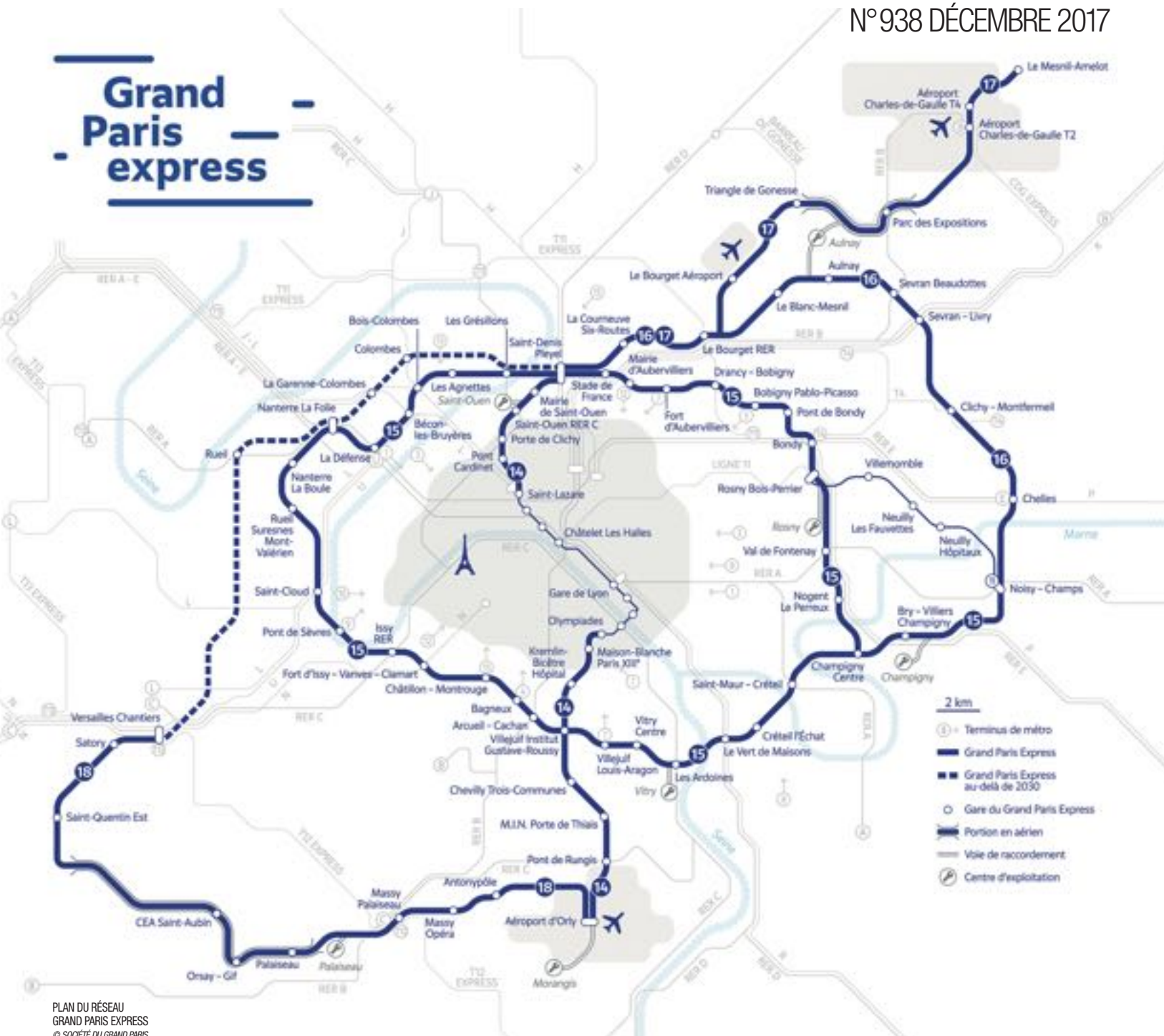


**SPECIAL GRAND PARIS. GESTION DES DEBLAIS. UBYSOL : TRACABILITE DES DEBLAIS. THALIA : SIMULATEUR DE PILOTAGE DE TUNNELIER. STATION SERGE GAINSBOURG. TRAVERSEES DE SEINE. GARE DE CHATILLON-MONTROUGE. LANCEMENT DES PREMIERS TUNNELIERS. REDUCTION DES RISQUES DE CREUSEMENT. CHOIX DU TYPE DE TUNNELIER. SECTIONS SOUTERRAINES DE LA LIGNE ORLY - VERSAILLES CHANTIERS. CLAMART - LA DALLE DE COUVERTURE ENTRE EN GARE !**

N°938 DÉCEMBRE 2017

## Grand Paris express





## BIM-IFC

intégration des logiciels  
Mensura VRD au BIM

## EXPORT 3D

exportation des scènes 3D  
vers les formats SKP, DAE  
(objets et matériaux)

## BIMétré

Échange de fichiers  
entre les logiciels de devis,  
métrés et CAO

# TO BIM OR NOT TO BIM ?

Avec les progiciels métiers  
**MENSURA**, la question  
ne se pose pas.

## Le BIM est l'affaire de tous, parlons-en !

Acteur du Grand Paris  
*Exposant au BIMWORLD 2018*



**GEOMENSURA**  
CONCEPTEUR & ÉDITEUR DE LOGICIELS POUR L'INFRASTRUCTURE



NOUVELLE VAGUE - Crédits photos : iStock



[www.geomensura.fr](http://www.geomensura.fr)  
[contact@geomensura.com](mailto:contact@geomensura.com)

Tél. +33 (0)2 40 16 92 60

**Directeur de la publication**  
Bruno Cavagné**Directeur délégué**  
**Rédacteur en chef**  
Michel Morgenthaler  
3, rue de Berri - 75008 Paris  
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03  
morgenthalerm@fnfp.fr**Comité de rédaction**  
Sami Bounatirou (Bouygues tp), Erica Calatizzo (Systra), Jean-Bernard Datry (Setec tpi), Philippe Gotteland (Fnfp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fnfp), Laurent Guilbaud (Saipem), Florent Imberty (Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis), Véronique Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage tp), Philippe Vion (Vinci Construction Grands Projets), Nastaran Vivan (Artelia), Michel Morgenthaler (Fnfp)**A collaboré à ce numéro**  
**Rédaction**  
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.frFrance (9 numéros) : 190 € TTC  
International (9 numéros) : 240 €  
Enseignants (9 numéros) : 75 €  
Étudiants (9 numéros) : 50 €  
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)  
Multi-abonnement : prix dégressifs  
(nous consulter)**Publicité**  
**Rive Média**  
2, rue du Roule - 75001 Paris  
Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44  
contact@rive-media.fr  
www.rive-media.fr**Directeurs de clientèle**  
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04  
b.cosson@rive-media.fr  
Carine Reininger - LD 01 42 21 89 05  
c.reininger@rive-media.fr**Site internet : www.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

## UN PROJET INÉDIT POUR DESSINER UNE NOUVELLE CARTE DES TRANSPORTS



**A**u moment où le Gouvernement porte l'ambition forte de construire une nouvelle politique de mobilité pour notre pays, le Grand Paris Express constitue un projet à la fois déterminant et structurant pour l'avenir des transports dans la région capitale. Bien au-delà d'un simple réseau qui s'étend, c'est un cap qu'il nous donne collectivement pour préparer demain.

Définitivement lancé en 2010 à l'issue d'un large débat public et après des années de réflexions, le Grand Paris Express relève le défi inédit de redessiner en profondeur la géographie de la région en la dotant d'une nouvelle carte des transports, adaptée aux nouveaux enjeux du siècle à venir. Avec 200 kilomètres de lignes nouvelles créées - rien de moins que l'équivalent du réseau existant - et la naissance de 68 gares nouvelles, les superlatifs ne manquent pas pour contempler l'ampleur du chantier qui est engagé.

À travers ces nouvelles lignes qui vont progressivement se déployer, le Grand Paris Express doit constituer une des réponses concrètes aux attentes fortes des douze millions de Franciliens quant à l'amélioration de leurs déplacements au quotidien, alors qu'ils sont aujourd'hui bien souvent confrontés à la saturation des axes routiers ou de leurs

transports en commun. Il est aussi une réponse contre « l'assignation à résidence » de nombreux citoyens qui vivent autour de la capitale sans y être encore correctement reliés, et pour qui ces lignes peuvent rendre le quotidien plus facile.

Plus encore, le Grand Paris Express entend transformer les logiques territoriales, en ouvrant enfin la voie à des déplacements directs entre banlieues, sans rendre nécessaire le passage par le centre de la capitale. Il s'agit là d'un profond changement d'état d'esprit, qui correspond pleinement à ce que sont devenues aujourd'hui les réalités des besoins de mobilité et des bassins d'emplois.

L'objectif même du Grand Paris Express est bien de nous projeter collectivement dans l'avenir, en faisant de ces nouvelles infrastructures un puissant levier de développement économique et social pour de nouveaux territoires, et à travers eux pour l'ensemble de la région capitale. Autour de ces lignes, ce sont de nouveaux pôles d'excellence, de compétitivité, qui vont sortir de terre et créer de nouvelles perspectives d'avenir.

Reposant sur une société dédiée et un mécanisme de financement propre, le Grand Paris Express constitue pour beaucoup de territoires une source d'inspiration. La réalisation de ce chantier sans précédent représente aussi un défi considérable, notamment au plan technique, dont chacun doit être conscient et qu'il nous faut relever collectivement. Le Gouvernement sera au rendez-vous pour rendre possible cette belle ambition.

**ÉLISABETH BORNE**  
MINISTRE CHARGÉE DES TRANSPORTS



# SPÉCIAL GRAND PARIS

MÉTRO LIGNE 14 - LOT 3 - VUE D'ENSEMBLE © ALEXANDRE SORIA



## 04 ALBUM



# 06

### ENTRETIEN AVEC JOSÉ RAMOS

F RTP ÎLE-DE-FRANCE -  
VISIBILITÉ ET QUALIFICATION  
AUTOUR DU NOUVEAU GRAND PARIS

## 12 MORPHOSENSE : DÉTECTER CE QUI NE PEUT ÊTRE VU, TOUT SIMPLEMENT



# 20

### LES DÉBLAIS DU GRAND PARIS EXPRESS

Un enjeu de 45 millions de tonnes



# 29

### UBYSOL

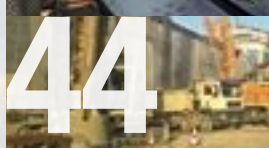
La solution de traçabilité  
des déblais



# 37

### THALIA

Le simulateur de pilotage  
de tunnelier par  
Bouygues Travaux Publics



# 44

### STATION SERGE-GAINSBOURG

Ligne 11



# 52

### TRAVERSÉES DE SEINE

Ligne 15 Sud, tronçon 3



# 60

### GARE DE CHÂTILLON- MONTROUGE

Ligne 15 Sud



# 71

### LANCEMENT DES PREMIERS TUNNELIERS

Ligne 15 Sud



# 79

### RÉDUCTION DES RISQUES INTÉGRÉE DÈS LA CONCEP- TION DES TUNNELS

Ligne 15 Sud



# 89

### CHOIX DU TYPE DE TUNNELIER

Ligne 15 Sud T2A entre  
les gares de Villejuif-Louis-Aragon  
et de Créteil-L'Échat



# 95

### ORLY-VERSAILLES CHANTIERS

Sections souterraines  
de la Ligne 18  
du Grand Paris Express



# 103

### CLAMART - LA DALLE DE COUVERTURE ENTRE EN GARE !

Ligne 15 Sud - lot T3B





## PREMIÈRE GARE ATTRIBUÉE PAR SGP ON A COMMENCÉ **FORT**

**HORIZON** est le nom du groupement constitué de Bouygues Travaux Publics (mandataire) et de sociétés du groupe Soletanche Bachy. Il réalise, sur la Ligne 15 Sud, la gare de Fort-d'Issy - Vanves - Clamart, la première du Grand Paris Express.

Sur une plateforme livrée à 6,50 m seulement sous les tabliers SNCF, 400 m<sup>3</sup> d'injection de prétraitement puis 15 000 m<sup>3</sup> de parois moulées à 35 m de profondeur ont été exécutés en un temps record. Le toit préfabriqué de la gare, d'un poids de 7 500 t (plus que la Tour Eiffel), a ensuite été ripé sur un assemblage de chariots automoteurs totalisant 240 essieux.

On a parlé, en termes mesurés, d'un « défi relevé ».

(Voir article page 103).



© ALTAMETRIS

# F RTP ÎLE-DE-FRANCE VISIBILITÉ ET QUALIFICATION AUTOUR DU NOUVEAU GRAND PARIS

AVEC LE NOUVEAU GRAND PARIS, LE GRAND PARIS EXPRESS, ÉOLE, LES PROLONGEMENTS DES LIGNES DE MÉTRO ET, DEPUIS PEU, LES JEUX OLYMPIQUES DE 2024, LA FÉDÉRATION RÉGIONALE DES TRAVAUX PUBLICS ÎLE-DE-FRANCE (F RTP ÎLE-DE-FRANCE) ET LES ENTREPRISES BÉNÉFICIENT D'UN ACCÉLÉRATEUR D'ACTIVITÉ. **ENTRETIEN AVEC JOSÉ RAMOS, PRÉSIDENT DE LA F RTP ÎLE-DE-FRANCE.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1

OUTRE LE VOLUME CONSÉQUENT QUE VONT ENGENDRER POUR LES QUELQUE 800 ENTREPRISES QUI LA COMPOSENT CES CHANTIERS D'EXCEPTION DANS LES 15 ANNÉES À VENIR, L'UN DE SES OBJECTIFS EST DE DONNER À SES ADHÉRENTS ET TOUT PARTICULIÈREMENT AUX PME FRANCILIENNES DE LA VISIBILITÉ À MOYEN TERME SUR LES BESOINS EN EMPLOIS ET EN QUALIFICATIONS.

CE QUE MET EN ÉVIDENCE JOSÉ RAMOS, PRÉSIDENT DE LA F RTP ÎLE-DE-FRANCE, LUI-MÊME À LA TÊTE DE PLUSIEURS PME DIRECTEMENT CONCERNÉES PAR CES GRANDS CHANTIERS D'EXCEPTION QUI VONT PROFONDÉMENT MODIFIER DANS UN FUTUR QUI EST DÉJÀ AUJOURD'HUI LE VISAGE DE LA RÉGION « CAPITALE ».

**En quelques mots, comment caractériser la F RTP Île-de-France ?**

La Fédération Régionale des Travaux Publics d'Île-de-France, au travers des entreprises et des syndicats de spécialités qui la composent, représente un acteur incontournable pour l'ensemble des activités des acteurs de la profes-

sion qui interviennent sur les chantiers d'Île-de-France tant au niveau de l'accompagnement technique qu'elle leur assure que pour répondre aux demandes et aux exigences des maîtres d'ouvrage. En quelques mots, les Travaux Publics représentent un chiffre d'affaires de l'ordre de 12 milliards d'euros dont 8 milliards d'euros

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © SGP / GÉRARD ROLLANDO - FIGURE 3 © SGP / GÉRARD ROLLANDO



2



3



1- José Ramos, président de la Fédération Régionale des Travaux Publics Île-de-France.

2- Derniers préparatifs avant le ripage du toit de la Gare Fort d'Issy Vanves Clamart (Bouygues TP).

3- Ripage du toit de la gare Fort d'Issy Vanves Clamart dans la nuit du 12 au 13 août 2017 (Bouygues TP).

4- Vue aérienne du chantier Fort d'Issy Vanves Clamart (Bouygues TP).

5- Congélation pour la station Aimé Césaire de la Ligne 12 (Dodin Campeyron Bernard - Vinci Construction).

en Île-de-France réalisé par 800 entreprises de toutes tailles employant plus de 50 000 salariés à temps plein. Les grandes entreprises y sont généralement représentées par leur direction régionale, quelquefois leur direction générale. Le chemin sur lequel je souhaite conduire la FRTP Île-de-France est d'accompagner les entreprises dans leurs besoins actuels et les préparer aux demandes de demain dans les domaines humains, notamment la formation, mais aussi techniques et juridiques.

L'accompagnement du BIM, par exemple, est l'un de nos axes de développement, tout spécialement à destination des PME car, outre son aspect le plus visible de technique de modélisation, il implique une anticipation des besoins et des contraintes.

Dans les Travaux Publics, il n'est pas encore utilisé dans la totalité de ses caractéristiques, comme c'est déjà le cas dans le Bâtiment, pour la simple raison que les chantiers de Travaux Publics sont presque toujours des chantiers-prototypes, en particulier

dans les travaux souterrains, dès lors que l'on intervient sur la géotechnique du sous-sol, où les paramètres à maîtriser sont très nombreux.

La FRTP Île-de-France est là précisément pour accompagner le renouvellement des technologies et pour les faire connaître aux entreprises. Il ne s'agit pas pour nous de nous substituer à elles mais de les informer et de leur faire prendre conscience de l'évolution de leur métier, tout en répondant dès maintenant aux questions que peuvent leur poser cette évolution. C'est le

## JOSÉ RAMOS : PARCOURS

José Ramos a été élu président de la FRTP Île-de-France en novembre 2013 pour un mandat de trois ans. Son premier mandat a été renouvelé en novembre 2016

À 48 ans, José Ramos est à la tête de l'entreprise Essonne-TP spécialisée dans les travaux de voirie, d'aménagement urbain et la pose de canalisations. Son nouveau mandat à la présidence de la FRTP IDF a débuté sous le signe du renforcement du conseil et de l'assistance à l'entreprise, du développement des partenariats et de la mise en œuvre opérationnelle des outils pour recruter et former le personnel qualifié dont les entreprises auront besoin pour le chantier du Nouveau Grand Paris.

Il a créé Essonne TP en 2001 après une expérience d'une dizaine d'années dans une filiale du groupe Eiffage et de cinq ans au sein de Sotravia, une PME régionale afin de vivre son métier avec plus d'autonomie dans les décisions.

De 16 personnes en 2001, les effectifs sont passés à 85 en 2017 et l'entreprise réalise un chiffre d'affaires de 15 millions d'euros.

Par la suite, José Ramos a créé seul ou en participation plusieurs entreprises spécialisées : LTP 91 (terrassement et démolition) en 2002, Topo Environnement (géométrie de VRD) en 2003, Rev TP (valorisation de déblais de chantiers de TP et centre de transit pour le groupe Cemex) en 2008, TP 2A (assainissement et réseaux) en 2012.

Essonne TP a également pris en 2014 une participation pour la reprise de Probinord, spécialisée dans les techniques routières et les enrobés coulés à froid.

L'ensemble de ces entreprises dont il assure la direction représente un effectif global de 150 personnes.

rôle des 10 collaborateurs de notre Fédération et de ses territoires qui sont chargés de favoriser l'activité des entreprises de la région. Il faut savoir que c'est la fiscalité des entreprises et des ménages franciliens qui va financer la quasi-totalité des grands travaux en Île-de-France, y compris une partie des travaux liés aux jeux olympiques de 2024.

### Comment les entreprises franciliennes sont-elles déjà impliquées dans le Nouveau Grand Paris et les projets qui y sont liés ?

Le projet du Nouveau Grand Paris représente plus de 40 milliards d'euros d'investissement dont 12,8 milliards consacrés à l'amélioration des infrastructures existantes et 31,25 milliards dédiés à la construction des prolongements et du nouveau réseau de métro et mode de transport lourd (RER).

Outre les lignes spécifiquement réalisées pour le Grand Paris Express (14 Sud, 15, 16, 17 et 18), s'ajoutent le prolongement d'Éole vers l'ouest ainsi que les prolongements des lignes de métro 4, 11, 12 et 14 Nord et la construction des lignes de Tram Express T4, 11, 12 et 13.

Les entreprises adhérentes à la FRTP Île-de-France sont toutes motivées et mobilisées en fonction de leurs spécialités.

Les premiers grands marchés, que nous appelons les quatre « gros lots » du Grand Paris Express déjà attribués représentent un montant de près de 4 milliards d'euros.

Le Nouveau Grand Paris a été délimité lors de la conférence de presse du 6 mars 2013 par le premier ministre Jean-Marc Ayrault. ▶

© ALTAMETRIS / SNCF RÉSEAU

4



© ALEXANDRE SORIA

5



La FRTP IDF a mené deux études, dans le cadre d'un Contrat Étude Prospective, pour évaluer sur les cinq ans à venir les besoins en emplois et en compétences dans notre secteur entre 2015 et 2020.

Ces données ont fait l'objet d'une réactualisation régulière.

Le projet est un relais de croissance qui permettra de retrouver un niveau d'activité favorisant le maintien des effectifs dans un premier temps et, à court, moyen et plus long terme, une augmentation de l'activité liée aux nombres et aux volumes des chantiers mis en œuvre.

L'impact positif sur l'économie francilienne reste subordonné au respect des calendriers annoncés par les différents maîtres d'ouvrage.

Le point de vigilance pour la FRTP Île-de-France est de veiller à ce que l'ensemble du tissu économique du secteur Groupe, ETI mais aussi PME puisse bénéficier en fonction de leur savoir-faire des marchés du Nouveau Grand Paris.

Ce Contrat d'Étude Prospective nous a permis de travailler sur l'ensemble des besoins en ressources humaines, le « fil de l'eau », c'est-à-dire les marchés courants d'entretien, de construction, de rénovation d'infrastructures ainsi que les grands projets composants du Grand Paris.

### Quelle distinction la FRTP Île-de-France fait-elle entre le Grand Paris Express et le Nouveau Grand Paris ?

Ce que nous appelons le Nouveau Grand Paris constitue le troisième réaménagement de la région Capitale depuis les travaux entrepris dans Paris par le préfet Haussmann sous le second empire et ceux décidés par

## NOUVEAU GRAND PARIS : BUDGET PRÉVISIONNEL

**Le projet du Nouveau Grand Paris représente plus de 40 milliards d'euros d'investissement, dont 12,8 milliards d'euros consacrés à l'amélioration des infrastructures existantes et 31,25 milliards d'euros (\*) dédiés à la construction des prolongements et du nouveau réseau de métro et mode de transport lourds (RER) répartis comme suit :**

- 3,52 milliards affectés au prolongement de la Ligne 14 Nord et Sud.
- 12,25 milliards d'euros alloués à la réalisation de la Ligne 15 (sud, ouest et est).
- 2 milliards d'euros pour la Ligne 16 (Saint Denis-Pleyel / Noisy-Champs).
- 4 milliards d'euros consacrés à la réalisation de la Ligne 17 (Saint Denis-Pleyel / Le Mesnil Amelot).
- 2,7 milliard d'euros dédiés au prolongement de la Ligne 18 (Aéroport d'Orly / Versailles).
- 3,2 milliards d'euros pour le prolongement du RER Éole à l'ouest.
- 1,84 milliards d'euros affectés aux prolongements des Lignes 4, 11 et 12.
- 1,741 milliards d'euros prévus pour les Tram Express (T4, 11, 12 et 13).

(\*) Chiffres d'estimation des travaux en 2013.

## LA RÉINSERTION, AUSSI, AU-DELÀ DU SPORT

**C'est à l'occasion de travaux réalisés pour la ville de Massy, dans l'Essonne, que José Ramos a découvert le club de rugby de cette commune, le Rugby Club Massy Essonne (RCME), au travers de son président de l'époque Alain Tingaud, aujourd'hui président du RC Agen, et s'est intéressé aux problèmes que pose, après une carrière consacrée au sport, la réinsertion des jeunes dans la vie professionnelle.**

**Devenu depuis vice-président et actionnaire du RCME, il a participé à la création de la fondation "Nos quartiers ont des talents", dont il en a fait son action sociétale dans l'entreprise. « J'ai beaucoup travaillé à la réinsertion des jeunes sportifs après leur métier de base, explique-t-il. La carrière d'un sportif est courte. Elle s'arrête entre 30 et 35 ans. Pendant toute la période de son activité sportive, nous l'accompagnons pour trouver un métier et assurer ainsi son reclassement à l'issue de sa carrière sportive. J'ai découvert les qualités humaines qu'impliquait la pratique du rugby et j'en ai fait une action importante dans l'entreprise ».**

**Aujourd'hui en Pro D2, l'équivalent de la ligue 2 de football, le RCME est actuellement la deuxième école de rugby en France.**

Paul Delouvrier, le père des « villes nouvelles », dans les années 60<sup>(1)</sup>, car il va initier des restructurations complètes de quartiers autour des gares principales, d'ailleurs sous maîtrise d'ouvrage de la SGP pour la plupart d'entre eux.

Sur la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express, par exemple, 11 des 16 gares supportent un projet connexe d'aménagement, soit de logements, soit de bureaux, soit de commerces ou font partie d'un projet périphérique d'aménagement urbain, générique d'une nouvelle dynamique pour la ville, en adéquation avec les besoins de la population.

Nous sommes dans le cadre d'un réaménagement global de la région Île-de-France, au-delà de Paris intra-muros, dans ses 7 départements constitutifs et au-delà des 200 km de voies nouvelles du métro automatique.

### Quels sont les défis de l'emploi et de la formation en Île-de-France pour la période 2015-2020 ?

La réponse est dans les chiffres du Contrat d'Étude Prospective (CEP) 2015-2020, qui met en avant l'impact des travaux du Grand Paris sur les besoins en recrutement à venir des entreprises.

Pour y faire face, les principaux acteurs franciliens de l'emploi et de la formation s'organisent.

29 000 besoins. Tel est le besoin en recrutement en Île-de-France des entreprises de Travaux Publics pour la période 2015-2020, selon le CEP. Réactualisé dans le cadre de la Convention cadre régionale emploi/formation pour les marchés publics liés à la construction du réseau de transport du Nouveau Grand Paris,

© ALEXANDRE SORIA

6



© ALEXANDRE SORIA

7



6- Le lot 3 du prolongement de la Ligne 14 du métro parisien (Dodin Campenon Bernard - Vinci Construction).

7- Porte Maillot, emprise du chantier de la gare « Porte Maillot » du prolongement de la Ligne E du RER dit « Éole » vers l'Ouest (Eiffage Génie Civil).

8- Station Stalingard du lot 1 du prolongement de la Ligne 4 du métro (Dodin Campenon Bernard - Vinci Construction).

9- Chantier du prolongement Nord de la Ligne 14 du métro parisien (Eiffage Génie Civil).

10- Le tunnelier sur le chantier du prolongement de la Ligne 14 vers le Nord (Eiffage Génie Civil).



© ALEXANDRE SORIA

signée le 22 janvier 2015 par 10 partenaires<sup>(2)</sup>, le CEP recense 6 500 besoins liés au renouvellement des effectifs, et plus de 22 000 besoins grâce au volet transport du Nouveau Grand Paris, aux aménagements autour des gares et aux Contrats de Développement Territorial (CDT).

### Plus globalement, quelle est la prospective de l'activité Travaux Publics en Île-de-France et l'impact des grands chantiers franciliens entre 2016 et 2020 ?

La FRTP Île-de-France a mené à ce sujet une étude au travers de sa commission de développement économique. Elle a permis d'identifier

un montant de travaux de plus de 22,3 milliards d'euros sur la période 2016/2020.

La part supplémentaire des travaux du Nouveau Grand Paris dans le volume du chiffre d'affaires global va s'accroître pendant cette période.

Ainsi, pour 2016, selon nos estimations, la part générée par le chiffre

d'affaires du Nouveau Grand Paris représenterait +12,8% pour atteindre son maximum en 2019-2020 avec près de 37%, soit 3 milliards d'euros supplémentaires.

Pour les grands opérateurs, on estime que la variation de l'activité devrait être limitée de l'ordre de 5 à 10% en raison de la substitution d'une partie des travaux d'entretien et de maintenance pour faire face aux besoins d'investissements liés aux grands chantiers : aménagements qualitatifs autour des gares, interconnexions, parkings... La Région, quant à elle, devrait augmenter de 3% à 4%, sur les 10 à 15 ans à venir, sa part d'investissements dans les infrastructures.

Enfin, pour les collectivités locales, après plusieurs années de baisse d'activité, nous anticipons une stabilisation en 2017 avant une augmentation entre 2018 et 2020.

### La FRTP Île-de-France a-t-elle engagé une démarche particulière au niveau des PME ?

Autour d'un projet aussi exceptionnel et structurant que celui-ci, l'un de nos enjeux est aussi de veiller à irriguer l'ensemble du tissu des entreprises et en particulier les PME.

Le tissu économique des Travaux Publics en Île-de-France compte des entreprises qui, sans être des PME au sens juridique du terme, ont des caractéristiques et des comportements d'achat et de production qui s'apparentent à ceux des PME. Je pense à certaines entreprises de taille intermédiaire.

Leur savoir-faire, leur implantation dans l'économie locale et leur capacité à générer de l'emploi justifient que ces entreprises aient accès également aux marchés du Grand Paris. ▷

© H. PIRAUD

9



© H. PIRAUD

10



Dans le cadre d'une charte que nous avons signée le 22 novembre 2016 avec Philippe Yvin, Président du directoire de la Société du Grand Paris, Bruno Cavagné, Président de la Fédération Nationale des Travaux Publics, et moi-même en qualité de Président de la FRTP Île-de-France, les avons ciblées.

La formalisation de cette coopération va permettre de conduire ce grand chantier dans ces conditions optimales d'exemplarité, dans la droite ligne des engagements pris par la Société du Grand Paris en faveur de l'emploi, de l'insertion et du respect des habitants pendant les travaux.

Cette charte comporte 7 points sur des sujets importants :

En ce qui concerne l'acceptabilité des chantiers, pour répondre à l'exigence de la Société du Grand Paris, qui place la concertation avec les territoires et leurs habitants en tête de ses priorités, les entreprises membres de la FNTP et de la FRTP Île-de-France s'engagent à déployer des dispositifs d'information, en désignant notamment des correspondants bien identifiés sur les sujets de communication de proximité.

Pour l'accès aux marchés pour les PME, la SGP demande à ce qu'une part minimale de 20% de chaque marché soit exécutée par des PME, en cotraitance ou en sous-traitance. Au niveau de l'environnement, les signataires s'engagent à inscrire leur action en conformité avec le code de l'environnement et à former leurs personnels en conséquence. Ils s'accordent également sur les modalités de la mise en place d'une économie circulaire des déblais de chantier, qui s'appuie notamment sur le transport multimodal, la traçabilité et la valorisation des déblais.



11

© ALEXANDRE SORIA

**11- Machine d'abattage ponctuel sur le chantier du lot 1 du prolongement de la Ligne 4 du métro (Spie Batignolles).**

**12- Descente de la tête du tunnelier mis en œuvre sur le chantier de la Ligne 14 (Eiffage Génie Civil).**

**13- Chantier à Boulogne Billancourt (Sade).**

**14- Site de Maintenance et de Remisage à Saint Ouen sur le lot 3 de la Ligne 14 (Spie Batignolles).**

**15- À Bagneux, chantier d'injections sur le lot T3C de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express (Spie Fondations).**

Une clause d'insertion sociale est incluse dans tous les marchés de la SGP de 5% du volume d'heures du chantier pour favoriser l'intégration sur les chantiers de publics éloignés de l'emploi, dont les modalités de mise en œuvre sont clairement fixées dans le partenariat pour garantir le succès de la mesure.

En lien avec la Société du Grand Paris, les entreprises membres de la FNTP et de la FRTP Île-de-France devront tout mettre en œuvre pour favoriser l'emploi local et lutter contre le travail illégal et la concurrence déloyale. En ce qui concerne la recherche et l'in-

novation, tous les signataires expriment leur volonté d'accompagner des projets collectifs et collaboratifs innovants, pour faire de la construction du Grand Paris Express un projet à la pointe de la recherche et de l'innovation.

Le partenariat comprend également des dispositions juridiques, assurant la fluidité dans l'application des contrats entre la Société du Grand Paris et les entreprises intervenant sur les chantiers.

Cette Charte met un accent particulier sur la formation aux métiers du Grand Paris Express. Le partenariat précise ainsi les objectifs de l'Académie des

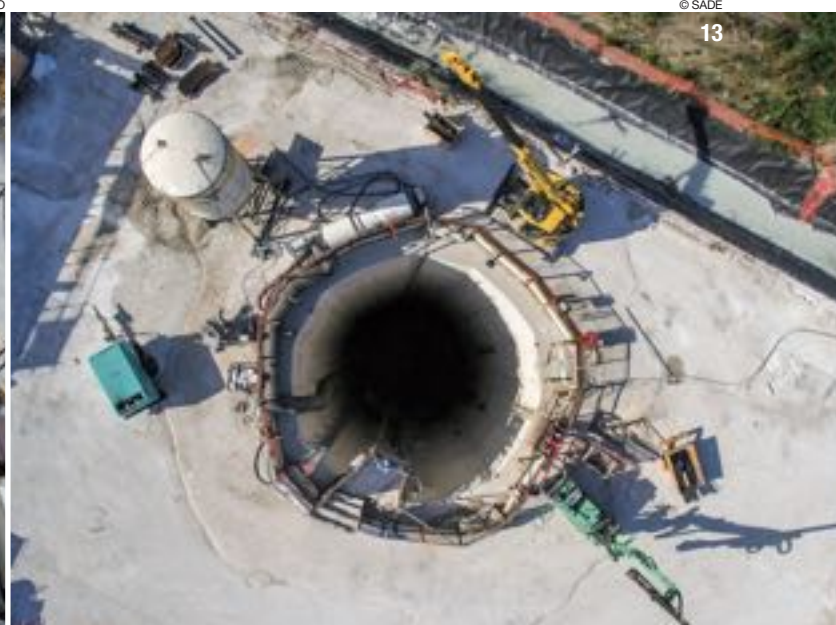
métiers du Grand Paris, dont la vocation est de former sur nos métiers des Travaux publics, de partager les savoir-faire et d'initier aux nouvelles technologies de la construction. Lancée par la Société du Grand Paris, l'Académie des métiers du Grand Paris répondra aux besoins d'emplois et de formations générés par les chantiers du nouveau métro et, au-delà, offrira aux jeunes des perspectives d'insertion durable en lien avec les activités économiques nouvelles générées par les gares du Grand Paris Express.

Au-delà de ces mesures, nous avons enclenché en janvier 2016 avec la CCI



12

© J.P.DOLLET DCOMDRONE MEDIACO



13

© SADE

Paris - Île-de-France, une démarche importante, baptisée « CCI Business Grand Paris » pour suivre avec les entreprises intéressées l'évolution des marchés avec tous les maîtres d'ouvrage et ainsi les préparer, avec une visibilité sur trois ans, à adapter leurs embauches, à former leurs équipes et les adapter aux différents métiers des chantiers du Grand Paris Express. Le rôle de la FRTP Île-de-France est de donner aux entreprises la visibilité à long terme indispensable à la définition d'une ligne de conduite afin d'imaginer les métiers et les besoins de demain. Il s'agit de donner à toutes les entreprises, au même moment, tous les éléments leur permettant de s'inscrire dans leurs envies, de se projeter dans l'avenir, de connaître les marchés qui peuvent les intéresser et de maintenir l'emploi.

**Pour répondre à cette demande nouvelle, notamment en travaux souterrains, des actions ont-elles également été entreprises au niveau de la formation des personnels ?**

Nous avons réussi à mutualiser les outils de formation existants et certaines entreprises ayant développé une offre dans leur Centre de Formation ont accepté de l'ouvrir à l'ensemble de la Profession. C'est le cas des formations de pilote, d'opérateur et de maintenance de tunnelier, développées par le Centre Gustave Eiffel.

Un titre professionnel qui avait quasiment disparu, celui de « mineur-boiseur en travaux souterrains » a été réactivé pour répondre aux besoins des chantiers du Grand Paris dans une coopération : le Centre de Formation d'Égletons, le CPO FC (Centre Professionnel d'Orcemont) et l'AFOR TP.

D'une manière plus globale, la SGP et la FRTP Île-de-France ont décidé, en l'absence d'offre spécifique, de coopérer pour la création d'un centre de formation des métiers des travaux souterrains et du Génie Civil : l'Académie du Grand Paris, inspirée du modèle anglais « Tunneling Underground Construction Academy » et du concept de « Learnpark » aux Pays-Bas.

Cette académie a pour vocation de former aux métiers des Travaux Publics, à partager les savoir-faire et initier aux nouvelles techniques de construction, telles que le BIM, pour n'en citer qu'une.

Au-delà des métiers des Travaux Publics, elle vise à répondre à terme aux besoins d'emplois et de formations d'autres secteurs en développement et, en premier lieu, ceux qui sont particulièrement concernés par les évolutions et les transformations urbaines et l'arrivée du Grand Paris Express : la maintenance et l'exploitation du futur métro, la sécurité, l'énergie, le transport et la logistique, le numérique...

Elle sera également un outil privilégié dans la mise en œuvre des parcours de formation liés aux clauses d'insertion des marchés publics.

En effet, la construction des projets de transport va générer au sein des entreprises des besoins de formations complémentaires pour les salariés en poste dans le cadre d'une mobilité fonctionnelle et/ou pour les nouveaux entrants.

**Qu'en est-il en 2017 de l'avancement du projet et des conditions de son déroulement ?**

La SGP respecte le calendrier établi en 2013, bien que les chantiers se déroulent sur un parcours à grande vitesse. Le fait que le calendrier soit respecté

formation continue **Unil** **EPFL** www.formation-continue-unil-epfl.ch

## Energy Geostrucures Analysis and Design

20-22 mars 2018

- Formation de 3 jours (donnée en anglais) par le Prof. Lyesse Laloui, Ph.D., et Alessandro F. Rotta Loria, P.E.
- Organisée par l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)
- Comprendre les géostrucures énergétiques pour le chauffage et le refroidissement de bâtiments et d'infrastructures ainsi que leur dimensionnement énergétique, géotechnique et structural.

En savoir plus : [www.formation-continue-unil-epfl.ch](http://www.formation-continue-unil-epfl.ch)

Formation Continue UNIL-EPFL | EPFL Innovation Park | Suisse  
Tél. : +41 21 693 71 20 | [formcont@unil.ch](mailto:formcont@unil.ch)

est essentiel et a permis aux entreprises de mettre en place toutes les mesures nécessaires pour répondre aux exigences des chantiers tant en ce qui concerne les moyens techniques en matériels que les capacités humaines. L'obtention des jeux olympiques et paralympiques de 2024 devrait avoir des répercussions positives sur les chantiers du Grand Paris.

Les craintes émises par certains à l'époque du lancement du projet concernant notamment la capacité des entreprises à mettre en œuvre simultanément 14 tunneliers n'ont plus lieu d'être car on sait déjà, qu'autour de

2019, ce sont plus de 20 tunneliers qui seront opérationnels sur l'ensemble des chantiers du Grand Paris Express. □

1- Paul Delouvrier publia le SDAURP, Schéma Directeur de l'Aménagement et d'Urbanisme de la région de Paris, en 1965, document fondé sur l'étalement de la population d'Île-de-France en créant cinq nouveaux centres urbains dans les banlieues existantes : Evry et Sénart au sud, Cergy-Pontoise au nord-ouest, Saint-Quentin-en-Yvelines à l'ouest et Mame-la-Vallée à l'est.

2- L'État (Préfecture de région et DIRECCTE Île-de-France), le Conseil Régional, la FRTP Île-de-France, la Fédération Île-de-France/Haute Normandie/Centre SCOP BTP, Pôle Emploi, l'Association Régionale des Missions Locales, les Rectorats de Paris, Créteil et Versailles, et la Société du Grand Paris.

© SPIE BATIGNOLLES



© SPIE FONDATIONS





MORPHOSENSE

# DÉTECTER CE QUI NE PEUT ÊTRE VU, TOUT SIMPLEMENT

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

**MORPHOSENSE, START-UP CRÉÉE EN AOÛT 2016, PROPOSE UN NOUVEAU PROCÉDÉ DE SURVEILLANCE ET DE SUIVI EN CONTINU ET EN TEMPS RÉEL DES INFRASTRUCTURES DU GÉNIE CIVIL - PONTS, TUNNELS, BARRAGES, CENTRALES NUCLÉAIRES... - ET À DES COÛTS MAÎTRISÉS. LA TECHNOLOGIE EST BASÉE SUR UN RÉSEAU D'ACCÉLÉROMÈTRES MEMS DE TRÈS HAUTE PRÉCISION, ASSOCIÉ À DES ALGORITHMES BREVETÉS POUR ESTIMER LA DÉFORMÉE 3D ET LES VIBRATIONS D'UNE STRUCTURE OU D'UNE SUPERSTRUCTURE. L'ENTREPRISE A ÉTÉ CRÉÉE EN AOÛT 2016. SON PRÉSIDENT ALEXANDRE PALÉOLOGUE REVIENT SUR LE CHEMINEMENT QUI A PERMIS À CETTE START-UP DE VOIR LE JOUR.**

La solution, basée sur un réseau de capteurs MEMS (Microsystèmes Électromécaniques) permet de mesurer la déformation géométrique 3D, avec une précision de 100 microns/mètre et les vibrations 3 axes d'une structure.

Le but de cette technologie est de monitorer la géométrie et les vibrations selon les 3 directions : c'est à dire la respiration d'une infrastructure pour en détecter les signes précurseurs d'une dégradation qui pourrait se révéler critique et coûteuse dans le futur.

Sa finesse de mesure permet de détecter des désordres imperceptibles à l'œil nu.

## **DU LETI À MORPHOSENSE : UN CHEMINEMENT RÉFLÉCHI**

Alexandre Paléologue et Mikael Carmona ont l'idée de créer la start-up Morphosense au début des années 2014.

Historiquement, Mikael Carmona a réalisé toute sa carrière au CEA : ingé-



2  
© MORPHOSENSE

- 1- Validation et suivi spatio-temporel des fréquences propres de la Tour Eiffel.**
- 2- Installation des nœuds de mesure sur la Tour Eiffel.**

nier INPG, agrégé en mathématiques, docteur en traitement du signal, au sein duquel il travaillait déjà sur les problèmes de traitement du signal lié à la surveillance des structures à partir de technologies MEMS.

De son côté, Alexandre Paléologue a débuté sa carrière chez Airbus Industries pendant une douzaine d'années,

pour les projets industriels de type satellitaire avant de basculer dans les applications militaires au sein du CESTA à Bordeaux. Puis il arrive à la DRT (Direction de la Recherche Technologique) du CEA à Grenoble (Isère) en 2011.

L'un et l'autre se rencontrent à cette période et commencent à imaginer le projet d'exploiter une technologie qui n'avait pas encore trouvé son marché. Les brevets mis en œuvre au sein de Morphosense ont été déposés précédemment au CEA autour de la capture de mouvements via des accéléromètres, portée avec succès par le Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information), centre de recherche et technologie spécialisé dans les micro et nanotechnologies. En 2013, ils réalisent l'instrumentation du funiculaire appelé "liaison Blanc-Blanc" du CEA.

Ce funiculaire de plus de 300 m de longueur, unique au monde, comporte une cabine dont l'atmosphère est "blanche", c'est-à-dire conforme aux ▷

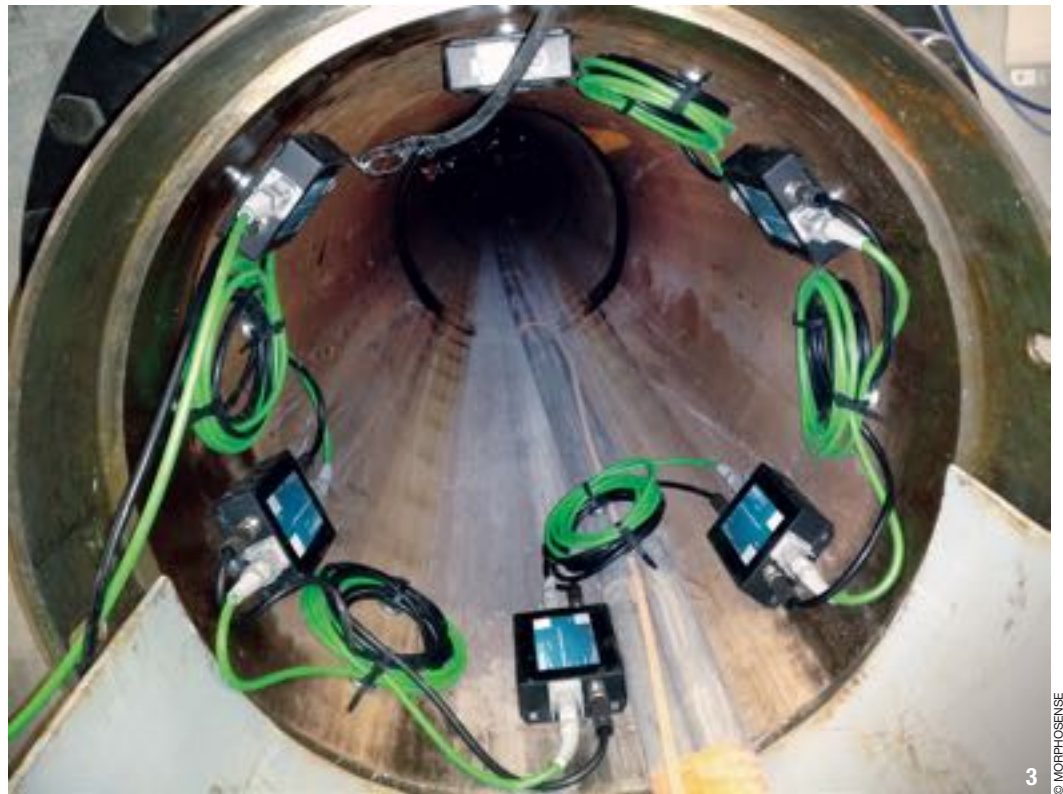
conditions "d'ultra propreté" requises (classe d'air Iso 6). Un système de sas étanche a été inventé pour permettre aux chercheurs d'aller et venir. C'est la raison pour laquelle cette liaison "high tech" conçue par Pomagalski a été baptisée "Liaison Blanc-Blanc".

Ils expérimentent leur technologie sur l'ouvrage d'art et participent la même année au challenge "First Step" en 2015, concours interne de CEA Tech, dont l'objectif est d'identifier parmi le panel de candidats qui veulent créer des start-up les bonnes idées de valorisation technologique à un stade précoce et d'accompagner dans leurs premiers pas les porteurs de projets les plus prometteurs.

Alexandre Paléologue et Mikael Carmona sont sélectionnés lors de l'édition 2015 et demandent alors en 2016 leur "incubation" au CEA afin de poursuivre leurs études sur le développement marketing de leur projet, le marché potentiel et la finalisation d'un prototype pour la technologie qu'ils souhaitent industrialiser. Ils participent alors à la formation HEC "challenge +" dont ils gagnent le concours du meilleur business plan en octobre 2016.

#### DE L'EXPÉRIMENTATION À L'INDUSTRIALISATION

Morphosense est créée en août 2016, au Bourget-du-Lac, en Savoie, avec 5 fondateurs : Alexandre Paléologue, Mikael Carmona, Matthieu Bosquet, Guy Lauvergeon et Supernova Invest<sup>(1)</sup>, une société de gestion pour investir dans l'innovation, née en mars 2017 d'un partenariat entre Amundi<sup>(2)</sup> et le CEA.



3 © MORPHOSENSE

Fin 2016, le prototype développé par Matthieu Bosquet, l'un des cinq cofondateurs de l'entreprise, est opérationnel.

Depuis janvier 2017, les trois associés ont quitté le CEA et commencé le développement commercial du produit et son industrialisation pendant les neuf premiers mois de l'année.

À cet effet, l'entreprise, qui compte actuellement 8 personnes, a embauché plusieurs collaborateurs : côté

**3- Suivi de la convergence - déformation radiale - d'un tunnel de l'Andra à Bure (Meuse) par instrumentation d'une zone spécifique.**

**4- Le funiculaire "Blanc-Blanc" du CEA à Grenoble.**

technique, Thomas Redouté, chargé du code embarqué et du contrôle à distance du système, Anaïs Milhiet, responsable du génie logiciel ; côté commercial, Jean-François Cabanel, ancien directeur commercial de Trimble, couvre l'Europe, Angela Keying-He, est en charge du marché asiatique (Taïwan, Japon, Corée du Sud, Chine), et Stéphane Pipon, développeur d'affaire basé au Canada pour le marché nord-américain.



4 © POMAGALSKI





5

**5- La passerelle Saint-Laurent à Grenoble.**

**6- Au premier plan, l'un des 11 capteurs installés sur la passerelle Saint-Laurent.**



6

### UNIQUE AU MONDE

Morphosense offre une solution de monitoring unique, en temps réel, continue et simultanée de la déformée, en 3D (100  $\mu$ /m) & les vibrations 3 axes (1 KHz).

« Ce système qui réalise à la fois la mesure de vibration et les mesures de déformées tel que nous le proposons est actuellement unique au monde, indique Alexandre Paléologue. Nous partons d'un capteur qui est un accéléromètre que nous utilisons de façon très particulière, sur la base de brevets sur l'architecture électronique et les algorithmes liés, qui permettent de retrouver la forme d'une structure sur laquelle nous avons réparti nos capteurs de façon efficace et rapide. »  
 « Ainsi, le même capteur mesure à la fois la déformation et les vibrations : cette faculté n'existe nulle part ailleurs : un capteur qui réalise simultanément les deux opérations sur des structures quelles que soient leur forme, leur taille et leur matériau constitutif est unique ».

Une fois que le système est installé sur une structure, il peut fournir en continu et en temps réel les paramètres modaux de la structure ainsi que sa déformée dynamique et statique.

### DÉFORMATION GÉOMÉTRIQUE 3D + VIBRATIONS 3 AXES

Le système se scinde en deux parties : une base hardware unique sur laquelle Morphosense fait tourner des algorithmes brevetés et l'ensemble des nœuds qui permettent de retrouver toutes les caractéristiques d'une géométrie 3D et d'une vibration 3 axes. La déformation géométrique 3D est un indicateur du comportement statique de la structure : la convergence sur un tunnel, la déflexion d'un tablier de pont, la torsion sur des câbles de pont haubané. La mesure des vibrations 3 axes est un indicateur du comportement dynamique de la structure : vibrations, chocs, analyse modale, analyse spectrale.

Les deux modalités "déformée 3D" et "vibrations 3 axes" sont bien entendu simultanées mais elles peuvent tout à fait être décorrélées et fournies de façon indépendante sans perte de précision. Si le système reste filaire aujourd'hui pour assurer la synchronisation parfaite des données de vibration 3 axes, Morphosense est en cours de développement d'une version sans fil pour la mesure géométrique 3D qui améliorera encore la facilité de mise en œuvre sans transiger avec les performances.

« Cela s'applique aussi bien à un ouvrage neuf qu'à un ouvrage en construction ou un ouvrage dont le vieillissement structurel peut entraîner des facteurs de risque, explique Alexandre Paléologue. Après, et c'est ce que nous visons également, au Canada, au Japon, en France, toutes les infrastructures ont dépassé leur durée de vie et se trouvent dans ce que l'on peut appeler de la prolongation de durée de vie. Notre système permet de gérer le risque associé à cette prolongation de durée de vie, c'est-à-dire d'identifier les paramètres permettant de gérer les risques. Notre système adresse tout autant la gestion de risques et la maintenance prédictive. Notre système fournit 80% des paramètres qui sont utiles pour gérer les risques de la vie d'une structure ».

Les informations mesurées sont stockées et exploitées dans le Cloud à distance pour permettre de la maintenance prédictive. En étant capable d'utiliser dans les paramètres mesurés, d'identifier dans ces paramètres les signaux faibles qui ont déjà engendré certains désordres et de les utiliser en vue de décider d'une éventuelle intervention de maintenance de façon automatique, sur un pont, sur un tunnel, ou encore sur une structure de quelque nature, forme et taille que ce soit.

« La maintenance prédictive que nous pouvons mettre en œuvre est très efficace, indique Alexandre Paléologue, car notre système fournit 80% des données qu'on utilise pour gérer un ouvrage ».



© MARC MONTAGNON

7- De gauche à droite, Jean-François Cabanel, responsable Europe et Alexandre Paléologue, président de Morphosense, lors du 15<sup>e</sup> congrès de l'AFTES à Paris.

8- L'équipe de Morphosense.  
9- Angela Keying-He, responsable du marché asiatique et, notamment, de Taiwan.

## ET LE GRAND PARIS ?

**Morphosense a déjà travaillé sur le Grand Paris avec Bouygues TP sur le monitoring d'une ouverture de gare. Grâce à sa facilité d'installation et sa précision de mesure, le système de Morphosense trouve naturellement son application dans la surveillance des avoisinants et dans la mesure de convergence des tunnels.**

**En cours de discussion avec plusieurs maîtrises d'œuvre, Morphosense devrait prochainement être impliquée dans des programmes de surveillance qui lui permettront de démontrer toute la puissance de son système temps réel, continu et de très haute précision.**

« Nous y travaillons activement grâce au concours "I-LAB", d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes<sup>(9)</sup>, dont nous sommes lauréat et qui nous permet de financer la R&D correspondant à la maintenance prédictive à partir des algorithmes d'intelligence artificielle plus tôt que nous

l'avons prévu. Cela va nous permettre de creuser plus encore l'écart avec les technologies concurrentes ».

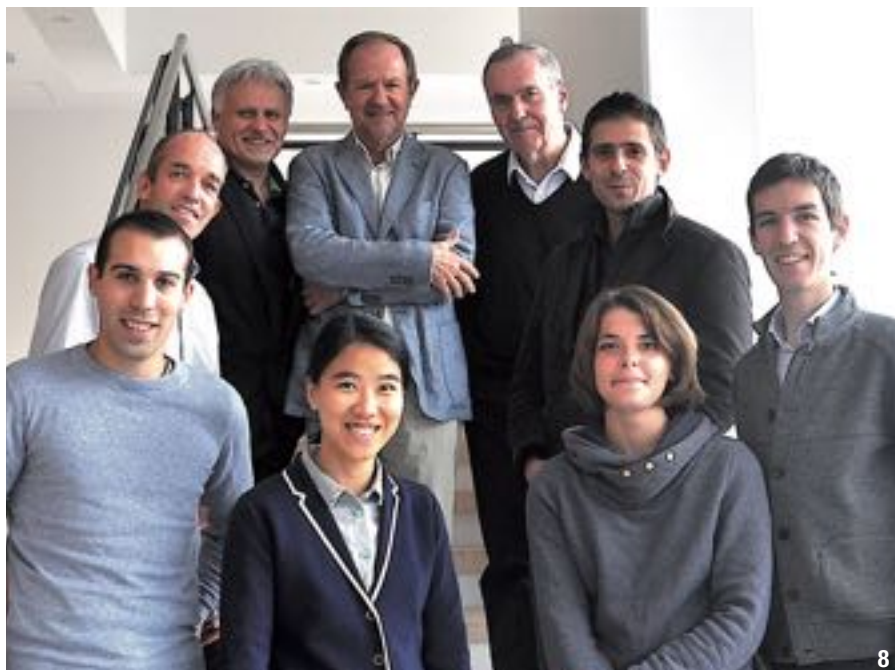
### LE SYSTÈME

Le système développé par Morphosense est un réseau de capteurs dont chacun des éléments constitue un

nœud de mesure. À l'extrémité de ce chapelet de capteurs reliés entre eux par des fils, se situe un nœud-maître dont le rôle est double : synchroniser l'ensemble des nœuds de mesure, récupérer les données et les transmettre sans fil sur le cloud, là où on va commencer à les traiter et à en extraire tous les indicateurs.

Ces capteurs sont intégrés à un boîtier au packaging étanche (IP67), résistant aux chocs, dont la connectivité est rapide et robuste et dont la chaîne de production est contrôlée tant au niveau des coûts que des délais.

En janvier 2017, dans sa première version encore à l'état de prototype, les potentiels du réseau de capteurs ont été exploités au maximum lors des premières manipulations sur plusieurs ouvrages : la Tour Eiffel, la passerelle



8



9

© MORPHOSENSE



© MORPHOSENSE  
10



© MORPHOSENSE  
11



12

Saint-Laurent à Grenoble, le paquebot Meraviglia, une alvéole du site gestion des déchets radioactifs de l'Andra à Bure (Meuse) ...

À l'issue de 9 mois d'essais intensifs de ce qui était encore un prototype, Morphosense a développé la version industrielle du capteur en collaboration avec Axandus, née en 2014 au sein du Groupe EFI Automotive. Il s'agit d'une ETI familiale (Équipementier automobile de premier rang), internationale et indé-

pendante, qui développe des capteurs, actionneurs et produits technologiques innovants pour l'industrie automobile. L'objectif d'Axandus est d'accélérer la croissance et le développement d'entreprises innovantes dans les domaines de la mécanique et des objets connectés.

« Le choix d'Axandus s'est avéré très judicieux, indique Alexandre Paléologue, car cette entreprise œuvre dans le domaine automobile, c'est-à-dire

des produits robustes utilisés dans des environnements complexes et difficiles. Ce qui s'apparente bien aux impératifs de l'univers des Travaux Publics. De plus, Axandus nous a suggéré des choix techniques garantissant la fiabilité de notre produit ».

« S'agissant de la calibration, en particulier, il était impératif que nos capteurs puissent mesurer la déformée et les vibrations dans des plages de  $-45^{\circ}\text{C}$  à  $+80^{\circ}\text{C}$ . Nous avons donc développé,

en collaboration avec le CEA, une machine de calibration spécifique qui nous permet de calibrer une dizaine de nœuds en parallèle selon les angles, la température et les vibrations. Là encore, cette machine est unique au monde ».

Morphosense dispose désormais d'un réseau de sous-traitants permettant d'approvisionner les éléments de sa solution tout en assurant la maîtrise des coûts et des délais.

L'ensemble des autres composants, électroniques notamment, sont fabriqués en Europe et assemblés dans les ateliers de Morphosense qui assure l'intégration et la calibration finale, qui nécessitent un savoir-faire essentiel.

« L'intérêt du système apparaît clairement si on le compare à ceux existant sur le marché, comme les théodolites par exemple. Le déploiement du réseau de capteurs Morphosense est rapide et simple : la mise en œuvre ne nécessite aucune compétence particulière. Le système Morphosense est insensible à la poussière, aux conditions optiques et résistant aux chocs d'un environnement de chantier. Enfin, le système fonctionne en temps réel, est continu et fournit les informations de déformée 3D et vibrations 3 axes simultanément. ▽

**10- Le "nœud" de mesure mis au point par Morphosense.**

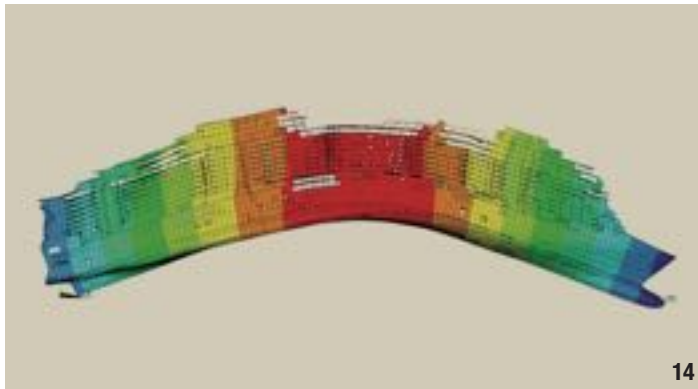
**11- La machine de calibration, unique au monde, développée avec le CEA.**

**12- Intégration des capteurs dans le laboratoire de l'entreprise à Grenoble.**

**13- Des capteurs MEMS prêts à être expédiés sur un chantier.**



© MORPHOSENSE  
13



14



15

Au niveau de la maintenance, si un nœud de mesure ne fonctionne plus - ce qui est mis immédiatement en évidence par la télémaintenance - son remplacement ne prend que quelques secondes, sans aucune perte d'information ».

#### TAÏWAN ET CANADA : DEUX MARCHÉS DE CONQUÊTE

Morphosense s'intéresse également à l'international et deux démarches ont déjà été initiées en direction du Canada et de Taïwan.

Taïwan est un pays situé à la jonction de trois plaques tectoniques, c'est-à-dire dans une zone fréquemment sujette à des tremblements de terre, des microséismes voire des séismes et des typhons. Dans ce pays soumis fréquemment à des catastrophes naturelles, les infrastructures sont très sollicitées.

« Les taïwanais sont conscients de ces problèmes et très soucieux de pouvoir y remédier. Mais Taïwan est un marché asiatique avec une culture très particulière. C'est la raison pour laquelle nous avons intégré à notre équipe Angela Keying-He, d'origine chinoise. Angela nous a permis de bien identifier le marché asiatique - Taïwan, Japon, Corée du

Sud, Chine - et d'en avoir une bonne approche. Notre choix s'est porté en priorité sur Taïwan car il s'agit du marché le plus ouvert sur le monde occidental et sur l'instrumentation via une aide extérieure. Nous avons déjà conclu

un accord avec un laboratoire national gouvernemental spécialisé dans les essais sur les systèmes antisismiques et nous sommes en train d'identifier les sites dans lesquels nous pourrions faire des démonstrations ».

#### MAINTENANCE PRÉDICTIVE POUR LE MARCHÉ ÉOLIEN

**Morphosense a été sélectionnée pour bénéficier du programme "Boostway" de KIC Innoenergy fin octobre 2017.**

**Ce programme va permettre de financer et d'initier les démarches de prospection et de commercialisation de sa solution de maintenance prédictive et de mesure de la déformée 3D et des vibrations 3 axes sur le marché des éoliennes offshore dans les pays d'Europe du Nord dont le Danemark.**

**En France, d'ici à 2020, 20% de l'énergie consommée devrait provenir des énergies renouvelables. Selon les projections du Grenelle de l'environnement, la moitié de cette énergie devrait être fournie par l'éolien.**

**La fiabilité et la sécurité des équipements constituent donc un enjeu majeur sur ce marché en plein développement. C'est pourquoi la solution Morphosense a été retenue. En effet, elle représente une offre unique de service global de monitoring, depuis la captation de la mesure à la restitution en temps réel, en continu et en simultané des deux indicateurs : déformée 3D (100µm/m) + vibrations 3 axes.**

**InnoEnergy est une société européenne qui soutient l'innovation, la création d'entreprise et la formation dans les énergies durables. Morphosense a été reconnue comme une start-up à fort potentiel. Elle en est fière.**

**Le projet démarrera fin 2017 pour une durée de 2 ans.**

Morphosense tisse également des contacts au Canada où les conditions climatiques accélèrent le vieillissement des structures. Le suivi de la santé structurelle des structures est donc primordial pour minimiser les risques et optimiser les coûts de maintenance. Un contrat avec le MTQ (Ministère du Transport Québécois) est en passe d'être signé pour instrumenter un pont.

