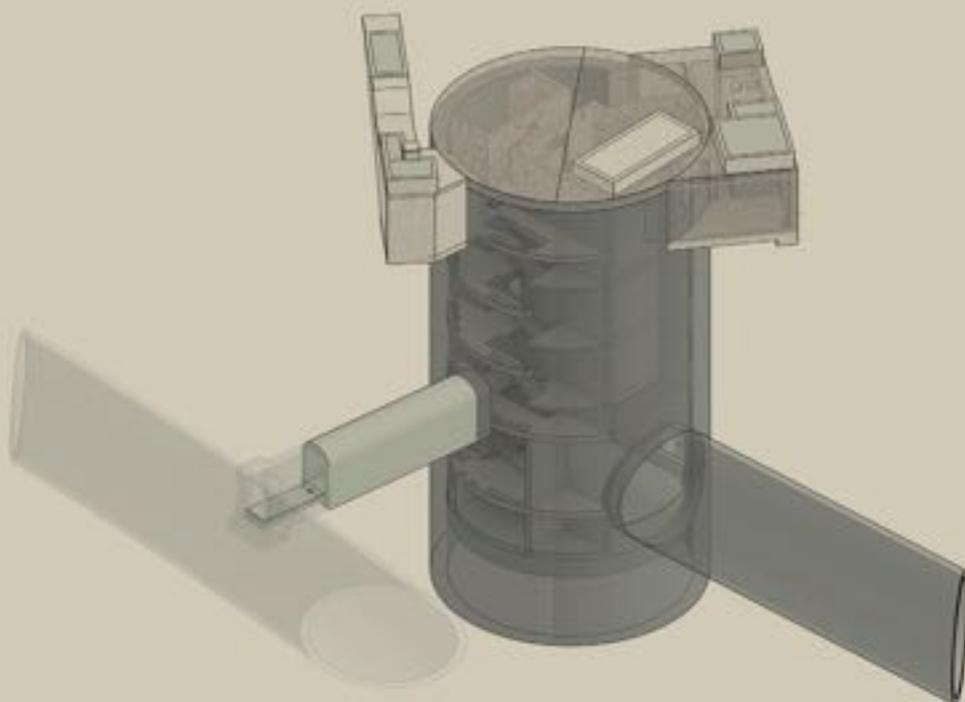
de la Ligne 14 est prolongé sur une distance de 2 km environ après la gare jusqu'au Site de Maintenance et Remisage (SMR) implanté au sud de l'aéroport sur la commune de Morangis. Le tunnel de la Ligne 18 est, quant à lui, prolongé sur une distance de 690 m au sud pour former un tunnel d'arrière-gare permettant le retournement et le remisage des rames de métro. La réglementation (arrêté du

1- Tête de l'ouvrage OA1.

1- Portal of tunnel OA1.

22 novembre 2005) impose la création d'un point d'accès des secours aux deux tunnels 14 et 18. Les tracés des deux lignes étant quasiment parallèles sur cette portion, la réalisation d'un unique ouvrage commun, Orly Sud dit OA1 (figure 1), s'est imposée du fait du foncier déjà très contraint au cœur des aires aéronautiques de l'aéroport. L'ouvrage est un puits d'accès des secours au tunnel de la Ligne 14, aussi

## MAQUETTE 3D DE L'OUVRAGE



bien en phase travaux qu'en phase d'exploitation. Pour la Ligne 18, l'OA1 constitue un point d'accès des secours, une prise d'air pour le désenfumage et la ventilation du tunnel borgne en phase d'exploitation, ainsi que le terminus du creusement au tunnelier en phase travaux. De part cette dernière fonction, la conception et le suivi de réalisation de l'ouvrage ont été confiés à l'ingénierie Arcadis, membre du groupement ICARE (Ingérop mandataire, Artélia, Arcadis) assurant la maîtrise d'œuvre globale de la Ligne 18. ▷

**2- Maquette 3D de l'ouvrage.**  
**3- Élévation de l'ouvrage et coupe géologique.**

**2- 3D model of the structure.**  
**3- Elevation view of the structure and geological cross section.**

## ÉLÉVATION DE L'OUVRAGE ET COUPE GÉOLOGIQUE



L'OA1 est un puits circulaire de 17 m de diamètre utile, en parois moulées, centré sur l'axe du tunnel de la Ligne 18. Des excroissances enterrées sur un niveau sont réalisées à l'abri de soutènements en parois berlinoises et lutéciennes de part et d'autre du puits et permettent l'intégration des grilles de ventilation mais aussi de l'accès principal déporté (figure 2). Le puits a une profondeur de 32,4 m (différence entre le TN moyen à 87 m NGF et l'arase supérieure du radier à 54,6 m NGF). L'ouvrage est relié au tunnel de la Ligne 14 par un rameau de connexion de 19,5 m de longueur et de 17 m<sup>2</sup> de section, excavé sous une couverture de terrain de 16,2 m en méthode conventionnelle avec un soutènement composé de cintres HEB160 espacés tous les mètres et de 16 cm de béton projeté.

### CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Situé sur le plateau d'Orly, l'ouvrage OA1 rencontre les principales formations suivantes, des plus récentes vers les plus anciennes (figure 3) :

- Formations superficielles : comprenant des remblais (Rb) et les Limons des Plateaux (LP) ;
- Calcaires de Brie et de Sannois (TB) présentant des blocs et bancs de calcaire silicifié, très indurés ;
- Argiles vertes de Romainville (GV), potentiellement gonflantes, dans lesquelles s'inscrit la partie supérieure du rameau ;
- Marnes supragypseuses divisées en Marnes de Pantin (MP), peu perméables, et Marnes d'Argenteuil (MA), très peu perméables ;
- Masses et Marnes du Gypse (MFL). L'ouvrage se situe à proximité d'une

zone de transition entre le faciès gypseux au nord et le faciès calcaire (Calcaire de Champigny) au sud-est.

Trois nappes sont rencontrées au droit du puits : la nappe des Travertins de Brie portée par les Argiles Vertes réputées imperméables, la nappe des Marnes de Pantin reposant sur les Marnes d'Argenteuil et la nappe des Masses et

Marnes du Gypse. Les niveaux d'eau retenus lors de la conception sont respectivement 79,4 m NGF, 68,3 m NGF et 51,5 m NGF.

La campagne d'investigations géotechniques réalisée dans le cadre de la mission géotechnique G3 a mis en évidence un niveau de la nappe des MFL supérieur de 11 m en charge sous les Marnes d'Argenteuil, particularité observée très localement au droit de l'aéroport certainement due au fait que le secteur est traversé par une multitude de forages mal comblés mettant probablement les nappes des MP et MFL en communication. Un pompage est nécessaire pour s'affranchir des problèmes de soulèvement de fond de fouille lors du terrassement du puits. De plus, préalablement aux travaux d'excavation du rameau dont le front

**4- Implantation de l'ouvrage au cœur de l'aéroport Paris-Orly.**

**4- Location of the structure in the heart of Paris-Orly Airport.**





5a



5b



5c

se situe dans les Marnes de Pantin en partie inférieure, l'entreprise a procédé à un traitement de terrain par injection de coulis bentonite-ciment depuis la surface afin de limiter les potentielles arrivées d'eau au niveau du radier du rameau.

Du fait de la faible perméabilité du terrain, l'arrêt des injections était piloté par l'atteinte de la pression de consigne avec peu de volume injecté. Néanmoins, quelques venues d'eau avec un faible débit ont été constatées lors de l'excavation.

### CONCEPTION

L'ouvrage est situé au milieu des circulations d'avions entre la piste de décollage et atterrissage n° 08/26, plus au sud, les aires de circulation et taxiways qui y mènent et des postes de stationnement des avions à une distance de 6 m de l'emprise chantier (figure 4). De fait,

### 5- Modélisation 3D des installations de chantier depuis la tour de contrôle.

### 5- 3D model of site facilities from the control tower.

le site est soumis aux contraintes et servitudes aéronautiques de la zone en général autant en phase travaux qu'en phase d'exploitation. Très tôt durant la phase de conception (début de l'Avant-Projet b) des réunions d'interface avec le groupe ADP, exploitant de l'aéroport, ont été initiées afin de préparer les travaux. En effet, bien que la plateforme aéroportuaire soit familière d'opérations de construction -

rénovation (extension des terminaux, rénovation des aires de circulation des avions et des pistes, etc.) il est rare que ceux-ci soient conduits par des entités (maître d'ouvrage et maître d'œuvre) extérieures au groupe ADP. En particulier, il a été mené, en partenariat avec ADP ingénierie, une Évaluation d'Impact sur la Sécurité Aéronautique (plus communément appelée étude EISA). Il s'agit pour l'exploitant de s'assurer que les modifications de l'aéroport apportées par le projet, respectent les normes techniques (conformité réglementaire) et sont évaluées au regard de l'impact et que des mesures appropriées sont prises (gestion des risques).

Des zones immatérielles, en 3D, appelées servitudes, restreignent l'installation d'équipement ou de bâtiment pour protéger l'évolution des avions, au sol ou en vol, ou l'émission de signaux

radioélectriques, et dont on distingue les deux principaux types suivants :

→ Les servitudes aéronautiques qui protègent l'évolution d'un avion à l'atterrissage, au décollage ou en manœuvre en vol à proximité de l'aéroport. Aucun objet ne doit percer ces servitudes. L'emprise de chantier se situe sous la surface latérale de dégagement de la piste 08/26. Ainsi l'altitude autorisée pour les travaux est limitée à la cote 100,5 m NGF, soit 15 m de hauteur (niveau de la plateforme travaux à 85 m NGF). Pendant le couvre-feu de l'aéroport et la fermeture de la piste 08/26, cette servitude est levée. Cependant l'ensemble de la plateforme de l'aéroport Paris-Orly est soumis à une hauteur maximale à ne jamais franchir définie par la surface horizontale intérieure à l'altitude 137 m NGF.



6

© JÉRÔME CORDIER/BOTTE FONDATIONS

→ Les servitudes radioélectriques qui protègent les cônes de diffusion des ondes de chaque équipement de radionavigation (localizer, radar, etc.). Les servitudes radioélectriques du localizer LOC 26 sont les plus contraignantes et fixent une altitude limite égale à 88,3 m NGF, soit une hauteur de 3,3 m par rapport au niveau de la plateforme. Des dérogations ont été obtenues sur présentation d'un dossier à la Direction Technique et Innovation (DTI) de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) qui juge et décide de l'acceptabilité ou non de l'obstacle.

En plus de ces deux types de servitude, les installations de chantier, le type et le gabarit des engins et leurs zones d'évolution dans l'emprise ne doivent pas créer de masque de visibilité pour les contrôleurs aériens. En effet, la situation du chantier se trouve dans l'alignement défini par la tour de contrôle de l'aéroport et le bout de la piste 08/26 ainsi que contre la Voie de Circulation Avions (VCA) W37 (figure 5).

Lors de la conception, la difficulté pour le maître d'œuvre est d'estimer précisément l'ensemble des méthodes, des moyens matériels et humains nécessaires pour réaliser les travaux et ce pour l'ensemble des opérations, bien avant la désignation de l'entrepreneur. Il s'agit notamment de définir le type d'engins (fiche technique), les gabarits et caractéristiques des flèches des grues de levage utilisées, le nombre d'engins présents sur site en simultané et la période de temps d'utilisation. Le dossier est alors soumis aux services de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) qui émet un avis favorable ou non pour le lancement des travaux. Dans le cas d'un avis favorable, l'entrepreneur est destinataire de l'EISA validée et s'engage à réaliser les travaux dans les conditions décrites par l'étude.

Dans le cas d'utilisation de méthodes et moyens dérogoires, une mise à jour de l'étude soumise à un nouvel accord est nécessaire. Une liste de mesures de réduction des risques identifiés pendant la réalisation des travaux est également émise et contractualisée lors de la passation du marché avec l'entrepreneur pour application.

**6- Réalisation des parois moulées.**  
**7- Plan de panneautage.**

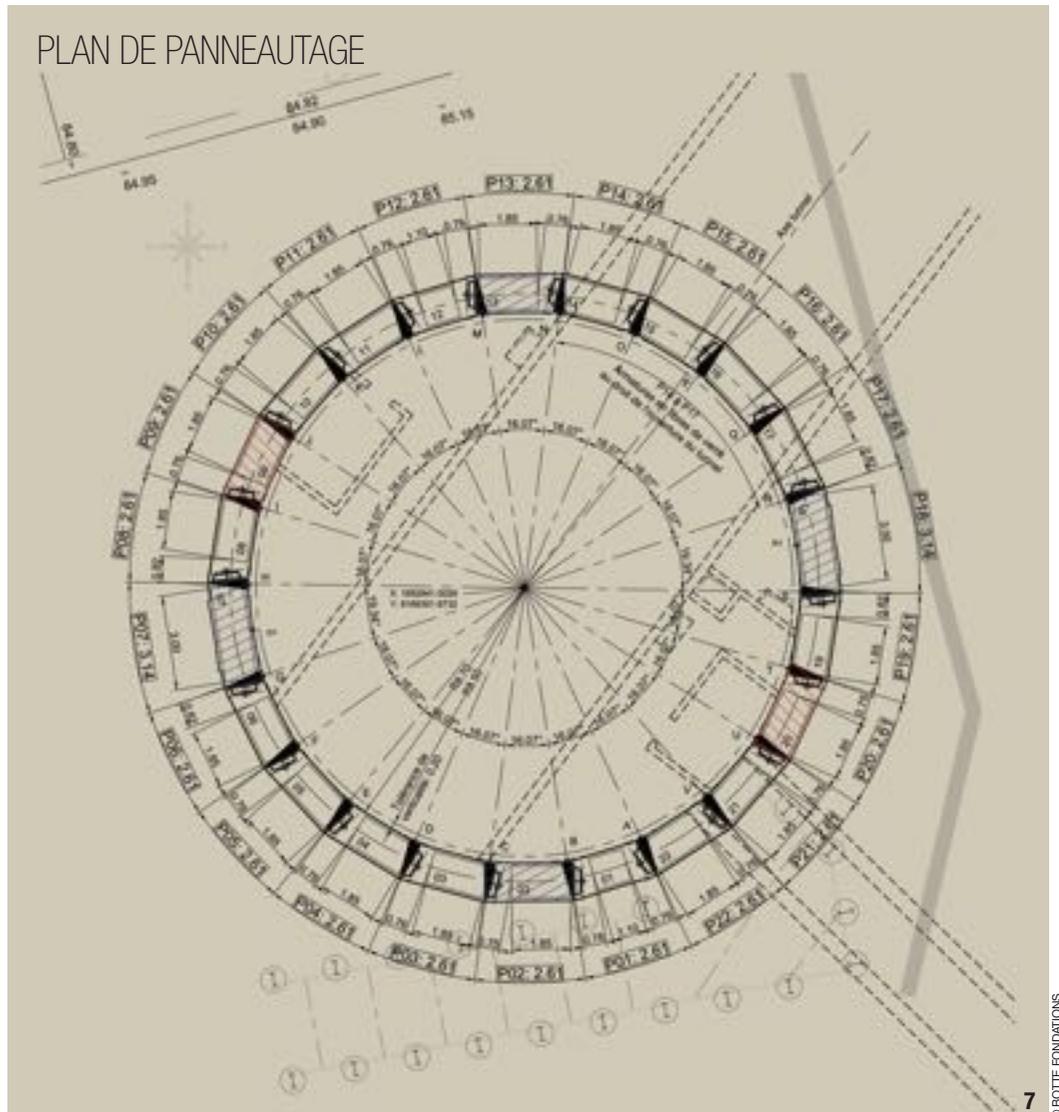
**6- Execution of diaphragm walls.**  
**7- Panelling layout.**

### RÉALISATION DES TRAVAUX

Intervenir au cœur de l'aéroport exige de l'entreprise une certaine rigueur d'organisation et d'anticipation des besoins.

L'OA1 se trouve dans la Partie Critique de la Zone à Accès Réglementé de l'aéroport (PCZSAR) qui se distingue de la zone publique.

### PLAN DE PANNEAUTAGE



7

© BOTTE FONDATIONS



© CYRUS CORNUT/SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

Toute personne, fourniture, matériel et véhicule pénétrant dans cette zone doit se soumettre à l'inspection-filtrage à chaque entrée pour assurer le niveau de sûreté de l'aéroport. Le risque de refus de passage dans le cas où les agents ne peuvent contrôler correctement le véhicule et/ou les fournitures et jugent ainsi la sécurité de l'aéroport dégradée, est avéré et contraignant pour l'avancement quotidien des travaux. L'accès à cette zone et au chantier se fait obligatoirement par le Poste d'Accès Routier d'Inspection Filtrage (PARIF) bien souvent encombré aux heures pointes des prises de poste des personnes travaillant sur la plateforme aéroportuaire. Seules les personnes habilitées (titulaires du badge rouge et du permis T) sont autorisées à pénétrer et circuler dans cette zone. Il en est de même pour les véhicules qui doivent être accrédités d'un laissez-passer permanent.

Les besoins d'accès ponctuels et occasionnels, courants sur chantier, nécessitent des demandes spécifiques à réaliser pour chaque cas.

Les procédures et nombreuses formalités démesurément chronophages,

**8- Soutènement en parois moulées du puits.**

**9- Réalisation du rameau de connexion.**

**8- Diaphragm wall retaining structure for the shaft.**

**9- Execution of the connecting gallery.**



© FLORIAN BOZONNET/ARCADIS

doivent être menées en temps et en heure pour s'assurer du bon déroulement des travaux et limiter les retards et annulations d'opération dus à ces manquements.

### RÉALISATION DES PAROIS MOULÉES

Préalablement aux travaux de parois, dans le but de s'affranchir des difficultés de forage à la benne dans les parties très indurées des travertins

de brie identifiées dans le cahier B, le groupement a opté pour une campagne de préforages de destruction des bancs ou blocs pluridécimétriques. Dans un premier temps, Botte Fondations a réalisé un forage par panneau à la tarière (soit un forage tous les 2,60 m) pour reconnaître la dureté de la couche située entre 4 m et 12 m de profondeur. Si l'utilisation du carottier s'avérait nécessaire, des forages destructifs implantés aux 4 coins du panneau en diamètre 800 mm sont réalisés à l'aide d'une foreuse de type Mait HR 260 afin de détruire le banc dur et faciliter la préhension à la benne.

Finalement, cette campagne a concerné 4 panneaux.

Les travaux de parois moulées ont débuté en novembre 2018 avec un atelier équipé d'une benne à câbles montée sur un porteur à flèche treillis d'une hauteur de 10 m (grue Bauer MC 96).

Une grue Liebherr HS 8070 à flèche treillis de 14 m était également présente sur site pour la manutention des porte-joints, des cages d'armatures et des colonnes de bétonnage. ▷

Pour respecter la servitude aéronautique, les cages d'armatures des parois d'une hauteur totale de 37 m étaient constituées de 4 éléments de 9 à 12 m, assemblés par soudage puis par assemblage boulonné.

L'utilisation de l'hydrohacheuse (ou cutter) n'a pas été retenue du fait de la faible hauteur à forer dans les MFL (2-3 m) et de manière à ne pas surcharger une emprise de chantier déjà encombrée avec une grue de forage supplémentaire et une centrale de traitement des boues (figure 6).

Dans le but de ne pas créer de masque de visibilité pour la tour de contrôle et se conformer à l'EISA, l'utilisation de silos pour le stockage des boues de forage était proscrite.

Deux cuves de 150 m<sup>3</sup> chacune ont été installées dans l'emprise.

La capacité de boue disponible restreinte a conduit l'entreprise à réaliser les parois moulées de l'ouvrage en 22 panneaux unitaires de 2,6 m de longueur et 1,2 m d'épaisseur au lieu de 9 panneaux de 6,5 m prévu initialement (figure 7).

Pour compenser la forme circulaire, entre chaque panneau a été mis en œuvre un joint water-stop positionné grâce à un renvoi d'angle calé avec un matériau type Nidaplast facile à casser lors du forage du panneau adjacent.

Les bétonnages (volume théorique de 118 m<sup>3</sup> par panneau) ont été réalisés exclusivement de nuit de manière à s'affranchir, entre autres, de l'encombrement en journée du Poste d'Accès Routier d'Inspection Filtrage de l'aéroport.

Botte Fondations a tenu la cadence de réalisation de 2 à 3 panneaux de paroi par semaine, en travaillant en 3 postes, 5j/7.

### GESTION DES DÉBLAIS

Durant la campagne d'investigations géotechniques réalisée lors de la mission géotechnique G3, un sondage de caractérisation a permis une identification de la pollution des terrains à excaver aussi bien issus des parois moulées que du terrassement du puits. Pendant la réalisation des parois, une fosse comportant 3 casiers a recueilli les déblais à évacuer dans les différentes filières de stockage permanent (Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI, ISDI+) et Dangereux (ISDD)). Le tri était effectué par le foreur qui contrôlait la destination des déblais en fonction de la profondeur d'excavation. Des prélèvements et essais de laboratoire complémentaires venaient confirmer la filière retenue. L'emprise restreinte et l'environnement avoisinant (obligation

de veiller à ne pas créer de stockage conséquent de terre pour limiter le péril aviaire pour les avions) a fortement réduit la capacité de stockage de la fosse équivalent au volume foré d'un seul panneau. Les déblais étaient mis en décantation des boues de forage avant évacuation par camion jusqu'à la filière de destination.

Pour la phase de terrassement du puits, les déblais ont été chargés en direct dans les camions d'évacuation. Des essais de caractérisation complémentaires réalisés à l'avancement ont permis la confirmation des orientations des déblais dans les filières adéquates.

### MONITORING ET SUMI DES AUSCULTATIONS

Le contexte aéroportuaire contraint également les possibilités d'instal-

lation des éléments de monitoring. Par exemple, les aires de circulation des avions (poste de stationnement, taxiways, ...) avoisinantes du chantier sont inaccessibles aux personnes non habilitées ou bien au moyen d'une procédure spécifique d'accompagnement par un agent de l'aéroport habilité pour accéder à la zone en dehors des heures d'exploitation. La solution la plus simple revient souvent à trouver des implantations alternatives pour positionner les cibles au sol permettant un suivi des déplacements optimal.

### CONCLUSION

Après une première phase de terrassement du puits jusqu'à 22 m de profondeur (figure 8), les équipes de Chantiers Modernes ont réalisé le rameau de connexion (excavation et revêtement définitif) avant le passage du tunnelier de la Ligne 14 en provenance de Morangis qui creusera à une distance de 5 m du tympan provisoire de la galerie (figure 9). Puis le lot GC04 de la Ligne 14 effectuera le raccordement entre les 2 ouvrages depuis le tunnel afin de garantir un point d'accès des secours travaux à une distance inférieure à 2000 m du front et poursuivre l'excavation au tunnelier.

La réalisation du puits OA1 - Orly Sud a marqué le lancement des travaux de la Ligne 18 dont le premier lot sera attribué début 2020. Le contexte particulier peu commun des travaux souterrains demande une collaboration étroite entre le groupement d'entreprises, le maître d'œuvre, la Société du Grand Paris et son assistant avec les services de l'aéroport Paris-Orly. Cette synergie quotidienne rend possible la réalisation de cet ouvrage entre deux mondes a priori opposés, celui du souterrain et le monde aérien. □

## LE CHANTIER EN CHIFFRES

**PAROI MOULÉE (épaisseur 1,2 m) : 2630 m<sup>3</sup>**

**TERRASSEMENT : 9 000 m<sup>3</sup>**

**BÉTON DE GÉNIE CIVIL : 2 000 m<sup>3</sup>**

**ACIERS (parois et génie civil) : 440 t**

**ARMATURES EN FIBRE DE VERRE : 2 t**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris**

**ASSISTANT À MAÎTRISE D'OUVRAGE : Groupement Linéov (Edeis, Transamo, Algae)**

**MAÎTRE D'ŒUVRE : Groupement Icare (Ingérop mandataire, Artélia, Arcadis)**

**COORDINATION SPS : Becs**

**OCTA : Bureau Veritas**

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Chantiers Modernes Construction (mandataire) - Botte Fondations (co-traitant)**

### ABSTRACT

## OA1, A TBM EXIT SHAFT ON LINE 18, IN THE HEART OF PARIS-ORLY AIRPORT

FLORIAN BOZONNET, ARCADIS - KARIM ZIDOUH, ARCADIS

*In the very heart of Paris-Orly Airport, remaining in service, the consortium formed by Chantiers Modernes Construction and Botte Fondations is executing the TBM exit shaft for Work Section 1 on Line 18 of the 'Grand Paris Express' metro project. The airport environment imposes exceptional worksite constraints, which must be allowed for as of the design stage with the airport operator. It also forces the contractors to show adaptability in their choice of work methods. One of the critical phases is execution of the diaphragm walls on this constrained site in terms of both area and volume requirements (height limited to 15 m in absolute terms, without the creation of a visibility mask for the airport's control tower). □*

## OA1, UN POZO DE RECEPCIÓN DE TUNELADORA EN LA LÍNEA 18, EN PLENO CENTRO DEL AEROPUERTO DE PARÍS-ORLY

FLORIAN BOZONNET, ARCADIS - KARIM ZIDOUH, ARCADIS

*En pleno centro del aeropuerto de París-Orly, mantenido en funcionamiento, el consorcio de empresas Chantiers Modernes Construction - Botte Fondations realiza el pozo de recepción de la tuneladora del lote 1 de la Línea 18 del proyecto Grand Paris Express. El contexto aeroportuario impone restricciones de obra excepcionales, que deben preverse desde la fase de diseño con la compañía operadora del aeropuerto. Asimismo, obliga a las empresas a demostrar una capacidad de adaptación a la hora de elegir sus métodos de realización. Una de las fases críticas es la realización de las pantallas de hormigón en este recinto, limitado tanto en superficie como en volumen (altura limitada a 15 m en su totalidad, sin creación de máscara de visibilidad para la torre de control del aeropuerto). □*



**Comment  
protéger  
une trémie  
d'escalier ?**

**PréventionBTP**

 **En direct**

**Une réponse immédiate** à vos questions sécurité  
et prévention grâce à nos experts OPPBTP



**[preventionbtpendirect.fr](https://preventionbtpendirect.fr)**



**PASSEZ SIMPLEMENT À LA PRÉVENTION**

**OPPBTP**  
*La prévention BTP*



© CÉDRIC HELSLY

# AMÉLIORATION DE LA BUTÉE DES PAROIS MOULÉES SUR LE TRAMWAY DE NICE

AUTEURS : REYNALD DEGEORGE, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SOLETANCHE BACHY FRANCE -  
PIERRE DE LAVERNÉE, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SOLETANCHE BACHY FRANCE

LES TRAVAUX DE LA LIGNE 2 DU TRAMWAY DE NICE ARRIVENT À LEUR TERME. C'EST LE MOMENT DE LA VALIDATION DE L'ENSEMBLE DES CHOIX TECHNIQUES QUI ONT ÉTÉ FAITS DANS LE CADRE DE CE PROJET EN CONCEPTION / RÉALISATION. À TOUTES LES ÉTAPES DU PROJET, LE CONTEXTE BIEN PARTICULIER DE LA VILLE DE NICE A REPRÉSENTÉ UN DÉFI AU QUOTIDIEN. SOLETANCHE BACHY ET LE GROUPEMENT THAUMASIA ONT APPORTÉ DES SOLUTIONS RATIONNELLES EN RÉPONSE AUX CONTRAINTES DE CET ENVIRONNEMENT EXIGEANT.

## CONTEXTE GÉNÉRAL

Après l'inauguration et la mise en service partielle, en 2019, de la Ligne T2 du tramway de Nice, les travaux arrivent aujourd'hui à leur terme et clôtureront ainsi avec succès les six années qui ont été nécessaires pour livrer l'ensemble des ouvrages de ce projet, initié en 2009.

La Ligne 2 du tramway offre aujourd'hui aux habitants de la métropole niçoise une alternative aux transports traditionnels, plus écologique et plus respectueuse du partage de l'espace public. Elle s'étend sur 11,3 km, reliant les parties Est et Ouest de la ville de Nice. Dans la zone du centre-ville, la Ligne 2 devient souterraine sur 3,2 km.

**1- Station  
Jean-Médecin -  
Travaux de  
parois mouées.**

**1- Jean-Médecin  
Station -  
Diaphragm wall  
works.**

Cette nouvelle ligne doit permettre, à terme, de relier le vieux port à l'aéroport en moins de 30 minutes. Dans sa partie souterraine, la Ligne 2 a nécessité la mise en œuvre de plusieurs ouvrages : quatre stations (Garibaldi, Durandy, Jean-Médecin et Alsace-Lorraine), deux puits (Ségarane pour le puits de départ et Grosso pour le puits d'arrivée du tun-



## PROBLÉMATIQUE DES SOLS AVEC FAIBLE BUTÉE - SOLUTION PROPOSÉE

Les faibles caractéristiques des sols alluvionnaires rendent très difficile la mobilisation de la butée.

Les solutions traditionnelles, qui consistent à poser des niveaux d'appuis au fur et à mesure des terrassements, se révèlent peu efficaces.

En effet, la butée mobilisable étant insuffisante, et les terrains tellement déformables, le pied du soutènement que constitue la paroi moulée chasse : cela engendre naturellement des tassements.

De surcroît, l'environnement très urbanisé des centres-villes complexifie encore le contexte, car il oblige à limiter très fortement les tassements en surface, et donc les déplacements des soutènements.

Cela a été le cas pour trois stations du projet niçois (Durandy, Jean-Médecin et Alsace-Lorraine) qui nécessitaient de garantir de faibles tassements et ce, en dépit de matériaux de très médiocres caractéristiques mécaniques au niveau des fonds de fouille.

Pour résoudre cette difficile équation, Soletanche Bachy a proposé une solution consistant à mettre en œuvre un soutènement de très forte inertie (panneaux de parois moulées en Té) appuyé, sous le fond de fouille, sur des refends butonnants réalisés avant les terrassements.

L'appui offert par ces refends, combiné à la très forte inertie du soutènement, a permis de terrasser jusqu'au fond de fouille, sans avoir à mettre en œuvre le niveau de dalle mezzanine, soit plus de 15 m de hauteur libre au final sous dalle, en fond de fouille. ▷

nelier), une tranchée couverte et une trémie finale permettant au tramway de remonter à la surface pour poursuivre, en aérien, son chemin vers l'aéroport (figures 2 et 3).

Ces ouvrages sont reliés par un tunnel excavé au tunnelier (diamètre excavé 9,7 m/diamètre revêtu intérieur 8,5 m) qui a traversé les stations avant leur terrassement.

### GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

La stratigraphie rencontrée au droit du projet est formée par un substratum, constitué par des terrains de

**2- Vue générale du tracé.**

**3- Vue de la partie souterraine du tracé entre le puits Ségurane et la trémie Grosso.**

**2- General view of the alignment.**

**3- View of the underground part of the alignment between the Ségurane shaft and the Grosso underpass.**

l'ère Secondaire (marnes et calcaires), surmonté par des dépôts d'alluvions modernes dont les épaisseurs sont très variables. Les formations alluvionnaires sont composées d'argiles sableuses à graveleuses et de sables limoneux de compacité faible à moyenne (pl entre 0,2 et 1,3 MPa). Dans certains secteurs, le substratum affleure, comme au droit de la colline du château à l'est du projet. Dans la partie centrale du tunnel, les horizons de matériaux de faibles caractéristiques mécaniques ont une puissance qui dépasse 40 m (figures 4 et 5).

## VUE DE LA PARTIE SOUTERRAINE DU TRACÉ ENTRE LE PUIS SÉGURANE ET LA TRÉMIE GROSSO



Cette solution proposée dans le cadre du marché de conception/réalisation, permettait ainsi :

- De respecter le critère de tassement de 1 cm des immeubles voisins ;
- De sécuriser le planning des travaux vis-à-vis du creusement du tunnel, la solution étant très peu tributaire des aléas du sol ;
- De supprimer les lits de butons, accélérant ainsi les terrassements jusqu'au fond de fouille, et donc la livraison des ouvrages.

Dans le détail, les principales caractéristiques de la solution mise en œuvre pour les 3 stations sont les suivantes (figures 5 et 6) :

- Une fiche mécanique (panneaux en Té) autour de 40 m de profondeur et une fiche hydraulique (paroi plane) jusqu'à 50 m de profondeur (figure 1) ;
- Trois dalles coulées en taube ;

→ Un radier voûte résistant aux sous-pressions ;

→ Des refends sous fond de fouille de 4,5 m de hauteur et de 1 m de largeur tous les 3 m, au droit de chaque nervure des panneaux en Té ;

→ Le traitement de la totalité du terrain face aux tympans.

Chacun des refends sous le fond de fouille est constitué de deux panneaux de parois moulées non armés, non jointifs, clavés à l'aide de colonnes de jet grouting (figure 7). Le jet grouting est réalisé à la fois entre les deux panneaux pour rétablir la continuité, mais aussi au contact avec la paroi moulée, pour assurer une bonne butée aux soutènements. Les panneaux de parois moulées sont réalisés depuis la plate-forme de travail. La partie active du refend, donc celle sous le fond de fouille, est réalisée en béton. La partie supérieure

qui a vocation à être démolie, est quant à elle remplie en bentonite ciment (figure 8). De part et d'autre des stations principales viennent se greffer des ouvrages de ventilation et d'accès (figure 9). Comme sur l'accès Sud de la station Durandy, il a été nécessaire, pour certains de ces ouvrages annexes, de créer un appui sous le fond de fouille avant terrassement, en utilisant le même principe.

