Ligne 15 sud du Grand Paris Express : aspects géotechniques et suivi du creusement des tunnels du tronçon T3C

Line 15 south of the Grand Paris Express: geotechnical aspects and monitoring of the excavation of tunnels in the T3C section

Hervé LE BISSONNAIS, *Terrasol, Paris, France*Anthony BACHELIER, *Terrasol, Paris, France*Yassine BEN DHAOUI, *Setec TPI, Paris, France*Gilles CHAPRON, *Terrasol, Paris, France*Guillaume PONS, *Société du Grand Paris, Saint Denis, France*

Résumé

Le lot de travaux T3C de la ligne 15 sud du Grand Paris Express reliera la gare de Fort d'Issy Vanves Clamart et la gare de Villejuif Louis Aragon sur un linéaire de 8 kms de tunnel dans un contexte très urbanisé. Les difficultés géotechniques sont significatives : présence de carrières souterraines liées à l'exploitation du Calcaire Grossier sur environ 6 kms de linéaire de projet (plateau de Vanves Bagneux Cachan), présence de formations argileuses très déformables comme les Argiles Plastiques ou les Argiles Vertes, passage du tunnel sous une faible couverture de matériaux médiocres au niveau de la vallée de la Bièvre, avoisinants sensibles.

Les deux tunnels principaux (tunnel Centre du Puits Robespierre à la gare de Fort d'Issy Vanves Clamart sur 3910 ml et tunnel Est de la gare d'Arcueil-Cachan à la gare Villejuif Aragon sur 3425 ml) ont démarré leur creusement respectivement fin février et fin avril 2019 à l'aide de tunneliers à pression de terre, un troisième tunnel relie le puits Robespierre à la gare d'Arcueil-Cachan sur 700 ml et creusé avec le tunnelier Centre.

L'article présente les grands principes de la conception de ces tunnels vis-à-vis des contraintes géotechniques et les premiers retours d'expérience après une année de creusement des deux tunneliers en termes d'impacts en surface et sur les avoisinants, pression de confinement, etc...

Abstract

The T3C work package on line 15 south of the Grand Paris Express will link Fort d'Issy Vanves Clamart station and Villejuif Louis Aragon station over an 8 km long tunnel in a highly urbanized context. The geotechnical difficulties are significant: presence of underground quarries (Limestone exploitation) over approximately 6 km of project length (Vanves Bagneux Cachan), presence of highly deformable clay formations such as Plastic Clays or Green Clays, passage of the tunnel under a weak cover of poor materials (Bièvre valley), sensitive neighbors.

The two main tunnels (Center tunnel: from Puits Robespierre to Fort d'Issy Vanves Clamart station on 3910 ml and East tunnel from Arcueil-Cachan station to Villejuif Aragon station on 3425 ml) started their excavation respectively at the end of February and at the end of April 2019, using earth pressure balance machines, a third tunnel links the Robespierre shaft to the Arcueil-Cachan station over 700 ml.

The article presents the main principles of the design of these tunnels with respect to geotechnical aspects and the first feedback from a year of excavation of the two tunnel boring machines in terms of impacts on the surface, confinement pressure, etc.

Ligne 15 sud du Grand Paris Express : aspects géotechniques et suivi du creusement des tunnels du tronçon T3C

Line 15 south of the Grand Paris Express : geotechnical aspects and monitoring of the excavation of tunnels in the T3C section

Hervé LE BISSONNAIS, *Terrasol, Paris, France*Anthony BACHELIER, *Terrasol, Paris, France*Yassine BEN DHAOUI, *Setec TPI, Paris, France*Gilles CHAPRON, *Terrasol, Paris, France*Guillaume PONS, *Société du Grand Paris, Saint Denis, France*

1 Contexte général

Le Grand Paris Express constitue le plus grand projet urbain en Europe, avec 200kms de nouvelles lignes de métro automatique et 68 nouvelles gares.

Le Grand Paris Express est composé de 4 nouvelles lignes 15, 16, 17 et 18, ainsi que de la ligne 14 prolongée au nord et au sud. Ces lignes seront connectées au réseau de transport existant. Le nouveau métro traversera les territoires du Grand Paris pour les relier entre eux et à la capitale.