#### PREMIÈRES RÉFÉRENCES DÉJÀ EMBLÉMATIQUES

La passerelle Saint-Laurent qui relie le plus vieux quartier de Grenoble à son centre-ville est "emmaillotée" dans une grande bâche depuis octobre 2016.

14- Modèle numérique du "Meraviglia".

15- Le "Meraviglia", un mastodonte de 315 m de long.

16- Le pont des Piles, à Grand-Mère, au Québec.

17- Mise en place de l'instrumentation dans le pont des Piles.



16



17

## UNE OUVERTURE POUR L'AVENIR

Parmi ses "expérimentations" récentes, Morphosense a, pour EDF, instrumenté de façon très complète une poutre en béton. L'objectif était de vérifier la facilité et la qualité de pose de sa solution ainsi que les performances vibratoires de son système. Une deuxième expérimentation est prévue avec EDF Q22018 sur une maquette à l'échelle réduite, dite "Vercors", d'une mini-centrale nucléaire et de ses éléments structurants afin de démontrer les performances du système Morphosense sur la déformée.

« La première expérimentation sur la poutre EDF, précise Alexandre Paléologue, a permis de démontrer que la méthode de fixation et l'interface mécanique du système Morphosense étaient extrêmement performantes et elles ont été validées par EDF, dont les fortes exigences en matière de protocole de fixation et d'instrumentation d'ouvrages d'art, sont connues ».



Il s'agit de donner une deuxième vie à ce pont historique construit au-dessus de l'Isère en 1837 et complètement usé par la corrosion.

À Paris, l'entreprise a instrumenté la Tour Eiffel, à l'aide de 10 capteurs sur une longueur de 130 m, pendant un mois, pour un problème structurel très ponctuel qu'elle était, selon Alexandre Paléologue, la seule à pouvoir identifier. Dans un tout autre domaine, Morphosense a été chargée d'instrumenter le paquebot géant Meraviglia, ("Merveille" en italien).

Le Meraviglia, le plus gros paquebot jamais construit pour un armateur européen - en l'occurrence l'italo-suisse MSC -, a pris la mer pour Le Havre en mai 2017 après avoir été baptisé en présence du premier ministre et ancien maire de la cité portuaire Edouard Philippe. Le MSC Meraviglia est un mastodonte de 315 m de long et 65 m de haut, jaugeant 171 598 t. Il pourra accueillir quelque 5700 passagers. L'opération s'est effectuée alors que le paquebot était encore en cale sèche aux chantiers navals de STX Europe à Saint-Nazaire. STX réalisait des

mesures indirectes de la géométrie de mise en position avec des jauges de contrainte à un endroit structurellement un peu fragile pour vérifier les mouvements normaux de torsion, de vrillage et de flèche observés lors de la mise en eau, en raison de la poussée d'Archimède.

STX a chargé Morphosense de mesurer la géométrie du Meraviglia avec son système. Elle a travaillé en aveugle, sans a priori sur les résultats attendus. Les valeurs de déformée restituées ont été réinjectées dans le modèle numérique du bateau et ont permis à STX

**18- L'un des « nœuds » de mesure installé par Morphosense sur une poutre en béton précontraint EDF.**

**19- Pour EDF, Instrumentation d'une poutre en béton précontraint.**

de recalculer le modèle numérique et de corréler les mesures indirectes classiquement effectuées.

Pour STX Europe, il s'agissait d'une première mondiale.

Parmi les références de la jeune start-up figure également l'instrumentation d'une alvéole de stockage dans le centre d'enfouissement des déchets radioactifs de l'Andra (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radiocatifs) à Bure (Meuse). L'idée était d'étudier durant cinq mois, en partenariat avec Egis, d'août à décembre 2016, les phénomènes de convergence (ou d'ovalisation) de ce micro-tunnel long de plusieurs dizaines de mètres et d'un diamètre de 70 cm. Six capteurs ont été mis en place sur l'intrados de l'alvéole, à une vingtaine de mètres de profondeur.

Les résultats se sont avérés plus précis que ceux obtenus avec des cannes de convergence.

### UN CONSTAT ÉPIFANIANT

Trois constats corroborent la vision d'avenir qu'ont eue ses fondateurs en créant Morphosense.

Aux États-Unis, plus de 12% des ponts (sur plus 600 000) sont, d'après la Société Américaine de l'Ingénierie Civile, classifiés comme structures déficientes.

En 2023, les infrastructures de plus de 50 ans représenteront 50% du parc au Japon. Le risque d'incident au kilomètre impactant la sécurité des infrastructures sera alors multiplié par 5, d'après le MLIT<sup>(4)</sup>.

En France, un pont ferme chaque jour. Il devient urgent de se pencher au chevet des ouvrages d'art, un patrimoine construit, pour l'essentiel, dans les années 1950. □

1- Baptisée "Supernova Invest", la nouvelle société a repris les fonds de CEA Investissement. Elle est codétenue à 40% par le CEA, 40% par Amundi Private Equity Funds et 20% par l'équipe de gestion.

2- Amundi est le premier gestionnaire d'actifs européen en termes d'encours avec plus de 1 000 milliards d'euros sous gestion.

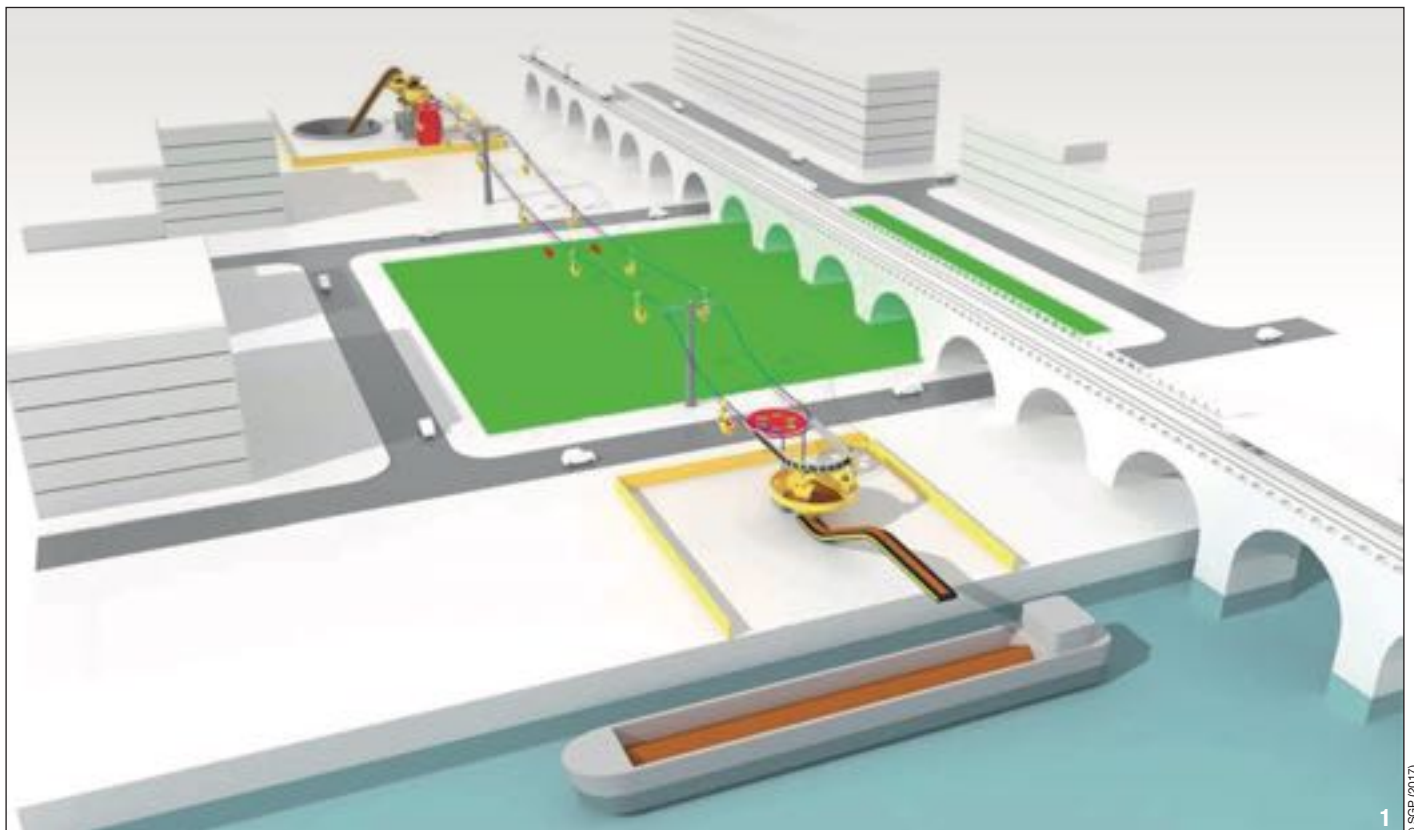
3- I-LAB est un concours national d'aide à la création d'entreprises innovantes né de la volonté du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation d'encourager l'esprit d'entreprendre, avec la participation de BPI France.

4- MLIT : Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan.

# LES DÉBLAIS DU GRAND PARIS EXPRESS : UN ENJEU DE 45 MILLIONS DE TONNES

AUTEUR : FABIEN BOUDRIERES, RESPONSABLE DE LA MISSION DE GESTION DES DÉBLAIS, ARCADIS/ARTEMIS

OPTIMISER LA GESTION DE 45 MILLIONS DE TONNES DE TERRES EXCAVÉES EN 10 ANS, C'EST UN DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX MAJEURS DU PROJET DU GRAND PARIS EXPRESS. LA SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS, MAÎTRE D'OUVRAGE, ACCOMPAGNÉE D'ARTÉMIS, ASSISTANT À MAÎTRISE D'OUVRAGE GÉNÉRALE, DÉVELOPPENT DEPUIS 2012 UNE STRATÉGIE DE GESTION DES DÉBLAIS QUI SE VEUT EXEMPLAIRE ET OPÉRATIONNELLE. ELLE EST OBJECTIVÉE SELON TROIS GRANDS AXES : LA TRAÇABILITÉ DES TERRES SORTANT DES CHANTIERS, LA VALORISATION DES MATÉRIAUX, ET LA LIMITATION DES NUISANCES ENVIRONNEMENTALES ASSOCIÉES À LA GESTION DES DÉBLAIS, NOTAMMENT PAR LE RECOURS OPTIMISÉ AU TRANSPORT FLUVIAL ET FERROVIAIRE.



## INTRODUCTION

Au lancement du projet du Grand Paris Express (GPE), la problématique de gestion des déblais a été rapidement identifiée comme un sujet d'attention du programme. Les 200 km de tunnels à creuser et les 68 gares qui les jalonnent, sans oublier les nombreux

ouvrages annexes (puits de service, ventilation et sécurité) parmi l'ensemble des autres ouvrages indispensables au fonctionnement du réseau de métro (dont les centres d'exploitation), induiront une production de terres excavées évaluée à environ 23 millions de mètres cubes en place,

**1- Représentation schématique du projet du « 1<sup>er</sup> kilomètre à câble ».**

**1- Schematic representation of the «First kilometre by cable» project.**

ou 45 millions de tonnes (figure 2). Ce volume extraordinaire, pour le plus grand projet européen, est produit depuis le printemps 2016 et pour une dizaine d'années environ. Il représente à lui seul 10 à 20% du volume annuel des déchets produits en Île-de-France sur la période considérée.

2- Volumes et flux de déblais produits par le programme.

3- Schéma des axes d'action en matière de gestion des déblais.

4- Grille de classification sommaire des déblais selon leur qualité chimico-prévisionnelle.

5- Qualité prévisionnelle des déblais.

2- Volumes and flows of excavated material produced by the programme.

3- Diagram of main lines of action regarding management of excavated material.

4- Rudimentary grid for classification of excavated materials according to their foreseeable chemical properties.

5- Foreseeable properties of excavated material.

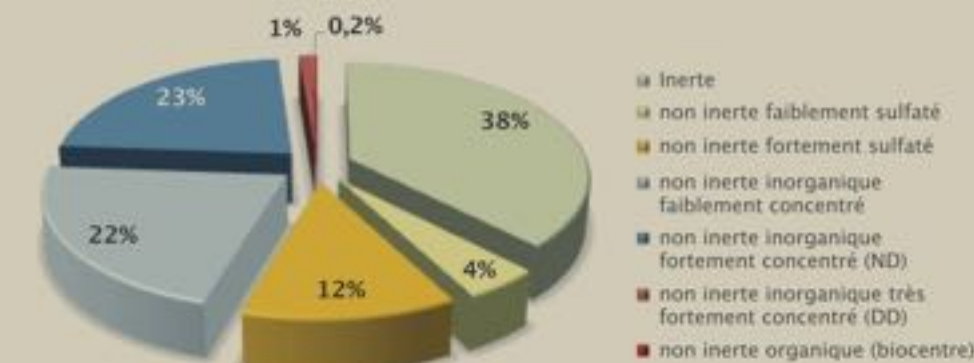


© SGP (2017) – SCHÉMA OPÉRATIONNEL DE GESTION ET DE VALORISATION DES DÉBLAIS

### GRILLE DE CLASSIFICATION SOMMAIRE DES DÉBLAIS SELON LEUR QUALITÉ CHIMICO-PRÉVISIONNELLE



### QUALITÉ PRÉVISIONNELLE DES DÉBLAIS



La Société du Grand Paris s'est donc engagée dans une démarche d'anticipation de la gestion des déblais, dans l'objectif de réduire les nuisances pour les riverains et l'environnement. Celle-ci s'est traduite dès 2012 par le Schéma Directeur d'Évacuation des Déblais (SDED) décliné à l'échelle de chacune des lignes.

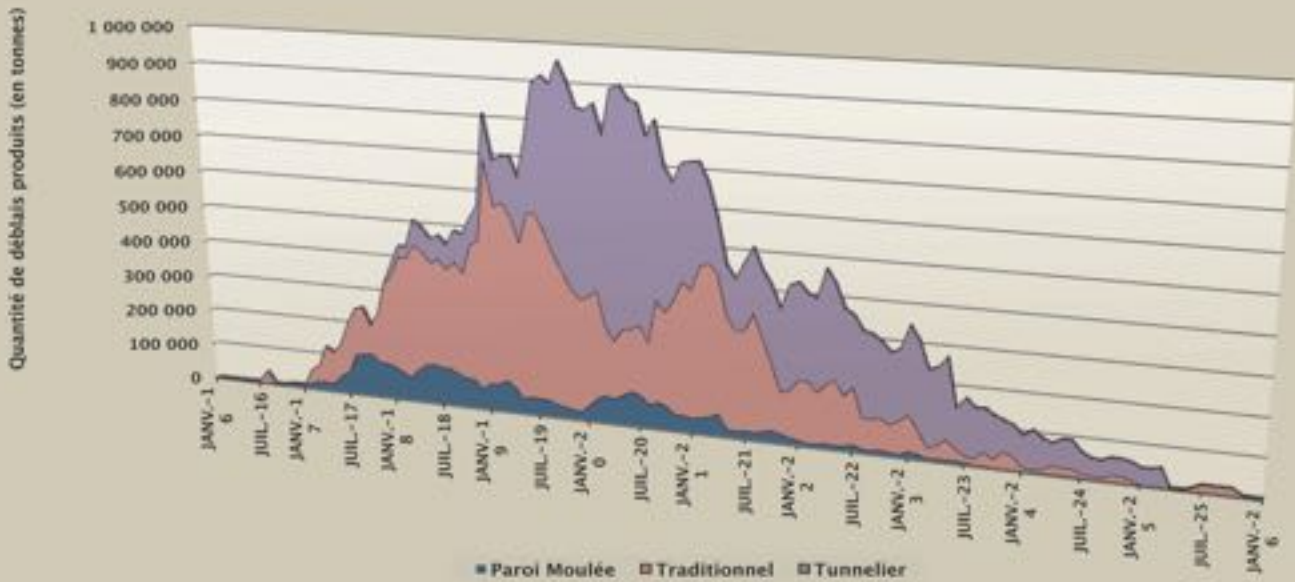
Les enjeux de la gestion des déblais en Île-de-France et pour les travaux du Grand Paris Express sont donc multiples. Ils sont notamment économiques, environnementaux, réglementaires ou encore concurrentiels.

Pour anticiper, évaluer, et maîtriser les risques associés à la gestion des déblais, la Société du Grand Paris s'appuie sur les équipes de projet de chaque ligne, maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre, mais aussi sur une équipe transverse environnementale dédiée (Direction de l'Ingénierie de l'Environnement, DIE).

Avec le conseil depuis 2014 d'une équipe spécialisée d'Artémis (Groupement d'AMOG composé d'Artélia, Arcadis et BG 21) en Gestion des Matériaux Excavés (GEME), la Société du Grand Paris met donc en œuvre un programme d'actions qui se veut exemplaire, ambitieux, innovant et qui, pour se faire, s'appuie sur trois grands axes<sup>(1)</sup> :

- Garantir une traçabilité optimale et opérationnelle des déblais ;
  - Favoriser le transport par voie fluviale et ferroviaire au détriment du transport routier des matériaux ;
  - Préférer la valorisation des terres naturelles excavées à un enfouissement en installation de stockage.
- Le programme des actions menées par l'équipe s'intéresse à tous les tenants et aboutissants de la gestion des déblais :
- La sécurisation du cadre réglementaire et la contribution à l'évolution des pratiques ;
  - L'évaluation et l'anticipation des modes de gestion possibles des terres, par leur caractérisation et leur analyse préalable ;
  - La mise en œuvre, voire le développement d'outils décisionnels, contractuels et de contrôle adaptés au projet et à ses spécificités ;
  - Des prescriptions opérationnelles aux entreprises qui se veulent volontaires et incitatives ;
  - Des partenariats et consultations nombreux avec l'ensemble des acteurs de la gestion des déblais ;
  - La recherche continue de solutions innovantes.

## PRODUCTION PRÉVISIONNELLE DE DÉBLAIS PAR MODE D'EXCAVATION



6 © ARCADIS

Le Schéma de Gestion et de Valorisation des Déblais (figure 3) synthétise l'ensemble des actions menées depuis 2012 ou engagées pour les années à venir, par la Société du Grand Paris et Artémis en matière de gestion des déblais.

### POUR UNE TRAÇABILITÉ EXEMPLAIRE

Les modes de gestion des déblais sont notamment conditionnés par le statut de déchet qu'acquière les déblais à la sortie de l'enceinte d'un chantier. Le cadre réglementaire qui contraint la gestion des déblais s'articule notamment autour de :

- La circulaire du 24 décembre 2010, relative aux activités de traitement de déchets ;
- L'arrêté ministériel du 12 décembre 2014, relatif aux conditions d'admission des déchets inertes en ICPE ;
- La note ministérielle du 25 avril 2017, relative aux modalités d'application de la nomenclature des installations classées pour le secteur de la gestion des déchets.

En regard de ce cadre réglementaire spécifique aux déchets, mais qui s'applique donc dans le cadre du programme à une quantité inhabituelle de terres pour leur très grande majorité naturelles (95 % des terres ne sont pas polluées), différentes démarches participatives sont menées avec le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, que sont par exemple :

- La modification par l'arrêté ministériel du 30 septembre 2016, de l'arrêté du 22 septembre 1994 qui facilite le remblaiement des

carrières de gypse par des déblais sulfatés et qui leur ouvre ainsi une capacité de stockage importante.

- La participation à plusieurs groupes de travail pour l'évolution des guides de réutilisation des terres excavées issues de sites potentiellement pollués, guide de valorisation des déblais en technique routière (pilotage Umtrm et Cerema), ou bien des projets de guides de revalorisation (Frtp), sur l'économie circulaire avec la région Île-de-France.

Le statut de déchet n'empêche pas la valorisation des déblais. Toutefois,

**6- Production prévisionnelle de déblais par mode d'excavation.**

**7- Traçabilité des déblais - Schématisation des logistiques de transport.**

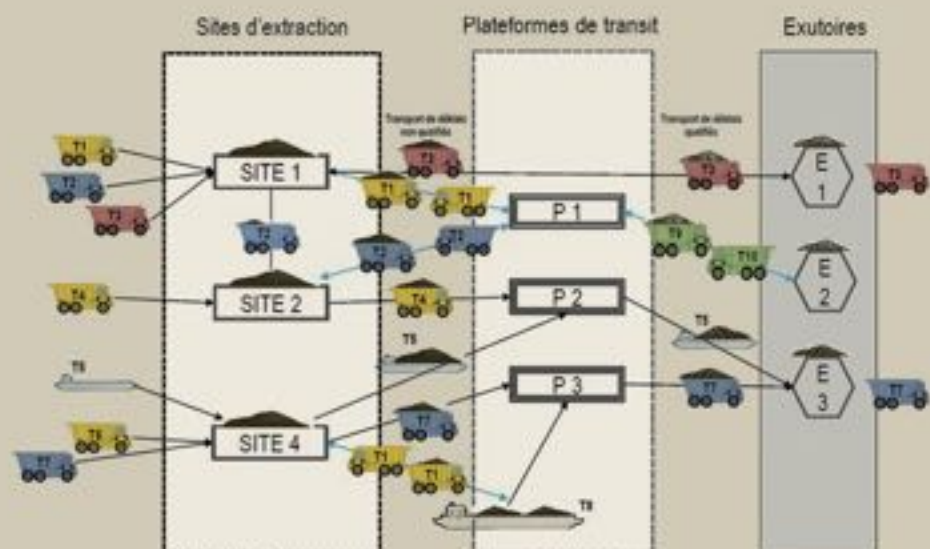
**6- Foreseeable production of excavated material by excavation method.**

**7- Traceability of excavated materials - Schematic representation of transport logistics.**

il peut constituer parfois un frein à la valorisation des matériaux par la responsabilité forte qu'il implique sur la Société du Grand Paris, en tant que fournisseur du terrain, et sur le maître d'ouvrage de l'aménagement receveur. Aussi, la traçabilité des déblais est-elle utilisée dans le cadre du programme comme un levier sur lequel il s'appuie et une garantie opposable favorisant la valorisation des déblais.

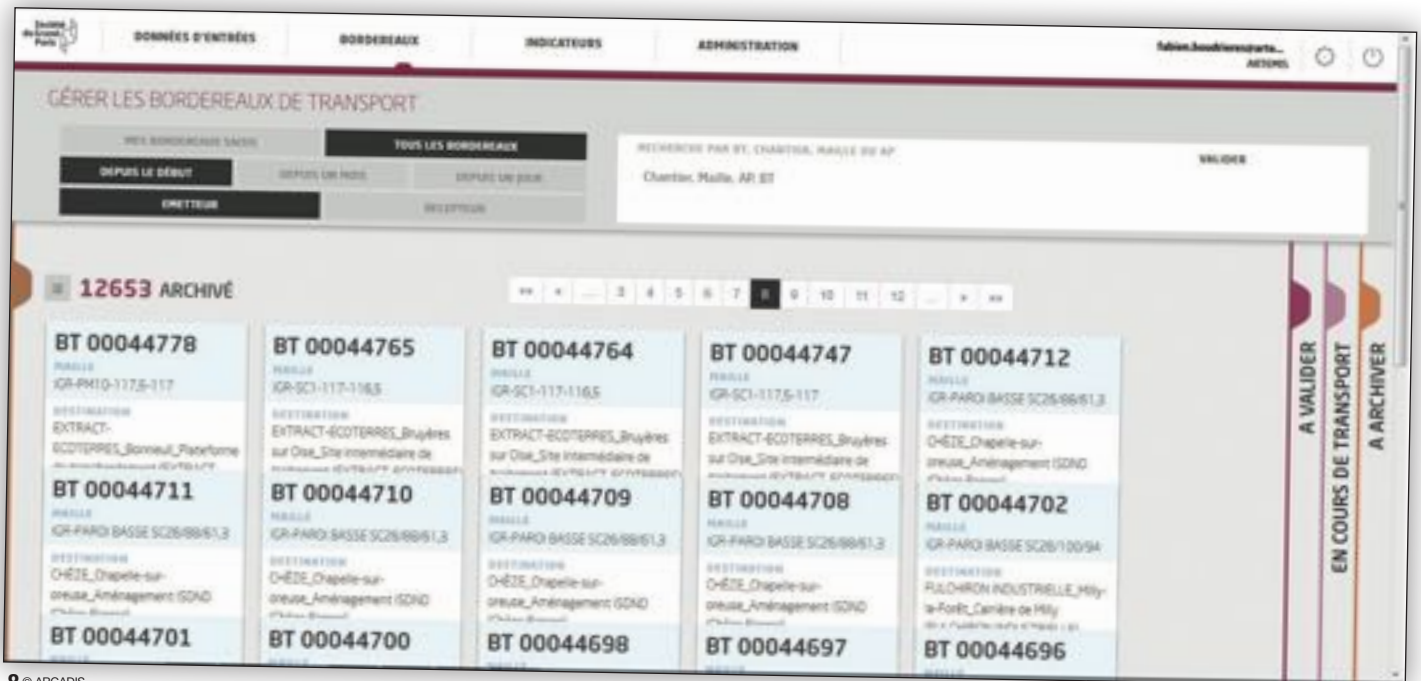
Le schéma de traçabilité comprend en premier lieu une caractérisation chimique et géotechnique des matériaux particulièrement dense sur le projet.

## TRAÇABILITÉ DES DÉBLAIS - SCHÉMATISATION DES LOGISTIQUES DE TRANSPORT



7 © ARCADIS





8 © ARCADIS

Trois bureaux d'études spécialisés en environnement, pilotés par la SGP et son AMOG, acquiert depuis 2014 les données relatives à la qualité des sols tant au droit des gares et ouvrages annexes que des tunnels :

- Plus de 6 000 échantillons de sols ont été ainsi analysés fin 2017, pour une représentativité de l'ordre d'un échantillon pour 6 000 t ;
- Plus de 20 entreprises de forage ont réalisé 1 100 sondages environnementaux.

Ces investigations préalables étoffent les dossiers de consultation des entreprises des travaux de génie civil. Elles seront complétées par ces derniers par un programme complémentaire, prescrit par la Société du Grand Paris, qui comprendra :

- Une analyse par maille de 200 m<sup>3</sup> de sols en place pour les terrassements en fouille depuis la surface ;
- Une analyse par lot de 500 m<sup>3</sup> pour les terrassements au tunnelier.

Cette prescription volontaire vise en particulier à optimiser le choix des filières de gestion des matériaux.

Compte tenu de la cadence moyenne d'avancement d'un tunnelier, la fréquence d'analyse représente ainsi 2 à 3 analyses par jour de creusement. In fine, ce seront environ 90 000 analyses qui auront permis de trier les matériaux et en définir la filière optimale, tant du point de vue environnemental que financier.

Les reconnaissances préalables ont permis d'identifier 27 formations lithologiques traversées. Ces horizons, souvent profonds de plusieurs dizaines de mètres, sont en très grande majorité exempts de pollution anthropique. Cependant, leur caractère inerte n'est pas garanti vis-à-vis de différents marquages naturels : sulfates, fluorures ou bien métaux tels que le sélénium ou le molybdène. Un référentiel simplifié (figure 4) est utilisé pour établir un premier classement prévisionnel des matériaux excavés.

Il met en évidence, à l'échelle du programme, une répartition prévisionnelle des matériaux excavés (figure 5) dont :

- Environ 40 % des déblais inertes au sens des critères analytiques d'acceptation en Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) ;
- Environ 20 % seraient acceptables en carrière de gypse ;
- Une même proportion respecterait les critères d'admissions en ISDI avec dérogation de seuils ;
- Enfin les 20 % restants sont nettement marqués naturellement, avec une très faible proportion polluée (moins de 5 %).

De plus, en vue notamment de l'optimisation de la réutilisation des matériaux, les volumes sont discrétisés en fonction de leur mode d'excavation (figure 6), auquel sont associées des caractéristiques géotechniques plus ou moins favorables :

- Les terrassements en pleine fouille pour lesquels le tri est moins con-

trait et la cohérence préservée ;

- Les terrassements de parois moulées, qui nécessiteront une préparation avant réutilisation et un tri post-excavation ;
- Enfin, les creusements par tunneliers qui représentent près de la moitié des déblais, pour lesquels l'ajout d'adjuvants au creusement et le mode de marinage peut contraindre leur transport et limiter leur réemploi. Le marinage hydraulique avec usine de séparation présente un réel avantage tant sous l'aspect du volume et de la consistance des matériaux à évacuer (faible teneur en eau) que sous l'aspect de leur réutilisation (tri granulométrique). Il est toutefois souvent plus onéreux et cela nécessite une surface d'installations de chantier souvent plus importante que les emprises disponibles des chantiers du GPE dans son environnement urbain.

8- Écran de la plateforme web de traçabilité des déblais dédiée au projet.  
9- Chantier environnement urbanisé.

8- Screen of the project-dedicated web platform for traceability of excavated material.  
9- Worksite in an urbanised environment.



© ARCADIS 9

## LOCALISATION DES SITES ÉTUDIÉS POUR L'ÉVACUATION FERROVIAIRE DES DÉBLAIS - SGP (2017)

10- Localisation des sites étudiés pour l'évacuation ferroviaire des déblais - SGP (2017).

11- Localisation des plateformes de la SGP pour l'évacuation par voie d'eau - SGP (2017).

10- Location of the sites examined for removal of excavated material by rail - SGP (2017).

11- Location of SGP's platforms for removal by waterway - SGP (2017).



10

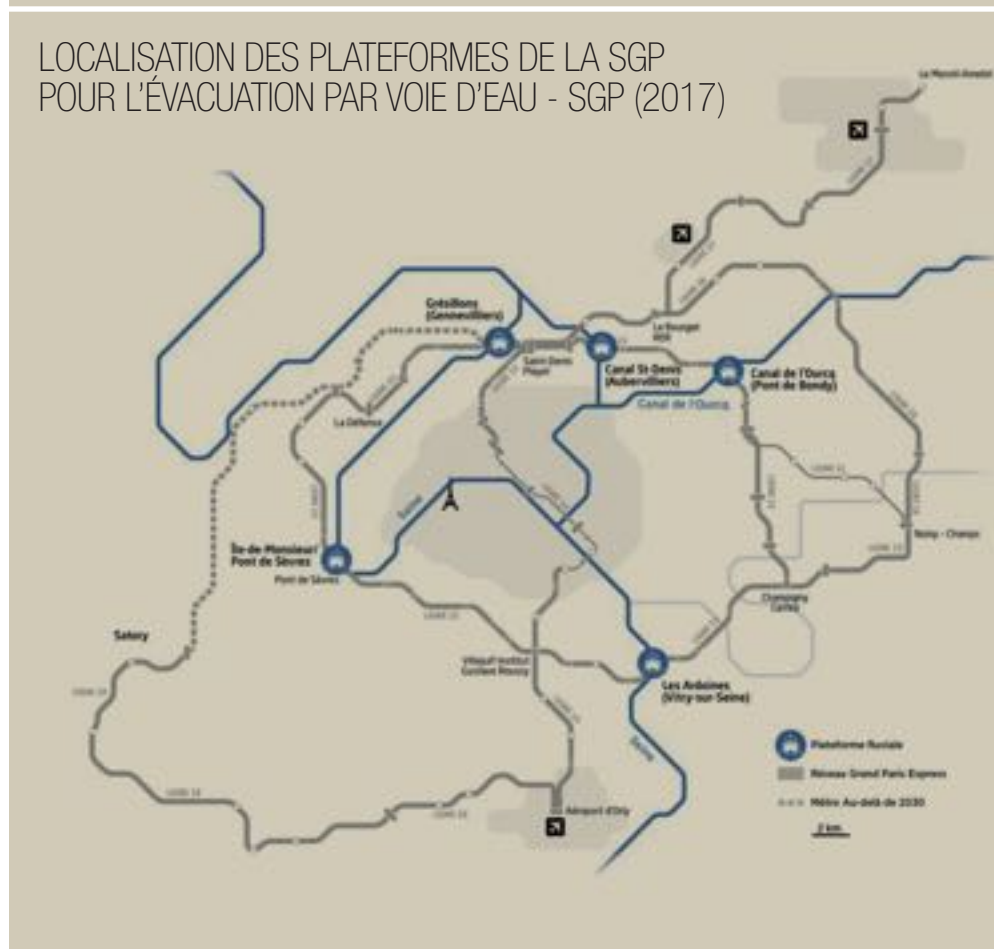
© SGP (2017) - SCHEMA OPÉRATIONNEL DE GESTION ET DE VALORISATION DES DÉBLAIS

## LOCALISATION DES PLATEFORMES DE LA SGP POUR L'ÉVACUATION PAR VOIE D'EAU - SGP (2017)

La traçabilité opérationnelle de ces déblais en phase chantier, produits par 200 chantiers environ dont plusieurs dizaines concomitantes (les plannings prévisionnels 2017 estiment que plus de 20 tunneliers pourraient creuser durant la même période, aux alentours de 2020) engendrera l'émission de plus de 2 millions de bordereaux de transport.

Sur la base de ce constat, et pour garantir une amélioration continue des pratiques de gestion et une réactivité à la mesure de ses responsabilités, Artémis a créé pour la Société du Grand Paris en 2016, son propre outil de traçabilité. La plateforme web, associée à une base de données hébergée par la SGP, est imposée à tous les acteurs de la chaîne logistique des déblais dans le cadre des marchés de génie civil. L'entreprise de terrassement prépare et émet les bordereaux, tandis que les sites de tri, de transbordement ou de valorisation les amendent, pour finir par l'enregistrement du traitement final du matériau à l'exutoire (figure 7). Le bordereau (figure 8), émis dès la sortie du chantier, est automatiquement enregistré et traité par la plateforme. La pesée des matériaux, imposée à la sortie de chaque chantier et à l'entrée de chaque site destinataire, est ainsi traitée pour fournir à la Société du Grand Paris des indicateurs de gestion mis à jour en continu.

À novembre 2017, ce sont plus de 37500 bordereaux de transport unitaires entre 2 points logistiques, qui sont enregistrés et traités par les 100 comptes ouverts.



11

© SGP (2017) - SCHEMA OPÉRATIONNEL DE GESTION ET DE VALORISATION DES DÉBLAIS

La quantité de déblais enregistrée dans la base de données est de l'ordre de 700 000 t.

Les matériaux réemployés et les déblais destinés à la valorisation en projets d'aménagements sont enregistrés par cette traçabilité.

La plateforme web, grâce au retour d'expérience des premiers chantiers

du programme, sera associée courant 2018 à une interface sous la forme d'une application (windows, android et IOS), qui améliorera son opérationnalité terrain et pourra permettre d'étudier l'interconnexion de la plateforme avec des solutions externes d'entreprise complémentaires (pesées automatiques télé-transmises, autres outils de traçabilité...).

### LA RÉDUCTION DES NUISANCES ENVIRONNEMENTALES LIÉES AU TRANSPORT ROUTIER

L'optimisation de la logistique de transport des déblais et des modes de transport alternatifs à la route est portée par une volonté de limiter au mieux les nuisances autour des chantiers et le bilan carbone de l'opération.



© ARCADIS

12

L'environnement de la majorité des chantiers est en effet fortement urbanisé, contraint en espaces disponibles, et situé au cœur de secteurs congestionnés en termes de trafic routier. C'est donc dans l'objectif de limiter les nuisances supplémentaires liées au transport usuel par camions, notamment, que les actions suivantes ont été menées :

- La localisation spécifique de certains chantiers en bord de voie d'eau ou adossés à une installation terminale embranchée ferroviaire (ITE) (figure 9) ;
- Une démarche de labellisation des exutoires destinés à recevoir les déblais du projet du Grand Paris Express, visant en particulier à identifier, localiser et promouvoir les exutoires équipés de quais ou embranchements ferroviaires ;
- Des partenariats localisés avec les acteurs du domaine du transport ferroviaire ou fluvial ;

**12- Installation de transport de déblais par bande transporteuse (franchissement sur le secteur de Bry-Villiers-Champigny).**

**13- Carte d'implantation des exutoires labélisés par la SGP en août 2017.**

**12- System for transport of excavated material by conveyor belt (passing through the Bry-Villiers-Champigny sector).**

**13- Layout map of outlets labelled by the SGP in August 2017.**

→ La contractualisation de clauses incitatives au transport alternatif au transport routier pour certains marchés de Génie Civil.

La Société du Grand Paris mène des actions coordonnées d'études et de partenariat, pour appliquer sa stratégie d'évacuation des déblais qui vise à limiter l'impact environnemental.

L'application de ces objectifs participe ainsi à l'atteinte des engagements fixés par la Loi de transition énergétique. Elle s'est traduite par un objectif global de 30 à 50 % de transport alternatif au transport routier, décliné à l'échelle de chaque marché de génie civil dans son environnement propre. Il s'entend pour les trajets à partir des chantiers et vise avant tout à limiter les nuisances dans les zones les plus urbanisées que sont les implantations du programme.

Au stade du projet, et avec une mise en œuvre sur la Ligne 15 Sud (Noisy-Champs/Pont-de-Sèvres) depuis 2016, il est ainsi prévu :

→ 4 sites d'évacuation directe depuis les chantiers des déblais par voie ferroviaire (figure 10) à Bry-Villiers-Champigny (Ligne 15 Sud), La-Courneuve/Le-Bourget (Ligne 16), à Aulnay (Ligne 16) et à Drancy/Bobigny (Ligne 15 Est) ;

→ 5 sites d'évacuation par voie fluviale (figure 11) à Pont-de-Sèvres et aux Ardoines (Ligne 15 Sud) à Auber-villiers (Ligne 15 Est et Ligne 16), à Pont-de-Bondy (Ligne 15 Est) et enfin à Gennevilliers (Ligne 15 Ouest).

Enfin, des solutions complémentaires sont étudiées ou mises en œuvre pour des transferts plus courts, allant de quelques centaines de mètre à 2 km, qui sont :

→ Les bandes transporteuses (figure 12), pour notamment de nombreux préacheminements vers des sites de transbordement (sites à proximité du canal de Saint Denis par exemple) ;

CARTE D'IMPLANTATION DES EXUTOIRES LABÉLISÉS PAR LA SGP EN AOÛT 2017



© ARCADIS

13

## CHARTRE DE BONNES PRATIQUES

### POUR LA GESTION DES DÉBLAIS DU GRAND PARIS EXPRESS

La Société du Grand Paris souhaite gérer les terres issues du creusement des ouvrages du Grand Paris Express dans le respect des riverains et de l'environnement.

La stratégie mise en place à cet effet par la Société du Grand Paris repose sur les trois axes stratégiques suivants : la traçabilité, le recours aux transports alternatifs à la route et la valorisation des matériaux.

En tant qu'entreprise responsable, nous participerons à l'atteinte des objectifs environnementaux de la Société du Grand Paris, dans le strict respect de la réglementation en vigueur.

#### NOS ENGAGEMENTS

Assurer la traçabilité des déblais issus des chantiers du Grand Paris Express que nous gérons, à travers l'utilisation systématique de l'outil de traçabilité créé et mis à disposition par la SGP

Favoriser la valorisation des déblais en tant que matériaux, en application des principes de l'économie circulaire

Faire preuve d'équité dans les relations commerciales avec les parties prenantes intervenant dans la gestion des déblais

Nom de l'entreprise, date, cachet et signature

Privilégier le recours à des modes de transports alternatifs à la route, par voie fluviale et/ou ferroviaire

Contribuer au développement d'exutoires en toute transparence avec la Société du Grand Paris, en regard des besoins

Développer une démarche d'amélioration continue en matière de respect de l'environnement pour la gestion des déblais

© SGP (2017) 14

→ Des dispositifs de transport « par câble » (figure 1), étudiés sur plusieurs sites nécessitant un franchissement (route, voie ferrée, ...) et distants de quelques centaines de mètres d'un site de transport fluvial. Cette solution innovante a été retenue dans le cadre de l'Appel À Projet d'Innovation relatif à la gestion des déblais.

Des dispositifs contractuels d'incitation financière au transport fluvial et ferroviaire sont, à ce titre, inclus dans les marchés de génie civil, à hauteur de plusieurs euros par tonne.

#### L'OPTIMISATION DE LA GESTION DES DÉBLAIS PAR LA VALORISATION

En transposition des objectifs de la Directive Cadre Européenne et de la loi de Transition Énergétique, la Société du Grand Paris s'est fixé un enjeu de valoriser 70 % des déblais du projet.

Cette valorisation se décline en termes programmatique en 2 grandes catégories :

- La valorisation « volume », que représentent les solutions de projets d'aménagements ou de remblaiement de carrières ;
- La valorisation « matière », qui

englobe toutes les solutions, innovantes ou non, d'intégration des déblais en tant que matière pour la fabrication de produits, bâtis ou autres solutions de réutilisation en technique routière par exemple.

L'objectif global est décliné à l'échelle de chaque marché de génie civil, sous la forme d'un dispositif contractuel d'incitation représentant lui-aussi plusieurs euros par tonne valorisée.

Trois grands axes d'action composent la stratégie globale de valorisation. Ce sont :

- Le recensement (figure 13) et la labellisation (figure 14) des exutoires par le biais desquels la Société du Grand Paris a validé, depuis décembre 2016, plus de 297 sites receveurs concernant 42 exploitants, pour lesquels un classement, en site de valorisation ou non, a été contractualisé avec l'exploitant. Cette démarche continue vise en partie à fournir aux acteurs du domaine l'ensemble des éléments programmatiques leur permettant de développer l'offre d'exutoire en regard des besoins du Grand Paris Express, adapté en termes d'accessibilité (voie d'eau, voie ferrée), de valorisation et de

#### 14- Charte de partenariat avec les exutoires.

#### 14- Charter of partnership with outlets.

catégorie (développement de certaines filières a priori sous-dimensionnées).

- Une démarche de recherche de solution d'innovation en la matière, initiée à l'automne 2016 par le lancement d'un Appel À Projet d'innovation pour la gestion des déblais et pratiquée depuis lors en continue. Cette démarche initiale a comptabilisé 70 réponses et permis de sélectionner 6 lauréats pour lesquels un partenariat d'expérimentation et d'évaluation sur le projet du Grand Paris Express a été mené en 2017.
- L'identification, l'évaluation et le développement de projets d'aménagements concomitants du programme, pour permettre aux déblais naturels valorisables du projet de trouver un exutoire plus vertueux en termes d'économie circulaire que l'enfouissement.

#### ZOOM SUR L'INNOVATION

Si la Société du Grand Paris recherche, par sa communication et les partenariats, à améliorer et optimiser les pratiques de gestion de déblais, elle ouvre en particulier une grande liberté à des propositions de solutions innovantes en matière de gestion des déblais.

Les six lauréats de l'AAP « innovation déblais » en témoignent. Ce sont les projets suivants :

- La solution « Diagnosol Express® » proposée par l'entreprise Guintoli qui consiste à développer un système de caractérisation en ligne des matériaux excavés en rupture avec les méthodes actuelles d'identification en laboratoire externe.
- La solution « ProVaDBat » proposée par les entreprises Séch Eco, Argiwest, Hoffmann, JB Technologies qui propose un procédé de valorisation des déblais pour produire des ciments et des matériaux de construction à faible empreinte carbone.
- La solution « Solpur » proposée par les entreprises Terbis et Etpo qui consiste à récupérer, retraiter et transformer des déchets minéraux pour consolider les cavités souterraines.

- La solution « TerraGenese® » proposée par l'entreprise Valorhiz permet la création de terre fertile à partir de déblais.
- La solution « Du déblai à la brique de terre crue » proposée par les entreprises Joly&Loiret, Yprema, Amàco/Grands Ateliers, Romain Anger et la Mairie de Villepreux qui consiste à transformer les déblais de chantier du Grand Paris en bri-

ques de terre crue pour le bâtiment.

- La solution « Schéma logistique d'évacuation des déblais du Grand Paris par train » proposée par les entreprises Cemex et Innofreight. Solution d'évacuation ferroviaire des déblais et de lavage automatique des conteneurs favorisant le double fret.

Le lancement des marchés de la Ligne 15 Sud est l'occasion pour la

Société du Grand Paris de mettre à l'épreuve des chantiers les objectifs environnementaux qu'elle s'est fixés en matière de gestion des déblais et des nuisances environnementales associées.

Le retour d'expérience de ces derniers permettra une amélioration continue de la stratégie de la Société du Grand Paris avec l'appui d'Artémis sur cette thématique, avec un objectif

prépondérant représenté par le développement des partenariats avec des projets d'aménagement d'envergure, dans la région élargie, dont la finalité pourra répondre à l'ensemble des objectifs visés par le maître d'ouvrage. □

1- [https://www.societedugrandparis.fr/sites/default/files/170202\\_sgp\\_sogeme\\_a3\\_paysage\\_v52.pdf](https://www.societedugrandparis.fr/sites/default/files/170202_sgp_sogeme_a3_paysage_v52.pdf)

## ABSTRACT

### EXCAVATED MATERIAL FOR THE 'GRAND PARIS EXPRESS': A 45 MILLION TONNE CHALLENGE

FABIEN BOUDRIERES, ARCADIS/ARTEMIS

Over about ten years, the 'Grand Paris Express' metro project will produce 45 million tonnes of excavated material, consisting for 95% of uncontaminated natural soils. Société du Grand Paris, assisted by Artémis, has since 2012 developed an exemplary operational strategy for management of excavated material. In the current regulatory environment, excavated material has the status of waste. The management strategy comprises three main features: traceability of earth, recycling of materials, and mitigation of environmental nuisances by the optimised use of river and rail transport. A significant role is reserved for innovation and the development of specific contractual tools and techniques. The start of work on the contracts for Line 15 South will allow continuous improvement of the strategy of Société du Grand Paris. □

### LOS ESCOMBROS DEL GRAND PARIS EXPRESS: UN DESAFÍO DE 45 MILLONES DE TONELADAS

FABIEN BOUDRIERES, ARCADIS/ARTEMIS

El metro del Grand Paris Express producirá 45 millones de toneladas de escombros a lo largo de diez años, compuestos en un 95% de suelos naturales no contaminados. La empresa Société du Grand Paris, acompañada por Artémis, desarrolla desde 2012 una estrategia de gestión de los escombros ejemplar y operativa. El contexto normativo confiere a los escombros un estatus de residuos. La estrategia de gestión consta de tres grandes ejes: la trazabilidad de las tierras, el aprovechamiento de los materiales y la limitación de los daños medioambientales mediante la optimización del transporte fluvial y ferroviario. Asimismo, confiere un papel destacado a la innovación y al desarrollo de herramientas específicas contractuales y técnicas. El inicio de los contratos de la Línea 15 Sur permitirá una mejora continua de la estrategia de Société du Grand Paris. □

www.rincent.fr



Chaussées : contrôle extérieur des travaux  
> Lots 4 et 5 ligne 15 Grand Paris



Qualité de l'Air : contrôle extérieur  
> Lot 3 de la ligne 15



Qualité de l'eau : contrôle externe d'entreprises  
> Lot T3C de la ligne 15



Contrôles externes d'entreprises  
> Ligne 11 et Lot T03 de la Ligne 14 - IdF Nord



Contrôles externes d'entreprises  
> Lignes 14, 15 Sud et 18 IdF Sud

- > Chaussées : suivi de chantiers, essais, contrôles
- > Fondations : essais non destructifs, essais statiques et dynamiques
- > Environnement : Expertise sites et sols pollués, Qualité de l'eau, Qualité de l'air
- > Essais sur bétons, matériaux, sols
- > Instrumentations d'ouvrages, vibrations



31 agences  
dont 10 agences à l'international

4 bis, rue du Bois Briard - 91080 Courcouronnes  
direction.technique@rincent.fr

# Trimble Quadri: Open BIM niveau 3

La plateforme collaborative de référence pour les bâtiments et les infrastructures



- Base de donnée 3D intelligente
- Stockage d'objets centralisé, cloud privé ou public
- Collaboration multi-équipe, multisite, interdisciplinaire
- Support workflow et processus BIM
- Interfacé avec tous les outils CAO en place

 **Trimble**  Quadri

En savoir plus, rendez-vous sur :

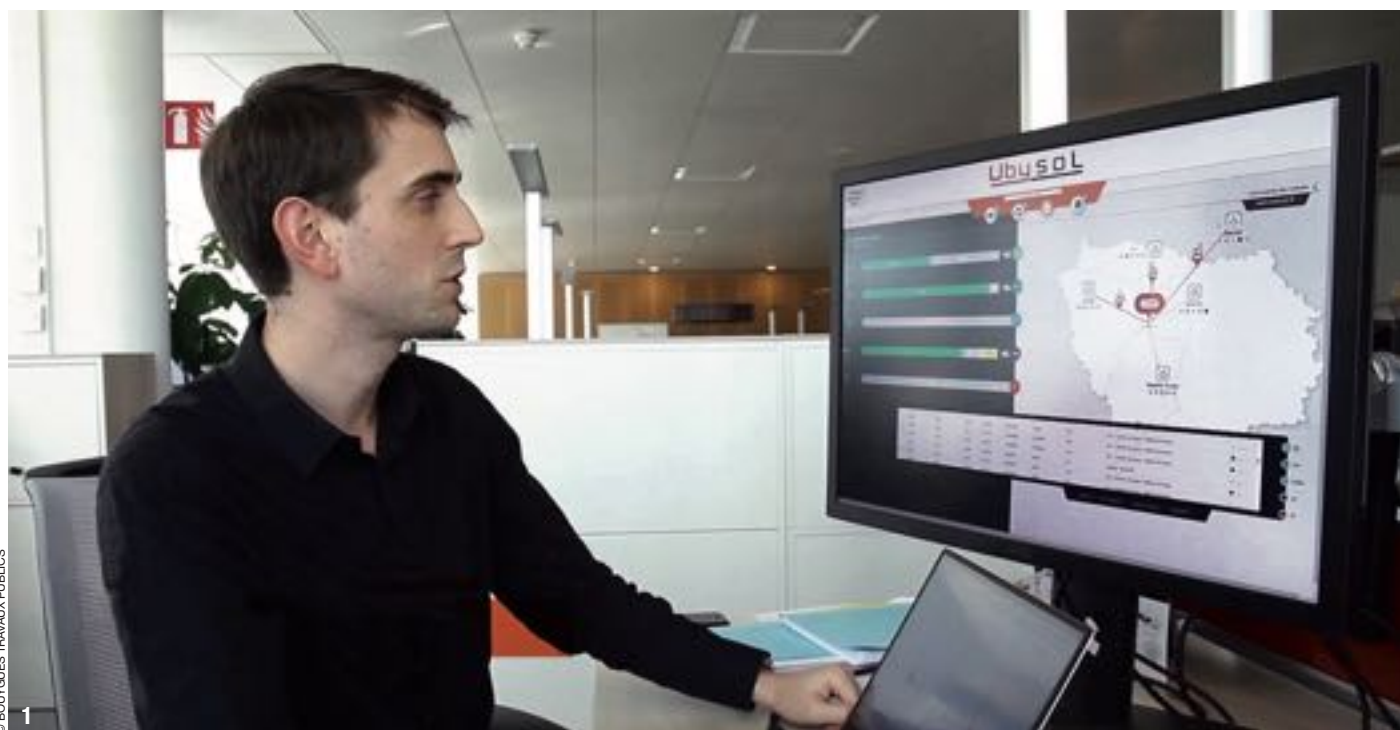


[sitech-france.fr/products/bim-construction/](http://sitech-france.fr/products/bim-construction/)

# UBYSOL, LA SOLUTION DE TRAÇABILITÉ DES DÉBLAIS

AUTEURS : KEVIN COLARD, INGÉNIEUR ENVIRONNEMENT GÉOTECHNIQUE, BOUYGUES TP -  
THOMAS COLOBY, RESPONSABLE ACTIVITÉ TERRASSEMENT, BOUYGUES TP

UBYSOL EST UNE SOLUTION DE TRAÇABILITÉ DES DÉBLAIS UTILISANT LA TECHNOLOGIE DES OBJETS CONNECTÉS. ELLE A ÉTÉ PENSÉE ET RÉALISÉE EN RÉUNISSANT LES SAVOIR-FAIRE DES DIFFÉRENTES FILIALES DU GROUPE BOUYGUES. ELLE PERMET UNE GESTION DES DÉBLAIS CONNECTÉS GARANTISSANT UNE EXCELLENTE TRAÇABILITÉ. ELLE RÉPOND AUX EXIGENCES RÉGLEMENTAIRES ACTUELLES ET AUX DEMANDES SPÉCIFIQUES DU MAÎTRE D'OUVRAGE DU GRAND PARIS.



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS  
1

## LE CONTEXTE, L'ORIGINE DU PROJET ET LA SOLUTION APPORTÉE

Les évolutions réglementaires positionnent la gestion des déblais comme un enjeu prioritaire pour tous les nouveaux chantiers en France, et par voie de conséquence les travaux du Grand Paris. Les déblais qui sortent de l'emprise d'un chantier prennent le statut de déchet et doivent être accueillis dans des sites d'enfouissement prévus à cet effet. Les chantiers du Grand Paris

**1- Utilisateur devant l'écran d'interface de gestion des déblais Ubysol.**

**1- User in front of the Ubysol excavated material management interface screen.**

Express vont à eux seuls en générer 43 millions de tonnes, dans toutes les catégories de pollution (inertes, non dangereux, dangereux). L'enjeu pour les chantiers est non seulement leur évacuation, mais aussi la garantie de leur traçabilité jusqu'à l'exutoire final. Le maître d'ouvrage, en tant que responsable de l'enfouissement des déchets produits dans le cadre de son projet, a besoin d'un outil garantissant cette traçabilité. À cette fin, la Société du Grand Paris (SGP) a développé un

outil informatique de traçabilité, alimenté par tous les acteurs de la chaîne logistique, permettant d'enregistrer les flux sortant du chantier et entrant sur les sites d'enfouissement. La solution Ubysol vient la compléter. Dans ce contexte, la direction de Bouygues TP Région Parisienne souhaitait aller plus loin dans la digitalisation du processus. Pour cela elle s'est rapprochée de l'E-Lab (Bouygues SA) en août 2016, pour rechercher une nouvelle technologie pouvant répondre à ses besoins. ▷

L'E-Lab est le centre d'innovation numérique du groupe Bouygues. Il travaille de façon transverse pour toutes ses entités. Il a été créé en 2001 et dispose de toutes les compétences nécessaires aux projets d'innovation dans le digital.

L'E-Lab a tout de suite réalisé ce que pouvait apporter le capteur Ubifeel pour répondre à cette problématique de gestion des déblais et de leur traçabilité. Ubysol était né. Le nom Ubysol est la contraction du mot ubiquité « capacité d'être présent en tout lieu ou en plusieurs lieux simultanément », de la lettre Y symbolique du groupe Bouygues, et sol car c'est un système de traçabilité des terres excavées.

Le principe général d'Ubysol est d'assister la gestion des déblais issus des chantiers de construction. Pour cela, le processus s'appuie sur le capteur Ubifeel qui est une source émettrice autonome (avec module de localisation et inclinomètre) utilisant la technologie des objets connectés. Ce capteur est fixé à la benne du camion. Au départ du chantier cet émetteur est marqué par « tag NFC » à partir d'une application tablette pour associer le capteur au camion et générer un bordereau de suivi. Tout au long de son parcours, la position du camion est repérée par un réseau de géolocalisation dénommé LoRa, dont les caractéristiques sont décrites ci-dessous. À l'arrivée sur le site de dépôt l'inclinomètre détecte le levage de la benne et enregistre la position de déchargement des matériaux. Toutes les données sont enregistrées en temps réel dans la solution de gestion des déblais, visualisable via un tableau de bord.

## LES COMPOSANTS ET LES ACTEURS DE LA SOLUTION UBYFEEL

### LE CAPTEUR UBYFEEL

En janvier 2016, l'E-Lab mène une réflexion sur la création d'un capteur générique à bas coût. Il doit pouvoir être déployé dans les différents métiers du groupe Bouygues, ainsi que pour les clients d'Objenius (Filiale de Bouygues Telecom spécialisée dans l'internet des objets connectés). Ce capteur permet de développer des solutions d'objets connectés dans leur environnement métier. Une fois le produit imaginé, on lance un appel d'offre en avril 2016 pour l'industrialisation du capteur. L'entreprise Sagemcom est sélectionnée et lance la production de l'Ubifeel.

Le capteur Ubifeel (figure 2) est composé :

- D'une radio 868 Mhz LoRa avec une antenne intégrée ;
- D'un micro-processeur organisant le fonctionnement ;
- D'une pile non rechargeable et non remplaçable ;
- D'un accéléromètre, inclinomètre, gyromètre, thermomètre, ...
- D'une interface NFC passive ;
- D'un bouton et d'un voyant bicolore pour l'interface avec l'utilisateur.

Le capteur générique a 12 logiciels embarqués préinstallés qui permettent de réaliser des pilotes rapides sur le terrain. Dans le cas présent, les besoins identifiés sont la géolocalisation et le

levage de la benne. Des tests ont été réalisés sur différents camions et secteurs de la région parisienne pour vérifier que le capteur répondait bien aux besoins. La phase de test ayant été concluante, le logiciel embarqué a été configuré par Sagemcom pour ces besoins spécifiques.

### LE RÉSEAU LORA

Ubysol s'appuie sur le réseau LoRa (Long Range) déployé sur le territoire français depuis 2016 par Objenius filiale de Bouygues Telecom. Ce réseau en couvre aujourd'hui la quasi-totalité (figure 3).

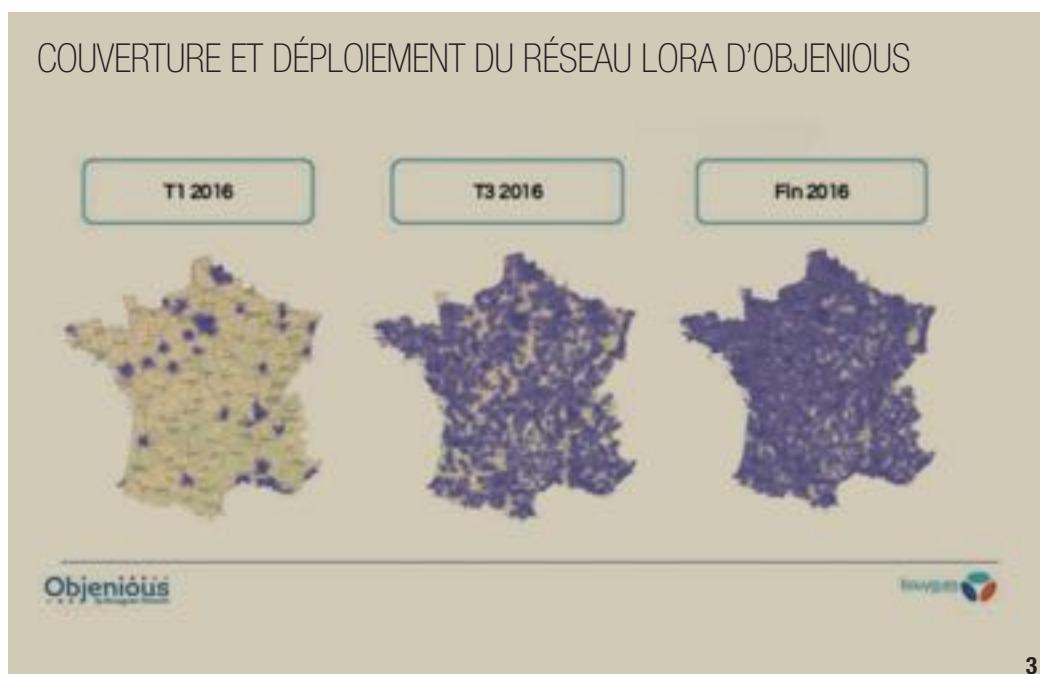


#### 2- Module Ubifeel.

#### 3- Couverture et déploiement du réseau LoRa d'Objenius.

#### 2- Ubifeel module.

#### 3- Coverage and deployment of the Objenius LoRa network.





## DIFFÉRENTS MODES DE FIXATION DU CAPTEUR



**05**  
4 aimants 18 kg

**01**  
4 aimants 8 kg

**02**  
4 aimants 8 kg

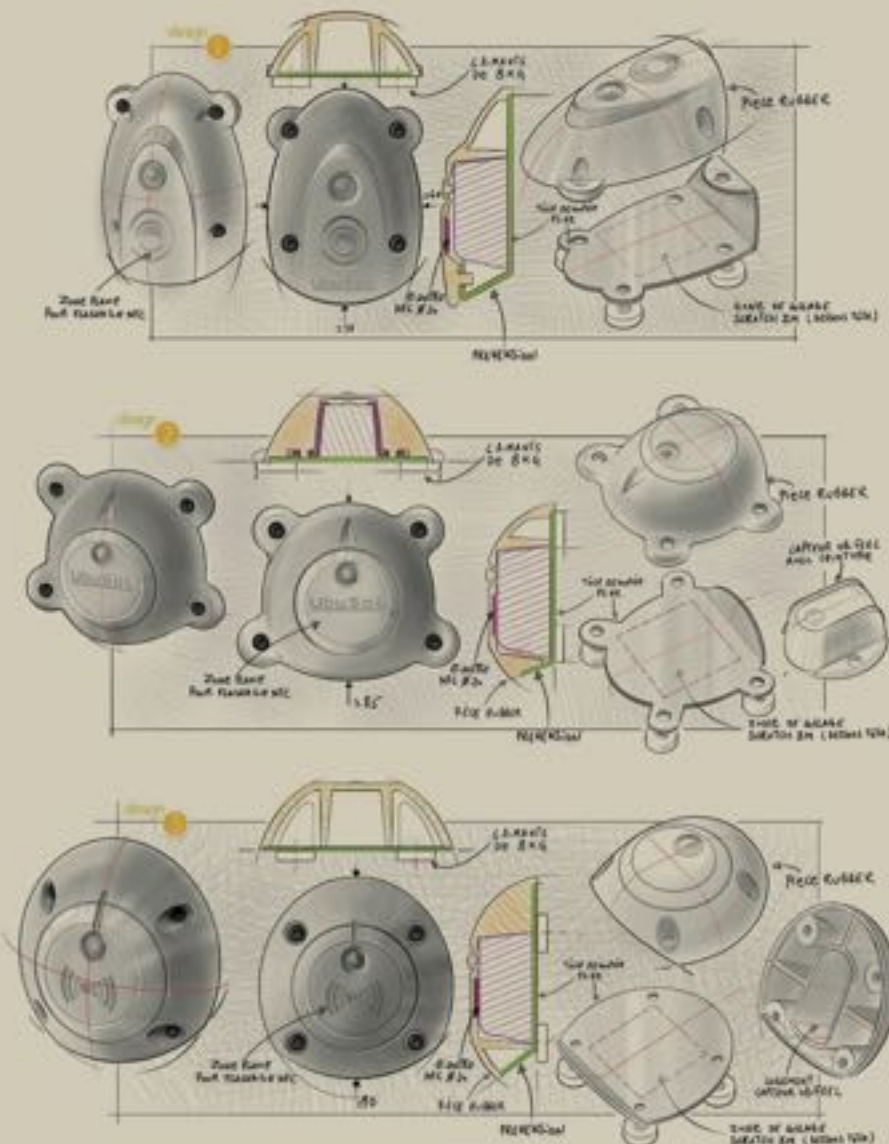
**03**  
Scratch DualLock

**04**  
Scratch DualLock

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

4

## DIFFÉRENTES ESQUISSES DE COQUES



**4- Différents modes de fixation du capteur.**  
**5- Différentes esquisses de coques.**

**4- Various sensor fastening methods.**  
**5- Various sketches of shells.**

LoRa est une technologie bas débit, qui permet aux objets connectés d'envoyer des données en petite quantité, afin d'économiser l'énergie et assurer une grande autonomie de leur batterie. Elle s'appuie sur un réseau de plus de 4300 antennes en France et fonctionne également hors de ses frontières.