#### 4- Stratigraphie - Profil en long de la partie souterraine du tracé.

#### 4- Stratigraphy - Longitudinal profile of the underground part of the alignment.

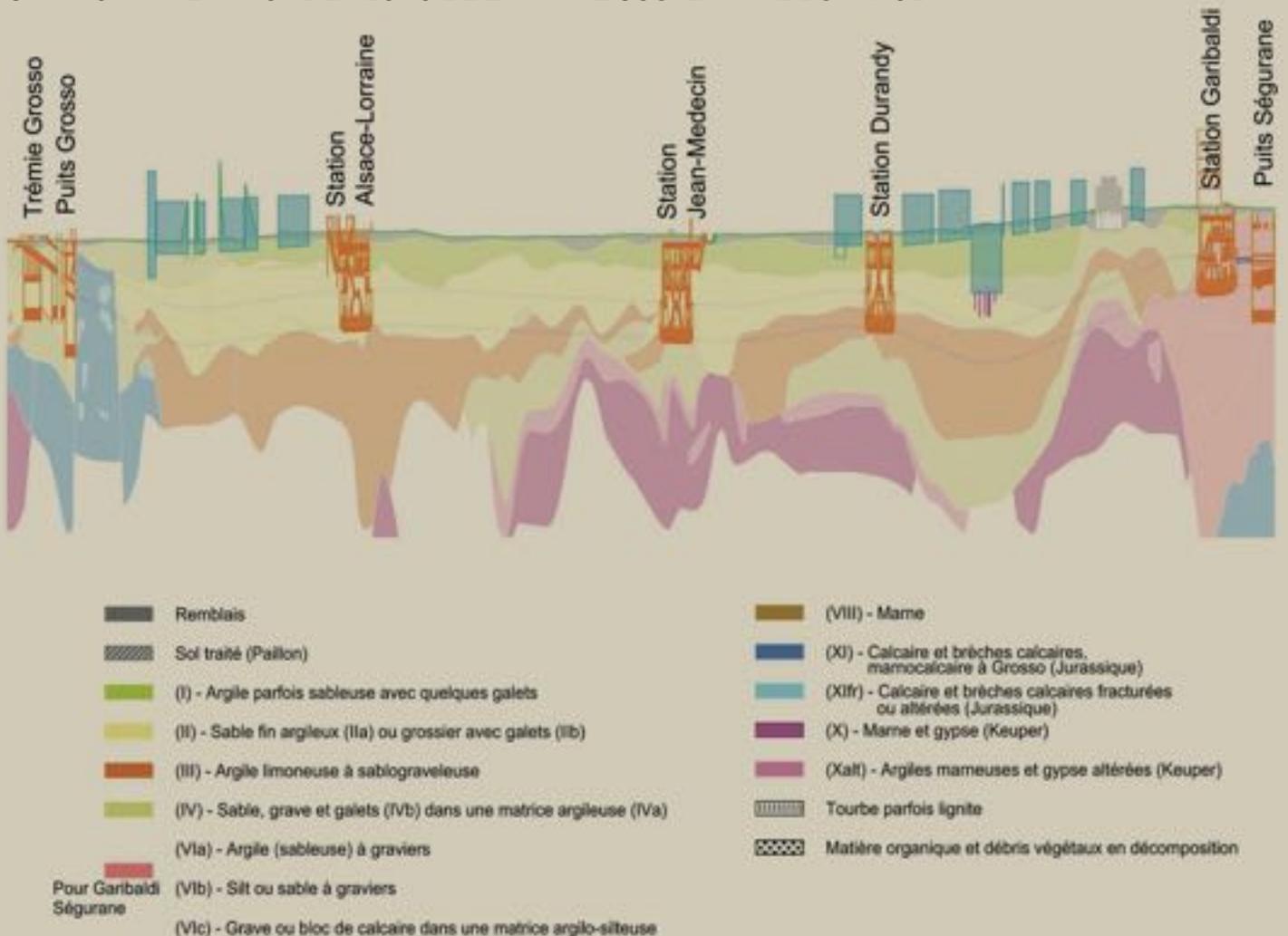
### PROCESSUS DE VALIDATION DE LA SOLUTION

Avant d'arriver à la solution finalement mise en œuvre pour les 3 stations du projet niçois, plusieurs solutions ont été examinées, afin d'améliorer la butée des panneaux de parois moulées.

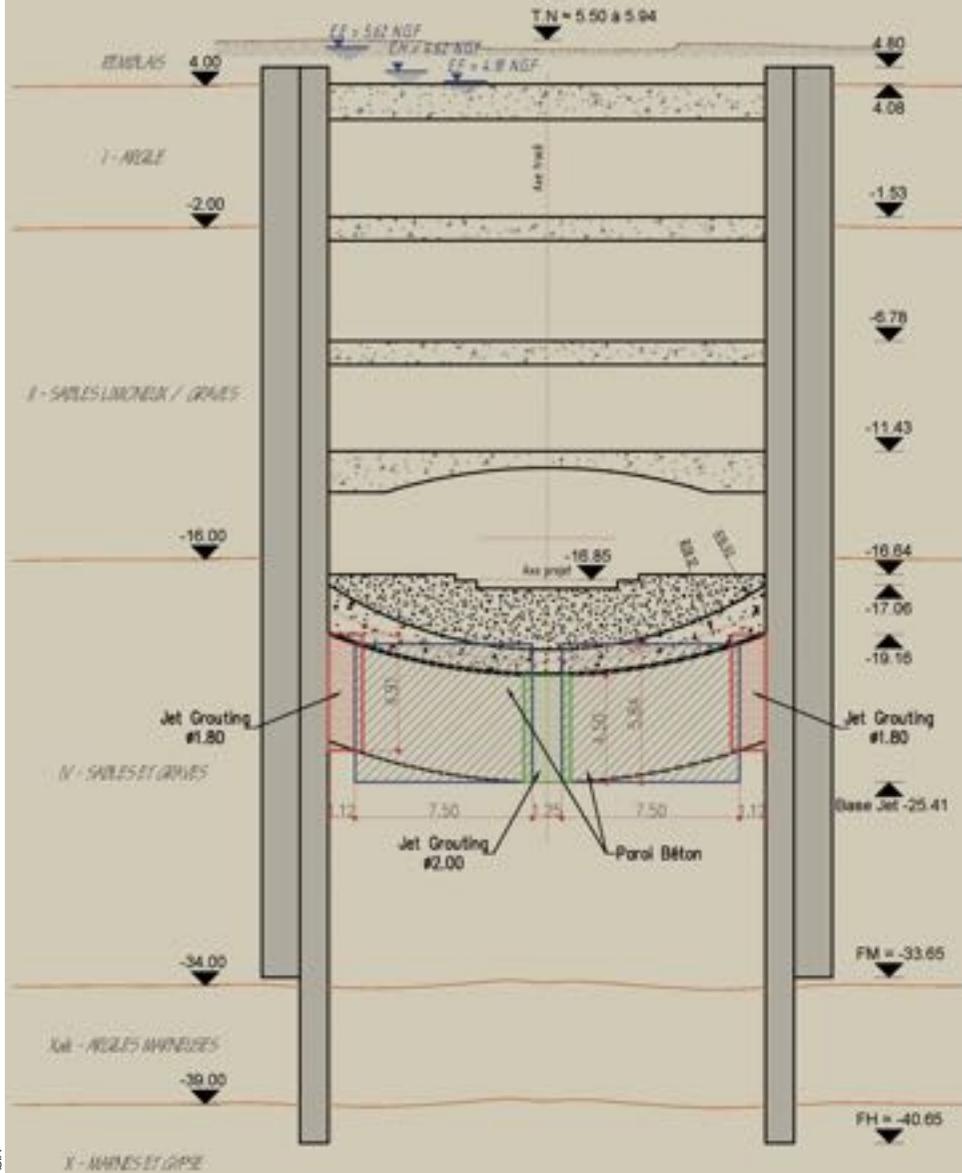
La solution initialement retenue lors de la phase Projet consistait à mettre en œuvre des colonnes de jet grouting jointives qui formeraient les refends au droit de chacune des nervures des parois en Té. Cette solution avait l'avantage de minimiser le volume de terrain traité, mais nécessitait de maîtriser très précisément la position des colonnes au niveau des refends pour s'assurer de leur qualité.

En effet, pour fonctionner, les refends doivent, non seulement être continus, mais également présenter une section minimale qui permet de garantir le passage des efforts de butée d'un côté à

## STRATIGRAPHIE - PROFIL EN LONG DE LA PARTIE SOUTERRAINE DU TRACÉ



## COUPE - STATION JEAN-MÉDECIN



5- Coupe -  
Station Jean-  
Médecin.

6- Vue en plan -  
Station Jean-  
Médecin.

5- Cross section -  
Jean-Médecin  
Station.

6- Plan view -  
Jean-Médecin  
Station.

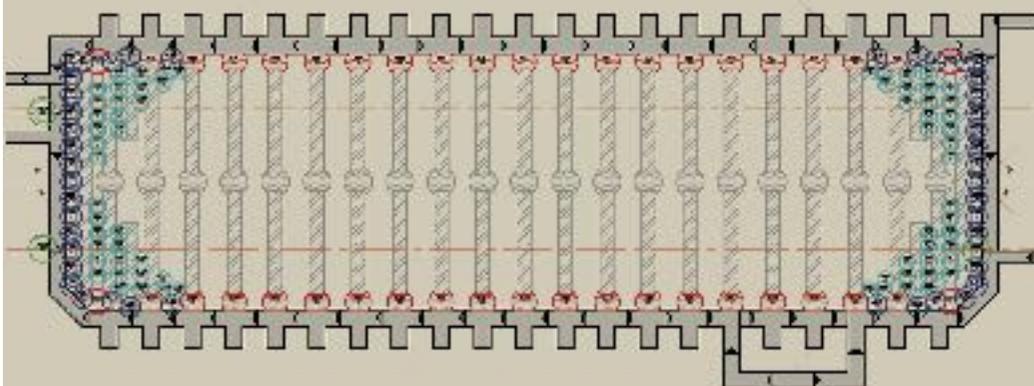
l'autre de la fouille. Cette section minimale doit être suffisante pour que les contraintes de compression dans le terrain traité restent admissibles. Or, la section de contact entre deux colonnes est fonction de la déviation du forage des colonnes entre elles, ainsi que du diamètre réel des colonnes mises en œuvre.

Au final, pour pouvoir garantir qu'un refend pourra jouer son rôle de buton, il faut connaître la position de chacune des colonnes qui le forment, connaître le diamètre réellement mis en œuvre, et vérifier ainsi que toutes les sections sont admissibles.

Les mesures de déviations et de diamètre pour les colonnes de jet grouting in situ sont réalisables, mais sont très lourdes à mettre en œuvre, tout comme se révèle l'être le récolement nécessaire pour vérifier la qualité du refend. On comprend facilement qu'en cas de non-conformité constatée sur un refend, les mesures correctives qui seraient à prendre consisteraient en la réalisation de nouvelles colonnes dans la zone où la section de sol traitée n'est pas suffisante ; et cette opération serait renouvelée autant de fois que nécessaire.

Tous ces sujets de mesures de déviation et de diamètre, de récolement et d'actions correctives, conduisent inévitablement à s'interroger : ne serait-il pas préférable de traiter l'ensemble du sol sous le fond de fouille, sans chercher à connaître précisément la position de chacune des colonnes. L'analyse des déviations de forage et des diamètres de colonnes serait alors statistique en fonction de résultats de mesures réalisées sur un plot d'essai. Pour évaluer l'intérêt d'une telle alternative, un outil a été développé afin de pouvoir générer un grand nombre de scénarios pour lesquels les déviations et les diamètres de colonnes suivraient des lois normales.

## VUE EN PLAN - STATION JEAN-MÉDECIN



Le maillage théorique des colonnes de jet est dessiné dans un logiciel de dessin en DWG, ce qui permet de suivre la géométrie exacte de l'ouvrage. Les coordonnées théoriques des colonnes, ainsi que leurs diamètres nominaux, sont alors importés dans un tableur qui calcule les nouvelles positions et diamètres de sorte que les variations appliquées suivent des lois normales. En effet, une simple prise en compte des tolérances nominales aurait été insuffisante.

Il a paru indispensable de prendre en compte la dispersion de ces tolérances, afin d'obtenir une géométrie dite caractéristique au sens de l'Eurocode 7. On a retenu pour cela une distribution de Gauss. Selon le paramétrage (profondeur, tolérance d'implantation, déviation moyenne, orientation de la déviation, variation moyenne du diamètre de la colonne (figure 10) les sorties graphiques des zones de sol traité présentent des vides plus ou moins grands (figure 11). Ces vides sont répartis et d'extension limitée, ce qui autorise à penser qu'il n'y aura pas de problème de résistance. Pour s'assurer que les nervures des panneaux des parois s'appuient bien sur une colonne, seule la partie centrale de la fouille serait traitée en jet grouting selon ce principe de mise en œuvre statistique. La zone en périphérie nécessiterait des vérifications de position et de diamètre des colonnes effectivement mises en œuvre. Cela limite nécessairement l'intérêt d'une telle solution, d'autant plus que les plots d'essai réalisés sur site ont montré que la mise en œuvre de colonnes de jet dans les terrains rencontrés au droit des fonds de fouille imposait un taux de substitution élevé et une énergie importante.

Une alternative en pieux sécants réalisés à la tarière depuis la plate-forme de travail a aussi été étudiée (figure 12), mais à l'instar de la solution en colonnes de jet, la garantie d'avoir un refend continu et présentant une section suffisante en tous points n'était pas assurée.

L'ensemble de ces considérations a amené à la solution qui a été finalement retenue, et qui consiste à réaliser les refends en mettant en œuvre deux panneaux de parois moulées d'un mètre d'épaisseur non jointifs, clavés par des colonnes de jet grouting (figure 13). D'un point de vue financier, et en dépit du mort-forage nécessaire pour réaliser les 4,5 m de refend sous le fond de fouille à 30 m de profondeur,



7 © CEDRIC HELSLY

la réalisation de la majeure partie du traitement en paroi moulée s'est avérée compétitive. La disponibilité sur le site des installations et des ateliers de paroi moulée, parallèlement au fait que la nature des terrains à traiter n'est pas idéale pour le jet grouting, a fait pencher la balance vers cette solution. Pour garantir un bon contact entre les parois moulées périmétriques, le cla-

**7- Station Jean-Médecin - Travaux de jet grouting.**

**7- Jean-Médecin Station - Jet-grouting works.**

vage à l'aide de colonnes de jet est apparu comme la solution optimale. Le jet grouting permet en effet de garantir une bonne continuité dès lors que toutes les dispositions sont prises pour s'assurer de la position de la colonne et du diamètre de cette dernière. Le clavage en jet apporte l'assurance d'une bonne continuité, mais conduit à un assouplissement du refend qui a

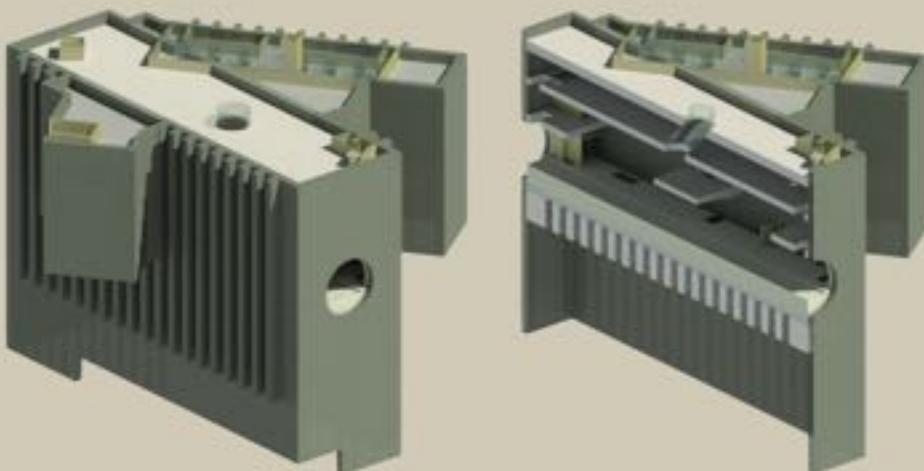
- 8- Photo du fond de fouille - Refends.
- 9- Vues en 3D - Station Durandy.
- 10- Colonne théorique - Colonne réelle.

- 8- Photo of bottom of excavation - Cross walls.
- 9- 3D views - Durandy Station.
- 10- Theoretical column - Actual column.



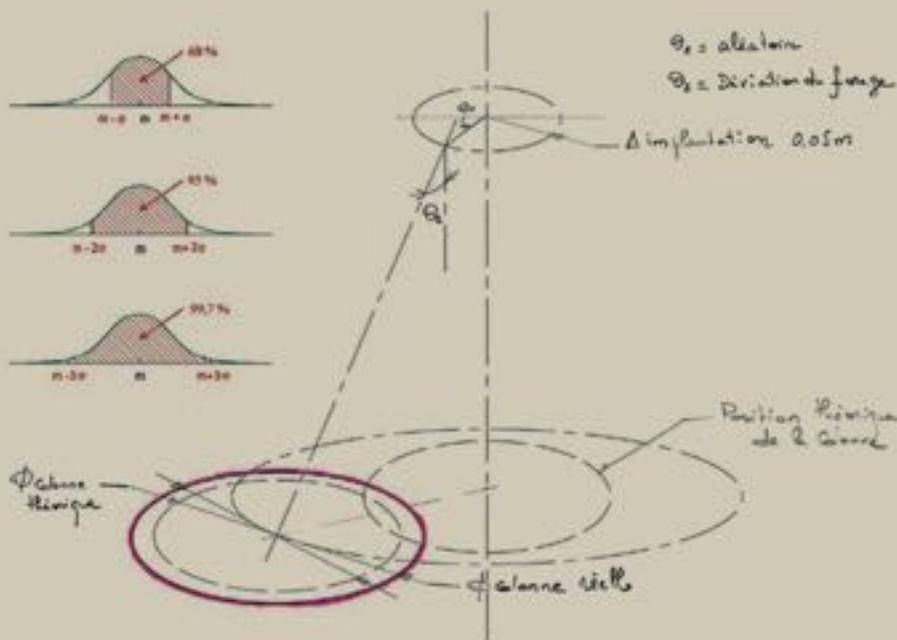
© THALIMASIA  
8

### VUES EN 3D - STATION DURANDY



© THALIMASIA  
9

### COLONNE THÉORIQUE - COLONNE RÉELLE



© THALIMASIA  
10

été pris en compte dans le dimensionnement de la paroi moulée. En effet, le refend forme un point dur sous le fond de fouille (et c'est bien là le but recherché), mais en fonction de sa raideur, il va drainer plus ou moins d'efforts, ce qui peut influencer sur les sollicitations de la paroi. Le complexe formé par l'alternance de terrain traité en jet grouting et de béton a une raideur plus faible que pour un refend entièrement en béton. Cette différence de raideur a conduit à une diminution des moments sur appui de la paroi moulée de l'ordre de 20%, mais a aussi été synonyme d'augmentation de déplacement. Après vérification, ces derniers restaient cependant admissibles dans les différentes modélisations.

Au droit des tympans, afin de garantir un appui continu à la paroi moulée plane et de transmettre les efforts de butée latéralement aux parois des longs pans, une voûte de terrain a dû être traitée.

En cours d'exécution, compte tenu de la difficulté de mise en œuvre du jet grouting dans ces terrains, il a été décidé de rajouter, entre le tympan et les deux premiers refends, quatre panneaux de paroi moulée supplémentaires, dont le rôle était de minimiser le nombre total de colonnes de jet grouting (figure 6).

### VALIDATION DE L'EFFICACITÉ DES REFENDS LORS DES TERRASSEMENTS

Le suivi inclinométrique mené durant les travaux a montré une très bonne corrélation avec les déformées évaluées dans les calculs (figure 14).

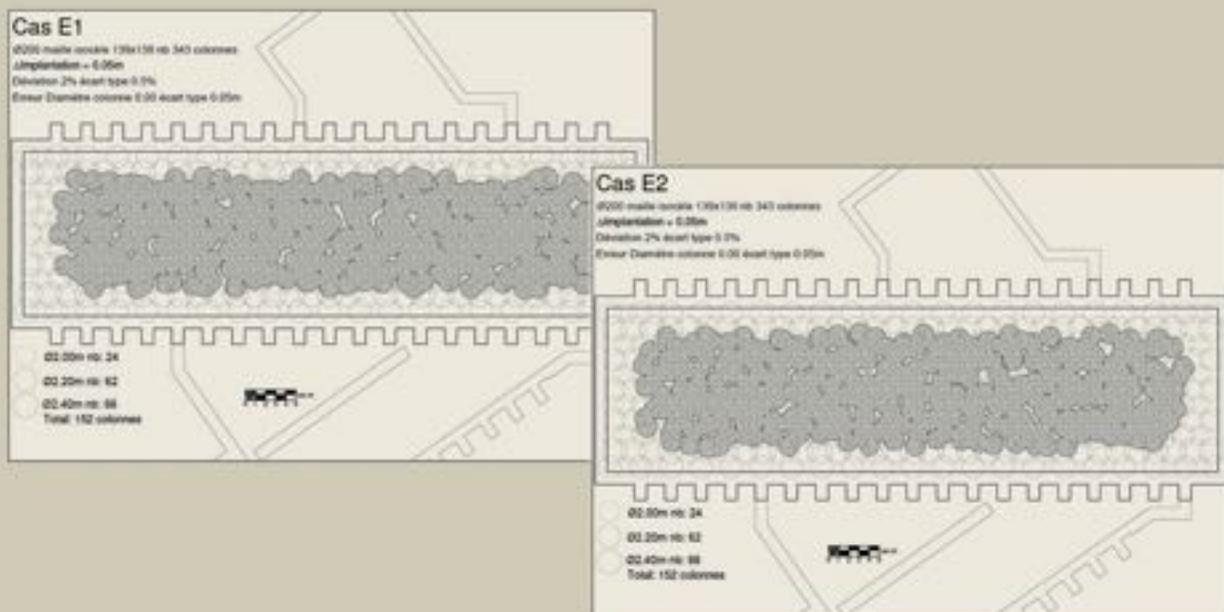
En l'absence de refends, les déplacements auraient été pluricentimétriques et donc complètement incompatibles avec les contraintes imposées par le contexte du projet.

Le même constat a été fait sur les 3 stations, confirmant ainsi l'efficacité d'un tel dispositif.

### SOLUTIONS RETENUES POUR D'AUTRES PROJETS

Le contexte particulier rencontré dans le cadre des études du tramway de Nice n'est cependant pas exceptionnel. Dans les projets qui sont actuellement en cours, par exemple dans le cadre des travaux du Grand Paris Express, on trouve des ouvrages qui sont confrontés à ces problèmes de mobilisation de butée. Cela peut être dû à des terrains de faibles caractéristiques mécaniques, comme c'est le cas pour certains ouvrages du lot T3A de la Ligne 15 Sud, ▷

## RADIERS JET "STATISTIQUE" - AVEC MÊMES JEUX DE PARAMÈTRES



11

© THAUMASIA

**11- Radiers jet "statistique" - Avec mêmes jeux de paramètres.**

**12- Refends - Solution à la tarière.**

**13- Refends - Solution paroi moulée clavage en jet grouting.**

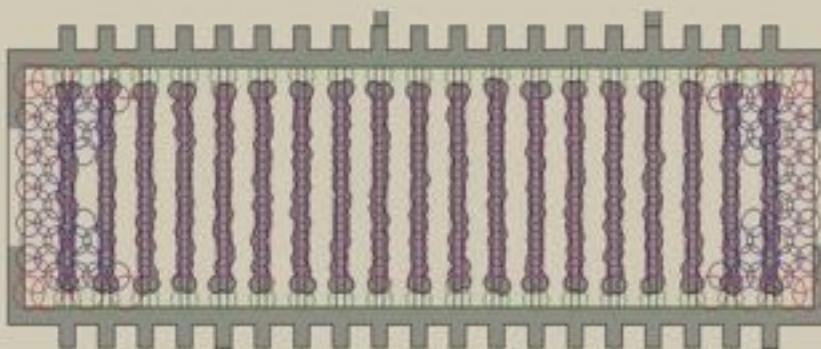
**11- "Statistical" jet-grouted slabs - with the same sets of parameters.**

**12- Cross walls - Auger solution.**

**13- Cross walls - Diaphragm wall solution, jet-grouted keying.**

ou encore en raison de la propension de certains sols à évoluer dans le temps. On peut citer par exemple le cas de la future gare Maison-Blanche, sur le prolongement sud de la Ligne 14, qui recoupe une forte couche d'argiles plastiques, ce qui a rendu nécessaire de prévoir des prébutons, sous forme de refends réalisés entièrement en béton mis en œuvre en remordu à l'Hydrofraise.

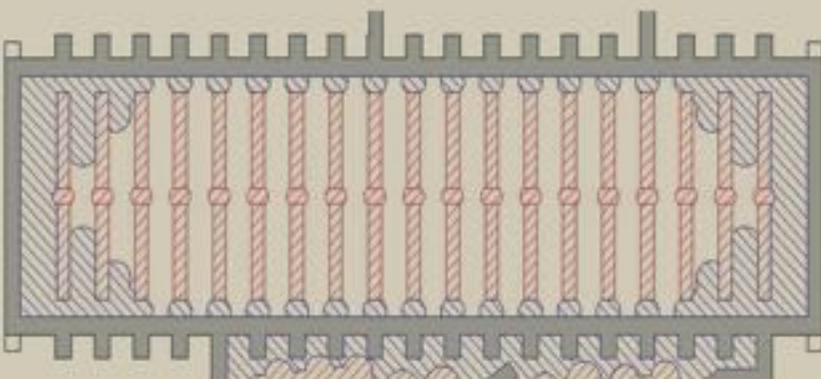
## REFENDS - SOLUTION À LA TARIÈRE



12

© THAUMASIA

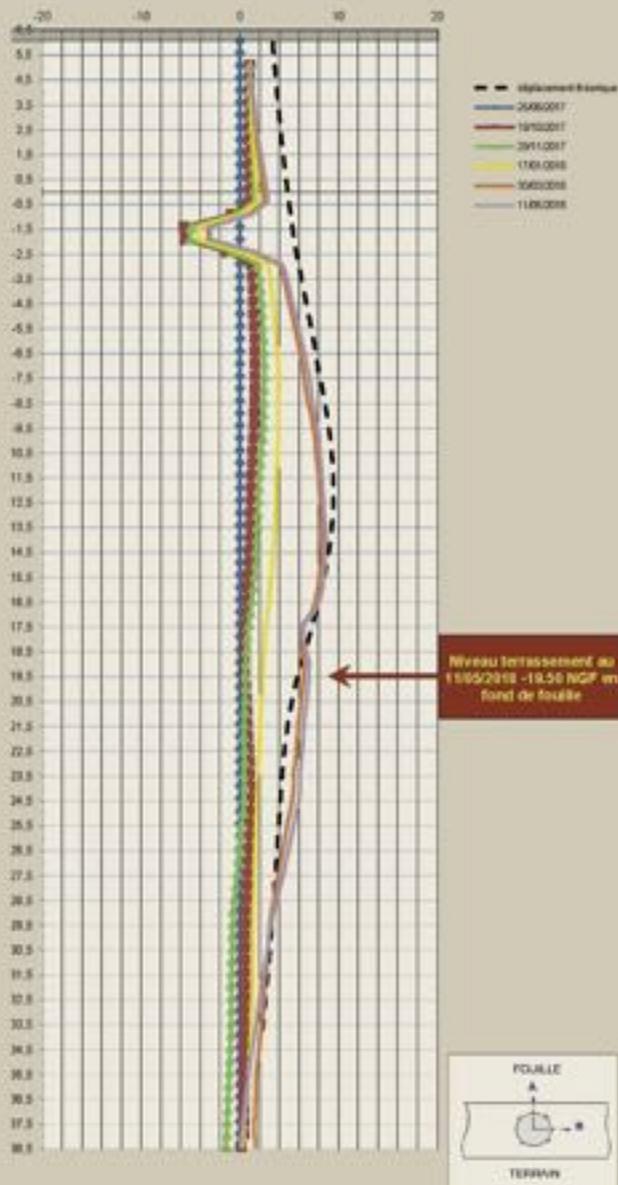
## REFENDS - SOLUTION PAROI MOULÉE CLAVAGE EN JET GROUTING



13

© THAUMASIA

## SUIVI INCLINOMÉTRIQUE - STATION JEAN-MÉDECIN



## CONCLUSION

Le traitement des terrains sous fond de fouille est une solution habituellement retenue dans le cas où l'on rencontre des difficultés pour mobiliser la butée.

La solution proposée par Soletanche Bachy, dans le cadre du projet du tramway de Nice, s'appuie à la fois sur

des refends réalisés sous le fond de fouille, avant terrassement, et sur un soutènement en paroi moulée en Té de forte inertie qui a permis de faciliter les terrassements jusqu'au fond de fouille en supprimant de nombreux butons. Cette solution a su répondre à toutes les exigences liées au contexte très urbanisé de la ville de Nice.

Enfin, les mesures inclinométriques réalisées tout au long des terrassements ont validé les modélisations réalisées durant les études, en faisant apparaître l'appui incontestable que créent les refends sous fond de fouille.

Aujourd'hui, ce sont les radiers des stations qui ont pris le relais, déchargeant progressivement les refends au fil du fluage et des redistributions d'efforts. □

**14- Suivi inclinométrique - Station Jean-Médecin.**

**14- Inclinometer monitoring - Jean-Médecin Station.**

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**BÉTON PAROI MOULÉE : 55 200 m<sup>3</sup>**  
**BÉTON GÉNIE CIVIL (RADIERS, DALLES) : 23 800 m<sup>3</sup>**  
**ACIER : 10 300 t**  
**DÉBLAIS : 520 000 t**  
**PERFORATION POUR JET GROUTING : 17 000 m**  
**CIMENT POUR JET GROUTING : 14 000 t**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Métropole Nice Côte d'Azur (MNCA) - Direction du tramway et de la Mobilité Durable  
**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Groupement Essia - Egis Rail / Stoa / Atelier Schall / Ingerop / Atelier Villes & Paysages  
**GROUPE D'ENTREPRISES THAUMASIA (composé de 7 cotraitants) :**

- Bouygues Travaux Publics (mandataire)
- Bouygues Travaux Publics Régions France
- Soletanche Bachy France
- Soletanche Bachy Tunnels
- Bessac
- Colas Midi Méditerranée
- Snaf

## ABSTRACT

### IMPROVING THE ABUTMENT OF THE DIAPHRAGM WALLS ON THE NICE TRAMWAY

REYNALD DEGEORGE, SOLETANCHE BACHY - PIERRE DE LAVERNÉE, SOLETANCHE BACHY

The works on Line 2 of the Nice tramway are being completed, validating de facto all the technical options that were chosen throughout this Design and Build project. With a bold solution based on cross walls under the bottom of excavation and a high-inertia retaining structure, Soletanche Bachy was able to provide a response to the numerous constraints of the very specific local context (substantial urbanisation, ground with poor mechanical properties, seismic environment). In order to find the best technico-financial compromise for erection of the cross walls under the bottom of excavation, an iterative process was applied at the start of the detailed design work. □

### MEJORA DEL EMPUJE PASIVO DE LAS PANTALLAS DE HORMIGÓN EN EL TRANVÍA DE NIZA

REYNALD DEGEORGE, SOLETANCHE BACHY - PIERRE DE LAVERNÉE, SOLETANCHE BACHY

Las obras de la Línea 2 del tranvía de Niza están terminando, lo que corrobora el conjunto de decisiones técnicas tomadas a lo largo de todo el proyecto de diseño/realización. Con una audaz solución basada en separaciones bajo el fondo de excavación y una contención de fuerte inercia, Soletanche Bachy ha sabido responder a las numerosas restricciones que imponía un contexto local muy particular (fuerte urbanización, terrenos con pobres características mecánicas, sismicidad). Para hallar el mejor compromiso técnico-financiero para la realización de las separaciones bajo el fondo de excavación, se ha aplicado un proceso iterativo al comienzo de los estudios de ejecución. □



1

© EIFFAGE

# GALERIE DES JANOTS - UN OUVRAGE CREUSÉ DANS UN MASSIF KARSTIQUE

AUTEURS : HASSAN FARHAT, DIRECTEUR TECHNIQUE, ARCADIS - MARIE LESIMPLE, GÉOLOGUE, EIFFAGE

LA GALERIE DES JANOTS EST UN OUVRAGE RÉALISÉ DANS UN MASSIF KARSTIQUE AU MOYEN D'UN TUNNELIER ROCHE DURE À GRIPPER DE DIAMÈTRE 3,5 m SUR 2 750 m DE LONGUEUR. L'AVANCEMENT DES TRAVAUX D'EXCAVATION A ÉTÉ PERTURBÉ PAR LA RENCONTRE DE NOMBREUX ALÉAS GÉOLOGIQUES QUI ONT NÉCESSITÉ LA MISE EN ŒUVRE RAPIDE DE TRAITEMENTS SPÉCIFIQUES, AFIN DE GARANTIR LA SÉCURITÉ DU PERSONNEL, L'INTÉGRITÉ DE L'OUVRAGE, ET PERMETTRE LA POURSUITE DU CREUSEMENT.

## PRÉSENTATION DU PROJET ET CARACTÉRISTIQUES DU TUNNELIER

La galerie des Janots est un tunnel destiné à alimenter en eau brute la commune de La Ciotat en remplacement de la conduite actuelle ancienne et vétuste, qui emprunte le tunnel SNCF existant.

Elle traverse le domaine du parc des Calanques à cheval sur les communes

de Cassis et de La Ciotat, sur un linéaire de 2 750 m et sous une hauteur de couverture variant de 15 à 180 m (figure 2). Son gabarit fini est de 3,0 m intérieur utile (figure 3) ; pour cela le diamètre excavé est de 3,5 m permettant la mise en place du soutènement et la tolérance d'exécution.