La ligne 15 sud entre la gare Pont de Sèvres et la gare Noisy Champs, premier tronçon ayant démarré en travaux doit être mis en service à l'horizon 2025. Cet article présente plus particulièrement les premiers enseignements géotechniques du creusement des deux premiers tirs de tunneliers du lot travaux T3C entre la gare Fort d'Issy Vanves Clamart et la gare Villejuif Louis Aragon.

Les principaux acteurs de ce tronçon sont :

- Maître d'ouvrage : Société du Grand Paris (SGP)
- Maîtrise d'œuvre Etudes et Travaux génie civil : Setec TPI / Terrasol
- Groupement d'entreprises CAP: Vinci Construction Grands projets / Spie Batignolles / Dodin Campenon Bernard / Vinci Construction France / Spie Fondations / Botte Fondations.

2 Contexte géologique et géotechnique

Les tunnels de la ligne 15 Sud-Est interceptent l'ensemble des formations géologiques du bassin parisien (cf. figure 1 et figure 2), en partant de la craie du Campanien dans la vallée de la Seine, jusqu'aux sables de Fontainebleau en arrivant sur le plateau de Villejuif. On rencontre ainsi des formations rocheuses (essentiellement des roches tendres comme la craie, le Calcaire Grossier, les Marnes et Caillasses, le calcaire de Brie), des sols indurés comme les Marnes de Meudon, le Marno-Calcaire de Saint-Ouen, les Masses et Marnes de Gypse, les Marnes supra gypseuses (Marnes d'Argenteuil et Marnes de Pantin), des formations argileuses (Argiles Plastiques, Argile Verte), et des terrains à dominante sableuse (Sables de Beauchamp, Sables de Fontainebleau).

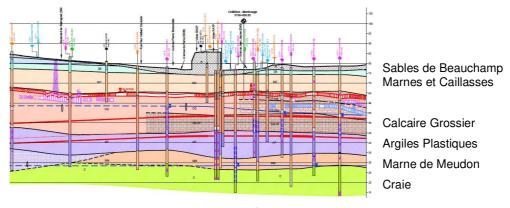


Figure 1. Profil en long géologique secteur Chatillon

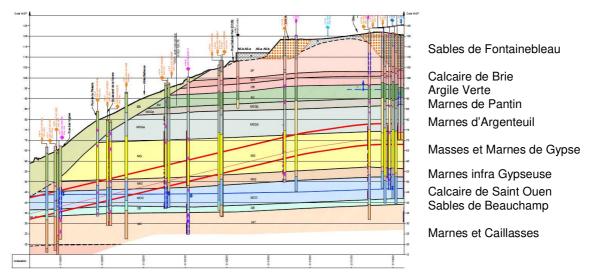


Figure 2. Profil en long géologique secteur Villejuif

3 Les principaux enjeux géotechniques

Les principales difficultés géotechniques ont été mises en évidence dès le démarrage des études préliminaires en 2011, avec en particulier :

- la présence de carrières souterraines liées à l'exploitation du Calcaire Grossier sur environ 6 kms de linéaire de projet (plateau de Vanves Bagneux Arcueil),
- la présence de formations argileuses très déformables comme les Argiles Plastiques ou les Argiles Vertes,
- le passage du tunnel sous une faible couverture de matériaux médiocres au niveau de la vallée de la Bièvre,
- Le risque de dissolution de gypse, en particulier lors de la remontée vers le plateau de Villejuif,
- Les avoisinants sensibles (passage sous voies RATP et LGV, collecteurs du SIAAP, bâtiments anciens type église).

4 Les choix de conception des tunnels

Le tunnel est un ouvrage circulaire à 2 voies de 8,70 m de diamètre intérieur avec 0,20 m de tolérance permettant de dégager un diamètre fonctionnel de 8,50 m avec un entraxe des voies de 3,50 m.

Le revêtement définitif est constitué de voussoirs en béton armé formant des anneaux d'une épaisseur minimale de 0,40 m. Un anneau est formé par 7 voussoirs. Le vide annulaire, créé entre le terrain et l'extrados du revêtement lors de la progression du tunnelier, est injecté sur toute sa circonférence à l'aide d'un mortier de bourrage faiblement dosé en ciment.