Les expérimentations ont tout d'abord permis de vérifier que les émissions de géolocalisation et de levage de benne soient bien reçues par le système. Ces tests ont eu lieu depuis les chantiers Bouygues de la Ligne 15 du Grand Paris Express : le Lot T3B, Gare FVC (Fort d'Issy-Varves-Clamart) et Lot T2A, de Villejuif à Créteil. Les bons résultats obtenus ont permis d'acter que la couverture réseau répondait à la demande. Dans le même temps, Objeniva a reçu la liste des exutoires conventionnés dans le cadre de l'accord de partenariat pour le traitement le stockage et la valorisation des déblais du Grand Paris Express en Île-de-France et dans l'Oise. ▷

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

5



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

Le retour d'Objenius fut en adéquation avec les attentes : 95 % des sites sont situés dans des zones de bonne couverture et les 5 % restants dans une zone de couverture moyenne.

Le principe de géolocalisation est basé sur la triangulation entre les antennes du réseau Bouygues Telecom. Cette technologie, très économe en énergie, ne permet pas une localisation aussi précise que la technologie d'un GPS. La précision de position est de l'ordre de 50 m. Elle fonctionne également dans les zones couvertes et permet surtout une autonomie d'environ 6 mois par capteur en fonctionnement continu. Objenius déploie actuellement la DTOA (Differential Time Of Arrival) qui permet par horodatage des antennes d'affiner la précision de géolocalisation. Les premiers retours de la phase de test sont très satisfaisants.

#### LE DESIGN, LE MODE DE FIXATION

Une fois acquises l'assurance du bon fonctionnement du réseau LoRa et du capteur, l'E-Lab a été mandaté pour réaliser la coque et définir le type de fixation approprié.

Un responsable « nouvelles technologies et industrialisation » et un designer industriel se sont attelés à cette tâche. La première contrainte était de trouver un système de fixation non intrusif et capable de couvrir l'intégralité de la flotte de camions. En effet, les bennes sont principalement métalliques mais peuvent également être en aluminium.

Le choix initial s'est tourné sur une fixation aimantée simple à fixer et à retirer, et sur un scratch « duallock » pour s'adapter aux bennes en aluminium. La phase de test a consisté à valider le pré-dimensionnement en testant pendant 2 mois des capteurs sur des bennes subissant tous les aléas de situation réelle sur un chantier (intempéries, poussières, vibrations, chocs...). Ces capteurs étaient équipés de différentes classes d'aimant et de scratch (figure 4), ce qui a permis de valider des aimants de 8 kg ainsi que le

**6- Scannage du capteur par l'opérateur.**

**7- Interface tablette de saisie d'un bordereau.**

**6- Sensor scanning by the operator.**

**7- Tablet interface for entering a slip.**

scratch. Aucun capteur n'a bougé durant ces tests.

Il restait à dessiner une coque pour le capteur avec un système de fixation mixte. L'aimant était privilégié, mais une surface plane a été laissée sous le support pour pouvoir substituer l'aimant par un scratch.

Différentes esquisses de coques (figure 5) ont été réalisées avec pour principales contraintes d'avoir une étanchéité optimum et de reproduire le bouton du capteur sur la coque avec une partie semi-rigide.



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS



© BOUGUES TRAVAUX PUBLICS

## L'APPLICATION TABLETTE ET LA SOLUTION DE GESTION DES DÉBLAIS UBYSOL

L'entreprise de services du numérique C2S, filiale de Bouygues SA, est en charge du développement de l'application tablette et du logiciel de gestion des déblais Ubysol.

Ce travail s'est fait en méthode dite « agile », c'est à dire en échangeant en permanence et en contrôlant que le besoin métier soit bien retranscrit. Ainsi les équipes de développement sont restées très proche des équipes de terrain en leur faisant tester les versions successives pour pouvoir bénéficier de leur retour d'expérience tout au long du développement.

Alors que le logiciel de gestion de déblais sert à traiter les données brutes transmises par le réseau LoRa pour réaliser un suivi en temps réel, et permet la gestion des différentes évacuations, l'application tablette quant à elle sert à appairer les capteurs et à acquérir dans la solution Ubysol les informations provenant en continu du chantier.

**8- Tableau de bord de suivi journalier.**

**8- Daily monitoring dashboard.**

## LA SOLUTION DE TRAÇABILITÉ ET DE GÉOLOCALISATION UBYSOL À TRAVERS L'APPLICATION TABLETTE

La solution s'appuie d'abord sur une application tablette qui sert dans un premier temps à appairer un capteur avec un camion grâce au tag NFC. Par cette action on associe des informations du camion au capteur comme sa plaque d'immatriculation, le nom du transporteur, le type de conditionnement, la consistance des matériaux transportables, etc. Toutes ces informations sont utilisées pour la seconde étape qui est la génération d'un bordereau de suivi des déchets.

Une fois le paramétrage général fait, et le premier camion chargé pour être évacué, l'opérateur commence par scanner le capteur fixé sur le camion via le tag NFC pour récupérer les informations liées au transporteur (figure 6).

Il sélectionne ensuite le type de déchet, la maille, le site d'évacuation et le tonnage et il valide la saisie sur sa tablette (figure 7).

Un bordereau de suivi des déchets de type Cerfa n°12571\*01 sous format pdf va apparaître sur l'écran. Il peut être imprimé instantanément. Avec un nombre réduit de données à saisir, le logiciel de gestion des déblais Ubysol apporte toutes les informations qui permettent de compléter intégralement les champs du formulaire Cerfa. Ainsi la création d'un bordereau est rapide et le peu d'information à saisir diminue le risque d'erreur.

La SGP ayant déjà son propre logiciel de création de bordereau, un interfaçage permettrait de combiner les atouts des deux solutions.

## À TRAVERS LE LOGICIEL DE GESTIONS DES DÉBLAIS UBYSOL

Cette solution se présente sous la forme d'une interface Web, hébergée sur serveur. Elle se décompose en deux parties : un back office servant à renseigner toutes les données générales d'un chantier et un tableau de bord sur l'interface web permettant de suivre en temps réel les évacuations du chantier. Le back office regroupe toutes les données permanentes du chantier et transmet ces données à l'application tablette lors de la génération du bordereau. On y retrouve toutes les informations sur les transporteurs utilisés, tous les sites d'évacuation avec lesquels des contrats ont été signés ainsi que toutes les acceptations préalables associées. Y sont également renseignés toutes les mailles et leurs caractérisations provenant des plans de dépollution du site. Le tableau de bord (figure 8) se divise en trois parties, sur la partie gauche on peut voir l'évolution des évacuations par type de déchets, à droite une carte schématique avec les évacuations en ▷



cours et leurs destinations, et sur la partie basse un tableau regroupant toutes les données par camion évacué pour lesquelles il est possible de faire une exportation au format Excel. Ainsi est créé un suivi journalier en temps réel des évacuations par site. En cliquant en haut à droite de l'onglet apparaît une carte détaillée « Google Map® ». Cette carte recouvre tout le tableau de bord et fait apparaître tous

les trajets en cours grâce à la géolocalisation LoRa. En cliquant sur un camion, une fenêtre « pop-up » s'ouvre avec son numéro d'immatriculation. Cela permet au responsable du chantier de savoir à tout moment où se trouvent les camions et de visualiser d'éventuelles anomalies. Des alertes sont définies ; elles s'affichent en jaune sur toutes les parties du tableau de bord. Les trois anomalies sont : un trajet suspect, une durée de

**9- Levage de benne.**  
**10- Modèle préliminaire d'un possible Ubysol Multi.**

**9- Bin lifting.**  
**10- Preliminary model of a possible Ubysol Multi.**

trajet anormale et enfin un déchargement au mauvais endroit. Lors de chaque déchargement par levage de benne (figure 9), le capteur envoie un signal qui permet au logiciel de comparer la localisation du déchargement avec la destination prévue. Le logiciel simplifie les rapports du conducteur de travaux grâce à l'exportation dans un tableau Excel, où sont compilées toutes les évacuations effec-



tuées sur les différents sites d'enfouissement. Il y retrouve les dates ainsi que l'heure d'évacuation, le type de déchet, leur destination finale, les quantités... À l'aide de filtres, il lui est possible de trier les informations pour faire des analyses dans le but d'optimiser ses évacuations notamment avec la durée de chaque trajet. Toutes les données sont stockées sur des serveurs en France et peuvent être

consultables a posteriori. Ainsi les trajets, visualisables en temps réel, sont aussi conservés pendant une durée adaptée au besoin du client, de trois mois par défaut.

### LES ÉVOLUTIONS EN COURS

Les développements actuels sont orientés vers la création d'un « Ubyzol-Multi ». Cette solution diverge de la précédente par le type de capteur.

Celui-ci aurait l'apparence d'un caillou (figure 10) et permettrait de suivre les évacuations avec tout type de transport (fluvial, ferroviaire et multimodal). Il pourrait servir également pour des contrôles inopinés, par exemple des contrôles externes mandatés par le maître d'ouvrage. Pour cela il faut que le capteur soit inerte et/ou biodégradable car une fois mélangé au déblai il ne sera pas récupéré.

Quant à la solution Ubyzol, l'accumulation de données sur les nombreux trajets effectués permet d'envisager de nouvelles interprétations via le « Big-data », comme l'estimation du tonnage du camion par le capteur selon les vibrations enregistrées. Enfin on peut imaginer dans un futur proche de connecter les bascules de pesée avec l'application tablette pour ne plus avoir à saisir le tonnage. □

## ABSTRACT

### UBYSOL, THE SOLUTION FOR TRACEABILITY OF EXCAVATED MATERIAL

KEVIN COLARD, INGÉNIEUR ENVIRONNEMENT GÉOTECHNIQUE, BOUYGUES TP - THOMAS COLOBY, RESPONSABLE ACTIVITÉ TERRASSEMENT, BOUYGUES TP

**The management of excavated material has become a priority issue for all new projects, and notably all the worksites of the 'Grand Paris' project. To meet this need, Bouygues Travaux Publics has developed Ubyzol based on the expertise of the various subsidiaries of Bouygues Group. Ubyzol uses connected objects and LoRa network technology to ensure complete traceability of excavated material. The Ubyzol solution is organised around a sensor, a tablet application and a dashboard which will make it possible to monitor continuously and in real time the materials removed from a worksite while generating waste tracking slips. □**

### UBYSOL, LA SOLUCIÓN DE TRAZABILIDAD DE LOS ESCOMBROS

KEVIN COLARD, INGÉNIEUR ENVIRONNEMENT GÉOTECHNIQUE, BOUYGUES TP - THOMAS COLOBY, RESPONSABLE ACTIVITÉ TERRASSEMENT, BOUYGUES TP

**La gestión de los escombros se ha convertido en un desafío prioritario en todas las obras nuevas, y en especial en las que se llevan a cabo en el área metropolitana de París. Para responder a él, Bouygues Travaux Publics ha creado Ubyzol basándose en las competencias de las distintas filiales del grupo Bouygues. Ubyzol utiliza la tecnología de los objetos conectados y de la red LoRa para garantizar una trazabilidad completa de los escombros. La solución Ubyzol se articula en torno a un sensor, una aplicación para tableta y un cuadro de control que permiten un seguimiento continuo y en tiempo real de las evacuaciones de una obra, generando a la vez los comprobantes de seguimiento de los residuos. □**

**KIF**  
KRINGS INTERNATIONAL FRANCE

**BLINDAGE DE TRANCHÉES - LOCATION/VENTE**

SIÈGE SOCIAL  
55 ROUTE D'ALLAUCH  
13011 MARSEILLE, FRANCE.

PHONE / +33-491-27.10.20  
FAX / +33-491-43.10.92  
EMAIL : INFO@KRINGS.COM

WWW.KRINGS.COM

# MacSafe™

## LE NOUVEAU DISPOSITIF DE PROTECTION CONTRE L'INTRUSION DE VÉHICULE DANS LES ESPACES PUBLICS



© MACCAFERRI - CRASH TEST



© R. PALOMBA PHOTOGRAPHE - PROMENADE DES ANGLAIS, NICE

Dans un contexte difficile lié aux attaques terroristes, les grandes métropoles françaises réfléchissent à des solutions de protection contre le franchissement de véhicules dans les espaces publics (zones piétonnes, lieux touristiques, aéroports, stade, etc.).

L'attaque du 14 juillet 2016 sur la promenade des Anglais à Nice a fortement marqué les esprits et a mis en évidence la vulnérabilité de certaines zones piétonnes à ces menaces.

À la suite de cet événement dramatique, le groupe industriel **Officine Maccaferri**, acteur majeur dans le domaine de la géotechnique, du contrôle de l'érosion, de la sécurisation des falaises et de la défense du territoire, a conçu et développé un dispositif de protection conforme aux exigences du cahier des charges établi par la métropole de Nice, afin de sécuriser la Promenade des Anglais contre l'intrusion de véhicule.

Ce dispositif de sécurité devait d'une part être en mesure d'intercepter la course d'un camion de 19 t lancé à 50 km/h avec un angle d'impact de 20° et d'autre part avoir un niveau de déformation inférieur à 3 m afin de protéger les piétons. Il devait également s'intégrer parfaitement dans un site d'exception tel que la Promenade des Anglais.

Soucieux de répondre à l'ensemble du cahier des charges tant d'un point de vue technique qu'esthétique, les équipes de **Maccaferri** ont réussi à développer un dispositif qui répond à toutes les attentes : nommé **MacSafe™**, il peut s'adapter à chaque projet en répondant à des exigences précises en termes de capacité d'absorption d'énergie, d'emprise, de niveau de déformation, de facilité de mise en œuvre et d'esthétique.

**MacSafe™** se compose de deux câbles longitudinaux soutenus par des poteaux en acier équipés de dissipateurs d'énergie aux extrémités. Les poteaux sont équipés d'un dispositif de mise en

tension des câbles, afin de faciliter la mise en œuvre. Les poteaux intermédiaires disposent d'un passe-câbles nécessaire à l'entretien et/ou au démontage des câbles. Le dispositif peut être entièrement ou partiellement démonté lorsque le niveau d'alerte diminue. À Nice, à l'occasion de l'Ironman en juillet, les câbles ont été démontés provisoirement pour faciliter l'organisation de la course, et ont ensuite été repositionnés.

Afin de valider les performances du système pour le chantier de Nice, une procédure de crash test a été définie et des tests ont été effectués à Belluno en Italie, dans le site dédié aux essais sur les Kits de protection contre les chutes de blocs ETAG 027 du groupe **Officine Maccaferri**. Cette méthodologie d'essai a consisté à fixer un bloc en béton de 6500 kg à l'aval de la glissière et de le lâcher en chute verticale sur 4,5 m, afin de développer une énergie de 300 kJ (30% de plus que celle demandée au cahier des charges). Deux lâchers consécutifs ont été réalisés sur la barrière, sans réparation entre les deux tests. La déformation du système mesurée suite aux deux impacts était de 1,63 m, alors que celle demandée au cahier des charges était de 3 m. Ces tests ont été supervisés et validés par le Laboratoire de science des constructions de l'Université IUAV de Venise.

Suite à la réussite du chantier de la Promenade des Anglais, le dispositif a été choisi par la Principauté de Monaco pour sécuriser la place d'Armes et sera installé en début d'année prochaine.

Le groupe **Maccaferri** réfléchit déjà à l'évolution du dispositif et a réalisé en novembre une deuxième session de crash test, dans un contexte différent : cette fois, c'est un impact équivalent à un camion de 7,5 t à une vitesse de 50 km/h mais avec un choc frontal qui a été testé sur la barrière. Bien que la capacité d'absorption d'énergie générée par l'impact ait été deux fois plus importante que celle du test du chantier de Nice, les résultats du test ont été un succès.

**MACCAFERRI**

[www.maccaferri.com/fr](http://www.maccaferri.com/fr)  
[info@maccaferri.fr](mailto:info@maccaferri.fr)



1

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

# THALIA, LE SIMULATEUR DE PILOTAGE DE TUNNELIER PAR BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

AUTEUR : ANNE-LAURE GIARD, CHEF DE PROJET INNOVATIONS DU TUNNEL LAB, DIRECTION OPTIMISATION INDUSTRIELLE DE BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

**THALIA, ACRONYME DE "TUNNELIER ARTIFICIEL D'INITIATION ET APPROFONDISSEMENT", PREMIER SIMULATEUR DE PILOTAGE DE TUNNELIER À PRESSION DE CONFINEMENT AU MONDE, A ÉTÉ MIS AU POINT PAR UNE ÉQUIPE MULTIDISCIPLINAIRE AU SEIN DE BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS. DESTINÉ À ACCOMPAGNER LA FORMATION DES NOUVEAUX PILOTES, IL DOIT NOTAMMENT PERMETTRE DE FAIRE FACE À LA DEMANDE CROISSANTE DE PILOTES DANS LE CADRE DES CHANTIERS DU GRAND PARIS EXPRESS COMPRENANT 200 km DE TUNNELS À CONSTRUIRE D'ICI 2024.**

## LES ORIGINES DU PROJET PILOTE DE TUNNELIER, UN MÉTIER EN TENSION QUI NÉCESSITE UNE FORMATION LONGUE ET CÔUTEUSE

Avec la montée en puissance des chantiers du Grand Paris Express (GPE), le marché de l'emploi doit faire face à une forte demande en pilotes de tunnelier expérimentés.

On estime ainsi à une centaine le nombre de pilotes nécessaires pour la construction des tunnels du GPE. Après la crise financière de 2008-2009 et l'absence de projets de construction d'envergure, le nombre de pilotes qualifiés est resté stable ces six dernières années et le nombre de nouveaux pilotes n'a que très peu augmenté. La conjoncture est aujourd'hui à nou-

**1- Élève devant le simulateur de pilotage de tunnelier Thalia.**

**1- Student in front of the Thalia TBM operation simulator.**

veau favorable, tirée notamment en France par les nombreux chantiers du Grand Paris. Par conséquent, le nombre de tunneliers en activité va augmenter en France. Vingt tunneliers sont prévus en simultané pour les ouvrages du Grand Paris. L'enjeu est donc de disposer de suffisamment de pilotes pour répondre à cette demande.

Le manque de pilotes expérimentés sur le marché du travail s'explique également par le fait qu'il s'agit d'un métier méconnu, peu promu chez les jeunes diplômés, et qu'il n'existe pas de formation de base pour devenir pilote de tunnelier.

Le profil des pilotes débutants est donc aujourd'hui très variable : beaucoup étaient déjà en poste en tunnel, comme poseurs de voussoir par exemple, d'autres viennent de formations de type BTS, DUT, ou Baccalauréat professionnel.

L'apprentissage du métier de pilote de tunnelier a lieu en général directement dans la cabine de pilotage : le pilote débutant travaille en binôme avec un pilote expérimenté, ce dernier transmettant son savoir-faire par oral pen-

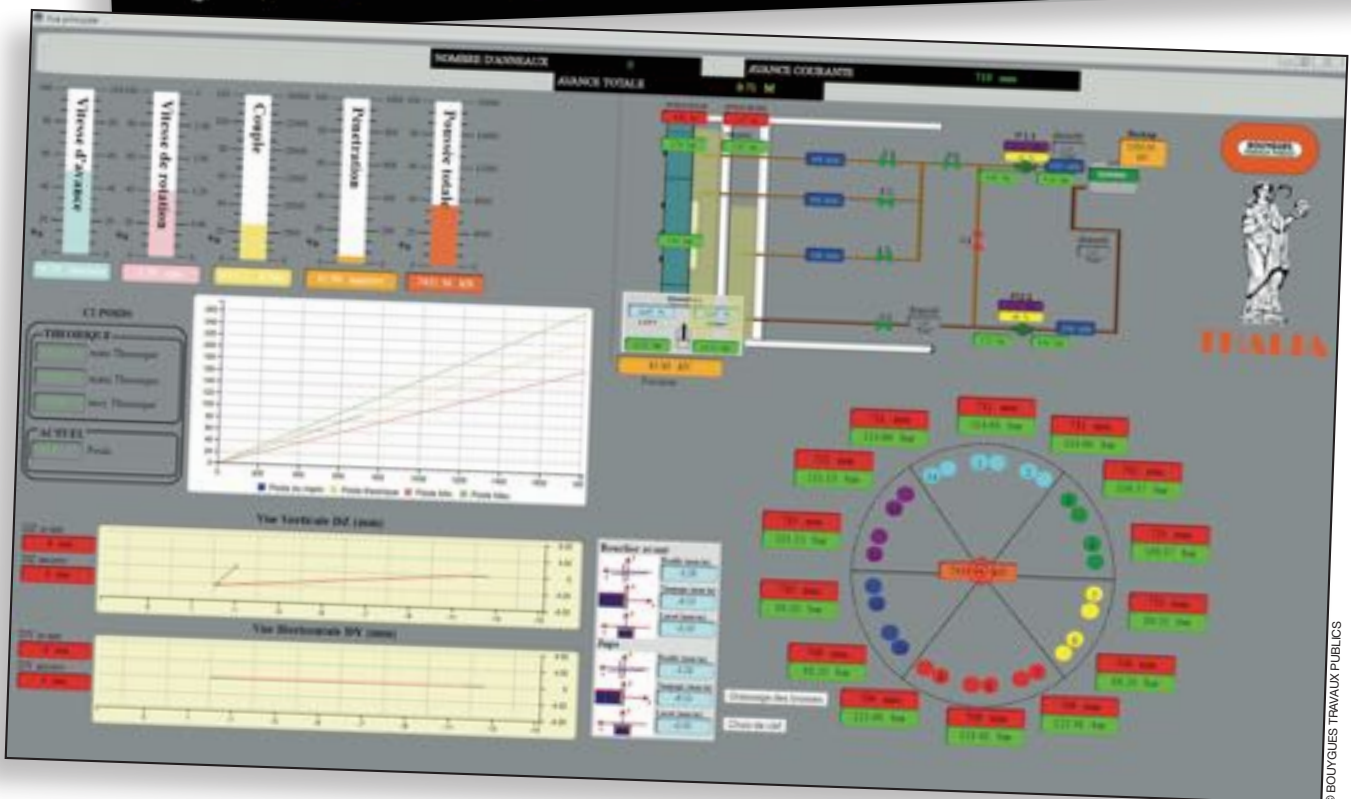
dant les postes de production. Sous le contrôle de son formateur, l'élève prend progressivement en main la surveillance des paramètres de fonctionnement de la machine. La durée de cette phase d'apprentissage varie en fonction de la complexité du tunnelier et du projet.

Les pilotes mettent parfois des années à acquérir les bons réflexes leur permettant de réagir au mieux à l'ensemble des anomalies auxquelles ils sont susceptibles d'être confrontés. La conception de la première version du simulateur a été conduite par un ingénieur travaux du chantier de prolongement de la Ligne 14, qui souligne qu'une erreur de pilotage peut impacter l'ouvrage définitif et doit être impérativement évitée. ▶



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

2



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

3

De ce fait, pendant la phase d'apprentissage, le pilote expérimenté confie les commandes à l'apprenti pilote lorsqu'aucune difficulté particulière ne se présente et en gardant une attention maximale sur l'évolution des paramètres.

Paradoxalement, cela ne facilite pas l'apprentissage du pilote dont la progression serait accélérée par la rencontre de situations difficiles. Finalement, un tunnelier en production est difficilement un bon terrain d'entraînement !

### BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS DÉCIDE DE METTRE AU POINT UNE FORMATION SPÉCIFIQUE

Face à ce constat et pour être en mesure de répondre efficacement aux enjeux des chantiers du Grand Paris Express, Bouygues Travaux Publics décide en 2015 de lancer le projet du simulateur de pilotage pour tunnelier. Bouygues Travaux Publics réalise des tunnels dans le monde entier et aujourd'hui une quinzaine de machines en production. Le Grand Paris Express va mobiliser un grand nombre de res-

2- Écran « Courbes » du simulateur Thalia.

3- Écran principal du simulateur Thalia.

2- «Curves» screen of the Thalia simulator.  
3- Main screen of the Thalia simulator.

sources de l'entreprise sur une zone très concentrée.

N'ayant pas l'intention de réduire son activité à l'international, la Direction Générale de Bouygues Travaux Publics a pris conscience de la nécessité de préparer l'entreprise, notamment en formant de nouvelles équipes capables d'opérer demain plusieurs tunneliers dans Paris.

Le simulateur Thalia est la véritable clé de voûte de ce qui est devenu par la suite un parcours complet de formation à destination des futurs pilotes.



Il permet de préparer les pilotes avant de les confronter aux réalités du terrain. Ce projet est le fruit de la collaboration entre de multiples services de Bouygues Travaux Publics et Bouygues Construction : la Direction des Travaux, le Centre de calculs techniques de la Direction Technique, les équipes de chantier, la Direction des Ressources Humaines et le Centre de Formation Gustave Eiffel.

L'objectif du simulateur Thalia est tout d'abord de mettre en confiance le pilote apprenni dès son arrivée à son poste et de raccourcir sa période d'apprentissage.

**4- Écran « Injection de mortier » du simulateur Thalia.**

**5- Écran « Pupitre » du simulateur Thalia, en écran tactile.**

**4- «Mortar grouting» screen of the Thalia simulator.**

**5- «Console» screen of the Thalia simulator, a touch-sensitive screen.**

Les exercices sur simulateur permettent une meilleure compréhension des interfaces entre géologie et tunnelier et une meilleure connaissance des situations dangereuses, ce qui permet d'augmenter les performances en réduisant les risques.

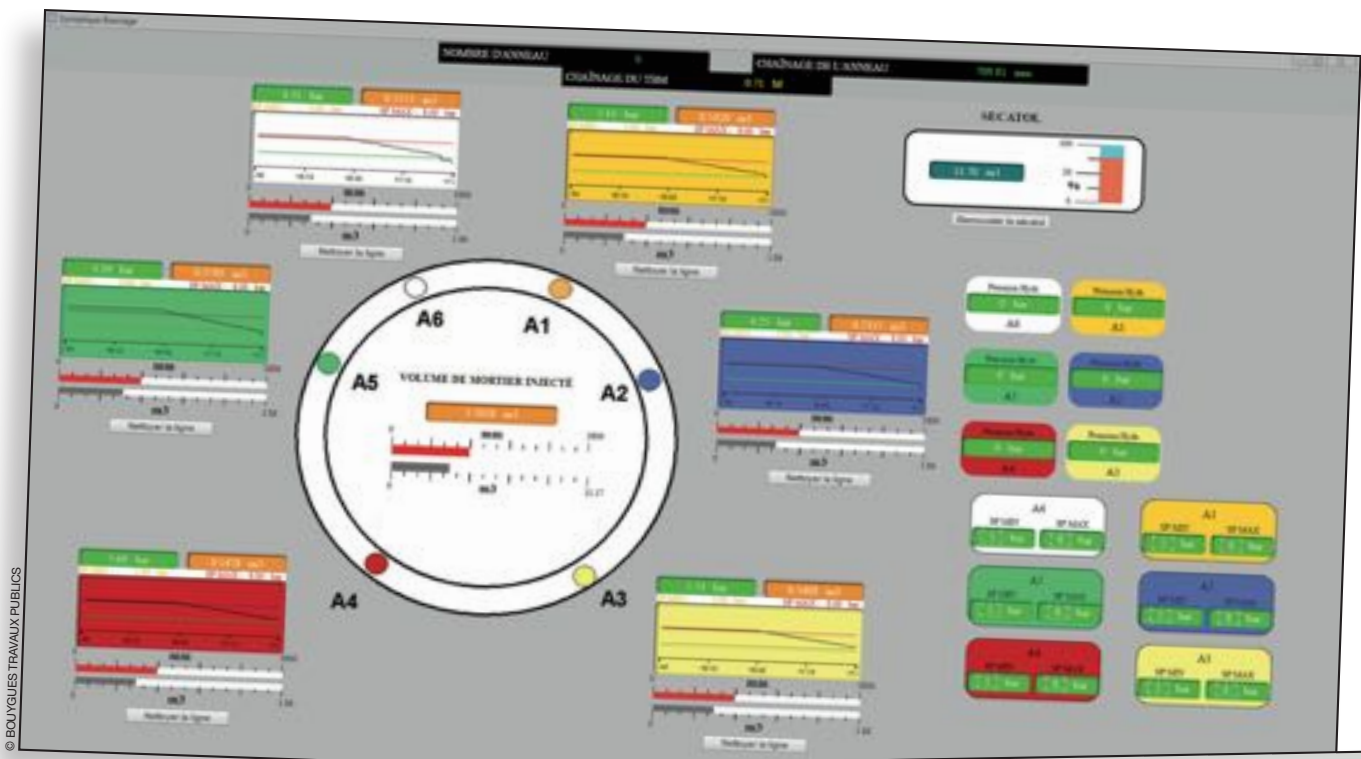
En effet, travailler sur le simulateur permet au pilote d'apprendre à réagir face à des situations anormales identifiées.

La montée en compétence s'acquiert grâce à la répétition des exercices dans différentes situations simulées, jusqu'à une compréhension parfaite des phénomènes.

**LE DÉROULEMENT DU PROJET**

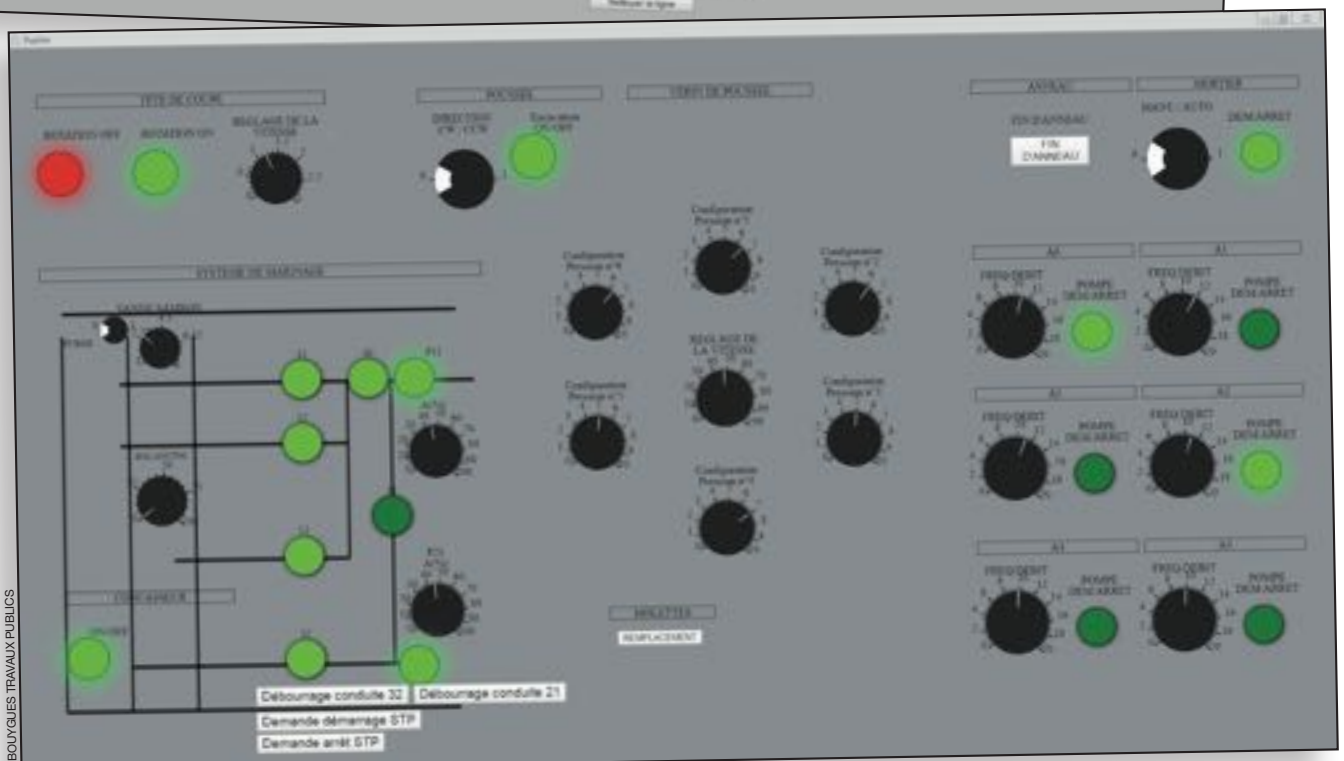
**LA CONCEPTION ET LE DÉVELOPPEMENT DE THALIA**

Dans un premier temps, les équipes ont rédigé un cahier des charges précis du simulateur Thalia. L'interview de pilotes expérimentés permet de comprendre les sensations ressenties par le pilote dans sa cabine : en effet, le principe du fonctionnement du simulateur est de reproduire sur les différents écrans de pilotage les conséquences à la fois des variations de paramètres extérieurs - terrain ou machine - et des décisions du pilote.



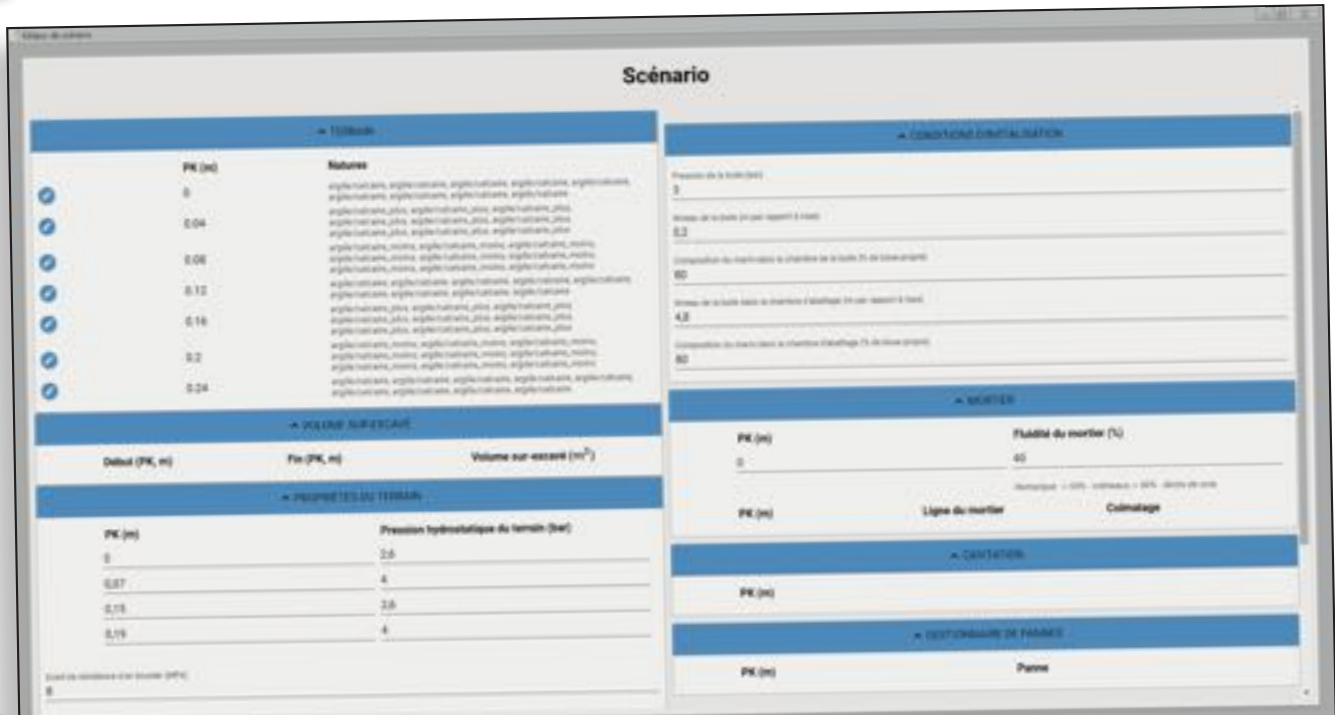
© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

4



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

5



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

6



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

7

Le simulateur Thalia repose sur un modèle de comportement décrivant les lois d'interaction entre les paramètres physiques du tunnelier et ceux du terrain. Il est configurable et adaptable à chaque projet au travers de trois types de paramètres :

- Les paramètres initiaux (pression, usure) ;
- Les paramètres système du tunnelier (diamètre, caractéristiques de poussée, nombre et caractéristiques des outils de coupe, etc.) ;
- Les paramètres extérieurs (caractéristiques du terrain, boues et mortier).

Conçu pour simuler le comportement des tunneliers à pression de terre et ceux à pression de boue, le simulateur propose une trentaine de scénarios préenregistrés. Les paramètres de creusement sont modifiés au fur et à mesure de l'avancement du tunnelier, en fonction des paramètres spécifiques au scénario et de l'action du pilote sur le pupitre de commande. À chaque pas de calcul (plusieurs pas par seconde), l'équilibre des efforts et le bilan des matières entrantes et sortantes est réévalué en fonction de ces nouveaux paramètres, permettant ainsi de reproduire en temps réel le

**6- Écran de sélection de scénario du simulateur Thalia.**

**7- Rapport d'évaluation de l'élève après exercices sur le simulateur Thalia.**

**6- Scenario selection screen of the Thalia simulator.**

**7- Student evaluation report after exercises on the Thalia simulator.**

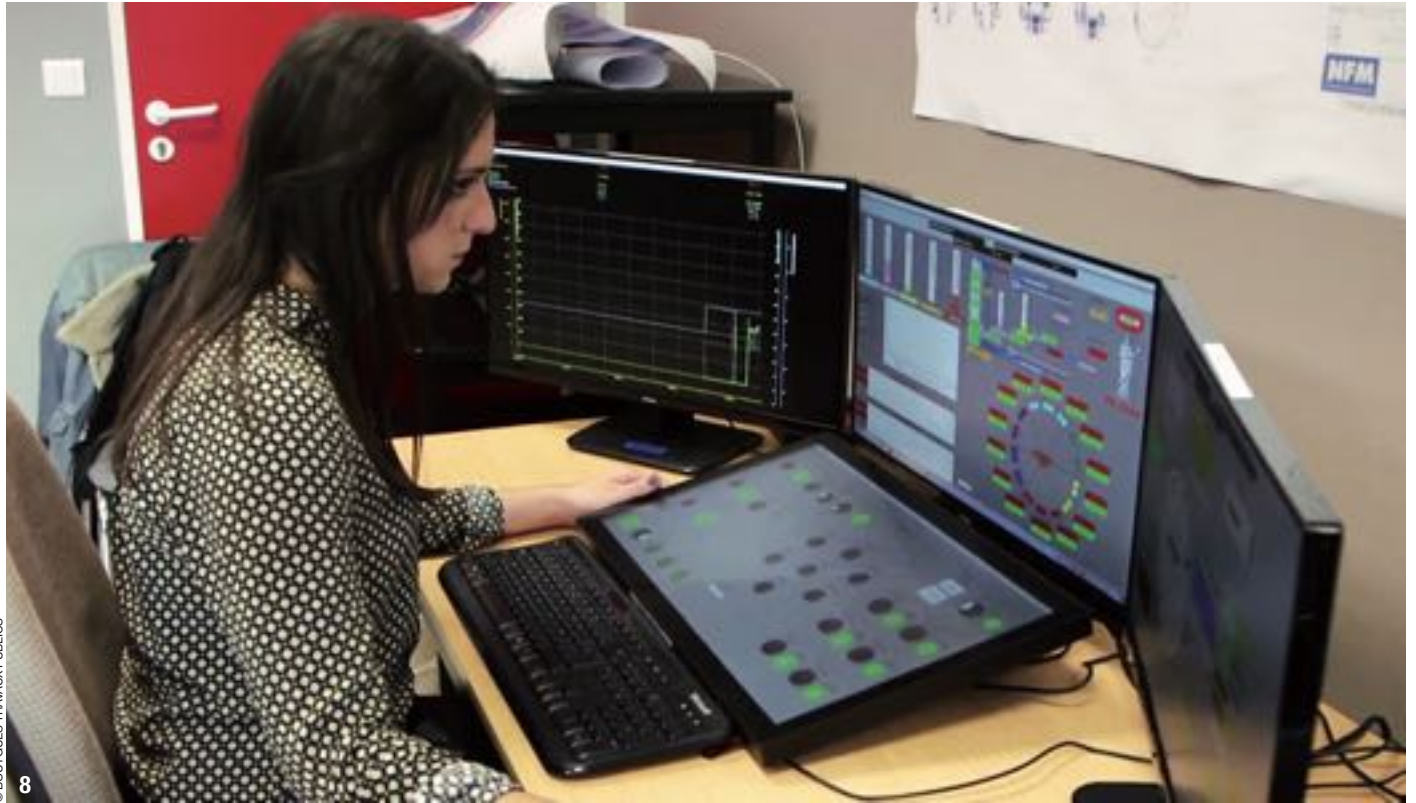
creusement d'un ou plusieurs anneaux consécutifs.

Pour développer le simulateur Thalia, Bouygues Travaux Publics choisit de travailler avec une entreprise spécialisée dans les logiciels de simulation et de réalité augmentée. Le modèle physique théorique est modélisé sous forme de logiciel et chaque nouvelle version est testée intégralement par des pilotes confirmés.

Le simulateur Thalia est composé de plusieurs écrans synthétisant les outils développés par Bouygues pour faciliter l'interface entre les pilotes et leur machine (système de guidage, interface d'acquisition des données, écrans de contrôle des outils de la tête de coupe). Le pilote peut donc visualiser les écrans de suivi présents dans les tunneliers en opération : les courbes en temps réel (figure 2), les paramètres principaux (figure 3) et les informations relatives au mortier (figure 4). Il accède à l'interface de commande machine via un écran tactile permettant de se représenter le pupitre de la cabine de pilotage (figure 5).

### LA MISE EN PLACE DE LA FORMATION « PILOTE DE TUNNELIER »

Après la mise à disposition de la première version du simulateur Thalia sur les chantiers de la Ligne 14 (version « pression de terre ») et sur le chantier de Nice (version « pression de boue ») au premier trimestre 2016, Bouygues Travaux Publics travaille ensuite à la finalisation de la formation dans son ensemble, avec une première session de formation en septembre 2016.



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS  
8

Disponible en français et en anglais, cette formation a pour but d'homogénéiser le niveau des nouveaux pilotes et d'apporter un socle de connaissances théoriques, afin que tous puissent appréhender le fonctionnement du tunnelier et les principales difficultés auxquelles ils peuvent être confrontés. La formation « Pilotes de tunnelier » dure six semaines et repose sur quatre axes. Tout d'abord, un module initial en *e-learning* permet d'enseigner les principes de fonctionnement des tunneliers (confinement du terrain, abattage, guidage, conditionnement du terrain etc.) et les principaux écarts de fonctionnement (baisse de la pression, colmatage de la tête, sur-excavation, blocage de la vis, perte du bouchon, etc.). Des explications et des illustrations de ces grands principes alternent avec des QCM pour contrôler l'acquisition des connaissances. Ensuite, une formation plus académique permet d'apporter une vision concrète du métier de pilote et des différents éléments qui composent le tunnelier, appuyée également par le partage d'expérience avec les experts de Bouygues Travaux Publics. Enfin, les exercices sur le simulateur Thalia permettent au pilote débutant d'apprendre les réflexes permettant de maintenir la machine en sécurité. L'instructeur définit les conditions d'utilisation du simulateur : il fournit des consignes de pilotage et choisit un

**8- Élève devant le simulateur de pilotage de tunnelier Thalia.**

**8- Student in front of the Thalia TBM operation simulator.**

scénario. Ce dernier décrit la trajectoire théorique du tunnelier, et le long de cette trajectoire, la nature des terrains, les discontinuités géologiques, une possible convergence de terrain, mais aussi des éventuels écarts de fonctionnement de la machine (panne et usure, changement de composition du marin, colmatage, sur-excavation) (figure 6). L'élève interagit avec la machine par le pupitre de commande et contrôle chaque sous-système de la machine : abattage, marinage, guidage, mortier de bourrage. En fin de session, le formateur restitue à l'élève l'historique de ses manœuvres sous la forme d'un rapport de creusement, qu'il peut comparer à un modèle de référence. Cela lui permet d'évaluer sa progression au fil des séances (figure 7). Il reçoit en fin d'apprentissage un certificat de passage sur simulateur, indiquant le nombre d'heures d'entraînement, les scénarios évalués et le niveau atteint dans chaque

scénario. Pour finir, cette formation ne serait pas complète sans une période d'accompagnement sur le terrain sous forme de tutorat, pour une découverte et une prise en main progressive du poste. La formation de septembre 2016 permet à Bouygues Travaux Publics de diplômer une première promotion de 10 nouveaux pilotes, dont 3 jeunes femmes, aujourd'hui en cours de tutorat sur les chantiers en France (Ligne 14, Nice) et à l'international (tunnels de Tuen Mun - Chek Lap Kok, Lian Tang et Lot 1128 à Hong Kong). Une élève de cette première promotion se souvient que, pour se lancer dans cette formation, il lui fallait être curieuse et convaincue que les constructions souterraines sont un métier d'avenir. Cette formation lui a apporté la majeure partie de ses connaissances théoriques applicables aujourd'hui en cabine de pilotage. Son apprentissage ne fait que commencer, et chaque journée apporte son lot de problématiques plus complexes les unes que les autres, ce qui rend le poste passionnant (figure 8). Les bénéfices de cette formation initiale sont constatés sur les chantiers : les apprentis pilotes arrivent avec les idées claires sur le fonctionnement général d'un tunnelier et ont déjà des automatismes de pilotage. Ils se voient confier très rapidement les commandes sous la surveillance d'un pilote expérimenté.

En mettant en lumière la modernité d'un métier méconnu qui a beaucoup évolué ces dernières années, cette formation permet de développer l'employabilité des collaborateurs dans un secteur en tension et à favoriser une insertion durable dans la vie active. Pour la Direction Générale de Bouygues Travaux Publics, former les collaborateurs en anticipant les besoins est primordial. Dans ce projet, l'implication de toutes les composantes de l'entreprise (Travaux, Direction technique, Ressources humaines, Tunnel Lab, etc.), tant en France qu'à l'international, a été déterminante. Dans un esprit qui fait un pied de nez à la vision caricaturale à court-terme de la gestion des collaborateurs au sein des entreprises, cette démarche permet à des jeunes de découvrir un métier de haute expertise, la plupart du temps méconnu. En leur confiant des machines d'une très grande technicité, l'opportunité leur est offerte de développer un savoir-faire qui leur permettra un parcours de carrière varié et valorisant.

**LA SUITE DU PROJET  
LES ÉVOLUTIONS DE THALIA**

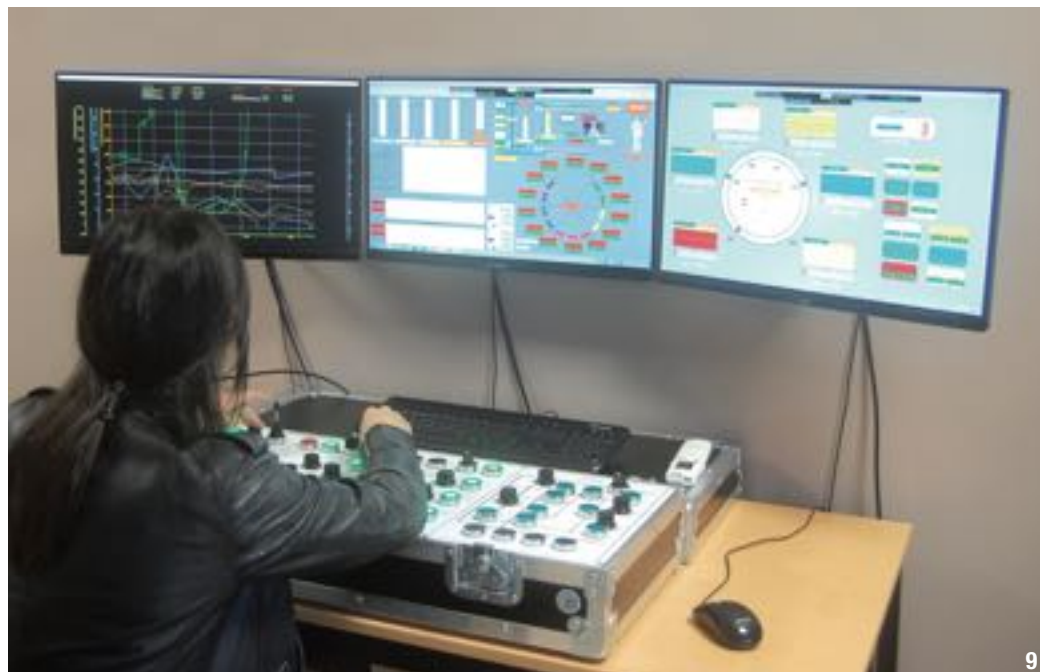
En juin 2016, Le Tunnel Lab, service Innovation de Bouygues Travaux Publics créé et rattaché à la Direction Optimisation industrielle, prend le relais de la Direction Travaux aux côtés de la Direction Technique. ▶

Ensemble, au premier semestre 2017, ces services travaillent sur une deuxième version du logiciel du simulateur qui intègre de nouvelles fonctions et de nouveaux exercices. Ils font également évoluer le support du pupitre afin de coller plus encore à la réalité d'une cabine de pilotage : dans sa nouvelle version, Thalia permet aux pilotes de travailler sur des potentiomètres et des boutons physiques semblables à ceux présents dans les postes de pilotage et non plus sur un écran tactile (figure 9).

Les équipes réfléchissent aujourd'hui à de nouvelles améliorations pour couvrir certains types de tunnelier moins répandus que les machines à pression de terre et à pression de boue.

### LES ÉVOLUTIONS DE L'UTILISATION DE THALIA

Après le succès de la première formation de pilotes et face à une demande sur le marché du travail pour l'ensemble des chantiers du Grand Paris Express, Bouygues Travaux Publics décide non seulement de la déployer en interne au fur et à mesure du lancement de ses chantiers mais aussi de la proposer à ses confrères par l'intermédiaire de son centre de formation Gustave Eiffel. Une dizaine de pilotes du groupement Alliance, dont Demathieu



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS 9

Bard est mandataire, bénéficie ainsi de la formation en juin 2017.

Bouygues Travaux Publics souhaite également approfondir et renforcer le socle de connaissances des pilotes déjà en fonction. L'objectif est de déployer un simulateur Thalia sur chaque chantier afin de profiter du temps libre des pilotes en dehors des périodes

**9- Nouveau pupitre du simulateur Thalia.**

**9- New console of the Thalia simulator.**

de creusement (arrêt maintenance, montage/démontage...) pour rafraîchir ou améliorer des connaissances déjà acquises. Le logiciel pourrait alors également évoluer pour pouvoir rejouer des enregistrements « à la seconde » de creusement réels, et le pilote travailler sur des cas réels déjà rencontrés sur des chantiers. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

### CONCEPTION & GESTION DE PROJET :

Tunnel Lab (Direction optimisation industrielle) et Centre de calcul technique (Direction industrielle), Bouygues Travaux Publics

### SUIVI DE LA FORMATION :

Direction des Ressources humaines Bouygues Travaux Publics, Centre Gustave Eiffel

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DU SIMULATEUR THALIA :**  
18 mois

**SIMULATEURS DÉPLOYÉS POUR LES CHANTIERS :**  
2 (L14, Tramway de Nice)

**HEURES DE FORMATION POUR PILOTES DÉBUTANTS :**  
240 heures (6 semaines)

**PILOTES BOUYGUES TP FORMÉS :**  
10 pilotes, 22 ans en moyenne, 7 hommes et 3 femmes

## ABSTRACT

### THALIA, THE TBM OPERATION SIMULATOR BY BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

ANNE-LAURE GIARD, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

**TBM operator** is a job profile currently in strong demand, notably for the worksites of the 'Grand Paris Express' project, but not well known by young graduates. It requires long training, which is complicated when it takes place exclusively in the field. Given this situation, Bouygues Travaux Publics has developed Thalia, a TBM operation simulator. Used for specific training for the job of TBM operator, this simulator allows a novice operator to get an idea of the main principles of operation of a TBM and master difficulties related to the machine or the environment which he will have to face in the field. □

### THALIA, EL SIMULADOR DE PILOTAJE DE TUNELADORA POR BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

ANNE-LAURE GIARD, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

**El oficio de piloto de tuneladora**, actualmente en auge, registra una fuerte demanda en el marco de las obras del proyecto Grand Paris Express, aunque es poco conocido entre los jóvenes licenciados. Requiere una formación larga y compleja en tanto que se desarrolla exclusivamente sobre el terreno. Frente a este hecho, Bouygues Travaux Publics ha creado Thalia, un simulador de pilotaje de tuneladora. Utilizado en el marco de una formación específica sobre el oficio de piloto, este simulador permite al piloto principiante familiarizarse con los principios de funcionamiento de una tuneladora y gestionar las dificultades relacionadas con la máquina o el entorno con las que se enfrentará en la práctica. □

# ArcelorMittal Palplanches

Solutions pour vos projets de fondations spéciales et soutènements  
[palplanches.arcelormittal.com](http://palplanches.arcelormittal.com)



ArcelorMittal



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



1  
© ARTELIA

# LIGNE 11 - STATION SERGE-GAINSBOURG

AUTEUR : ANIS CHAAR, RESPONSABLE TRAVAUX DE LA STATION SEGA, ARTELIA

DEPUIS DÉBUT 2014 ET DANS LE CADRE D'UN MARCHÉ MENÉ SOUS LA MAÎTRISE D'ŒUVRE DU GROUPEMENT SYSTRA, ARTELIA, ET RICHEZ ASSOCIÉS, ARTELIA ASSURE LA CONCEPTION ET LE SUIVI DES TRAVAUX DE LA FUTURE STATION SERGE-GAINSBOURG, SE SITUANT DANS LA COMMUNE DES LILAS, ET QUI EST LA PREMIÈRE STATION DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 11 DEPUIS LE TERMINUS ACTUEL. LE PROJET EST ENTRÉ MI-2017 DANS SA PHASE D'EXÉCUTION AVEC L'OBJECTIF DE POUVOIR RELEVER LE DÉFI DE LA RÉALISATION D'OUVRAGES COMPLEXES DANS UN CONTEXTE URBAIN TRÈS DENSE ET AVEC LA PRISE EN COMPTE DE MULTIPLES INTERFACES INTERNES ET EXTERNES.

## PRÉSENTATION DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 11 À L'EST

De Mairie-des-Lilas à Rosny-Bois-Perrier, le prolongement à l'est de la Ligne 11 du métro parisien s'étend sur 6 km dont 5,4 km en exploitation commerciale (figure 2).

Sa mise en service est prévue à l'horizon 2022. Ce projet, conduit sous la maîtrise d'ouvrage conjointe de la RATP et d'Île-de-France Mobilités, prévoit la création de 6 nouvelles stations, dont une en viaduc, et d'un nouvel atelier de maintenance des trains.

Le projet de prolongement de la Ligne 11 à l'est jusqu'à Rosny-sous-Bois fait l'objet d'une mobilisation unique de la part des financeurs. Le coût du projet est de 1,3 milliard d'euros financé par l'État, la Région Île-de-France, la Société du Grand Paris, le Département de Seine-Saint-Denis, la Mairie de Paris, la RATP et Île-de-France Mobilités.

## PRÉSENTATION DE LA STATION SERGE-GAINSBOURG

Les travaux de la station Serge-Gainsbourg, première station du prolongement après le terminus actuel menée sous la maîtrise d'œuvre du groupement Systra, Artelia, et Richez Associés fait partie d'un marché de travaux, attribué le 27 juin 2016 au groupement Alliance formée par les entreprises suivantes : Nge Génie-Civil, Demathieu Bard Construction, Implenia et Pizzarotti, Franki Foundations, Atlas Foundations, Gts.

Le marché porte sur un tunnel circulaire de 3 km de long, d'un diamètre intérieur de 7,95 m, à exécuter au tunnelier, le gros œuvre de 4 stations de dimensions approximatives 82 m x 20 m et de 20 à 25 m de profondeur : 2 stations à l'abri de parois moulées et 2 stations mixtes (puits en parois moulées et partie

souterraine en traditionnel) et de 3 ouvrages de ventilation et accès pompiers en puits blindés.

La station Serge-Gainsbourg est constituée de cinq ouvrages indépendants structurellement (figure 3) :

→ Le corps de la station : Il s'agit d'un ouvrage cadre réalisé en parois moulées à l'abri d'une dalle. Les dimensions utiles de l'ouvrage sont de l'ordre de 80,2 m de longueur utile, de 21,7 m de largeur et de

24 m de profondeur. La station comporte trois niveaux de planchers.

- L'accès principal est réalisé en puits blindé. Son radier se raccorde à la salle des billets du corps de la station à environ 8 m sous le terrain naturel. Ses dimensions extérieures maximales sont de 37,1 m x 14,4 m.
- L'accès secondaire est réalisé en puits blindé. Son radier se raccorde à la salle des billets du corps de la station à environ 9 m sous le terrain naturel. Ses dimensions extérieures maximales sont 39,05 m x 7,5 m.
- La BAM (baie d'aération motorisée) Est a pour dimensions en plan 8,60 m x 3,20 m et une profondeur de 14 m sous le terrain naturel. La BAM Ouest a pour dimensions en plan 8,00 m x 5,65 m et une profondeur de 14 m sous le terrain naturel. Les BAM sont réalisées en puits blindés.

**1- Travaux de parois moulées de la station.**

**1- Diaphragm wall work for the station.**



### CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

La station Serge-Gainsbourg s'inscrit dans un contexte géologique caractérisé schématiquement par la succession suivante (figure 4) :

- Les remblais (en gris) : La nature et la composition de cette couche sont hétérogènes. L'épaisseur de ces remblais est variable, de l'ordre de 4 à 5 m environ.
- Le calcaire de Brie (en rouge) : est constitué de marnes beige marron à blanchâtres avec des cailloutis calcaires. Il peut comporter des horizons de marnes sableuses et des blocs de silex. Son épaisseur varie de 3 à 4,5 m environ au droit de la station.

- 2- Carte du prolongement de la Ligne 11 à l'est.
- 3- Plan de repérage de la station.

- 2- Map of the eastern extension of Line 11.
- 3- Location drawing of the station.

- Les Argiles Vertes (en vert) : c'est une formation quasi-homogène constituée d'argiles de couleur vert-kaki à vert foncé. Son épaisseur varie de 8 à 10 m environ au

droit de la station. Une pression de gonflement effective de 260 KPa dans cette couche est considérée.

- Les marnes de Pantin (en bleu) sont constituées d'horizons de marnes et de passages calcaires, pouvant contenir localement des cailloutis et blocs calcaires. L'interface supérieure avec les Argiles Vertes apparaît parfois localement décomprimée. Son épaisseur varie de 5 à 6 m.
- Les marnes d'Argenteuil (en bleu) sont composées de marnes argileuses généralement de couleur bleuâtre entrecoupées de bancs de marnes plus calcaires, grisâtres à verdâtres en partie haute. Une pression de gonflement effective

de 180 KPa dans cette couche est considérée. Son épaisseur varie de 10 à 12 m environ au droit de la station. L'assise du radier de la station se fait sur cette couche.

- Les Masses et Marnes du Gypse (en jaune). Cette formation est composée de bancs gypseux parfois intercalés de marnes blanchâtres et de bancs épais de gypse saccharoïde. Au droit de la station, les Masses et Marnes du Gypse apparaissent compactes et plutôt saines, avec peu de passages de dissolution. Les parois moulées de la station sont fichées dans cette couche.

À noter qu'à l'est de la station une zone de dissolution des Masses et Marnes du Gypse a été identifiée, mais ces passages restent très localisés.