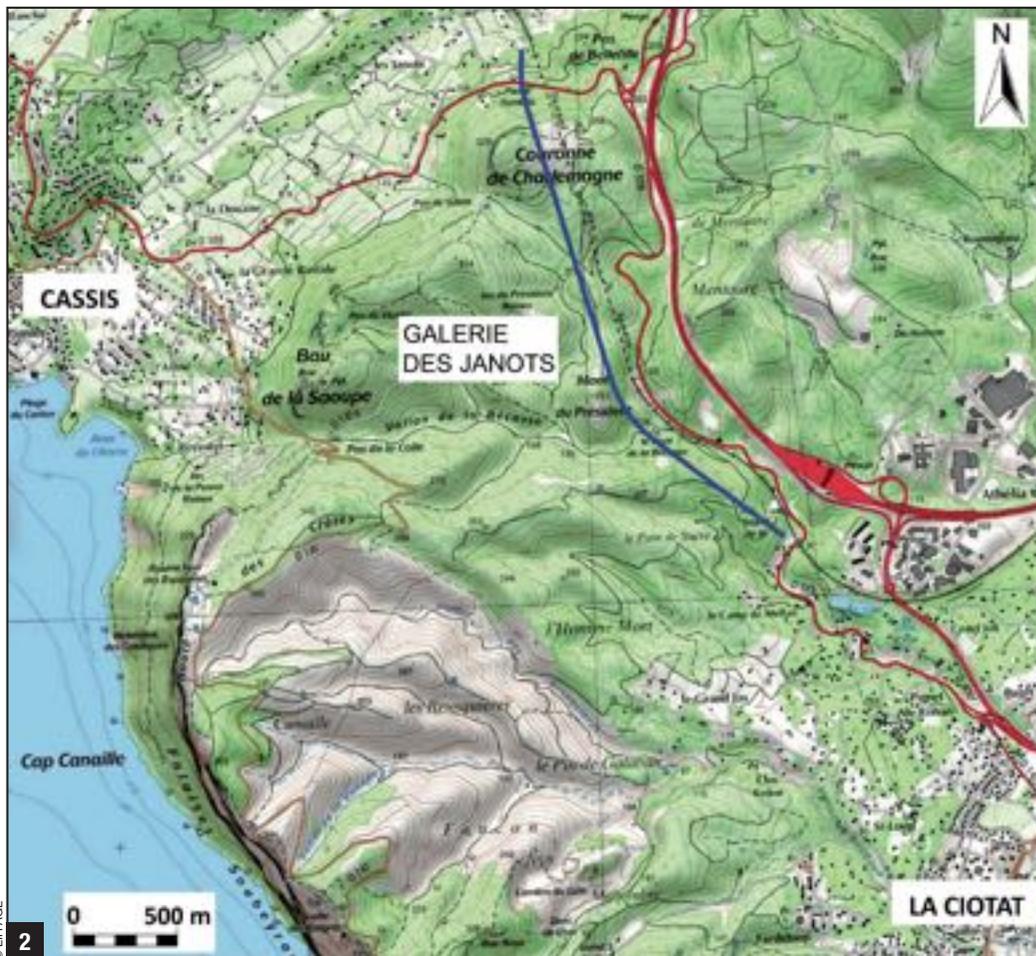
La galerie est équipée après creusement d'une cunette de section 70x70 cm qui permet de faire transiter

**1- Grotte pluridécimétrique rencontrée au PM 1035.**

**1- Grotto measuring several tens of metres found at PM 1035.**

gravitairement un débit prévisionnel de 450 l/s d'eau brute. La conception de cet ouvrage permet d'y intégrer, ultérieurement, une conduite d'adduction d'eau potable en fonte Ø 900 assurant 1 000 l/s de débit.

La galerie est creusée au moyen d'un tunnelier roche dure ouvert à gripper de diamètre 3,5 m, avec pose du soutènement à l'avancement, baptisé Augustine et inauguré le 4 mars 2017.



© EIFFAGE  
2

Le creusement s'est achevé le 4 avril 2019 avec le percement du tympan amont.

Les caractéristiques du tunnelier de marque Robbins (figure 4) et mis en place par les équipes du chantier sont les suivantes :

- Diamètre de la roue de coupe **3,50 m** ;
- Longueur totale de la machine **135 m** ;
- Poids total **220 t** ;
- Molettes **25 unités de 17"** ;
- Poussée opérationnelle **500 t** ;
- Course des vérins **1500 mm** ;
- Vitesse roue de coupe **14 tr/min**.

Le tunnelier est équipé d'une jupe télescopable et de deux grippers prenant appui sur le terrain qui permettent de reprendre le creusement. Une casquette de protection située à l'arrière du bouclier permet aux opérateurs de mettre en place les différents types de soutènements à chaque phase de creusement de la machine.

### CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

Le projet est situé dans une zone semi-urbaine à fort relief, à proximité de la RD559 (13500 véhicules/jour), et de la voie ferrée internationale Vintimille-Marseille, qui longe le projet (figure 5). Cette voie ferrée double emprunte le tunnel des Janots puis une tranchée ouverte le long de la RD559.

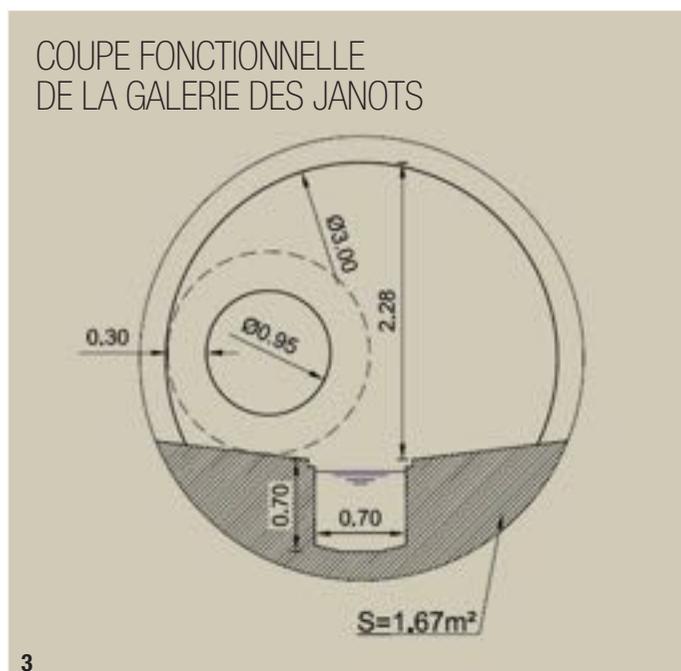
### 2- Localisation du projet.

### 3- Coupe fonctionnelle de la galerie des Janots.

### 2- Project location.

### 3- Functional cross section of the Janots gallery.

La galerie est concernée par les zones classées suivantes : Parc naturel des Calanques, Site classé Natura 2000, Zone ZNIEFF de type 2 (Zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique), classement EBC (Espace boisé classé) et Zones soumises à autorisation de défrichement. Elle traverse sur les communes de La Ciotat et Cassis le massif de la Couronne de Charlemagne, dans le Parc naturel



3  
© EIFFAGE

des Calanques, qui présente de nombreux escarpements et vallons, dont les pentes peuvent atteindre 60 % (figure 6).

L'altimétrie varie de 120 à 320 m NGF dans le secteur du tracé. La Couronne de Charlemagne est un relief structural qui constitue le point culminant du massif au PM 2400. L'accès au site et à la trace de l'ouvrage en surface se fait partiellement par des pistes DFCl (Défense des Forêts Contre l'Incendie) et les sentiers de randonnée, depuis la RD559 à l'entrée de la ville de La Ciotat.

### CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le projet se situe sur la bordure occidentale du bassin Sud Provençal, appelée "bassin du Beausset". Au sens géomorphologique, ce bassin correspond à un synclinal. Le projet traverse les terrains sédimentaires d'âge Crétacé Moyen à Crétacé Supérieur de sa bordure Nord-Ouest (figure 7).

Les formations traversées ont un pendage faible vers le SE. Elles comportent des terrains d'origine continentale (grès) et des roches carbonatées (calcaires) marqués par de nombreuses variations latérales de faciès, générées par une tectonique syn-sédimentaire.

Au sens de la notice de la carte géologique de la feuille Aubagne-Marseille (1969), le tracé de la galerie des Janots recoupe les formations suivantes, de l'aval vers l'amont :

- Barres calcaires blanchâtres souvent fossilifères, recoupées notamment sur l'attaque aval de la galerie (C3R inf et C3R sup), constituées de calcaires de plateforme, ou de re-sédimentations de ces calcaires dans le bassin (olistolites) ;
- Calcaires gréseux et grès coquilliers bioclastiques, de teinte rousse, à stratification oblique, représentant le front d'un ancien delta (C3G) ;
- Marnes et calcaires marneux, en alternance avec des formations marno-gréseuses, du centre du tracé jusqu'à l'attaque amont (C3M).

Les formations carbonatées de plateforme (barres de calcaires à rudistes) affleurent sur le plateau de la Couronne de Charlemagne, point culminant du massif traversé par le projet, et constituent une surface structurale intensément lapiazée.

L'unité du Beausset connaît peu d'écoulement de surface pérenne. Ces derniers semblent concentrés au niveau

Aucune venue d'eau n'a été rencontrée au cours des études préalables, mais 2 sources ont été recoupées dans le tunnel SNCF existant où il a également été constaté des venues d'eau non pérennes dont le débit est entièrement dépendant de la pluviométrie.

Il existe cependant un risque non négligeable de rencontrer des systèmes aquifères de type karstique, notamment dans les horizons calcaires, générés par les variations des niveaux marins au quaternaire. Ainsi, il existe à proximité du tunnel SNCF une cavité importante résultant d'une ancienne rivière souterraine (grotte des Janots, voir ci-dessous), et des vides/cavités de taille variable ont été recoupés sur certains sondages des différentes campagnes de reconnaissances. Ces cavités peuvent être pleines et se vider rapidement, avec des débits résiduels faibles.

#### RECONNAISSANCES GÉOLOGIQUES

Les premières études géotechniques de faisabilité datent de 1977, et comprennent des reconnaissances géophysiques type sondages sismiques et traînés de résistivité, permettant d'aboutir à un profil en long géologique prévisionnel à structure monoclinale dont le pendage moyen des couches est de 15° à 20° vers le sud.



4  
© EIFFAGE

Les données issues de la base de données du Brgm mettent en évidence la présence de quelques cavités karstiques autour du Parc des Calanques, dont la grotte des Janots, située à environ 1,2 km de l'attaque amont du projet. Elle correspond à un ancien lit de rivière obstrué par des dépôts argileux. Les indices fossiles témoignent du passage prolongé d'un courant aqueux

**4- Tunnelier, en cours de montage.**

**5- Installations de chantier zone aval.**

**4- TBM undergoing assembly.  
5- Site facilities in the downstream zone.**

dans le sens Nord-Sud, mais aucune présence d'eau n'a jamais été constatée. Elle se développe au sein des calcaires à rudistes du Cénomaniens (C2R), formation non recoupée par le tracé. La campagne de reconnaissance des études d'Avant-Projet date de 2008. Elle comporte des études géologiques et géophysiques, 7 sondages verticaux (destructifs et carottés) et 2 sondages carottés horizontaux pour un linéaire total de 555 m, des mesures dans ces sondages (type diagraphies, pressiomètres, dilatomètre, essais de laboratoire).

Ces sondages n'ont mis en évidence "qu'une seule cavité" au droit du sondage S4, située en toit de la future galerie. Cette campagne de reconnaissance a confirmé les différentes unités géologiques du tracé.

En phase travaux, la campagne de reconnaissances complémentaire (G3) a comporté les reconnaissances suivantes (figure 8) :

- Une campagne de prospection géophysique de surface par panneaux électriques de longueur totale 3000 m ;
- Des sondages carottés et pressiométriques verticaux aux têtes ;
- Un sondage carotté subhorizontal de longueur 250 m à partir de l'attaque côté aval.



5  
© EIFFAGE

6- Parc des Calanques au droit du tracé.

7- Extrait de la carte géologique de la région.

6- Les Calanques park on the alignment.

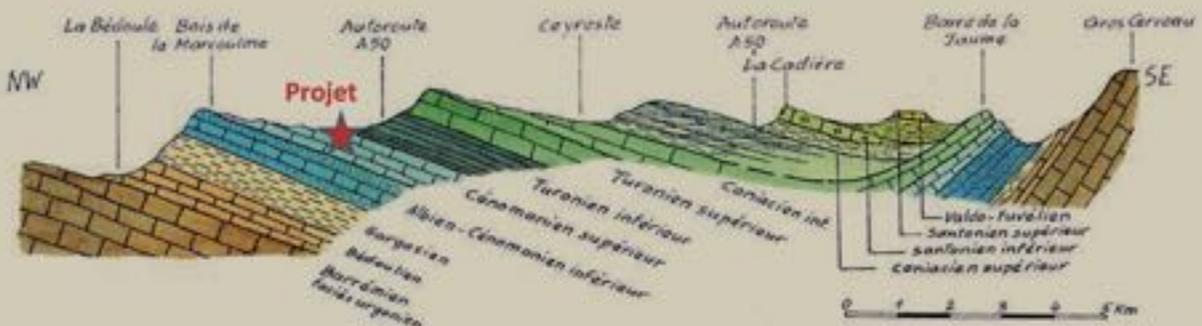
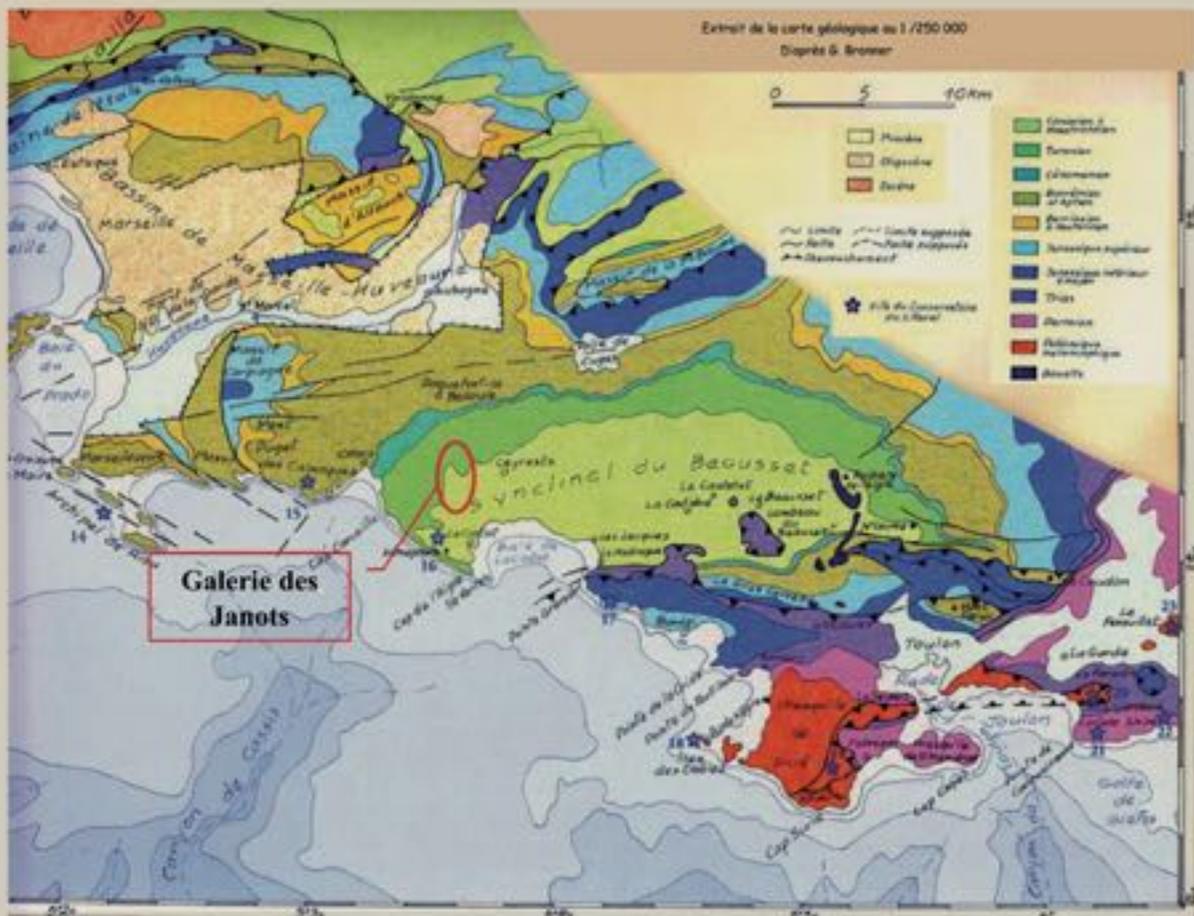
7- Excerpt from the geological map of the region.



© EIFFAGE  
6

Un modèle géologique a été établi à partir des profils géophysiques, des sondages existants et des données géologiques et structurales des levés effectués en surface (figure 9). Ce modèle a permis d'associer certaines anomalies repérées en profondeur à des accidents structuraux relevés en surface ou dans les sondages. Une campagne de 410 m de sondages verticaux en surface a été définie pour compléter ce modèle géologique. ▷

## EXTRAIT CARTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION



Coupe géologique schématique NW-SE régionale du synclinal du Beausset (d'après G. Bronner, 2006)

© EIFFAGE

Les sondages ont permis de reconnaître plusieurs anomalies karstiques au niveau de la tête aval du projet côté La Ciotat, justifiant la réalisation d'une galerie de longueur 80 m en méthode conventionnelle (abattage à l'explosif et machine à attaque ponctuelle) afin de réaliser la chambre de démarrage du tunnelier dans un environnement géologique sain.

### PLAN DE MANAGEMENT DES RISQUES

Les résultats des reconnaissances géologiques complémentaires ont permis d'établir un zonage des risques géologiques résiduels sur le profil en long du projet, dont un linéaire de 1 053 m de risques karstiques élevés, dans les formations stratifiées riches en carbonates de la première partie de l'ouvrage, par nature plus sensibles à la dissolution.

Le tunnelier a été équipé d'un système de reconnaissance géophysique à l'avancement par tomographie électrique (système BEAM<sup>(1)</sup>) conçu pour une analyse continue des caractéristiques des terrains situés à une distance équivalente à 3 fois le diamètre de la roue de coupe, en particulier l'identification de cavités métriques et d'horizons aquifères, exclusivement à l'intérieur de la section. Par ailleurs, le plan de management des risques prévoyait la réalisation depuis le tunnelier de sondages destructifs de reconnaissance à l'avancement avec recouvrement (hors emprise section) dans les zones à risques géologiques élevés.



8 © EIFFAGE

### LA GÉOLOGIE RENCONTRÉE ET LA GESTION DES ALÉAS KARSTIQUES

Dès le démarrage du creusement, le tunnelier a traversé des calcaires à rudistes du Turonien très fortement affectés par des phénomènes karstiques non envoyés de nature et de dimensions variables, dont certains, se développant en périphérie de la section et difficilement détectables par les systèmes de reconnaissances à l'avancement mis en œuvre sur le tunnelier, ont considérablement impacté les travaux de creusement. Il s'avère que les aléas

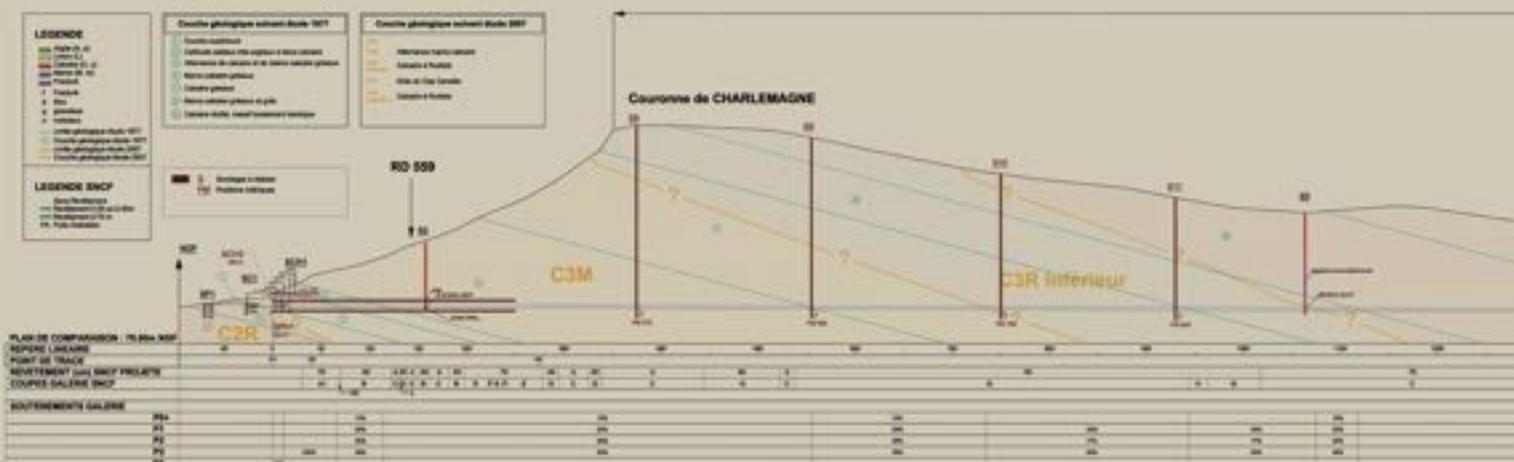
**8- Reconnaissances complémentaires dans le Parc des Calanques.**  
**9- Profil en long géologique prévisionnel.**

**8- Additional reconnaissance in Les Calanques park.**  
**9- Projected geological longitudinal section.**

karstiques ont par la suite concerné toutes les formations traversées par le projet, de la tête aval jusqu'à la tête amont, quelle que soit la hauteur de couverture :

- Les formations calcaires à rudistes de l'attaque aval, sous une hauteur de couverture de 25 à 60 m ;
- Les calcarénites bioclastiques quartzieuses rousses à stratification oblique du centre du tracé, sous une hauteur de couverture de 14 à 100 m ;
- Les calcaires à rudistes de plate-forme carbonatée, y compris ceux

## PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE PRÉVISIONNEL



## PRINCIPALES PHASES DE RÉALISATION



© EIFFAGE

de la Couronne de Charlemagne, sous une hauteur de couverture de 80 à 105 m ;

→ Les formations marno-calcaires argileuses et silteuses, sous une hauteur de couverture de 13 à 185 m.

Les différents aléas rencontrés sont majoritairement des formes souterraines karstiques de type cavités et boyaux, tapissés de concrétions, se développant ponctuellement au sein d'un encaissant souvent sain, compact voire massif.

Les travaux de traitement nécessaires au franchissement de ces aléas diffèrent selon leurs caractéristiques, en particulier la nature de leur remplissage : elles se présentent soit vides, soit entièrement ou partiellement remplies

de résidus de décalcification argileux à argilo sableux.

### Cas des cavités remplies

Il s'agit du type d'aléa karstique le plus fréquemment rencontré pendant le creusement et le plus contraignant compte tenu de l'obligation de traiter les résidus de remplissage avant la reprise du creusement.

Les cavités remplies rencontrées à l'avancement, de dimension inframétrique jusqu'à pluridécamétrique, sont caractérisées par un développement soit subvertical, soit subhorizontal le long des joints de stratification des formations calcaires. Dans la plupart des cas, les passages karstifiés ont été sujets à la formation de blocs volumineux, soit individualisés dans le

remplissage, soit le long des parois des cavités. Les matériaux de remplissage essentiellement humides et plastiques ont eu un fort impact sur les cadences de creusement du fait :

→ Du colmatage complet et répété des éléments de la roue de coupe (racleurs, molettes, trémie) : les travaux de nettoyage manuel doivent être réalisés à l'avancement, l'utilisation de polymères en aspersion dans la chambre d'abattage peut être envisagée en préventif pour atténuer l'adhérence des matériaux argileux.

→ De la nécessité de réaliser des travaux de substitution au droit des appuis latéraux avant de poursuivre le creusement. La substitution des résidus de remplissage doit s'effec-

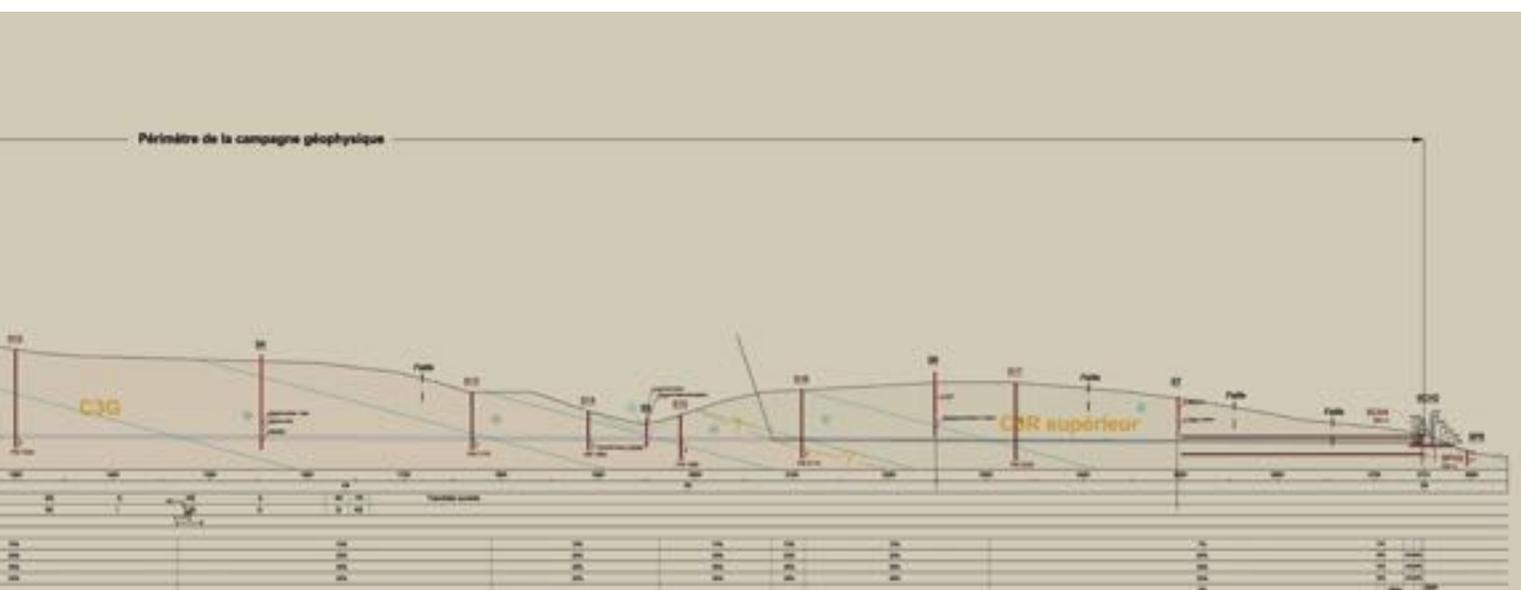
tuer entre le bouclier et les grippers du tunnelier, par du béton pompé armé ou du sable, sur une épaisseur suffisante pour reprendre les efforts de poussée du tunnelier.

→ Des renforcements des soutènements mis en œuvre à l'arrière du bouclier.

→ À l'avant de la roue de coupe, ces matériaux en place s'apparentent à un front mixte et sont responsables d'une trop grande sollicitation de la roue de coupe générant des difficultés d'évacuation, des coincements et usures prématurés et asymétriques des molettes.

### Cas des cavités vides

Les vides karstiques rencontrés ont des dimensions inframétriques à pluridécamétriques. Il peut s'agir de réseaux de conduits circulaires ou boyaux subverticaux généralement secs, de cavités partiellement remplies dont le toit s'est effondré, voire de véritables grottes volumineuses. La gestion des vides karstiques est différente puisqu'il s'agit davantage de gérer des problèmes de stabilité de paroi à court ou moyen terme, avant ou après le passage du bouclier selon la géométrie de la cavité, au moyen de coulis de consolidation ou de mousse expansive. Les remplissages au coulis ont été privilégiés dans les cavités affectant la zone des grippers (pour la reprise de la poussée de grippage), ou dans le cas d'horizons fortement décomprimés et de blocs volumineux potentiellement instables en partie supérieure de l'excavation (pour la stabilité à long terme). ▷



La mousse expansive a été utilisée pour le comblement de cavités karstiques volumineuses affectant la partie supérieure de la section, afin de contenir les éventuels phénomènes de vidange de matériaux de remplissage des boyaux supérieurs inapparents. Ce traitement effectué dans l'urgence pour le court et moyen terme, a dû faire l'objet de mesures de traitements complémentaires après passage du tunnelier (injections complémentaires de coulis de consolidation, pour le long terme).

**10- Schéma de la grotte du PM 1035.**

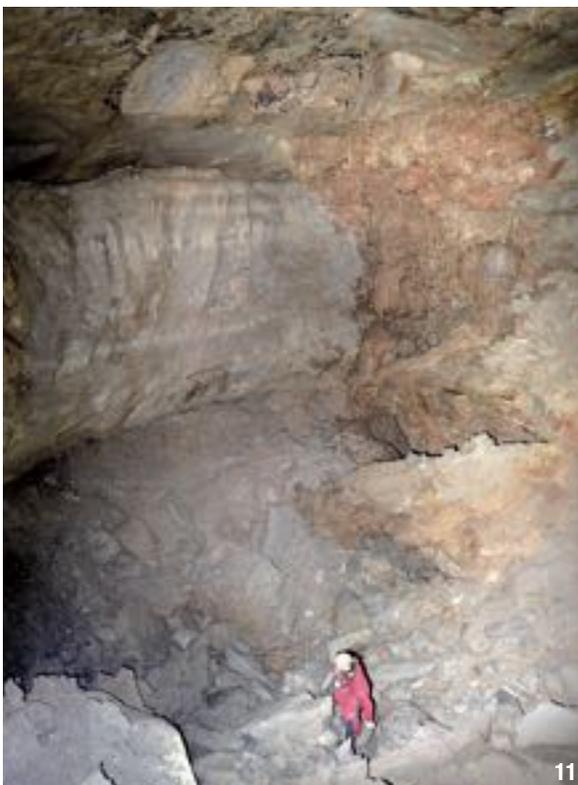
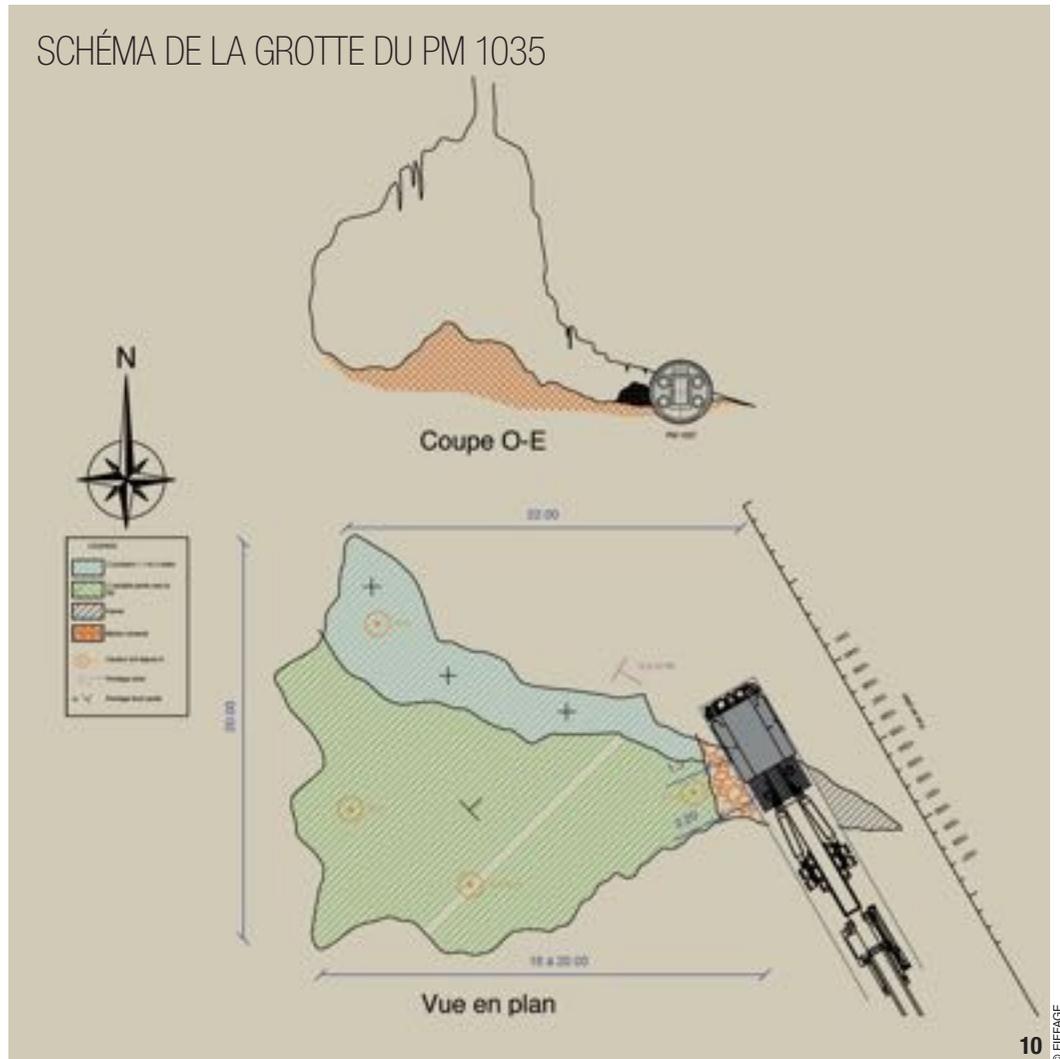
**11- Grotte pluridécimétrique rencontrée au PM 2057.**

**12- Vide karstique intercepté par le bouclier.**

**10- Diagram of the grotto at PM 1035.**

**11- Grotto measuring several tens of metres found at PM 2057.**

**12- Karstic void intercepted by the shield.**



### Cas des cavités pluridécimétriques

Elles ont fait l'objet d'interventions de spéléologues professionnels. 4 cavités pluridécimétriques ont été recoupées par le tunnelier et ont bouleversé les travaux, dont les deux principales :

→ Une grotte "sèche" baptisée Marie Lesimple, très concrétionnée, se développant dans les calcarénites gréseuses sous 50 m de couverture, de dimensions approximatives 22 m de longueur, 20 m de largeur, et 10 à 15 m de hauteur, créant une entrée artificielle d'environ 6 m dans le parement de la galerie (figure 10). Cette grotte sèche montre toutefois des indices de mise en charge de la partie aval de la grotte sur des hauteurs d'environ 4 m au-dessus du fil d'eau de la galerie. Après une première phase d'inspection préliminaire de la grotte et de sécurisation du toit rocheux au droit de l'entrée artificielle créée dans la paroi de la galerie, un massif en béton armé de 20 m<sup>3</sup> a été réalisé au droit de la saignée afin de recréer un massif d'appui pour les vérins de poussée de la machine et assurer la reprise du creusement en sécurité.



13  
© EIFFAGE

**13- Percement tympan aval avril 2019.**

**13- Front wall drilling in April 2019.**

→ Une grotte générée par des phénomènes de fantômisations ayant eu des conséquences majeures sur le creusement (figure 11), se développant au sein des formations marno-calcaires silteuses de la partie amont du projet. Des spéléologues professionnels sont intervenus, en appui des équipes de chantier, pour effectuer notamment des travaux de comblement de la cavité dans le but de sécuriser le tunnelier et la reprise du creusement. □

1- **Le système BEAM** : cette technique géophysique (électrique) non-intrusive utilise les variations de la polarité induite PFE (lié à la porosité du terrain) et de la résistivité R du sol pour identifier en temps réel les obstacles pouvant être rencontrés à l'avancement.