Le tracé des tunnels a été essentiellement dicté par la présence des carrières de Calcaire Grossier. En effet, un passage à travers celles-ci a été considéré comme étant insuffisamment robuste (risque de déstabilisation des carrières pouvant générer des fontis ou des tassements en surface, risque de rencontre d'objets métalliques). Il a ainsi été retenu un profil en long permettant de rester sous les carrières, avec une couverture suffisante pour éviter toute déstabilisation. Ce tracé conduit à un creusement en front mixte Calcaire Grossier en voûte / Argile Plastique sur un linéaire important. La volonté de remonter la gare de Bagneux a conduit néanmoins à intercepter les carrières sur quelques centaines de mètres.

4.1 Cinématique des tunneliers

Trois tirs de tunnelier ont été retenus afin de respecter le planning :

 Un premier tir de 3910 ml (tunnel centre) entre l'ouvrage annexe « parc de Robespierre » à Bagneux vers la gare de Fort d'Issy Vanves Clamart,

- Un deuxième tir de 3425 ml (tunnel est) entre la gare d'Arcueil-Cachan et la gare Villejuif Louis Aragon.
- Un troisième tir sur 700 ml entre l'OA Robespierre et la gare d'Arcueil.

4.2 Tracé

En partant de la gare de FIVC (Fort d'Issy Vanves Clamart), point le plus à l'ouest du tracé, le tunnel passe en pleine section dans les Argiles Plastiques et à très faible couverture (~15 m) sous les remblais d'une ancienne carrière à ciel ouvert puis il plonge dans les Marnes de Meudon sur 600 ml traversant une zone pavillonnaire très dense. Le tunnelier continue dans cette formation géologique sur environ 700 ml avec la présence de carrières de Calcaire Grossier à 15m au-dessus de la voûte environ, il remonte après dans les formations de Calcaire Grossier tout en restant sous des réseaux profonds du SIAAP notamment avec à peine 4 m de couverture puis sous le réseau SNCF (Technicentre et LGV Paris Bordeaux) et les voies de la RATP (terminus Métro 13) avec des carrières souterraines qui ont été comblées dans le cadre du projet depuis les voies ferrées pour certaines. En sortie du domaine ferré se trouve la gare CHM (correspondance avec la ligne du métro 13 à Chatillon Montrouge). Le tracé continue dans cette formation de Calcaire Grossier jusqu'au puits de départ de Robespierre et intercepte les carrières de part et d'autre de la gare BAG (correspondance avec la ligne du métro 4 à Bagneux). En partant vers l'est du puits Robespierre, le tunnel reste sur 40 ml dans un front de Calcaire Grossier et passe sous des immeubles R+15 fondés sous les carrières, puis le tunnel plonge dans les Argiles Plastigues à l'approche de la gare ARC de Cachan et passe sous 3 niveaux de carrières souterraines et une carrière remblayée à ciel ouvert.

En partant d'ARC, le tunnel est creusé dans un front mixte, il plonge sur 500 ml jusqu'au point bas du projet pour commencer une montée de 1500ml, à 4,75% en grande partie, jusqu'à la gare d'IGR (correspondance avec la ligne 14 à l'Institut Gustave Roussy). Il passe au droit de la vallée de la Bièvre avec la plus faible couverture du projet (13 m). Par la suite, il traverse les formations des Marnes d'Argenteuil et des Masses et Marnes de Gypse sur 1500 ml jusqu'à la gare de VLA (correspondance au terminus de la ligne du métro 7 à Villejuif Louis Aragon).

5 Les tunneliers

Les tunneliers à pression de terre (Ellen et Amandine) sont conçus à l'identique et sont essentiellement composés d'un bouclier qui est constitué de trois parties réunies par des vérins d'articulation (Figure 3) : le corps avant supporte la roue de coupe et l'entrainement, le corps intermédiaire qui est relié au bouclier avant par un groupe de vérins d'articulation qui constitue l'articulation active. Le corps arrière constitue la jupe dans laquelle les voussoirs sont assemblés, cette jupe est reliée au corps intermédiaire par une articulation passive.