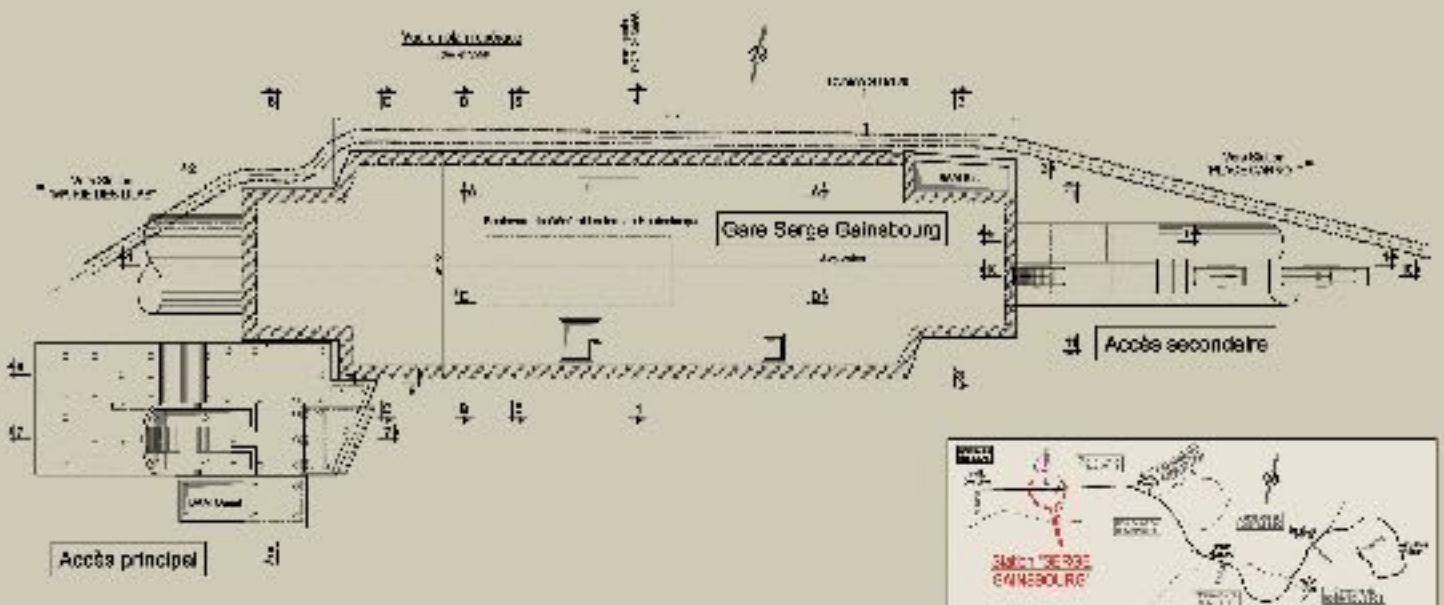
Les trois nappes suivantes ont été identifiées (figure 4) :

- La nappe des Calcaires de Brie à une profondeur de 3 à 5 m ;
- La nappe des Marnes de Pantin à une profondeur de 11 à 14 m ;
- La nappe des Masses et Marnes du Gypse est à une profondeur approximative de 45 m.

### CONTEXTE URBAIN

La station est implantée sur le boulevard du Général-Leclerc-de-Haute-cloque aux Lilas, lequel sera fermé avant les travaux, à proximité immédiate de plusieurs réseaux et bâtiments et leurs fondations (figure 5) :

### PLAN DE REPÉRAGE DE LA STATION



**4- Profil transversal géologique.**  
**5- Repérage de la station et du bâti environnant existant.**

**4- Geological cross section.**  
**5- Location drawing of the station and the surrounding building stock.**

- Au nord, la station longe le bâtiment d'habitation n°21 (R+3/R-1) sur 60 m et est implantée à 2,10 m du nu de ses fondations.
- Au sud-ouest, l'angle du parking n°28 (R+4/R-1), remanié préalablement aux travaux, se trouve à 60 cm de la future paroi moulée.
- Au sud-est, la station est à 50 cm d'un bâtiment d'habitation n°24 (R+4/R-1) remanié préalablement aux travaux.
- L'accès principal se trouve à une distance de 1 m d'un bâtiment d'habitation n°29 (R+18/R-1).
- L'ovoïde d'assainissement qui a été dévié le long des fondations du bâtiment n°28 au nord de la station est situé par endroit à 33 cm des parois moulées. Ce nouvel ovoïde a été réalisé par la DEA préalablement aux travaux de la station à partir du 2<sup>e</sup> semestre 2016.
- De nombreux réseaux en service se trouvant à l'intérieur de l'emprise et qui seront déviés en phase 2 (électricité, gaz, télécom, assainissement).

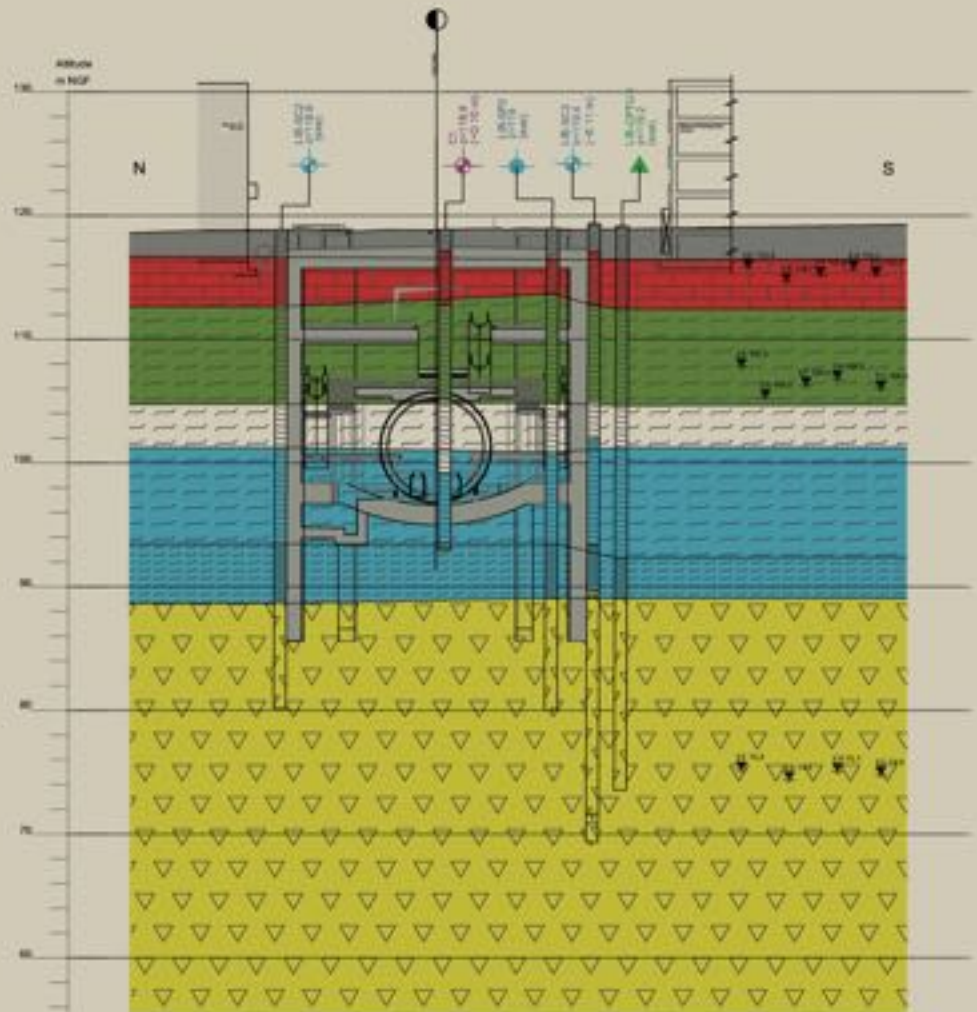
### TRAVAUX PRÉALABLES À LA RÉALISATION DE LA STATION

Préalablement aux travaux de la station, les travaux préparatoires suivants ont été rendus nécessaires en lien avec le contexte urbain environnant très dense :

#### DÉMOLITION PARTIELLE DES FONDATIONS DU PARKING N°28

Les investigations ont relevé que le parking est fondé superficiellement sur des semelles qui sont en débord par rapport à la façade. Ce qui a nécessité la démolition partielle de la semelle d'angle et d'une gaine de ventilation adjacente en excroissance de la façade, en conflit avec la station et avec un réseau d'assainissement Ø 300 mm à créer dans le cadre du marché de travaux de génie civil.

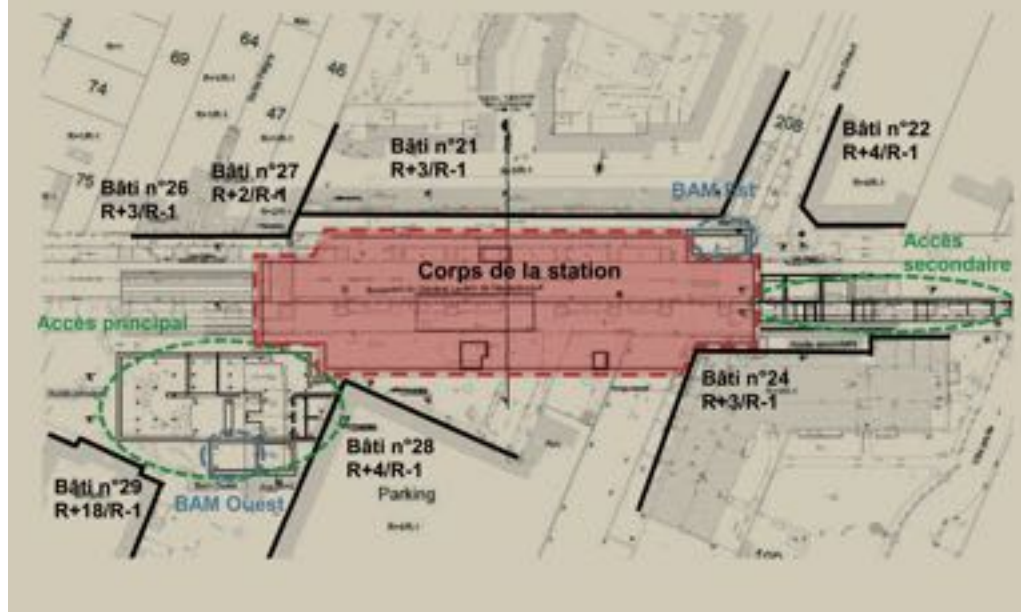
## PROFIL TRANSVERSAL GÉOLOGIQUE



4

© ALLIANCE

## REPÉRAGE DE LA STATION ET DU BÂTI ENVIRONNANT EXISTANT



5

© ARTELIA



Ces travaux ont eu lieu en janvier et février 2017 (figure 6), et ont permis de :

- Réduire la semelle jusqu'au pied de la façade en l'agrandissant vers l'intérieur ;
- Démolir et déplacer en façade l'ancienne gaine de ventilation.

#### MODIFICATION DE LA STRUCTURE DU PARKING DU BÂTIMENT N°24

Le niveau de sous-sol est en débord sur la façade extérieure. Une partie de ce sous-sol entre en conflit avec la future station.

Il a été établi que le plancher haut du sous-sol porte de la façade du bâtiment vers la façade du parking. Le choix a donc été de démolir entièrement le plancher sur la zone concernée.

Un nouveau voile de façade sous-sol a été recréé, décalé de 50 cm vers l'extérieur par rapport à la façade du bâtiment. Ces travaux ont eu lieu d'avril à octobre 2016 en maintenant les fonctionnalités du parking existant (figure 7).

#### CRÉATION DE LA VOIRIE D'ACCÈS AU PARKING DU BÂTIMENT N°28

La fermeture du boulevard Général-Leclerc nécessite l'interruption de l'accès au parking n°21. Un accès a été créé à travers une ouverture réalisée à l'arrière de ce bâtiment.

Une intervention pour créer une voirie intérieure qui se raccorde à la voirie existante a eu lieu dans le cadre du marché de travaux de génie civil, au préalable de la fermeture du boulevard ayant eu lieu le 28 avril 2017.

#### CRÉATION DE L'OVOÏDE DEA

La DEA a procédé au dévoiement de l'ovoïde existant au nord de la future station à partir du deuxième semestre 2016. Vu la proximité de cet ovoïde par rapport à la station (figure 8), en plus du récolement effectué par la DEA, des relevés topographiques contradictoires ont été réalisés par la RATP afin de déterminer la position, ce qui a permis de caler les murettes-guides pour les travaux de parois moulées.

#### MISE EN PLACE D'UN ÉCHAFAUDAGE SUR LA FAÇADE DU BÂTIMENT N°28

Suite à la demande des pompiers, un échafaudage a été mis en place sur la façade du bâtiment n°28 pour permettre l'intervention des pompiers

en cas de sinistre pendant les travaux. Ces travaux ont eu lieu dans le cadre du marché travaux de la station pendant la phase de préparation.

#### PRÉSENTATION DU PHASAGE GÉNÉRAL DE LA STATION ET DES PRINCIPALES INTERFACES

Le phasage de la station est séquencé selon plusieurs phases :

**Phase 1 :** d'une durée de 13 mois et qui a démarré le 28 avril 2017.

Il s'agit de la phase de la réalisation de la demi-dalle Nord et de la BAM Est (figure 9) et s'enchaîne comme suit :

- Installation de chantier ;
- Réalisation des injections dans les Calcaires de Brie et dans les Masses et Marnes du Gypse, pour ▷

6- Travaux de démolition partielle des fondations du parking n°28.

7- Travaux de modification de la structure du parking du bâtiment n°24.

6- Partial demolition work on the foundations of car park No. 28.

7- Alteration works on the structure of the car park of building No. 24.



© ARTELIA  
6



© ARTELIA  
7

éviter les pertes de boues lors des forages des parois moulées et assurer l'homogénéité des terrains sous-jacents par remplissage des éventuelles dissolutions ;

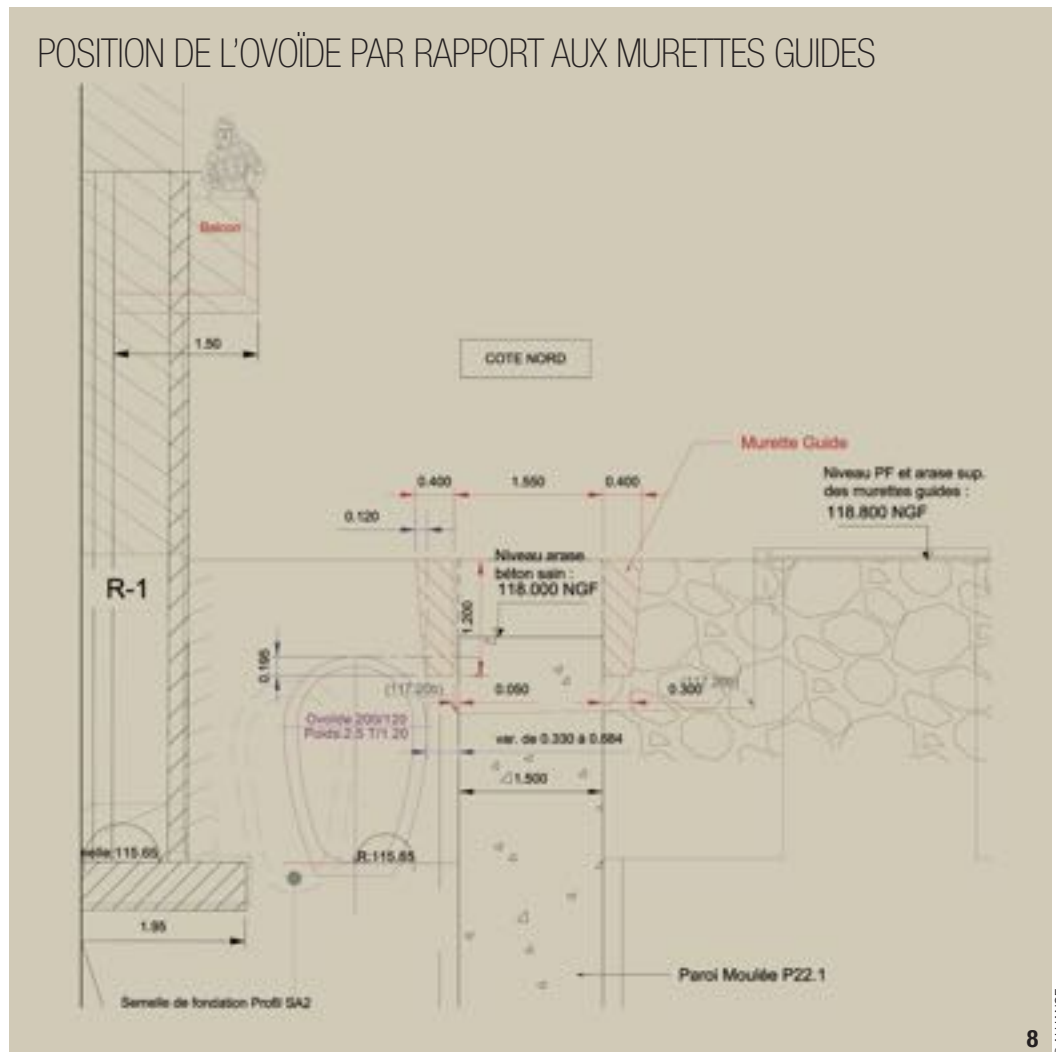
- Réalisation des parois moulées Nord, d'une épaisseur de 1,20 m à 1,50 m et d'une profondeur de 33 m ;
- Pré-terrassement de 3,70 m avec soutènement type berlinoise et mise en place d'un lit de butons provisoires en tête de la paroi moulée ;
- Construction de la dalle de couverture Nord d'une épaisseur de 1,70 m et mise en place de l'étanchéité ;

**8- Position de l'ovoïde par rapport aux murettes guides.**

**9- Phase 1 - Travaux de la demi-boîte Nord et de la BAM (baie d'aération motorisée) Est.**

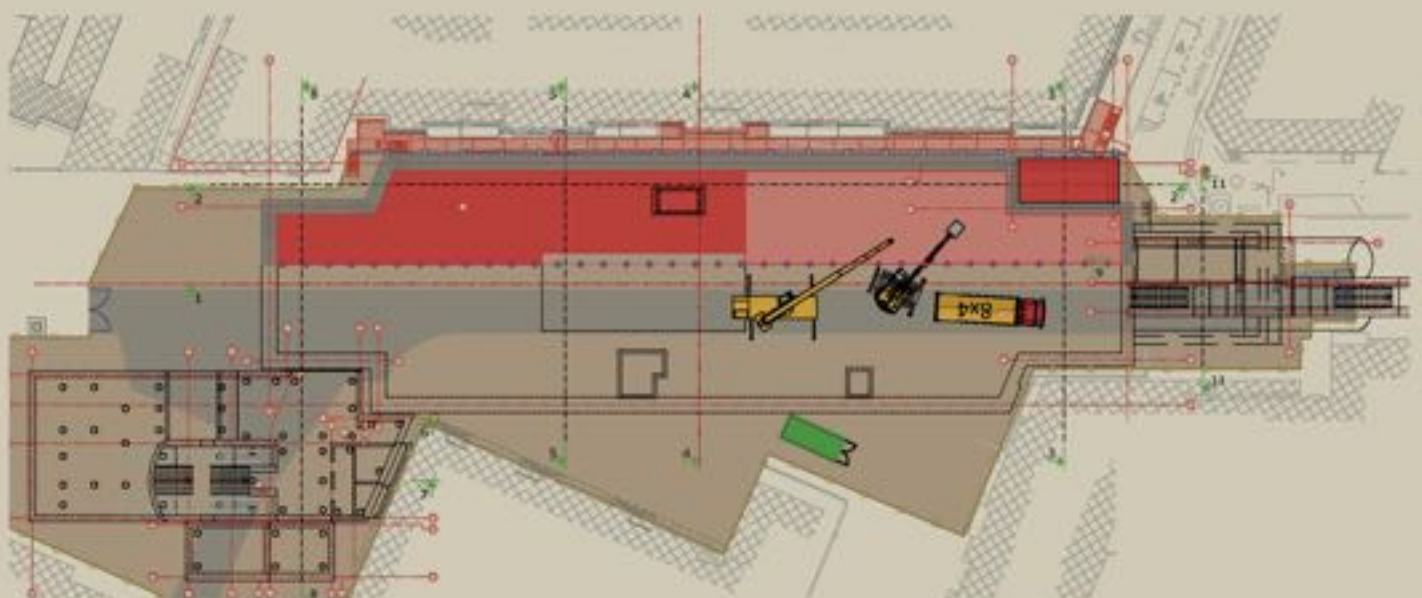
**8- Position of the ovoid relative to the guide walls.**

**9- Phase 1 - Work on the northern half-box and the eastern mechanical ventilation aperture.**



8 © ALLIANCE

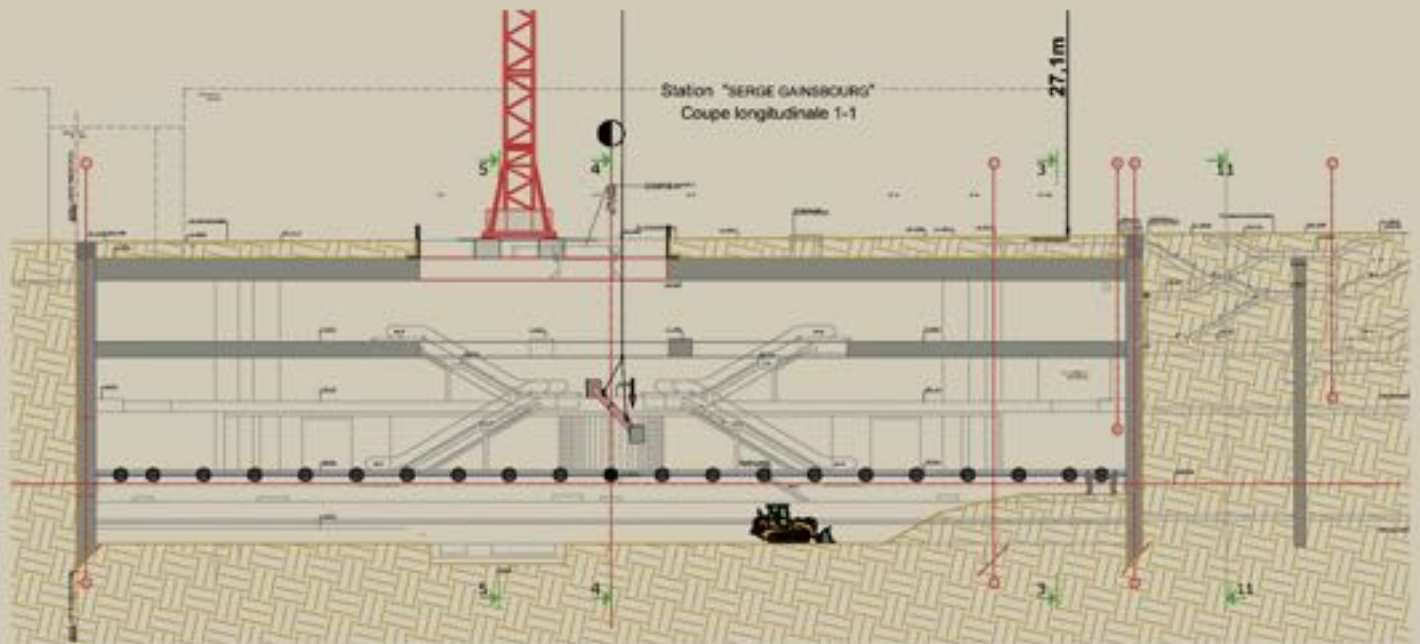
## PHASE 1 - TRAVAUX DE LA DEMI-BOÎTE NORD ET DE LA BAM (BAIE D'AÉRATION MOTORISÉE) EST



9

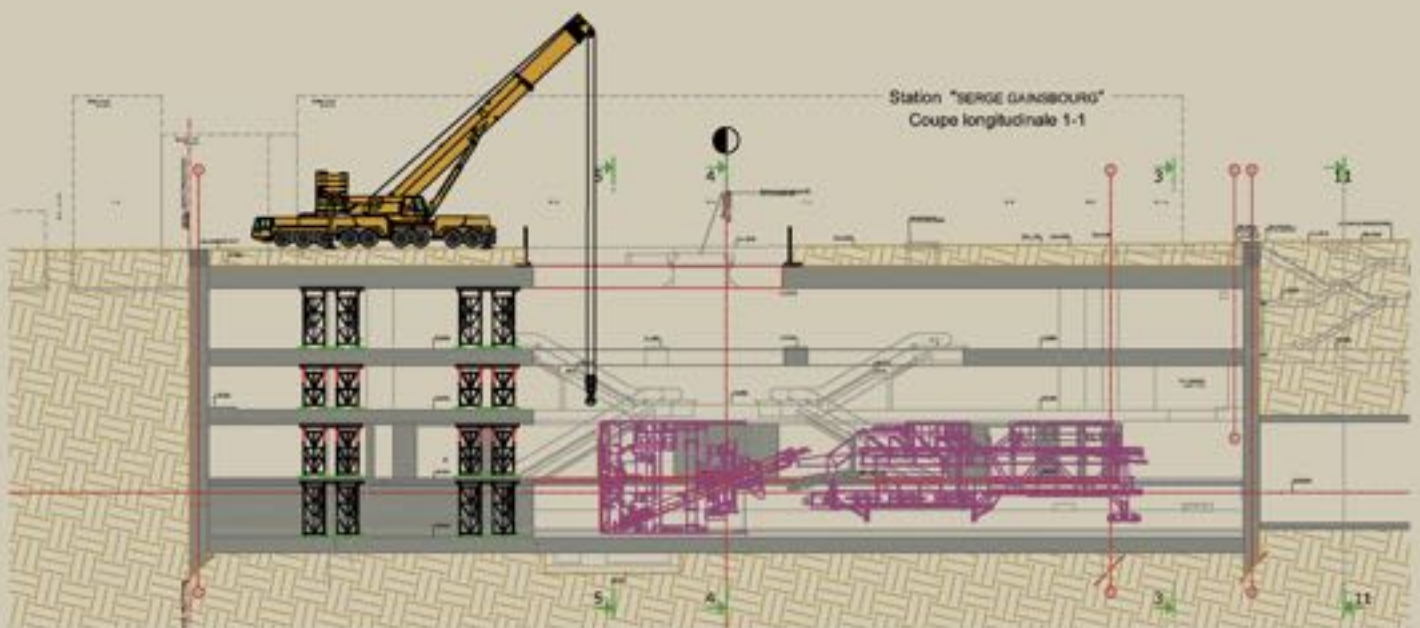
© ALLIANCE

## PHASE 3 - TERRASSEMENTS À LA DESCENTE DE LA STATION



10

## PHASE 3 - SORTIE TUNNELIER ET ÉTAIEMENT DE LA STATION



11

© ALLIANCE

- Recépage de la paroi moulée ;
- Remblaiement jusqu'au terrain naturel à la cote approximative de 119 NGF ;
- Suppression du lit de butons en tête de paroi ;
- Construction de la BAM Est à l'abri d'un puits blindé réalisé à l'avancement du terrassement. Des manchons sont préalablement mis en place dans les parois moulées pour connecter la BAM ;

**10- Phase 3 - Terrassements à la descente de la station.**

**11- Phase 3 - Sortie tunnelier et étaielement de la station.**

**10- Phase 3 - Earthworks for the station descent.**

**11- Phase 3 - TBM exit and station strutting.**

- Mise à disposition aux concessionnaires pour déplacement des réseaux.

**Phase 2 :** correspond à un arrêt de chantier de 6,5 mois pour permettre aux concessionnaires se trouvant au sud de la station de dévoyer au-dessus de la dalle de couverture réalisée en phase 1.

**Phase 3 :** d'une durée de près de deux ans, comprend la réalisation des ouvrages nécessaires pour accueillir le

tunnelier qui aura commencé à creuser en 2019 et à la mise à disposition des ouvrages pour les travaux de voies ferrées et d'aménagement de la station, elle se déroulera comme suit :

- La réalisation de la paroi moulée Sud et de la dalle de couverture Sud comme sur la phase 1, de sorte à constituer le complément de la dalle de couverture. Une trémie centrale de 20 m x 5 m est conservée et permettra l'approvisionnement du

chantier pendant les travaux de génie civil de cette phase et l'accès aux travaux de voies ferrées par la suite.

- Terrassement de la station et coulage à l'avancement des structures (les dalles sont coulées à la descente, au fur et à mesure du terrassement, sauf la dalle mezzanine) avec mise en place d'un butonnage provisoire (figure 10) comme suit :
  - Excavation jusqu'au niveau 109,65 et réalisation de la dalle du niveau N-1 au niveau supérieur 110,86.
  - Excavation jusqu'au niveau du radier à 95 et mise en place à la descente d'un à deux lits de butons.
  - Réalisation du radier.

Dès lors que le radier est achevé, les lits de butons sont déposés et la station est prête à accueillir le tunnelier.

Les travaux de la dalle N-2 (mezzanine) à la remontée se poursuivront côté Ouest et aboutiront à la mise en place d'un étaieement des dalles pour recevoir le poids de la grue qui se mettra en place en surface pour sortir le tunnelier (figure 11). Les travaux de réalisation des parties Est et centrale marqueront un arrêt jusqu'à la sortie du tunnelier. Le tunnelier percera le tympan Est et sera ripé jusqu'à la trémie centrale par laquelle il sera sorti.

Le percement du tympan Ouest sera réalisé pour permettre la création du raccordement avec un tunnel traditionnel qui reliera l'ancien terminus à la station. Les travaux de réalisation du tunnel traditionnel relèvent d'un marché travaux sous maîtrise d'œuvre et maîtrise d'ouvrage de la RATP.

En parallèle des travaux du corps de la station auront lieu les travaux de construction de l'accès principal de la station et de la BAM Ouest.

**Phase 4 :** d'une durée de 10 mois comprend :

- La pose de la voie, sous maîtrise d'œuvre RATP, qui s'opère par l'intermédiaire de la trémie centrale ayant servi pour l'évacuation des déblais et la sortie du tunnelier ;
- L'aménagement interne des locaux prioritaires de la station et des accès se poursuit en dehors de la zone neutralisée par le chantier de voie (emprise de surface 1 000 m<sup>2</sup>, trémie et volumes neutralisés dans la station).

**Phase 5 :** d'une durée de 7 mois. Elle démarrera après la fin des travaux des voies ferrées et des locaux prioritaires et consistera en la fermeture de toutes les trémies pour mise en configuration finale du corps de la station

## CRITÈRES DE DÉPLACEMENTS CONTRACTUELS ET SEUILS DE PILOTAGE

Classe de Niveau	Sensibilité vis-à-vis des déformations											
	U (Système de surveillance)			A (Fer sensible)			C (Accessible)			D (Très accessible)		
	Tassement (mm)	Mise en pente (‰)	Déformation horizontale (%)	Tassement (mm)	Mise en pente (‰)	Déformation horizontale (%)	Tassement (mm)	Mise en pente (‰)	Déformation horizontale (%)	Tassement (mm)	Mise en pente (‰)	Déformation horizontale (%)
	T <sub>1</sub> = 1			T <sub>1</sub> = 0,7			T <sub>1</sub> = 1,7			T <sub>1</sub> = 2		
1	<10	<2/1000	<0,05	10	<2,5/1000	<0,07	10	<2,5/1000	2/1000	10	<2/1000	<0,05
2	10-25	2/1000-12/1000	0,05-0,25	10-25	2,5/1000-42/1000	0,07-0,11	10-15	2,5/1000-10/1000	10/1000-15/1000	10-15	2/1000-1,7/1000	0,05-0,033
3	25-35	12/1000-20/1000	0,25-0,50	25-35	10/1000-10/1000	0,11-0,12	15-20	2/1000-10/1000	10/1000-15/1000	15-20	2/1000-3/1000	0,033-0,017
4	>35	>20/1000	>0,50	>35	>10/1000	>0,12	>20	>1/1000	>15/1000	>20	>3/1000	>0,017

Paramètre de contrôle	Seuils de pilotage	
	Vigilance	Alerte
Tassement local	0,2 %	1,0 %
Taux de déformation	5 à 14 par 1000	5 à 15 par 1000
Mise en pente	0,7 ‰	1,0 ‰
Déformation horizontal	0,7 ‰	1,0 ‰

### 12- Critères de déplacements contractuels et seuils de pilotage.

### 12- Contractual movement criteria and control thresholds.

ainsi qu'en la réalisation du gros œuvre de l'accès secondaire.

**Phase 6 :** poursuite des travaux d'aménagement et fin des travaux de la station.

### PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE DE SUIVI DES DÉPLACEMENTS DU BÂTI PENDANT LES TRAVAUX

Préalablement aux travaux, une enquête bâti a été réalisée et a permis de fournir un classement en sensibilité des bâtiments en quatre catégories :

## PRINCIPALES QUANTITÉS

- BÉTON POUR PAROIS MOULÉES :** 10 320 m<sup>3</sup>
- ACIERS POUR PAROIS MOULÉES :** 1 380 t
- BÉTONS POUR STRUCTURES INTERNES :** 14 780 m<sup>3</sup>
- ACIERS POUR STRUCTURES INTERNES :** 1 446 t
- TERRASSEMENTS :** 46 000 m<sup>3</sup>
- PROFILÉS MÉTALLIQUES POUR BUTONS LIERNES, BERLINOISES ET PUIITS BLINDÉS :** 1 965 t

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE :** RATP
- MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Systra (mandataire), Artélia, Richez Associés
- BUREAU DE CONTRÔLE :** Apave
- ASSISTANT À MAÎTRISE D'OUVRAGE DE LA COORDINATION DES CONCESSIONNAIRES :** Segic
- SECOND REGARD GÉOTECHNIQUE :** Lombardi SA
- GROUPEMENT D'ENTREPRISES :** Nge Génie-Civil, Demathieu Bard Construction, Implemia, Pizarrotti, Franki Foundations, Atlas Fondations, Gts
- CSPS (Coordinateur Sécurité et Protection de la Santé) :** Degouy

moyennement sensibles, peu sensible, sensible et très sensible.

Une définition des classes de dommages a été également établie.

Pour chaque bâtiment, des valeurs des seuils contractuels de tassements, de déformation horizontale et de mise en pente ont été déterminées sur la base des classements en sensibilité (figure 12). À partir de ces seuils, des seuils de pilotage (alerte et vigilance) ont été fixés (figure 12).

Avant le début des travaux, les tassements prévisionnels de chaque bâtiment ont été déterminés par des calculs aux éléments finis type Plaxis 2D.

Afin de contrôler les déplacements éventuels des ouvrages environnants, un système d'auscultation a été mis en place pour mesurer l'impact des travaux à l'intérieur de la ZIG (zone d'influence géotechnique) sur les ouvrages existants (bâti, réseaux etc.) notamment les mouvements 3D du bâti

par mesures topographiques manuelles et automatiques.

Le système d'auscultation inclut également :

- Des mesures des vibrations et des bruits ;
- Des inclinomètres et des jauges de contrainte en parois moulées ;
- Des mesures piézométriques ;
- Des jauges de contraintes dans les butons ou les revêtements ;
- Des fissuromètres.

## DÉMARRAGE ET AVANCEMENT DES TRAVAUX

Les travaux d'installation de chantier ont commencé le 28 avril 2017, date de la fermeture du boulevard.

Les travaux de traitements de terrains ont eu lieu entre mai et début septembre 2017.

Les travaux de parois moulées de la première phase sont en cours actuellement et ont commencé mi-septembre 2017 (figure 1). □

### ABSTRACT

#### LINE 11 - SERGE-GAINSBORG STATION

ANIS CHAAR, ARTELIA

*Prior to civil engineering work on the Serge-Gainsbourg Station, preparatory work was performed on the surrounding buildings to compensate for the closing of Général-Leclerc-de-Hautecloque boulevard and resolve conflicts between the station and the existing structures. Given the proximity of the existing building, it was necessary to establish a monitoring system to follow up in real time the nuisances generated by the works. The station is earmarked to receive the exit of a mechanised TBM coming from the east and a connection with a conventional tunnel in the west. The station will also serve as a supply shaft for railway works. Work phasing for the station, which is planned to be executed over a period of about six years, covers a sequence of tasks involving several contractors and several trades. □*

#### LÍNEA 11 - ESTACIÓN SERGE-GAINSBORG

ANIS CHAAR, ARTELIA

*Previamente a las obras de ingeniería civil de la estación Serge-Gainsbourg, se han llevado a cabo obras preliminares en los edificios circundantes para paliar el cierre del boulevard Général-Leclerc-de-Hautecloque y solventar los conflictos entre la estación y las construcciones existentes. La proximidad del edificio existente ha requerido la implementación de un sistema de auscultación para seguir en tiempo real los problemas generados por las obras. Está previsto que la estación acoga la salida de una tuneladora mecanizada procedente del este y la conexión con un túnel tradicional por el oeste. Asimismo, la estación servirá de pozo de aprovisionamiento para las obras de vías férreas. La organización por fases de las obras de la estación, cuya realización tendrá una duración estimada de unos 6 años, constituye un encadenamiento de tareas que implicarán a varias empresas intervinientes y varios oficios especializados. □*





terrasol

setec

Ingénieurs-Conseils  
en géotechnique

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

INGÉNIERIE

LOGICIELS

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

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

Dans le cadre du Grand Paris Express, Terrasol intervient aussi bien :

- en Maîtrise d'oeuvre au sein des équipes du groupe Setec sur la ligne 15 Sud-Ouest (T3), la ligne 14 Sud (T6), la ligne 15 Ouest (T4), ainsi que sur le projet Eole
- en AMO Géotechnique auprès de la Société du Grand Paris : tronçons T1 et T5a sur les lignes 16/17, et ligne 18 (T7)
- et auprès des entreprises sur la ligne 15 Sud-Est (T2) et la ligne 14 Nord

 <p>Paris Tél : +33 (0)1 82 51 52 00 Fax : +33 (0)1 82 51 52 99 Email : <a href="mailto:info@terrasol.com">info@terrasol.com</a></p>	<p>Lyon Tél : +33 (0)4 27 85 49 30 Fax : +33 (0)4 27 85 49 36 Email : <a href="mailto:lyon@terrasol.com">lyon@terrasol.com</a></p>	<p>Maroc Tél : +212 (0)51 25 53 69 Fax : +212 (529) 03 64 00 Email : <a href="mailto:telmaiki@terrasol.com">telmaiki@terrasol.com</a></p>	<p>Tunisie Tél : +270 71 23 63 14 Fax : +256 71 76 32 88 Email : <a href="mailto:info@terrasol.com">info@terrasol.com</a></p>
---	--	---	---

# LIGNE 15 SUD, TRONÇON 3 - TRAVERSÉES DE SEINE

AUTEURS : GUILLAUME PONS, DIRECTEUR DE PROJET DE LA LIGNE 15 SUD, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - PASCALE MATHERN, DIRECTRICE PROJET ET DET TRONÇON T3A, INGEROP - AYMERIC GELLEE, INGÉNIEUR GARE PDS, INGEROP

LE TRONÇON T3A DE LA LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS (GPE) SECTEUR OUEST FRANCHIT LA SEINE AU NIVEAU DE L'ÎLE SEGUIN. CE TRONÇON DE 4 KM EN SOUTERRAIN ENTRE LA GARE DE FORT-D'ISSY-VANVES-CLAMART (FDV EXCLUE) ET L'OUVRAGE ANNEXE ÎLE-DE-MONSIEUR COMPORTE LES GARES D'ISSY-RER (ISS) ET DE PONT-DE-SÈVRES (PDS), 4 OUVRAGES ANNEXES ET UNE PASSERELLE RELIANT L'ÎLE SEGUIN À LA GARE PDS. LA PROXIMITÉ DE LA SEINE CONSTITUE UN ATOUT POUR L'APPROVISIONNEMENT ET L'ÉVACUATION DES DÉBLAIS MAIS IMPLIQUE DES CONTRAINTES VIS-À-VIS DES PROTECTIONS AUX CRUES.



© ARCHITECTE D'UHLLEUL

## PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES OUVRAGES

Le tronçon T3A correspond à un secteur de tunnelier, le secteur Ouest, comprenant (figure 2) :

- Les gares d'Issy-RER et de Pont-de-Sèvres ;
- Le tunnel entre la gare de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart et l'ouvrage

annexe OA13 - Île-de-Monsieur ;  
 → Les ouvrages annexes OA09 - Parc-Henri-Barbusse, OA-P10 - Place-de-la-Résistance, OA12 - ZAC SAEM et OA13 - Île-de-Monsieur.

Le tunnel qui relie ces gares et ouvrages annexes est un ouvrage mono-tube à deux voies foré au tunnelier. Le contexte géotechnique et hydro-

### 1- Gare Pont-de-Sèvres dans son environnement.

### 1- Pont-de-Sèvres Station in its environment.

géologique du tronçon (figure 3) est découpé en quatre secteurs (d'ouest en est, soit dans le sens de progression du tunnelier) :

- Le secteur « Vallée de Seine » Ouest (OA13 - PDS environ) :  
 Le secteur de la Vallée de la Seine est caractérisé par le sub-affleurement de la Craie campanienne

## VUE EN PLAN DU TRACÉ ET DES OUVRAGES



2

© INGEROP

sous faible couverture alluvionnaire. Sous une épaisseur d'alluvions et de remblais d'environ 10 m à 15 m, la craie présente un profil d'altération très marqué en rive droite de la Seine (côté Boulogne-Billancourt) où la frange d'altération dépasse 20 m d'épaisseur, plus limité en rive gauche (Île-de-Monsieur).

La nappe alluvionnaire est en communication avec la nappe de la Craie en vallée de Seine. Le niveau piézométrique s'établit aux alentours de +26 m NGF.

- Le secteur « Vallée de Seine » Est (PDS - OA10 environ) :
- Ce secteur, principalement, de l'Île Saint-Germain aux coteaux d'Issy, est caractérisé par une remontée irrégulière du toit de la craie saine (Cs), se traduisant par une diminution de la frange d'altération. À l'extrémité Est du secteur, les

### 2- Vue en plan du tracé et des ouvrages.

### 3- Profil en long du tracé et des ouvrages.

#### 2- Plan view of the alignment and engineering structures.

#### 3- Longitudinal profile of the alignment and engineering structures.

« éboulis » (colluvions argileuses) s'intercalent sous forme lenticulaire avec les alluvions. La nappe alluvionnaire est en communication avec la nappe de la Craie en vallée de Seine. Le niveau piézométrique s'établit aux alentours de +26 NGF.

- Le secteur « Coteau d'Issy » Est (OA10 - ISS environ) :

Le coteau d'Issy forme le versant Ouest du plateau rencontré d'Issy à Cachan. Il est marqué par une forte épaisseur d'éboulis qui reposent successivement d'ouest en est, sur les alluvions de la Seine (en sortie de gare ISS), la Craie, les Marnes de Meudon, l'Argile Plastique et le Calcaire grossier.

L'altération de la Craie diminue progressivement en se rapprochant du plateau du fait de l'épaississement de la couverture.

Ce secteur rencontre les nappes suivantes :

- La nappe de la Craie dont le niveau se situe environ à +27 m NGF ;
- Bien qu'elle n'ait pas été sondée dans ce secteur, la nappe du Lutétien est potentiellement présente

autour de +61 NGF (niveau mesuré plus à l'est dans le plateau).

- Le secteur « Plateau d'Issy » Est (ISS - FDV environ) :

Le plateau d'Issy, sur lequel se situe le fort d'Issy, est constitué des niveaux inférieurs du Tertiaire parisien, avec en remontant, les Marno-calcaires de Meudon, les Argiles Plastiques (les Fausses Glaises sont absentes), le Calcaire Grossier, les Marnes & Caillasses, les Sables de Beauchamp et les Marno-calcaires de Saint-Ouen.

### STRATÉGIE D'INONDATION

La SGP affiche sa volonté de protéger des inondations les usagers et les infrastructures du réseau de transport. Pour ce faire, plusieurs types de crue sont définis :

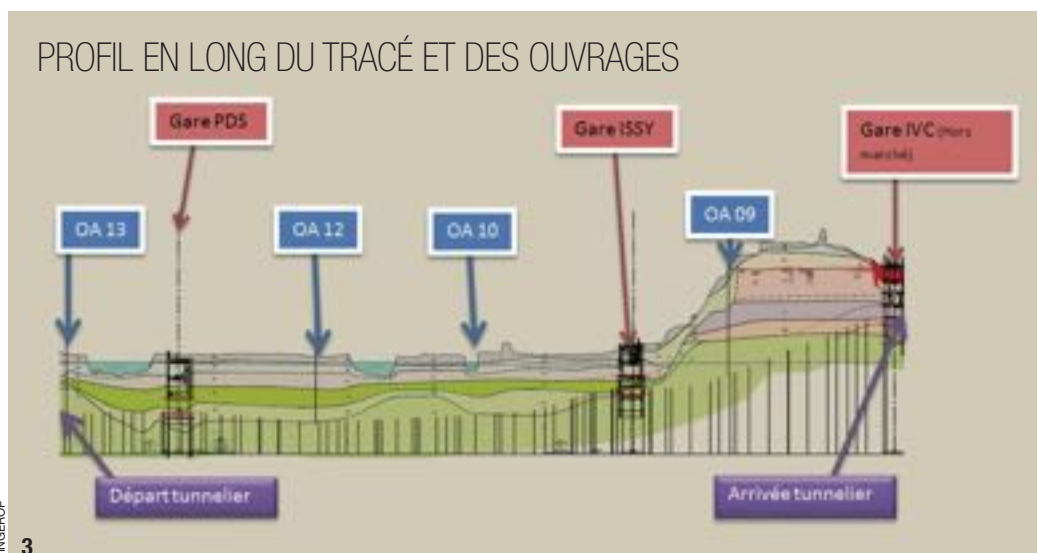
- Une crue de protection (ou crue de dimensionnement) ;
- Une crue « exceptionnelle » de protection (ou crue de protection supplémentaire) ;
- Une crue de chantier.

Les infrastructures et les moyens de protection au risque inondation doivent répondre aux enjeux suivants :

- Accessibilité des usagers et des secours, évacuation des usagers ;
- Nivellement urbain existant ;
- Protection des équipements sensibles ;
- Possibilité d'adapter la protection contre la « crue exceptionnelle » de protection ;
- Compensation des remblais mis en place et transparence hydraulique.

**En phase exploitation**, les crues de protection et les crues exceptionnelles de protection sont définies de la manière suivante :

## PROFIL EN LONG DU TRACÉ ET DES OUVRAGES



3

© INGEROP

- Crue de protection (ou crue de dimensionnement) : crue contre laquelle les infrastructures du réseau de transport doivent être protégées de façon « permanente » ; le niveau retenu est PPRI + 20 cm.
- Crue exceptionnelle de protection (ou crue de protection supplémentaire) : crue supérieure à la crue de protection contre laquelle les infrastructures du réseau de transport doivent être protégées de façon « supplémentaire », soit par l'ajout de moyens de protections provisoires, soit par l'adaptation des protections nécessaires pour la crue de dimensionnement ; le niveau retenu est EA2012 R1.15, avec une marge si possible de 20 cm également.

Les cotes de ces crues sont issues de documents et institutions suivantes :

- Crue centennale : Plans de Préventions des Risques d'Inondation départementaux, via la DRIEE/Préfecture ;
- Crue « EA2012 R1.15 » : État de l'art 2012 - Les scénarios de crues en région Île-de-France, DRIEE/Préfecture de la région d'Île-de-France ».

Le tableau A donne, par gare et par ouvrage annexe concerné, les niveaux de ces crues.

Les moyens de protection aux crues envisagés sont les suivants :

- Niveau des émergences (grilles de ventilation et trappes d'accès) à la cote PPRI + 20 cm ;
- Verrières de boîte gare sous niveau PPRI : mise en place d'un système de protection spécifique à activer en cas de crue ;
- Vis-à-vis des crues exceptionnelles : mise en place de batardeaux gonflables ou à remplir avec des matériaux tels que sacs de sable, ou bien batardeaux à poutrelles avec poteaux intermédiaires ou batardeaux à structure avec membrane étanche.

Des compensations par décaissement des terrains à proximité des ouvrages sont mises en place du fait des volumes et surfaces pris à la crue par les émergences.

**En phase chantier**, on doit mettre en œuvre des dispositifs préservant l'intégrité des fouilles et des installations afin qu'une fois la crue terminée les travaux puissent redémarrer rapidement. Il s'agit, par exemple, de la mise en place d'une poutre de chaînage périphérique des fouilles rehaussée par rapport au TN, ou de la couverture provisoire des trémies.



4 © INGEROP

Ainsi, on distingue, en phase chantier :

- La « crue de protection » : crue vis-à-vis de laquelle les ouvrages doivent être protégés de manière permanente d'un point de vue inondation.
- La « crue de protection complémentaire » : crue vis-à-vis de laquelle des protections complémentaires provisoires sont à mettre en œuvre, en cas de risque, en moins de 2 jours.
- La « crue de chantier » qui est la crue maximale pour laquelle l'activité de chantier doit être maintenue. Le niveau de cette crue est défini comme étant le minimum entre :
  - La cote d'inondation des emprises de chantier,
  - La cote d'inondation des voiries d'accès au chantier,
  - La cote au-delà de laquelle les structures de l'ouvrage ne permettent plus, en phase transitoire, de tenir la pression de l'eau entourant l'ouvrage (un pompage étant fait à l'intérieur).
- Le seuil de vigilance pour lequel il faut évacuer du chantier toutes les installations susceptibles de faire obstacle à l'écoulement des eaux et qui est le minimum entre le seuil de la crue de chantier et le seuil de vigilance orange défini par l'arrêté Loi sur l'eau, article 6, à la station de Suresnes.

Par exemple, pour l'ouvrage OA13 - Île-de-Monsieur, les dispositions envisagées sont proposées dans le tableau B.

- 4- Implantation OA13 - Île-de-Monsieur.**
- 5- Déplacement des péniches.**

- 4- Location of OA13 - Île-de-Monsieur.**
- 5- Barge movements.**

**OA13 - ÎLE-DE-MONSIEUR**

L'OA13 se situe entre la gare de Pont-de-Sèvres et la future gare de Saint-Cloud, qui fait partie du tronçon T4 de la L15 Sud (figure 4). Cet ouvrage est le point limite entre les marchés du tronçon T3 et du tronçon T4, il sert de point de départ du tunnelier qui réalise le secteur ouest du tronçon T3 jusqu'à la gare de Fort-d'Issy - Vanves - Clamart, sur la longueur de tunnel de 4,1 km environ.

TABLEAU A : NIVEAUX DE CRUES PAR GARE ET PAR OUVRAGE ANNEXE CONCERNÉ

Nom de l'ouvrage	Cote PPRI + 20 cm	Cote EA2012 R1.15
OA13 - Île-de-Monsieur	31,55 m NGF	31,93 m NGF
Gare de Pont de Sèvres	31,70 m NGF	32,18 m NGF
OA12 - ZAC SAEM	31,75 m NGF	32,18 m NGF
OA10 - Place de la Résistance	31,85 m NGF	32,41 m NGF



5 © INGEROP





© ARCHITECTE DUTHILLEUL  
6

L'ouvrage est constitué d'un puits en parois moulées, de forme trilobique constituée de trois parties circulaires sécantes, constituant le corps principal de l'ouvrage annexe. Le puits est axé sur le tunnel. Les dimensions en plan du puits sont les suivantes : longueur de 50 m et largeur maximale de 24 m entre nus de parois moulées et correspondant au diamètre des parties circulaires du puits. La largeur minimale du puits est de 18,36 m au niveau des jonctions des parties circulaires du puits. Le puits a une profondeur de 29,80 m (différence entre le TN moyen à 30,20 m NGF et le niveau du rail à 0,40 m NGF). Le lobe Ouest doit permettre d'intégrer la trémie de dimensions 20 m x 8 m nécessaire à l'approvisionnement des coupons de voies.

**6- Gare Pont-de-Sèvres dans son environnement.**

**6- Pont-de-Sèvres Station in its environment.**

Le lobe Est est relié par 2 tunnels logistiques, franchissant la plateforme du tramway T2 à 4 m minimum de profondeur, qui mènent au puits provisoire côté Seine réalisé pour assurer l'amenée des voussoirs et l'évacuation des déblais (95 % des volumes extraits soit environ 1 500 000 t) par voie fluviale. Les libérations d'emprise ont comporté le déplacement de 4 péniches habitées installées en rive de Seine (figure 5) vers le quai en face de l'OA10.

D'autre part, le groupement Horizon (Bouygues TP et Soletanche Bachy) doit assurer la maintenance des pontons pendant toute la durée du chantier dans la zone des péniches démenagées, remettre en place des fourreaux pour l'alimentation future en eau, télécom et électricité des péniches au droit du quai de l'OA13, enfin organiser un convoi pour le retour des péniches à leur emplacement initial.

**GARE DE PONT DE SÈVRES**

La gare de Pont-de-Sèvres est un ouvrage souterrain implanté sous le quai Georges-Gorse en rive droite de la Seine. La gare est construite dans une zone dense d'infrastructures routières, en bordure immédiate de la Seine et comporte des bâtis avoisinants (figures 1 et 6).

La gare est en connexion avec la station terminus Pont-de-Sèvres du métro M9. Une passerelle franchissant la Seine relie la gare à l'île Seguin (figure 7). La gare de Pont-de-Sèvres est constituée :

- D'une boîte rectangulaire en parois moulées, constituant le corps principal de la gare souterraine dont les dimensions intérieures principales sont : largeur 22,45 m, longueur 109 m (dimensions théoriques nettes, hors tolérance pour défaut de verticalité de 15 cm) et profondeur d'environ 34 m ;
- Du couloir de correspondance souterrain avec le métro M9 d'environ 200 m de longueur ;
- D'une émergence débouchant quai Georges-Gorse le long du bâtiment Square Com dénommée « émergence Square Com ».

La boîte gare, le couloir de correspondance M9 et l'émergence Square Com comportent une enceinte en paroi moulée présentant les caractéristiques suivantes :

- Les parois ont une épaisseur de 1,50 m et sont calepinées par panneaux de largeur 6,40 m sur les grands côtés de la boîte ;
- Elles sont prolongées par une jupe injectée réalisée dans la craie saine sur une hauteur d'environ 10 m, limitant les débits d'exhaure au cours de l'excavation ;

TABLEAU B : DISPOSITIONS CHANTIER VIS-À-VIS DES CRUES SUR OA13

Phase	Seuil concerné	Définition du seuil	Dispositions à prendre
Avant démarrage tunnel	Seuil d'évacuation	Minimum seuil crue de chantier et seuil de vigilance orange de l'arrêté LSE	Mesures d'évacuation du stock tampon de déblais et du matériel non rehaussé en cas d'alerte de crue.
	Crue de chantier	Crue quinquennale = 29,20 m NGF	Pompage des eaux dans l'ouvrage jusqu'à cette cote, Arrêt de l'activité, Seuil = limite structurelle de l'ouvrage en phase provisoire.
	Crue de protection	Crue quinquennale = 29,20 m NGF pour l'ouvrage - PPRI + 20 cm pour les installations de chantier	Pas de dispositif permanent particulier sur l'ouvrage, Mise hors crue sur pilotis des bases-vie, centrale à boue, groupe électrogène et transformateurs jusqu'à la cote PPRI + 20 cm, Produits polluants en cuves étanches arrimées et lestées.
	Crue de protection complément	Niveau > crue quinquennale	Noyage de l'ouvrage.
Après démarrage tunnel	Seuil d'évacuation	Idem avant démarrage	Idem avant démarrage.
	Crue de chantier	Crue décennale = niveau RD1 = 29,63 m NGF	Arrêt de l'activité, Seuil = niveau RD1 inondée (transport par camion impossible).
	Crue de protection	Centennale - niveau PPRI + 20 cm	Parois périphériques autour du puits, des galeries souterraines, des bassins d'exhaure du puits et de la centrale à boue à la cote PPRI + 20 cm, Mise hors crue sur pilotis des bases-vie, centrale à boue, groupe électrogène et transformateurs, Produits polluants en cuves étanches arrimées et lestées.
	Crue de protection complément	Niveau > centennale	Mise en place de dispositifs amovibles de protection autour de l'ouvrage.

7- Vue en plan -  
Gare Pont-de-  
Sèvres et  
passerelle.

8- Coupe lon-  
gitudinale de  
la passerelle.

7- Plan view -  
Pont-de-Sèvres  
Station and foot  
bridge.

8- Longitudinal  
section of the  
foot bridge.



© INGEROP  
7

→ Compte tenu de la mauvaise butée des terrains et du besoin de limiter les déplacements pris par la paroi vis-à-vis des avoisinants lors l'excavation, des dispositifs particuliers sont prévus tels que les diaphragmes provisoires en parois moulées, démolis en cours d'excavation, et des butons mis en place à l'avancement ;

→ Utilisation d'un béton de résistance élevée.

Les émergences de ventilation/désen-

fumage sont marquées par des voiles d'enceinte dont l'arase supérieure est portée au-dessus du niveau +31,50 m NGF de crue centennale.

#### LA PASSERELLE

La passerelle relie la rive Nord de l'île Seguin à la gare du Pont-de-Sèvres et aux voiries de Boulogne.

La passerelle réservée exclusivement aux modes doux a une largeur utile de 6 m et peut recevoir une circulation vélo. Sa géométrie et ses équipe-

ments permettent l'accès des PMR. La passerelle se décompose en deux ouvrages (figure 8) :

→ La passerelle principale avec 2 travées métalliques (100 m + 118 m environ) ;

→ Une rampe d'accès depuis le parvis (appelée aussi émergence vitrée), formant une partie du toit de la correspondance de la gare du Pont-de-Sèvres.

Les files d'appui sont positionnées de la façon suivante :

→ Culée C1 placée en bordure de la Coursive Nord ;

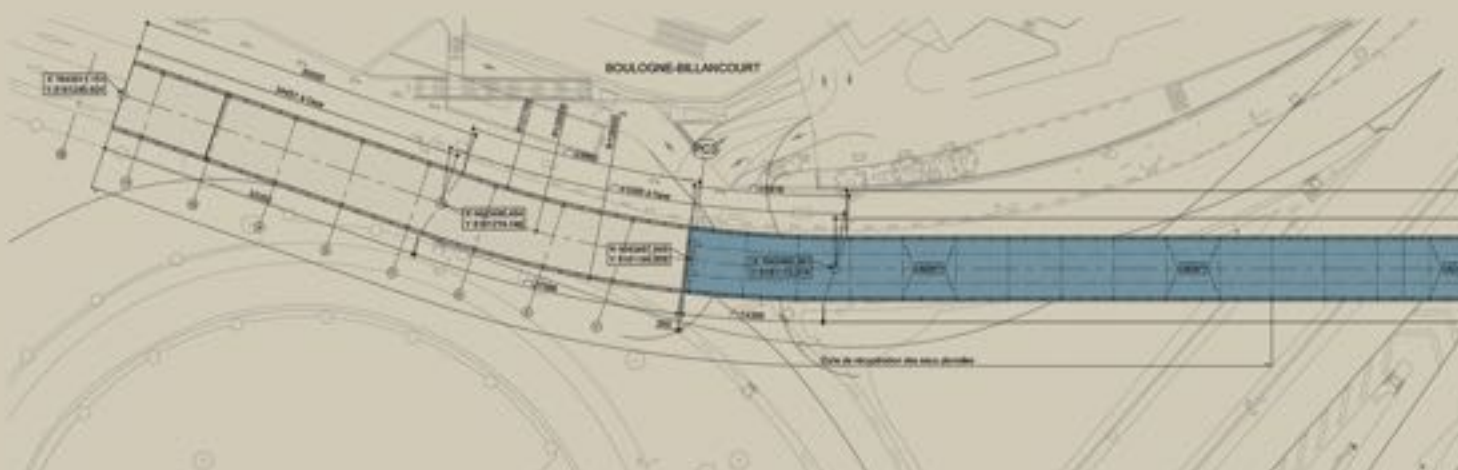
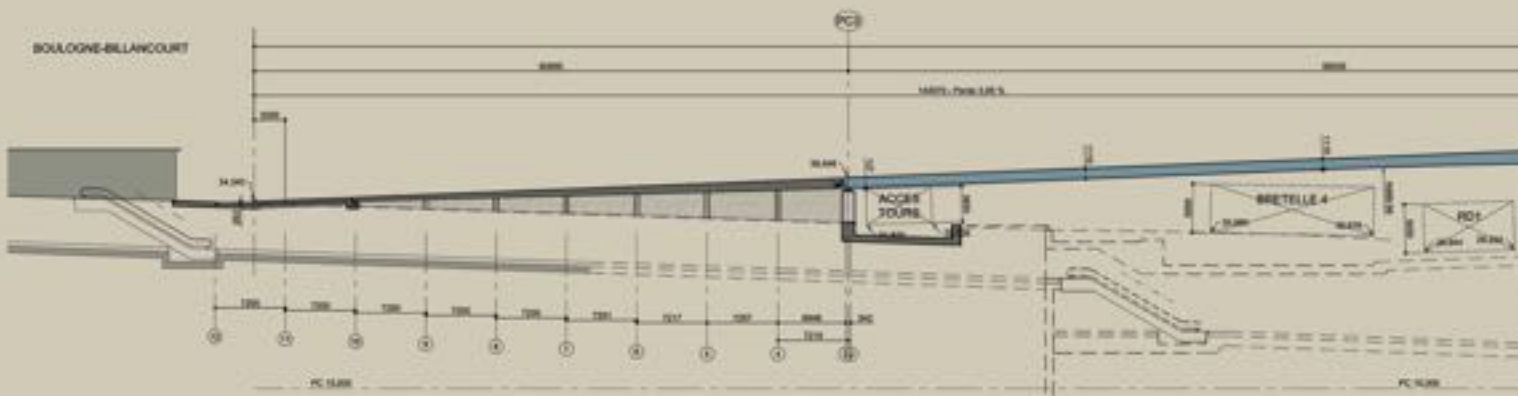
→ Pile P2 placée sur la paroi moulée côté Seine de la boîte gare ;

→ Pile culée PC3 implantée sur le couloir de correspondance de la gare du Pont-de-Sèvres, en bordure de l'accès au parking des tours de Boulogne (Trident notamment).