## PRINCIPALES ÉTAPES ADMINISTRATIVES

**OCTOBRE 2004** : Schéma Directeur d'Adduction et de Production CUMPM

**JUILLET À OCTOBRE 2013** : Consultation des entreprises

**SEPTEMBRE À DÉCEMBRE 2013** : Enquête publique

**13 MARS 2014** : Attribution du Marché à Eiffage Génie Civil

**MARS 2014 À OCTOBRE 2015** : Conventions foncières

**22 OCTOBRE 2015** : Notification du marché

**01 DÉCEMBRE 2015** : OS de démarrage des travaux

**04 MARS 2017** : Inauguration du tunnelier Augustine

**04 AVRIL 2019** : Percement du tympan amont

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**CREUSEMENT PAR LA MÉTHODE CONVENTIONNELLE : 80 m**

**CREUSEMENT PAR TUNNELIER OUVERT, TYPE ROCHE DURE DE 3,5 m DE DIAMÈTRE EXTÉRIEUR : 2670 m**

**PENTE DE LA GALERIE DES JANOTS : 0,4 %**

**DÉBLAIS : 35 000 m<sup>3</sup>**

**BÉTON PROJETÉ EN GALERIE : 2 120 m<sup>3</sup> / 22 000 m<sup>2</sup>**

**CINTRES HEB : 168 t**

**SOUTÈNEMENT EN PAROIS CLOUÉES OU BERLINOISE : 1 200 m<sup>2</sup>**

**BÉTON : 5 000 m<sup>3</sup>**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE** : Métropole Aix-Marseille-Provence

**MAÎTRE D'ŒUVRE** : Cabinet Merlin

**MISSION SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXÉCUTION G4** : Arcadis

**CONTRÔLEUR TECHNIQUE** : Socotec

**COORDONNATEUR HYGIÈNE ET SÉCURITÉ** : Bureau Veritas

**ENTREPRISE PRINCIPALE** : Eiffage Génie Civil

## ABSTRACT

### JANOTS GALLERY - A TUNNEL DRIVEN IN A KARSTIC ROCK MASS

HASSAN FARHAT, ARCADIS - MARIE LESIMPLE, EIFFAGE

The Janots gallery is a tunnel 3 metres in useful diameter and 2,770 metres long designed to convey raw water by gravity flow to supply the town of La Ciotat. The gallery was driven in 25 months by a hard rock TBM with grippers 3.5 metres in diameter, placing the retaining structure as work progressed, in carbonaceous sedimentary ground, under 15 to 180 metres of overburden. The ground encountered by the gallery is mainly limestones and quartzose calcarenites containing numerous karstic zones with voids or filled with plastic materials, including cavities of sizes measured in metres, tens of metres, or even several tens of metres. Faced with the karstic risk constituting the main geological hazard, identified ahead of the project, reconnaissance was performed as the work progressed. To pass through the cavities, ground treatment and consolidation work was required, and special systems for restarting the tunnel boring machine. □

### GALERÍA DE LOS JANOTS - UNA OBRA HUECA EN UN MACIZO CÁRSTICO

HASSAN FARHAT, ARCADIS - MARIE LESIMPLE, EIFFAGE

La galería de los Janots es un túnel de 3 m de diámetro y 2.770 m de longitud destinado al tránsito por gravedad de agua bruta para abastecer la ciudad de La Ciotat. La galería fue perforada en 25 meses con una tuneladora de roca dura con grippers de 3,5 m de diámetro, instalando previamente soportes en terrenos sedimentarios carbonatados, bajo un recubrimiento de 15 a 180 m. Los terrenos hallados en la galería son principalmente calcáreos y calcarenitas de cuarzo, con numerosas zonas cársticas vacías o rellenas de materiales plásticos, con cavidades de dimensiones métricas a decamétricas, e incluso multidecamétricas. Ante el riesgo cárstico como el principal peligro geológico, identificado en la fase inicial del proyecto, se han realizado reconocimientos previos. Para atravesar las cavidades ha sido preciso realizar trabajos de tratamiento y consolidación del terreno y emplear dispositivos específicos para la puesta en marcha de la tuneladora. □





# EXTENSION DE LA L14 AU SUD DE PARIS - GONFLEMENT SOUS RADIER ET PAROIS MOULÉES SOUS GABARIT RÉDUIT

AUTEURS : PIERRE XEMARD, INGÉNIEUR ÉTUDE, GEOS - AGNÈS SAGNIERE, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, RAZEL-BEC - THOMAS NOVALES, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, RAZEL-BEC

DES SOLUTIONS TECHNIQUES INNOVANTES ONT ÉTÉ PROPOSÉES, JUSTIFIÉES ET MISES EN ŒUVRE AVEC SUCCÈS POUR OPTIMISER LES CONDITIONS DE RÉALISATION DU CHANTIER DES 4,1 km DE TUNNEL, TROIS STATIONS ET TROIS OUVRAGES ANNEXES DU LOT GC03 DE LA L14 SUD : COFFRAGES MODULO POUR LES VIDES SANITAIRES SOUS RADIER, MINI-BENNE ET CAGES D'ARMATURES MANCHONNÉES POUR LES PAROIS MOULÉES SITUÉES SOUS LES LIGNES ÉLECTRIQUES À HAUTE TENSION.

## PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le prolongement de la Ligne 14 Sud de la RATP, en cours de creusement, s'étend des portes de Paris (gare de Maison-Blanche - Paris XIII<sup>e</sup>) jusqu'à l'aéroport d'Orly, et desservira 7 nouvelles gares réparties le long de 14 km de tunnel (figure 2). Cette ligne 100 % automatique, dont la mise en service est prévue en 2024, transportera à terme un million de voyageurs par jour

**1- Utilisation d'une mini-benne sous les lignes à haute tension.**

**1- Use of a mini-grab under the high-voltage lines.**

et sera l'une des plus empruntées d'Île-de-France.

Le lot GC03 comprend la réalisation de 3 gares et 3 ouvrages annexes ainsi que le creusement de 4,1 km de tunnel entre la commune de Thiais à proximité de l'aéroport d'Orly (gare Pont-de-Rungis) et la commune de L'Haÿ-les-Roses (figure 3).

Les trois gares (Pont-de-Rungis, Porte-de-Thiais et Chevilly-Trois-Communes) et un ouvrage annexe (Alouettes) sont

excavés à l'abri de parois moulées, les deux ouvrages annexes restants (Petit-Le-Roy et Hochdorf) sont réalisés en méthode traditionnelle (cadres métalliques et béton projeté) couplée avec des injections d'étanchement pour minimiser les venues d'eau.

Le tunnel est foré à l'aide d'un tunnelier à pression de terre, nommé Claire (en hommage à Claire Merouze première femme pilote de chasse sur un Rafale).

## CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Le tracé s'inscrit dans le contexte géologique du Bassin Parisien, vaste cuvette, apparue au cours du Carbonifère et du Permien, dans laquelle se sont accumulées, au Mésozoïque et au Cénozoïque, des roches sédimentaires d'origines marine, lacustre, lagunaire ou fluviale sur environ 3000 m d'épaisseur. À partir du Miocène le réseau hydrographique actuel se met en place. Des soulèvements d'origine tectonique et l'érosion ont alors conduit à la mise à jour des formations les plus anciennes en périphérie du bassin tandis que subsistent au centre des formations plus récentes.

Le tronçon est couvert par les cartes géologiques au 1/50000<sup>e</sup> de Corbeil-Essonnes et de Paris (figure 4).

Les principales formations présentes le long du tracé du tunnelier sont des terrains sédimentaires de l'Oligocène à l'Éocène supérieur.

Les campagnes d'investigations géotechniques successives ont permis d'identifier la série lithostratigraphique type rencontrée le long du tracé (figure 5) :

- **Remblais (RB)** : matériaux hétérogènes, de consistance sableuse, localement avec des cailloux de taille variable.
- **Limons des Plateaux (LP)** : formation meuble de nature hétérogène et souvent remaniée, principalement composée de limons, accompagnés localement de cailloutis siliceux.
- **Calcaires de Brie et de Sannois (TB)** : succession de lits marno-calcaires blanchâtre, incluant localement des cailloutis calcaireux et siliceux de taille décimétrique.
- **Argile verte de Romainville et Glaises à Cyrènes (GV)** : argiles principalement constituées d'illite et de smectites, caractérisées par leur vert intense. Elles sont compactes, très plastiques et potentiellement gonflantes.
- **Marnes de Pantin (MP)** : marnes blanches au sein desquelles le développement d'une pression d'eau est possible malgré la portion argileuse et les faibles perméabilités retenues qui minimisent la possibilité d'une circulation d'eau.
- **Marnes d'Argenteuil (MA)** : marnes argileuses comprenant des bancs successifs de marnes bleues (ou brunes) feuilletées, compactes. La base de cet horizon est caractérisée par la présence de gypse sac-

charoïde. Leur forte teneur en argile les rend potentiellement gonflantes.

- **Marnes et Masses du Gypse (MFL)** : faciès gypseux qui comprend trois masses de gypse séparées par deux assises marneuses, qui n'ont pas pu être distinguées clairement le long du tracé.

Les nappes en présence sont les suivantes :

- **Nappe du Calcaire de Brie (Oligocène, TB)** : présente tout le long du tracé, en circulation vers le sud, caractérisée par une perméabilité de fracture amplifiée par la dissolution des Calcaires d'autant plus développée que la formation a subi des percolations et infiltrations d'eaux de surface. Sous recouvrement, elle est alimentée latéralement et par percolation des eaux au travers des formations superfi-

cielles. Les parties marneuses sont en revanche peu perméables.

- **Nappes de l'Éocène supérieur et moyen :**

- **Marnes de Pantin (MP)** : aquitard de faible perméabilité repo-

sant sur les Marnes d'Argenteuil, alimenté par la percolation des eaux à travers l'Argile Verte très peu perméable. Cette faible recharge explique la saturation partielle de la formation, avec un niveau piézométrique généralement inférieur à la cote du toit.

- **Masses et Marnes du Gypse (MFL)** : il s'agit de circulations d'eau dans la porosité de fracture et de dissolution de la partie rocheuse des Masses et Marnes du Gypse datées du Ludien. Les modes d'alimentation de la nappe (percolation des eaux à travers des Marnes d'Argenteuil, alimentation latérale), sa relation avec les formations aquifères sous-jacentes comme le Calcaire de Saint-Ouen et ses exutoires sont globalement mal connus.

2- Synoptique du prolongement de la Ligne 14 de la RATP au sud de Paris.

3- Vue en plan et profil en long géologique du lot GC03.

2- Block diagram of the extension of RATP Line 14 south of Paris.

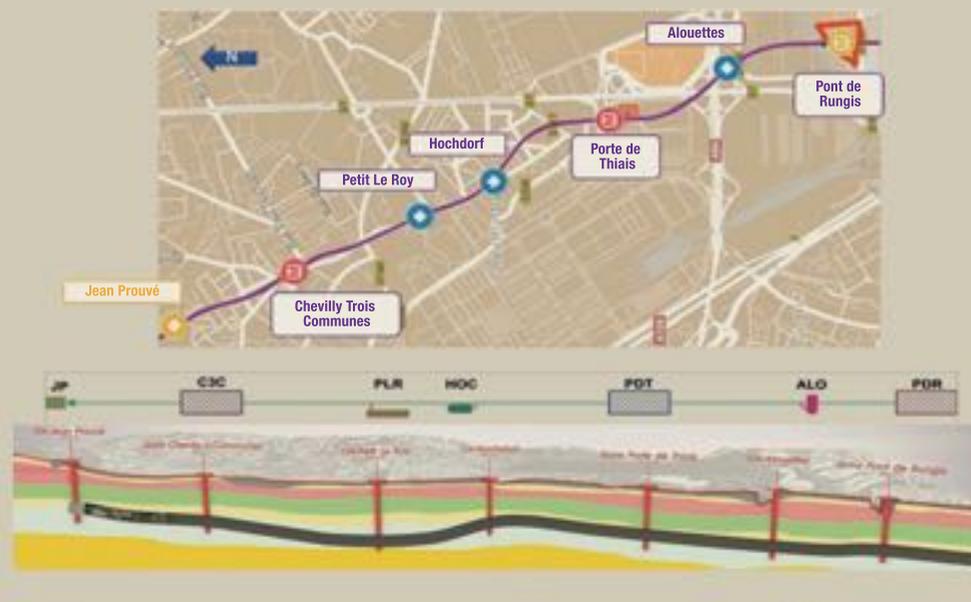
3- Plan view and longitudinal geological profile of work section GC03.

## SYNOPTIQUE DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 DE LA RATP AU SUD DE PARIS



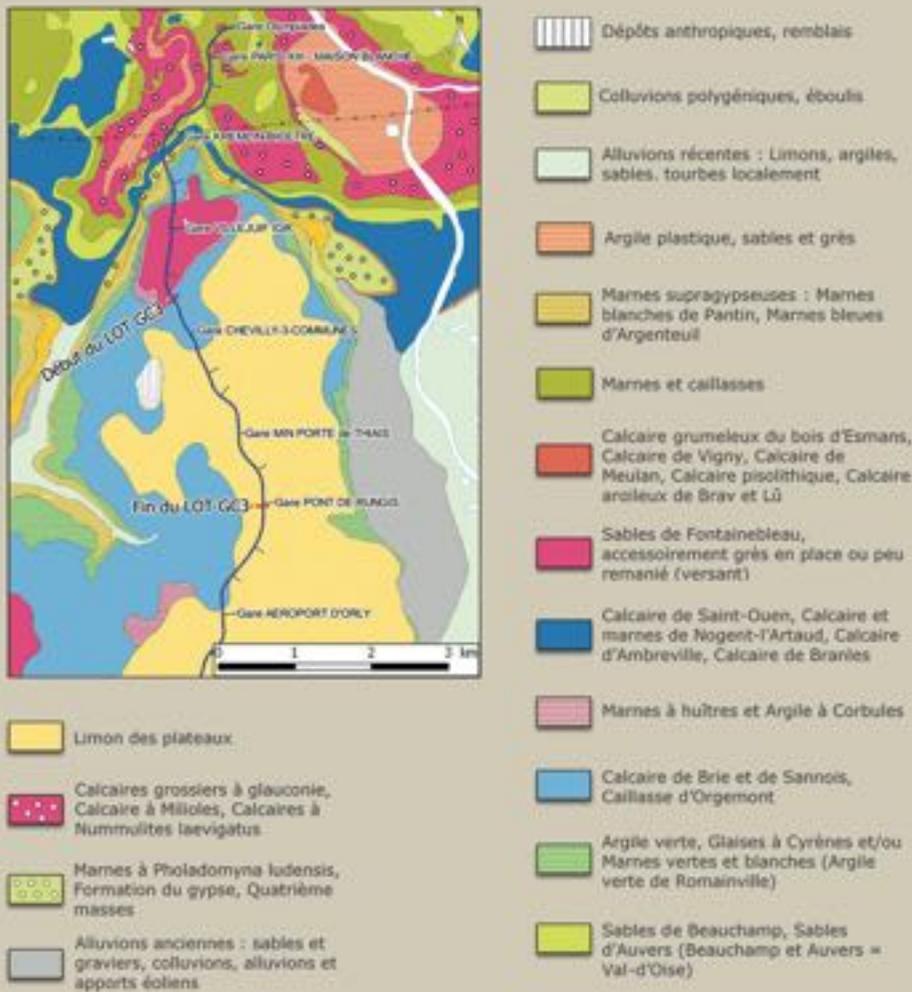
2 © RATP

## VUE EN PLAN ET PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE DU LOT GC03



3 © FAZEL-BEC

## EXTRAIT DE LA CARTE GÉOLOGIQUE HARMONISÉ AU 1/50 000° (BRGM)



4- Extrait de la carte géologique harmonisé au 1/50000° (BRGM).  
5- Coupe stratigraphique type au niveau du plateau d'Orly (BRGM).

4- Excerpt from the harmonised geological map to scale 1:50000 (BRGM).  
5- Typical stratigraphic section at the level of Orly plateau (BRGM).

## TRAITEMENT DU GONFLEMENT SOUS RADIER

Les radiers des gares Pont-de-Rungis (PDR), Porte-de-Thiais (PDT) et Chevilly-Trois-Communes (C3C) reposent sur les Marnes d'Argenteuil qui ont été qualifiées par le maître d'œuvre comme présentant un potentiel de gonflement élevé. La conception prévoit la mise en œuvre d'un vide sanitaire de 50 cm d'épaisseur.

## PHÉNOMÈNE DE GONFLEMENT DES ARGILES

Les conditions simultanées à réunir pour voir se développer le phénomène de gonflement de terrains argileux sont les suivantes :

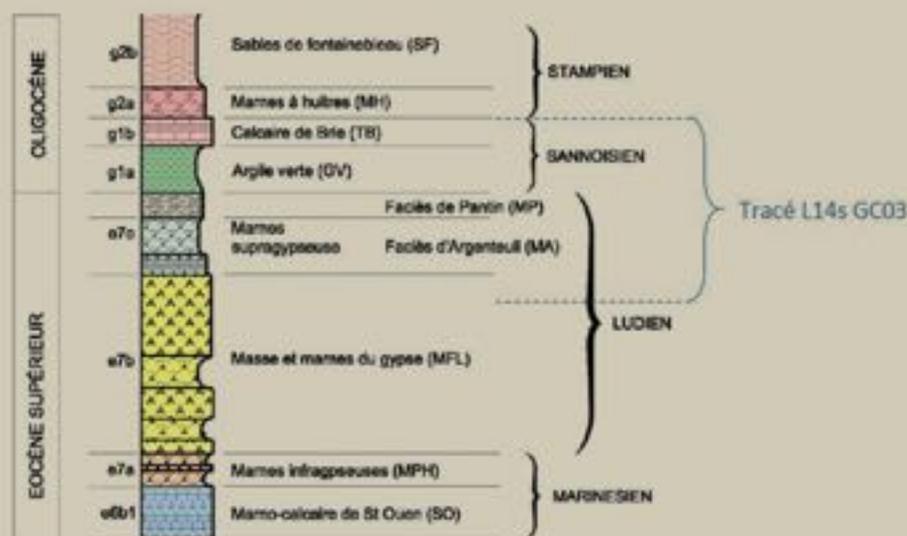
- Modification de l'état de contrainte - déchargement lié au terrassement ;
- Modifications des conditions hydriques - apport d'eau ;
- Une contrainte effective  $\sigma'_v$  inférieure à la pression de gonflement.

Une fois ces conditions réunies, les effets du gonflement dépendent des possibilités du matériau à se déformer. Si les déformations sont libres, alors il y a une augmentation du volume. Si les déformations sont bloquées, le gonflement se traduira par l'application d'une pression sur la surface qui s'oppose à sa déformation.

Pour les trois stations, les parois moulées sont ancrées dans les Marnes et Masses du Gypse et isolent les Marnes d'Argenteuil de la nappe superficielle des Calcaires de Brie (figure 6).

Sur le long terme, le relâchement des contraintes peut être un facteur susceptible d'initier une modification de la structure de l'argile et entraîner un gonflement par hydratation (phénomène de succion et d'imbibition de l'argile avec augmentation de la porosité et de la teneur en eau).

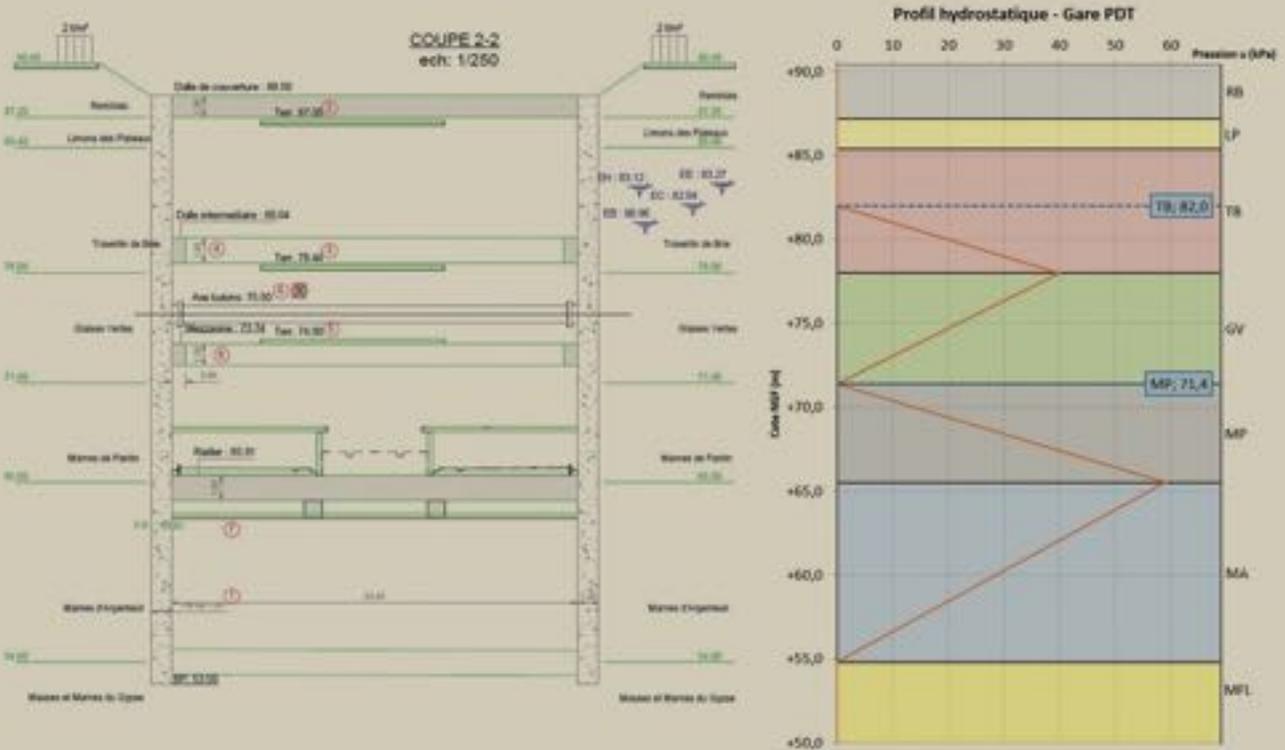
## COUPE STRATIGRAPHIQUE TYPE AU NIVEAU DU PLATEAU D'ORLY (BRGM)



© BRGM 4

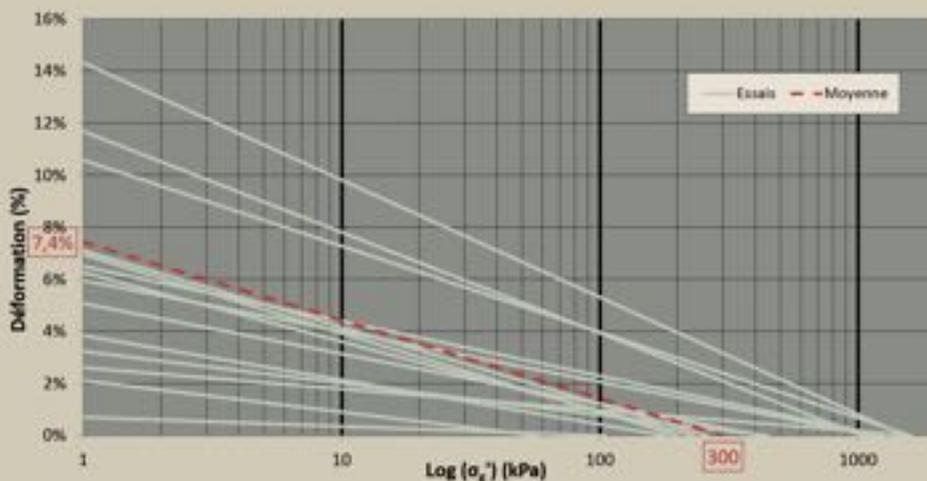
© BRGM 5

COUPE ET PROFIL HYDROSTATIQUE AU NIVEAU DE LA STATION PORTE-DE-THIAIS



6 © SEF-INTRAFOR & GEOS

COURBES DE GONFLEMENT DES MARNES D'ARGENTEUIL EN LABORATOIRE



7 © GEOS

6- Coupe et profil hydrostatique au niveau de la station Porte-de-Thiais.  
7- Courbes de gonflement des Marnes d'Argenteuil en laboratoire.

6- Cross section and hydrostatic profile at the level of Porte-de-Thiais Station.  
7- Swelling curves for Argenteuil marls in laboratory.

**CARACTÈRE GONFLANT DES MARNES D'ARGENTEUIL**

Lors des études de conception, les paramètres d'identification mesurés par essais en laboratoire ont mis en évidence le comportement gonflant des Marnes d'Argenteuil, avec un indice de plasticité élevé ( $I_p > 30$ ) et une forte argilosité (VBS proche de 6 et passant à 80  $\mu\text{m}$  supérieur à 90%). Ce caractère

gonflant a été confirmé par les essais de gonflement spécifiques à l'œdomètre et selon la méthode de Huder-Amberg. Après élimination des valeurs issues d'essais douteux, probablement réalisés sur des matériaux décomprimés, les paramètres de gonflement moyens suivants ont été retenus : rapport de gonflement  $R_G = 0,03$  et pression de gonflement  $\sigma_G = 300$  kPa (figure 7).

En considérant l'épaisseur de Marnes d'Argenteuil sous le fond de fouille, les calculs conduisent aux résultats suivants :

- Pression de 300 kPa pour un gonflement totalement bloqué ;
- Déplacement vertical de 30 cm pour un gonflement totalement libre ;
- Pression résiduelle de 0 kPa pour un vide de 50 cm.

**SOLUTION VIDE SANITAIRE MODULO**

La conception des gares prévoit un vide sanitaire de 50 cm, que le groupement a mis en œuvre avec un coffrage perdu de type Modulo. Il s'agit d'éléments en matière plastique appuyés sur le fond de fouille par des pieds, permettant de ménager un vide entre le fond de fouille et le radier. La surface d'appui



8a



8b



8c



8d

au sol des éléments est de 10% de la surface totale.

Par sécurité, le ferrailage des radiers a été dimensionné pour une sous-pression uniforme de 30 kPa, qui prend en compte à la fois la pression résiduelle de gonflement des terrains sous le radier après gonflement libre (0 kPa) sur 50 cm, et la charge apportée par la surface d'appui (30 kPa). La solution de vide sanitaire sur Modulo a ainsi permis de diviser d'un facteur 10 la sous-pression sous le radier, et de réduire de manière efficace son ferrailage.

Cette solution a été privilégiée à d'autres méthodes de coffrage, polystyrène ou carton notamment, pour son coût réduit et sa facilité de mise en œuvre.

#### MÉTHODE DE MISE EN ŒUVRE ET DIFFICULTÉS RENCONTRÉES

La mise en œuvre des coffrages Modulo est simple (figures 8a à 8d) : il suffit de les emboîter les uns aux autres sur une surface donnée. Les modules de coffrage n'étant pas symétriques, ils sont marqués d'une flèche pour indiquer le sens d'assemblage à respecter. Une fois l'ensemble des modules posé, un treillis soudé est mis en œuvre puis le béton est coulé et vibré.

Le système de coffrage perdu par Modulo permet ainsi d'obtenir un vide sanitaire sous une chape de béton munie de potelets, qui constitue une assise suffisamment résistante pour permettre le ferrailage et le coulage du radier dont l'épaisseur dépasse parfois 1,5 m.

Pour éviter les découpages et épouser la surface à recouvrir, des fermetures continues sont placées aux extrémités. Il s'agit de modules secondaires qui se glissent sous les modules principaux afin de pouvoir varier la distance jusqu'aux soutènements et refermer le coffrage. Avant la pose du treillis, ▷

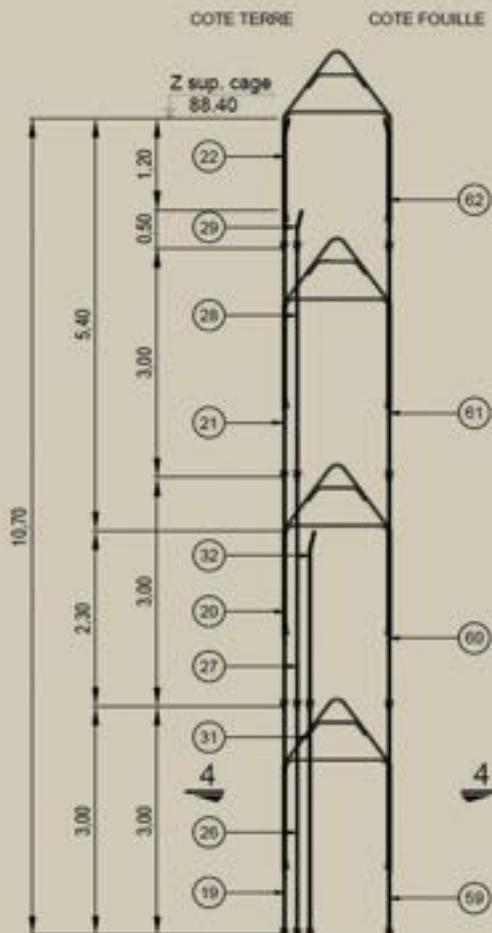
**8- Mise en œuvre des éléments de coffrage Modulo.**

**9- Cages d'armature manchonnées mises en œuvre en éléments de 3 m de hauteur au niveau de la gare Porte-de-Thiais.**

**8- Erection of Modulo formwork elements.**

**9- Sleeved concrete reinforcing cages installed in elements 3 m high at the level of Porte-de-Thiais Station.**

### CAGES D'ARMATURE MANCHONNÉES

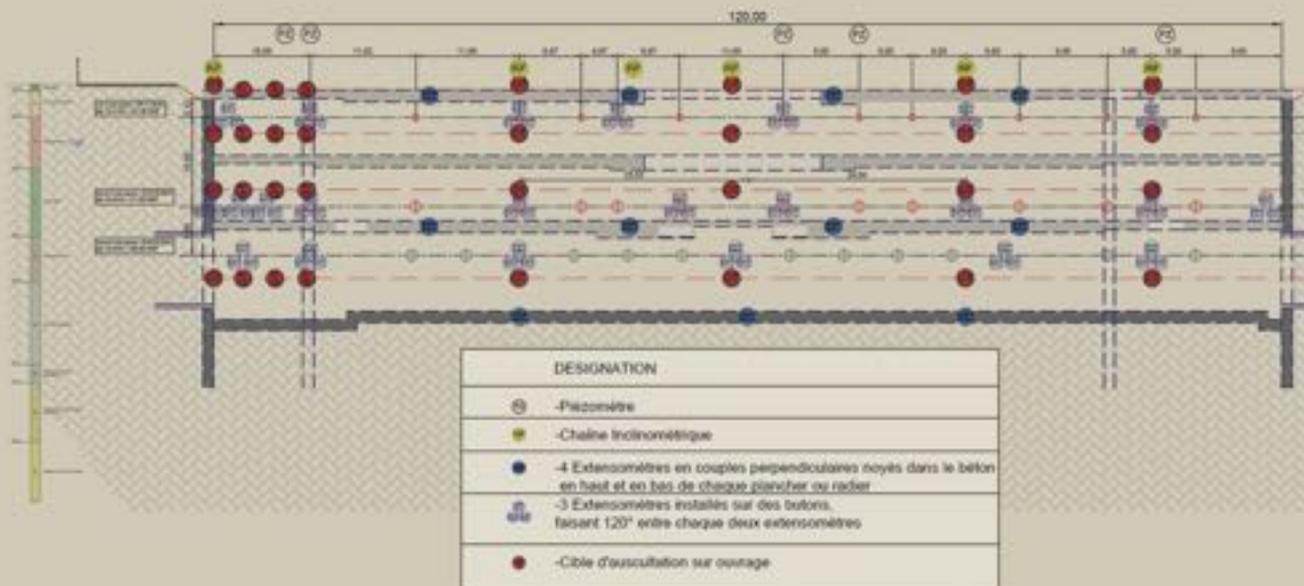


9a



9b

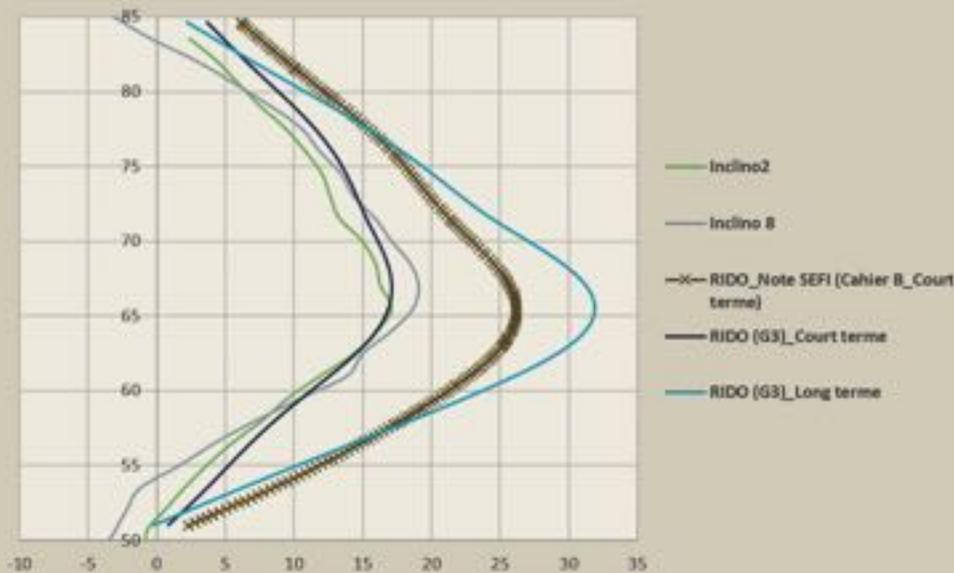
## PLAN D'IMPLANTATION DES AUSCULTATIONS DE LA BOÎTE GARE PONT-DE-RUNGIS



10

© FAZEL-BEC

## SUPERPOSITION DES DÉFORMÉES THÉORIQUES ET MESURÉES POUR UNE PAROI MOULÉE DE LA GARE PONT-DE-RUNGIS



11

© FAZEL-BEC

**10- Plan d'im-  
plantation des  
auscultations  
de la boîte gare  
Pont-de-Rungis.**

**11- Superposi-  
tion des déformées  
théoriques et  
mesurées pour  
une paroi moulée  
de la gare Pont-  
de-Rungis.**

**10- Layout plan  
for monitoring  
of the Pont-de-  
Rungis Station  
box.**

**11- Superposi-  
tion of theoretical  
and measured  
deformations for  
a diaphragm wall  
of Pont-de-Run-  
gis Station.**

les modules sont relativement vulnérables et des casses peuvent survenir, il convient donc d'éviter les passages intempéstifs sur les modules.