Les tunneliers sont munis :

- d'un dispositif d'injection de bentonite le long de l'extrados de la jupe du tunnelier pour garantir le confinement du terrain et réduire le frottement de la machine,
- un dispositif d'injection de bentonite à l'avant de la roue de coupe,
- un dispositif de montage de foreuse de reconnaissance à travers la paroi de la chambre d'abattage ainsi que des boulons radiaux à travers la jupe,
- un dispositif d'injection de mortier de bourrage à l'arrière de la jupe pour combler le vide annulaire créé entre l'extrados du revêtement et le terrain excavé.

La roue de coupe comporte 32 molettes de 19" dont les 8 molettes centrales sont composées de disque simple et les autres de bi disque. Elle est conçue pour permettre le remplacement des outils depuis la chambre d'abattage. Sa forme et ses ouvertures réduisent le plus possible la surface de terrain découvert, notamment en clé et offrent suffisamment de place pour laisser passer des blocs.

Le dispositif de pilotage est assisté par ordinateur, permet l'enregistrement de l'intégralité des données de la machine et leur visualisation en temps réel sur un logiciel de monitoring.

Le dispositif embarqué de reconnaissance géophysique à l'avancement a été abandonné au profit d'une reconnaissance depuis la surface (SISSTERRA proposé par Sixense).

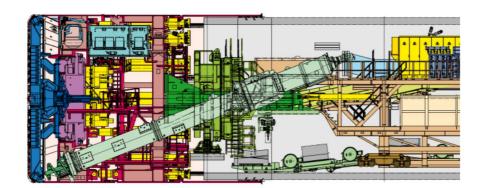




Figure 3. Tunnelier S1120

6 Les ouvrages annexes

Le tronçon T3C de la ligne 15 sud-ouest comporte 5 gares profondes enterrées et 8 ouvrages d'accès de secours et ventilation (dits « ouvrages annexes »).

Les ouvrages de cette ligne sont à réaliser en milieu urbain dense (petite couronne francilienne), dans une temporalité courte (5 ans pour le génie civil), avec des ouvrages atteignant 50 m de profondeur. Ces ouvrages traversent de multiples horizons géologiques de nature et de résistance très hétérogènes (Argiles Plastiques, Calcaire Grossier).

C'est dans ce cadre que les ouvrages d'accès de secours espacés de 800 m sur la longueur du tracé sont conçus. Ils sont constitués de trois parties :

- Une partie « locaux techniques », qui est construite en subsurface à côté du puits ; cette partie d'une profondeur de l'ordre de 8 à 10 m fait une surface de l'ordre de 10 m par 40 m en plan ;
- Une partie « puits » permettant d'accéder au tunnel qui est à une profondeur variant de 28 à 48 m au droit de ces ouvrages d'accès. Le diamètre de ces puits est variable selon les fonctionnalités qui leur sont attribuées (voir plus loin);
- Une partie de communication avec le tunnel par galerie creusée en souterrain entre le puits et le tunnel (jusqu'à 15/20 m de longueur environ).

Les puits eux-mêmes constituent des ouvrages très particuliers puisqu'ils ont, selon leur positionnement sur le tracé, des fonctionnalités diverses et multiples :

- accès de secours et évacuation ;
- ouvrages de drainage ;
- usine de ventilation :
- point d'alimentation électrique de la ligne en service ;
- sécurité en phase chantier.

Ces fonctionnalités, couplées à la nécessité d'optimiser les coûts des travaux, ont conduit à concevoir des ouvrages dont le diamètre était totalement optimisé vis-à-vis de ses fonctions. Ainsi, selon l'ouvrage, le diamètre variait à la conception de 7.4 à 11 m.

Lors de la phase d'exécution qui a débuté en 2018, l'entreprise a proposé pour 4 des puits un creusement par un outil mécanisé développé à l'étranger par Herrenknecht baptisé VSM (Vertical Shaft Machine). Ce mode constructif n'avait jamais été mis en œuvre en France jusqu'à présent, et est à ce titre encore expérimental.