Le tablier de la passerelle dégage un gabarit de 7 m au-dessus de la Ligne d'Eau de Référence (LER), et de 5,25 m au-dessus des Plus Hautes Eaux Navi-

© INGEROP

## COUPE LONGITUDINALE ET VUE EN PLAN DE LA PASSERELLE



8



9- Implantation OA12 - ZAC.

9- Location of OA12 - «ZAC» mixed development zone.

gables (PHEN). La passe navigable de 40 m de large est décalée coté Île Seguin du fait des travaux et de l'apportement en rive droite de Seine (coté Boulogne). Il est prévu d'interrompre la circulation fluviale (montante) sur le grand bras de la Seine pour les opérations de pose du tablier métallique de la passerelle sur ses appuis définitifs.

**OA12 - ZAC SAEM**

L'ouvrage annexe OA12 - ZAC SAEM se situe à l'intérieur de la ZAC Seguin

Rives de Seine aménagée par la SAEM (Société anonyme d'économie mixte) SPL Val de Seine anciennement Val de Seine Aménagement. Il est implanté dans la parcelle d'aménagement d'un jardin public réservée par la SAEM entourée par un lot de bâtiment D5 à l'est et la rampe de l'ouvrage Daydé rejoignant l'île Seguin (figure 9).

L'ouvrage annexe est constitué :

→ D'un puits circulaire excentré par rapport au tunnel et descendant

jusqu'au niveau du tunnel réalisé dans le cadre d'un marché préparatoire en puits d'essai, exécuté en 2016 afin de reconnaître les terrains (cf article Revue *Travaux* n°924) ;

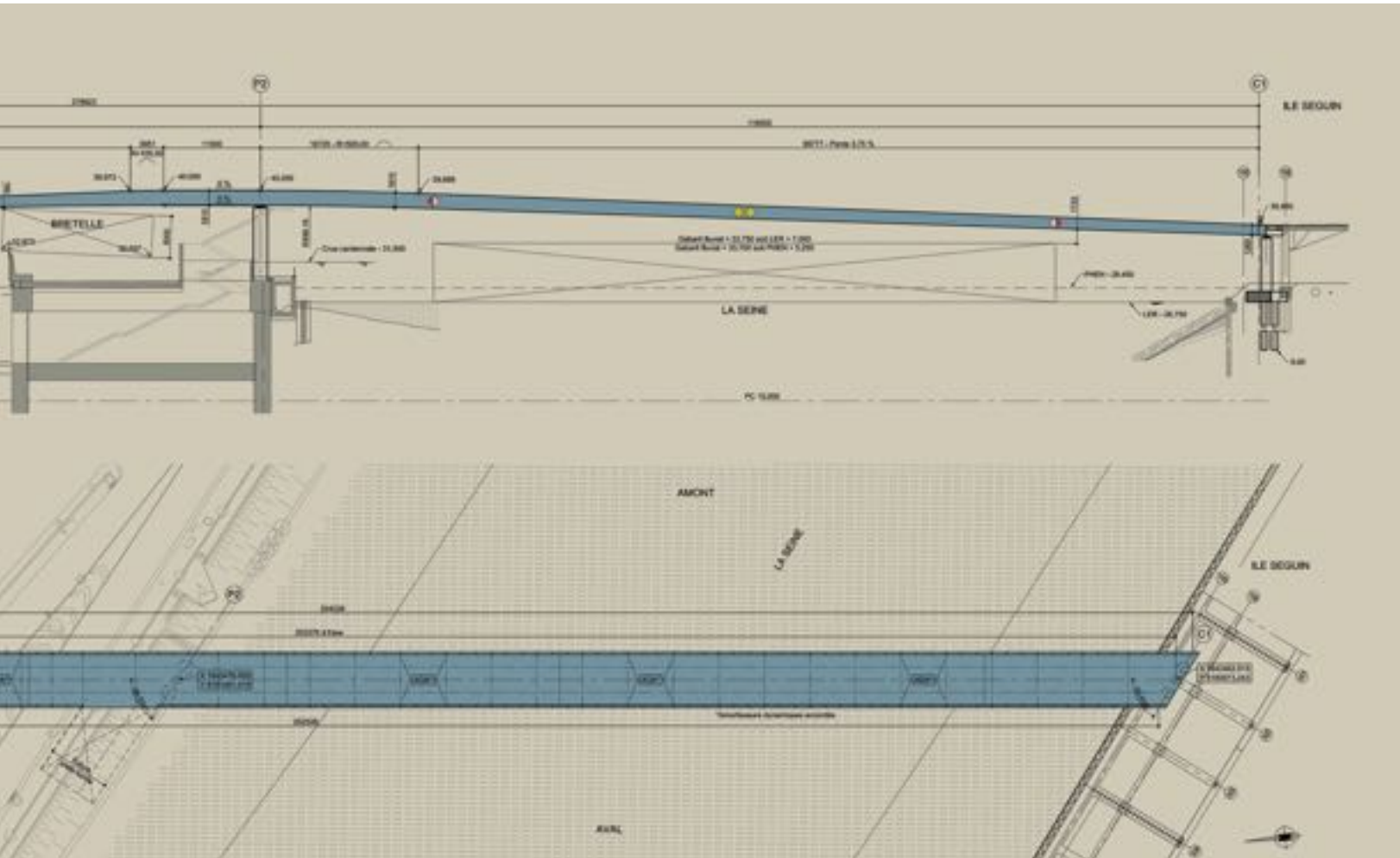
- D'une structure faiblement enterrée abritant les locaux techniques et l'usine de ventilation du tunnel ;
- D'un rameau reliant les puits au tunnel.

Le puits de forme circulaire a un rayon utile de 4,70 m. Sa profondeur est de

l'ordre de 40 m au niveau -10,87 m NGF qui correspond à l'rase du béton fini du radier.

L'issue de secours débouche à la surface par une trappe positionnée à la cote PPRI + 20 cm.

L'ouvrage est un point bas du tunnel, il sert donc également à relever les eaux d'infiltration du tunnel vers un exutoire. L'ensemble des eaux d'infiltration de l'ouvrage annexe et du tunnel est rejeté en Seine sans passage par un réseau d'assainissement existant. ▷



**10- Implantation  
OA10 - Place de  
la Résistance.**

**11- Vue en plan  
Gare Issy-RER.**

**10- Location of  
OA10 - Place de  
la Résistance.**

**11- Plan view of  
Issy-RER Station.**

### OA10 - PLACE DE LA RÉSISTANCE

L'ouvrage annexe est implanté long du quai de Stalingrad, bordé par la Seine au nord, la voirie du RD7 au sud et la Place de la Résistance à l'est (figure 10). Il est constitué :

- D'un puits circulaire avec un rayon utile de 4,70 m excentré par rapport au tunnel et descendant jusqu'au niveau du tunnel, constitué de parois moulées périphériques de 1 m d'épaisseur avec une longueur de fiche de 10 m sous le niveau du fond de fouille ancrées dans la craie saine ;
- D'une structure faiblement enterrée abritant les locaux techniques et l'usine de ventilation du tunnel ;
- D'un rameau reliant le puits au tunnel.

De même que près de la gare de Pont-de-Sèvres, des péniches sont actuellement présentes face au quai de Stalingrad. Elles doivent être déplacées sur la rive opposée sur les pontons provisoires du CD92.

### GARE D'ISSY-RER (ISS)

La gare d'Issy-RER est un ouvrage souterrain implanté en partie sous la rue Aristide-Briand et le parking de surface de la résidence Garibaldi, sous la rue des Arches-d'Issy et la place Léon-Blum ainsi que sur l'emprise de bâtiments démolis (figure 11).

La gare est en connexion avec la gare aérienne d'Issy du RER C.

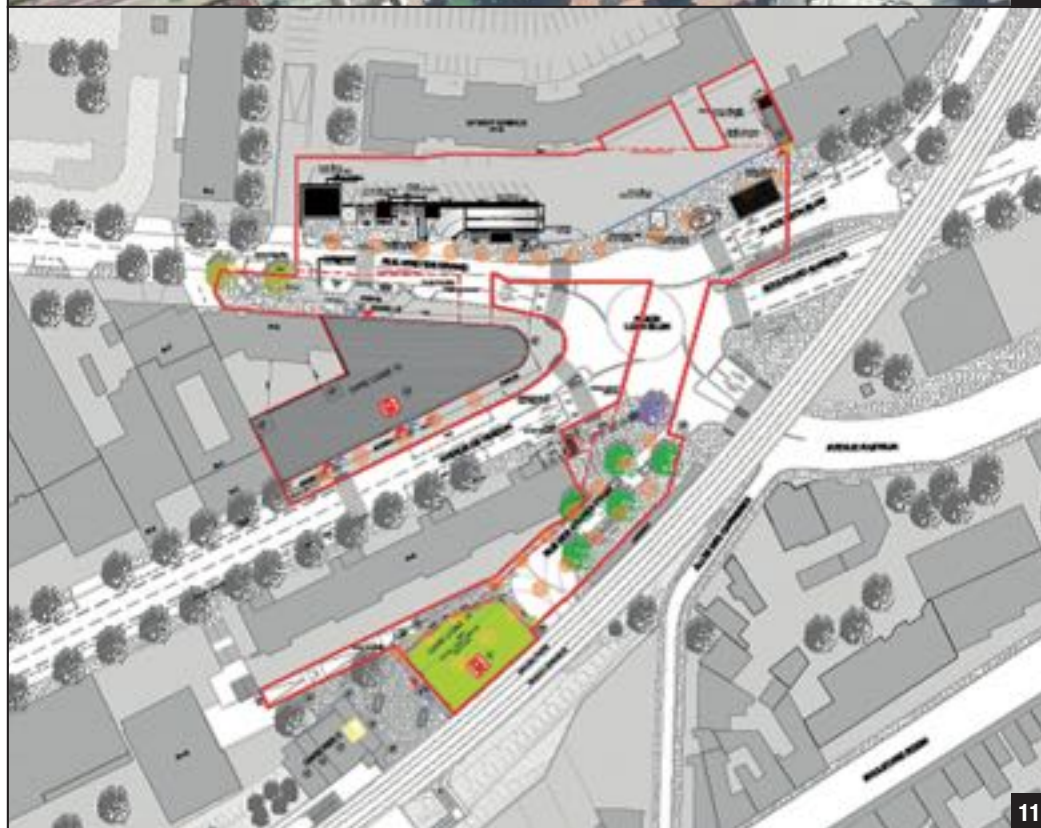
Les structures porteuses (poteaux, voiles, planchers, radier et parois moulées) de l'émergence de la gare sont conçues de façon à pouvoir assurer la fondation connexe d'un immeuble résidentiel qui sera réalisé ultérieurement.

La gare d'Issy-RER se compose :

- D'une boîte gare abritant le passage des trains, réalisée par la méthode *top-down*. La largeur de la boîte gare est variable en fonction des zones. A l'intrados du soutènement elle vaut 28,52 m au point le plus



10



11

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

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

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Groupement Setec Tpi (mandataire) -

Ingérop (co-traitant) - Geos (sous-traitant géotechnique) -

Agence Duthilleul (architecte PDS et Passerelle) -

Brunet Saunier Architecture (architecte ISS)

**AMO :** Artemis (Artélia - Arcadis - Bg)

**CONSTRUCTEUR GÉNIE CIVIL :** groupement Horizon (Bouygues TP et Soletanche Bachy)

### PRINCIPALES QUANTITÉS

**4,1** km de tunnel

**2** gares souterraines

**4** ouvrages annexes

**1** passerelle piétonne  
sur la Seine

large et 23,44 m au point le plus étroit.

→ D'un puits d'émergence déporté par rapport à la boîte gare, constitué d'une enceinte étanche en parois moulées.

→ D'une correspondance avec le RER C déportée.

Une issue de secours en partie enterrée et en partie émergente en édicule est

localisée en excroissance de l'enceinte des parois moulées à l'angle Nord-Est de la boîte.

L'épaisseur des parois moulées est de 1,20 m pour ce qui est de l'émergence, de la boîte gare et de la partie de correspondance la plus proche de la gare RER.

La partie de correspondance la plus proche de la place Léon-Blum présente

en revanche une épaisseur de parois moulées de 1,50 m.

#### OA09 - PARC HENRI BARBUSSE

L'ouvrage annexe OA09 est implanté dans la partie sud du Parc Henri Barbusse, en lieu et place de l'escalier monumental et des bâtiments adjacents le long de la rue de l'Égalité. Il est constitué :

→ D'un puits circulaire excentré par rapport au tunnel et descendant jusqu'au niveau du tunnel, de 4,70 m de rayon utile et de profondeur de l'ordre de 50 m ;

→ D'une structure à flanc de talus abritant les locaux techniques et l'usine de ventilation du tunnel ;

→ D'un rameau reliant le puits au tunnel. □

#### ABSTRACT

### LINE 15 SOUTH, SECTION 3 - SEINE CROSSINGS

GUILLAUME PONS, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - PASCALE MATHERN, INGEROP - AYMERIC GELLEE, INGEROP

**Section T3A of Line 15 South consists of a tunnel 4.1 km long, single-tube with two tracks, bored by TBM, linking four ancillary structures and the Pont-de-Sèvres and Issy-RER stations. The alignment runs along the Seine and crosses the river at several points. This waterway is an asset for the removal of excavated material (more than one million tonnes) and for procurement of the tunnel segments, thereby mitigating environmental nuisances. However, it entails constraints for protection of the transport network's users and infrastructure from flooding specific to this section for three levels of flood: design flood, «extraordinary» flood and construction-site flood. □**

### LÍNEA 15 SUR, TRAMO 3 - CRUCES DEL SENÁ

GUILLAUME PONS, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - PASCALE MATHERN, INGEROP - AYMERIC GELLEE, INGEROP

**El tramo T3A de la L15 Sur consta de un túnel de 4,1 km de longitud, monotubo de dos vías, perforado con tuneladora, que une 4 construcciones anexas y las estaciones de Pont-de-Sèvres e Issy-RER. El trazado es tangente al Sena y lo cruza en varios puntos. Esta vía fluvial ofrece una vía para la evacuación de los escombros (más de un millón de toneladas) y el aprovisionamiento de las dovelas del túnel, lo que permitirá reducir los perjuicios medioambientales. Sin embargo, limita también la protección de los usuarios y de las infraestructuras de la red de transporte en caso de inundación en dicho tramo para 3 niveles de crecidas: una crecida de protección (o crecida de dimensionamiento), una crecida "excepcional" de protección (o crecida de protección adicional) y una crecida de obra. □**



**Novateur**

La nouvelle technologie de tunneliers à densité variable a réalisé des performances remarquables – avec une sécurité optimale – pour la création du métro de Kuala Lumpur. Elle sera employée lors de la mission complexe du Grand Paris Express.

Maitre d'ouvrage  
MRT Mass Rapid Transit Corporation Sdn Bhd

Clients  
MMA Gamuda KVMRT  
GTI Sdn Bhd

**Pioneering Underground Technologies**

› [www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com)





© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

# LIGNE 15 SUD - GARE DE CHÂTILLON-MONTROUGE

AUTEURS : GUILLAUME PONS, DIRECTEUR DE PROJET DE LA L15 SUD DU GPE , SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - DAVID TROTTIN, ARCHITECTE, PÉRIPHÉRIQUES - GILLES CHAPRON, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, SETEC - IOANA PASCU BROCHARD, INGÉNIEUR CHEF DE PROJET, SETEC

LA GARE DE CHÂTILLON-MONTROUGE (CHM) FAIT PARTIE DES 16 GARES DE LA LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS SECTEUR OUEST. ELLE EST EN CORRESPONDANCE AVEC LA GARE HOMONYME DU MÉTRO 13. LE TRONÇON OUEST DE LA LIGNE, DIT « TRONÇON 3 », ENTIÈREMENT EN SOUTERRAIN, S'ÉTEND SUR UNE LONGUEUR DE 12 KM, DE L'OUVRAGE ANNEXÉ ÎLE-DE-MONSIEUR (INCLUS) À LA GARE DE VILLEJUIF-LOUIS-ARAGON (INCLUDE). LES ÉTUDES ASSOCIÉES ONT ÉTÉ CONFIAÉES AU GROUPEMENT MENÉ PAR SETEC ET COMPOSÉ D'INGÉROP ET DE 6 AGENCES D'ARCHITECTURE, DONT PÉRIPHÉRIQUES, ARCHITECTE DE CETTE GARE.

## CONTEXTE

### CONTRAINTES D'IMPLANTATION

La gare de CHM se situe sur les communes de Bagneux, Châtillon et Montrouge dans le département des Hauts de Seine (92), sous le carrefour très circulé des avenues Marx-Dormoy, Jean-Jaurès et de la République, et sous la gare routière de Châtillon-Montrouge. Pour favoriser l'intermodalité, la gare du métro 15 (M15) est implantée au plus

près de la gare du métro 13 (M13). La gare se situe en partie sous des bâtiments existants (pavillons et bureaux R+3) qui ont dû être démolis. L'environnement de la gare est composé également des voies LGV Atlantique au sud-ouest, du Technicentre SNCF Rive Gauche (maintenance Transilien au sud-est et maintenance LGV au sud-ouest), de bâtiments conservés allant jusqu'au R+10 à son angle Nord-Est,

**1- Vue du bâtiment voyageur de la gare dans son contexte final.**

**1- View of the station's passenger building in its final context.**

et plus loin du terminus du tramway T6 (figure 3).

Plusieurs réseaux majeurs sont situés dans l'emprise de la gare, en interface directe avec elle, dont principalement (figure 4) :

→ Un réseau de transport d'eau potable SEDIF Ø 1,25 m intérieur. Cette conduite sous pression traverse le carrefour selon l'avenue Marx-Dormoy et passe ensuite sous

- la gare du M13 et les voies SNCF à l'abri d'une galerie à environ 12 m de profondeur, réalisée préalablement pour l'exploitation du calcaire ;
- Des réseaux d'eau usée du Conseil Départemental des Hauts-de-Seine (CD92) (ovoïde en meulière 1,9 m x 1 m intérieur), longeant les avenues de la République et Marx-Dormoy ;
  - De nombreux réseaux télécom sur l'ensemble du carrefour, dont une importante multitubulaire de transport Orange traversant l'emprise de la gare selon l'avenue Jean-Jaurès ;
  - Un poste et une chambre GrDF dans l'emprise de la gare routière et réseaux associés ;
  - Un poste ERDF dans un bâtiment à l'aplomb de la gare et réseaux associés.

La sensibilité des bâtis et ouvrages vis-à-vis des tassements et des vibrations créés par les travaux de la gare est

variable. Des préconisations de la SNCF, de la RATP et des divers concessionnaires par rapport à leurs ouvrages sont fournies. Des vérifications spécifiques sont faites pour certains ouvrages (RATP, SEDIF, ...), pour lesquels il n'y a pas de données précises.

## 2- Plan du réseau Grand Paris Express et position de la gare de Châtillon-Montrouge.

## 2- Map of the 'Grand Paris Express' network and location of Châtillon-Montrouge Station.

## GÉOLOGIE, GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIE

La gare est située au centre du plateau calcaire lutétien qui s'étend du coteau d'Issy-les-Moulineaux au coteau Ouest de la Bièvre, dans une légère cuvette où l'éocène supérieur (Marno-Calcaire de Saint-Ouen et Sables de Beauchamp) a été érodé. Le Lutécien (éocène moyen) est donc à l'affleurement sous une légère épaisseur de remblais anthropiques (figure 5).

Par conséquent les Marnes et Caillasses (en beige), d'une dizaine de mètres d'épaisseur, sont plus dégradées par rapport à celles sous couverture. À cela s'ajoute l'effet de l'exploitation du Calcaire Grossier (couleur saumon) en carrières souterraines dans la zone.

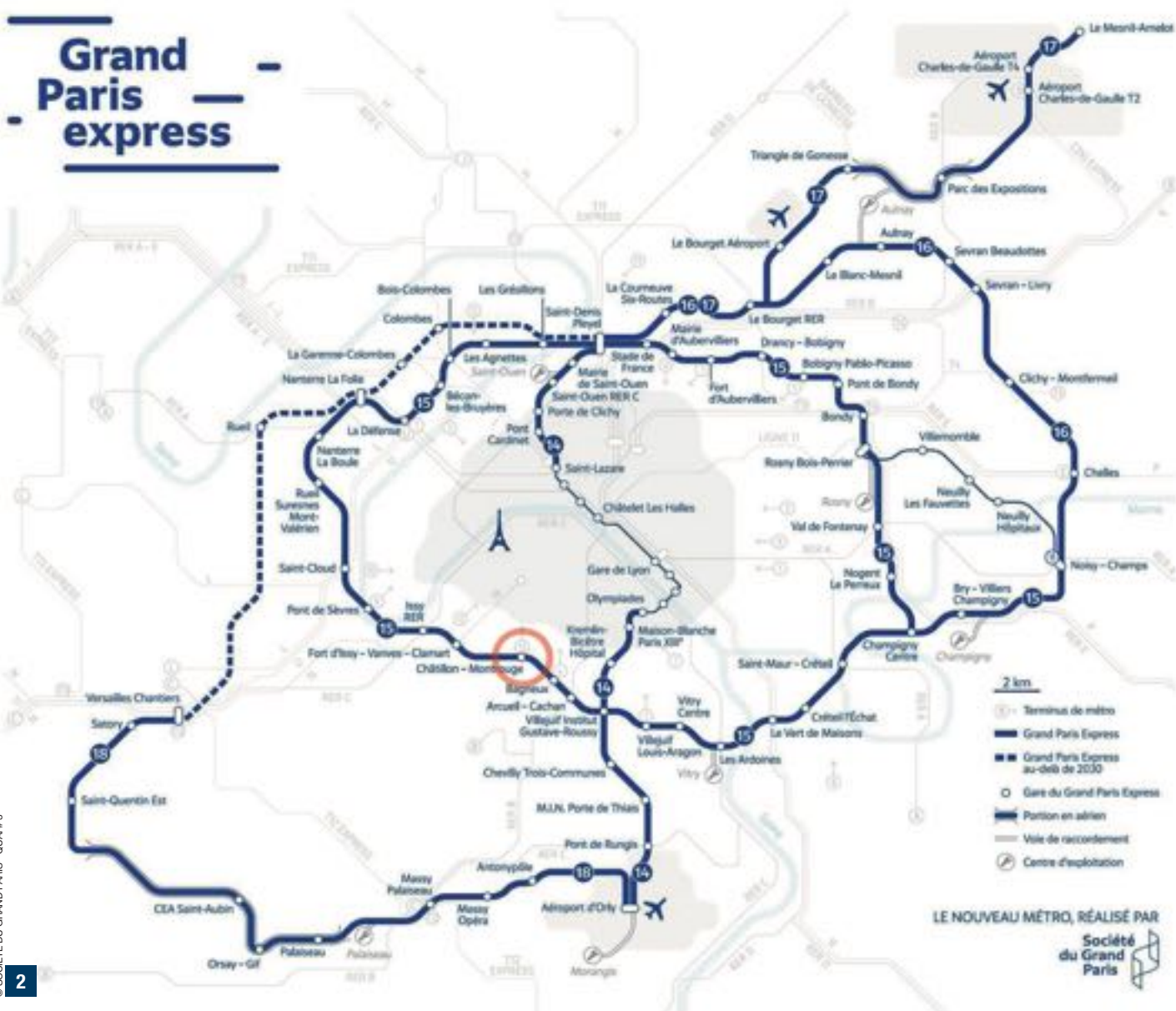
Sous la vingtaine de mètres habituelle de calcaire (4 m de supérieur, 7 m de moyen et 9 m d'inférieur),

l'Argile Plastique de l'Yprésien (violet) est présente localement au droit de la gare sur une épaisseur plutôt importante d'une douzaine de mètres, au détriment des Marnes de Meudon du Montien (orange) qui sont réduites à environ 4 m.

La Craie Campanienne (en vert), saine sous couverture, constitue le substratum de la zone.

Comme sur le reste du plateau, on retrouve deux nappes superposées : la nappe lutétienne d'une dizaine de mètres de puissance, soutenue par l'argile imperméable et la nappe de la Craie, qui n'apparaît pas en charge à cet endroit.

Les deux principaux risques géotechniques pour cette gare sont, d'une part, la présence des carrières souterraines déjà évoquée, et la déformabilité et le gonflement de l'Argile Plastique d'autre part. ▶



3- Vue en plan de la gare dans le contexte initial.

4- Vue en plan des réseaux existants (emprise de la gare en gris, réseaux en couleur).

3- Plan view of the station in the initial context.

4- Plan view of existing networks (area occupied by the station in grey, networks in colour).

Le calcaire a été exploité dans la zone principalement sur le niveau supérieur et localement sur un niveau moyen dans sa partie moyenne. Un certain nombre de galeries visitables ont été inspectées, puis cartographiées précisément en 3D, en noir sur la carte (figure 6).

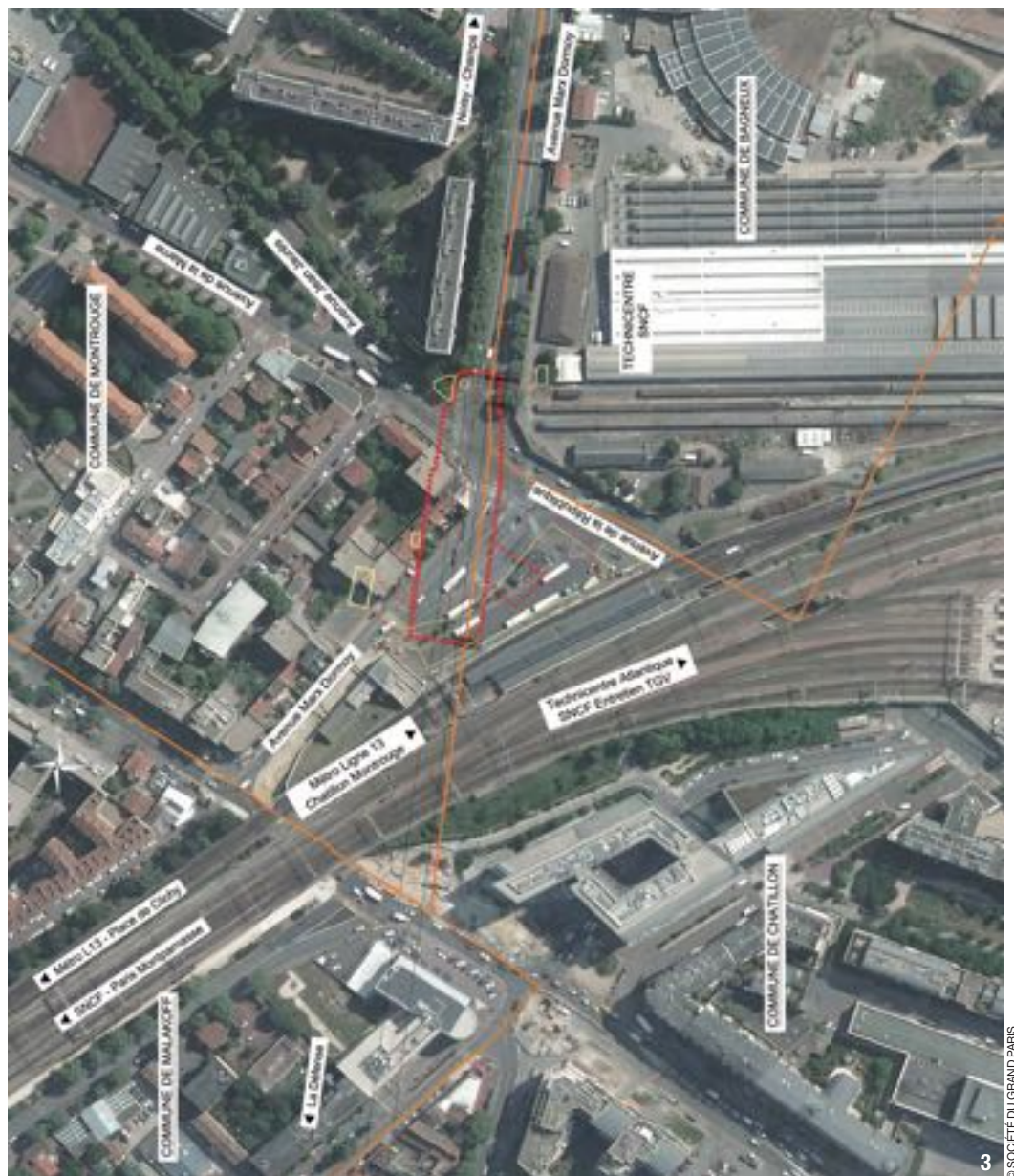
L'Argile Plastique contraint fortement le soutènement de la gare. Elle imprime, d'une part, des poussées très importantes sur les parois moulées, poussées qui se développent très tôt lors des terrassements du fait du déchargement et donc difficilement contrées de façon efficace par un butonnage classique. Ces poussées induisent donc des déplacements relativement importants et, du fait de la profondeur de la flèche induite, des tassements assez loin des parois dont la limitation est nécessaire du fait des avoisinants sensibles (ouvrages SNCF et station M13). Enfin, le gonflement potentiel de cette couche à long terme a conduit à concevoir un radier porté sur vide sanitaire.

## EXIGENCES

### CONTRAINTES FONCTIONNELLES

La gare répond à diverses contraintes fonctionnelles : matrice de flux à l'horizon 2030, intermodalité (M13, T6, bus, vélo, deux-roues motorisés, taxis, automobiles, ...), matériel roulant du métro, mécanisation mixte ascenseurs/escaliers mécaniques, sécurité incendie conforme à un établissement ERP de type GA de 1<sup>re</sup> catégorie, enjeux de sûreté et sécurité publique, divers locaux fonctionnels (espaces pour le personnel, exploitation, services, commerces, sécurité, ...), locaux techniques (courants forts, courants faibles, aéraulique, électromécanique, traitement des eaux), locaux de maintenance et d'entretien, stationnements réservés, visibilité, ...

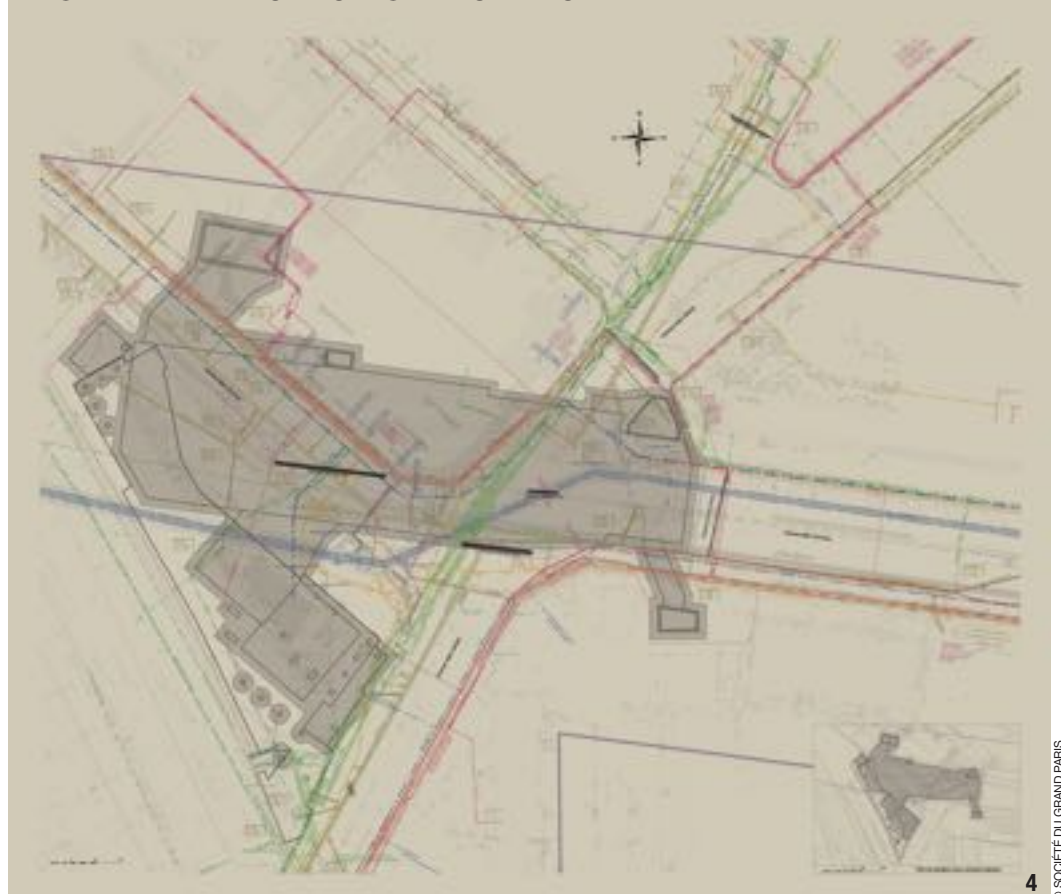
La gare abrite un poste de redressement double. Il n'y a pas de ventilation du tunnel prévue en gare.



3

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

## VUE EN PLAN DES RÉSEAUX EXISTANTS



4

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS



## PROFIL EN LONG GÉOTECHNIQUE DU PROJET ET DE LA GARE (COUPES LONGITUDINALE ET TRANSVERSALE CENTRALES)



5

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

**5- Profil en long géotechnique du projet et de la gare (coupes longitudinale et transversale centrales).**

**6- Carte et photographie des carrières souterraines au droit de la gare.**

**5- Longitudinal geotechnical profile of the project and the station (central longitudinal and cross sections).**

**6- Map and photograph of the underground quarries at the station level.**

La gare prend en compte la réalisation future d'un bâtiment d'environ 7 000 m<sup>2</sup> situé au-dessus du bâtiment voyageurs. Le premier étage courant du projet s'effectue au-dessus de la correspondance avec le M13, à 17,5 m du TN. Des mesures conservatoires

sont prises dans la gare du M15 : report de charges sur la structure, génie civil de diverses parties du bâtiment tertiaire (sous-sol technique, hall, escalier de secours, ...), trémies de connexion etc. Le projet connexe est prévu réalisé après achèvement de la gare du M15.

### CONTRAINTES DE RÉALISATION

La gare routière est maintenue en fonction, après éclatement sur plusieurs sites adjacents. À partir de la mise à disposition de l'ensemble des emprises de la gare, la circulation dans le carrefour est coupée pendant 1,5 an, ▷



© INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES



© PHOTOTHÈQUE SETEC



7

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

à l'exception d'une voie de bus (tourne-à-droite entre l'avenue Marx-Dormoy et l'avenue Jean-Jaurès).

Le carrefour est ensuite ré-ouvert à la circulation (au minimum une voie dans chaque sens et direction).

La piste circulaire qui longe le mur de soutènement du Technicentre SNCF doit rester utilisable pendant la totalité du chantier.

### CONCEPTION CONCEPTION FONCTIONNELLE

Le projet de gare s'inscrit dans un projet urbain global futur, relativement différent de la situation urbaine actuelle. L'ensemble des exigences fonctionnelles dimensionne les espaces de la gare et les circulations afférentes, créant un volume ajusté selon les contraintes extérieures en termes de forme et de structure.

Ce volume est constitué d'un corps principal souterrain et d'un corps d'accès et de correspondance, en partie souterrain et en partie aérien.

**Le corps d'accès** est côté M13, divisé en deux bâtiments de forme irrégulière et hauteur variable, maximum ~17,5 m face aux voies du M13 pour y permettre l'interconnexion par une passerelle. Le bâtiment voyageur est positionné en fonction des flux structurants ; l'entrée de gare, sur l'avenue de la République, est conçue pour minimiser les temps de parcours entre les divers modes de transport.

Le bâtiment voyageurs comprend principalement : la connexion avec la ville et la gare du M13 (passerelle et 3<sup>e</sup> quai du M13 sous MOA/MOE RATP), le hall d'accès depuis la rue au futur projet connexe en surplomb, les locaux de la gare routière etc.

Le bâtiment technique abrite le poste de redressement du M15, des bâches d'eau pluviale, un escalier de secours pour le futur projet connexe etc.

Entre ce bâtiment technique et le mur de soutènement existant du M13 vient s'insérer le futur escalier de secours du 3<sup>e</sup> quai de la gare du M13. La façade au rez de chaussée de

### 7- Vue de l'entrée de la gare.

### 7- View of station entrance.

16,5 m et 26,5 m (entre nus des parois moulées hors tolérance pour défaut de verticalité), profondeur au fond de fouille d'environ 38 m.

Cet ouvrage se développe sur 5 niveaux, dont les quais à 33 m sous le TN. Les quais sont dissymétriques, de largeur 5,19 m direction La-Défense et 3,90 m direction Noisy-Champs.

l'émergence, entièrement vitrée, est caractérisée par un auvent qui souligne et sépare le volume gare de celui du projet connexe.

Cet auvent assoit la présence de la gare du Grand Paris Express au sein du pôle multimodal et permet de l'identifier sans ambiguïté comme un équipement public.

L'infrastructure de l'émergence comprend la connexion entre le corps principal de la gare et le bâtiment voyageur en superstructure, ainsi que le sous-sol du projet connexe futur (figures 1 et 7).

**Le corps principal** est une boîte souterraine, quasi-rectangulaire, de longueur 109 m et largeur variable entre

### SÉQUENCES DE PARCOURS

L'entrée de la gare n'étant pas à l'aplomb des quais, il y a donc plusieurs séquences de parcours : une séquence urbaine à l'échelle du pôle multimodal, une séquence de services et de circulation horizontale au RdC dans le prolongement du parvis, une séquence verticale appelée « puits » et enfin une séquence entre le niveau N-4 et les quais, de répartition et choix de direction.

Le puits reprend le principe de l'escalier à la Chambord, en développant 4 volées qui s'enroulent simultanément autour d'un grand vide central (figures 8 à 11).

## STRUCTURE

Sur l'ensemble de la gare, la structure a été mise en valeur architecturalement, l'exemple le plus lisible étant les butons définitifs internes au « puits ». L'ensemble des structures est stable au feu 2 heures.

Les structures et parois séparatives par rapport aux ouvrages tiers (existants ou futurs) sont coupe-feu 2 heures.

## STRUCTURES DÉFINITIVES VERTICALES

L'enceinte de la boîte gare principale est composée de parois moulées, de 1,8 m d'épaisseur, de longueur totale de forage de 53 m, fiche de 15 m et ancrage dans la craie.

Certains panneaux au sud sont plus profonds (65 m), en raison du surcroît d'effort normal apporté par les appuis du bâtiment voyageurs ou ceux du projet

connexe en surplomb. L'enceinte de l'émergence de la gare est composée également de parois moulées, de 1 m d'épaisseur, de longueur totale de forage de 17 m, fiche de 7 m et ancrage dans le calcaire grossier sous le niveau des carrières. La paroi moulée est surmontée d'une poutre de couronnement faisant aussi office de lierne. Un pontage est prévu au droit de la galerie abritant la conduite SEDIF.

Les planchers de la gare sont supportés par des appuis de type poteau ou voile.

Dans la boîte gare ils sont en béton armé, fondés sur des barrettes réalisées depuis le niveau du TN et ancrées dans la craie.

Aucun poteau ne monte jusqu'à la dalle de couverture.

Dans le corps d'accès ils sont en béton armé ou mixtes, fondés sur barrettes ou pieux ancrés dans le calcaire, sous le niveau des carrières.

## STRUCTURES DÉFINITIVES HORIZONTALES

La dalle de couverture du corps principal de la gare assure le butonnage en tête des parois moulées.

En béton armé, elle est d'épaisseur constante de 2 m.

Une hauteur libre de minimum 1,3 m est laissée au-dessus permettant la déviation des réseaux. Le réseau d'eau usée du CD92 (ovoïde 1,9 m x

1,0 m) est dévié en partie à travers une encoche dans la dalle de couverture, perpendiculairement aux parois moulées, l'égout étant posé dedans.

La dalle de couverture de l'accès, en béton armé d'épaisseur 1,5 m, constitue en partie la dalle inférieure du rez-de-chaussée du corps d'accès et en partie la dalle support d'une partie de la gare routière.

Les planchers du corps principal sont composés de poutres en béton armé de 1,5 m et 2 m d'épaisseur et de dalles plus minces reposant sur les poutres.

Les planchers assurent le butonnage définitif entre les parois : les liernes reportent les poussées sur les poutres butonnantes qui permettent un auto-équilibrage des poussées.

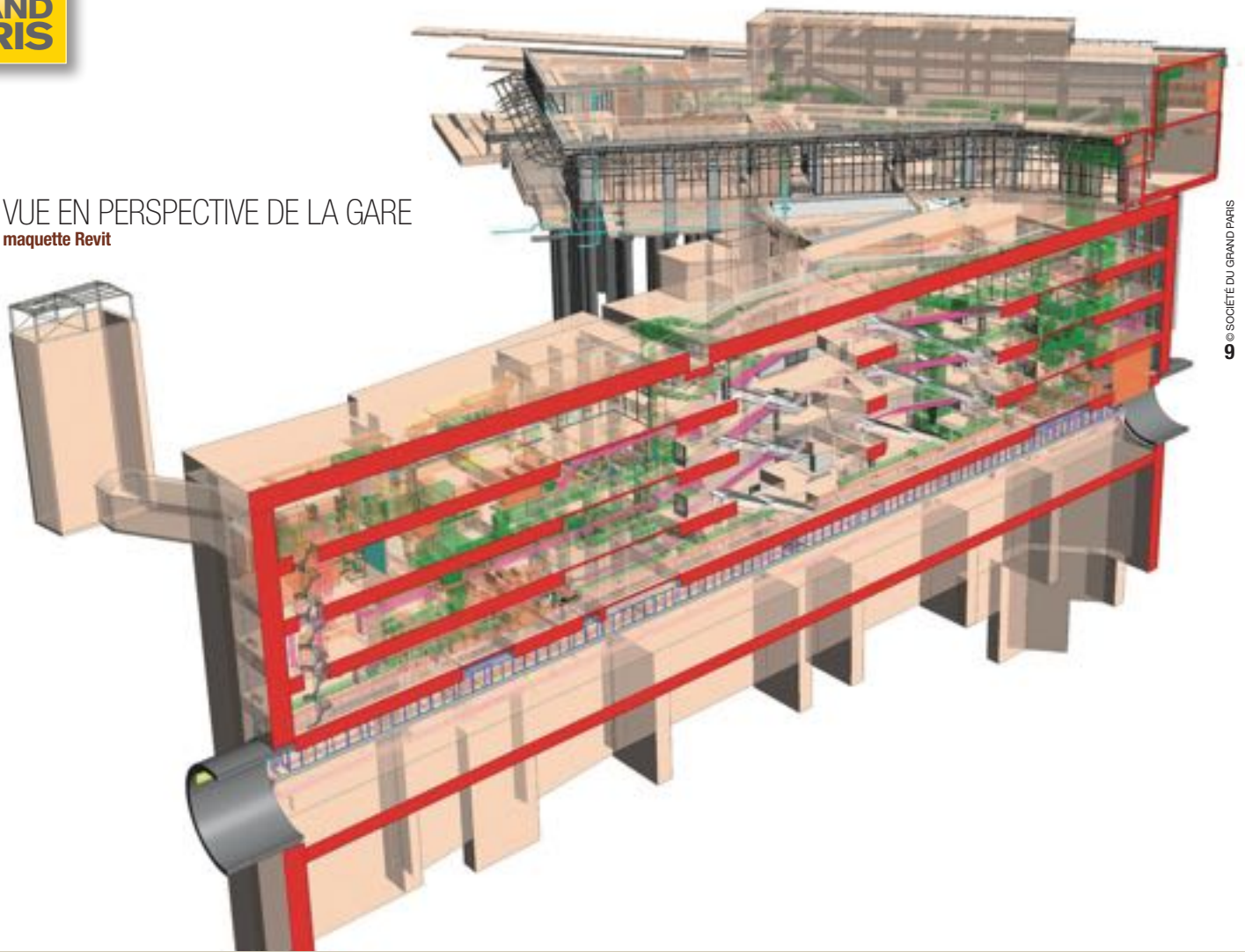
Les planchers sont complétés par des renforts à l'aplomb des ouvertures. ▷

8- Vue du puits intérieur.

8- View of interior shaft.



VUE EN PERSPECTIVE DE LA GARE  
maquette Revit



© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

VUE EN PLAN DU N-5



10

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

Les quais sont réalisés par une structure poteaux-poutres avec des dalles d'épaisseur 25 cm. Les planchers du corps d'accès sont en béton armé, de 30 à 40 cm d'épaisseur, à l'exception d'une partie au droit du poste de redressement en dalles alvéolées précontraintes. Des poutres en béton ou métalliques sont prévues pour les divers reprises de charges, notamment du

projet tertiaire en surplomb. Le radier du corps principal de la gare, en béton armé, a une épaisseur de 1,5 m. Il est calé au niveau de la couche d'Argiles Plastiques, en fonction des contraintes de positionnement du tunnel par rapport au plancher des carrières, au-dessus d'un vide sanitaire. Le radier de l'émergence de 1 m d'épaisseur repose d'une part sur les parois mou-

9- Vue en perspective de la gare - maquette Revit.

10- Vue en plan du N-5.

9- Perspective view of the station - Revit model.

10- Plan view of N-5.

lées et d'autre part sur des barrettes longeant la galerie SEDIF.

#### GAINES HORS CORPS PRINCIPAL DE LA GARE

Les gaines à l'extérieur de la gare (prise d'air, rejet, désenfumage et décompression de la gare et du tunnel) sont des structures en béton de 40 à 60 cm d'épaisseur.

## MÉTHODES CONSTRUCTIVES ÉLÉMENTS DE PLANNING

La gare est sur le chemin critique des travaux du tronçon. Le planning de la gare comporte de nombreux travaux préalables de démolition et déviation des réseaux qui sont en cours d'achèvement. À partir du printemps 2018, il est prévu de fermer le carrefour pendant 1,5 an, sauf une voie bus, pour les travaux de traitement des carrières et de réalisation des parois moulées et de la dalle de couverture. Ensuite le carrefour est ré-ouvert à la circulation jusqu'à l'achèvement des travaux, qui se poursuivent « en taupe ». Le tunnelier est prévu passer dans la gare non excavée complètement.

## TRAVAUX PRÉALABLES

Les bâtiments situés à l'aplomb de la future gare sont démolis. Les nombreux réseaux impactés par la réalisation de la gare sont déviés autour des ouvrages futurs, dans le même carrefour, dans des emprises très étroites, ou en utilisant la rue Chopin adjacente à l'exception de la multitubulaire Orange et de l'égout CD92 (figure 12). Ces derniers font l'objet de déviations

**11- Coupe  
transversale.**

**11- Cross  
section.**

avec importantes parties provisoires, le tracé définitif étant par-dessus la future gare. La galerie abritant la conduite SEDIF est à étancher et consolider.

## PHASAGE DES TRAVAUX

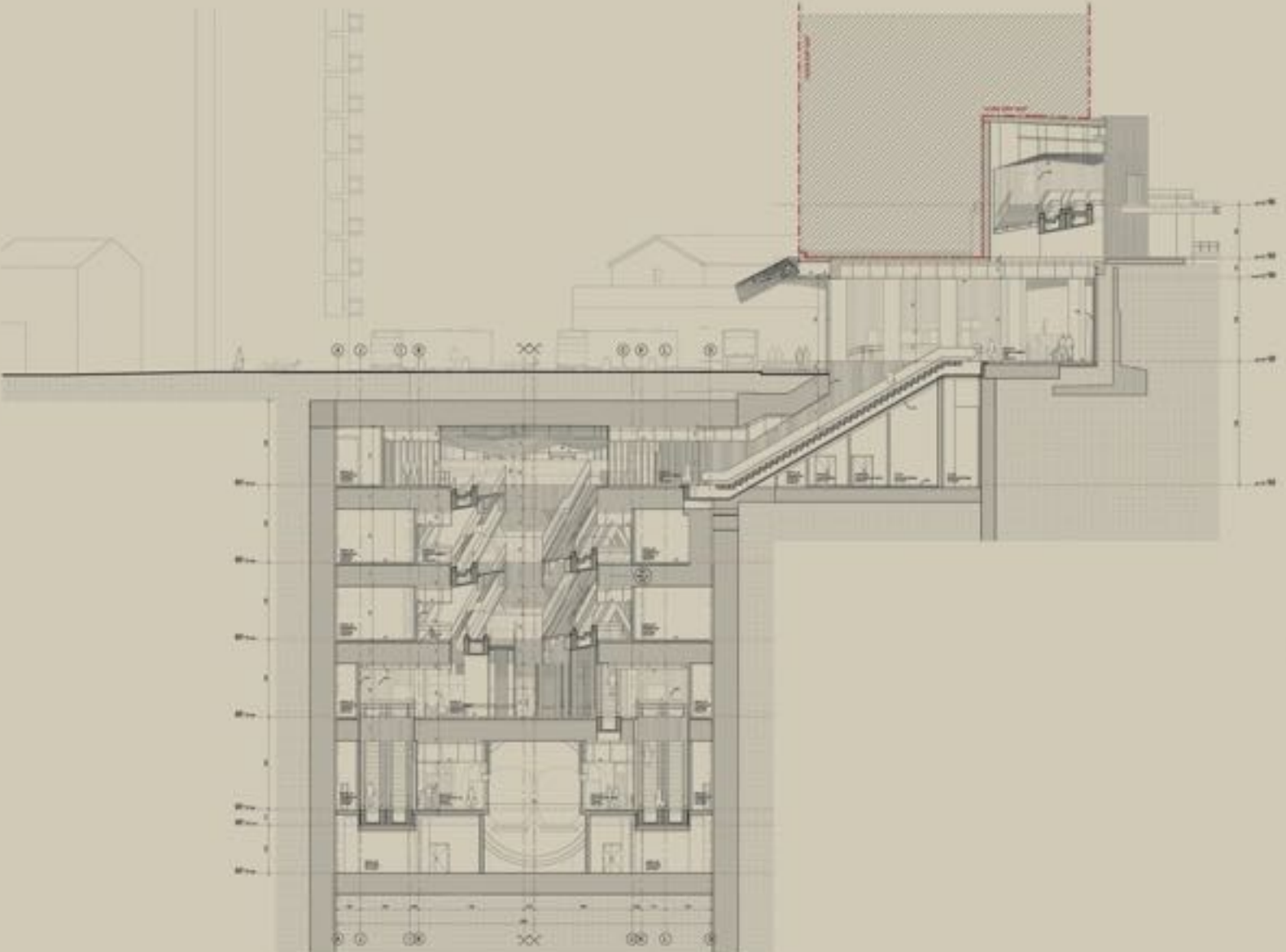
Les carrières présentes au droit de la gare sont traitées afin d'éviter les pertes de boue et de coullis au droit des fondations profondes, pour permettre une bonne assise des fondations superficielles et éviter des difficultés lors des terrassements. Il est prévu un comblement par déversement gravitaire et clavage au droit des parois moulées et des galeries vides intérieures à la gare, ainsi qu'un comblement gravitaire et des injections sous pression au droit

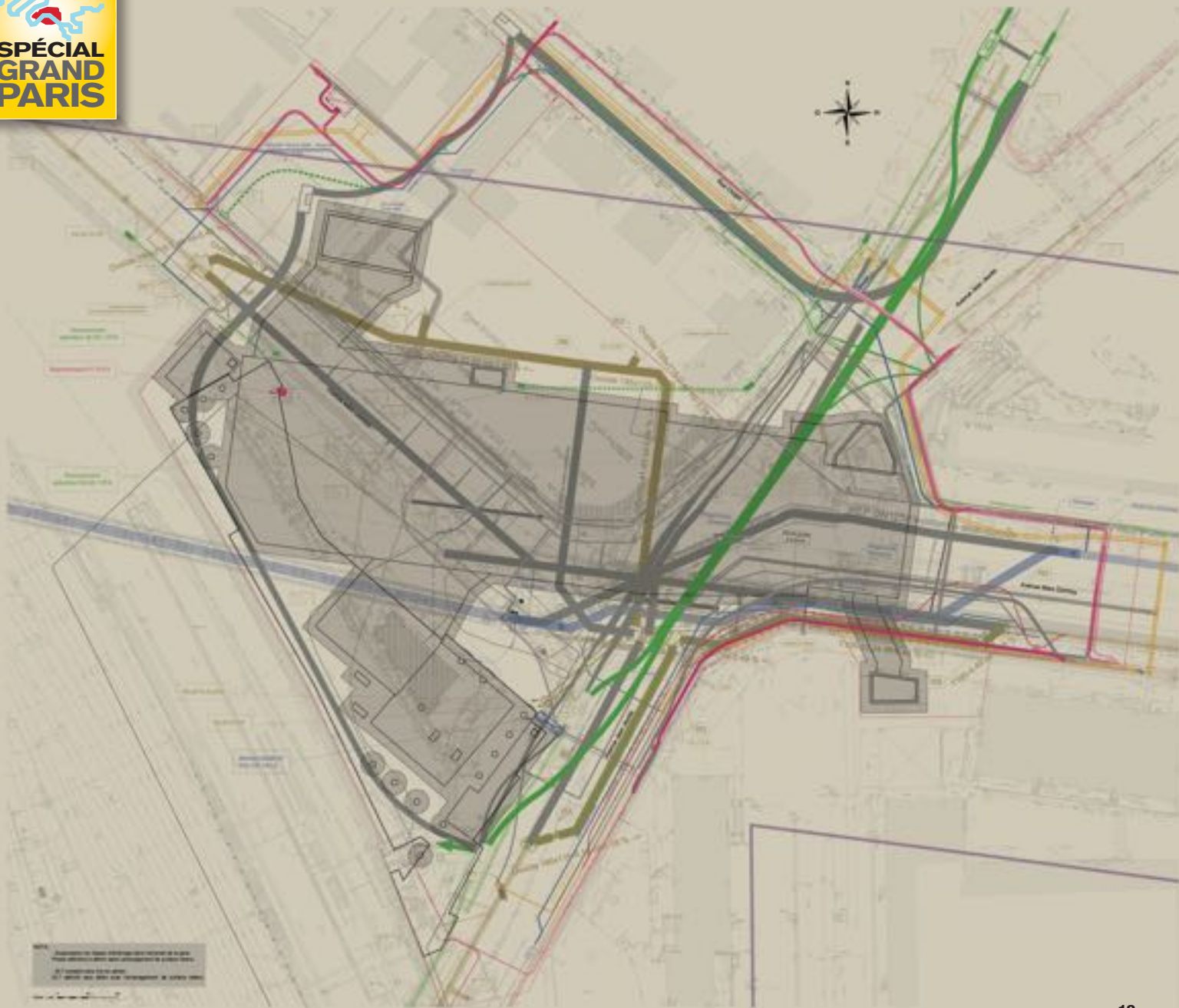
des fondations superficielles et des zones avec pieux. Un puits d'accès est créé pour pallier la coupure par la gare des accès aux galeries visitables sous l'avenue Jean-Jaurès.

La gare est réalisée en sous-œuvre, à l'abri de la dalle de couverture, à l'exception de l'infrastructure et de la superstructure du corps d'accès.

Le phasage des parois moulées et de la dalle de couverture est imbriqué avec la déviation de la multitubulaire Orange et de l'égout CD92, ainsi que la démolition via un puits de la galerie et du réseau SEDIF abandonnés après déviation. Le phasage du corps d'accès est imbriqué avec les travaux d'interconnexion avec la gare M13. ▷

## COUPE TRANSVERSALE





Cela mène à plusieurs phases de réalisation en interface avec d'autres marchés de travaux.

Le terrassement est prévu par passes successives et mise en place des butons provisoires et entretoises intermédiaires, déposés après réalisation des planchers. □

**12- Vue en plan des réseaux déviés (réseaux existants en gris, déviations en couleur).**

**12- Plan view of diverted networks (existing networks in grey, diversions in colour).**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

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

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** groupement Setec (mandataire)

**ARCHITECTE :** Périphériques Architectes (Jumeau, Marin, Trottin Architectes)

**CONSTRUCTEUR GÉNIE CIVIL :** groupement Vinci (mandataire)

### ABSTRACT

#### LINE 15 SOUTH - CHATILLON-MONTROUGE STATION

GUILLAUME PONS, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - DAVID TROTTIN, PÉRIPHÉRIQUES - GILLES CHAPRON, SETEC - IOANA PASCU BROCHARD, SETEC

**Châtillon-Montrouge Station (Line 15 of the 'Grand Paris Express')** is located in a sensitive, dense urban environment, close to existing buildings and utilities (rail, bus, water, telecoms, gas, etc.). The above-ground part, with a concrete and steel structure, provides a connection with the town and the multimodal hub. It is the site of an associated real estate project. The underground part, giving access to the platforms and housing the equipment rooms, is a 5-level box, 109 m long and of maximum width 26.50 m, for a bottom-of-excavation depth of 38 m, to be built by underpinning. The geotechnical environment shows anthropogenic quarries, treated by grouting, and plastic clays at the bottom of excavation, deformable and swelling, leading to diaphragm walls 1.8 m thick, shoring floors 1.5 m thick, and a foundation raft over a crawl space. □

#### LÍNEA 15 SUR - ESTACIÓN DE CHATILLON-MONTROUGE

GUILLAUME PONS, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - DAVID TROTTIN, PÉRIPHÉRIQUES - GILLES CHAPRON, SETEC - IOANA PASCU BROCHARD, SETEC

**La estación de Châtillon-Montrouge (Línea 15 del Grand Paris Express)** está situada en un entorno urbano denso y sensible, cerca de construcciones y redes existentes (ferrocarril, autobús, agua, telecomunicaciones, gas, etc.). La parte aérea, con estructura de hormigón y acero, permite el enlace con la ciudad y el nodo multimodal, al tiempo que soporta un proyecto inmobiliario conexas. La parte subterránea, que da acceso a los muelles y acoge los locales técnicos, es una caja en 5 niveles, de 109 m de longitud y 26,50 de anchura máxima, con una profundidad hasta el fondo de excavación de 38 m, que se construirá mediante recalce. El contexto geotécnico presenta canteras antrópicas, tratadas por inyección, y arcillas plásticas en el fondo de excavación, deformables y expandibles, que requieren pantallas de hormigón de 1,8 m de espesor, suelos acodados de 1,5 m de espesor y una losa de cimentación sobre forjado sanitario. □

# Mettre de la valeur au cœur des grands travaux

INFRASTRUCTURES DE RÉSEAUX, SOUTERRAINES  
EN BÉTON PRÉFABRIQUÉ

RÉSEAUX D'ASSAINISSEMENT EAUX USÉES / EAUX PLUVIALES

COLLECTE ET TRAITEMENT DES EAUX PLUVIALES

ÉNERGIE RÉSEAUX SECS

GÉNIE CIVIL

AMÉNAGEMENTS URBAINS

© PUC3 TUNISIA - November 2019

[www.stradal-vrd.fr](http://www.stradal-vrd.fr)

Stradal est une filiale du groupe



 **STRADAL**



demathieu bard

*Osez entreprendre, autrement!*



demathieu-bard.fr





1

© HERRENKNECHT

# LIGNE 15 SUD - LANCEMENT DES PREMIERS TUNNELIERS

AUTEURS : PIERRE JULLIEN, DIRECTEUR TRAVAUX, SYSTRA - NICOLAS MARGOLOFF, DIRECTEUR DE PROJET, DEMATHIEU BARD - SAMIR RENAI, DIRECTEUR TUNNELS, IMPLenia - VINCENTE FLUTEAUX, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

LA LIGNE 15 SUD RELIANT LA GARE DE PONT-DE-SÈVRES À NOISY-CHAMPS EST LE PREMIER TRONÇON EN TRAVAUX DU RÉSEAU DE TRANSPORT DU GRAND PARIS EXPRESS QUI COMPREND 200 km DE LIGNES NOUVELLES PRINCIPALEMENT EN SOUTERRAIN. LES TRAVAUX D'INFRASTRUCTURES DE LA LIGNE 15 SUD ONT COMMENCÉ EN 2016, POUR RÉALISER LES 33 km, 10 TUNNELIERS SERONT NÉCESSAIRES POUR UNE MISE EN SERVICE EN 2022. LES PREMIERS TUNNELIERS DÉBUTERONT DÈS LE DÉBUT 2018 SUR LE LOT T2C ALLANT DE NOISY-CHAMPS À BRY-VILLIERS-CHAMPIGNY.

## HISTORIQUE DES TUNNELIERS PARISIENS

La métropole parisienne a vu apparaître les premiers boucliers/tunneliers de grand diamètre (supérieur à 4 m intérieur) dans les années 1960, avec la construction par la Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP) du tronçon de la Ligne A du Réseau Express Régional (RER) entre l'Étoile

1- Commissioning S-1078.

1- S-1078 commissioning.