Pour la gare Pont-de-Rungis, les coffrages Modulo ont été posés en période humide (de janvier à mars) sans mettre en péril la mise en œuvre ou ralentir la cadence de pose, ce qui n'aurait pas été possible avec des coffrages perdus en carton, beaucoup plus sensibles à l'eau.

### GARE PDT - RÉALISATION DE PAROIS MOULÉES SOUS LIGNES À HAUTE TENSION

Un des risques principaux du chantier de la gare Porte-de-Thiais est l'électrocution ou l'amorçage des lignes RTE, présentes et couvrant la moitié de l'emprise. Il s'agit de lignes à très haute tension (225 000 V) qui assurent l'alimentation électrique de la plateforme aéroportuaire d'Orly. Une solution technique et matérielle adaptée à

cette contrainte a dû être déployée pour réaliser les parois moulées de 1,2 m à 1,5 m d'épaisseur jusqu'à 36 m de profondeur dans les meilleures conditions de sécurité.

Un plafond artificiel a été fixé à 8 m au-dessus du terrain naturel, grâce à un système LIDAR (Light Detection And Ranging) qui émet une alerte sonore en cas de franchissement de ce seuil. Les outils de forage classiques ont été adaptés à l'enjeu : la mini-benne de

forage ne fait que 3 m de haut et la flèche de la foreuse ne peut dépasser 6,70 m de haut (figure 1). Les palplanches et les cages d'armatures réduites en éléments de 3 m de long sont manutentionnées par une grue spécifique, dont la hauteur de travail maximale est entrée électroniquement par l'opérateur pour répondre aux exigences du site et à la hauteur à ne jamais dépasser. Ces adaptations des machines ont permis d'écarter le

facteur "risque humain" et de réaliser les parois moulées dans les meilleures conditions de sécurité.

Le ferrailage des parois a également été adapté à ces conditions particulières. La hauteur des éléments étant limitée à 3 m, des cages d'armatures manchonnées ont été privilégiées à une mise en œuvre classique avec recouvrement (figures 9a et 9b).

De même, de façon usuelle, des coupleurs sont placés dans les cages de parois moulées afin d'ancrer les dalles aux parois. L'architecture spécifique de la future station amène un cas peu ordinaire où un pan de paroi moulée sert de voile définitif entre les niveaux "accueil" et "dalle de couverture". La dalle niveau accueil vient ainsi faire le tour de la paroi, ce qui impose la mise en place de barres doublement manchonnées dans certaines cages des parois moulées. Les armatures de la dalle seront ainsi connectées via cette barre double manchonnée à travers la paroi moulée. Cette technique présente des avantages structurels, économiques et sécuritaires par rapport à la réalisation de scellements.

## GARE PDR - RETOUR D'EXPÉRIENCE DES MESURES DE DÉPLACEMENTS

Les mesures d'auscultation récoltées au cours de la construction de la première station du lot (Pont-de-Rungis) ont été exploitées et confrontées aux résultats théoriques. Cet exercice de rétro-analyse a permis de confirmer et fiabiliser les hypothèses de calcul retenues pour les trois stations du lot qui se situent dans un contexte géotechnique très similaire.

## INSTRUMENTATION DE LA STATION PDR

Afin de surveiller le comportement de la gare et des avoisinants, un important

dispositif d'auscultation a été mis en place au niveau de la station Pont-de-Rungis (figure 10), consistant notamment en :

- 10 inclinomètres automatisés installés dans les parois moulées ;
- 23 triplets d'extensomètres installés sur les butons - la mise en place de 3 extensomètres à 120° permet de s'affranchir des efforts parasites ;
- 22 couples d'extensomètres noyés dans le béton du radier et de chaque dalle - 1 couple en intrados et 1 couple en extrados ;
- 68 cibles d'auscultation installées sur les parois à l'avancement des terrassements - elles sont positionnées au niveau des inclinomètres afin de fiabiliser les mesures ;
- 8 piézomètres.

Ce dispositif est densifié au niveau du tympan nord pour tenir compte de l'interaction avec la gare RER existante.

## DES CALCULS THÉORIQUES SÉCURITAIRES

Le dimensionnement des parois moulées butonnées a été réalisé par des calculs aux coefficients de réaction à l'aide du logiciel Rido, qui fournit la déformée de la paroi et les efforts dans les appuis provisoires et définitifs. Les déformations induites à l'arrière de la paroi sur le bâti avoisinant sont ensuite vérifiées par calculs aux éléments finis. Le calcul de dimensionnement a été réalisé en considérant des paramètres non drainés (cohésion non drainée  $c_u$ ) dans les terrains à dominante argileuse jusqu'à la réalisation du radier, et vérifié avec des paramètres drainés (cohésion et angle de frottement effectifs  $c'$  et  $\phi'$ ). Un premier calcul a été réalisé avec le jeu de paramètres issus du cahier B, déterminé à partir des méthodes statistiques recommandées dans les Eurocodes. Les données complémentaires

issues de la campagne de reconnaissance réalisée dans le cadre de la mission d'exécution G3 ont ensuite permis de réévaluer à la hausse certaines caractéristiques géotechniques.

Les rétro-calculs ont fourni deux enseignements intéressants dans le cas de la gare Pont-de-Rungis :

- Les caractéristiques géotechniques initialement retenues dans le cahier B se sont révélées sécuritaires, déplacements calculés avec un déplacement maximum en ventre supérieur de 35 % à celui mesuré sur site

(figure 11). La prise en compte des caractéristiques pressiométriques améliorées issues de la campagne de reconnaissances G3 dans les rétro-calculs montre une cohérence entre les déplacements calculés et les déplacements mesurés.

- L'allure et l'amplitude de la déformée mesurée confirment le comportement non drainé des matériaux argileux pendant la durée des travaux (10 mois), ce qui est cohérent avec les retours d'expérience disponibles dans ce type de terrain. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**TUNNEL - TUNNELIER À PRESSION DE TERRE : 4,1 km**

**3 GARES : Pont-de-Rungis – M.I.N. Porte-de-Thiais – Chevilly-Trois-Communes – 18 à 26 m x 120 m x 27 m (fond de fouille) avec parois moulées de 1,2 à 1,5 m d'épaisseur ancrées à 37 m**

**3 OUVRAGES ANNEXES : ALOUETTES (ALO) – HOCHDORF (HOC) – PETIT-LE-ROY (PLR)**

- ALO : enceinte en paroi moulée avec un puits circulaire de 8,7 m de diamètre et 30,8 m de profondeur

- HOC et PLR : puits rectangulaires de 20 et 33 m de profondeur, excavés en méthode traditionnelle

**TERRASSEMENTS : 520 000 m<sup>3</sup> dont 250 000 m<sup>3</sup> issus du tunnel**

**BÉTON : 140 000 m<sup>3</sup>**

**ACIERS : 8 000 à 9 000 t**

**INSERTION PROFESSIONNELLE : 76 000 h (dont 20% dédiées aux PME)**

**EFFECTIF EN PIC D'ACTIVITÉ : 300 hommes x mois**

**DÉLAI DU MARCHÉ DE GÉNIE CIVIL : 63 mois (mars 2018 à juin 2023)**

**FIN DU CHANTIER : juillet 2022**

**MONTANT DU MARCHÉ : 362 M€**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE : RATP / Société du Grand Paris**

**MAÎTRISE D'ŒUVRE : Elios / Setec tpi / Systra**

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Razel-Bec (mandataire) / Eiffage Génie-Civil / Sefi-Intrafor**

**EXE GÉOTECHNIQUES (mission G3) : Geos Ingénieurs Conseils**

## ABSTRACT

### EXTENSION OF LINE L14 SOUTH OF PARIS - SWELLING UNDER INVERT AND DIAPHRAGM WALLS UNDER LOW CLEARANCE

PIERRE XEMARD, GEOS - AGNÈS SAGNIERE, RAZEL-BEC - THOMAS NOVALES, RAZEL-BEC

**Innovative technical solutions have been deployed on work section GC03 of Line 14 South.** For crawl spaces under inverts anchored in the Argenteuil marls, Modulo type formwork was preferred for its lower cost and ease of installation. Execution of the diaphragm walls for Porte-de-Thiais Station under a limited clearance required adaptation of the construction equipment and procedures. A crane with a short boom (6.70 m high), equipped with a mini-grab, was used and the concrete reinforcing cages were reduced to sleeved elements 3 m long. These arrangements, justified and implemented successfully, made it possible to optimise the conditions of project performance. □

### AMPLIACIÓN DE LA L14 AL SUR DE PARÍS - INFLADO BAJO LOSA DE CIMENTACIÓN Y PANTALLAS DE HORMIGÓN CON GÁLIBO REDUCIDO

PIERRE XEMARD, GEOS - AGNÈS SAGNIERE, RAZEL-BEC - THOMAS NOVALES, RAZEL-BEC

**Se han desplegado diversas soluciones técnicas innovadoras en el lote GC03 de la Línea 14 Sur.** Para los huecos sanitarios bajo losas de cimentación ancladas en las Marnes d'Argenteuil, se ha apostado por encofrados de tipo Modulo por su coste reducido y su facilidad de aplicación. La realización de las pantallas de hormigón de la estación Porte-de-Thiais bajo una altura limitada ha exigido una adaptación del material y los procedimientos de construcción. Se ha utilizado una grúa de flecha corta (6,70 m de altura) provista de un mini-volquete, y las jaulas de armadura se han reducido a elementos de 3 m de longitud empalmados. Estas disposiciones, justificadas y aplicadas con éxito, han permitido optimizar las condiciones de realización de la obra. □



1  
© YVES CHANOIT

# SÉCURISATION DU TUNNEL FERROVIAIRE DE MEUDON : RÉALISATION D'UNE GALERIE D'ÉVACUATION AU TUNNELIER

AUTEURS : NICOLAS KOLODKINE, RESPONSABLE ADJOINT AGENCE BESSAC ÎLE-DE-FRANCE - PIERRE GUERIN, INGÉNIEUR GEOS - YVES MÉNARD, RESPONSABLE AGENCE BESSAC ÎLE-DE-FRANCE

SITUÉE LE LONG DU TUNNEL FERROVIAIRE DE MEUDON, LA FUTURE GALERIE DE SECOURS DE 3,50 m DE DIAMÈTRE INTÉRIEURE ET DE 1 700 m DE LONG, EST DESTINÉE À L'ÉVACUATION DES VOYAGEURS DU RER C EN CAS D'INCENDIE. DES INSTALLATIONS RÉDUITES ET DU MATÉRIEL COMPACT ONT PERMIS D'IMPLANTER UN CHANTIER DE TUNNELIER ACCOLÉ AUX VOIES SNCF DANS UN ENVIRONNEMENT URBAIN TRÈS CONTRAINT. LE CHANTIER A ÉTÉ CONÇU POUR ÊTRE RÉALISÉ AU MOYEN D'UN TUNNELIER À PRESSION DE TERRE, DANS LA ZONE D'INFLUENCE DU TUNNEL FERROVIAIRE SNCF EXISTANT.

## PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Le tunnel de Meudon sur le RER C, situé entre les communes de Chaville et de Meudon, est un tunnel de 3363 m datant de 1901 qui présente la particularité de n'avoir aucune issue de secours.

À la suite de l'incendie du tunnel du Mont Blanc en 1999, l'ensemble des tunnels ferroviaires et routiers français a fait l'objet d'un inventaire. Le tunnel de Meudon fait partie des tunnels à

risques pour lesquels des travaux sont indispensables.

Les travaux ont pour objectif d'améliorer les conditions d'auto-évacuation des voyageurs en cas d'incident. Trois issues de secours sont en cours de réalisation (figure 2) :

- 2 issues constituées chacune d'un rameau de 30 m de longueur relié à une galerie réalisée au tunnelier sur 1700 m ;
- 1 issue constituée d'un rameau de 60 m de longueur relié à un puits

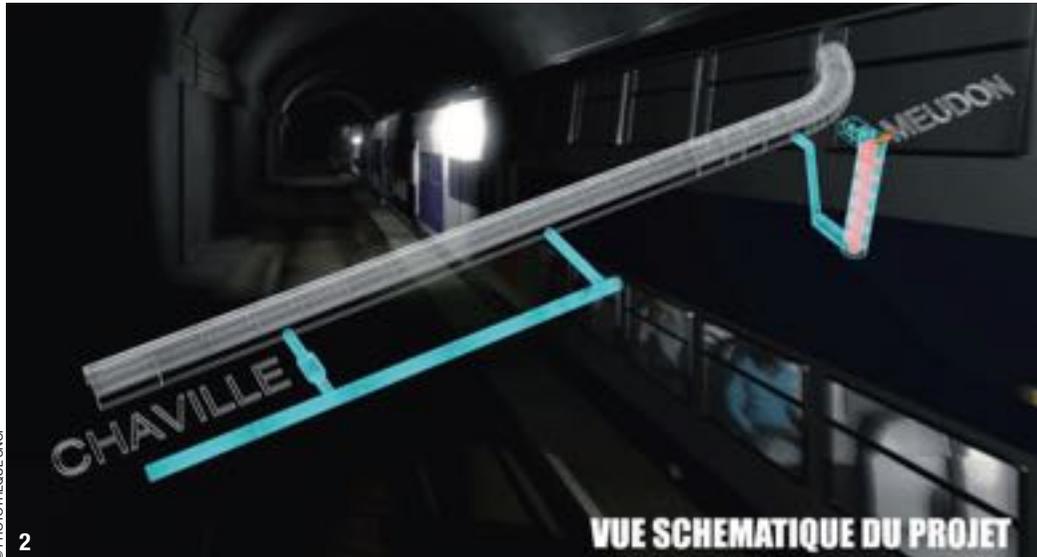
**1- Vue du site de démarrage - creusement au tunnelier.**

**1- View of the starting site - tunnel driving by TBM.**

de 8 m de diamètre et de 42 m de profondeur.

Ces travaux viennent en complément d'une première série de travaux comprenant :

- La réalisation de platelages pour faciliter le cheminement à pied dans le tunnel existant ;
- Les amorces des rameaux (figure 3), c'est-à-dire le renforcement du tunnel existant et le creusement des rameaux sur une longueur de 5 m depuis le tunnel.



© PHOTO THÉQUE SNCF

## CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Le tunnel de Meudon relie d'ouest en est les communes de Chaville et de Meudon en passant sous le plateau de la forêt de Meudon. Celui-ci présente une topographie marquée avec un dénivelé de plus de 80 m entre le sommet du plateau et les zones urbaines en têtes de tunnel.

Du point de vue structural, les formations sédimentaires tertiaires rencontrées dans la zone du projet sont affectées

2- Vue 3D du projet de sécurisation.

3- Vue sur l'amorce du rameau au PM1700.

2- 3D view of the safety improvement project.

3- View of the start of the connecting gallery at PM1700.

tées par le pli anticlinal de Meudon, dont l'axe de direction approximative Est-Ouest se trouve à environ 2 km au nord du projet.

Le secteur étudié est relativement proche du dôme anticlinal, ce qui explique l'épaisseur significativement réduite de la plupart des couches. Celles-ci présentent une morphologie marquée de larges ondulations au long du tracé du tunnel et leur pendage global est estimé à 7% orienté vers le sud dans cette zone (figure 4).

## CONTRAINTES PARTICULIÈRES

La galerie de secours vient s'inscrire dans un contexte particulier dans plusieurs domaines :

### → Profondeur de la galerie

La galerie se situe en grande partie sous une forte couverture liée au passage sous le plateau de la forêt de Meudon. En effet, la couverture, faible au départ, atteint rapidement plus de 80 m. Lors du creusement du tunnel existant, un effondrement s'est produit dans la partie centrale dans une zone où les formations imperméables supportant la nappe des Sables de Fontainebleau étaient de faible épaisseur, sous une forte charge hydraulique. Cet incident a généré un retard de plus d'un an sur la construction et a potentiellement perturbé les horizons traversés par le tunnelier dans ce secteur.

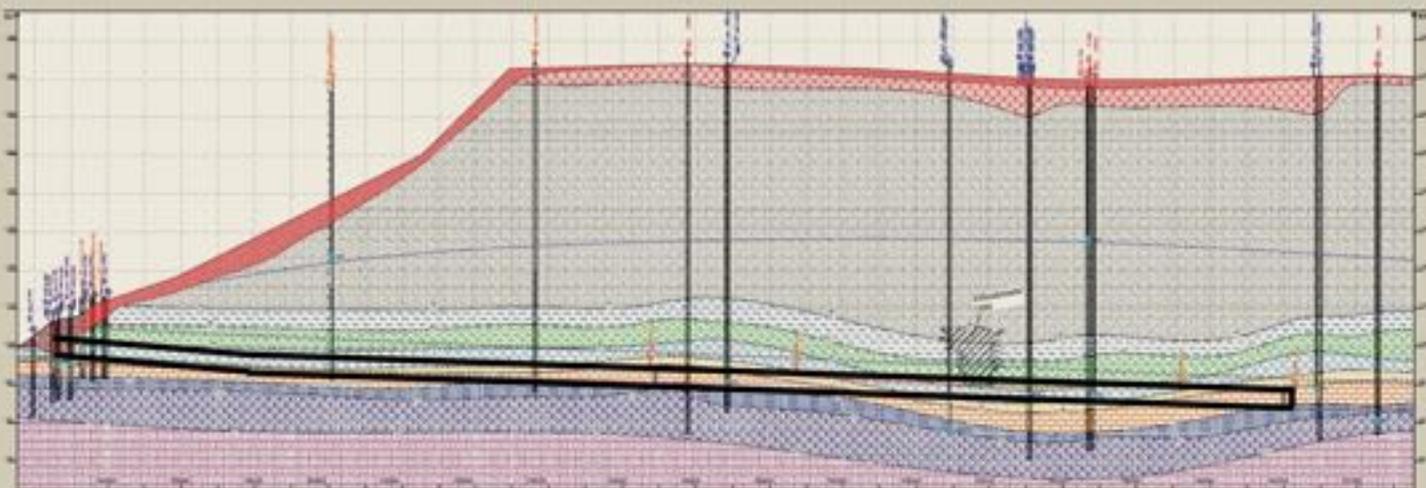
### → Zone de départ du tunnelier

Dans un contexte urbain dense au niveau des têtes du tunnel existant, il n'a pas été simple de définir une zone de départ pour le tunnelier. Le choix s'est fixé sur l'emprise SNCF autour de la tête côté Chaville, et en particulier sur le talus au sud des voies.



© PHOTO THÉQUE SOLE TANCHE BACHY

## PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE DU TRACÉ



4

© PHOTOTHÈQUE SNCF

Ce choix a conduit à mettre en œuvre toute une série de mesures de protection pour assurer la stabilité des nombreux avoisinants et garantir un démarrage du tunnelier dans de bonnes conditions.

### → Environnement global du chantier

La zone d'installation de chantier se trouve dans un secteur pavillonnaire en bordure de la forêt de Meudon, ce qui a nécessité l'application de procédures particulières visant à limiter les nuisances pour les riverains (mise en place d'écrans acoustiques, créneaux horaires spécifiques pour les camions, etc.).

### → Dispositions techniques spécifiques pour le démarrage du tunnel

Au niveau de la zone de démarrage du tunnel, les travaux préparatoires suivants (figure 5) ont été réalisés afin d'assurer la pérennité des ouvrages à créer ainsi que celles des ouvrages existants (tunnel du RER C, réseaux enterrés, bâtis voisins) :

- Écrans de pieux tangents pour confiner dans le volume entre écrans les tassements liés au creusement ;
- Ferrailage d'une partie des pieux qui ont servi de fondations à la dalle support de la zone de stockage des voussoirs et des déblais, car il n'était pas possible de faire du stockage au-delà de 1 t/m<sup>2</sup> au-dessus du tunnel existant ;

- Injection de traitement des remblais entre les réseaux enterrés et la galerie, au passage sous la rue Alexis Maneyrol, pour limiter les déformations au niveau de ces réseaux ;
- Paroi clouée pour réaliser la plateforme de démarrage du tunnelier.

Les techniques de soutènement mises en œuvre devaient s'adapter aux conditions du terrain mais aussi à l'environnement urbain dense : emprise à gabarit réduit, présence de réseaux et d'ouvrages sensibles.

### 4- Profil en long géologique du tracé.

### 5- Plan d'implantation des travaux préparatoires - zone de démarrage.

### 4- Longitudinal geological profile of the alignment.

### 5- Location plan of preparatory works - starting area.

## ÉCRANS DE PIEUX TANGENTS

La zone de départ de la galerie se situe à proximité du tunnel existant (environ 5 m entre les nus des ouvrages), en partie dans des remblais dont les caractéristiques mécaniques sont faibles.

Un écran en pieux tangents a donc été réalisé pour limiter l'influence du creusement de la galerie sur le tunnel existant et permettre au tunnelier de s'éloigner du tunnel existant.

Les pieux ont un diamètre extérieur de 400 mm, et une profondeur de 10 m

## PLAN D'IMPLANTATION DES TRAVAUX PRÉPARATOIRES

### Zone de démarrage



5

© PHOTOTHÈQUE SNCF

6- Vue de la réalisation de la paroi clouée.

7- Vue de dessus de l'emprise serrée du chantier à côté des voies SNCF.

6- View of execution of the soil-nailed wall.

7- Plan view of the cramped site premises alongside the railway tracks.



© PHOTO THÉQUE GEOS  
6

depuis le niveau de la plateforme. Compte tenu de la faible emprise disponible pour les installations de chantier et de la limitation de la charge de stockage au-dessus du tunnel existant, on a réalisé une dalle portée par une partie des pieux précédents.

Cette dalle a la particularité de présenter une partie en console importante vers le tunnel existant (5 m environ par rapport à l'axe des pieux les plus proches du tunnel).

#### INJECTION DE TRAITEMENT SOUS LES RÉSEAUX

Plusieurs réseaux enterrés étaient présents sous la voirie traversée par la galerie de sécurité (électricité, eau potable, gaz, assainissement). Pour limiter les déformations induites par le passage du tunnelier sous la voirie, une série de forages équipés de tubes à manchettes ont été forés afin d'injecter un coulis de ciment dans les matériaux situés entre les réseaux et la galerie.

Les travaux s'effectuant sur la chaussée, et comme il était nécessaire de passer sous les réseaux, les forages ont été réalisés selon plusieurs inclinaisons afin de garantir le traitement optimal.

#### PAROI CLOUÉE

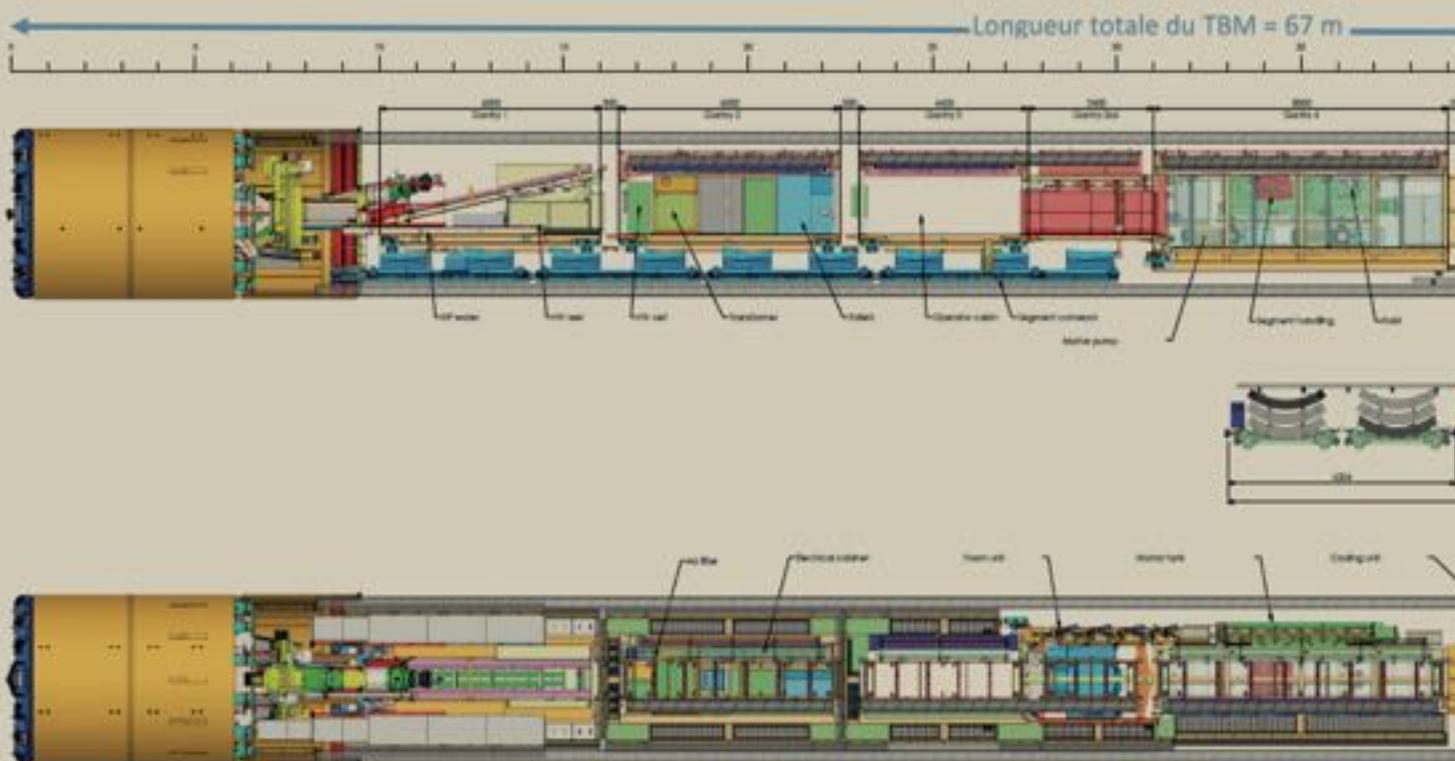
Une paroi clouée (figure 6) d'environ 8 m de hauteur et de 250 m<sup>2</sup> a été réalisée pour libérer un espace suffisant pour la plateforme de démarrage du tunnelier. Cette paroi est constituée de

clous HA 32 d'environ 7 m de longueur sur la face Sud (longueur limitée par l'emprise SNCF) et de clous en HA 32 et fibre de verre de 15 m de longueur pour la face Est. Les clous en fibre de verre ont été réalisés pour la section interceptée par le tunnelier car ils ont une très bonne résistance en traction mais très peu de résistance au cisaillement (donc facilement détruits par la roue de coupe au fur et à mesure du creusement).



© ALINE BOROIS  
7

## PLAN DU TUNNELIER



8

© PHOTOTHÈQUE BESSAC

### UN TUNNEL DANS UN MOUCHOIR DE POCHE

Les contraintes liées au site ont nécessité de trouver des solutions innovantes, tant dans la conception fonctionnelle et structurelle du tunnelier que dans la logistique du chantier.

Un coup d'œil sur l'emprise (figure 7) du site suffit pour comprendre les enjeux du chantier de construction de la galerie de secours du tunnel ferroviaire de Meudon.

Véritable mouchoir de poche, le site de lancement du tunnelier s'étend sur une parcelle de 1 370 m<sup>2</sup>, bordée à l'ouest par une forêt, au sud par une rangée d'habitations et au nord-est par les voies ferrées de la ligne du RER C et le tunnel ferroviaire de Meudon.

« Difficile d'imaginer l'installation d'un tunnelier mécanisé dans ces conditions-là. Il a donc fallu trouver des solutions pour optimiser le faible espace disponible. Ce projet était un vrai défi technique car le site de démarrage du tunnelier était très exigu et fortement contraint », commente Gilles Broll, le directeur de travaux du projet.

Aussi, dès le stade de la conception, les équipements du tunnelier ont été prévus afin de permettre le démarrage du creusement depuis une tranchée

ouverte de seulement 25 m de long et 8 m de large entre le talus de la paroi clouée à construire et la voie ferrée SNCF.

Issue de l'usine de fabrication de l'entreprise Bessac, basée près de Toulouse, le tunnelier certifié "Origine France Garantie", a pu ainsi être démarré en 1 mois et demi après la livraison des pièces sur le chantier.

Le tunnelier a été conçu pour démarrer en configuration courte avec la centrale hydraulique et l'enrouleur à câble

Haute Tension à l'avant de la machine. Le phasage de réalisation de montage du tunnelier a été réglé au cordeau par les équipes travaux afin de permettre l'assemblage des différents éléments de la machine depuis la phase de

### 8- Plan du Tunnelier.

### 8- Drawing of the TBM.

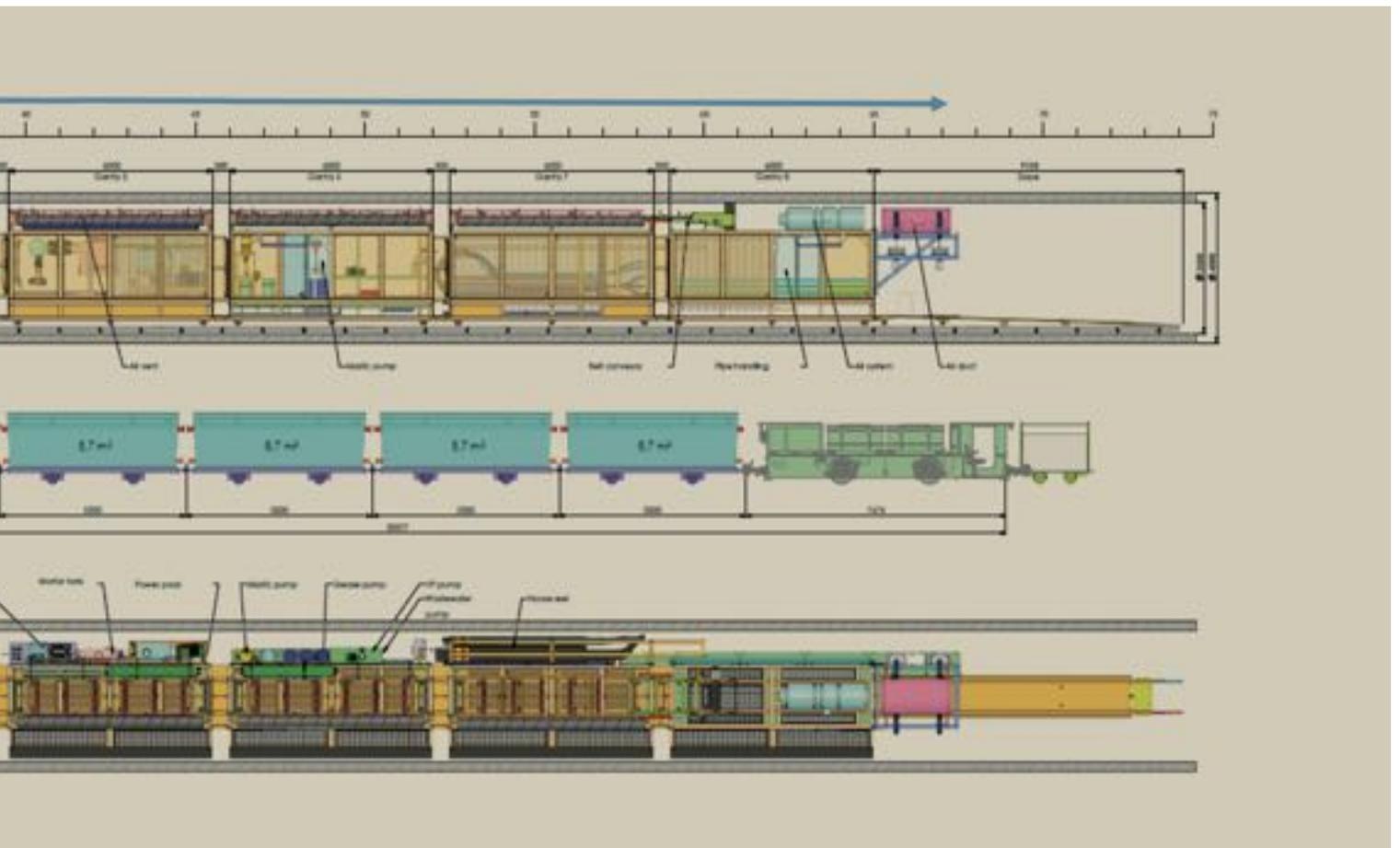
démarrage avec une seule remorque jusqu'à la mise en œuvre de la configuration de creusement définitive.

Parmi les choix techniques qui ont permis de réduire de plus de 30 % la longueur totale (67 m) du tunnelier (figure 8), on relève le choix du constructeur de positionner le poste de pilotage à l'intérieur de la cabine de survie, le développement d'un système de rallongement des servitudes compact à l'arrière du train suiveur, l'utilisation d'un mortier bi-composant permettant entre autre d'optimiser le nombre de wagons du train de marelage et l'intégration du sas à personnel dans la structure du bouclier frontal du tunnelier. Le tunnelier a été conçu en éléments d'un poids maximal compatible avec l'utilisation d'une grue de capacité maximale de 250 t.

L'ergonomie et les accès à l'intérieur du tunnelier ont également été optimisés afin de permettre le logement de l'intégralité des équipements nécessaires au bon fonctionnement de la machine. Un ensemble très compact a été installé afin d'optimiser l'occupation de l'espace disponible résiduel. En surface, le moindre m<sup>2</sup> de surface disponible a été utilisé par le chantier pour la création des zones de stockages des

## CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU TUNNELIER

- Tunnelier à pression de terre type EPB
- Diamètre de creusement : 4 280 mm
- Longueur du bouclier : 9,50 m
- Longueur du train suiveur : 57,50 m
- Longueur totale du tunnelier : 67 m
- Voussoirs : type universel / longueur 1,3 m / 5 + 1
- Couple maximal : 2 000 kN.m
- Poussée totale : 16 000 kN
- Pression de confinement : 4 bars
- Mortier injection : type bi-composant
- Rayon de courbure mini : R=250 m
- Démontable depuis un tunnel borgne



déblais et des voussoirs, l'installation des équipements annexes telles que la centrale de fabrication de mortier bi-composant, les cuves à air et autres ateliers mécaniques. Le choix du mortier bi-composant s'est aussi imposé pour ce projet afin de minimiser les emprises en surface pour l'installation

**9- Vue de dessus de l'installation réduite de chantier en surface.**

**9- Plan view of the small surface area of site facilities.**

de la centrale. Le stock de voussoirs sur le chantier est réduit à la production maximale journalière de 14 anneaux. La fosse à déblais présente un volume de 380 m<sup>3</sup> soit l'équivalent d'une journée de creusement.

Pour arriver à maintenir des cadences de creusement, il a donc fallu organiser

au plus juste la logistique des camions d'approvisionnement et d'évacuation des déblais, tout en respectant les règles strictes de circulation imposées par la ville.

La grue à tour desservant l'ensemble du site a été montée sur un massif de pieux à proximité de la zone de démarrage de la galerie pour faciliter le chargement/déchargement des bennes à déblais et les manœuvres d'approvisionnement en voussoirs, additifs, huiles, graisses et autres matériels de servitude nécessaires au fonctionnement du tunnelier (figure 9).

L'autre enjeu majeur du projet concernait le maintien du bien-être des riverains et la limitation des nuisances environnementales pouvant découler de la réalisation des travaux sur le chantier, notamment en termes de bruits et de vibrations. Conformément à l'étude "bruit" réalisée au début du projet, plusieurs dispositions ont été prises pour limiter au minimum les nuisances extérieures comme par exemple l'installation d'un écran acoustique de 4 m de haut et 60 m de long au niveau de la limite Est de la plateforme haute du chantier et l'arrêt complet du fonctionnement de la pelle, des camions et de la grue la nuit.



© PHOTOHÉQUE ALINE BORCOS



10

© PHOTOTHÈQUE BESSAC

Afin d'utiliser les engins dans les plages horaires dérangeant le moins possible les riverains, le groupement a retenu, pendant la réalisation du creusement, un fonctionnement du chantier à 2 postes de production du lundi au vendredi. En effet, un fonctionnement 24h/24 et 7J/7 aurait été incompatible avec les objectifs de limitation des nuisances compte tenu de la proximité des riverains et malgré toutes les dispositions envisagées et mises en œuvre (figure 10).

### AUX GRANDS MAUX LES GRANDS MOYENS

Le tracé du tunnel présentait au démarrage une courbe suivie d'une contre-courbe de façon à éloigner l'ouvrage à construire du tunnel ferroviaire construit à la fin du 19<sup>e</sup> siècle par assemblage de moellons. Après la phase de démarrage réalisée sur 35 m à l'abri de deux rangées de pieux sécants séparant les deux tunnels, la trajectoire prévue en courbe n'a pas pu être respectée : le tunnelier a continué à forer en ligne droite et a commencé à plonger au-delà de la pente théorique du tunnel soit -3,5% avec un accroissement jusque -4,3% sur quelques anneaux. Ce faisant, le tunnel en cours de réalisation s'est rapproché du tunnel ferroviaire existant jusqu'à une distance de 4,60 m au PM74 entre la roue de coupe et l'extrados du tunnel ferroviaire. Les solutions d'évitement classiques (rajout de vérin de poussée, utilisation de boue lourde pour alléger le bouclier, utilisation d'outils racleurs surdimensionnés) n'ayant pas montré leur efficacité, il a été imaginé de mettre en œuvre une solution originale consistant à exercer une traction de plusieurs centaines de tonnes sur une partie du bouclier tout en poussant avec les vérins de la machine situés à l'opposé de façon

à générer un couple de redressement important. Cette solution a été efficace et a permis de remettre le tunnelier sur la trajectoire appropriée.

Après prise en compte des caractéristiques du matériel disponible chez le prestataire Freyssinet pressenti pour son expérience en précontrainte et possédant des équipements rapidement disponibles, et recensement des espaces accessibles en tunnel, libres de servitudes/rails/gaine de ventilation/câbles d'alimentation, il est apparu que le seul endroit en tunnel suscep-

**10- Future galerie d'évacuation de diamètre intérieur 3,5 m.**

**11- Installation du vérin de traction à l'entrée du tunnel.**

**10- Future evacuation gallery of inner diameter 3.5 m.**

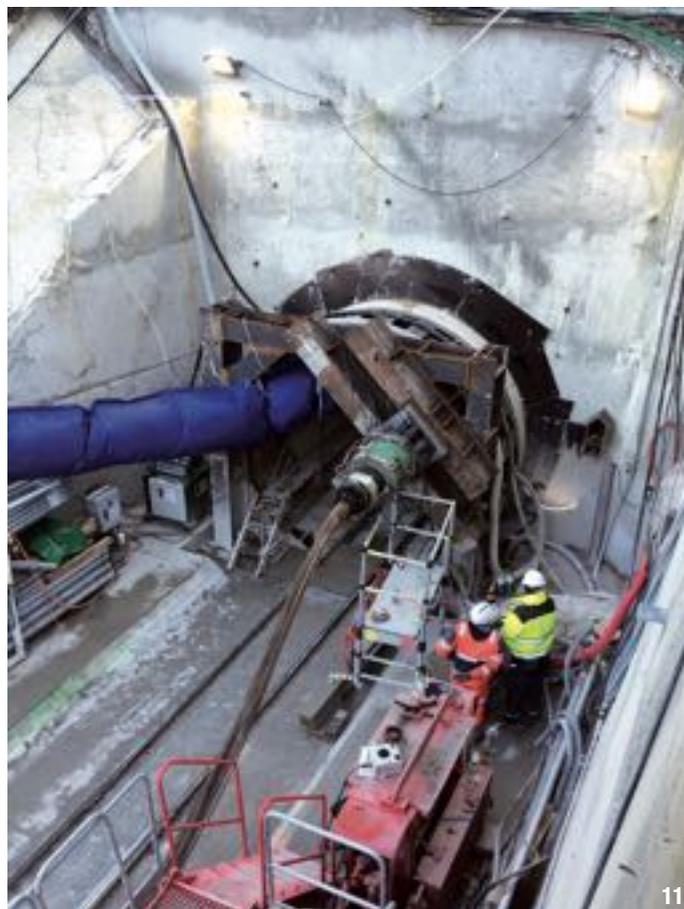
**11- Installing the tensioning jack at the tunnel entrance.**

tible d'accueillir les câbles de traction correspondait exactement à la zone du bouclier où il fallait exercer la traction soit en position horaire 2h.

Rapidement, le chantier et les bureaux d'études de Freyssinet et du constructeur Bessac ont convergé vers la solution innovante suivante :

- Mise en œuvre d'un faisceau de 19 torons et d'un vérin de traction HA400 de capacité 400 t et de course 280 mm (figure 11) ;
- Fixation côté tympan du tunnel d'un chevêtre support de vérin HA400 sur le bâti de poussée d'origine de la machine ;
- Fixation à l'autre extrémité, côté bouclier d'un bloc d'ancrage EV-19 des câbles sur une des chapes de vérin d'articulation (figure 12) ;
- Mise en place du faisceau de câbles en tunnel entre le bouclier et le vérin de traction ;
- Élaboration d'une procédure pour piloter le vérin de traction en étant en mesure d'exercer une traction constante tout en relâchant le vérin de 200 mm entre chaque regripage, de façon à ce que le bouclier progresse dans le terrain en étant soumis à des efforts poussée/traction constants ;
- Adaptation de l'érecteur permettant la pose de l'anneau de part et d'autre des câbles précontraints (figure 13).

Cette installation a été mise en œuvre sous trois semaines. Le système a ensuite prouvé son efficacité puisque la trajectoire a pu être infléchiée immédiatement dans la direction souhaitée. L'assistance au creusement par le dispositif de traction a été maintenue pour la pose d'un total de 25 m de revêtement. Le système a ensuite été démonté et le tunnelier a repris son fonctionnement nominal.



11

© PHOTOTHÈQUE BESSAC



12

**12- Installation du bloc d'ancrage dans le tunnelier.**

**13- Passage des torons à travers la jupe du tunnelier.**

**12- Installing the anchor block in the TBM.**

**13- Passing tendons through the TBM skirt.**



13

### ABANDON DE LA CHAUDRONNERIE EXTÉRIEURE

Ces derniers mois, le tunnelier Gaia a creusé selon un rythme soutenu de 270 m/mois en moyenne.

Le creusement de la galerie de secours devrait s'achever fin 2019, après 14 mois de creusement, quand le tunnelier atteindra le PM1700 du projet. La galerie de sécurité étant borgne, la chaudronnerie extérieure et la roue de

coupe seront abandonnées en fond de galerie et, après démontage, les autres équipements du tunnelier seront évacués par la galerie construite.

Hormis la roue de coupe et le bouclier, l'intégralité des équipements du tunnelier va faire l'objet d'un démontage minutieux à l'aide d'outils spécifiquement commandés pour l'opération. Ce phasage a été intégré dès la conception du tunnelier par le bureau d'études du constructeur.

Une série de travaux préparatoires dans le tunnel est nécessaire pour faciliter le recul des remorques du train suiveur et leur évacuation en dehors de la galerie. Dans l'ordre du démontage, le groupement envisage la dépose de l'érecteur, de la vis et des tubes de vis, la récupération des armoires électriques, des groupes hydrauliques, le repli de la motorisation complète de la machine (roulement et moteurs), ainsi que les vérins de poussée et d'articulations. Les éléments ainsi démontés sont ensuite restitués au fabricant qui pourra sans doute les réutiliser pour la remise en état d'un autre tunnelier aux caractéristiques approchantes. □

### PRINCIPALES QUANTITÉS

**LONGUEUR DE LA GALERIE : 1 690 m**

**QUANTITÉ DE DÉBLAIS : 24 500 m<sup>3</sup>**

**EMPRISE INSTALLATION DE CHANTIER EN SURFACE : 1 370 m<sup>2</sup>**

**RAMEAUX D'ACCÈS AU TUNNEL EXISTANT : 2**

**LOCAUX TECHNIQUES : 3**

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : SNCF réseau**

**MAÎTRE D'ŒUVRE : Ingérop Conseil et Ingénierie / Géos Ingénieurs Conseils**

**ENTREPRISE : Groupement d'entreprises Bessac / Chantiers Modernes Construction / Soletanche Bachy France**

### ABSTRACT

#### IMPROVING THE SAFETY OF THE MEUDON RAIL TUNNEL: EXECUTION OF AN EVACUATION GALLERY BY TBM

NICOLAS KOLODKINE, AGENCE BESSAC ÎLE-DE-FRANCE - PIERRE GUERIN, GEOS - YVES MÉNARD, AGENCE BESSAC ÎLE-DE-FRANCE

**This emergency gallery, designed to enhance rail-tunnel safety, is a structure 1,700 m long and of inner diameter 3.5 m. The structure, driven alongside the existing tunnel, will be able to facilitate the evacuation of passengers in the event of an incident in the tunnel built more than 100 years ago. It is executed by means of an Earth Pressure Balance TBM. Several special design and construction measures were needed before starting tunnel driving. □**

#### PROTECCIÓN DEL TÚNEL FERROVIARIO DE MEUDON: REALIZACIÓN DE UNA GALERÍA DE EVACUACIÓN CON TUNELADORA

NICOLAS KOLODKINE, AGENCE BESSAC ÎLE-DE-FRANCE - PIERRE GUERIN, GEOS - YVES MÉNARD, AGENCE BESSAC ÎLE-DE-FRANCE

**Diseñada para reforzar la seguridad del túnel ferroviario, la galería de emergencia es una construcción de 1.700 m de longitud y 3,5 m de diámetro interior. Perforada a lo largo del túnel existente, facilitará la evacuación de los viajeros en caso de incidente en el túnel, construido hace más de 100 años. Se ha llevado a cabo mediante una tuneladora de presión de tierras. El inicio de la perforación ha precisado varias disposiciones específicas en el diseño y la realización. □**



1

© GROUPEMENT ALLIANCE \ YVES CHANOIT

# RÉALISATION DU PREMIER TUNNEL DU GRAND PARIS EXPRESS ENTRE CHAMPIGNY-SUR-MARNE ET VILLIERS-SUR-MARNE

AUTEURS : JAMES HADDADI, CHARGÉ DES SERVICES GÉNÉRAUX, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION - VALÉRIE DROUOT, CHARGÉ D'AUSCULTATION, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION - DANIEL SOLHEID, DIRECTEUR TRAVAUX SOUTERRAINS, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION - MATTEO MANTOVANI, DIRECTEUR TECHNIQUE, PIZZAROTTI

L'OUVRAGE SOUTERRAIN EST UNE PARTIE DU LOT T2C DANS LE CADRE DU PROJET DE LA LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS. IL ÉTABLIT UNE LIAISON ENTRE LE SITE DE MAINTENANCE ET DE REMISAGE À CHAMPIGNY-SUR-MARNE ET LA LIGNE DE MÉTRO PAR L'OUVRAGE DE DÉBRANCHEMENT DE VILLIERS-SUR-MARNE. RÉALISÉ EN ZONE URBAINE, LE PROJET EST CARACTÉRISÉ PAR DES CONTRAINTES DE SITES EXIGUS ET LA PRÉSENCE D'OUVRAGES ET DE RÉSEAUX AVOISINANTS SINGULIERS LE LONG DU TRACÉ.

## DESCRIPTION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE

Le lot T2C consiste en la réalisation (figure 2) :

→ D'un tunnel foré de 4,70 km et de 8,70 m de diamètre intérieur, entre les gares de Noisy-Champs et Bry-Villiers-Champigny exclues ;

→ D'un ouvrage d'entonnement (environ 80 m en parois moulées et 90 m en excavation traditionnelle) permettant d'assurer le débranchement d'un tunnel depuis le tunnel de ligne principal (OA807) ;

→ D'un tunnel foré de 2,20 km et de 8,70 m de diamètre intérieur, entre

**1- Revêtement définitif et arrière du tunnelier.**

**1- Final lining and rear of the TBM.**

l'ouvrage d'entonnement du tunnel exploité (OA807) et le puits de lancement (OA813) attenant au Centre d'exploitation et de maintenance (CEM) exclu. Il s'agit de l'objet de l'article ;

→ De 7 ouvrages annexes circulaires de ventilation et d'accès pompier



© DR 2

(OA803/804/805/806/808/810/811) ;

- De rameaux de raccords entre les ouvrages circulaires et les tunnel forés ;
- De 2 ouvrages annexes (OA802 et OA813) servant de puits de lancement des tunneliers.

Deux tunneliers ont été mobilisés sur le chantier. Le premier nommé Steffie-Orbival a été lancé depuis l'ouvrage 813 et creusé jusqu'à l'ouvrage 807.

**2- Tracé du tronçon T2C.**  
**3- Voussoirs de revêtement.**

**2- Alignment of section T2C.**  
**3- Lining segments.**

Un second nommé Malala a été lancé de l'ouvrage 802 et continue en direction de la gare BVC. Il traversera l'ouvrage 807.

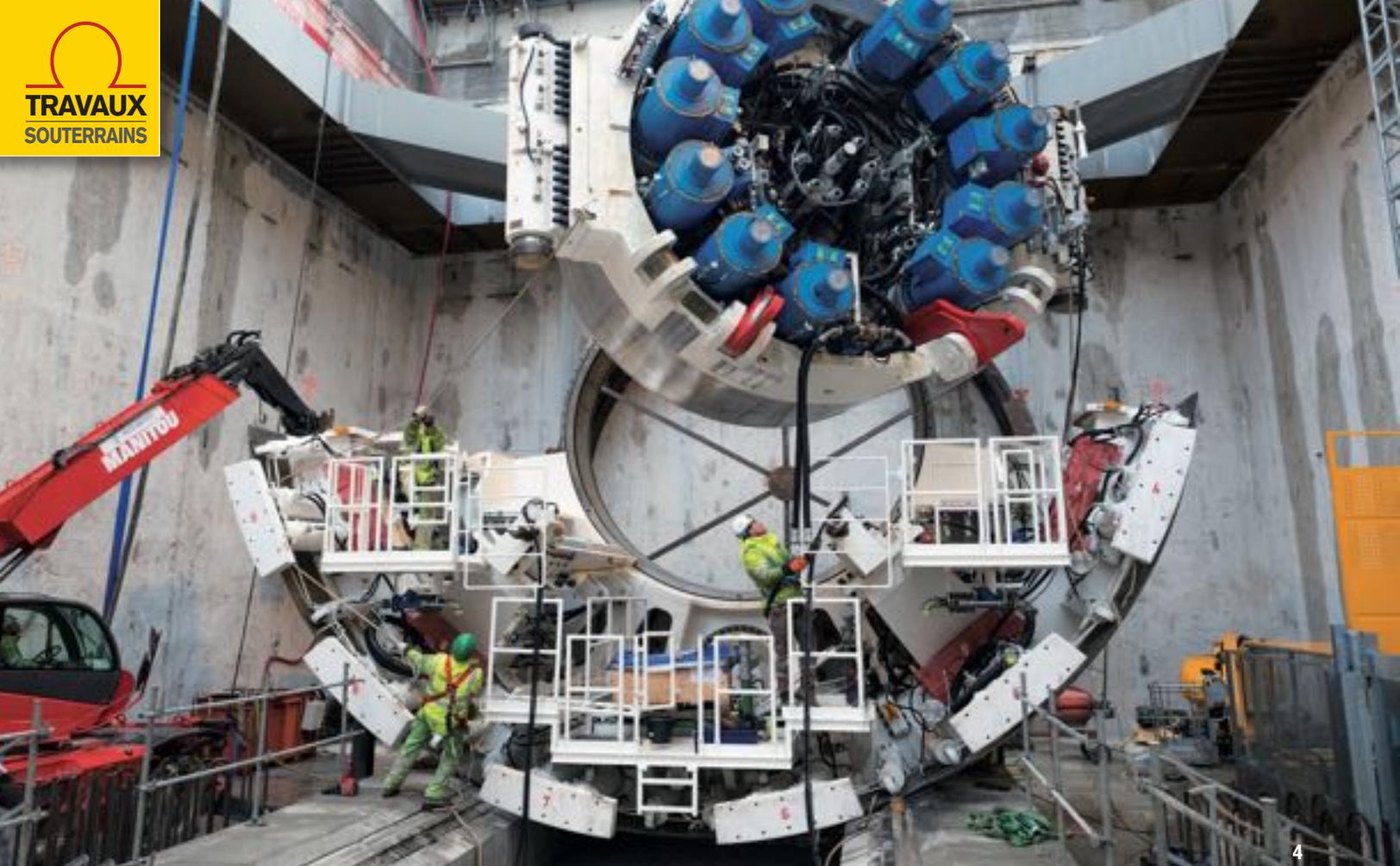
- Le tunnel dont il est question est entièrement en souterrain et il est situé à une profondeur comprise entre 10 m et 30 m mesurée en clé de voûte.
- Le point de départ du tunnel est un puits de section rectangulaire identifié par le n° 813 de dimen-

sions 20x45 m en plan et 20 m de profondeur.

- Le tunnelier est assemblé dans le puits et lancé dans le sous-sol en traversant l'une des parois moulées de 1,50 m d'épaisseur. La longueur du tunnelier de 106 m dépassant la dimension longitudinale du puits, le lancement du tunnelier est fait avec une configuration d'assemblage partiel qui est ensuite complétée après environ 100 m de creusement.
- Après avoir creusé suivant un tracé courbe ayant un rayon minimum de courbure en plan de 250 m, le tunnelier rejoint l'ouvrage d'arrivée, identifié par le n°807.
- Cet ouvrage, situé sur la commune de Villiers-sur-Marne (94) constitue l'ouvrage de débranchement entre le tunnel principal et le tunnel d'accès au CEM (entonnement de 170 m de longueur).
- Il comporte une partie réalisée à ciel ouvert, constituée d'un puits de section polygonale de dimensions longitudinale 80 m, transversale 20-35 m et de profondeur 35 m, et une partie réalisée en souterrain en raison de la présence d'avoisnants en surface.
- Cette partie souterraine, de longueur de 90 m environ, réalisée en méthode traditionnelle est aussi appelée "caverne", en raison de ses dimensions relativement grandes par rapport à celles du tunnel.



© GROUPEMENT ALLIANCE L'YVES CHANOIT 3



© GROUPEMENT ALLIANCE \ DEMATHIEU BARD, NGE, PIZZAROTTI, IMPLÉNIA

4

- Le revêtement du tunnel est réalisé à l'avancement par anneaux constitués de voussoirs préfabriqués en béton armé d'épaisseur 40 cm (figure 3). Chaque anneau est composé de 7 voussoirs. Les anneaux sont de longueur 1,5 m pour les parties du tracé en courbe de rayon réduit et de 2,0 m pour les parties droites ou de faible courbure.
- Des anneaux spéciaux ayant une armature renforcée sont aussi prévus pour les zones soumises à des sollicitations ou contraintes particulières, comme par exemple au droit des rameaux des connexions entre le tunnel et les ouvrages annexes.
- Les horizons géologiques traversés sont, du haut vers le bas, les Marnes d'Argenteuil et le Calcaire de Champigny, ce dernier étant prépondérant.
- Le Calcaire de Champigny est hétérogène et présente une alternance de faciès à prévalence marneuse et de faciès à prévalence calcaire, induré et silicifié par endroit.

#### DESCRIPTION DES CARACTÉRISTIQUES DU TUNNELIER ET ANALYSE DES CHOIX RETENUS

La présence quasi-systématique des deux couches géologiques sur le front d'avancement détermine une situation dite « de front mixte » qui constitue une difficulté majeure pour l'avancement. En effet les différents faciès géologiques nécessiteraient différentes techniques de creusement, soutènement et traitement du marin. Les dispositions

d'avancement doivent ainsi être calibrées afin de satisfaire au mieux les exigences diverses du front mixte, sans pouvoir, par la force des choses, optimiser les techniques d'avancement sur l'une ou l'autre couche sous peine de négliger les exigences de l'autre.

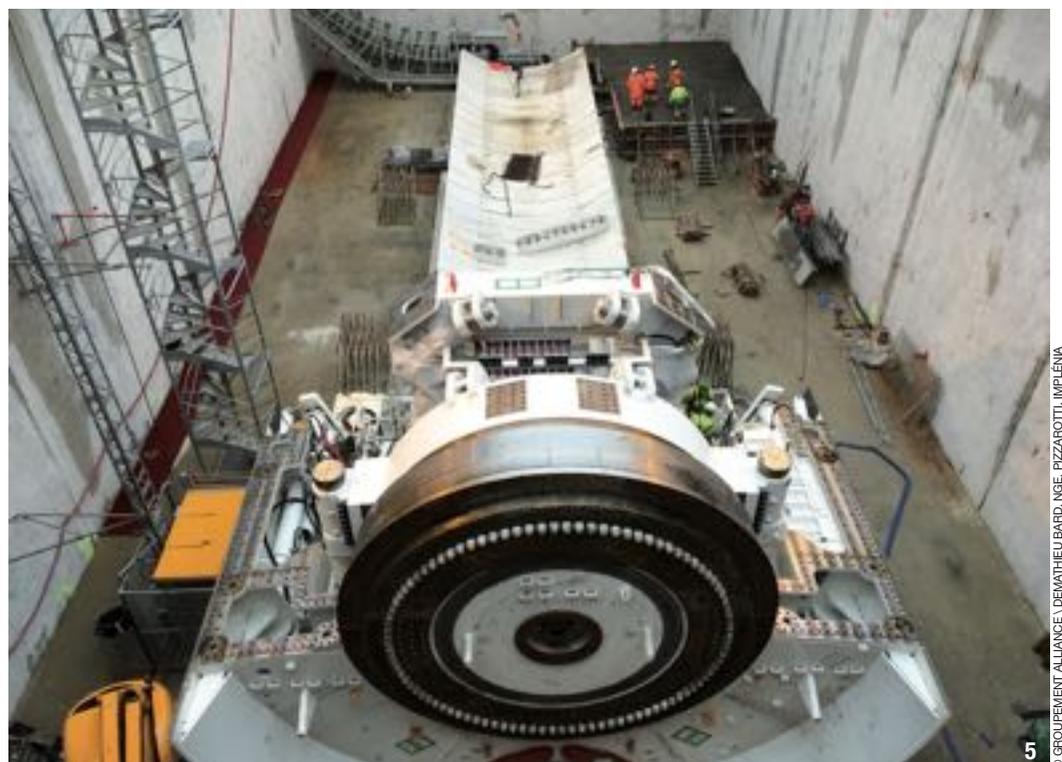
→ Le type de machine sélectionné est un bouclier à pression de terre de 9830 mm de diamètre et 7 100 mm de long, avec une jupe d'une longueur de 4500 mm (figures 4 et 5).

**4- Tunnelier en cours de montage.**

**5- Montage de tunnelier dans le puits d'attaque.**

**4- TBM undergoing assembly.**  
**5- TBM assembly in the entry shaft.**

- Les anneaux agencés en 6+1 voussoirs ont des diamètres extérieurs et intérieurs respectivement de 9,50 m et 8,70 m pour une largeur de 2 m (1,5 m pour les parties du tracé en courbe de rayon réduit).
- La roue de coupe de 9870 mm de diamètre est équipée de 27 molettes bi-disques, 8 molettes mono-disques et 134 couteaux. Son taux d'ouverture globale est de 28 %.



5

© GROUPEMENT ALLIANCE \ DEMATHIEU BARD, NGE, PIZZAROTTI, IMPLÉNIA



6

- Le système d'entraînement est composé d'un roulement sphérique orientable de 5000 mm de diamètre muni d'une motorisation électrique (11 x 350 KW) développant un couple de 17 988 kN.m.
  - 13 paires de vérins de 2800 mm de course permettent le creusement avec une force de poussée de 56 033 kN (à 350 bars).
- Deux options supplémentaires ont été ajoutées sur la machine :
- Mise en place d'un concasseur disposé à la sortie de la vis de marinage, la possibilité d'installation en

**6- Acheminement des voussoirs pour les phases de démarrage.**  
**7- Coupe transversale du tunnelier dans le puits d'attaque.**

**6- Transporting segments for the starting phases.**  
**7- Cross section of TBM in the entry shaft.**

fond de puits étant écartée du fait de son espace restreint. Le concasseur a une double utilité de concassage des roches et d'émiettage des blocs argileux.

- Installation d'une foreuse de reconnaissance type Doofoor DF550L sur un anneau de positionnement. Le bouclier comporte au total 13 passages inclinés en partie haute et basse et 2 passages horizontaux.

**MONTAGE**

La longueur disponible en puits de lancement était de 35 m. Cet espace

est très nettement inférieur aux dimensions requises pour assembler le bouclier et les deux premières remorques porteuses des organes essentiels au creusement et constitutifs d'un mode dégradé courant (~70 m). Un mode dégradé avancé a donc dû être mis en œuvre pour exécuter les 100 premiers mètres du tunnel. Pour ce faire il a été nécessaire de modifier la première remorque pour accueillir une partie des équipements électriques normalement embarqués sur la remorque 2 :

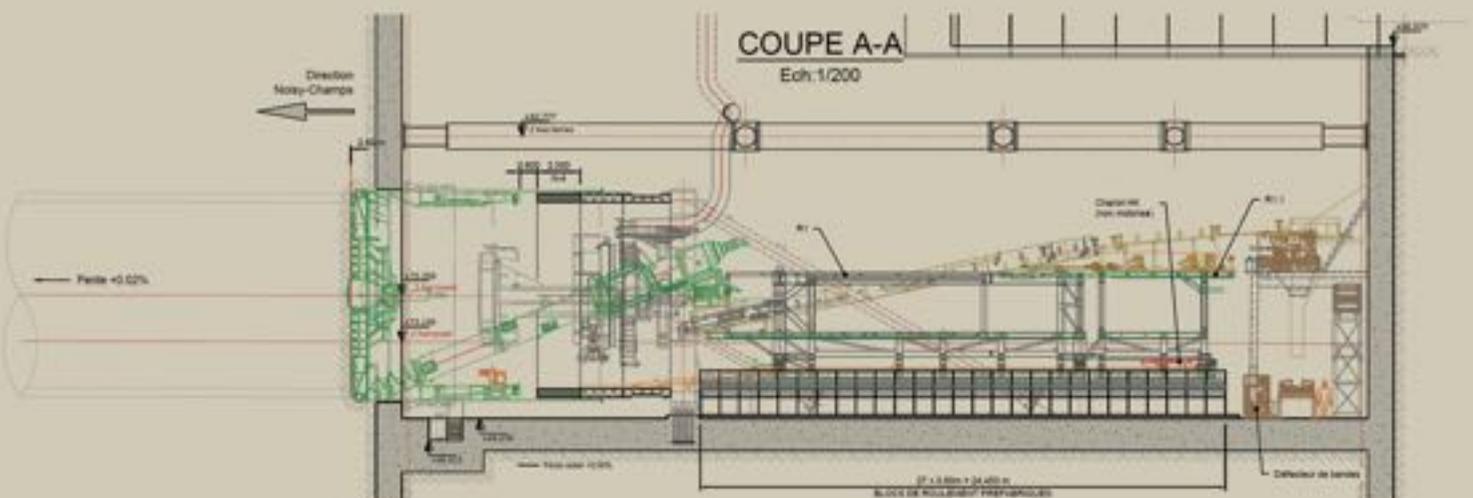
- La cellule d'arrivée de distribution 20 000 V, deux transformateurs de 400 V et 690 V respectivement et les armoires indispensables permettant d'alimenter les groupes hydrauliques, les pompes à mortier et 50% des moteurs de l'entraînement de la roue de coupe.
- Ainsi que le système de mousse pour conditionner le terrain.

Dans un second temps, la conception d'outils spécifiques divers supportant les fonctions absentes a été nécessaire. Durant la phase de creusement en mode dégradé la question de l'approvisionnement en voussoirs illustre particulièrement la part de méthodes chantier déployées dans un phasage de démarrage complexe :

**Creusement de 0 m à 2,60 m :**

- Installation de deux anneaux métalliques de 2,2 m et 2 m de large respectivement (~24 t chacun). Solution pour s'abstenir d'approvisionnement de voussoirs en béton pour les 4,2 premiers mètres du faux tunnel. ▷

COUPE TRANSVERSALE DU TUNNELIER DANS LE PUITS D'ATTAQUE





8

© GROUPEMENT ALLIANCE \ DEMATHIEU BARD, NGE, PIZZAROTTI, IMPLÉNIA

→ Stockage d'un premier anneau béton du faux tunnel sous la remorque 1, sur chariots provisoires. Cela implique une surcharge de 60 t sur la remorque compensée par des vérins entre le berceau de roulement et les chariots provisoires.

→ Après 2,60 m de creusement, pose du 1<sup>er</sup> anneau béton avec transfert vers l'érecteur à l'aide d'un treuil CMU 2T et remplacement des chariots provisoires par le chariot définitif sans motorisation (interface avec le convoyeur en fin de course).

#### De 2,60 m à 12,60 m :

→ Acheminement des voussoirs en bout de berceau de roulement par un monorail d'une capacité de 10 t sur une charpente métallique, puis transfert sur le chariot Herrenknecht via le monorail (figures 6 et 7).

→ Rallongement des rails supportant le chariot de 3,5 m puis chaque 2,0 m pour maintenir une fin de course sous le monorail.

#### De 12,60 m à 103,50 m :

→ Dépose des rallonges de chariot.  
→ Descente et montage d'une remorque provisoire conçue sur le chantier, la remorque R1.2 (8,55 m et 6,49 m) permettant en partie inférieure de remplacer le rôle du monorail au fur et à mesure de l'avancement. Le transfert entre le monorail et la remorque 1.2 étant effectué par un chariot motorisé supplémentaire.

À la suite du creusement des 100 premiers mètres, la remorque provisoire a été démontée et la remorque N°1 a été ramenée dans le puits afin de pouvoir être mise en configuration définitive avant d'être retirée dans le tunnel et connectée au tunnelier. Il a ensuite été

**8 & 9- Sortie en terre dans l'OA807.**

**8 & 9- Exit above ground in OA807.**

procédé au montage des trois autres remorques du train suiveur du tunnelier.

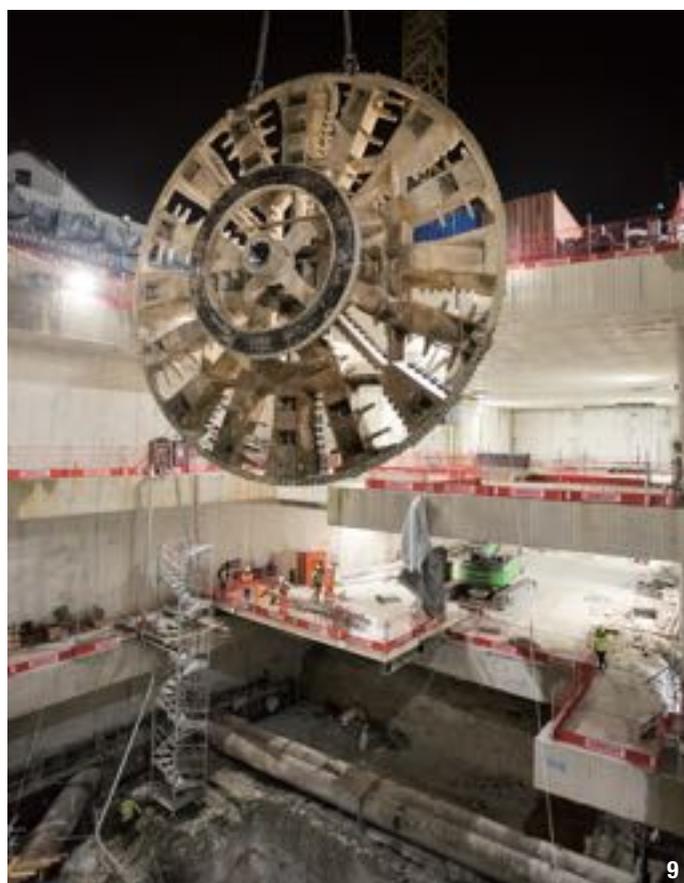
#### DÉMONTAGE

Le tunnelier est arrivé en terre dans l'ouvrage de débranchement OA807 de Villiers-sur-Marne après percement de la paroi moulée (figure 8). Pendant que le bouclier restait en attente du terrassement à ciel ouvert de l'ouvrage OA807 pour être gruté (figure 9), l'ensemble des remorques a été évacué vers le puits de lancement OA813 pour y être démonté.