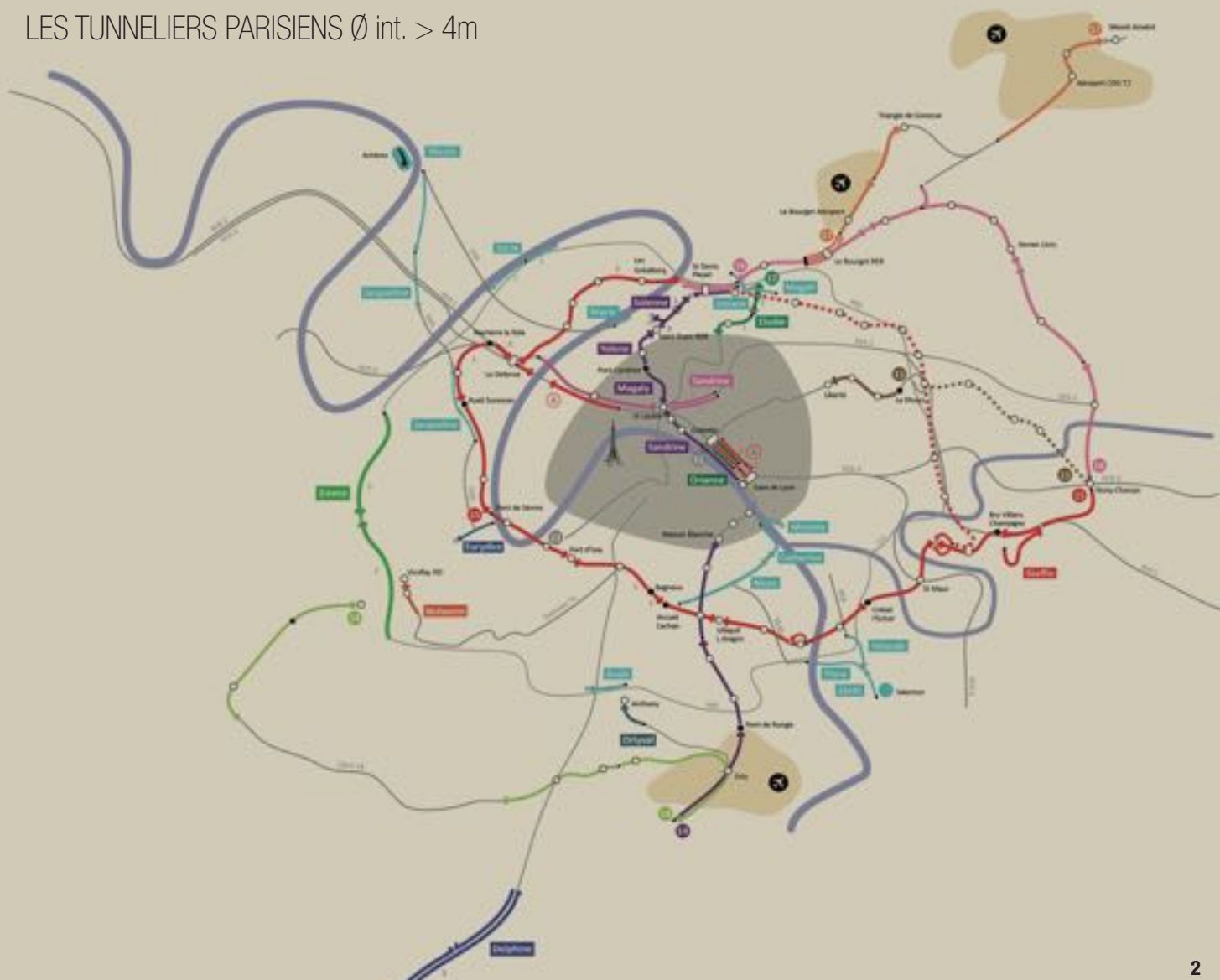
et Neuilly. Depuis, de nombreux tunneliers ont été mis en œuvre.

Parmi les plus emblématiques, on peut citer ceux des projets de transport tels que les 2 tunneliers à pression de boue de Bade/Theelen qui ont servi à la construction des tunnels de Villejust dans le cadre du projet de la Société National des Chemins de Fers (SNCF) de la ligne à grande

vitesse Atlantique, en 1987/88. Les tunneliers Sandrine et Martine respectivement pour les projets Meteor (RATP) et Éole (SNCF) dans les années 1990.

Le tunnelier mixte (pression de boue, pression de terre) d'Herrenknecht de plus de 11,5 m de diamètre excavé pour réaliser l'autoroute A86 au début des années 2000. ▶

## LES TUNNELIERS PARISIENS Ø int. > 4m



2

© SYSTRA - PIERRE JULIEN

De très nombreux tunneliers, de différents diamètres, ont également été utilisés pour réaliser les réseaux concessionnaires (évacuation des eaux usées, alimentation en eau, chauffage urbain, etc.). Ainsi, durant la période courant de la construction du collecteur Sèvres - Achères - Nanterre (SAN) à la fin des années 1980 à la construction des collecteurs en liaison avec l'usine de Valenton (VL9 et VL10) ou des tunnels de stockage Ivry MAsséna (TIMA) à la fin des années 2000, le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP) a été le principal utilisateur de tunneliers en Île-de-France (figure 2).

### CONTEXTE DU GRAND PARIS

Avec plus de 170 km de tunnels à réaliser pour le compte de la Société du Grand Paris (SGP), l'activité des tunne-

liers en région parisienne va exploser au courant des prochaines années. Après les 5,8 km du prolongement de la Ligne 14 entre Saint-Lazare et la mairie de Saint-Ouen, qui ont nécessité l'utilisation de 3 boucliers commandés par la RATP, les tunneliers du Grand Paris Express vont entrer en service pour excaver les nombreux kilomètres de tunnel nécessaires à la mise en service des nouvelles lignes de métro :

- Ligne 15 Sud, de Noisy-Champs à Pont-de-Sèvres : 33 km ;
- Ligne 15 Ouest, de Pont-de-Sèvres à Saint-Denis-Pleyel : 20 km ;
- Ligne 15 Est, de Saint-Denis-Pleyel à Champigny-Centre : 23 km ;
- Ligne 16, de Noisy-Champs à Saint-Denis-Pleyel : 22 km ;
- Ligne 17 Nord, du Bourget-RER au Mesnil-Amelot : 21 km ;
- Ligne 18, de l'aéroport d'Orly à Versailles-Chantiers : 21 km.

**2- Les tunneliers parisiens Ø int. > 4 m.**

**2- Paris TBMs of ID > 4 m.**

En parallèle, d'autres tunneliers seront utilisés pour prolonger les lignes existantes :

- Ligne 14 Sud, d'Olympiades à l'aéroport d'Orly : 14 km ;
- Ligne 14 Nord, de Saint-Ouen à Saint-Denis-Pleyel : 2 km ;
- Ligne de RER E, de Saint-Lazare à La-Défense : 8 km ;
- Ligne 11, de Mairie-des-Lilas à la Dhuis : 5 km ;
- Ligne 11, de la Dhuis à Noisy-Champs : 10 km.

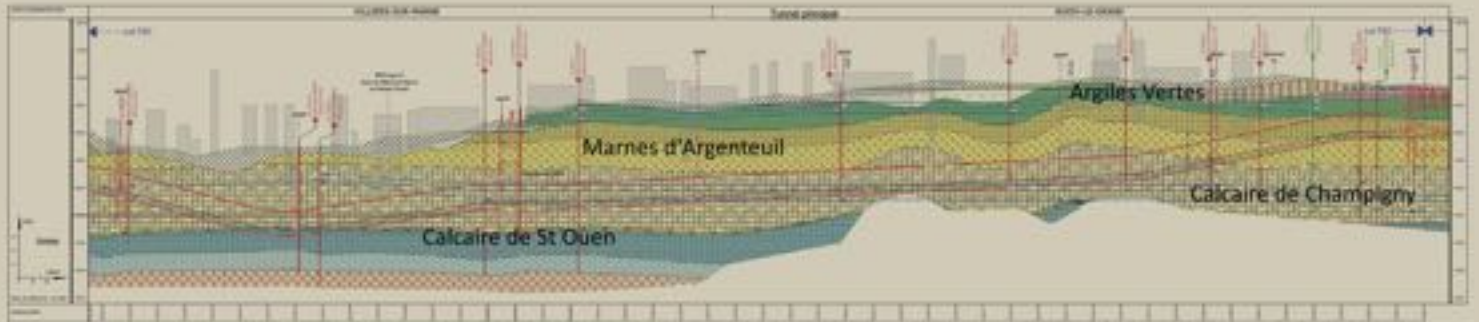
### LA LIGNE 15 SUD

Les premiers travaux du Grand Paris Express commencent par la Ligne 15 Sud. Elle représente 33 km de métro souterrain et traverse 22 communes. En intégrant les raccordements des sites de maintenance, la réalisation de cette première ligne nécessitera pas moins que 10 tunneliers afin de respecter les délais ambitieux de l'opération. Dans l'ordre de mise en service, ces tunneliers réaliseront :

→ **Tunnelier 1** : le tronçon de 2,2 km du raccordement entre le Site de Maintenance et de Remisage des trains (SMR) situé sur la commune de Champigny et l'ouvrage de débranchement (référéncé ouvrage 0807).

→ **Tunnelier 2** : le tunnel inter-gares de 4,7 km, entre Noisy-Champs et Bry-Villiers-Champigny y compris la traversée de l'ouvrage 0807.

## PROFIL GÉOLOGIQUE DE LA LIGNE



3

© SYSTRA

- **Tunnelier 3** : les 4,7 km de tunnels entre Bagneux et Fort-d'Issy, y compris la traversée de la gare de Châtillon-Montrouge, puis de Bagneux à Arcueil-Cachan.
- **Tunnelier 4** : le tronçon de 3,2 km entre Bry-Villiers-Champigny et l'ouvrage de débranchement de la Ligne 15 Est, y compris la traversée de la gare de Champigny-Centre.
- **Tunnelier 5** : les 4,4 km entre l'ouvrage 1302 en bordure de Seine et la gare de Villejuif-Louis-Aragon, y compris les traversées des gares des Ardoines et Vitry-Centre.
- **Tunnelier 6** : les 4,2 km de tunnels entre l'ouvrage OAP13 situé sur l'Île-de-Monsieur et la gare de Fort-d'Issy, y compris la traversée de la gare d'Issy-RER.
- **Tunnelier 7** : le tronçon de 3,4 km entre la gare d'Arcueil-Cachan et la gare de Villejuif-Louis-Aragon, y compris la traversée de la gare de Villejuif IGR.

### 3- Profil géologique de la ligne.

### 4- Tracés du lot T2c avec points singuliers.

### 3- Geological profile of the line.

### 4- Alignments of work section T2c with special features.

- **Tunnelier 8** : les 4,5 km entre la gare de Créteil et l'ouvrage de débranchement de la Ligne 15 Est, y compris la traversée de la gare de Saint-Maur.
- **Tunnelier 9** : le raccordement de 1,1 km entre le Site de Maintenance des Infrastructures (SMI) et l'ouvrage 1401 situé à proximité de la gare des Ardoines.
- **Tunnelier 10** : les 2,8 km entre l'ouvrage 1302 et Créteil, y compris la traversée de la gare Vert-de-Maison.

À l'exception du tunnelier 9 qui a un diamètre d'excavation de 7,70 m pour réaliser un tunnel à voie unique (tunnel de service), les tunneliers ont un diamètre de 9,83 m pour des tunnels à double voie.

## LES 2 PREMIERS TUNNELIERS

### LE TRACÉ

Le premier tunnelier (S-1078) doit réaliser un tunnel circulaire profond à 2 voies de 8,70 m de diamètre intérieur sur une longueur de 2,2 km environ, sur la commune de Champigny, entre l'ouvrage n°0813, situé à proximité immédiate du site de maintenance et de remisage (SMR) et l'ouvrage de débranchement n°807.

Le second tunnelier (S-1079) œuvrera pour réaliser un tunnel, de même diamètre, sur une longueur de 4,7 km environ sur les communes de Noisy-le-Grand, Villiers-sur-Marne et Champigny. Ce tunnel sera réalisé en 2 tirs.

Le premier sera creusé entre l'ouvrage n°802 situé à proximité dans la future gare de Noisy-Champs et l'ouvrage de débranchement n°807. Le second tir sera réalisé entre l'ouvrage 807 et la future gare de Bry-Villiers-Champigny situé à côté de la route RD10.

### LA GÉOLOGIE

La géologie de l'opération, située au sud-est de Paris est constitué des dépôts d'origine sédimentaires de l'âge du Bartonien, du Ludien et du Sannoisien. Les principales formations traversées sont les suivantes (figure 3) :

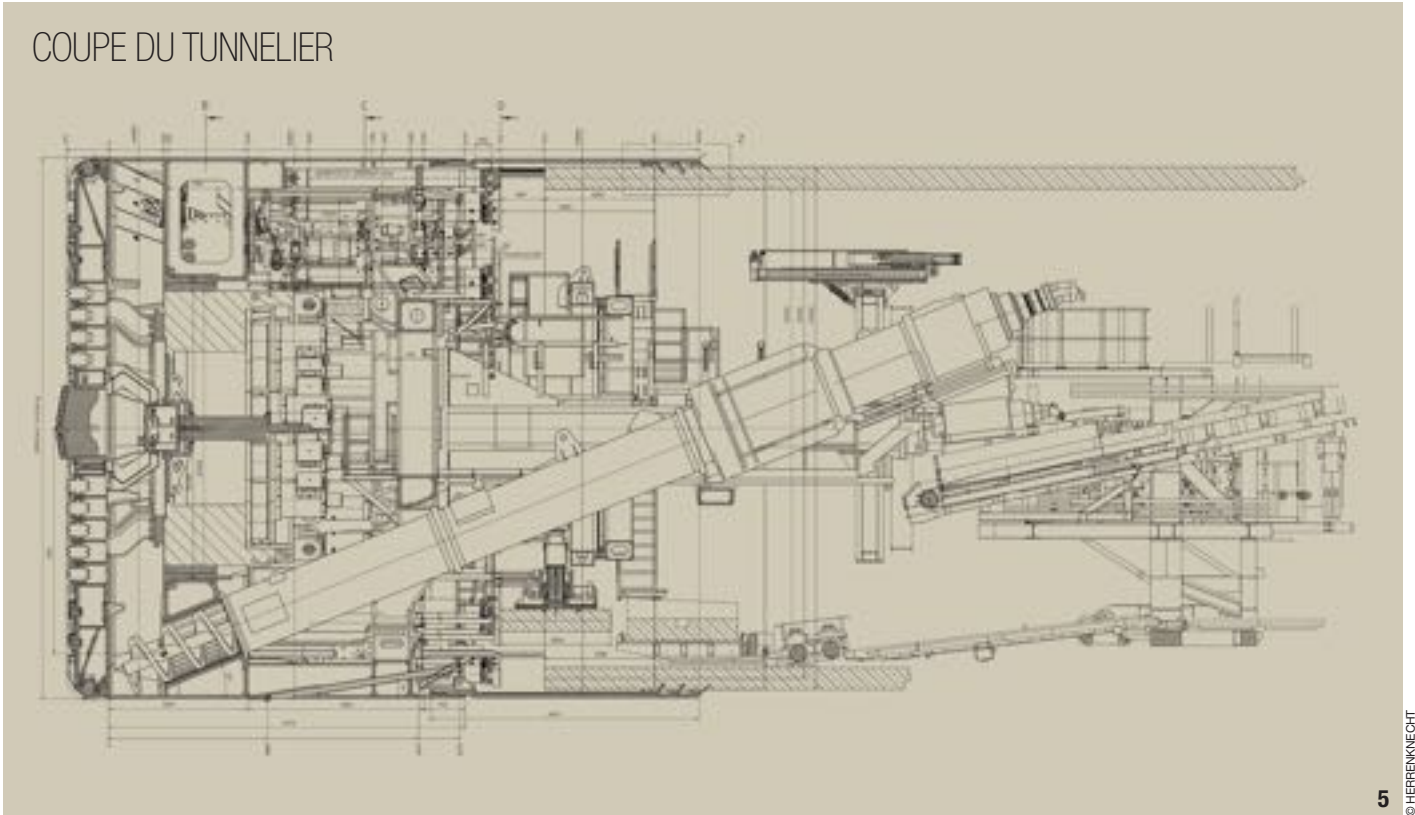
Le Calcaire de Brie ou Travertin de Brie (TB) d'environ 4 m, est essentiellement marno-calcaire plus ou moins riche en accidents siliceux (bancs de meulière compacts). Il arme le relief et constitue l'entablement du plateau de Noisy-le-Grand d'où est lancé le second tunnelier. Dans le secteur, il est présent de manière massive au cœur du plateau puis sous forme de butte témoin. ▷



© SYSTRA

4

## COUPE DU TUNNELIER



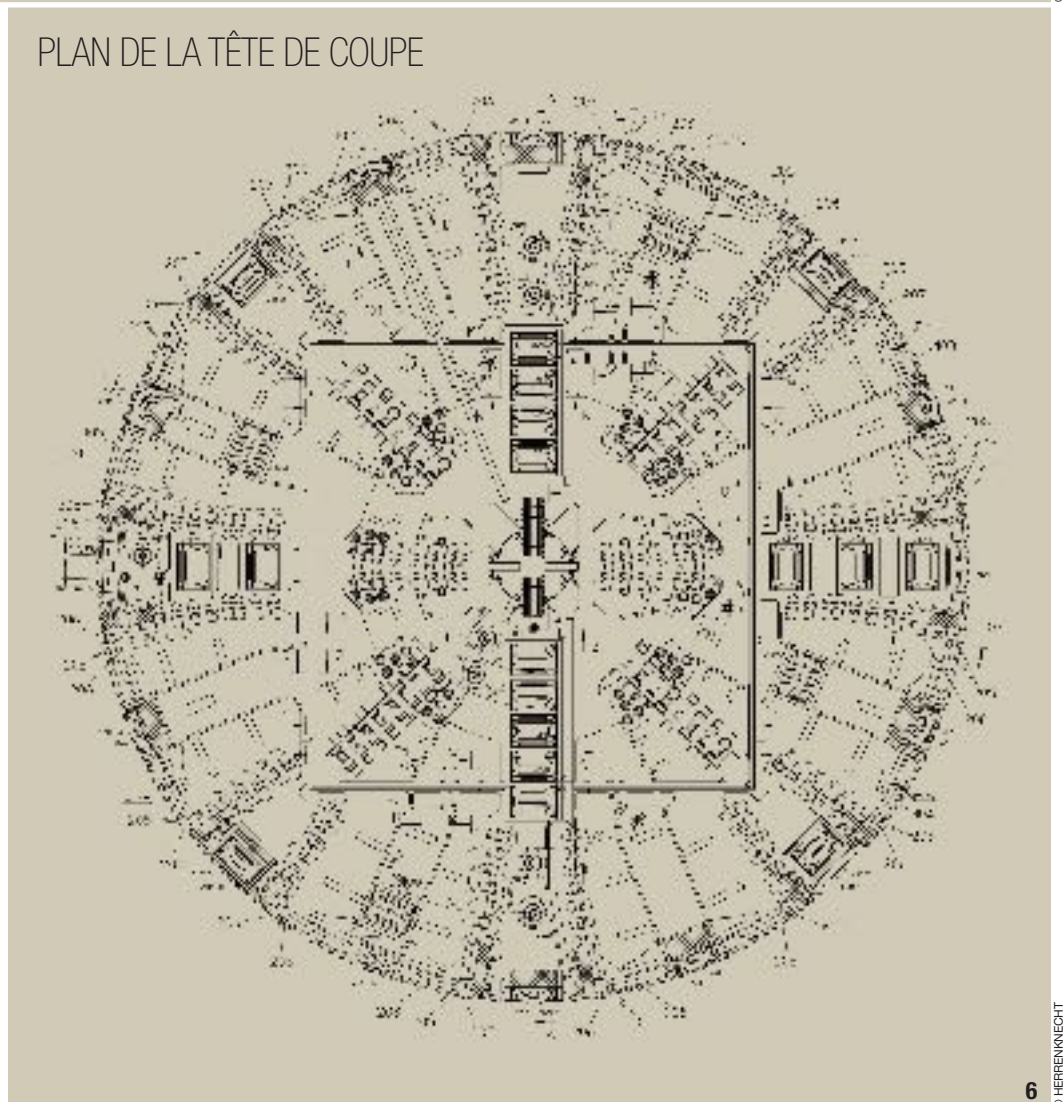
5

© HERRENKNECHT

**5- Coupe  
du tunnelier.  
6- Plan de la tête  
de coupe.**

**5- Cross section  
of TBM.  
6- Drawing of  
cutting head.**

## PLAN DE LA TÊTE DE COUPE



6

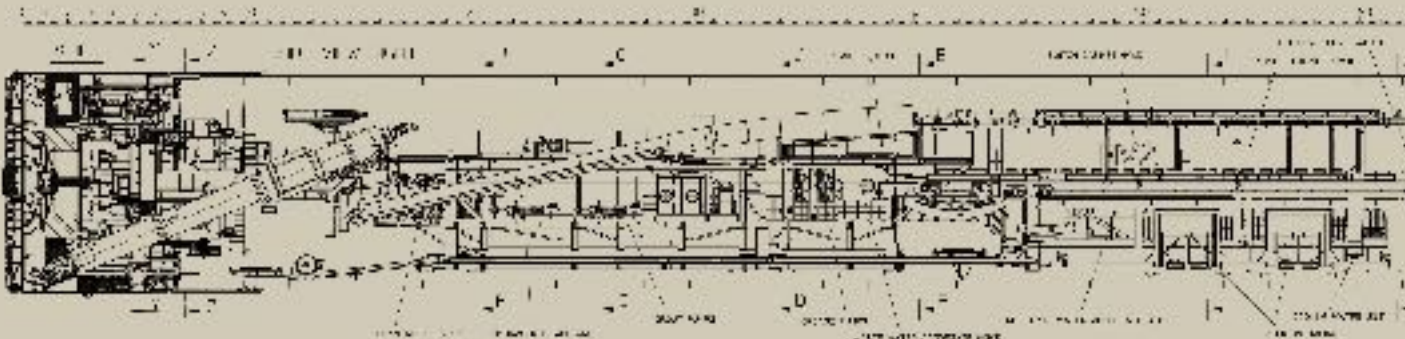
© HERRENKNECHT

Les Argiles Vertes (AV) ou Glaises Vertes de 2 à 7 m, sont composées d'argile grise verte pouvant contenir quelques nodules de calcite. Elles ont tendances à fluier au niveau des versants et constituent un matériau important dans les pentes comme par exemple au niveau de l'ouvrage de débranchement. Leurs caractéristiques mécaniques et hydrologiques sont alors différentes de celles en place.

Les Marnes de Pantin (MP) de 7 à 9 m, sont caractérisées par une marne beige crème légèrement silteuse, compacte, et moyennement plastique.

Les Marnes d'Argenteuil (MA) de 6 à 10 m, sous-jacentes aux Marnes de Pantin, sont constituées d'une alternance d'argile marneuse et de marne argileuse gris clair bleuté, compacte, pouvant contenir quelques filets sableux millimétriques et des inclusions calcaires blanchâtres. Il s'agit de marnes

## COUPE LONGITUDINALE DU TUNNELIER



7

© HERRENKNECHT

et argiles très plastiques, classées principalement A3 et A4 dans la classification GTR.

Le Calcaire de Champigny (CC) de 15 à 20 m, est la principale couche géologique traversée par les tunneliers. Il présente un faciès marno-calcaire de couleur claire constitué de marnes, calcaires fins et travertin avec de nombreux accidents siliceux de type silex. Les accidents siliceux peuvent être présents sur le secteur par passes centimétriques à décimétriques.

Les Sables Verts (SV) jusqu'à 2 m, sont composés de marnes sableuses gris vert et le Calcaire de Saint-Ouen (CSO) de 8 à 15 m, est considéré sain avec une marne très ferme à indurée et un calcaire dur pouvant être fracturé avec des passages marno-calcaires avec présence de passages silicifiés et gypsifères.

D'un point de vue hydrogéologique, le projet est baigné par une superposition de plusieurs nappes, certaines sont perchées.

La nappe de l'Oligocène, dans le Calcaire de Brie, est très superficielle.

L'ensemble aquifère de l'Éocène Supérieur (Ludien et Bartonien) regroupe une multitude de faciès différents avec les Marnes de Pantin situées sous l'éponte imperméable de l'Argile verte, le Calcaire de Champigny souvent exploité pour l'eau potable est protégé par les Marnes d'Argenteuil, et le Calcaire de Saint-Ouen, sous les Sables Verts, a des circulations entre les bancs calcaires et de marnes parallèlement à la stratification.

### LES POINTS SINGULIERS

Plusieurs zones à front géologique mixte (Argiles/Marnes, Marnes/Calcaire et Calcaire/Sables) sont prévues traversées sur environ 1 km cumulé.

### 7- Coupe longitudinale du tunnelier.

### 8- Foreuse installée à demeure.

### 7- Longitudinal section of TBM.

### 8- Drilling machine installed permanently.

De plus, 43 points singuliers ont été identifiés lors des études de conception pour les 3 tirs des tunneliers du lot T2C (figure 4).



8

© HERRENKNECHT

Ils sont de plusieurs types :

- Passage sous un ouvrage ayant une exploitation très sensible (exemple : plus de 2,3 km de creusement au tunnelier sont situés sous le réseau RFN, avec notamment l'exploitation du RER E) ;
- Passage sous des bâtiments classés « très sensibles » ;
- Passage sous des projets immobiliers en cours de construction ;
- Passage à proximité des ouvrages annexes du projet puisque 10 rameaux sont prévus pour les accès pompier ou ouvrage de ventilation.

5 points singuliers sont présentés ci-après avec les mesures envisagées au niveau du tunnelier en adéquation avec le milieu et leur singularité :

- 1- Le pylône de télécommunication à fort élanement et fondé sur un groupe de micropieux, situé à environ 200 m du puits de départ du premier tunnelier, qui nécessite une pression au tunnelier supérieure à 1,0 bar pour avoir une mise en pente maximale inférieure à 1 ‰.
- 2- L'autoroute A4 en exploitation, une pression du tunnelier à plusieurs bars devrait garantir des tassements différentiels non critiques dans le sens longitudinal, moyennant une cuvette de tassement d'ampleur assez élevée (environ 70 m).
- 3- Un bâtiment industriel sur pieux à Noisy-le-Grand, classé peu sensible, une pression du tunnelier de plusieurs bars sera nécessaire à sa bonne préservation.
- 4- Une école maternelle à Noisy-le-Grand (fondations superficielles), classée comme très sensible notamment du fait de son exploitation, qui nécessitera une bonne maîtrise de la pression de confinement au front.
- 5- Le passage sous le réseau RFN.

Les résultats de l'analyse et des modélisations indiquent que les paramètres de pression permettant une maîtrise des tassements de surface satisfaisants, aucun des points singuliers identifiés ne nécessite de traitement préventif.

Dès le démarrage des tunneliers, des sections d'auscultation, seront mises en place afin de réaliser des rétro-calculs afin de confirmer les données calculées.

Par ailleurs, l'ensemble des points singuliers identifiés seront l'objet d'une instrumentalisation renforcée. ▷

## LES CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES TUNNELIERS

Le groupement Alliance, titulaire du lot T2c, a confié la fabrication des tunneliers à pression de terre à la société Herrenknecht. Ce type de tunnelier, encore appelé EPB (Earth Pressure Balance) dans la terminologie anglo-saxonne, exploite le procédé de confinement avec le terrain excavé.

La première machine (S-1078) a été réceptionnée en usine le 30 août 2017 et la seconde (S-1079), le 25 octobre 2017 (figure 1).

Chacune des deux machines est conçue pour excaver à une vitesse de 80 mm/min en pointe et poser des anneaux composés de 6 voussoirs courants et d'une petite clé de 2,0 m et 1,5 m de longueur, ces derniers étant mis en œuvre dans les sections à faible rayon de courbure (250 m minimum). Le bouclier, d'une longueur de 11,3 m avec la jupe comprise, intègre 26 vérins de poussée développant 56 000 kN à 350 bars, une vis de marinage équipée d'un concasseur à rouleaux installé en ligne et d'un sas à personnel Ø 1 600 pour les interventions hyperbares d'une capacité de 4 personnes. Une réserve pour un second sas est aménagée dans la cloison étanche (figure 5).

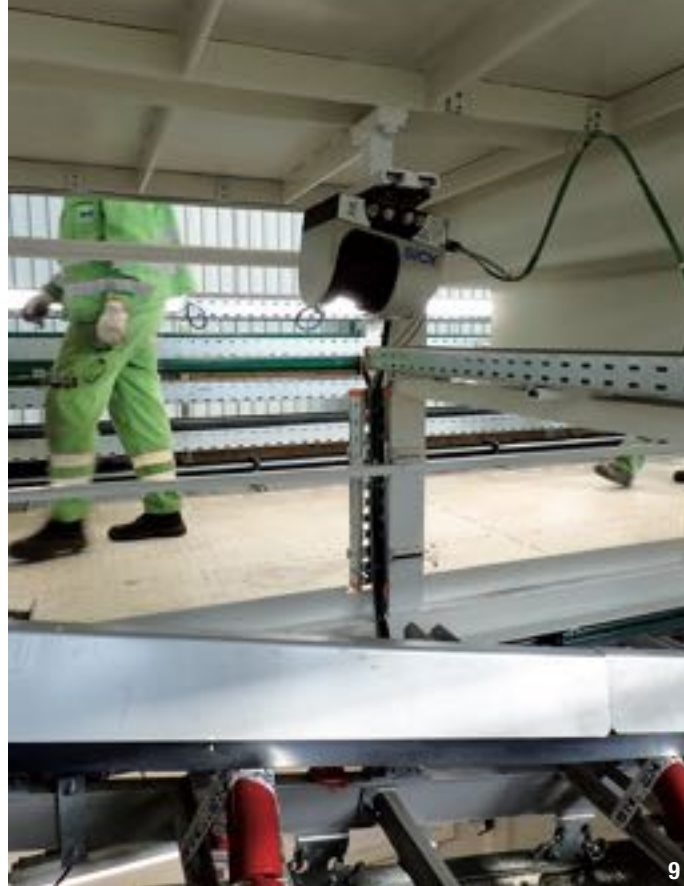
La roue de coupe, d'une masse de 135 t, comporte 22 molettes doubles et 8 molettes simples en 17", ainsi que 237 outils.

La roue est articulée et 6 vérins d'une course de 400 mm permettent de l'incliner, de la translater et de l'excentrer (sur-largeur de coupe). Elle est mise en rotation par 11 moteurs électriques développant 3 850 kW et 18 MNm (couple de déblocage de 24,1 MNm) (figure 6).

Au global, le tunnelier et les 4 remorques composant le train suiveur, représentent un poids de 1 450 t pour une longueur de 106 m et une puissance 6 150 kW (figure 7).

## LES CARACTÉRISTIQUES PARTICULIÈRES DES TUNNELIERS

Lors de la phase de *pre-design* de la machine, les échanges entre le grou-



© SYSTRA

pement Alliance et Systra ont amené à intégrer un certain nombre d'équipements sur chacun des tunneliers, en supplément des matériels standards (capteurs de pressions, injections mousse et air, etc.) :

→ Une foreuse est installée à demeure à l'arrière de l'érecteur à voussoirs permettant de réaliser des forages Ø 100 mm au travers du bouclier (13 ouvertures à 30° + 2 horizontales) pour de la reconnaissance géologique et/ou injections à l'avant du tunnelier (figure 8).

→ Une double pesée du marinage sur le convoyeur principal complétée par un capteur volumétrique de type Bulkscan, pour contrôler les volumes/poids réellement extraits par rapport au théorique et les volumes du mortier de bourrage injectés (une alerte automatique, via le système de supervision VMT, est mise en place lorsque ces 3 données dépassent les seuils admissibles) (figure 9).

→ Un fontimètre d'une course de 525 mm est implanté dans la partie haute du bouclier pour contrôler le vide annulaire, à chaque pas d'avancement.

→ Un scissomètre est également mis en place à l'avant du bouclier pour

**9- Capteur volumétrique Bulkscan.**

**9- Bulkscan volume measuring sensor.**

contrôler l'état de remplissage de la chambre.

→ 4 molettes doubles sont instrumentées pour mesurer les efforts de poussée.

→ Un équipement de caractérisation des déblais en ligne sur la chaîne de marinage (système Diagnosol Expert actuellement en cours de développement) permettant de caractériser les matériaux (classes de polluants) avec résultats en temps réel.

De plus, chacun des tunneliers est muni d'un système de reconnaissance à l'avancement :

→ Sur le tunnelier S-1079 et optionnellement sur le S-1078 : un système SSP-E (HK) composé de 2 émetteurs installés sur le bouclier et de 5 receveurs permettant la détection de cavités, bancs indurés ou changement de densité par réfraction d'ondes sismiques (de surface et de cisaillement).

→ Sur le tunnelier S-1078 : un télescope à muons installé dans le bouclier dans le cadre d'un partenariat avec l'IPNL (CNRS - université de Lyon). □

## PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA LIGNE 15 SUD

**TYPE DE MÉTRO : Ligne automatique avec caténaire rigide**

**NOMBRE DE STATION : 16 gares**

**LONGUEUR COMMERCIALE DE LA LIGNE : 33 km**

**INTERVALLE MINIMUM : 85 secondes**

**VITESSE COMMERCIALE : 40 km/h**

**CAPACITÉ : 27 000 voyageurs par heure**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

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

**ASSISTANT MAÎTRISE D'OUVRAGE : Artemis**

**MAÎTRISE D'ŒUVRE INFRASTRUCTURES : Systra**

**LOT T2C : Groupement Demathieu Bard Construction (mandataire) / Nge génie civil / Guintoli / Gts / Implenia / Pizzarotti / Atlas Fondations / Franki Fondations**

## ABSTRACT

### LINE 15 SOUTH - LAUNCH OF THE FIRST TBMS

PIERRE JULLIEN, SYSTRA - NICOLAS MARGOLOFF, DEMATHIEU BARD - SAMIR RENAI, IMPLenia - VINCENTE FLUTEAUX, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

Due to the 'Grand Paris Express' project, the activity of TBMs in the Paris region will explode in the coming years. Work has started on Line 15 South, and the first TBMs will be working from the start of 2018. □

### LÍNEA 15 SUR - LANZAMIENTO DE LAS PRIMERAS TUNELADORAS

PIERRE JULLIEN, SYSTRA - NICOLAS MARGOLOFF, DEMATHIEU BARD - SAMIR RENAI, IMPLenia - VINCENTE FLUTEAUX, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

Con el proyecto Grand Paris Express, la actividad de las tuneladoras en la región parisina será frenética durante los próximos años. Tras el inicio de las obras de la Línea 15 Sur, las primeras tuneladoras empezarán a trabajar a comienzos de 2018. □

NOS FONDATIONS AUJOURD'HUI, CE SONT EUX

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

**REJOIGNEZ-NOUS POUR LE GRAND PARIS**

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





**PARIS**  
**23 - 28 AVRIL 2018**

**SALON INTERNATIONAL  
DE LA CONSTRUCTION  
ET DES INFRASTRUCTURES**

# DEMAIN SE CONSTRUIT AUJOURD'HUI

**VOTRE BADGE GRATUIT**

SUR [PARIS.INTERMATCONSTRUCTION.COM](http://PARIS.INTERMATCONSTRUCTION.COM) | CODE : TRAVAUX18

      #intermatparis

CONJOINTEMENT AU SALON



COMEXPOSIUM

**INTERMAT PARIS**  
70 avenue du Général de Gaulle  
92058 Paris La Défense Cedex - France  
E-mail : [communication@intermatconstruction.com](mailto:communication@intermatconstruction.com)





1

© SYSTRA

# LIGNE 15 SUD - RÉDUCTION DES RISQUES INTÉGRÉE DÈS LA CONCEPTION DES TUNNELS

AUTEURS : GASPARD KARWETA-PAYEN, INGÉNIEUR TRAVAUX SOUTERRAINS, SYSTRA - OLIVIER DUFOURD, DIRECTEUR TECHNIQUE TRAVAUX SOUTERRAINS, SYSTRA - FEDERICO VALDEMARIN, EXPERT RISQUES TRAVAUX SOUTERRAINS, SYSTRA

**7 TUNNELIERS SONT PRÉVUS POUR LES 21 KM DE TUNNELS DU TRONÇON SUD-EST DE LA LIGNE 15 DU GRAND PARIS EXPRESS. LA DIVERSITÉ DES HORIZONS GÉOLOGIQUES TRAVERSÉS AINSI QU'UNE FORTE DENSITÉ URBAINE AVEC DE NOMBREUSES CONSTRUCTIONS FONDÉES EN PROFONDEUR CONSTITUENT LES GRANDS DÉFIS DU CREUSEMENT. DANS CE CONTEXTE, À CHAQUE ÉTAPE DE LA CONCEPTION, UNE STRATÉGIE DE GESTION DES RISQUES A ÉTÉ APPLIQUÉE POUR IDENTIFIER, ÉVALUER ET RÉDUIRE LES RISQUES DU CREUSEMENT TOUT EN CHERCHANT À OPTIMISER COÛTS ET DÉLAIS.**

## UN PROJET AU CŒUR DU GRAND PARIS EXPRESS

Un des objectifs du Grand Paris est de moderniser le réseau actuel de transports en commun en réalisant un nouveau métro automatique, le Grand Paris Express. Il s'agit de l'extension des Lignes 11 et 14, et de la construction de lignes nouvelles : la Ligne 15, une ligne circulaire autour de Paris permettant notamment de désaturer les lignes traversant la ville, et les Lignes 16, 17 et 18, prévues pour desservir les zones en développement de la périphérie (figure 2).

**1- Exemple d'une carrière souterraine réalisée par « chambre et piliers » située sous le Val de Grâce à Paris.**

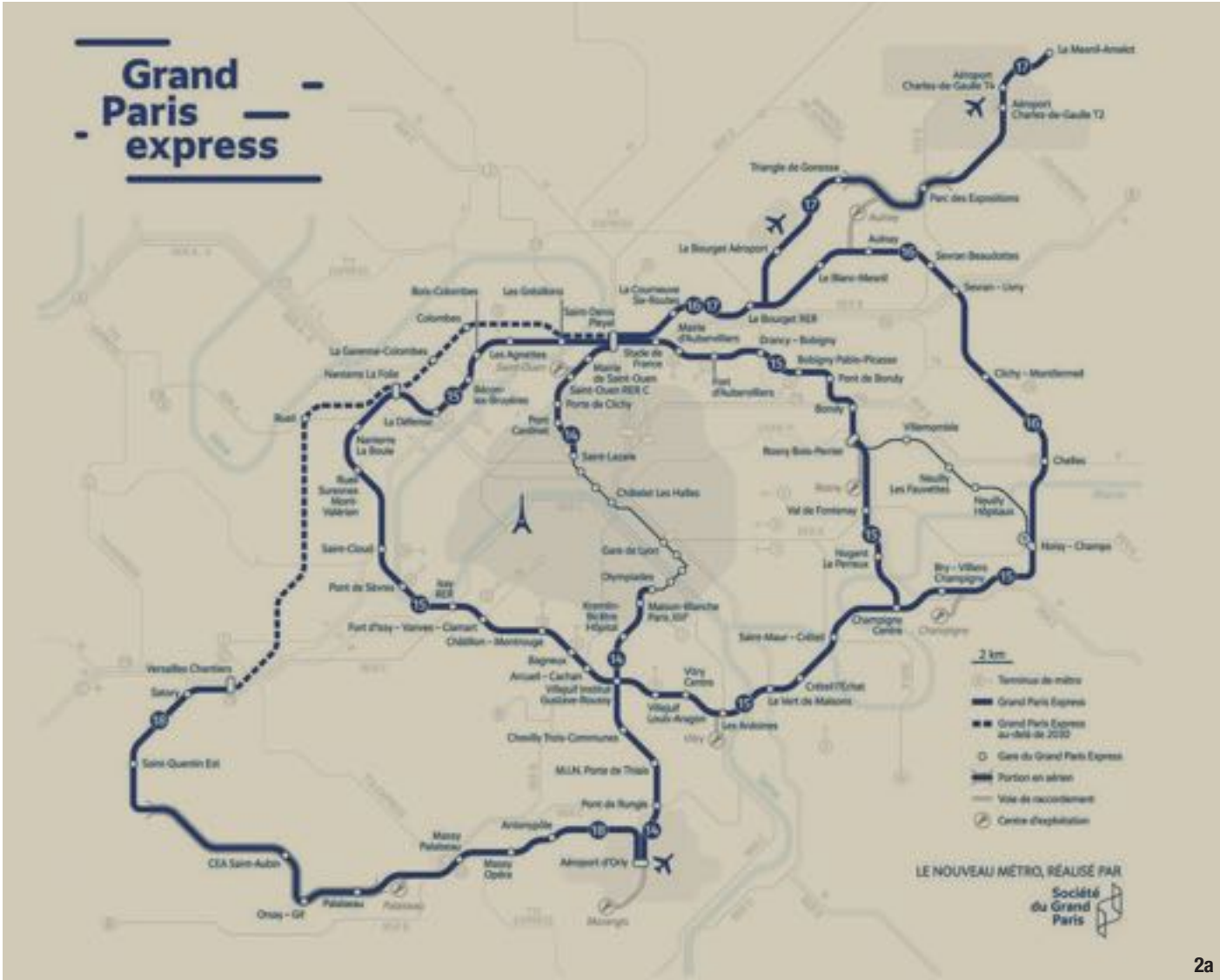
**1- Example of an underground quarry executed by the «room and pillar» system, located under Val de Grâce in Paris.**

Les travaux ont débuté en 2015 et, de 2022 à 2030, toutes les lignes seront progressivement mises en service, sans interruption ni phasage. La portée du projet est sans précédent : 200 km de nouvelles lignes, 68 nouvelles stations et 15000 à 20000 emplois directs. À moyen terme, 90% des habitants de la Région Île-de-France vivront à moins de 2 km d'une station de métro (figure 3). Ce contexte est très exigeant pour les firmes d'ingénierie qui réalisent la conception du métro, notamment vis-à-vis des modalités et délais associés aux interfaces avec l'existant et avec

les autres projets en cours, tels que les interconnexions entre les lignes nouvelles et existantes ou l'urbanisation prévue autour des nouvelles gares.

## LE TRONÇON SUD-EST DE LA LIGNE 15

La Ligne 15 est une nouvelle ligne souterraine de 75 km de long, divisée en plusieurs tronçons pour les études d'ingénierie. Le maître d'ouvrage, la Société du Grand Paris, a attribué à Systra la maîtrise d'œuvre du génie-civil du métro du tronçon Sud-Est de la Ligne 15, également appelé lot T2. ▷



2a

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

Systra est en charge de la conception des ouvrages, de la préparation des appels d'offres et de la passation des marchés de travaux et effectue actuellement la supervision de la construction. Le tronçon Sud-Est de la Ligne 15 consiste en un tunnel monotube de 21 km entre la future gare de Villejuif-Louis-Aragon à celle de Noisy-Champs ; il est conçu pour être excavé par 7 tunneliers, avec des diamètres intérieurs de tunnels qui varient entre 6,70 m pour les tunnels mono-voie et 8,70 m pour les tunnels à bi-voie. Le tracé s'insère sous des zones densément urbanisée et les tunneliers devront réaliser trois traversées sous-fluviales, avec la Seine et la Marne. Ce tronçon comprend également la construction de 8 stations et de 25 puits de sécurité et de ventilation. Des gares ont été prévues pour relier les métros existants et futurs, les lignes de train et de tramway du réseau de transport parisien (figure 4).



2a & 2b- Les futures lignes du Grand Paris Express.

2a & 2b- The future lines of the 'Grand Paris Express'.

**DES CONTRAINTES FONCTIONNELLES POUR L'INSERTION DU TRACÉ**

D'un point de vue fonctionnel, la géométrie des tunnels est dictée par l'emplacement et la profondeur des gares, des ouvrages, les critères géométriques de la voie ferrée et enfin l'implantation et la profondeur des puits intermédiaires de secours et de ventilation. Pour le projet du Grand Paris Express, parmi les principaux objectifs en matière de conception ferroviaire

2b

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS



© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS / LAURENT VILLERET

3

était d'obtenir une vitesse commerciale élevée - jusqu'à 110 km/h -, de minimiser l'entretien des voies et d'assurer le confort des voyageurs, par la limitation des superpositions de clothoïdes notamment. Des courbes de grand rayon ont été ainsi privilégiées, avec, par exemple, pour les tunnels de diamètre intérieur 8,7 m, les critères géométriques suivants :

- Rayon de courbure minimum en plan en vitesse maximale : 600 m.
- Rayon de courbure minimum dans le plan en vitesse commerciale : 350 m.

**3- Le premier tunnelier qui creusera le nouveau métro.**

**4- Le tronçon Sud-Est de la Ligne 15 du Grand Paris Express.**

**3- The first TBM which will dig the new metro.**  
**4- South-East section of Line 15 of the 'Grand Paris Express'.**

Les normes de sécurité des tunnels du réseau ferroviaire public imposent que les puits de plus de 30 m de profondeur soient équipés d'ascenseurs pour les secours, ce qui engendre des agrandissements et des surcoûts non négligeables.

Pour concilier maîtrise des coûts et maîtrise des risques au-dessus du tunnel, il a été nécessaire de maintenir 15 à 20 m de terrain de couverture au-dessus des tunnels, hors des points singuliers de la topographie, de la géologie ou de structures avoisinantes particulières.

### UNE GÉOLOGIE TRÈS CONTRASTÉE

Les caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques varient considérablement entre les horizons traversés, offrant de forts contrastes pour le creusement des tunneliers avec :

- Des calcaires de nature variée et hétérogène ; des bancs et massifs très durs, des bancs marneux, des zones très altérées, poreuses, de nombreuses traces karstiques, des horizons gypseux avec des poches ou vides de dissolution, des zones exploitées par l'homme en carrières souterraines.
- Des formations argileuses, plastiques et gonflantes localement.
- Des horizons sableux plus ou moins cohésifs, parfois sous forte pression d'eau.
- Des formations crayeuses poreuses et sous charge d'eau.
- Des horizons très perméables ou au contraire quasi-étanches.
- L'absence d'eau au front du tunnel ou au contraire jusqu'à 5 bars de pression d'eau sous le radier du tunnel.

Dans une approche « risque », le tracé des tunnels retenu a cherché à réduire les aléas du creusement en raccourcissant autant que possible les longueurs de tunnel creusées dans des formations intrinsèquement hétérogènes ou mal appréhendées d'une part et, d'autre part, ▷



© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

4

5- Horizons géologiques traversés par les tunneliers du tronçon Sud-Est L15.

6- Profil géologique entre la gare de Villejuif-Louis-Aragon et celle de Créteil-l'Échat.

7- Profil géologique entre la gare de Créteil-l'Échat et celle de Bry-Villiers-Champigny.

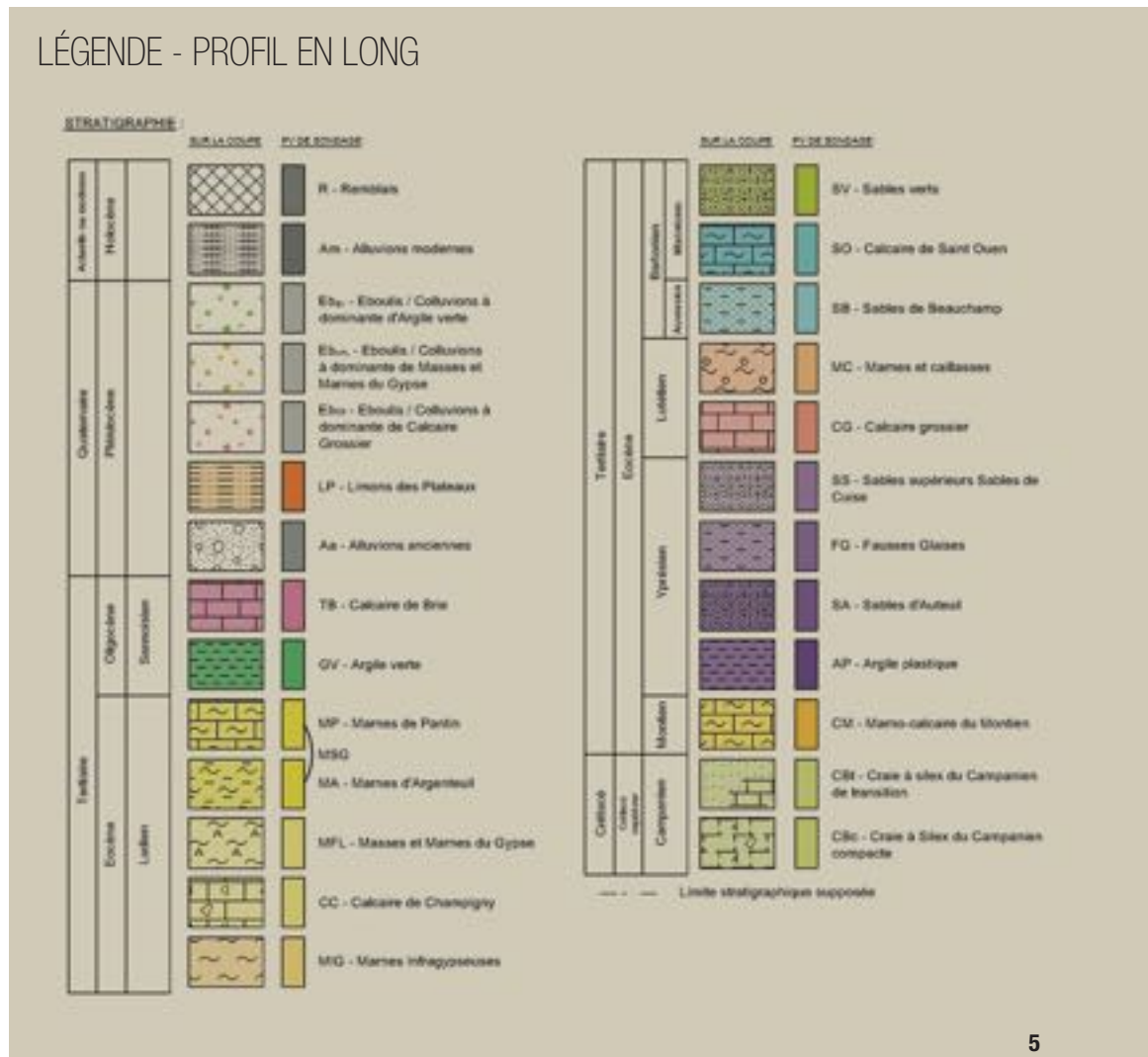
8- Profil géologique entre la gare de Bry-Villiers-Champigny et celle de Noisy-Champs.

5- Geological horizons passed through by the TBMs of the L15 South-East section.

6- Geological profile between the stations of Villejuif-Louis-Aragon and Créteil-l'Échat.

7- Geological profile between the stations of Créteil-l'Échat and Bry-Villiers-Champigny.

8- Geological profile between the stations of Bry-Villiers-Champigny and Noisy-Champs.



les longueurs de tunnel creusées en « fronts mixtes » où peuvent coexister de forts contrastes géotechniques et hydrogéologique entre formations ; des interfaces qui pourront s'avérer problématiques pour le creusement (calcaire grossier sur argiles plastiques par exemple).

Les différents profils géologiques de l'ouest, gare Villejuif-Louis-Aragon, à l'est, station Noisy-Champs, pour chacun des lots principaux de travaux de tunnels sont illustrés dans les figures 5 à 8.

### LA TRAVERSÉE DES FORMATIONS ARGILEUSES

Entre les gares de Créteil-l'Échat et de Champigny, 25 m d'épaisseur d'argiles plastiques de l'Yprésien constituent un véritable défi la réalisation des ouvrages souterrains.

En raison du caractère gonflant de ces argiles au contact de l'eau et de leur grande plasticité, des phénomènes de colmatage des outils de forage peuvent aller jusqu'à bloquer la rotation de la

roue du tunnelier. Par ailleurs, leur gonflement pourrait continuer sur le long terme et induire des efforts supplémentaires sur le béton armé des anneaux de voussoirs. Enfin, dans les zones où l'ensemble de la séquence géologique originelle sus-jacente à ces argiles est érodé, leurs caractéristiques géomécaniques sont plus faibles : le creusement du tunnelier peut alors engendrer des tassements plus importants en surface.

D'autres zones sont concernées par la présence en superficie d'argile soumise à l'effet de retrait-gonflement ; cet effet sollicite et fissure les habitations en surface, particulièrement dans les périodes sèches. C'est notamment le cas sur 3 km avec les argiles de l'Oligocène situées entre les gares Bry-Villiers-Champigny et Noisy-Champs. Dans cette zone, de nombreuses constructions de surface ont déjà été structurellement renforcées et la plupart sont fondées sur des pieux, dépassant parfois 30 m de profondeur et inégalement répertoriés ; ceux-ci

peuvent alors se retrouver en interaction avec le tunnel.

Les formations argileuses ont donc largement influencé la conception du tracé des tunnels, conduisant parfois à approfondir des sections de tunnel ou à en augmenter localement la pente.

### LE FRANCHISSEMENT DE CARRIÈRES SOUTERRAINES

Entre les gares de Créteil-l'Échat et de Saint-Maur-Créteil, au droit d'une zone nommée « Buttes-Halage », se trouvent d'importantes carrières souterraines, vestiges d'anciennes industries d'extraction du calcaire Lutétien. Elles ont été exploitées jusqu'à la fin du 20<sup>e</sup> siècle par la méthode des chambres et piliers.

Ces carrières s'étendent sur presque 90 m de part et d'autre de l'axe du tunnel et sont positionnés au-dessus de celui-ci.

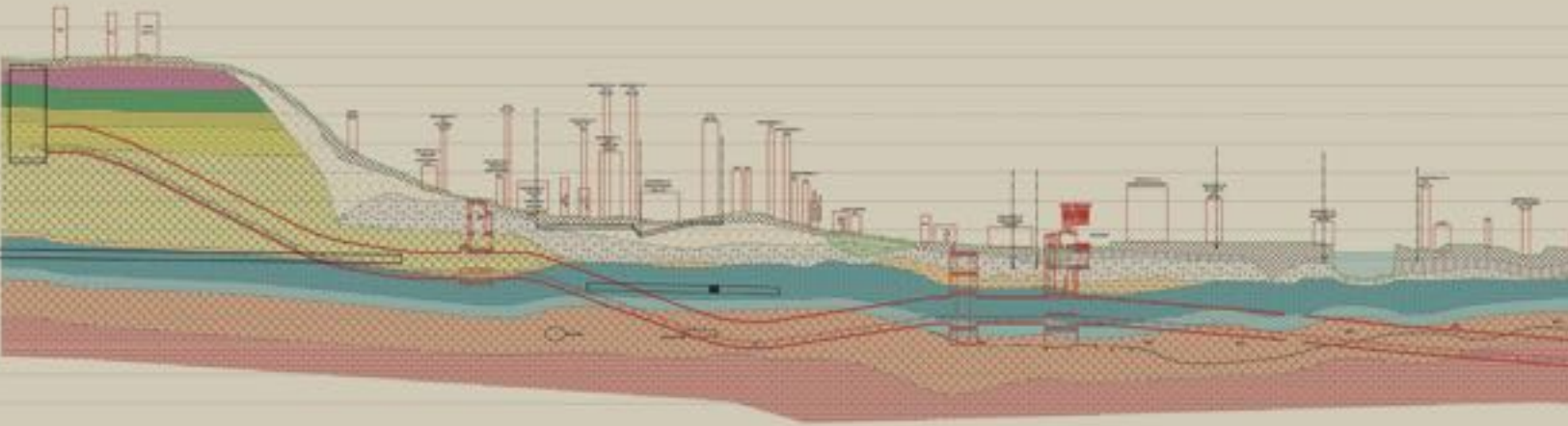
Plusieurs bâtiments ont été construits en surface, parfois avec des fondations spéciales telles que des micropieux. On note aussi la présence de dolines et

la trace historique de fontis. Enfin, les campagnes de reconnaissance réalisées dans le cadre du projet montrent que les calcaires du toit sont parfois fracturés et que les terrains sus-jacents sont décomprimés.

Dans un tel contexte, les risques en phase travaux sont majeurs et doivent être réduits dès la conception des tunnels. Des analyses multifactorielles ont été menées pour mieux approcher et comprendre les effets du creusement au tunnelier sur les carrières (tassements, déstabilisation, vibrations, décompression, etc.). Elles ont montré que le tunnel ne devait être ni trop proche (distance d'amortissement trop faible), ni trop éloigné des carrières (plus fort impact des argiles plastiques sous-jacentes, notamment en front mixte).

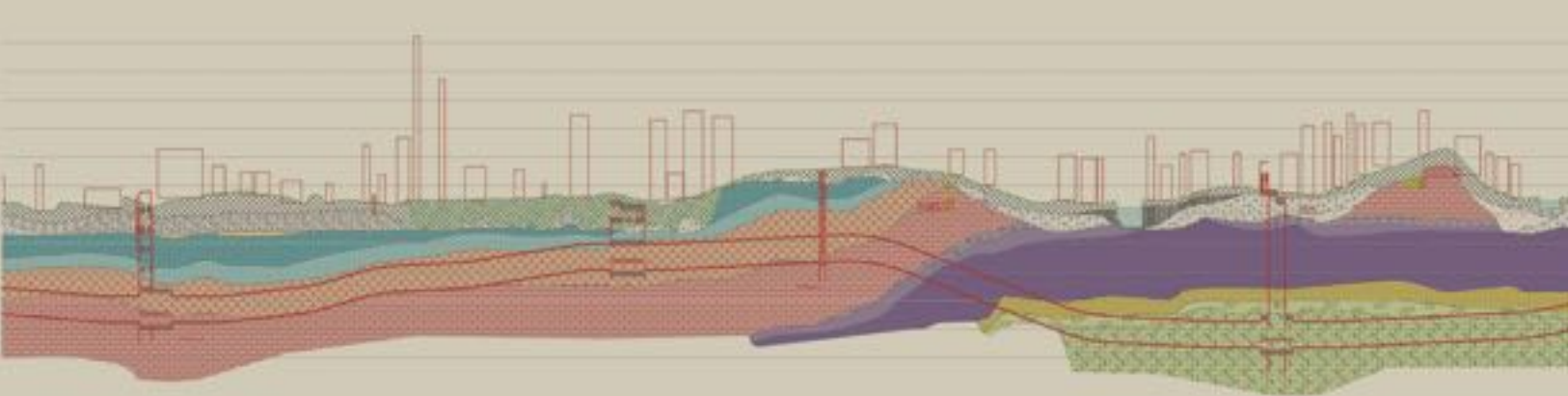
En plus du calage fin du profil en long, l'analyse de risque conforte la nécessité de réaliser des travaux de consolidation par comblement et injection des carrières préalablement à l'arrivée du tunnelier (figure 9).

## PROFIL GÉOLOGIQUE ENTRE LA GARE DE VILLEJUIF-LOUIS-ARAGON ET CELLE DE CRÉTEIL-L'ÉCHAT



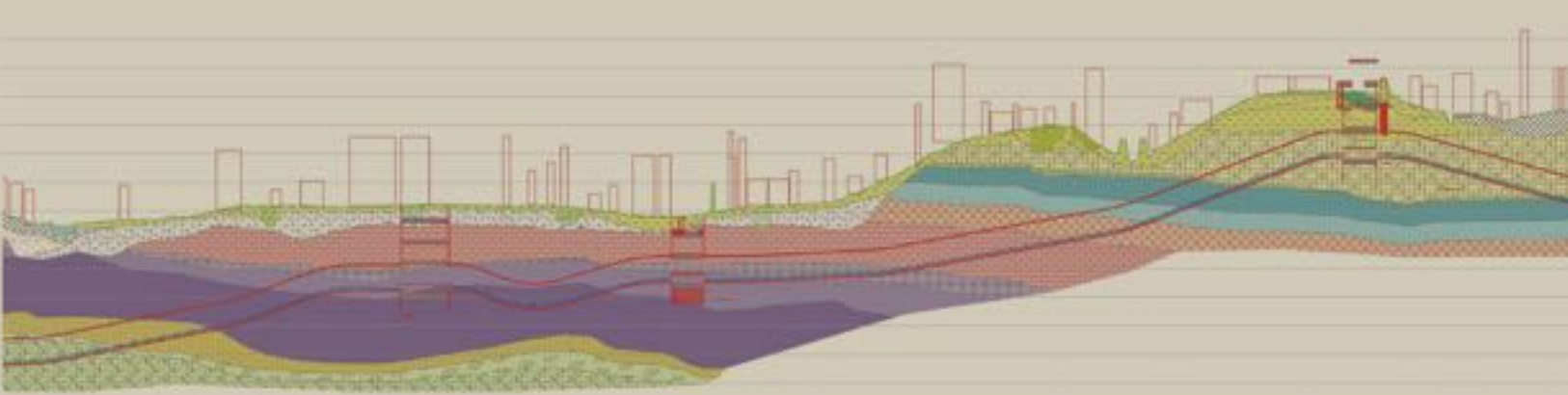
6

## PROFIL GÉOLOGIQUE ENTRE LA GARE DE CRÉTEIL-L'ÉCHAT ET CELLE DE BRY-VILLIERS-CHAMPIGNY



7

## PROFIL GÉOLOGIQUE ENTRE LA GARE DE BRY-VILLIERS-CHAMPIGNY ET CELLE DE NOISY-CHAMPS



8

© SYSTRA

### UN CONTEXTE URBAIN DENSE ET PARFOIS VULNÉRABLE

Deux contraintes fortes pour la conception du tracé étaient, d'une part, de devoir réduire au maximum le risque d'impacter les constructions existantes au-dessus du tunnel en raison de tassements ou de vibrations non suppor-

tables et, d'autre part, que soit éliminé le risque d'interception de structures enterrées - pieux, micropieux ou autres structures d'ouvrages -, en raison des conséquences majeures qui pourraient en découler : blocage du tunnelier, perte de portance d'un appui du bâtiment, ...

Le contexte géologique du projet - carrières souterraines, sablières et argiles soumises au retrait-gonflement -, explique donc qu'un nombre important de bâtiments au-dessus du tunnel soit fondé sur fondations profondes.