Pour réaliser l'opération de recul des remorques sur les 2,2 km de tunnel, un système de ripage avec vérin et un calage des boggies a été mis en place. Ce système reprend le principe de déplacement d'une chenille :

- Deux vérins sont installés entre les ensembles R1/R1.1 et R2/R3/R4 ainsi que des cales en bois de chaque côté des boggies ;
- Les cales des boggies sont placées sur l'ensemble R1/R1.1, l'action des vérins pousse l'ensemble R2/R3/R4 de 2 m en direction du puits ;
- Les cales sont disposées sur le second ensemble et l'action des vérins tracte R1/R1.1 de 2 m en direction du puits.

Le pilotage du système de recul et le guidage des remorques ont été assurés par une pompe du groupe hydraulique de la R1. L'énergie électrique était fournie par un générateur installé sur la R4, ce qui a permis d'avoir un ensemble autonome.



9

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS \ CLAIRE-LISE HAVET



© GROUPEMENT ALLIANCE L'YVES CHANOT

10

### GESTION DES DÉBLAIS

Les formations géologiques excavées peuvent présenter, à l'état natif, des teneurs en métaux et substances dépassant les seuils réglementaires caractérisant les matériaux inertes.

On a rencontré notamment :

- Des sulfates, concentrés dans les Marnes Supragypseuses et Masses et Marnes du Gypse ;

**10- OA807 et voies du Réseau ferré national.**

**11- Bac de gestion des déblais.**

**10- OA807 and tracks of the national railway network.**

**11- Excavated material management container.**

- Des fluorures, présents sous la forme de minéraux accessoires au sein des argiles vertes ;
- Des métaux lourds (sélénium, molybdène et antimoine) que l'on a rencontrés de manière ponctuelle dans l'ensemble des formations.

Les déblais du chantier sont gérés comme des déchets et évacués vers les filières de valorisation ou de stockage

adéquates. Cette politique d'engagement environnemental est appuyée par une obligation contractuelle de caractérisation des marins du tunnelier par mailles de 500 m<sup>2</sup>.

Le temps de caractérisation étant de 5 jours, l'un des enjeux du projet était l'aménagement de 12 bacs dédiés au stockage tampon des déblais le temps de l'analyse des échantillons par un laboratoire Cofrac pour chaque maille. Ces bacs ont été réalisés en palplanches selon une géométrie de forme camembert, chacun des bacs, d'un volume de 489 m<sup>3</sup>, étant desservi par un empileur rotatif. Le cumul de l'évacuation des marins a représenté 421 150 t avec un pic journalier à 6000 t (figure 11).

### L'AUSCULTATION (EN LIEN AVEC LES VOIES SNCF)

Le tunnelier a réalisé 386 m d'avancement dans la Zone d'Influence Géotechnique du Réseau Ferré National (RFN).

Le tracé longe la ligne SNCF "Paris - Mulhouse" en exploitation, 206 trains (RER E et Intercités) circulent quotidiennement sur cette ligne à une vitesse maximale de 140 km/h (figure 10). Lors de l'avancée du tunnelier dans cette zone, la vitesse de circulation des trains a été réduite à 100 km/h.

Un système dense d'auscultation a été installé sur les rails SNCF, un an avant les travaux d'excavation, reposant sur la mise en place de prismes optiques, ▷



© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS / CÉDRIC EMERAN

11

espacés de 3 m sur chaque fil de rail, avec acquisition automatique des données par cycle de 20 minutes.

La pression de confinement préconisée lorsque les voies SNCF sont à l'aplomb du creusement était de 2,5 bars en raison de la tolérance de seulement 5 mm de tassement sur certains ouvrages (ponts rails).

Toutefois, cette pression élevée induit également un risque de soulèvement des rails.

Afin d'assurer une atteinte graduelle de cette pression en maîtrisant les déformations en surface, un découpage de zones de 20 m avec mise en place d'une méthode observationnelle a été réalisé.

L'analyse, sur chaque zone, des paramètres de creusement tels que : pression de confinement en fonction du temps, pressions et volume de mortier injecté à chaque anneau, masse de terrain excavée confrontée aux mouvements observés sur le réseau SNCF, a rendu possible l'augmentation de la pression de confinement passant de 1,1 à 2,5 bar en 100 m avec une maîtrise des déformations observées sur le réseau SNCF.

Outre les valeurs brutes des déformations observées, l'enjeu pour l'exploitant ferroviaire est l'actualisation du système ainsi que le taux de données par portion. Le suivi minimal toléré par la SNCF est de 70 % de visée par zone possible de 15 m et par voie.

Pour pallier l'encrassement naturel lié au souffle des trains, phénomène accentué dans cette zone d'accélération et décélération correspondant à l'arrivée en gare, des maintenances ont eu lieu chaque nuit pendant un mois sous consignation du trafic ferroviaire. Des capots ont été placés sur



12

© GROUPEMENT ALLIANCE \ DEMATHIEU BARD, NGE, PIZZAROTTI, IMPLÉNIA

les cibles de références afin de limiter les effets de condensation en hiver. Ces différents moyens ont permis d'élever le taux de visée journalier à plus de 80 % en moyenne, en conformité avec les exigences de la SNCF (figure 12). En sus, afin de se prémunir de toute panne matérielle des stations robotisées lors des périodes d'exploitation SNCF, les stations ont été disposées en tandem : deux stations jumelles sont programmées pour être capable de viser les mêmes 100 prismes mais chacune n'en vise effectivement que 50 afin d'assurer des cycles courts. En cas de perte de l'une des stations, sa jumelle vise la totalité de la zone en mode dégradé avec un cycle abaissé à 40 min. □

**12- Station totale de mesure.**

**12- Measuring total station.**

## PRINCIPALES QUANTITÉS

- 1 500 000 t de déblai
- 170 000 m<sup>3</sup> de béton
- 11 100 kg d'acier
- 25 186 voussoirs de revêtement

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Société du Grand Paris

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Systra

**GROUPEMENT CONJOINT D'ENTREPRISES :**

Demathieu Bard Construction (mandataire) / Nge / Pizarrotti / Implenia

## ABSTRACT

### CONSTRUCTION OF THE FIRST TUNNEL FOR THE 'GRAND PARIS EXPRESS' PROJECT BETWEEN CHAMPIGNY-SUR-MARNE AND VILLIERS-SUR-MARNE

JAMES HADDADI, DEMATHIEU BARD - VALÉRIE DROUOT, DEMATHIEU BARD - DANIEL SOLHEID, DEMATHIEU BARD - MATTEO MANTOVANI, PIZZAROTTI

The underground tunnel is part of work section T2C, included in the project for Line 15 South of the 'Grand Paris Express' metro project. It establishes a link between the maintenance and storage facility in Champigny-sur-Marne and the metro line via the Villiers-sur-Marne shunting tunnel. The project, carried out in an urban area, is characterised by constraints due to the cramped space on the sites and the existence of singular adjacent engineering structures and networks along the route. In particular, due the cramped space in the starting shaft, 35 metres long, i.e. shorter than the TBM, assembly has to be performed sequentially, moving forward in degraded mode over the initial lengths. □

### REALIZACIÓN DEL PRIMER TÚNEL DEL GRAND PARIS EXPRESS ENTRE CHAMPIGNY-SUR-MARNE Y VILLIERS-SUR-MARNE

JAMES HADDADI, DEMATHIEU BARD - VALÉRIE DROUOT, DEMATHIEU BARD - DANIEL SOLHEID, DEMATHIEU BARD - MATTEO MANTOVANI, PIZZAROTTI

La obra subterránea es una parte del lote T2C del proyecto de la Línea 15 Sur del Grand Paris Express. Establece un enlace entre el área de mantenimiento y apartadero en Champigny-sur-Marne y la línea de metro a través del elemento de desconexión de Villiers-sur-Marne. Realizado en zona urbana, el proyecto destaca por las restricciones que imponen la exigüidad de los emplazamientos y la proximidad de construcciones y redes específicas a lo largo del trazado. En particular, la exigüidad del pozo de salida, cuya longitud (35 m) es inferior a la de la tuneladora, ha exigido un montaje secuencial y un avance a velocidad mínima en los primeros tramos. □

# PRO BTP LE MEILLEUR DE LA PROTECTION SOCIALE

SANTÉ  
PRÉVOYANCE  
ASSURANCES  
RETRAITE  
ACTION SOCIALE  
VACANCES



**PRO BTP**  
GROUPE



© BOUYGUES TP - RAZEL BEC - EIFFAGE - SEFI INTRAFOR

# RER EOLE : CONCEPTION ET RÉALISATION DE LA GARE PORTE-MAILLOT DANS UN MILIEU SOUTERRAIN TRÈS DENSE

AUTEURS : BENOIT BERTRAND, DIRECTION TECHNIQUE, EGIS - SOPHIE YEM, RESPONSABLE TRAVAUX, EGIS - PHILIPPE PATEAU, DIRECTEUR DE PRODUCTION, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

**LA NOUVELLE GARE PORTE-MAILLOT D'EOLE, RÉALISÉE DANS LE CADRE DU PROLONGEMENT DU RER E VERS L'OUEST, CONSTITUE UN OUVRAGE EXCEPTIONNEL DE PAR SES DIMENSIONS, LE CONTEXTE URBAIN DENSE DANS LEQUEL IL S'INSÈRE, ET LES CONTRAINTES IMPOSÉES POUR LA MAÎTRISE DES DÉPLACEMENTS DES OUVRAGES AVOISINANTS.**

## INTRODUCTION

La Ligne E du RER d'Île-de-France est en cours de prolongement vers l'ouest afin d'améliorer la desserte du quartier d'affaires de La Défense et des territoires à l'ouest de la capitale.

Le prolongement se fait en partie par création d'une infrastructure souterraine neuve en souterrain dans Paris, depuis la gare terminus actuelle d'Hausmann-Saint-Lazare (HSL), jusqu'à la gare de Nanterre-La-Folie, pour un linéaire total d'environ 8 km réalisé pour la plus

grande partie au tunnelier. La poursuite du prolongement jusqu'à Mantes emprunte les voies ferrées existantes réaménagées pour accueillir le nouveau RER E (figure 2).

L'infrastructure souterraine neuve s'accompagne de la création de trois gares nouvelles, deux en souterrain (gare Porte-Maillot objet du présent article, et gare CNIT - La Défense) et une gare aérienne (gare Nanterre - La Folie). L'architecte des deux gares souterraines est Jean-Marie Duthilleul. Il en

assure la maîtrise d'œuvre en groupement avec Setec et Egis, qui ont également en charge l'ensemble des ouvrages souterrains du projet (tunnel, puits, entonnement). La conception s'est développée sur les années 2012 à 2015 et l'année 2016 a été consacrée à la finalisation de la contractualisation des marchés de travaux. Le marché comprenant le tunnel foré au tunnelier et la gare Porte-Maillot a été confié au groupement Bouygues Travaux Publics - Razel Bec - Eiffage - Sefi Intrafor ; il a

**1- Vue depuis le chantier vers l'ouest et Neuilly-sur-Seine.**

**1- View from the worksite toward the west and Neuilly-sur-Seine.**



Les formations reconnues au droit de la gare Porte-Maillot sont décrites ci-après :

- Une couche de remblais anthropiques d'une épaisseur d'environ 4 m ;
- Des Marnes et Caillasses (MC) sur une épaisseur de 5 à 7 m ;
- Des Calcaires Grossiers (CG) d'épaisseur 12 à 14 m ;
- Les Sables Supérieurs (SS) sur 15 m d'épaisseur environ. C'est dans cet horizon que se situe le radier de la gare ;
- Les Fausses Glaises (FG), de 7 m d'épaisseur ;
- Les Sables d'Auteuil (SA), couche de 2 m d'épaisseur difficilement différenciable des Fausses Glaises sus-jacentes ;
- Les Argiles Plastiques (AP). La base de cet horizon n'a pas été reconnue par les sondages disponibles au droit de la gare Porte-Maillot.

#### CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Dans le secteur de la Porte Maillot, le tracé recoupe les nappes contenues dans le Calcaire Grossier du Lutétien et les sables de l'Yprésien. Ces deux aquifères sont en relation hydraulique, seulement séparées par le niveau de Glauconie grossière constituant la base du Calcaire Grossier et qui présente ici une épaisseur de l'ordre du mètre. À noter que la nappe de l'Yprésien comprend deux niveaux : la nappe supérieure dans les Sables Supérieurs, et la nappe inférieure dans les Sables d'Auteuil.

La nappe dans les Sables d'Auteuil est séparée de la nappe des Sables Supérieurs par l'horizon des Fausses Glaises, dont la nature argileuse constitue un frein aux écoulements verticaux. Elle peut donc présenter un caractère semi-captif à captif. Du point de vue piézométrique, son niveau dans l'ouest de la région parisienne est proche de celui de la nappe de l'Éocène Supérieur. L'examen des niveaux sur les piézomètres montre que les niveaux des deux nappes sont très proches et se situent en moyenne entre +23 et 24 m NGF. À noter que le niveau de la nappe est conditionné, dans ce secteur, par le drainage permanent au droit du radier du parking du Palais des Congrès.

#### CONCEPTION GÉOMÉTRIQUE ET FONCTIONNELLE DE LA GARE PORTE-MAILLOT

Le volume central de la gare est créé avec des parois moulées ou des voiles coulés tenus par des butons horizontaux en acier. Une verrière éclaire naturelle-



4

© SETEC - EGIS - DUTHILLEUL

ment l'ensemble du volume de la gare jusqu'aux quais. Les escaliers plaqués contre les parois ouvrent également au maximum le volume à la lumière naturelle. Ils desservent les coursives du niveau -2 qui bordent le volume central de part et d'autre. Ces coursives débouchent à leurs extrémités sur deux halls situés à l'est et à l'ouest. Le hall Ouest permet une liaison directe avec la Ligne 1 et le cheminement vers les sorties côté Neuilly-sur-Seine. Le hall Ouest mène au hall d'échanges de la gare, espace de jonction le plus fréquenté de la gare, situé entre le hall Est, la sortie principale sur le parvis du Palais des Congrès (émergence de la gare), le RER C et le Palais des Congrès (liaisons souterraines) : il abrite les principaux locaux d'exploitation, les surfaces commerciales et l'espace de vente Transilien.

**4- Coupe transversale de la future gare et des infrastructures souterraines sous la place.**

**5- Vue d'artiste de l'intérieur de la gare à partir des quais.**

**4- Cross section of the future station and underground infrastructure under the square.**

**5- Artist's view of the station interior from the platforms.**

Le concept est entièrement tourné vers la lumière naturelle. Celle-ci sert de fil conducteur au voyageur, lui indiquant sa situation spatio-temporelle, lui permettant de se situer, parallèlement à l'Axe Majeur et 29 m sous le niveau de la place Porte Maillot. Le parcours est simplifié : depuis le niveau quai, des escaliers mécaniques de 18 m de dénivelé permettent d'accéder au niveau mezzanine et aux coursives. C'est le niveau des correspondances avec les autres modes de transports : RER C, métro Ligne 1, tramway T3. D'autres escaliers permettent de finir la remontée vers la lumière naturelle et l'extérieur.

La gare est large, spacieuse, très haute de plafond, avec un volume central de forme trapézoïdale, dont la pente des parois rappelle celle de la façade du Palais des Congrès (figure 5).



5

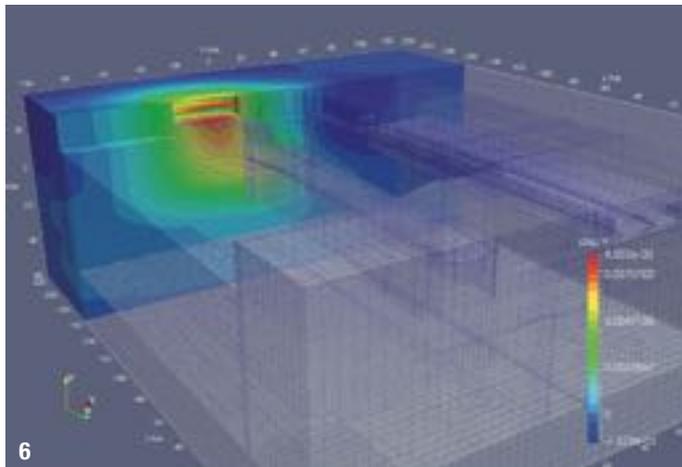
© SETEC - EGIS - DUTHILLEUL

Les consistants principaux de la gare sont mis en évidence : béton des parois moulées laissé brut, autres bétons coffrés avec coffrages calepinés et soignés, puissants butons en acier laqué blanc. Le niveau quai est identifié par l'usage de parquets en bambou massif, l'étage des coursives et les couloirs par du marbre de Carrare gris clair.

Les grands escaliers mécaniques sont encoffrés dans des tubes en aluminium poli pour assurer une double fonction : protection contre les fumées en cas d'incendie et rôle protecteur et rassurant pour les voyageurs.

L'étage des coursives reçoit un plafond acoustique de tissu tendu rouge qui souligne les deux circulations principales.

L'éclairage des zones publiques est entièrement composé de produits à base de LED qui sont programmables pour tenir compte de l'apport de la verrière et ajouter un effet scénographique évolutif. Le niveau quai est éclairé par des lustres qui complètent l'ambiance salon déjà suggérée par le parquet. Les métalleries sont essentiellement en inox. La conception de la gare prend en compte le référentiel national de mise en accessibilité pour les personnes à mobilité réduite ou en situation d'handi-



6- Vue du modèle de calcul 3D.

6- Vue du modèle de calcul 3D.  
7- Phasage transversal de la partie souterraine de la gare Porte-Maillot.

6- View of the 3D design calculation model.  
7- Transverse phasing of the underground part of Porte-Maillot Station.

cap : bandes podotactiles et d'éveil à la vigilance, balises de guidage pour non-voyants, signalétique de grande taille pour malvoyants, boucles à induction et magnétiques pour malentendants, double main courante pour personnes de petite taille.

Les choix des matériaux ont été basés sur la continuité du concept des gares existantes de la Ligne E : Haussmann-Saint-Lazare et Magenta mises en service en juillet 1999.

À noter que le prolongement du tramway T3 à la Porte Dauphine via la

Porte Maillot a imposé de reprendre la conception de la gare alors que le marché de travaux de génie civil était déjà en cours. En effet, le tracé retenu pour le T3, à l'est de la place Maillot perpendiculairement à l'avenue de la Grande Armée, était incompatible avec la position des accès de la gare initialement prévus.

De plus, le nouveau projet de la gare Porte-Maillot a dû intégrer en cours de travaux des mesures conservatoires pour reprendre les charges d'un projet d'extension du Palais des Congrès de Paris.

### CONCEPTION STRUCTURELLE DE LA GARE PORTE-MAILLOT À CIEL OUVERT

La conception de la gare Porte-Maillot est le résultat de l'intégration des multiples contraintes du site et de la concertation avec les différents acteurs de la place.

Concernant les ouvrages RATP (Ligne 1 du métro), la conception intègre les différentes correspondances EOLE/RATP issues du programme. L'un des principaux enjeux de la conception est la préservation des ouvrages existants, notamment par le respect des limites des déplacements autorisés, caractérisés par des valeurs très faibles : seuil d'alerte correspondant à 12 mm de déplacement absolu et 0,5‰ de déplacement relatif pour la station en double-voûte de la Ligne 1.

### STABILITÉ DE LA GARE

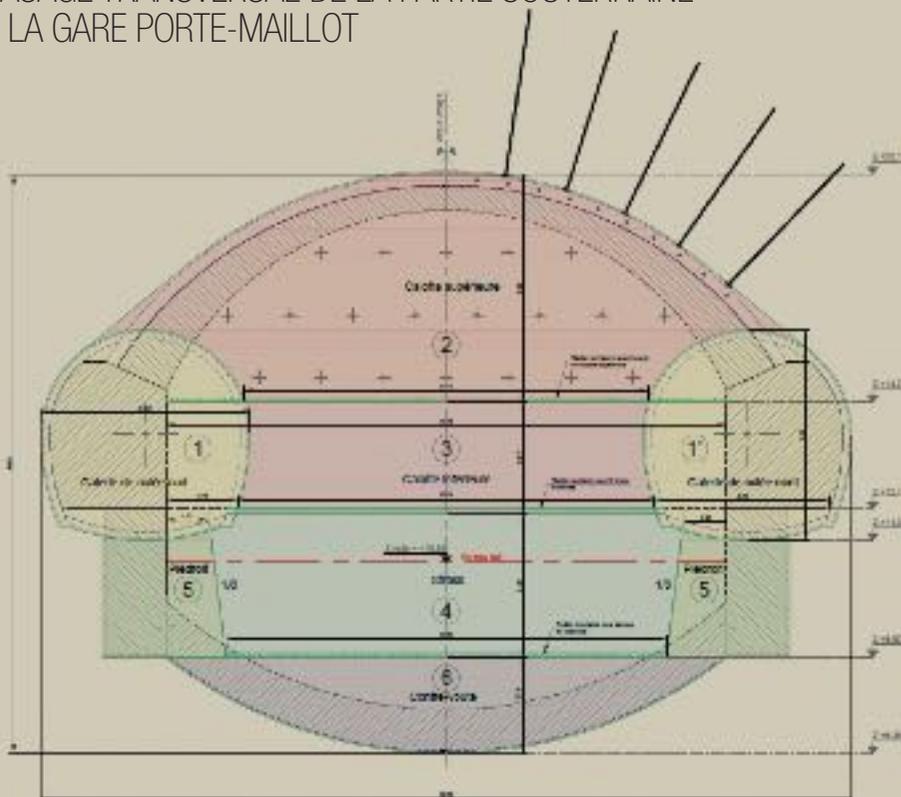
Parmi les différentes contraintes, la conception de la gare Porte-Maillot relève d'un sujet de stabilité particulière du fait de la dissymétrie de poussée qu'elle subit entre les côtés Nord et Sud dans sa partie à ciel ouvert.

En effet, côté Sud, les terrains en place et la double-voûte de la station de la Ligne 1 du métro génèrent une poussée horizontale importante sur la paroi sud de la gare, alors que, côté Nord, le parking du Palais des Congrès ne crée pas de poussée sur la paroi Nord.

De plus, les études réalisées en phase de conception (AVP et PRO) ont montré que les structures du parking n'étaient pas en mesure d'équilibrer les poussées horizontales importantes générées côté Sud.

Ainsi, les dispositions suivantes ont été intégrées à la conception de la gare Porte-Maillot afin de reprendre les poussées horizontales tout en limitant les déplacements de la station de métro Ligne 1 pour respecter les seuils convenus avec les MOA tiers :

### PHASAGE TRANSVERSAL DE LA PARTIE SOUTERRAINE DE LA GARE PORTE-MAILLOT



7



8

© BOUYGUES TP - RAZEL BEC - EIFFAGE - SEFI INTRAFOR

- Pour la phase provisoire, mise en œuvre d'un contre-rideau qui permet de limiter les déplacements horizontaux en tête de la paroi moulée Sud dès les premières phases de terrassement, et de butons provisoires à l'intérieur de la fouille ;
- Pour la phase définitive, mise en œuvre de butons inclinés précontraints pour transmettre les efforts horizontaux sous le niveau du radier du parking côté Nord après détente des tirants du contre-rideau ;
- Pour les phases provisoire et définitive, renforcement du massif en Calcaire Grossier sous le radier du parking afin de sécuriser l'appui de la gare.

Ces dispositions de conception ont été complétées dès l'appel d'offres par le groupement d'entreprises en charge des travaux, notamment par la mise en œuvre de tirants actifs inclinés sous la station Ligne 1 pour bloquer les déformations de la paroi moulée sud en phase provisoire.

### PRÉSENTATION DES CALCULS

Les nombreux calculs réalisés, en phase conception puis lors des études d'exécution, ont eu pour objectifs, outre le fait de justifier la conception structurelle de la Gare Porte-Maillot au regard des contraintes citées ci-dessus, d'appréhender le fonctionnement des structures avoisinantes vis-à-vis des déplacements générés par les travaux d'EOLE, et d'identifier la sensibilité des

principaux paramètres de calculs sur les résultats.

Plusieurs types de calculs ont été menés : calculs milieux continus 2D et 3D pour déterminer les déplacements des structures avoisinantes, calculs aux modules de réactions pour estimer les sollicitations et les déformées des parois moulées, calculs structurels aux éléments finis 2D et 3D (figure 6) pour estimer les raideurs et dimensionner les structures internes. Ces différentes approches complémentaires étaient basées sur des hypothèses géotechniques communes issues de l'exploitation des reconnaissances géologiques et géotechniques. Des analyses de sensibilité ont également été réalisées pour identifier l'impact des

**8- Vue depuis le chantier vers l'est et l'avenue de la Grande-Armée.**

**9- Terrassements en cours dans la zone Ouest de la partie à ciel ouvert.**

**8- View from the worksite toward the east and avenue de la Grande-Armée.**

**9- Earthworks in progress in the western area of the open-air part.**

incertitudes sur certains paramètres. Les calculs milieux continus, utilisés notamment pour le calcul des déplacements des avoisinants, ont fait l'objet d'études poussées pour modéliser au mieux les existants ainsi que le phasage d'exécution qui a été revu en cours d'étude pour des raisons de planning.

### PARTIE SOUTERRAINE DE LA GARE PORTE-MAILLOT

Du fait de la présence des avoisinants, notamment la tranchée couverte du RER C et les voies de circulation du rond-point de la Porte Maillot, l'extrémité Est de la gare Porte-Maillot est réalisée en souterrain en méthode conventionnelle (figure 6).

La section excavée, d'environ 200 m<sup>2</sup> au total, s'inscrit dans les horizons des Calcaires Grossiers et des Sables Supérieurs. Cette zone est réalisée sous rabattement de nappe généralisé, son phasage transversal est le suivant :

- Excavation des galeries de culées nord et sud, en front mixte Calcaires Grossiers/Sables Supérieurs ;
- Réalisation des culées Nord et Sud qui prennent appui sur des colonnes de jet grouting dans les Sables Supérieurs ;
- Excavation de la calotte supérieure dans les Calcaires Grossiers et bétonnage de la voûte ;
- Excavation de la calotte inférieure puis du stross dans les Sables Supérieurs ;



9

© BOUYGUES TP - RAZEL BEC - EIFFAGE - SEFI INTRAFOR



10

© SETEC - EGIS - DUTHILLEUL



11

© PROJET EOLE - SNCF RESEAU

- Excavation et bétonnage des piédroits par plots en sous-cœvre des galeries de culées ;
- Excavation et bétonnage de la contre-voûte qui vient fermer la section.

Compte tenu de la présence d'infrastructures majeures au-dessus de l'excavation et des dimensions importantes de celle-ci, il a été retenu un phasage d'excavation avec des passes courtes et des soutènements par cintres lourds et béton projeté (figure 7). De plus, des traitements de terrain sont prévus de manière systématique : jet grouting pour l'appui des culées et la reprise en sous-cœvre des piédroits dans les Sables Supérieurs, et injections dans les Calcaires Grossiers.

### LES TRAVAUX À FIN SEPTEMBRE 2019

Sur la partie à ciel ouvert de la gare, les dernières parois moulées sont en cours de réalisation.

**10- Béton projeté en cours dans les galeries de culées.**

**11- Tympan Est de la partie à ciel ouvert - Dalle du niveau -4 en cours de ferrailage - Départ des galeries escaliers Nord et Sud.**

**10- Shotcreting underway in the abutment galleries.**

**11- East spandrel of the open-air part - Slab of level -4 undergoing reinforcement - Starting point of North and South staircase galleries.**

Les terrassements ont débuté aux deux extrémités :

- Côté Est dans le puits frontal, depuis lequel l'excavation de la calotte supérieure de la partie souterraine sera réalisée, le ferrailage de la dalle du futur niveau -4 de la gare est en cours ;
- Côté Ouest où le niveau de terrassement a atteint le futur niveau -3 de la gare.

Dans la partie souterraine de la gare, les travaux de jet grouting sont en cours depuis les galeries d'escaliers qui ont été excavées. L'excavation des galeries de culées Nord et Sud suivent la réalisation du jet grouting (figures 1 et 8 à 11).

### CONCLUSION

La gare Porte-Maillet constitue un ouvrage exceptionnel de par ses dimensions (225 m de longueur, 21 m

de largeur et 29 m de profondeur), le contexte urbain très dense dans lequel il s'insère et qui conditionne la conception de la gare, ainsi que par les contraintes très fortes sur les déplacements admissibles des ouvrages avoisinants. Le maître d'ouvrage SNCF Réseau et le maître d'œuvre SED (Setec Egis Duthilleul) ont poussé les études de conception pour maîtriser ces enjeux fonctionnels et techniques complexes ainsi que les risques associés. Depuis le démarrage du marché de travaux de génie civil, le travail en commun avec le groupement Bouygues Travaux Publics - Razel Bec - Eiffage - Sefi Intrafor qui mène à bien les études d'exécution et les travaux de la gare Porte-Maillet d'EOLE, permet d'intégrer les modifications de conception et les évolutions de phasage afin de réaliser cette gare emblématique. □

### PRINCIPALES QUANTITÉS

**DÉBLAIS : 210 000 m<sup>3</sup>**

**PAROIS MOULÉES : 36 000 m<sup>2</sup>**

**BÉTON DE STRUCTURE (hors parois moulées) : 47 000 m<sup>3</sup>**

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : SNCF Réseau**

**ASSISTANT MAÎTRE D'OUVRAGE : Systra**

**MAÎTRE D'ŒUVRE : Setec / Egis / Duthilleul**

**BUREAU DE CONTRÔLE : Veritas**

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES DE GÉNIE CIVIL :**

**Bouygues Travaux Publics / Razel Bec / Eiffage / Sefi Intrafor**

### ABSTRACT

#### EOLE "RER" RAPID TRANSIT SYSTEM: DESIGN AND CONSTRUCTION OF PORTE-MAILLOT STATION IN A VERY DENSE UNDERGROUND ENVIRONMENT

BENOIT BERTRAND, EGIS - SOPHIE YEM, EGIS - PHILIPPE PATEAU, BOUYGUES TP

The new Porte-Maillet Station of the EOLE network, constructed as part of the western extension of RER (rapid transit system) Line E, is an exceptional structure due to its size, the dense urban environment into which it will be integrated, and the constraints imposed to control subsidence of the neighbouring buildings. The article describes the context, the main functional and structural design aspects of the open-air and underground parts of Porte-Maillet Station; it ends with a brief description of civil engineering work progress at end-September 2019. □

#### RER EOLE: DISEÑO Y REALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN DE PORTE-MAILLOT EN UN ENTORNO SUBTERRÁNEO MUY DENSO

BENOIT BERTRAND, EGIS - SOPHIE YEM, EGIS - PHILIPPE PATEAU, BOUYGUES TP

La nueva estación de Porte-Maillet del EOLE, realizada en el marco de la prolongación de la línea de cercanías (RER) E hacia el oeste, constituye una obra excepcional por sus dimensiones, el contexto urbano denso en el que se inserta y las restricciones impuestas para respetar los asentamientos de las construcciones vecinas. El presente artículo expone el contexto, las grandes líneas del diseño funcional y estructural de las partes a cielo abierto y subterráneas de la estación de Porte-Maillet y, por último, una presentación sucinta del avance de las obras de ingeniería civil a finales de septiembre de 2019. □



© ALEXANDRE SOFIA

# LIGNE 14 : CONGÉLATION POUR LE PASSAGE SOUS LA GARE DU RER C DE SAINT-OUEN

AUTEURS : LOUIS DELMAS, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, SYSTRA - LAURENT BUISSART, DIRECTEUR DE CHANTIER, SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL - CHRISTIAN GILBERT, DIRECTEUR B.U. STRUCTURES ET GÉNIE CIVIL, SYSTRA - GIORGIO FANTAUZZI, DIRECTEUR DU DÉPARTEMENT TUNNELS ET STRUCTURES SOUTERRAINES, SYSTRA

LA GARE DU RER C DE SAINT-OUEN EST FONDÉE SUR DES BARRETTES TRAVERSANT LES SABLES DE BEAUCHAMP. LE CROISEMENT AVEC LA LIGNE 14 DU MÉTRO PARISIEN A NÉCESSITÉ LA RÉALISATION D'UN TUNNEL INTERCEPTANT 3 DE CES BARRETTES ET ÉGALEMENT SITUÉ DANS LES SABLES DE BEAUCHAMP AVEC DE FAIBLES COHÉSIONS, SOUS 20 m D'EAU. LE CREUSEMENT A EU LIEU À L'ABRI D'UNE COQUE CONGELÉE ARTIFICIELLEMENT QUI A ASSURÉ LA STABILITÉ DES TERRAINS DANS UN CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDRAULIQUE PARTICULIÈREMENT COMPLEXE.

## REPRISE EN SOUS-CŒUVRE D'UNE GARE DE RER C

Clichy-Saint-Ouen (CSO), est une future station de métro de la Ligne 14 au nord de Paris qui se raccorde à la ligne RER C existante (figure 2). La station RER C a été construite en 1985 avec une tranchée couverte de 12 m de profondeur et 18 m de largeur. Le tracé de la Ligne 14N croise la station du RER C avec un angle de 26° ; le croisement fait 26 m de long (figure 3). Le quai central de la gare est fondé sur des barrettes de 15 m de long avec un espacement maximal de 4,5 m (figure 4). Les barrettes reposent en

pointe sur les Marnes et Caillasses à 27 m de profondeur.

La principale difficulté pour la construction de la station CSO a été de traverser sous le RER C (figure 3). Le RER C devait rester en service pendant toute la durée des travaux.

Deux puits ont été utilisés pour accéder sous le RER C : Au nord, un puits de ventilation (BAM : Baie d'Aération Mécanique) (~20 m x 20 m de surface ; 20 m de profondeur) et au sud, la station CSO (140 m x 15 m de surface ; 20 m de profondeur) (figure 4). Les puits BAM et CSO ont tous deux été utilisés pour des sorties de tun-

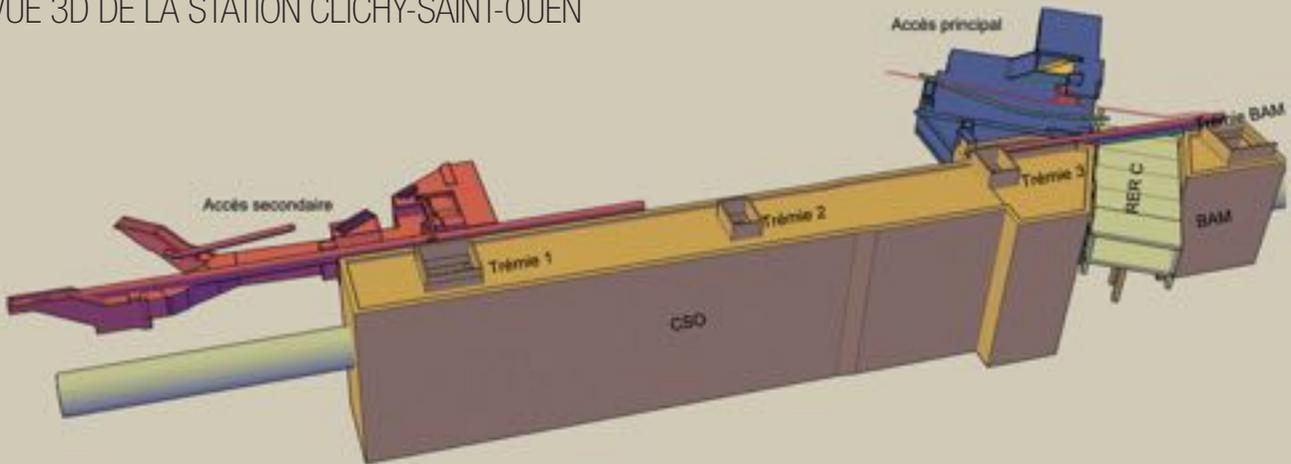
**1- Coque congelée en cours de congélation.**

**1- Frozen shell during ground freezing.**

neliers. Un ouvrage cadre a été conçu pour traverser sous le RER C (figure 5). L'emplacement des barrettes a imposé qu'une barrette soit coupée et que ses charges soient transférées à l'ouvrage cadre de la Ligne 14.

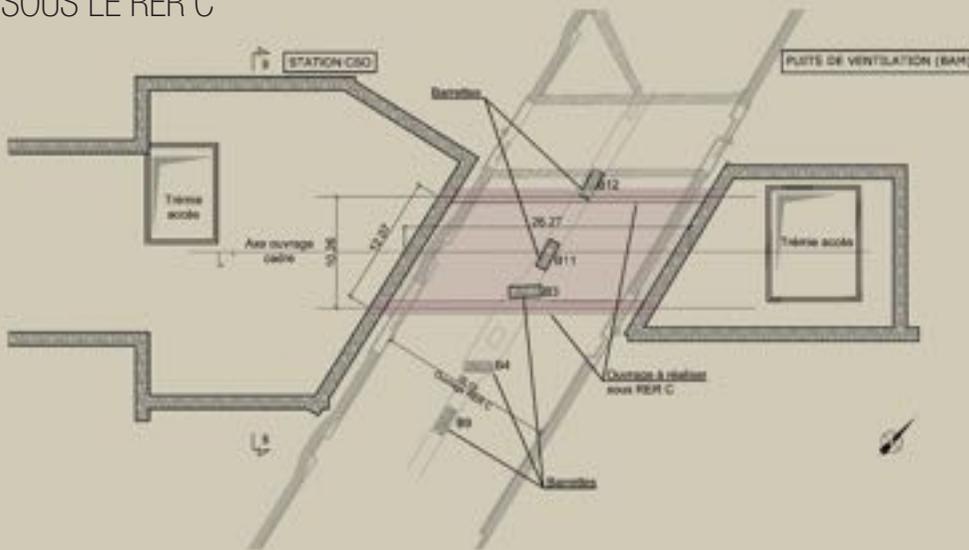
La reprise des efforts du RER C par l'ouvrage cadre s'est faite par l'ancrage de la barrette B11 à une poutre reposant sur les piédroits de l'ouvrage cadre (figure 5). La barrette B11 a ensuite été coupée. Cette solution impliquait de terrasser jusque sous le radier du RER C pour mettre à nu, puis étayer le système de fondation du RER C. Les parois moulées du RER C ont été fixées aux parois moulées des puits BAM et CSO par des linteaux (3 m de hauteur sur 12 m de largeur). Ceci a permis le creusement sous la fiche des parois moulées du RER C. La partie inférieure de la barrette B11 située sous le

## VUE 3D DE LA STATION CLICHY-SAINT-OUEN



2

## VUE EN PLAN DE LA CONFIGURATION DU TUNNEL À CONSTRUIRE SOUS LE RER C



3

## VUE 3D SOUS LE RER C



4

2- Vue 3D de la station Clichy-Saint-Ouen.

3- Vue en plan de la configuration du tunnel à construire sous le RER C.

4- Vue 3D sous le RER C.

2- 3D view of Clichy-Saint-Ouen Station.

3- Plan view of the configuration of the tunnel to be constructed under RER C.

4- 3D view under RER C.

radier de l'ouvrage cadre a été abandonnée dans le terrain et n'est pas utilisée comme support (figure 6).

Ces opérations de reprise en sous-œuvre ont impliqué que le creusement soit réalisé par des méthodes traditionnelles. Le contexte géologique a nécessité l'utilisation de méthodes d'amélioration du sol telles que la congélation des sols.

### DES SABLES SANS COHÉSION, SOUS CHARGE D'EAU

L'ouvrage cadre est situé dans les horizons du Lutétien. Plus particulièrement, les sols suivants ont été rencontrés :

- Marno-Calcaire de Saint-Ouen (MCSO) : mélange de blocs calcaire et de marnes.

- Calcaire de Ducy (CDu) : couche très dure de calcaire fracturé (50-100 cm). Les fractures sont remplies d'argile brune.

- Sables de Beauchamp (SB) : sables verts de composition variable en Île-de-France. Au niveau de l'ouvrage ils comprennent 3 sous-unités. En partie supérieure et inférieure : sables limoneux, sans cohésion. En partie médiane : argile sableuse, faible cohésion. La perméabilité globale de cette formation est de  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  m/s. Elle n'est pas injectable, des essais d'injectabilité en phase d'études l'ont démontré.
- Marnes et Caillasses (MC) : mélanges de marnes avec des blocs calcaires pouvant contenir du gypse et/ou des zones de dissolutions.

Le terrain naturel se trouve à +31 m NGF et le niveau de la nappe se trouve à 5 m de profondeur soit à 26 m NGF. L'excavation de l'ouvrage cadre se situe dans les Sables de Beauchamp entre +6 m NGF et +16 m NGF. La pression maximum d'eau est de 200 kPa sous l'ouvrage cadre.

### CONCEPTION D'UNE COQUE CONGELÉE

Le gabarit de l'ouvrage cadre se situe principalement dans les sables sans cohésion (SB) avec une pression d'eau de 100 à 200 kPa. La non-injectabilité de cette formation a conduit au choix de la congélation des

sols comme soutènement provisoire. La partie en "U" de la coque est conçue pour assurer la flottabilité pendant les phases d'excavation. La contre-voûte redirige la pression d'Archimède vers les murs gelés, les propriétés mécaniques des sols gelés doivent donc être compatibles avec les efforts internes dans la contre-voûte. La voûte centrale a pour but d'assurer la stabilité du toit lors de l'excavation des galeries basses. La méthode de congélation a été choisie pour la voûte centrale en phase conception. Il s'agissait de limiter le nombre de méthodes de traitement de sol utilisées en cours de chantier (figures 1 et 7).

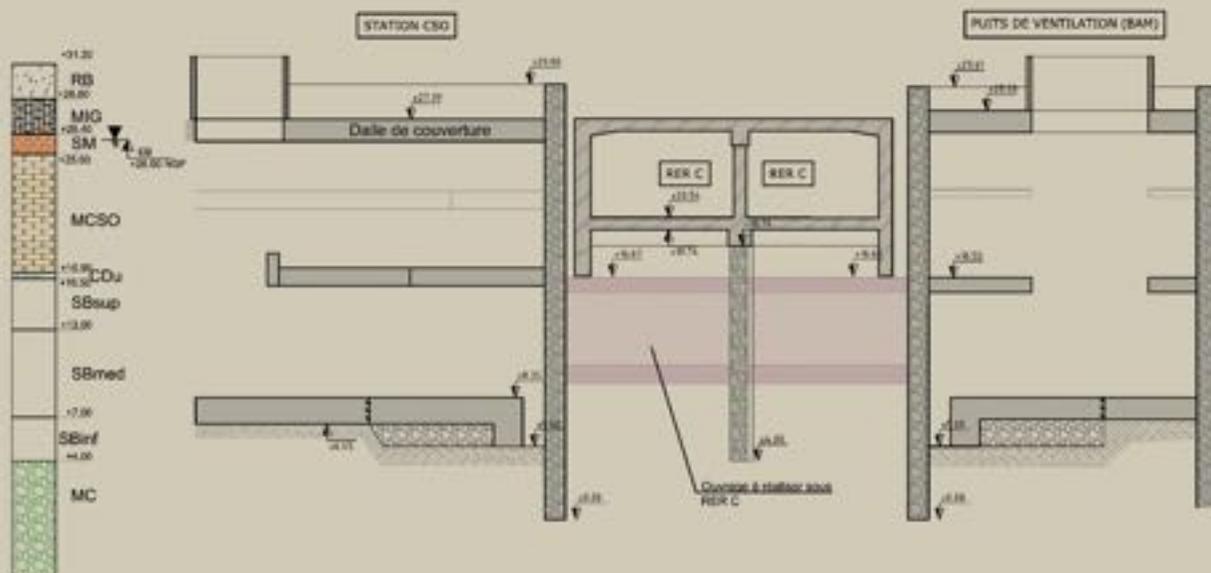
5- Coupe longitudinale du tunnel à construire.

6- Coupe longitudinale du tunnel construit.

5- Longitudinal section of the tunnel to be constructed.

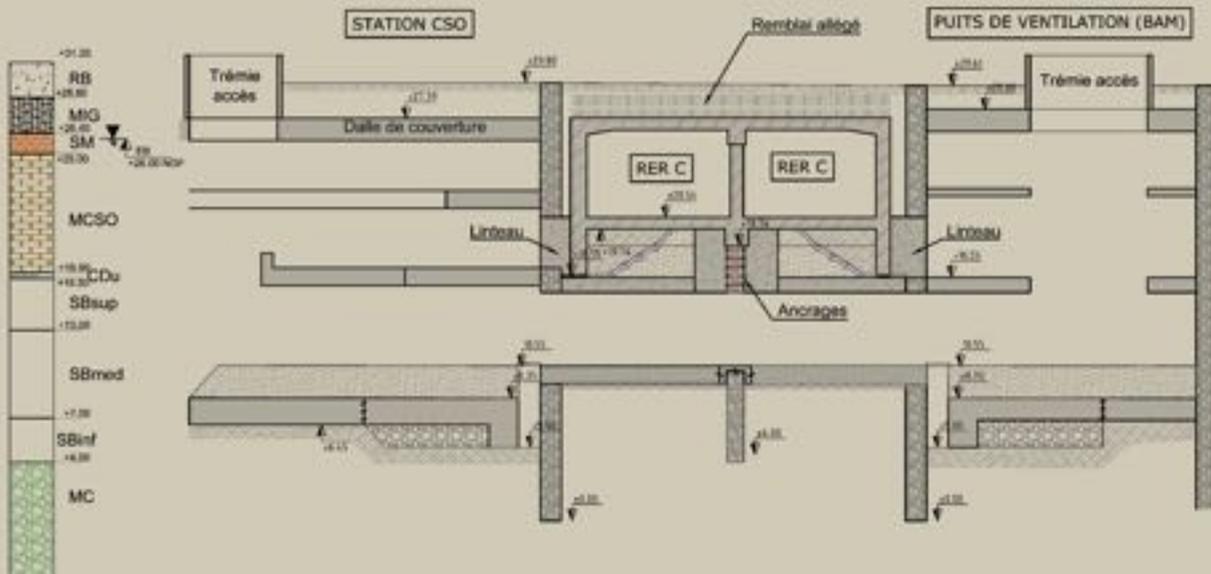
6- Longitudinal section of the constructed tunnel.

## COUPE LONGITUDINALE DU TUNNEL À CONSTRUIRE



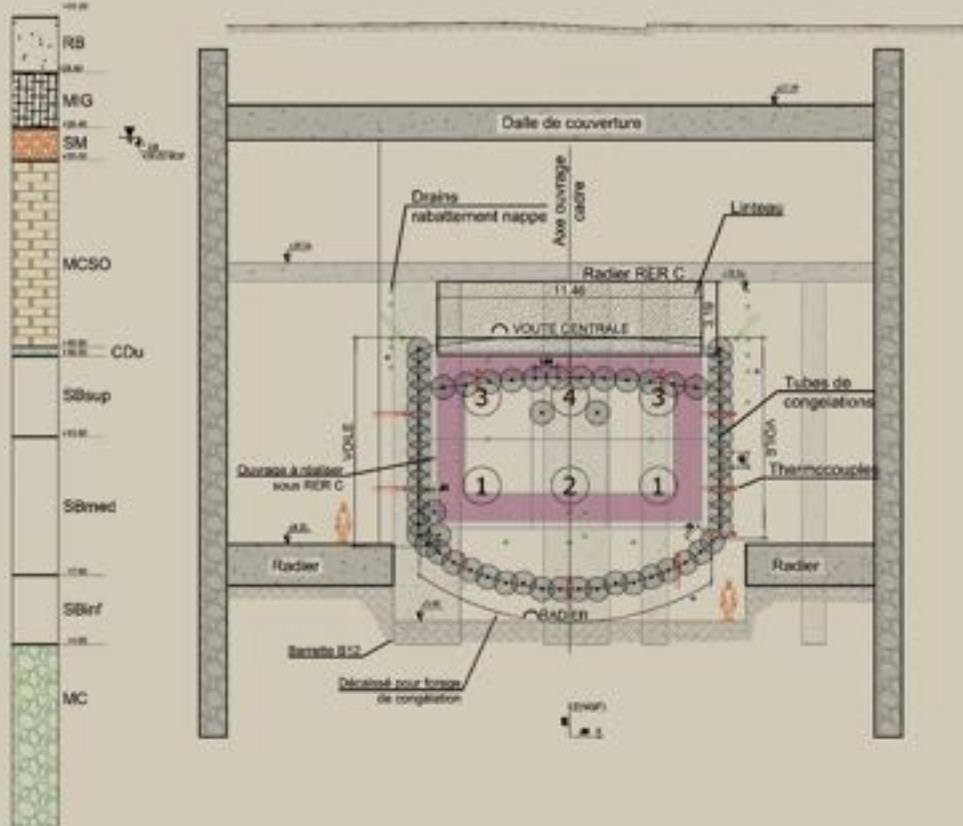
5 © SYSTRA

## COUPE LONGITUDINALE DU TUNNEL CONSTRUIT



6 © SYSTRA

## ÉLÉVATION DE LA COQUE CONGELÉE VUE CÔTÉ CSO



© SYSTRA

7

L'excavation a été réalisée en sections divisées pour assurer la stabilité du soulèvement et la flottabilité pendant toute la durée des travaux. La séquence des travaux d'excavation était : (2) section centrale, (1) sections latérales inférieures, (3) sections latérales supérieures, (4) section centrale supérieure. La séquence d'avancement de l'excavation a été réalisée par pas de 1 m. La congélation a assuré le soutènement provisoire et l'étanchéité lors de l'excavation. Après chaque pas d'avancement, un soutènement provisoire (cadres HEM220 et béton projeté fibré) était installé derrière le front d'excavation. Le revêtement définitif a été installé à la fin de l'excavation de chacune des galeries (figure 8).

Cette séquence d'excavation inhabituelle, de bas en haut, a été choisie pour assurer la stabilité du soulèvement au cours des travaux. À certaines étapes, le revêtement définitif était nécessaire pour assurer la non-flottabilité de l'ensemble.

Pendant les phases d'étude, la stabilité au soulèvement au centre du tunnel n'était pas assurée à toutes les phases

### 7- Élévation de la coque congelée vue côté CSO.

#### 7- Elevation view of the frozen shell seen from CSO.

d'excavation. Pour satisfaire à cette condition de stabilité, un lestage des galeries inférieures a été mis en place lors de l'excavation des parties supérieures. Le radier de l'ouvrage cadre a également été ancré aux parois moulées BAM et CSO. Ces solutions ont permis d'équilibrer la poussée d'Archimède pendant toutes les phases d'excavation.

Le Marno-Calcaire de Saint-Ouen n'est pas sujet à l'érosion interne (débouillage). Mais, pour éviter une infiltration excessive d'eau pendant l'excavation, des injections ont été réalisées en rideau de part et d'autre du "U". De plus, un réseau de drains a été placé entre le haut de la coque gelée et la base du RER C pour capter l'eau avant qu'elle n'entre dans l'excavation.

Les résistances mécaniques des terrains gelés ont été estimés à partir de données provenant de projets de congélation antérieurs, réalisés dans les mêmes formations géologiques. Les résultats des essais en laboratoire effectués sur un autre lot du prolongement de la Ligne 14, qui nécessitait également la congélation artificielle du sol, ont été utilisés (figure 9).

Les contraintes dans la coque congelée ont été calculées pour toutes les phases d'excavation. Ceci a permis de fixer un critère d'épaisseur minimum de la coque congelée : 80 cm d'épaisseur à une température inférieure à  $-10^{\circ}\text{C}$ .

### UNE CONGÉLATION MIXTE AZOTE LIQUIDE - SAUMURE

La congélation initiale a été effectuée grâce à un circuit ouvert, alimenté avec de l'azote liquide. Ceci a permis un développement rapide de la glace et l'atteinte du critère mécanique. L'entretien de la congélation a été effectué en circuit fermé avec de la saumure ( $\text{CaCl}_2$ ) à des températures comprises entre  $-37^{\circ}\text{C}$  et  $-25^{\circ}\text{C}$ , en fonction des besoins énergétiques de la paroi gelée

au cours du projet. Pour refroidir la saumure, une installation frigorifique de 500 kW a été utilisée (figure 10). Les tuyaux de congélation ont été forés horizontalement à partir des deux puits BAM et CSO. Les forages ont été réalisés sous sas. Les déviations maximales autorisées étaient de 2%.

Les tubes de forage et des têtes de coupe ont été utilisés comme supports pour les tubes de congélation et abandonnés dans le sol. Des manchons en cuivre ont été scellés à l'intérieur des tubes de forage pour servir de surface d'échange entre la saumure et le sol. Un tube central a ensuite été installé à l'intérieur des tuyaux de congélation pour l'alimentation en fluide cryogénique. Les têtes des tubes de congélation ont été reliées aux circuits de distribution. Deux circuits ont été utilisés, un circuit ouvert pour l'azote liquide et un circuit fermé pour la saumure. Le réservoir d'azote liquide et les installations de refroidissement de la saumure étaient placés à la surface.

### ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS : ADAPTATION DU SÉQUENÇAGE DE CONGÉLATION

Une fois les parois moulées de CSO et BAM réalisées, des différences de niveaux piézométriques sont apparues entre le nord et le sud de la station. Un écoulement général existe de la nappe du sud vers le nord (de la colline de Montmartre à la direction de la Seine). Cette différence de niveau piézométrique de 0,5 m est la conséquence d'un effet barrage créé par la station. Un effet secondaire de cet effet barrage a été l'augmentation des vitesses d'écoulement sous le RER C, dans le goulot d'étranglement créé par les deux puits.

Les vitesses d'écoulement sous le RER C ont été mesurées in situ avec un essai de traçage. Elles atteignent jusqu'à 18 m/jour sous le RER C. Cependant, seuls de petits volumes d'eau se déplacent à cette vitesse ; la vitesse d'écoulement globale s'est avérée inférieure à 0,5 m/jour.

Deux chemins préférentiels ont été identifiés pour les grandes vitesses d'écoulement : d'une part, des hétérogénéités à l'interface sol/paroi moulée, d'autre part, la perméabilité élevée du calcaire de Ducy. Pendant le forage des drains, on a observé que l'eau était chargée en particules d'argile foncée. Il s'est avéré que cela provenait du remplissage des fractures dans le Calcaire de Ducy qui était emporté par délavage.



8

© SYSTRA

Il a ainsi été décidé que la congélation initiale à l'azote liquide devrait être phasée.

Le Calcaire de Ducy a donc été gelé en premier pour assurer la fermeture des lignes d'écoulement à grande vitesse et éviter l'amplification du phénomène de goulot d'étranglement.

La fermeture du Calcaire de Ducy a été vérifiée par une surveillance régulière de la température et à l'aide de drains situés au centre de la coque gelée.

Enfin, le reste de la coque en "U" a été congelé avec de l'azote liquide (figure 11).

Un essai d'érosion du "U" a été réalisé. L'essai d'érosion a consisté à créer

artificiellement un écoulement au-dessus du "U" en déchargeant les drains situés à l'intérieur et à surveiller l'évolution des températures dans le sol gelé. Les températures ont été surveillées pendant trois semaines. Aucune augmentation de température n'a été observée, même à des températures de saumure plus élevées (jusqu'à -28°C testé). Cela a amélioré la confiance dans la stabilité du corps gelé contre l'érosion thermique créée par les écoulements externes.

Enfin, la voûte centrale a d'abord été gelée à l'azote liquide, puis entretenue avec de la saumure, comme le reste de la coque.

Lors de l'excavation, les actions suivantes ont été prévues pour faire face au risque d'une augmentation soudaine de la température dans les bras du "U" :

- Ouverture des drains à l'extérieur de la coque congelée à pleine capacité pour rediriger l'eau avant qu'elle ne réchauffe la coque congelée ;
- Réduction de la température de la saumure au minimum de la capacité du groupe froid ;
- Finalement sans effet notable des actions précédentes, un réservoir plein d'azote liquide a été conservé sur site afin de revenir au refroidissement à l'azote liquide en dernier recours.

### MISE EN PLACE D'UN MODÈLE D'ANALYSE DES TEMPÉRATURES

Des chaînes de thermocouples ont été installées dans des forages dédiés. L'espacement longitudinal entre chaque thermocouple a été fixé à 2 m.

Afin de s'assurer que les critères mécaniques (températures inférieures à -10°C) sur une paroi de 80 cm d'épaisseur étaient vérifiés pendant toute la durée du projet, il a fallu extrapoler la position de l'isotherme -10°C à partir de la température mesurée de façon ponctuelle par chaque capteur.

L'hypothèse retenue est celle de Sanger et Sayles (1980) qui considèrent que la distribution de la température



9

© SYSTRA



10

© ALEXANDRE SORIA

**8- Terrassements à l'ouverture des galeries latérales basses.**

**9- Front dans les Sables de Beauchamp supérieurs (jaunes) et médians (verts).**

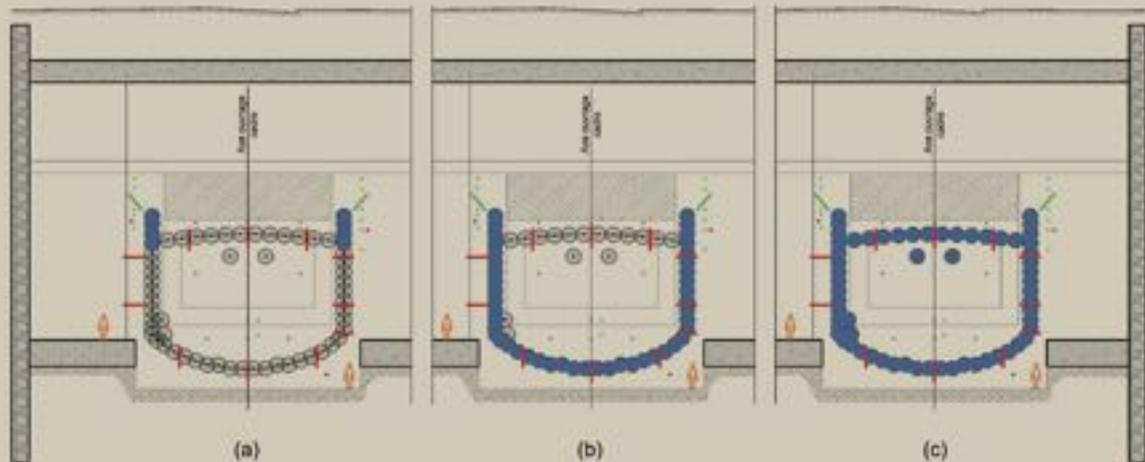
**10- Silos d'azote liquide et cheminée d'échappement.**

**8- Earthworks at the opening of the low side galleries.**

**9- Working face in the upper (yellow) and median (green) Beauchamp sands.**

**10- Silos of liquid nitrogen and exhaust stack.**

## SÉQUENÇAGE DE LA MISE EN FROID



© SYSTRA  
11

est logarithmique dans la partie gelée. Cette hypothèse a permis de relier la température mesurée par les capteurs à la position de tous les isothermes par rapport aux tubes de congélation et donc à l'épaisseur extrapolée de la coque en tout point. Grâce à cette hypothèse, un système d'alertes automatisées a été mis en place pour assurer la sécurité de la coque tout au long du chantier.

Ces seuils ont été utilisés pour piloter la congélation. En décembre 2018, le seuil de vigilance a été atteint sur un capteur situé près de la paroi moulée de la BAM. L'augmentation de température a été associée à plusieurs

### 11- Séquençage de la mise en froid.

### 12- Vue 3D de la coque congelée sous le RER C et son interface avec les barrettes.

### 11- Sequencing of freezing.

### 12- 3D view of the frozen shell under RER C and its interface with the barrettes.

facteurs : la proximité du puits et les flux d'air de ventilation ; le bétonnage récent de la culée du tunnel et une température initiale du sol plus élevée dans cette zone. Ce dernier facteur avait été identifié au début du projet et était probablement dû à la circulation de l'eau sous le RER C.

Comme prévu, les actions correctrices ont été mises en œuvre, la température de la saumure a été baissée au minimum (-37°C) et les drains ont été ouverts complètement. Mais cela n'a pas été suffisant pour arrêter le réchauffement et relancer la croissance du mur gelé. La décision a été prise d'entretenir le froid avec de l'azote liquide.

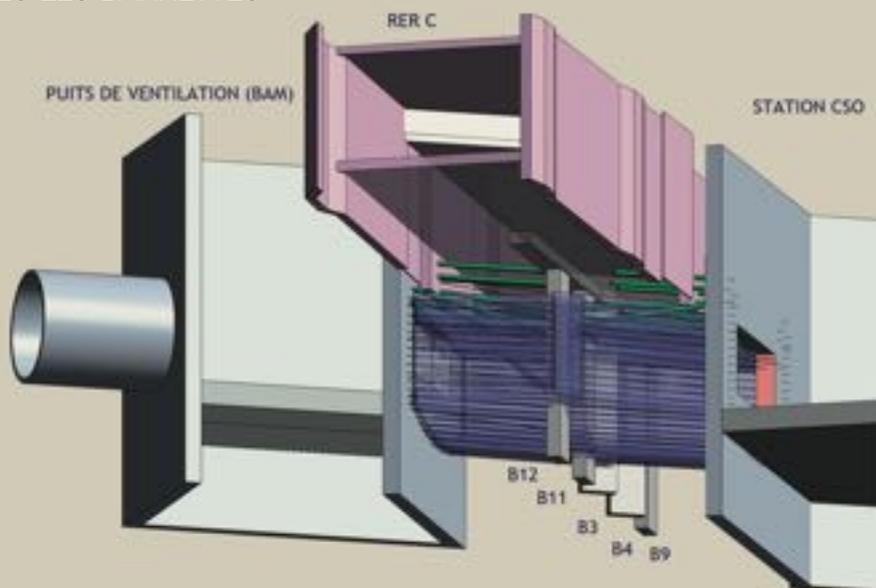
L'entretien à l'azote liquide a été réintroduit par des injections intermittentes (entre 4 et 8 heures par nuit, selon les besoins énergétiques). Un seuil spécifique a été mis en place pour s'assurer que les critères mécaniques étaient toujours vérifiés et son atteinte déclenchait une injection d'azote liquide. Après une période d'ajustement et d'étalonnage avec la réponse dynamique en température du sol, les injections ont été réalisées pendant la nuit pour limiter les interactions avec les travaux de génie civil.

### GONFLEMENTS CRYOGÉNIQUES ET SOULÈVEMENTS DU RER C

Le gonflement dû au gel dans le sol est consécutif à deux processus différents liés à la perméabilité des sols et à leur texture. D'une part dans les sols peu perméables, la dilatation de l'eau lors de son changement de phase ne peut pas s'accompagner par une évacuation de l'excédent volumique vers les parties non gelées. D'autre part, dans les sols limoneux, la fraction d'eau liée aux grains (forces de Van der Waals) favorise la succion cryogénique. Ce deuxième processus conduit à une augmentation constante du volume avec le temps.

Lors de la congélation initiale du "U" à l'azote liquide, un déplacement du poteau reposant sur la barrette B11 a été mesuré. Cela est probablement dû à la non-compatibilité entre l'avancée rapide du front de congélation pendant la congélation initiale à l'azote liquide (-196°C à -80°C) et la perméabilité des sables, ne leur permettant pas d'évacuer à temps l'excédent volumique formé par le changement d'état de l'eau dans les sables.

## VUE 3D DE LA COQUE CONGELÉE SOUS LE RER C ET SON INTERFACE AVEC LES BARRETTES



© SYSTRA  
12



13

© ALEXANDRE SORIA

Lors du passage à la saumure, à une température plus élevée (-35 °C à -28 °C), le soulèvement dû au gel s'est arrêté (figure 12). Pendant la congélation initiale à l'azote de la voûte centrale, le soulèvement a repris. Mais cette fois-ci, il ne s'est pas arrêté lors du basculement à la saumure. Dans ce cas, le soulèvement a été continu, lié à la succion cryogénique, probablement influencé par la teneur en limon des Marno-Calcaires de Saint-Ouen et par l'apport continu d'eau sous le RER C (figure 13). Plusieurs actions correctrices ont été mises en œuvre, sans effets notables sur les soulèvements : ouverture complète des drains latéraux pour réduire les arrivées d'eau, augmentation de la température de la

saumure, arrêt de l'écoulement de la saumure dans les tuyaux de congélation de la voûte parapluie. La seule solution efficace a été d'abandonner la voûte congelée et de la faire fondre activement. Lors de l'excavation, des palpeilles ont été prévues pour assurer la stabilité du toit de l'excavation.

#### CONCLUSION

La construction d'un tunnel de 26 m de long sur lequel repose le RER C a été marquée par de nombreux rebondissements tout au long du projet. La congélation artificielle des sols sous la forme d'une coque en forme de "U", sous un ouvrage en exploitation a entraîné des difficultés importantes. Le pilotage de la congélation a consisté à cher-

**13- Photo à la fin du terrassement des galeries latérales basses.**

**13- Photo at the end of earthworks on the low side galleries.**

cher l'équilibre entre deux contraintes contradictoires :

- Garantir la stabilité mécanique et l'étanchéité implique de travailler sous des températures basses ;
- La limitation des impacts sur les avoisinants nécessite des températures de sol gelé plus élevées.

La mise en œuvre sur site a dû être adaptée au contexte géologique complexe et s'est traduite par un succès grâce à l'implication de tous les acteurs du projet. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS LIGNE 14 NORD

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** RATP

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Systra

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES :** Spie Batignolles (mandataire) / Botte fondations / Chantiers modernes construction / Dodin Campenon Bernard / Vinci Grand Projets / Icop SA.

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**PÉRIODE DES TRAVAUX :** De décembre 2014 à novembre 2019

**PAROIS MOULÉES :** 25 000 m<sup>3</sup>

**BÉTON DE STRUCTURE :** 30 000 m<sup>3</sup>

**ARMATURES :** 6 000 t

**NOMBRE DE FORAGES DE CONGÉLATION ET THERMOCOUPLES :** 145 u

**LONGUEUR CUMULÉE DES FORAGES POUR LES TUBES DE CONGÉLATIONS ET THERMOCOUPLES :** 1 900 m

**MISE EN FROID INITIALE DE LA COQUE :** 19 février 2018

**FIN DU DÉGEL DE LA COQUE :** octobre 2019

**VOLUME D'AZOTE POUR LA MISE EN FROID INITIALE :** 2,5 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>

**SOUTÈNEMENT OUVRAGE CADRE :** 300 t

### ABSTRACT

#### LINE 14: GROUND FREEZING FOR THE PASSAGEWAY UNDER THE SAINT-OUEN STATION OF RER C

LOUIS DELMAS, SYSTRA - LAURENT BUISSART, SPIE BATIGNOLLES - CHRISTIAN GILBERT, SYSTRA - GIORGIO FANTAUZZI, SYSTRA

As part of the extension of metro Line 14 toward northern Paris, a frame structure 26 m long, 14 m wide and 11 m high was dug under the Saint-Ouen Station of RER C. The frame structure intercepts three barrettes which support the central platform of RER C. One barrette was cut and its forces transferred to the frame structure. Artificial ground freezing was used to allow earthworks in a complex geotechnical and hydrological environment. The article outlines the main features of the project. The thermal and mechanical design of ground freezing and the way in which it was implemented on site overcame the difficulties. □

#### LÍNEA 14: CONGELACIÓN PARA EL PASO BAJO LA ESTACIÓN DEL RER C DE SAINT-OUEN

LOUIS DELMAS, SYSTRA - LAURENT BUISSART, SPIE BATIGNOLLES - CHRISTIAN GILBERT, SYSTRA - GIORGIO FANTAUZZI, SYSTRA

En el marco de la prolongación de la Línea 14 del metro hacia el norte de París, se ha realizado una obra marco de 26 m de longitud, 14 m de ancho y 11 m de altura bajo la estación de la línea de cercanías (RER) C en Saint-Ouen. La obra marco intercepta tres vigas que soportan el andén central del RER C. Se ha cortado una viga y sus esfuerzos se han transmitido a la obra marco. Se ha utilizado la técnica de congelación artificial de los suelos para permitir el asiento en un contexto geotécnico e hidrológico complejo. El artículo presenta las grandes líneas del proyecto. El diseño térmico y mecánico de la congelación del suelo y la forma en que se ha aplicado in-situ han superado las dificultades. □





Travaux de Soil Mixing et de paroi moulée du tronçon  
T3A, Pont de Sèvres - Île-de-France, France  
Grand Paris Express - Ligne 15



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.

Buildings

Construire sur du solide

[www.soletanche-bachy.com](http://www.soletanche-bachy.com)



**SOLETANCHE BACHY**