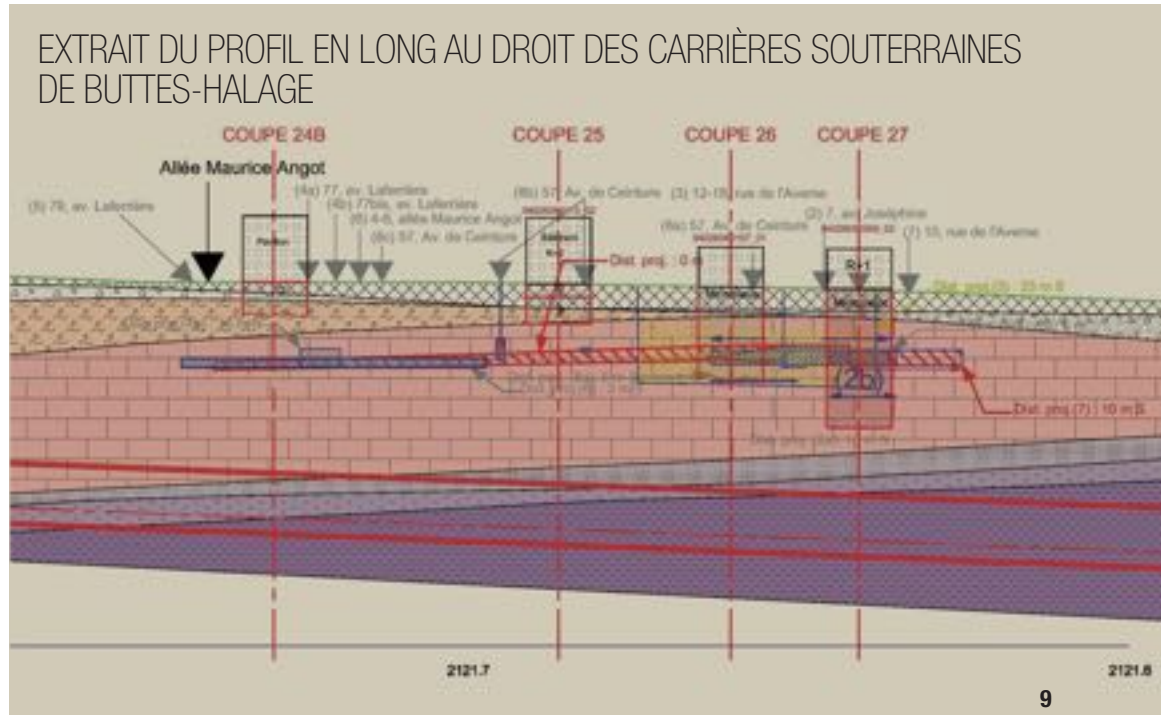
Dans la zone de la station Noisy-Champs par exemple, où l'on identi-

fie un fort aléa retrait-gonflement des argiles, un cas de bâtiment sur fondations profondes est particulièrement remarquable.

Il s'agit d'un bâtiment récent d'une hauteur de 10 m, qui est cependant fondé sur des pieux jusqu'à 20 m de profondeur. ▷

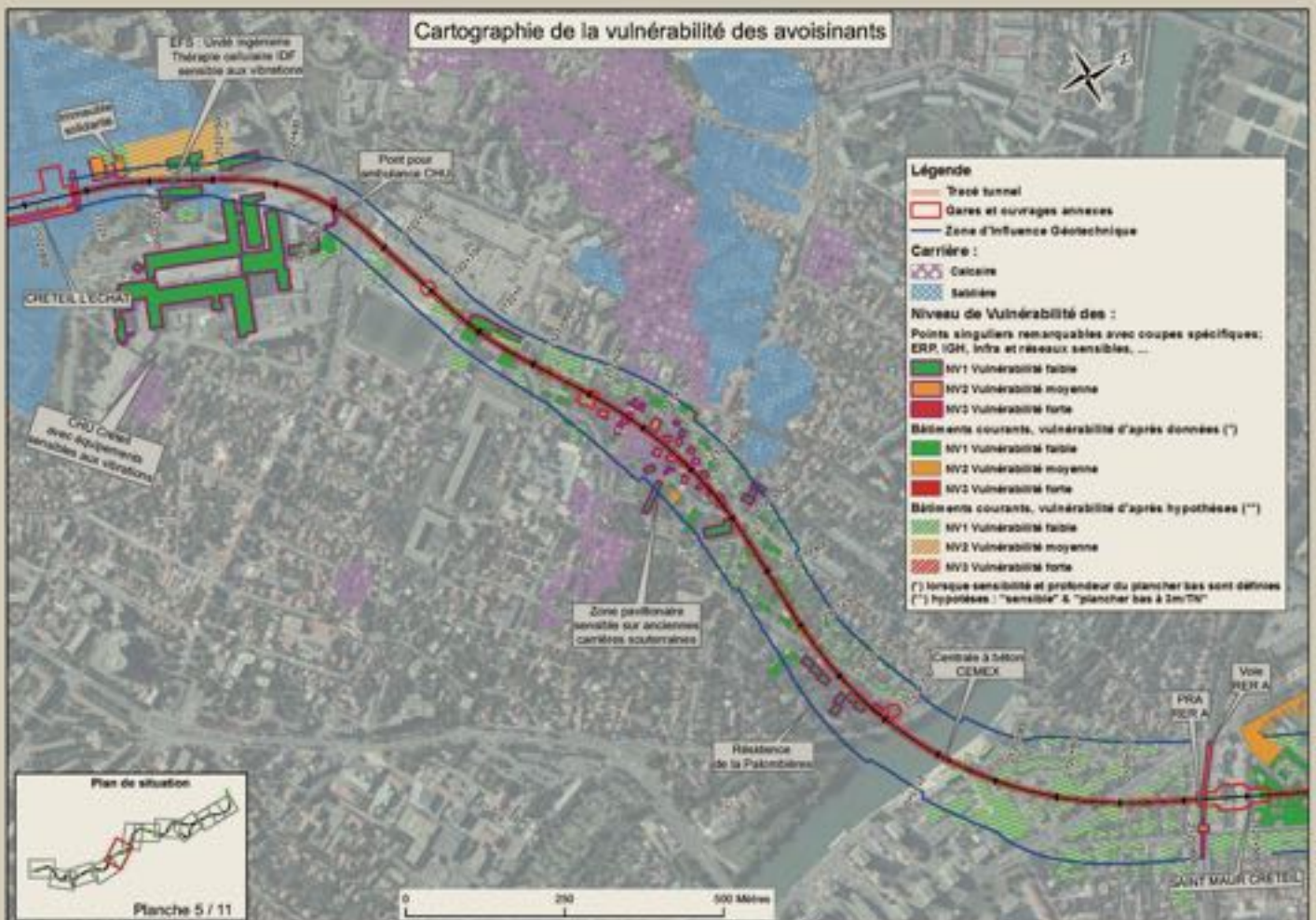
9- Extrait du profil en long au droit des carrières souterraines de Buttes-Halage.  
10- Extrait de la cartographie du risque d'endommagement des avoisinants aux tassements.

9- Excerpt from the longitudinal profile at the level of the Buttes-Halage underground quarries.  
10- Excerpt from the map of damage risk near subsidence.



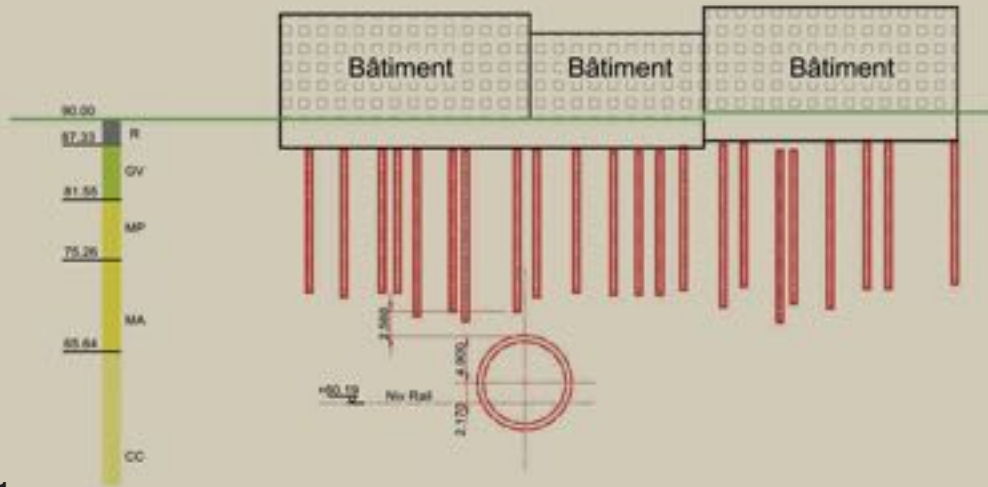
9

EXTRAIT DE LA CARTOGRAPHIE DU RISQUE D'ENDOMMAGEMENT DES AVOISINANTS AUX TASSEMENTS



10

## EXEMPLE D'INTERFACES AVEC DES FONDATIONS PROFONDES



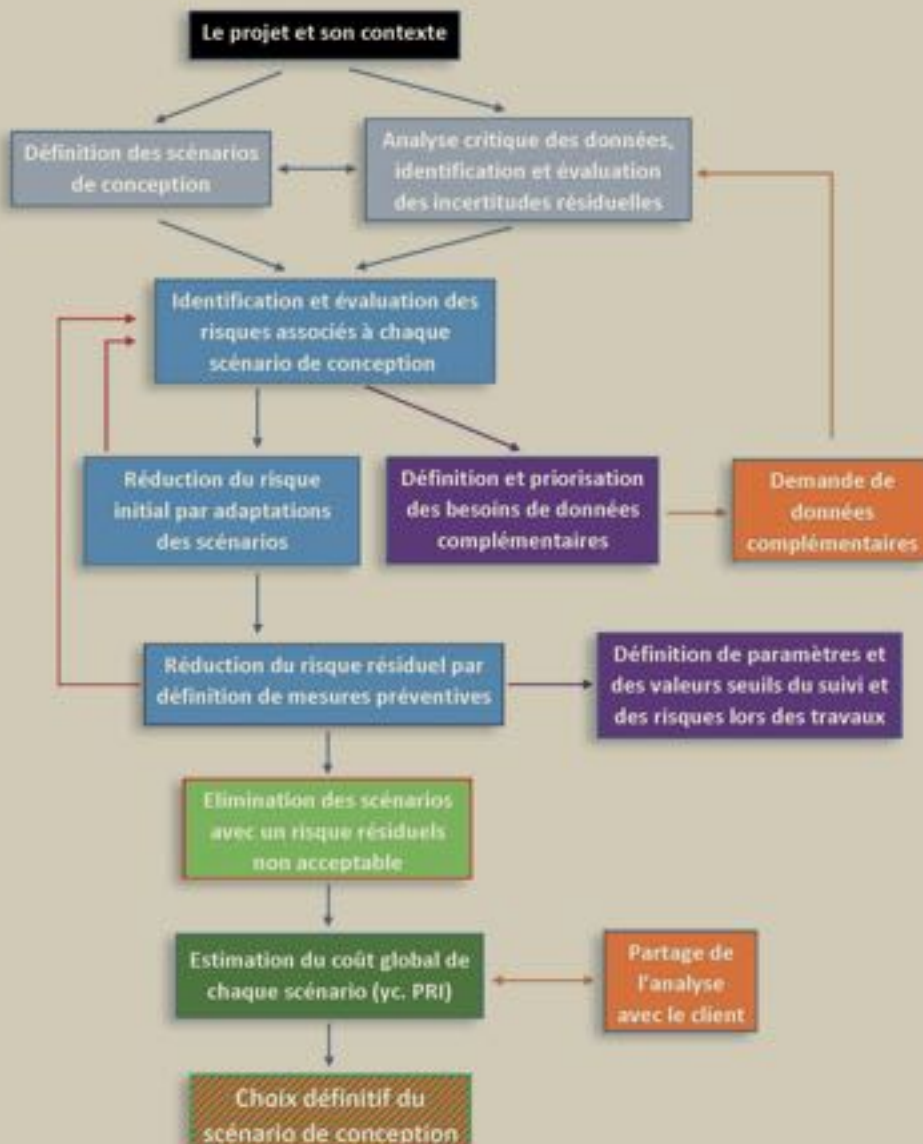
11- Exemple d'interfaces avec des fondations profondes.

12- Logigramme du processus de gestion des risques en phase de conception.

11- Exemple of interfaces with deep foundations.

12- Flow chart of the risk management process in the design phase.

## LOGIGRAMME DU PROCESSUS DE GESTION DES RISQUES EN PHASE DE CONCEPTION



La figure 10 illustre le scénario initial de la position du tunnel au-dessus de ce nouveau bâtiment.

L'application du processus de gestion des risques a d'abord permis d'identifier le risque, de retrouver des données de construction, en particulier sur le système de fondation, et d'adapter le profil en long : en l'occurrence il a été approfondi jusqu'à 6 m dans cette zone (figure 11).

Des analyses des risques d'endommagement fondés sur des scénarios de tassements et de vibrations raisonnablement sécuritaires et sur l'évaluation de la sensibilité intrinsèque de chaque construction existante ont été menées ; elles croisent les effets induits avec l'enjeu pour en estimer le niveau de dommage attendus : niveau architectural - ELS non atteint, fonctionnel - ELU non atteint, ou structurel - ELU atteint (figure 10).

Les résultats de ces analyses ont conduit à des adaptations locales en plan et en profil du tracé et/ou à la prescription de confortements ou de renforcement des bâtis impactés.

Enfin, de manière générale, l'incomplétude des données de l'existant en phase de conception a aussi nécessité une approche « risque » systématique concernant la sensibilité intrinsèque et l'existence possible de fondations profondes non identifiées.

### UN PROCESSUS DE GESTION DES RISQUES INTÉGRÉ À LA CONCEPTION

Afin d'intégrer les risques liés au contexte, notamment tel que présenté dans les sections précédentes, la conception du tracé des tunnels a été développée selon le processus du chapitre suivant (figure 12).

## LE CAS DES CONSTRUCTIONS SUR FONDATIONS PROFONDES

Comme expliqué précédemment, tout doit être entrepris en phase de conception pour que soit éliminé le risque d'interception de structures enterrées. L'incomplétude résiduelle des données de l'existant en phase de conception a amené à appliquer une approche globale de gestion de risque ; d'abord pour mieux identifier et quantifier les incertitudes concernant l'existence possible de fondations profondes, ensuite pour mieux évaluer les probabilités et conséquences du risque d'interception, et enfin pour pouvoir justifier l'augmentation des coûts du projet qu'une mesure corrective telle qu'un approfondissement du tracé entraînerait par rapport aux coûts estimés des conséquences évitées.

Avec environ 9 000 bâtiments potentiellement impactés par les travaux situés dans la ZIG, Zone d'Influence Géotechnique du projet (21 km de long), MOA et MOE se sont rapidement aperçus que retrouver de

manière exhaustive les caractéristiques de chaque bâtiment était difficilement réalisable dans les délais impartis de réalisation des études : si d'intenses recherches documentaires, des enquêtes sur le terrain et des reconnaissances de sol devaient absolument être menées pour obtenir un maximum d'informations quant à la présence de tels systèmes de fondation au cas par cas, celles-ci devaient être priorisées.

Dans cette optique, les étapes décrites ci-dessous ont été suivies :

→ Sélection des bâtiments à analyser situés dans une zone large de 1,5 diamètre de tunnel au-dessus de l'alignement du tunnel.

→ Identification des zones dans le scénario de référence où, malgré la présence éventuelle de pieux de fondation, la distance entre la base des pieux et l'extrados du tunnel est suffisante pour éliminer le risque d'interception ; ces zones étaient par la suite exclues de la recherche.

→ Identification des zones dans le scénario de référence avec des couches de sol, sus-jacentes au tunnel, présentant de fortes caractéristiques de portance (Ludien, Bartonien et Calcaire Lutétien) sur une épaisseur minimale de 7 m. Ce critère repose sur le principe que les pieux profonds, s'ils existent, n'auront pas besoin d'être fondés plus profondément que cette formation pour assurer la stabilité de la structure ; là-encore, ces zones étaient par la suite exclues de la recherche.

→ Exclusion des bâtiments de moins de quatre étages, à l'exception des zones où se trouvent des géologies défavorables, telles que les zones de carrières, de sablières ou d'argiles avec un aléa retrait-gonflement. Ce critère repose sur le principe que, dans ces zones, même des maisons particulières peuvent être fondées sur fondations profondes et ne doivent pas être négligées.

Il a résulté de ce processus que, sur les 9 000 bâtiments de la ZIG :

→ Seuls 5 bâtiments présentaient un risque fort d'interception. Le tracé a alors été modifié, que ce soit en plan ou en profil.

→ Environ 15 présentaient un risque moyen à faible d'interception. Le tracé a été adapté lorsque la modification restait sans conséquences et, pour les autres cas, une liste de bâtiments nécessitant des investigations supplémentaires en urgence a été établie. Cette liste réduite a permis d'obtenir des résultats rapides d'investigations complémentaires.

→ Une centaine présentaient un risque résiduel très faible d'interaction avec le tunnel. Une liste secondaire de bâtiments nécessitant des investigations supplémentaires a été établie. Cette liste donnait un objectif d'investigations complémentaires à atteindre.

Cette procédure de gestion des risques lors de la conception du tracé des tunnels a alors permis de stabiliser la conception des tunnels avant l'attribution des travaux. □

## PRINCIPAUX CHIFFRES DES TRACÉS DU TRONÇON SUD-EST DE LA LIGNE 15

**NOMBRE DE GARES : 8 u**

**NOMBRE DE PUIXS DE SECOURS ET/OU VENTILATION : 25 u**

**LONGUEUR DES TUNNELS : 21 km**

**NOMBRE DE TUNNELIERS : 7 u**

**DIAMÈTRES INTÉRIEURS DES TUNNELIERS : 6,7/8,7 m**

**DIAMÈTRES FORÉ DES TUNNELIERS (ENVIRON) : 7,8/10 m**

**PROFONDEUR MOYENNE DES TUNNELS HORS POINTS SINGULIERS : 15 à 20 m**

**NOMBRE DE BÂTIMENTS DE LA ZIG : 9000 u**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS LIGNE 15 SUD

**MAÎTRE D'OUVRAGE : SGP**

**MAÎTRE D'ŒUVRE INFRASTRUCTURE : Systra**

**MAÎTRE D'ŒUVRE SYSTÈME : Egis**

**ENTREPRISE DE TRAVAUX :**

- groupement Horizon (Bouygues TP et Soletanche Bachy) (entre Villejuif et Créteil, 6,6 kilomètres de tunnel)
- groupement Razel-Bec et Eiffage (entre Créteil-l'Échat et Bry-Villiers-Champigny)
- groupement Alliance, piloté par Demathieu Bard (4,7 kilomètres jusqu'au site de maintenance de Bry-Villiers-Champigny)

### ABSTRACT

#### LINE 15 SOUTH - RISK MITIGATION FACTORED IN AS OF THE TUNNEL DESIGN STAGE

GASPARD KARWETA-PAYEN, SYSTRA - OLIVIER DUFOURD, SYSTRA - FEDERICO VALDEMARIN, SYSTRA

**Design of the tunnels for section T2 East of Line 15 of the 'Grand Paris' project was a challenge.** Firstly because of very dense urbanisation with numerous buildings having foundations on piles, some of which are not known. Secondly due to a contrasting geology that it is hard to analyse, such as plastic clays, underground quarries, or mixed faces. These factors led to the widespread adoption of risk management at all stages of design, to optimise the scenarios while improving the control of excavation and surface impacts. The aim of this approach was to meet both Systra's quality and safety requirements and the major time constraints for the project. □

#### LÍNEA 15 SUR - REDUCCIÓN DE LOS RIESGOS INTEGRADA DESDE EL DISEÑO DE LOS TÚNELES

GASPARD KARWETA-PAYEN, SYSTRA - OLIVIER DUFOURD, SYSTRA - FEDERICO VALDEMARIN, SYSTRA

**El diseño de los túneles del tramo T2 Este de la Línea 15 del área metropolitana de París ha sido todo un reto.** En primer lugar, a causa de una urbanización muy densa, con numerosos edificios sobre pilotes, algunos de los cuales no se conocían. Seguidamente, por una geología contrastada y de difícil comprensión: arcillas plásticas, canteras subterráneas o frontales mixtos. Estos factores han obligado a generalizar la gestión de los riesgos en el conjunto de las etapas de diseño para optimizar los escenarios, mejorando a la vez el control de la perforación y los impactos en superficie. Este procedimiento ha intentado responder a la vez a las exigencias de calidad y seguridad de Systra y a las fuertes exigencias de plazos del proyecto. □



# SMA



**Ensemble,  
allons plus loin !**

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

Retrouvez tous nos produits d'assurance sur [groupe-sma.fr](http://groupe-sma.fr)



  
**SMABTP**  
S'EN SAVOIR AVEC ASSURANCE

**SMA** **VIE**

**SMA**  
ASSURANCES

**SMA**  
COURTAGE

**SMA** **VIE**  
COURTAGE



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

SANTÉ

PRÉVOYANCE

RETRAITE

ÉPARGNE

ASSURANCES

ACTION SOCIALE

VACANCES

 **PRO BTP**  
GROUPE

# LIGNE 15 SUD T2A ENTRE LES GARES DE VILLEJUIF-LOUIS-ARAGON ET DE CRÉTEIL-L'ÉCHAT. CHOIX DU TYPE DE TUNNELIER

AUTEURS : BRUNO COMBE, DIRECTEUR TECHNIQUE TUNNEL, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - EMANUELE MARCUCCI, INGÉNIEUR TUNNEL, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

LA CONSTRUCTION DE LA LIGNE 15 SUD EST UN PROJET HORS DU COMMUN DE PLUS DE 32 KM DE LONGUEUR COMPORTANT 16 GARES. LE LOT T2A UN TRONÇON QUI SE SITUE AU SUD-EST DE PARIS ENTRE LES COMMUNES DE VILLEJUIF ET DE CRÉTEIL, SUR UNE ZONE QUI S'ÉTEND SUR PRÈS DE 7 KM. DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES VARIÉES ET COMPLEXES DOIVENT ÊTRE TRAVERSÉES PAR LE TUNNEL SOUS UN ENVIRONNEMENT URBAIN DENSE ET AVEC LA PRÉSENCE D'OUVRAGES SENSIBLES. L'ÉVACUATION DES DÉBLAIS ISSUS DES TRAVAUX D'EXCAVATION EST AUSSI UN PARAMÈTRE IMPORTANT À PRENDRE EN COMPTE. FORT DE SES EXPÉRIENCES SUR D'AUTRES PROJETS À L'ÉTRANGER AVEC DES MACHINES SIMILAIRES, LE GROUPEMENT A SÉLECTIONNÉ DES TUNNELIERS À CONFINEMENT DE TYPE « DENSITÉ VARIABLE ».

SITUATION DU LOT T2A DE LA LIGNE 15 SUD



## LES TUNNELS DU PROJET T2A ET LEUR CONTEXTE

Le lot T2A de la Ligne 15 Sud (figure 1) consiste en la réalisation de trois tunnels (figure 2). Les deux tunnels principaux, de longueur 3972 m et 2649 m, sont réalisés depuis le puits 1302P situé en bord de Seine sur la friche Arrighi. Ces deux tunnels relient la gare de

1- Situation du lot T2A de la Ligne 15 Sud.

1- Location of work section T2A on Line 15 South.

Villejuif-Louis-Aragon (VLA) à celle de Créteil-l'Échat (CLE) situées aux extrémités et croisent trois autres gares, à savoir, celles de Vert-de-Maisons (VDM), des Ardoines (ARD) et de Vitry-Centre (VIC). Ils traversent également l'ouvrage de débranchement vers le futur site de maintenance et cinq ouvrages annexes. Le diamètre intérieur de ces

tunnels principaux est de 8,7 m nécessitant l'engagement de 2 tunneliers de diamètre 9,87 m. Le troisième tunnel, de longueur 1135 m, relie le site de maintenance SMI situé à proximité de la gare des Ardoines à l'ouvrage de débranchement 1401P. De diamètre intérieur 6,7 m, il est réalisé au moyen d'un tunnelier de diamètre 7,75 m. ▷

Les tunnels sont situés dans un contexte hydrogéologique très varié. En effet, ils sont excavés dans les terrains sédimentaires de l'Éocène Supérieur et Moyen du Bassin Parisien depuis les Marnes d'Argenteuil jusqu'au Calcaire Grossier.

Le long du projet, on distingue deux grands domaines :

→ Le premier domaine, à l'ouest, est situé sous le plateau de Villejuif (figure 4). Le tunnel traverse les formations les plus récentes des Marnes d'Argenteuil (MA) et des Masses et Marnes du Gypse (MMG) (figure 3). Trois nappes peu profondes sont présentes ici, avec une pression pouvant atteindre 120 kPa en voûte du tunnel. Elles sont drainées par la Seine et se déversent sur le coteau dans les dépôts de pentes. L'une des difficultés dans cette zone consiste en la traversée



de fortes hétérogénéités avec la présence de zones décomprimées et dégradées du fait des dissolutions gypseuses.

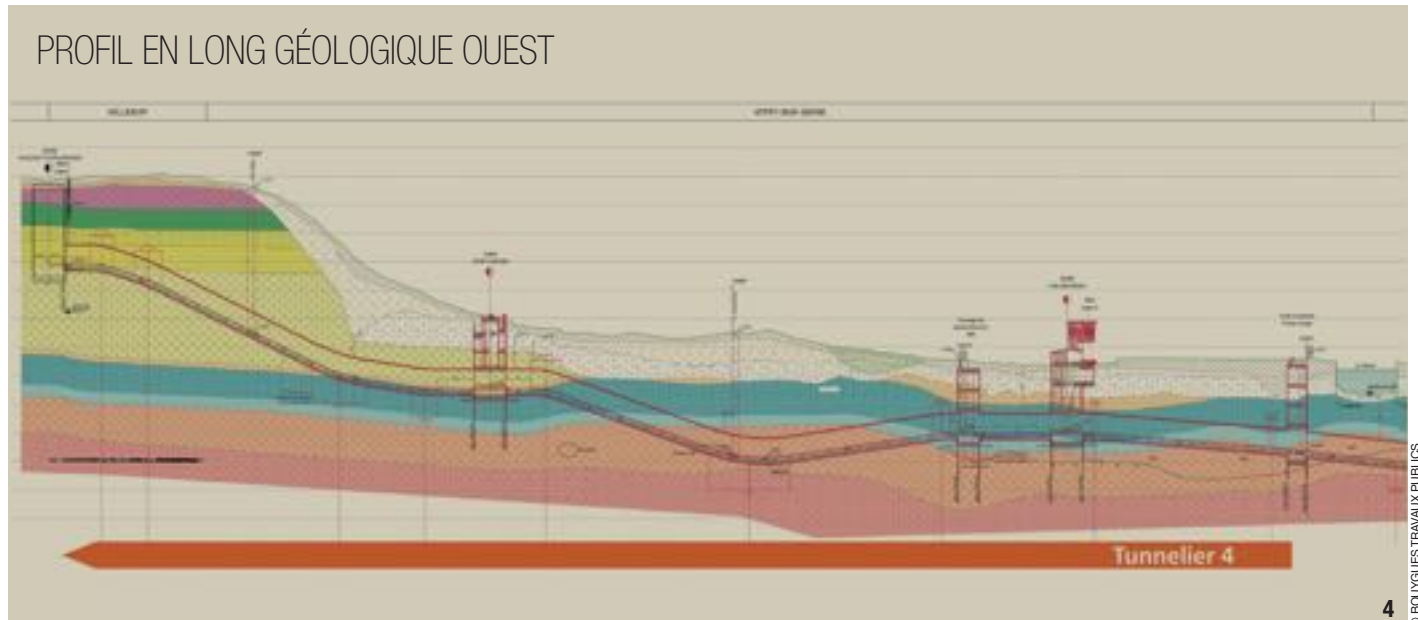
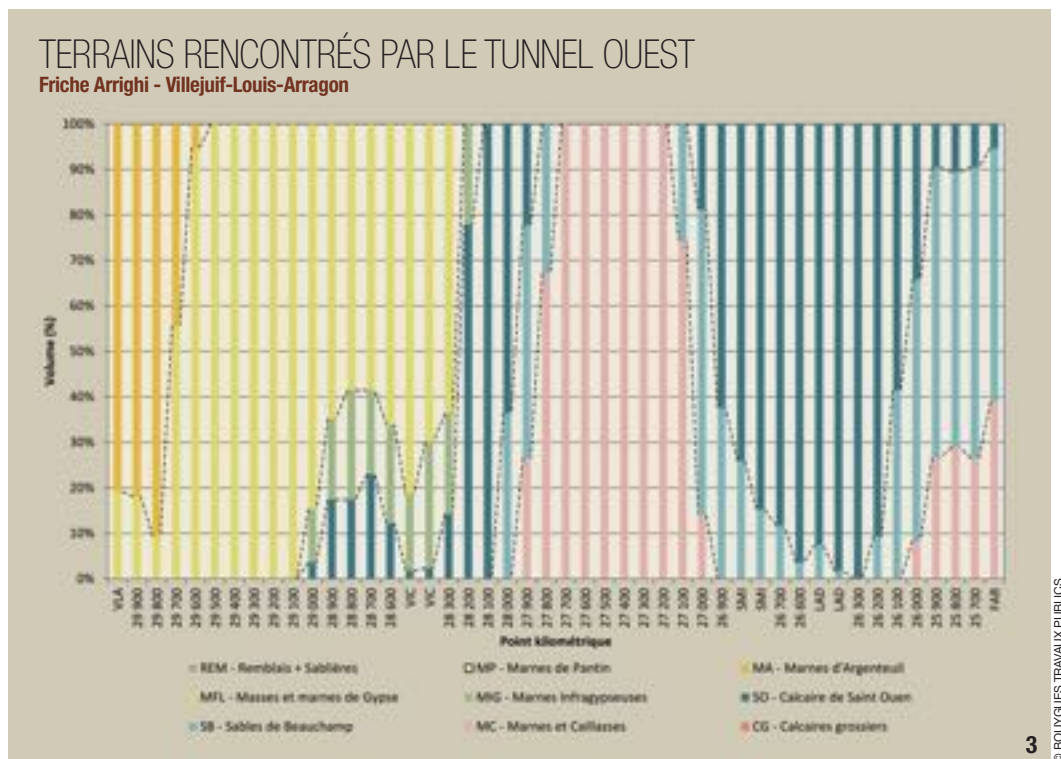
→ Le second domaine, à l'est, est caractérisé par la plaine alluviale de la vallée de la Seine (figure 6).

Le tunnel traverse les formations plus anciennes depuis les Calcaires de Saint-Ouen (CSO), les Marnes et Caillasses (MC) sur une grande partie du tracé jusqu'au Calcaire Grossier (CG) (figure 5). Trois nappes superposées et en

équilibre avec la Seine affectent le projet dans cette zone avec une pression d'eau variable, pouvant atteindre le niveau important de 290 kPa en voûte du tunnel à proximité de la gare de Vert-de-Maison.

- 2- Vue en plan des tunnels du lot T2A.
- 3- Terrains rencontrés par le tunnel Ouest.
- 4- Profil en long géologique ouest.

- 2- Plan view of the tunnels of work section T2A.
- 3- Land encountered by the West tunnel.
- 4- West longitudinal geological profile.



5- Terrains rencontrés par le tunnel Est.  
6- Profil en long géologique Est.

5- Land encountered by the East tunnel.  
6- East longitudinal geological profile.

Les deux formations sont recouvertes par des lambeaux de Marnes Infra Gypseuses (MIG) et par les Alluvions Anciennes, partiellement érodés par la Seine. Un ancien lit a été identifié à proximité immédiate de la gare de Créteil-L'Échat. Cela se traduit notamment

## DESCRIPTION DU CONTRAT

Le marché comprend les travaux de génie civil de la Ligne 15 Sud du Grand Paris (tunnel, gares, ouvrages annexes et tranchée SMI) entre la gare de Villejuif-Louis-Aragon (non incluse) et la gare de Créteil-L'Échat (incluse), et notamment :

- 6,621 km de tunnel au tunnelier
- 4 gares : Créteil-L'Échat (CLE), le Vert-de-Maisons (VDM), les Ardoines (ARD) et Vitry-Centre (VIC)
- 1 ouvrage permettant d'assurer le débranchement d'un tunnel et la sortie du tunnelier 5
- 1 raccordement entre l'ouvrage de débranchement 1401P et le futur site de maintenance des infrastructures composé d'un tunnel, d'une tranchée couverte et d'une tranchée ouverte
- 5 ouvrages annexes d'interstations : 1201P, 1301P, 1402P, 1404P, 1501P
- 1 ouvrage annexe 1302P servant de puits de lancement de deux tunneliers

par l'érosion quasi totale du Calcaire de Saint-Ouen. Lors du passage sous la Seine, la voûte de l'ouvrage tangente la base des Sables de Beauchamp avec une charge d'eau de 230 kPa.

Pour ce qui concerne le contexte environnemental, différentes contraintes entrent en jeu.

L'alignement du tunnel est localisé sous une zone urbanisée, avec la présence de plusieurs ouvrages ou infrastructures sensibles au regard des tassements que pourraient entraîner l'excavation des tunnels. Au droit de ces ouvrages, les déformations autorisées sont bien entendu limitées avec un seuil maximal de déformation de 15 mm.

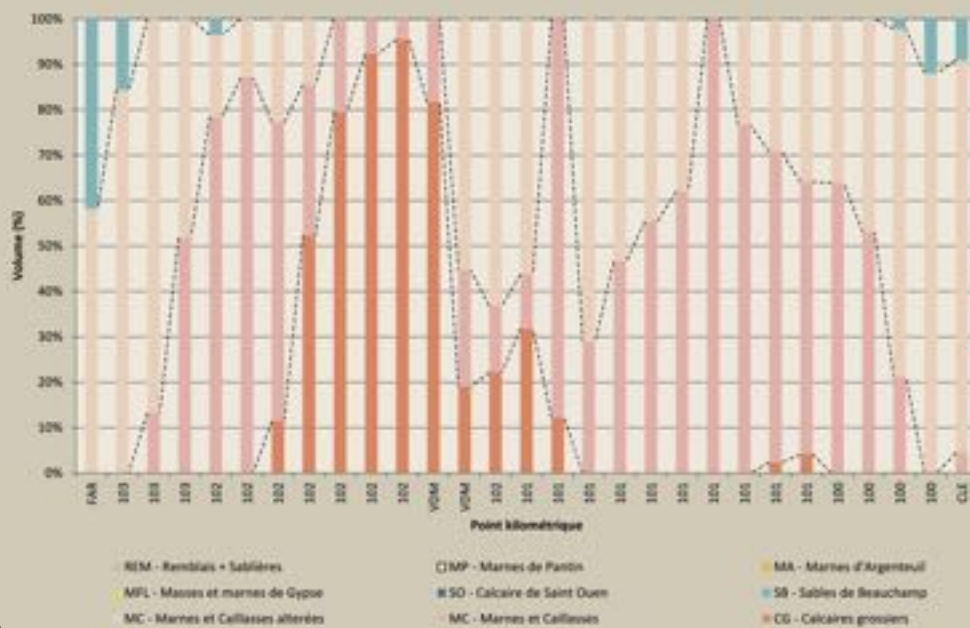
Le démarrage des tunneliers du tunnel principal, dans le puits de dimension réduite 1302P situé dans la friche Arrighi est à la fois une contrainte forte et aussi une vraie opportunité pour ce qui concerne l'évacuation des déblais par voie fluviale. Encore faut-il que la qualité de ces déblais soit compatible avec les contraintes des transports fluviaux, notamment pour ce qui concerne leur teneur en eau.

### LES MÉTHODES RETENUES POUR FAIRE FACE AUX CONTRAINTES ET PROFITER DES OPPORTUNITÉS

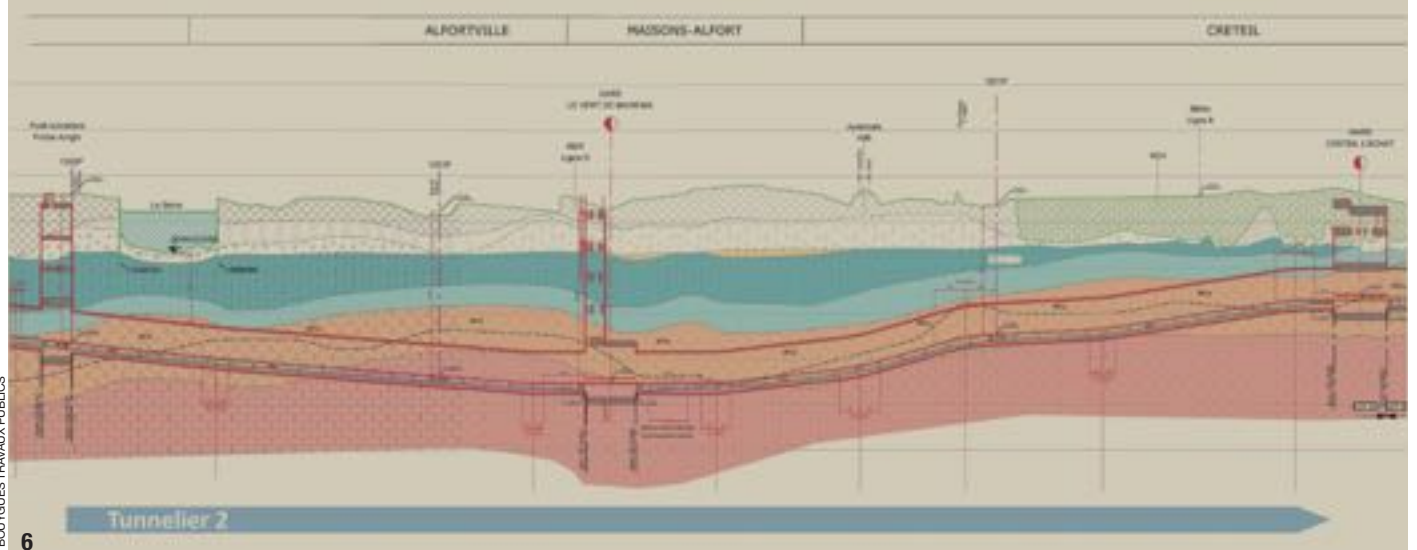
En raison du contexte contraint du projet, la réalisation du tunnel implique une maîtrise continue des pressions de confinement au front de taille afin de réduire au minimum les tassements et les déformations en surface, et cela dans des horizons géologiques très variés et des pressions de nappe pouvant être élevées.

## TERRAINS RENCONTRÉS PAR LE TUNNEL EST

Friche Arrighi - gare de Créteil-L'Échat



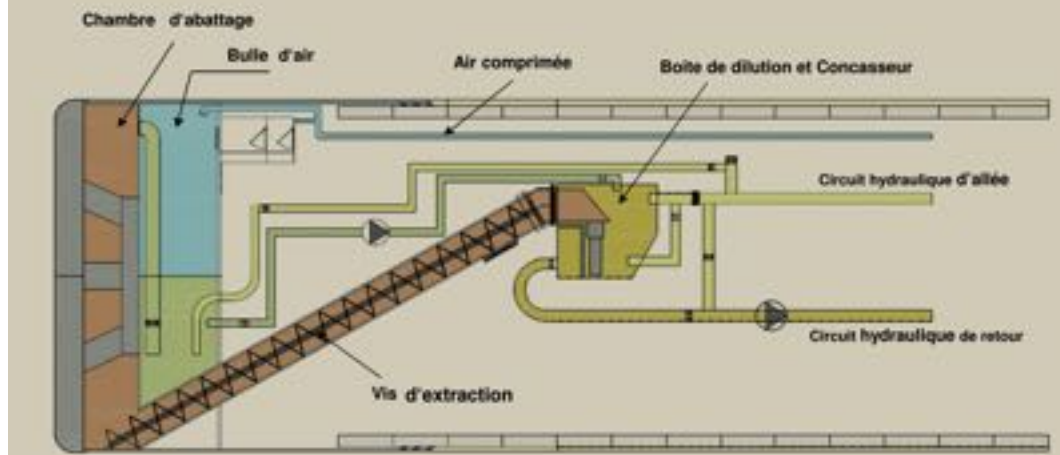
## PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE EST



## PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU TUNNELIER À DENSITÉ VARIABLE

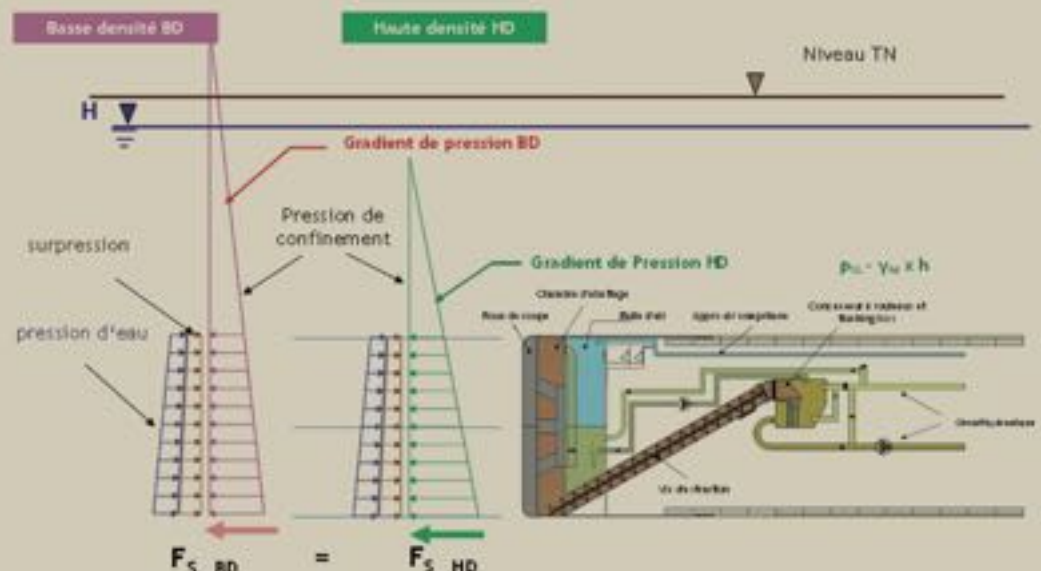
Les installations ainsi que la logistique de chantier doivent être conçues pour permettre un déroulement optimal de toutes les activités liées au creusement, aussi bien en tunnel qu'en surface. Après avoir mené une analyse multicritère détaillée, le groupement a sélectionné le type des tunneliers à « densité variable ». C'est en effet ce type de machine qui est le plus approprié pour répondre aux enjeux principaux du projet que sont l'exposition, dans certaines zones, à des pressions supérieures à 400 kPa (4 bars) en pied de tunnel, le passage au travers de zones dégradées de dissolution gypseuse, la capacité à exercer un confinement fort et précis sous les ouvrages sensibles et la maîtrise de la qualité des déblais en vue de leur évacuation par voie fluviale, grâce au marinage hydraulique et à la station de séparation des boues. Le tunnelier à confinement à densité variable est un tunnelier hybride combinant en grande partie les avantages du tunnelier à pression de boue et du tunnelier à pression de terre. C'est pour cela qu'on y retrouve à la fois une bulle d'air de régulation du confinement et une vis de convoyage pour extraire des déblais de forte densité de la chambre d'abatage (figure 7). Ce tunnelier permet de gérer en continu la densité des fluides dans la chambre d'abatage, en fonction de la quantité de boue qui y est envoyée. Le circuit hydraulique est conçu pour garantir un apport d'eau et de fines suffisant au conditionnement des terrains au front ainsi que pour le marinage hydraulique. En fonction des formations traversées le débit de boue dans la chambre varie jusqu'à pouvoir garantir la formation d'une boue dense, quasi pâteuse, capable de maintenir un confinement au front de taille. Cela permet aussi d'empêcher les pertes de confinement au passage des zones à risque de vide de dissolution, non seulement en raison de la rhéologie de la boue dans la chambre mais aussi grâce à sa densité inclinant davantage le gradient de pression au front (figure 8). La maîtrise du confinement est garantie par :

→ La bulle d'air à l'arrière de la chambre d'abatage qui permet une maîtrise très fine de la pression grâce au système de régulation d'air identique à celui qui est éprouvé sur les tunneliers à pression de boue. Par rapport à la pression de consigne requise, l'écart de pression au front est précis à 10 kPa près, par opposition à un tunnelier à pression de terre classique permettant 30 à 40 kPa de précision.



7

## VARIATION DE DENSITÉ DU FLUIDE DE SUPPORT EN FONCTION DE L'APPORT D'EAU



8

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

**7- Principe de fonctionnement du tunnelier à densité variable.**

**8- Variation de densité du fluide de support en fonction de l'apport d'eau.**

**7- Operating principle of the variable-density TBM.**

**8- Change in density of the support fluid depending on the water intake.**

→ La pression du circuit de marinage hydraulique au travers de la boîte de mélange des matériaux (flushing box) située à l'arrière de la vis d'extraction. À noter, qu'un concasseur positionné juste à l'arrière de la vis permet de calibrer les déblais pour leur évacuation sans risque de bouchon dans le circuit de marinage hydraulique.

## PRINCIPALES QUANTITÉS

- NOMBRE DE TUNNELIERS : 3**
- DIAMÈTRE FORÉ TUNNELIERS 2 ET 4 : 9,87 m**
- LONGUEUR TUNNELIERS 2 ET 4 : 6621 m (3972 m + 2649 m)**
- VOLUME EXCAVÉ : 506 000 m<sup>3</sup>**
- DIAMÈTRE FORÉ TUNNELIER 5 : 7,75 m**
- LONGUEUR TUNNELIER 5 : 1 138 m**
- VOLUME EXCAVÉ : 54 000 m<sup>3</sup>**

## LES INTERVENANTS

- MAÎTRISE D'OUVRAGE (MOA) : SGP - Société du Grand Paris**
- ASSISTANCE À MAITRISE D'OUVRAGE (AMO) : groupement Artemis : Artélia (mandataire), Arcadis Esg, Bg Ingénieurs Conseils**
- MAÎTRISE D'ŒUVRE (MOE) : Systra**
- MONTANT : 807 millions d'euros HT**
- OS : 31 janvier 2017**
- DÉLAI : 62,5 mois**
- GROUPEMENT D'ENTREPRISES : groupement Horizon : Bouygues Travaux Publics (mandataire), Soletanche Bachy France, Bessac et Soletanche Bachy Tunnels**

Pour ses autres équipements, le tunnelier à densité variable reste très similaire aux autres machines, en particulier les tunneliers à pression de boue.

Dans le cas particulier du projet T2A, la mise en œuvre d'un marinage hydraulique a permis de ramener tous les déblais au niveau de la friche Arrighi, y compris ceux du tunnel d'accès au

site de maintenance dont le portail d'entrée se situe à plus de 700 m de la station de traitement. Aucune installation de logistique d'évacuation des déblais de tunnel n'est donc nécessaire au niveau de la gare des Ardoines. La station de traitement des boues, installée sur la friche Arrighi, traite donc l'ensemble des marins des tunnels.

Le procédé de séparation est identique à celui utilisé dans le cas de tunneliers à pression de boue. La station est équipée de plusieurs étages de séparation permettant d'enlever en continu les graves, sables et silts au moyen de scalpeurs et cyclones. Les particules fines sont traitées séparément au moyen de filtres-presses.

Les déblais issus de la station ont une teneur en eau globalement significativement plus faible que celle issue d'un tunnelier à pression de terre classique permettant non seulement de réduire les quantités transportées mais aussi de maîtriser la « pelletabilité » des déblais, essentielle au transport par voie fluviale. □

#### ABSTRACT

### LINE 15 SOUTH T2A BETWEEN THE STATIONS OF VILLEJUIF-LOUIS-ARAGON AND CRETEIL-L'ÉCHAT. CHOICE OF THE TYPE OF TBM

BRUNO COMBE, DIRECTEUR TECHNIQUE TUNNEL, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - EMANUELE MARCUCCI, INGÉNIEUR TUNNEL, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

*For section T2A of Line 15 South of the 'Grand Paris Express' project, the Horizon Grand Paris consortium made the bold decision to use variable-density TBMs. It was positive experience with this type of machine on foreign projects that confirmed the suitability of this choice for this section. Detailed analysis of the hydrogeological conditions identified high operating pressures. The project layout is in the immediate vicinity of sensitive structures. Environmental constraints are substantial. There is an opportunity to remove all the material excavated from the tunnels by river transport equipment, after treatment in a separation plant. All these factors pleaded in favour of this new technology. □*

### LÍNEA 15 SUR T2A ENTRE LAS ESTACIONES DE VILLEJUIF-LOUIS-ARAGON Y CRETEIL-L'ÉCHAT. ELECCIÓN DEL TIPO DE TUNELADORA

BRUNO COMBE, DIRECTEUR TECHNIQUE TUNNEL, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - EMANUELE MARCUCCI, INGÉNIEUR TUNNEL, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

*Para el tramo T2A de la Línea 15 Sur del proyecto Grand Paris Express, el consorcio Horizon Grand Paris ha optado por la audaz alternativa de utilizar tuneladoras de densidad variable. La experiencia positiva con este tipo de máquinas en proyectos en el extranjero ha validado la pertinencia de esta elección para este tramo. El análisis detallado de las condiciones hidrogeológicas ha identificado fuertes presiones de funcionamiento. El trazado del proyecto se encuentra en proximidad inmediata de construcciones sensibles. Las exigencias medioambientales son considerables. Existe la posibilidad de evacuar la totalidad de los escombros de los túneles por medios fluviales, previo tratamiento en una central de separación. Todos estos factores favorecían el uso de esta nueva tecnología. □*

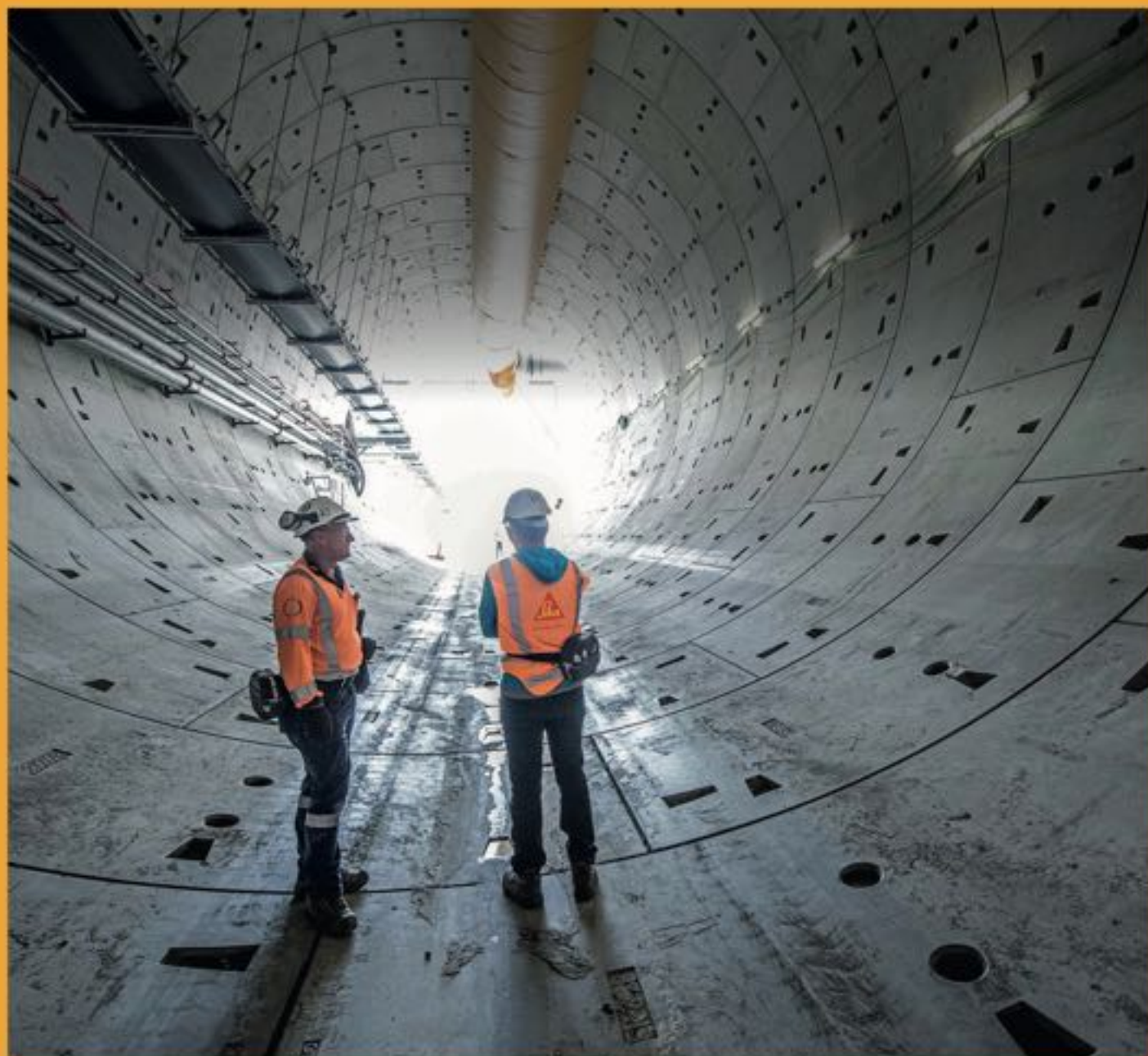
**CESAR<sub>LCPC</sub>**  
Logiciel Éléments Finis 2D & 3D  
Géotechnique - Tunnels - Génie Civil

**Nouvelle version 6**  
HSM, ancrages, écoulements, scripts, puissance...  
pour toutes vos analyses 2D  
et 3D de tunnels et ouvrages  
souterrains

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

**itech**  
Editeur de logiciels pour le Génie Civil

8 quai Bir-Hakeim 94410 Saint-Maurice  
Tél.: +33 1 49 76 12 59  
[www.itech-soft.com](http://www.itech-soft.com) [contact@itech-soft.com](mailto:contact@itech-soft.com)



# BÉTON PROJETÉ + ÉTANCHÉITÉ, DES TUNNELS MAÎTRISÉS

- Accélérateurs pour béton projeté Sigunit®
- Fibres pour béton projeté SikaFibre®
- Étanchéité des joints Sika Dilatec®
- Adjuvantation pour voussoirs Sika ViscoCrete® Krono 867
- Membranes pour tunnels SikaPlan®
- Produits pour tunneliers : Sika Foam® TBM, Sika® Stabiliser TBM...



Service lecteur : [bpe@fr.sika.com](mailto:bpe@fr.sika.com)  
[www.sika.fr](http://www.sika.fr)

**BUILDING TRUST**







1  
© SGP/AGENCE RICHEZ ASSOCIÉS

# SECTIONS SOUTERRAINES DE LA L18 DU GRAND PARIS EXPRESS ORLY-VERSAILLES CHANTIERS

AUTEURS : ALAIN BERNARDET, INGÉNIEUR SENIOR, ARCADIS / ICARE - CLAIRE CARPENTIER, CHEF DE PROJET ENVIRONNEMENT, ARCADIS / ICARE - ANDRÉ DE GOYON, RESPONSABLE D'ACTIVITÉ OST, ARCADIS / ICARE

**LA LIGNE 18 DU GRAND PARIS EXPRESS RELIERA L'AÉROPORT D'ORLY À LA GARE SNCF ET RER C DE VERSAILLES-CHANTIERS. ELLE SERA CONSTITUÉE D'UN TRONÇON CENTRAL EN VIADUC AU DROIT DU PLATEAU DE SACLAY ENCADRÉ PAR DEUX TRONÇONS EN SOUTERRAIN. SA MISE EN SERVICE SERA RÉALISÉE EN DEUX PHASES, LA PREMIÈRE PHASE RELIANT LE PÔLE SCIENTIFIQUE DE L'UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY À L'AÉROPORT D'ORLY EN CORRESPONDANCE AVEC LA LIGNE 14 REJOIGNANT PARIS.**

## INTRODUCTION

La Ligne 18 du Grand Paris Express se situe au sud-ouest de Paris. À terme, elle reliera l'aéroport d'Orly à Versailles-Chantiers. Sa mise en service est prévue en 2 phases avec une priorité pour le tronçon situé à l'est en vue de desservir le Pôle Scientifique de l'Université Paris-Saclay.

Le projet traverse la zone aéroportuaire d'Orly, des secteurs densément urbanisés, des territoires en développement, des espaces naturels protégés, une zone en proximité des installations du Commissariat à l'Énergie atomique et aux Énergies alternatives, le site militaire du plateau de Satory, et les périmètres des monuments historiques de Versailles.

La ligne (figure 2) compte 10 gares (6 souterraines, 3 aériennes, plus la

gare souterraine Aéroport-d'Orly sous maîtrise d'ouvrage ADP), 23 ouvrages annexes et un Centre d'Exploitation regroupant un SMI et un SMR.

Les ouvrages annexes présentent des profondeurs du Z rail allant de 21 m à 55 m de profondeur.

Ces ouvrages servent systématiquement d'accès aux secours et, pour certains, de puits de ventilation/désenfumage ou bien de puits de décom-

**1- Gare de Massy Palaiseau.**

**1- Massy Palaiseau Station.**

pression pour le tunnel. Ils permettent également le drainage des eaux dans les points bas du tunnel.

Trois des 10 gares ont des correspondances (Aéroport-d'Orly, Massy-Palaiseau, Versailles-Chantiers) : leur insertion au sein de ces pôles de transport est complexe.

Le tracé de la Ligne 18 comporte 2 sections souterraines en tunnel foré au tunnelier (monotubes de diamètre 8 m intérieur) :

→ Tronçon Est entre l'OA1 en amont de la gare d'Orly et l'OA14 au droit du centre d'Exploitation d'un linéaire de creusement de 12 km ;

→ Tronçon Ouest entre l'OA15 au niveau du Golf national et l'OA24 en aval de la gare Versailles-Chantiers d'un linéaire de creusement de 8,2 km.

Une section aérienne vient s'intercaler entre ces deux parties souterraines. Elle se compose d'un viaduc qui franchit la Nationale N118 avec un ouvrage particulier, et présente à chaque extrémité des zones de transition qui permettent la jonction avec les tunnels (tranchées couvertes, tranchées ouvertes et rampes).

Sur le tronçon Est, un débranchement permet l'accès au Centre de Maintenance.

La suite du présent article traitera uniquement des 2 sections en tunnel.

Aux deux extrémités de la ligne, des mesures conservatoires sont prises pour des prolongements dans le futur. Les études de conception ont commencé le 15 février 2016, avec un rendu de la phase PRO 21 mois plus tard le 15 novembre 2017. ▷

**CONTEXTE GÉOLOGIQUE  
ET STRATIGRAPHIQUE**

Les formations du Bassin Parisien sont réputées pour être peu déformées du fait d'une activité tectonique en son sein très faible depuis sa formation, avec une structure d'ensemble relativement horizontale héritée des dépôts sédimentaires successifs qui le constituent.

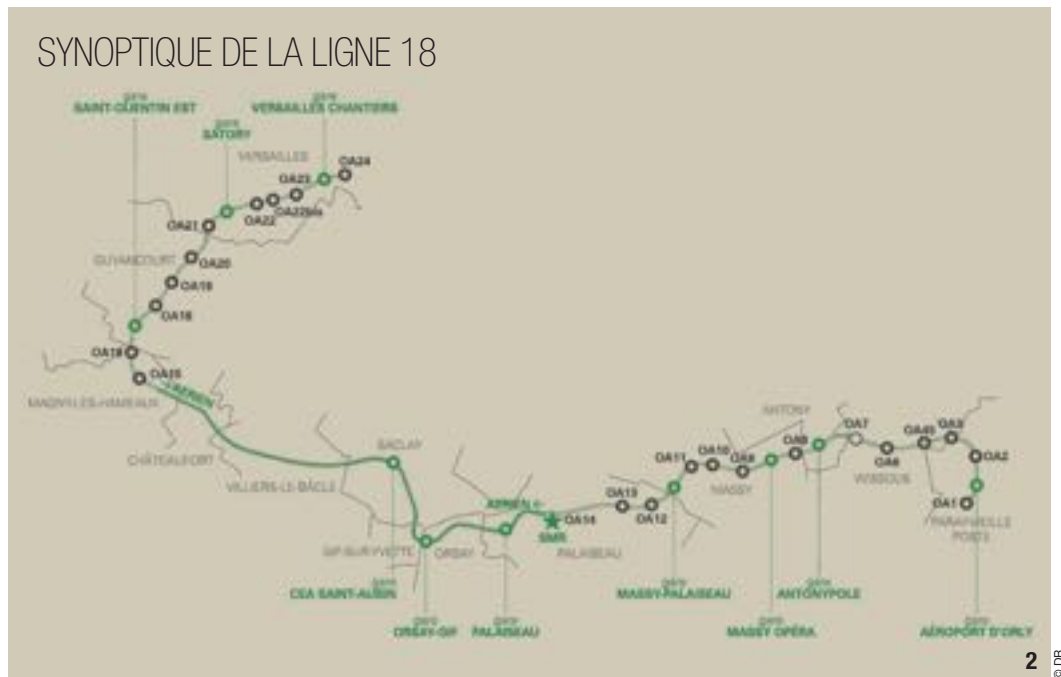
À l'échelle régionale, les terrains peuvent néanmoins être marqués de faibles pendages sous l'influence de plissements étendus (anticlinal de Meudon, synclinal de Saint Denis).

Le tracé de la Ligne 18 débute en souterrain au niveau de l'aéroport d'Orly dans les formations de l'Oligocène et de l'Éocène Supérieur pour rejoindre dans sa partie aérienne les couches tertiaires du Stampien dominées par les Sables de Fontainebleau avant de bifurquer au nord/nord-est pour rejoindre Versailles et retrouver les mêmes étages géologiques que ceux rencontrés à l'est mais sous plus forte couverture (figure 3).

Le projet recoupe ainsi d'est en ouest trois grandes unités géologiques et géomorphologiques présentant une certaine « homogénéité » :

**1- Le Plateau d'Orly de l'OA1 à l'OA13 :**

Son altitude moyenne se situe autour de 85 NGF avec un point bas vers 67 NGF juste après l'OA6 ; à partir de la gare Massy-Palai-



2 ©

seau, le TN remonte pour atteindre 140 NGF à l'OA13. Le tracé s'inscrit essentiellement dans les formations du Sannoisien (Calcaires de Brie et Argile Verte) et du Ludien (Marnes Supragypseuses et Masses et Marnes du Gypse).

**2- Le Plateau de Saclay de l'OA13 à l'OA23 :**

Son altitude moyenne se situe autour de 165 NGF avec un point bas vers 125 NGF à la traversée de

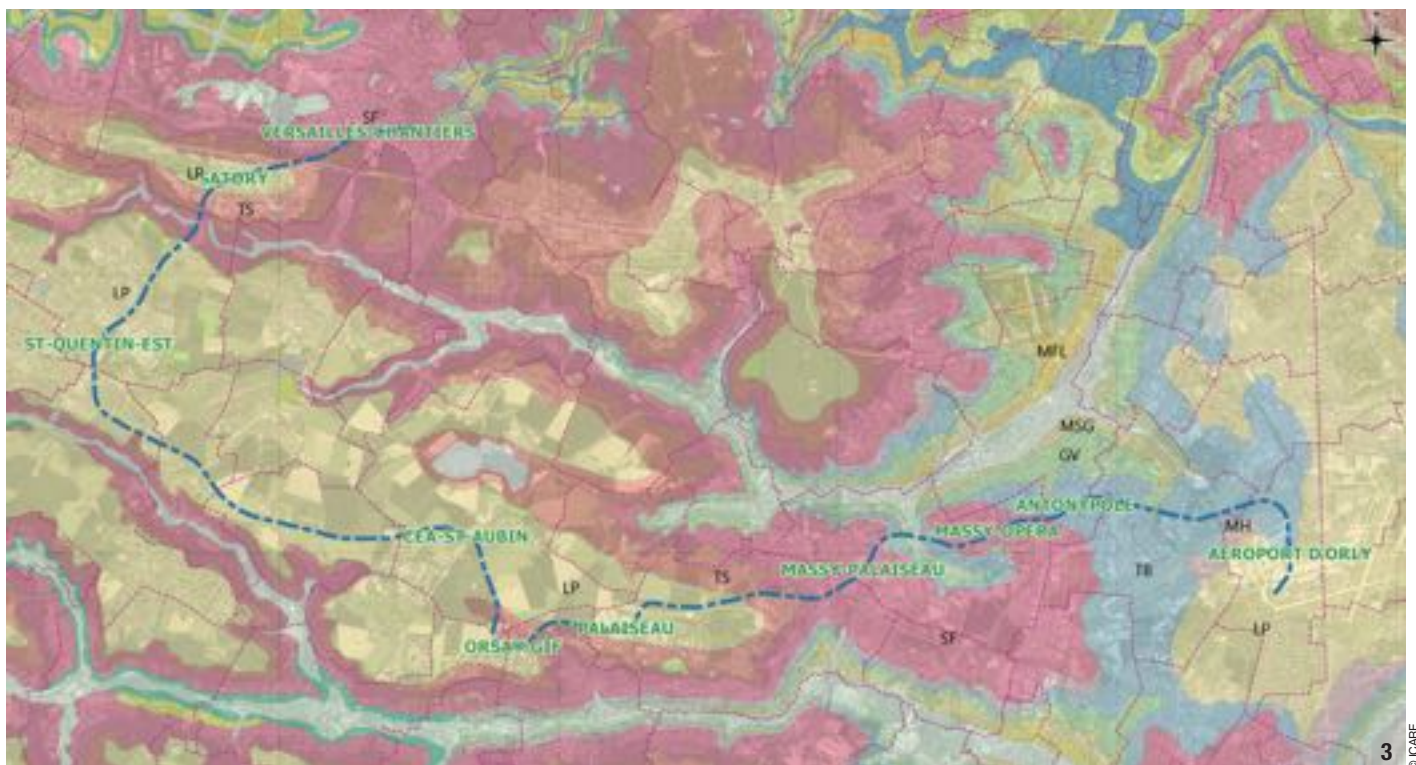
**2- Synoptique de la Ligne 18.**

**3- Contexte géologique de la Ligne 18.**

**2- Overview diagram of Line 18.**

**3- Geological context of Line 18.**

la vallée de la Bièvre suivi d'un point haut à 179 NGF sur Satory ; les trois principales formations rencontrées sont les Limons des Plateaux, les Argiles à Meulière et les Sables de Fontainebleau sur une forte épaisseur (socle du plateau) auxquelles s'ajoutent des comblements en colluvions, éboulis et alluvions diverses des fonds de talweg recoupés par le tracé (RN118, vallée de la Bièvre, ...).



3 ©

### 3- Le Plateau de Versailles de l'OA23 à l'OA24 :

L'altitude s'abaisse de 176 NGF à l'OA23 à 125 NGF à l'OA24 ; on retrouve les formations du Sannoisien/Ludien, citées précédemment, sous couverture des Sables de Fontainebleau.

L'enchaînement stratigraphique de ces différents ensembles est représenté sur la figure 4.

### STRATÉGIE POUR LA RÉALISATION DES TUNNELS

La construction des tunnels Est et Ouest se décompose en 2 lots avec 3 tunneliers pour le tunnel Est et 1 tunnelier pour le tunnel Ouest :

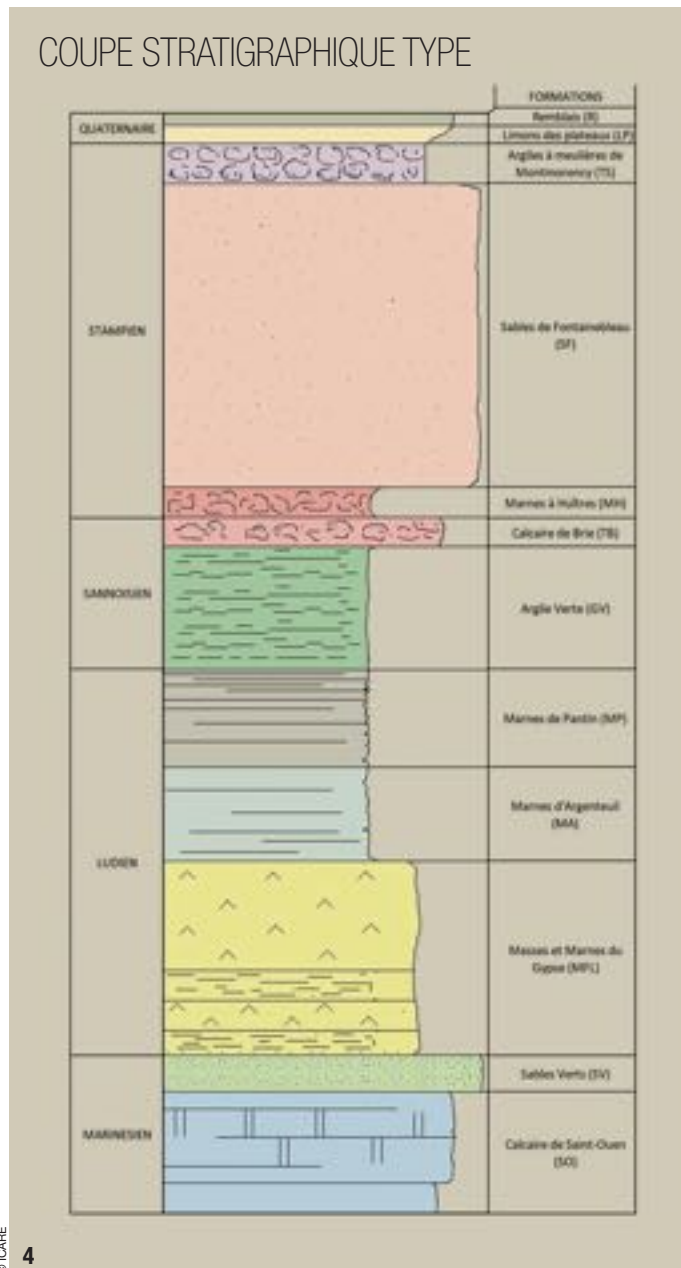
La cinématique est la suivante sur le tronçon Est (Lot 1) (figure 5) :

- Le tunnelier 1 part de l'OA45 pour creuser jusqu'à l'OA1, puis est transféré dans l'OA12 pour creuser le tronçon vers l'OA14 ;
- Le tunnelier 2 réalise le creusement entre l'OA45 et l'OA8 ;
- Le tunnelier 3 réalise le creusement entre l'OA8 et l'OA12 ;

Un seul tunnelier opère sur le tunnel Ouest (Lot 3) :

4- Coupe stratigraphique type.  
5- Cinématique des tunneliers - vue en plan.

4- Typical stratigraphic cross section.  
5- TBM moving parts - plan view.



© ICARE 4

→ Dans un premier temps il creuse le tronçon de la gare de Satory jusqu'à l'OA15 ;

→ Ensuite il est transféré de nouveau à la gare de Satory pour creuser le tronçon jusqu'à Versailles-Chantiers et ressortir dans l'OA24.

Le programme actuel prévoit un creusement des premiers tunneliers à compter du 3<sup>e</sup> trimestre 2019, pour une fin de creusement du tronçon Est (lot 1) début 2022.

Certains ouvrages annexes sont centrés sur l'axe du tunnel et leurs dimensions adaptées pour être utilisés dans la cinématique des tunneliers. Ils servent soit de puits de lancement (OA45, OA8, OA12), soit de puits de sortie (OA1, OA8, OA12, OA14, OA15, OA24) pour les tunneliers. La gare de Satory est également utilisée comme puits d'entrée pour les deux tunneliers dans le secteur Ouest.

Les différentes formations rencontrées par chaque tunnelier (figure 6) guideront pour le choix du type de confinement à mettre en œuvre et pour l'étude des possibilités de valorisation selon le mode de maritage retenu.

### PRINCIPAUX ENJEUX GÉOTECHNIQUES

La connaissance du sous-sol et la qualification des terrains en présence sont un enjeu majeur pour un projet de tunnel en zone semi-urbaine.

Dans le détail, ces principaux enjeux sont :

#### 1- Sur le plateau d'Orly :

→ La bonne connaissance du fonctionnement hydrogéologique des différentes formations rencontrées. Les études préliminaires ont montré la présence de trois nappes indépendantes et superposées (nappe du Calcaire de Brie, nappe des Marnes de Pantin et nappe des Masses et Marnes du Gypse) qu'il convient de qualifier en termes de perméabilité des formations aquifères et de fluctuations de niveau d'eau (définition des niveaux caractéristiques) ;

→ La caractérisation du potentiel de gonflement des formations argileuses notamment de l'Argile Verte et des Marnes d'Argenteuil qui pourrait avoir un impact important en termes de dimensionnement des ouvrages souterrains ;

→ La présence potentielle de phénomènes de dissolution de gypse au sein des Masses et Marnes du Gypse présentant un risque fort pour l'avancement du tunnelier quel que soit son mode de confinement ; ▽



© ICARE 5

## RÉPARTITION DES DÉBLAIS PAR FORMATIONS ET PAR TUNNELIERS



6

© ICARE

→ La présence de formations dures à faible profondeur (Calcaire de Brie).

### 2- Sur le plateau de Saclay :

- La présence de blocs de meulière dans la Meulière de Montmorency et de lentilles et de bancs de grès dans les sables de Fontainebleau (usure des outils de forage, vibration...);
- La sensibilité des argiles de la Meulière de Montmorency (pouvoir gonflant, collage) lors des terrassements;
- La présence possible de marnières au niveau de la gare de Saint-Quentin-Est;

→ Le franchissement de la zone de l'étang de la Minière dans des terrains de mauvaise qualité et sous faible couverture (de l'ordre de 1 diamètre).

### 3- Sur le plateau de Versailles :

- Les caractéristiques de l'aquifère des Sables de Fontainebleau (puissance et perméabilité du réservoir, écoulement...) en relation éventuellement avec les autres nappes;
- Le nombre élevé de couches de sol lié à la profondeur des excavations, nécessitant un échantillonnage et un nombre d'essais importants, notamment dans les formations

### 6- Répartition des déblais par formations et par tunnelier.

7- Passage sous le viaduc de l'Orlyval à Orly.

### 6- Breakdown of excavated materials by formation and by TBM.

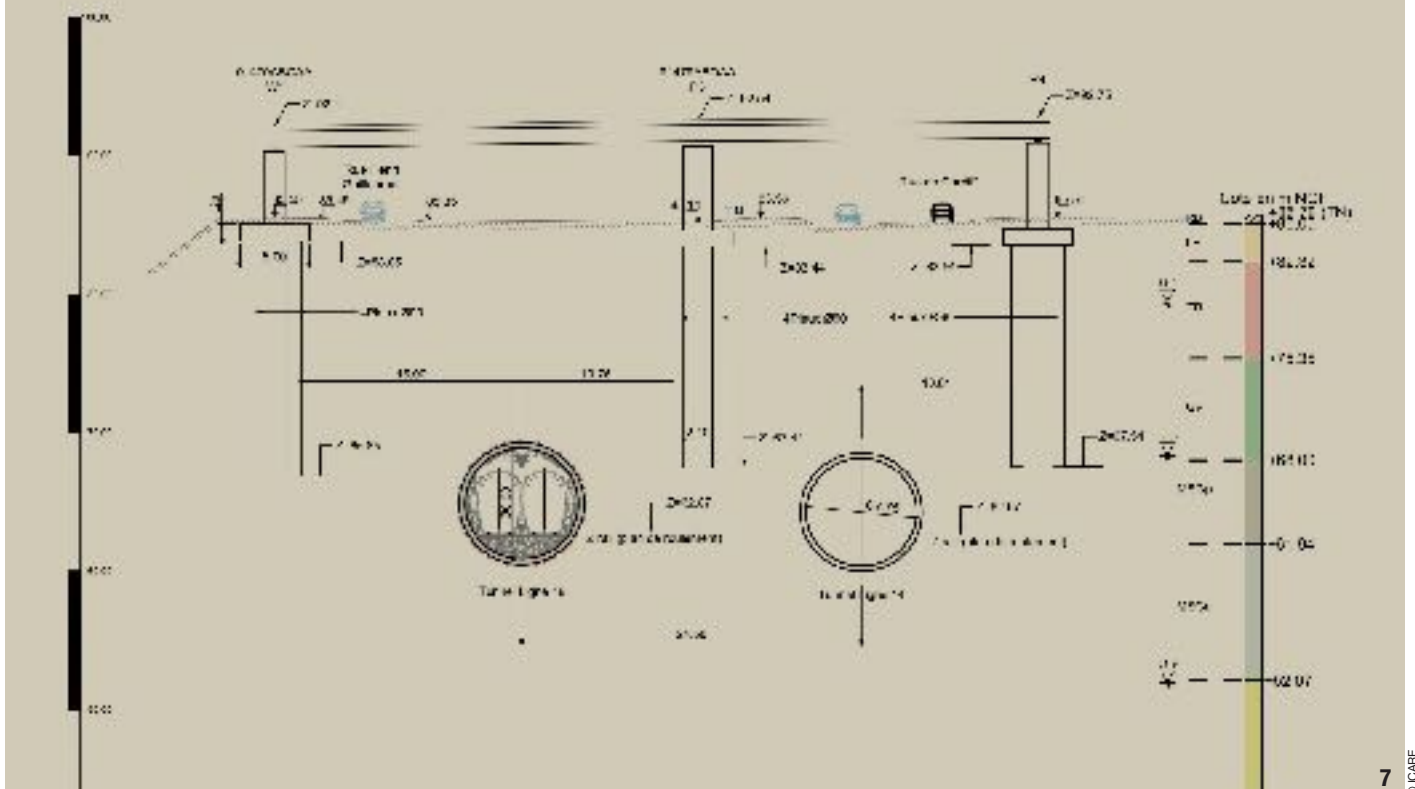
7- Passage under the Orlyval viaduct at Orly.

sensibles (Argile Verte, Marnes de Pantin et d'Argenteuil, Masses et Marnes du Gypse).

### PRINCIPAUX POINTS DURS LIÉS AUX AVOISINANTS

Les deux sections souterraines recourent sur leur tracé toutes sortes d'infrastructures (routières, ferroviaires, aéroportuaires, réseaux de concessionnaires, ...) et s'inscrivent dans un tissu urbain qui, s'il est parfois diffus voire inexistant, est localement très dense. Un certain nombre de situations pourront nécessiter la mise en œuvre de mesures conservatoires afin de pré-

## PASSAGE SOUS LE VIADUC DE L'ORLYVAL À ORLY



7

© ICARE

## PASSAGE SOUS LA PASSERELLE HISTORIQUE EN GARE DE MASSY



© ICARE  
8

server l'intégrité du bâti existant ou qui aura été construit avant la réalisation de la Ligne 18.

Ainsi, sur l'aéroport d'Orly, la construction de la gare, commune aux Lignes 14 et 18, implantée en partie sur le site actuel du parking PO, va s'accompagner d'une importante restructuration de celui-ci. Les structures nouvelles, de part et d'autre de la gare, seront fondées sur des barrettes descendues sous le niveau du tunnel. L'espace laissé libre entre deux rangées de barrettes pour permettre le passage

**8- Passage sous la passerelle historique en gare de Massy.**

**9- Passage sous l'étang de la Minière.**

**8- Passage under the historic foot bridge at Massy Station.**

**9- Passage under the Minière pond.**

du tunnelier ne dépasse le diamètre de celui-ci de guère plus de 2 à 3 m. On retrouve la même situation au sud de la gare, au droit du projet d'un bâtiment faisant la jonction entre les deux terminaux d'Orly, Ouest et Sud. À 200 m au nord de la gare, les tunnels des deux lignes passent de part et d'autre des piles supportant le viaduc d'Orlyval au niveau de son débranchement vers la station Orly-Sud, avec de fortes contraintes sur la limitation des tassements en raison de la grande sensibilité de cet ouvrage (figure 7).

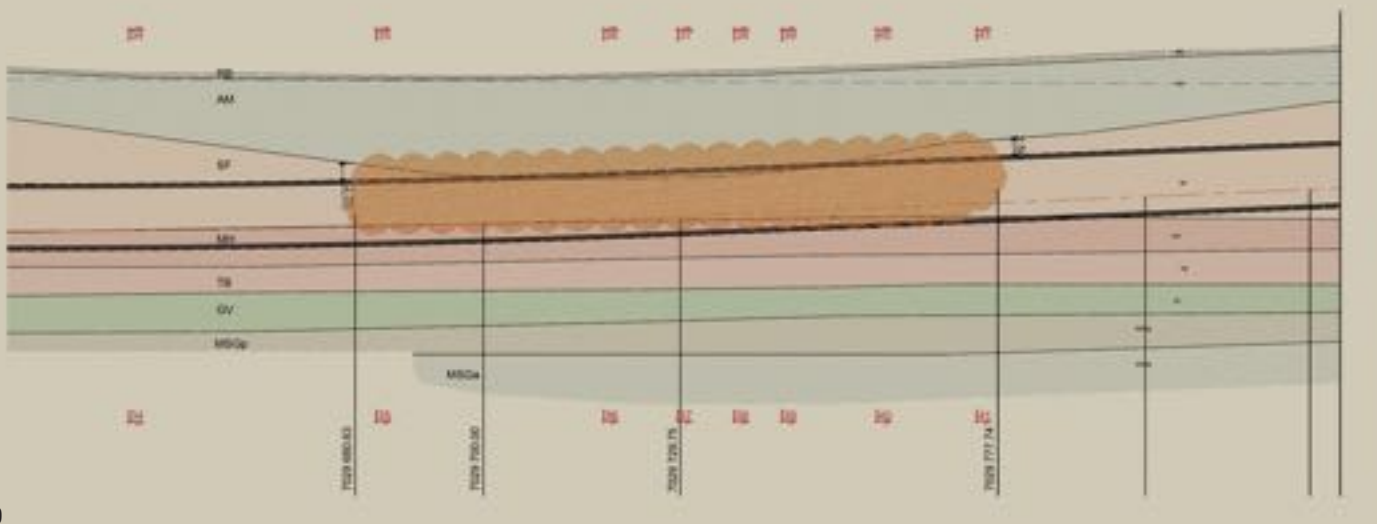
Sur la commune de Massy, le tissu urbain devient très dense et les infrastructures sensibles se succèdent. À partir de l'avenue de la République et jusqu'aux abords de la mairie, le tunnel passe à proximité, voire au-dessous, d'un certain nombre de bâtiments allant du R+3 au R+12 ainsi que de quelques édifices religieux. Au-delà de la mairie, le tunnel recoupe toutes les infrastructures ferroviaires de la gare de Massy (TGV, RER B, RER C, ...) et les ouvrages d'art qui les accompagnent (pont SNCF sous la RFN 990, viaduc de la rue Victor-Basch).

Le point le plus difficile est le passage entre les fondations de la passerelle historique franchissant les voies, qui intervient à une distance trop faible de la future gare de Massy-Palaiseau pour que le tunnelier puisse fonctionner avec sa pression de confinement nominale (figure 8).

Sur la commune de Palaiseau, la principale difficulté est le creusement sous les fondations d'un passage inférieur de l'autoroute A126, qui intervient à une vingtaine de mètres du puits de départ du tunnelier avec les problèmes liés à un début de creusement : apprentissage pour la maîtrise de la pression de confinement, et donc des tassements qui en résultent.

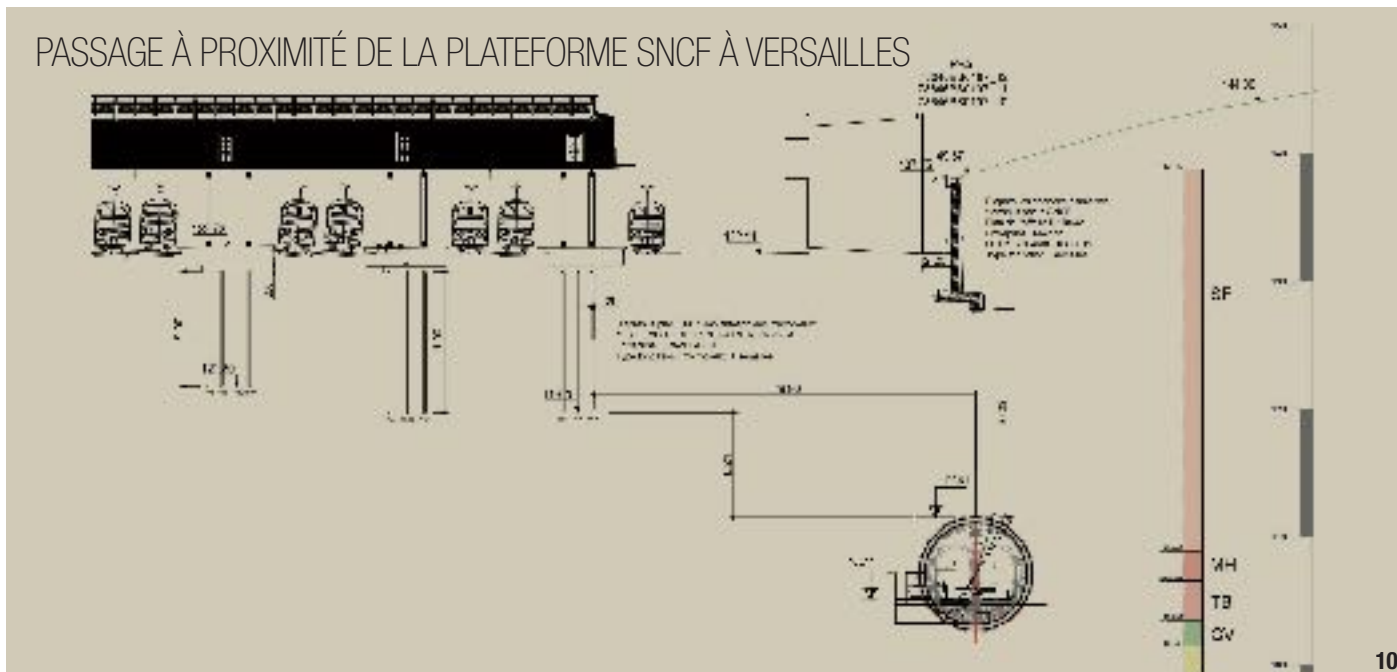
Sur la commune de Guyancourt, la principale difficulté est la traversée de la vallée de la Bièvre au niveau de l'étang de la Minière en raison du contexte topographique et géologique. Le fond de vallée, rempli de matériaux d'apport (alluvions et remblais divers), ne laisse qu'une faible couverture de matériaux en place au-dessus du tunnel (figure 9), ▷

## PASSAGE SOUS L'ÉTANG DE LA MINIÈRE



© ICARE  
9

## PASSAGE À PROXIMITÉ DE LA PLATEFORME SNCF À VERSAILLES



10

© ICARE

sans possibilité de modification du profil en long du fait du dénivelé important par rapport à la gare de Satory située à un kilomètre.

Sur la commune de Versailles, avant d'arriver à la gare Versailles-Chantiers, le tunnel longe les emprises ferroviaires existantes en passant sous un mur de soutènement retenant le talus qui les surplombe (figure 10). Après la gare, sur la fin du tracé, le contexte urbain se densifie et le tunnel passe sous une dizaine de bâtiments allant du R+2 au R+5.

### POLLUTION PYROTECHNIQUE

L'évaluation des risques associés à une possible pollution des sites par des engins pyrotechniques a débuté dès les études préliminaires par des études historiques spécifiques.

Les sites identifiés comme concernés sont notamment les ouvrages dans la zone aéroportuaire d'Orly, la gare de Satory, les ouvrages annexes localisés sur le foncier ou à proximité immédiate d'un camp militaire et la gare de Massy-Palaiseau.

Au droit de la gare de Satory, où le risque de présence d'engins non explosés est avéré, il est prévu de réaliser des travaux anticipés de dépollution pyrotechnique jusqu'à 1,5 m de profondeur dans la zone des installations de chantier et jusqu'à 7 m de profondeur au droit de l'ouvrage. Pour les autres ouvrages, les travaux de terrassement seront réalisés suivant un protocole adapté pour permettre la sécurisation au fur et à mesure des excavations.

### POLLUTION CHIMIQUE

Les études historiques et les investigations de terrain préalables aux travaux ont été réalisées par les ingénieries Antea en grande majorité et ponctuellement par Geolia et Iddea, pilotés par Lineov et la SGP. Les investigations de terrain sont encore en cours, certains sites n'étant pas accessibles pour des problèmes fonciers principalement. Elles ont eu pour but de fournir une première indication des caractéristiques chimiques des futurs déblais du projet (figure 11) afin :

10- Passage à proximité de la plateforme SNCF à Versailles.

11- Histogramme des volumes de déblais par formation lithologique (m<sup>3</sup>).

10- Passage near the SNCF platform at Versailles.

11- Bar chart of volumes of excavated material by lithological formation.

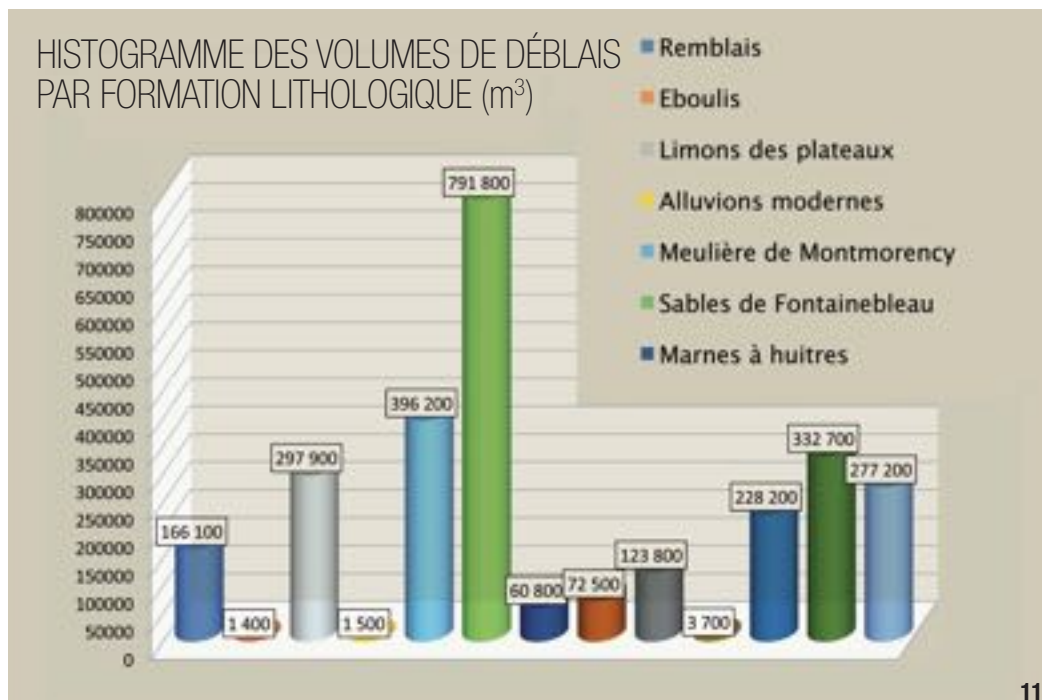
→ D'orienter les estimations financières pour leur évacuation et les hypothèses de valorisation ;

→ D'identifier des sites qui pourraient nécessiter des travaux anticipés de dépollution ou bien des mesures HSE spécifiques en phase de terrassement.

Les pollutions anthropiques identifiées à ce jour sont de faible ampleur.

Peu de sites sont concernés et il s'agit majoritairement de quelques impacts ponctuels en hydrocarbures et métaux dans les terrains de surface

## HISTOGRAMME DES VOLUMES DE DÉBLAIS PAR FORMATION LITHOLOGIQUE (m<sup>3</sup>)



11

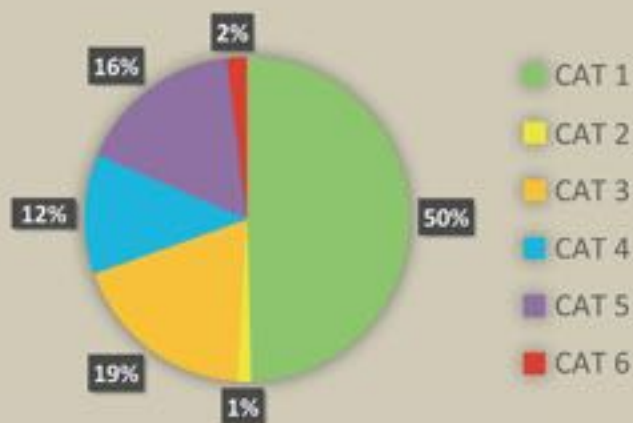
© ICARE

## CATÉGORISATION DES DÉBLAIS



12

## RÉPARTITION DES DÉBLAIS PAR CATÉGORIES



13

qui ne nécessiteront pas de procédures d'hygiène et de sécurité compliquées pour les travailleurs ni de travaux de dépollution anticipés.

Reste une incertitude sur un des ouvrages annexes situé au droit d'une ancienne station-service où les investigations préalables n'ont pas encore pu avoir lieu. Selon l'étude historique disponible, la pollution des sols et des eaux souterraines y est avérée mais son ampleur spatiale et en termes de concentration n'est pas connue.

Par ailleurs, les analyses ont été orientées pour évaluer le caractère inerte ou non des futurs déblais selon l'arrêté ministériel du 12 décembre 2014 relatif aux conditions d'admission des déchets inertes dans les installations relevant des rubriques 2515, 2516, 2517 et 2760 de la nomenclature des installations classées. Les qualités chimiques de déblais ont été scindées en 6 catégories (figure 12). Globalement, il ressort des analyses disponibles les grandes tendances

suivantes par lithologies rencontrées (figure 13) :

- Les formations des Limons des plateaux (Plateaux de Saclay), des Argiles à Meulière de Montmorency, des Sables de Fontainebleau, des Marnes à Huîtres et des Calcaires de Brie sont majoritairement inertes ;
- L'Argile Verte présente une forte proportion de non-inerte (autour de 50%) du fait de ses teneurs en fluorures, sélénium ou sulfates sur éluat ;

→ Les Marnes Supragypseuses de Pantin et d'Argenteuil et les Masses et Marnes du Gypse sont très majoritairement non inertes du fait de leurs teneurs en sulfates, fluorures et quelques fois en sélénium sur éluat.

Les déblais de lithologies non inertes seront principalement extraits dans les ouvrages et le tunnel du tronçon Est. En effet, pour le tronçon Ouest, la lithologie majoritaire correspond aux Sables de Fontainebleau.

La Société du Grand Paris a fixé à l'échelle du projet Grand Paris Express un objectif de valorisation de 70% des déblais. Pour la Ligne 18, les pistes de valorisation identifiées, à ce stade des études, sont :

- Le remblaiement de carrières avec des déblais des catégories 1, 2 ou 3 : la proportion valorisée dépendra des capacités d'accueil des carrières retenues par les entreprises de travaux ;
- Le recyclage potentiel des sables de Fontainebleau pour alimenter la filière de fabrication de béton en Île-de-France : des études de caractérisations spécifiques sont en cours pour évaluer la faisabilité de cette option (550 000 m<sup>3</sup> environ de sables pourraient être valorisés) ;
- Le recyclage de matériaux argileux pour la fabrication des cloisonnements de locaux techniques des gares (environ 3 700 m<sup>3</sup> nécessaires), via la transformation des déblais en briques de terres cuites ou crues ; le réutilisation des Limons des Plateaux pour le besoins en remblais du projet (environ 140 000 m<sup>3</sup>) au droit du centre d'exploitation et des zones de transition tranchée/viaduc.

## PRINCIPALES QUANTITÉS DE LA L18

**LINÉAIRE DE LA LIGNE : 34,64 km**

**LINÉAIRE DE LA PARTIE SOUTERRAINE : 20,2 km, dont 12 km pour le tronçon Est et 8,2 km pour le tronçon Ouest**

**DIAMÈTRE INTÉRIEUR DES TUNNELS : 8 m**

**LINÉAIRE DU VIADUC : 14 km, dont un ouvrage d'art pour le franchissement de la N118**

**NOMBRE DE GARES : 10, dont la gare d'Orly commune avec la L14 (hors marché)**

**NOMBRES D'OUVRAGES ANNEXES : 23, plus un centre d'exploitation avec site de maintenance de l'infrastructure (SMI) et site de remisage et d'entretien du matériel roulant (SMR)**

**VOLUME DE DÉBLAIS PRÉVISIONNEL : 2 700 000 m<sup>3</sup>**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :**

Société du Grand Paris

**MAÎTRE D'ŒUVRE :**

groupement Icare (Ingérop mandataire, Artélia, Arcadis, les Architectes : Dietmar Feichtinger Architectes ; Ateliers 2/3/4 ; Richez Associés ; C. Vezzoni ; JF. Schmit)

**ASSISTANT AU MAÎTRE D'OUVRAGE :**

groupement Lineov (Edeis, Algae, Transamo)

**ASSISTANT AU MAÎTRE D'OUVRAGE POUR LA GÉOTECHNIQUE :**

Terrasol

**ASSISTANT AU MAÎTRE D'OUVRAGE POUR LES BÂTIS :**

groupement Bureau Véritas, Sites, 3IA

## TRANSPORT DES MATÉRIAUX

Le Schéma Directeur d'Évacuation des Déblais (SDED) fixe notamment pour objectif du projet GPE pour le transport des matériaux de privilégier les modes de transports alternatifs (fluvial et ferré). La Ligne 18 est située sur un territoire plutôt à l'écart des infrastructures fluviales. Bien que la position du fleuve à l'est du tracé soit suffisamment proche pour constituer une solution possible,

la distance à parcourir entre les zones de travaux et les ports existants reste un élément trop contraignant pour que cette solution soit retenue.

Concernant les infrastructures ferroviaires, 2 sites spécifiques ont fait l'objet, à ce stade, d'études préliminaires par SNCF Réseau afin de permettre une logistique de flux de matériaux : le site de Satory et celui de Versailles-Chantiers. Ces 2 sites sont à proximité suffi-

sante des zones de travaux pour pouvoir envisager une logistique d'évacuation des déblais sans passer par une rupture de charge routière entre le convoyeur à bande du tunnelier et le quai de chargement des trains. Le site de Versailles ne sera réservé qu'à l'évacuation des déblais de la gare, puisqu'elle est située en fin de course du dernier tunnelier. Les sites de Massy-Palaiseau et Wis-sous sont également pressentis, en

revanche les études préliminaires n'ont pas encore été menées.

Compte-tenu de ces spécificités, le recours au transport routier sera donc le cas le plus fréquent pour les matériaux de la Ligne 18 (déblais et matériaux de construction). Un encouragement pour l'utilisation du transport ferré a toutefois été intégré dans les marchés de travaux des lots d'infrastructure.) □

## ABSTRACT

### UNDERGROUND SECTIONS OF LINE 18 OF THE 'GRAND PARIS EXPRESS' ORLY-VERSAILLES-CHANTIERS

ALAIN BERNARDET, ARCADIS/ICARE - CLAIRE CARPENTIER, ARCADIS/ICARE - ANDRÉ DE GOYON, ARCADIS/ICARE

*Line 18 of the 'Grand Paris Express' project passes through urbanised areas in the East and West underground (in a bored tunnel), and through a large part of the Saclay plateau on a viaduct. It will be connected to the Île-de-France transport networks at Orly (connection with Line 14), Massy-Palaiseau (connection with «RER» (rapid transit system) and high-speed train lines) and Versailles (connection with «RER» C, and SNCF main lines), and in the future Rueil and Nanterre. The article outlines merely the two sections executed underground, with, especially, a description of the geotechnical context, its impact on the works and the measures taken to manage pollution and treatment of excavated material. □*

### SECCIONES SUBTERRÁNEAS DE LA LÍNEA 18 DEL GRAND PARIS EXPRESS ORLY-VERSAILLES CHANTIERS

ALAIN BERNARDET, ARCADIS/ICARE - CLAIRE CARPENTIER, ARCADIS/ICARE - ANDRÉ DE GOYON, ARCADIS/ICARE

*La Línea 18 del proyecto Grand Paris Express atraviesa zonas urbanizadas al este y al oeste en subterráneo (túnel perforado), y una gran parte de la meseta de Saclay en viaducto. Estará conectada con las redes de transporte de Île-de-France en Orly (enlace con la Línea 14), en Massy-Palaiseau (enlace con las líneas RER y TGV) y en Versailles (enlace con las líneas RER C y SNCF), y en el futuro en Rueil y Nanterre. El artículo presenta únicamente los dos tramos realizados en subterráneo, y principalmente una descripción del contexto geotécnico, el impacto sobre las obras y las medidas tomadas para gestionar la contaminación y el tratamiento de los escombros. □*



Membre du Réseau Compétit Intempéries BTP

## CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

### Nos missions :

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

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

### Nos coordonnées :

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







1

© ALTAMETRIS

# LIGNE 15 SUD - LOT T3B - CLAMART - LA DALLE DE COUVERTURE ENTRE EN GARE !

AUTEUR : NICOLAS CHARTIER-KASTLER, INGÉNIEUR TRAVAUX, BOUYGUES TP

LE GROUPEMENT HORIZON (BOUYGUES TP/SOLETANCHE BACHY) RÉALISE LA GARE DE FORT-D'ISSY-VANVES-CLAMART, PREMIER OUVRAGE DE GÉNIE CIVIL DU GRAND PARIS EXPRESS. LA PARTICULARITÉ DE CETTE BOÎTE ENTERRÉE EST SA COUVERTURE SITUÉE SOUS LES VOIES SNCF DE LA LIGNE N DU TRANSILIEN. CELLE-CI A ÉTÉ PRÉFABRIQUÉE EN DEHORS DES VOIES POUR ENSUITE ÊTRE RIPÉE VERS SON EMPLACEMENT DÉFINITIF LORS D'UN WEEK-END DE COUPURE TOTALE DE LA CIRCULATION FERROVIAIRE (ITC), OPÉRATION HORS NORMES RÉALISÉE AU COURS DU WEEK-END DU 12 AU 16 AOÛT 2017.

## LES ÉTAPES QUI CONDUISENT AU RIPAGE

### CONTEXTE

Le principal enjeu pour réaliser cette étape du chantier est la forte interface avec la SNCF qui porte les marchés liés aux aménagements et modifications de la gare de Transilien en surface. La contrainte principale du marché de la gare souterraine, sous maîtrise d'ouvrage de la Société du Grand Paris (SGP), est d'assurer autant que pos-

**1- Vue aérienne de la dalle de couverture pendant le week-end d'interruption totale de circulation, avant ripage.**

**1- Aerial view of the cover slab during the weekend of complete suspension of traffic, before sliding.**

sible la continuité de la circulation des trains de la Ligne N. Cette contrainte a piloté le phasage du début de chantier mais également les méthodes de réalisation de la dalle de couverture et des parois moulées. Il y a donc, sur cette opération, deux maîtrises d'ouvrage distinctes, la Société du Grand Paris (SGP) et la SNCF. Une mission OPCIC (Organisation, Pilotage et Coordination Inter Chantier) gère les interfaces entre ces deux parties.

### TRAVAUX AVANT RIPAGE

Neuf ponts provisoires métalliques (tabliers auxiliaires (TA)) et deux appuis (Piles) ont été réalisés par la SNCF pour supporter les voies ferrées et offrir de l'espace libre pour réaliser les parois moulées de la boîte gare en-dessous. Cet espace libre de 5,9 m de hauteur (figure 2) permet de laisser circuler les engins de réalisation des parois moulées et de leurs rehausses en béton armé sur ces dernières.



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

Ces voiles de 1,2 m d'épaisseur et 55 m de longueur prolongent les parois moulées et servent ensuite d'appuis définitifs à la dalle de couverture après ripage (figure 3).

La dalle de couverture est construite en béton armé plein, non précontraint, sans joint de dilatation et coulée en 6 plots successifs sur étaielement (figure 4).

Son volume est de 2600 m<sup>3</sup> pour un poids total de 6 500 t (hors béton de protection de l'étanchéité et ballast ferroviaire). Ses dimensions sont de 77 x 53 x 24 m (trapèze en plan). Son épaisseur moyenne est de 1,5 m avec une pente transversale de 1 % (1,62 m au plus épais et 1,38 m au plus mince). Il a fallu réaliser la couverture sur étaielements avec une passe charretière afin de laisser libre la circulation sous la dalle pendant sa préfabrication.

**Nota :** Une fois ripée, la dalle de couverture est ancrée aux rehausses verticales sur lesquelles elle s'appuie. La méthode d'ancrage retenue est du type « rotule Freyssinet » (figure 5). C'est à dire qu'une réservation est laissée dans la dalle préfabriquée et une autre dans la rehausse de telle façon que ces réservations coïncident. On peut alors y insérer une barre d'acier HA50 qui est scellée à l'aide d'un coulis de ciment haute performance (figure 6). Ce procédé permet de fixer la dalle à la boîte gare et à cette dernière de travailler comme un buton supérieur pour l'excavation de la boîte. La liaison créée n'est alors pas un encastrement mais bien une rotule.

Une étanchéité en feuille préfabriquée monocouche est appliquée sur la dalle

ainsi qu'une protection en béton de 20 cm servant également de sous-couche à la future plateforme ferroviaire.

Une fois l'étaielement retiré, cette méthode permet également de laisser un espace sous la dalle pour installer les chariots automoteurs du ripage. Ces opérations (mise en place des ponts provisoires et ripage) ont nécessité chacune des travaux de démontage/remontage de voies ferrées réalisés pendant des Interruption Temporaire de Circulation (ITC) planifiées longtemps à l'avance par la SNCF. Ces coupures constituent des impératifs de planning pour toutes les autres tâches du chantier.

**Nota :** une passerelle provisoire piétonne métallique a également été construite au-dessus du chantier et des voies SNCF pour permettre aux voyageurs de circuler librement et accéder aux voies du Transilien N.



**2- Vue de la zone sous tabliers auxiliaires SNCF, avant ripage et avant réalisation des rehausses sur parois moulées.**

**3- Réalisation des rehausses de paroi moulées sous tabliers auxiliaires SNCF.**

**2- View of the area under SNCF auxiliary decks, before sliding and before execution of the heighteners on diaphragm walls.**

**3- Execution of diaphragm wall heighteners under SNCF auxiliary decks.**

## FOCUS SUR L'OUTIL DE RIPAGE : LES SPMT DE MAMMOET

Le ripage de la dalle est assuré par des remorques multidirectionnelles auto-propulsées type SPMT de l'entreprise Mammoet (figure 7). La dalle préfabriquée est ripée avec 5 rangées de SPMT constituées d'un total de 240 essieux (figure 8).

La plateforme en béton armé, support de l'étaielement pour la préfabrication de la dalle de couverture, a été dimensionnée pour permettre le déplacement des SPMT dans des conditions optimales.

La passe charretière sous ces étaielements qui permettait la circulation des engins sur la dalle étayée a également été bétonnée et remblayée avant l'installation des SPMT pour avoir une dalle continue. La dalle de couverture et sa protection en béton pèsent près de 7 500 t, soit 200 t de plus que la tour Eiffel !

Les SPMT sont assemblés par modules de 4 ou 6 essieux d'une capacité maximale de 40 t par essieu. Ils sont assemblés et couplés hydrauliquement et alimentés par un groupe moteur appelé *power-pack* installé aux extrémités. Ce groupe assure le déplacement de la ligne d'essieux complète.

## COMPOSITION DE L'ASSEMBLAGE

- 44 unités dont 13 unités de 4 essieux ;
- Capacité d'un module de 4 essieux : 136 t ;
- Capacité d'un module de 6 essieux : 204 t ;
- Course des vérins : +/- 200 mm soit 400 mm de course.

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS



4

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

Un test de levage et de roulage des SPMT a été effectué avant l'ITC dans le cadre de l'analyse de risque menée par le groupement. Cela a permis de vérifier le fonctionnement de l'ensemble et de libérer la sous-face de la dalle située en appui sur la poutre de couronnement pour la préparer au matage final après pose définitive.

La procédure de positionnement et de pose de la dalle a été renforcée et affinée car la tolérance de positionnement de SPMT est de l'ordre de 2 cm. Or, le brochage de la dalle de couverture est dépendant du bon alignement des réservations Ankrabox pour les appuis Freyssinet (dalle vs. rehausse). La procédure était donc stricte et hiérarchisée entre le sous-traitant et le topographe pour poser la dalle et maîtriser l'implantation finale aux côtés du sous-traitant et du topographe.

4- Vue aérienne de la dalle de couverture en cours de préfabrication.

5- Schéma des broches d'ancrage.

4- Aerial view of the cover slab undergoing prefabrication.

5- Diagram of anchoring pins.

## L'OPÉRATION DU RIPAGE EN ITC

Les grandes lignes du ripage (en gras les Intervenant) :

- Coupure des voies SNCF, démontage des voies et ripage des caténaïres - **SNCF**.
- Dépose des tabliers auxiliaires (TA) et démolition des piles provisoires - **SNCF**.
- Ripage de la dalle de couverture - **Horizon (SGP)**.
- Dépose sur appuis provisoire et réalisation des broches d'ancrage - **Horizon (SGP)**.
- Matage de la dalle aux rehausses - **Horizon (SGP)**.
- Étanchéité, libération des zones latérales et remplissage des réservations d'étanchéité - **Horizon (SGP)**.

→ Remblai contigu entre la dalle de couverture et les anciennes culées (bloc technique) - **SNCF**.

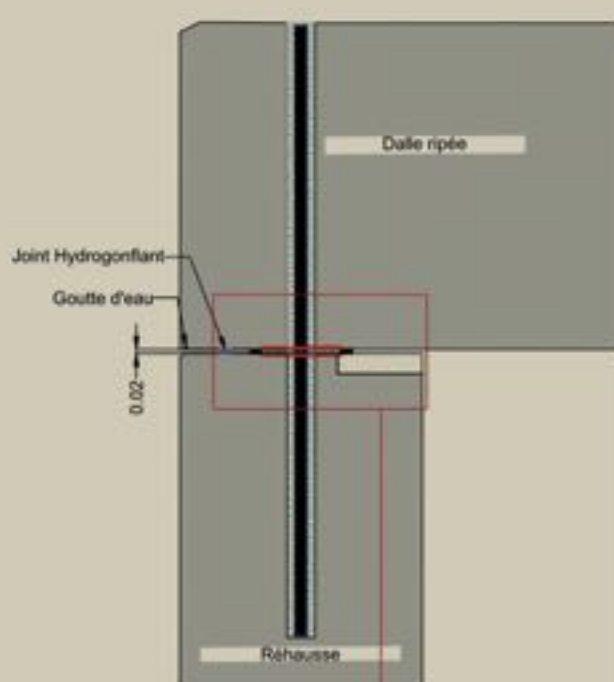
→ Ballastage de la dalle et raccordement au ballast des voies de part et d'autre - **SNCF**.

→ Mise en place des traverses et des rails ; bourrage et ballastage - **SNCF**.

→ Essai en charge - **Horizon (SGP)**.

→ Ripage des caténaïres et remise en service de la ligne - **SNCF**.

## SCHÉMA DES BROCHES D'ANCRAGE



5

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

## TRAVAUX PRÉPARATOIRES SNCF (12/08 0H)

Les travaux concernant la plateforme ferroviaire existante sont gérés par le marché SNCF. Ainsi, la première étape du week-end consistait à démonter les voies et caténaïres existants, pour ensuite déposer les tabliers auxiliaires (TA) et retirer les têtes des piles pour permettre le passage de la dalle de couverture.

**Nota :** Une optimisation majeure, l'adaptation piles de TA/SPMT.

Les deux piles centrales supportant les tabliers auxiliaires (TA) devaient initialement être démolies pendant le week-end pour laisser passer les files de SPMT du ripage, très rapprochées les unes des autres. Il a donc été proposé aux MOE des deux marchés d'enlever une file de SPMT et de les espacer pour pouvoir passer autour des fûts de pile. Il restait alors à adapter la tête de pile pour ne déposer que la partie en conflit (altimétrique) avec la dalle de couverture ripée comme évoqué dans le paragraphe précédent. Le reste du fût de pile a ensuite été démoli en sous-œuvre après l'opération.

*Cette adaptation a permis de gagner un temps considérable sur le planning et de sécuriser globalement l'opération car la démolition totale des piles occupait près de 14 heures dans le planning initial.*

**RIPAGE DE LA DALLE DE COUVERTURE (12/08 - ÉTAPE : 17H ; ÉTAPE 2 : 23H45)**

Le ripage en lui-même a duré environ 3 heures à partir de la prise en charge jusqu'à la dépose sur appuis temporaires. Ce sont finalement les tâches de positionnement et de dépose sur appuis qui ont occupé près de 70% de ce temps.

Le déplacement de la dalle s'est effectué en deux phases, à l'avancement du retrait des têtes de piles provisoires par le marché SNCF. La première phase de ripage au-dessus de la première pile s'est passée en moins d'une heure pour les 33 m à parcourir (figure 9). Il restait alors 27 m pour finir le ripage et déposer la dalle.

**DÉPOSE SUR APPUIS PROVISOIRES ET RÉALISATION DES BROCHES D'ANCRAGE**

Une fois en position définitive, la dalle est déposée sur les boîtes à sable (figure 10) et les SPMT sont repliés.

**DESCRIPTION DU CONTRAT**

**Réalisation des études d'exécution et de la construction :**

- Des parois moulées et du génie civil d'une boîte gare de 110 m de longueur, de largeur variable entre 21 et 26 m avec une dalle de couverture sur laquelle reposent les voies ferrées. La profondeur de la boîte est variable entre 23 et 30 m.
- D'une émergence Ouest incluant un niveau de sous-sol hors boîte de 300 m<sup>2</sup>.
- De la mise en accessibilité PMR (fosses ascenseurs et escaliers) du couloir Ville-Ville (Issy-Clamart).

Des joints préalablement installés sur les poutres de couronnement et les rehausses assurent le confinement de la bande de mortier sur 2 cm d'épaisseur. La bande de mortier est remplie en même temps que le clavage des barres HA, une fois la dalle posée sur appuis provisoires.

Après une série d'essais préalables, on a retenu des joints de 4 cm d'épaisseur pour assurer le bon confinement et la séparation des zones de matage.

Ils permettent d'assurer l'étanchéité lors du clavage car ils se retrouvent alors comprimés sur 2 cm.

Il y a 68 broches d'ancrage à réaliser : 28 côté Nord et 40 côté Sud. Elles sont constituées d'une barre HA50 d'environ

3 m de longueur scellée dans une réservation de 140 mm de diamètre dans la dalle de couverture et dans les rehausses de paroi moulée. La bande de 2 cm d'épaisseur complète le clavage. Elle est remplie au mortier haute performance.

Le volume total de coulis pour le matage est d'environ 4 m<sup>3</sup>. Afin d'optimiser le temps de mise en œuvre, quatre ateliers ont travaillé en parallèle. Pour s'assurer que le mortier remplit correctement les cavités, des événements sont placés lors de la réalisation de la dalle de couverture de part et d'autre de la réservation. Cela permet un contrôle fiable du remplissage de mortier pour chaque broche.

**6- Vue des broches HA50 pour ancrage de la dalle de couverture et des réservations dans le béton de protection, avant ripage.**

**7- Mise en place et montage des SPMT sous la dalle de couverture pour le ripage.**

**8- Ripage de la dalle de couverture avec les chariots SPMT.**

**6- View of the HA50 pins for anchoring the cover slab, and wall pockets in the protective concrete, before sliding.**

**7- Positioning and assembly of SPMTs under the cover slab for sliding.**

**8- Cover slab sliding with SPMT trucks.**



6



8



7



9  
© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

9- Vue de la première phase de ripage de la dalle de couverture et de la dépose des têtes de pile provisoires.

10- Vue d'une boîte à sable avant ripage, prête pour la dépose de la dalle de couverture.

9- View of the first phase of cover slab sliding and the placing of temporary pier caps.

10- View of a sand box before sliding, ready for placing down the cover slab.

### ÉTANCHÉITÉ, LIBÉRATION DES ZONES LATÉRALES ET REMPLISSAGE DES RÉSERVATIONS D'ÉTANCHÉITÉ

L'étanchéité verticale permet la fermeture étanche de la boîte gare. Elle est réalisée après le matage des broches d'ancrage entre la rehausse et la dalle de couverture ripée. Ces travaux



10  
© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

démarrent juste après le matage des premières broches, à l'avancement. Ceci permet de libérer au plus vite les extérieurs de la dalle de couverture et rendre au marché SNCF la zone pour remblayer (figure 11) et recréer ainsi une plateforme ferroviaire, jalon partiel sur le chemin critique global de l'opération. Passé ce jalon, les opérations du groupement ne sont plus critiques vis-à-vis de la remise en état de la circulation ferroviaire sur la dalle.

Pendant que les remblais latéraux SNCF démarrent, le remplissage des réservations dans le béton de protection de l'étanchéité est exécuté par quatre ateliers qui travaillent en parallèle, sur le même schéma que pour le matage/brochage.

**Nota :** Une optimisation majeure, les réservations pour brochage/matage. L'étanchéité doit former une enveloppe étanche autour de la boîte gare. Le brochage des rotules Freyssinet dans la dalle depuis le haut impose donc de réaliser l'étanchéité de la couverture en opération « coup de poing » pendant l'opération de 100 h seulement après le matage/brochage de ces appuis. Cette tâche d'étanchéité occupait près de 8 h dans le planning initial, auxquelles il fallait ajouter la réalisation de 30 cm de béton de protection/couche-de-forme sur cette étanchéité (minimum 10 h hors séchage).



11

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

Le groupement Horizon (Bouygues TP et Soletanche Bachy) a donc proposé de réaliser des réservations ponctuelles dans l'étanchéité et le béton de protection autour des zones de brochage pour alors mettre en œuvre en amont cette étanchéité et protection sur toute la partie courante de la dalle. Ceci implique alors de réaliser pendant le week-end de ripage une étanchéité et un bétonnage spécifique au droit des zones non fermées pour le brochage. Cette adaptation a permis au groupement Horizon de gagner environ 15 heures.

des marchés SGP et SNCF pour faire en sorte qu'aucune place ne soit laissée à l'incertitude ou à l'aléa. Ainsi, à titre d'exemple, cette analyse de risque a étudié l'aléa climatique, les pannes matérielles (engins, SPMT, etc.) la gestion des imprévus ou la réalisation de banc d'essai à l'échelle 1:1 pour tester le système de boîte à sable et les méthodes de matage de la dalle de couverture. Cette analyse de risque a abouti, pour chaque point et face à chacun de ces aléas, à un plan d'action concret.

**11 - Remblai SNCF contre la dalle de couverture ripée pour reconstitution de la plateforme ferroviaire.**

**11 - SNCF back-fill against the slid cover slab to reconstitute the railway track formation.**

## CONCLUSION

Le défi lancé au groupement Horizon (Bouygues TP et Soletanche Bachy) par la Société du Grand Paris a été relevé tant techniquement que vis-à-vis du planning de réalisation de la Ligne 15 Sud. La dalle, après le ripage, se substitue maintenant aux ponts provisoires et permet à la suite du chantier de s'effectuer en sous-œuvre de façon tout aussi spectaculaire, sans interface avec les voies en surface, pour fermer l'enceinte souterraine de la gare. La gare sera prête à accueillir la sortie des tunneliers dès 2019. □

## LES OPTIMISATIONS ET L'ANALYSE DE RISQUE DU WEEK-END ITC

Entre la solution initiale et ce que le groupement Horizon (Bouygues TP et Soletanche Bachy) a réalisé pour le compte de la SGP en définitive lors de cette opération, beaucoup d'optimisations ont été apportées par les équipes travaux du projet. Ces optimisations ont également permis de sécuriser et gagner du délai sur le chemin critique du planning global. Par ailleurs une analyse de risque a été menée conjointement entre les acteurs

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**BÉTON DE PAROI MOULÉE :**  
15000 m<sup>3</sup>

**ARMATURES DE PAROI MOULÉE :** 1 300 t

**BÉTON GC :** 14000 m<sup>3</sup>

**ARMATURES GC :** 2500 t

**BUTONS :** 1 400 t

**TERRASSEMENT (DÉBLAIS) :**  
250000 t

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE (MOA) :** SGP - Société du Grand Paris

**ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE (AMO) :** groupement Artemis : Artélia (mandataire), Arcadis Esg, Bg Ingénieurs Conseils

**MAÎTRISE D'ŒUVRE (MOE) :** groupement Setec Tpi (mandataire), Ingérop

**MONTANT :** 65 979 926 Euros HT

**OS :** 1<sup>er</sup> avril 2016

**DÉLAI :** 60 mois

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES :** groupement Horizon : Bouygues Travaux Publics (mandataire), Soletanche Bachy France, Soletanche Bachy Pieux et Soletanche Bachy Tunnels

## ABSTRACT

### LINE 15 SOUTH - WORK SECTION T3B - CLAMART - THE COVER SLAB ENTERS THE STATION!

NICOLAS CHARTIER-KASTLER, BOUYGUES TP

**The Fort-d'Issy - Vanves - Clamart Station forms part of the 'Grand Paris Express' project.** It is an underground station on Line 15 South, located at the junction between the districts of Issy-les-Moulineaux, Vanves, Clamart and Malakoff. This project constitutes work section T3B of Line 15 South. The specific feature of this station is that it was designed for connection under the existing above-ground station (Line N of the 'SNCF Transilien'). In order not to disrupt traffic, the 7,000-tonne cover slab over which the trains will run was prefabricated away from the tracks and then slid to its definitive location on a weekend during which the tracks were closed. This also made it possible to build the metro station by underpinning without disturbing the operation of the SNCF railway line. □

### LÍNEA 15 SUR - LOTE T3B - CLAMART - ¡LA LOSA DE CUBIERTA ENTRA EN LA ESTACIÓN!

NICOLAS CHARTIER-KASTLER, BOUYGUES TP

**La estación de Fort-d'Issy - Vanves - Clamart forma parte del proyecto Grand Paris Express.** Es una estación subterránea de la Línea 15 Sur, situada en la confluencia de los municipios de Issy-les-Moulineaux, Vanves, Clamart y Malakoff. Este proyecto constituye el lote T3B de la Línea 15 Sur. La especificidad de esta estación reside en que ha sido diseñada enlazada bajo la estación existente en superficie (Línea N del Transilien SNCF). Para no interrumpir el tráfico, la losa de cubierta, de 7.000 t, sobre la que circularán los trenes ha sido prefabricada lejos de las vías y, seguidamente, deslizada hasta su ubicación definitiva durante un fin de semana en que se cortaron las vías. Esto ha permitido también construir mediante recalce la estación de metro sin perturbar la operativa de la línea SNCF. □



## Spie fondations

Partenaire-expert



Résoudre votre  
problématique de sol  
& de construction

- > Fondations profondes
- > Soutènements
- > Ecrans étanches
- > Reprises en sous-oeuvre
- > Réhabilitations d'ouvrages
- > Comblements de cavités
- > Traitements de terrains
- > Améliorations de sols
- > Ancrages
- > Fouilles clés en main

Ligne 15, Lot T3C :  
Tunnel, gares & ouvrages annexes  
entre les gares de Fort d'Issy Vanves  
Clamart & Villejuif Louis Aragon

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



spie batignolles

/ Spie fondations



CRÉATEUR DE SOLUTIONS



PAROIS MOULÉES / SOUTÈNEMENTS

PIEUX DE FONDATIONS / MICROPIEUX

CLOUS / TIRANTS D'ANCRAGE

REPRISE EN SOUS-CŒUVRE

COMBLEMENT DE CARRIÈRES

TRAITEMENT DE TERRAINS

SONDAGES DE RECONNAISSANCE

JET GROUTING

CONGÉLATION DE SOL

FONDATIONS DE PYLÔNES & ÉOLIENNES

BOTTE Fondations

ZAC du Petit Leroy - 5 rue Ernest Flammarion

94659 RUNGIS Cedex

Tél. : 01.49.61.48.00

bottefondations@vinci-construction.fr // [www.botte-fondations.fr](http://www.botte-fondations.fr)



FRANCE