Il s'agit des puits des Ouvrages Annexes n°5, 6, 7 et 8 :

- OA n°5 (dit « Pierre Plate ») : diamètre intérieur adapté de 8,3 m et profondeur de 50 m ;
- OA n°6 (dit « Cimetière Parisien ») : diamètre intérieur adapté de 10,3 m et profondeur de 48m ;
- OA n°7 (dit « Fort de Vanves ») : diamètre intérieur adapté de 10,3 m et profondeur de 49 m;
- OA n°8 (dit « Square Malleret-Joinville ») : diamètre intérieur adapté de 11,9 m et profondeur de 47 m (cf. Figure 4);

Ces puits sont par la suite raccordés au tunnel par des rameaux de sections différentes selon la fonctionnalité de l'ouvrage.



Figure 4. OA8 : Montage du VSM et ouvrage en cours de creusement

Les quatre puits ont été excavés entre octobre 2018 et novembre 2019, avec une durée d'excavation comprise entre quatre mois pour le premier et moins de deux mois pour le dernier (P05).

7 Premiers retours d'expérience des creusements des tunnels

7.1 Tunnelier centre

L'entrée en terre du tunnelier centre « Ellen » partant du Parc Robespierre s'est faite dans un bouchon 16 m x 16 m traité par injection de coulis sous pression et une virole porte joint pour assurer l'injection du mortier de bourrage du premier anneau. Le profil en long remonte au fur et à mesure pour traverser la gare BAG en pleine terre puis passe sous la station Bagneux en cours de construction de la ligne du métro M4, pour finir par replonger progressivement du Calcaire Grossier supérieur vers le Calcaire Grossier inférieur. Il restera dans cette formation géologique sur environ 2000 ml avec la traversée de quelques points singuliers (sans être exhaustif) :

- Passage sous les caveaux profonds du cimetière parisien de Bagneux,
- Passage sous des immeubles R+15 fondés sur piliers maçonnés jusqu'aux carrières,
- Passage sous les voies RATP de la ligne 13,
- Passage sous les voies SNCF (2 voies TGV et 3 voies classiques)

 Passage à deux reprises sous les réseaux profonds du SIAAP avec à peine 5m de couverture (Figure 5)

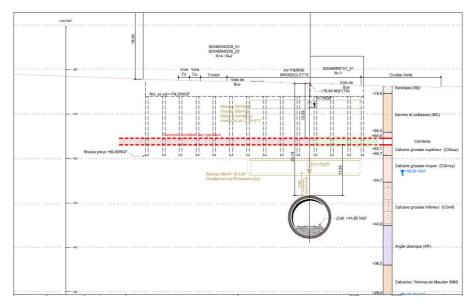


Figure 5. Coupe au droit d'un réseau SIAAP avec présence de carrière souterraine et fondations profondes d'avoisinants

Le creusement dans les formations de Calcaire Grossier ou en front mixte Calcaire Grossier / Argile Plastique s'avère globalement favorable d'un point de vue tassements, avec, à ce stade, une stabilisation des déformations après le passage du tunnelier avec des valeurs de tassements ne dépassant pas les seuils définis.

Passage à travers les carrières de Bagneux

La gare BAG de la ligne 15 ayant été optimisée en phase de conception (réduction d'un étage), elle a conduit au recalage du profil en long du tracé avec pour conséquence l'interception des carrières souterraines sur environ 280 ml du tracé dont 110 ml dans la gare BAG. Cette interception des carrières avait été anticipée en conception en renforçant le traitement par injection en mode IRS (Injection Répétitive et Sélective) avec une maille de 3m x 3m pour garantir la stabilité du toit des carrières dont les piliers se retrouveraient sectionnés par le tunnelier. Des modélisations par éléments finis (Figure 6) ayant mis en évidence la nécessité de confortement supplémentaire des carrières et/ou un renforcement des voussoirs (risque de poinçonnement d'un pilier sur les voussoirs), des dispositions complémentaires ont été définies selon plusieurs scénarios.

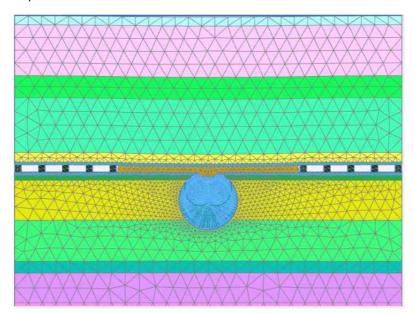


Figure 6. Extrait du calcul montrant la ruine des voussoirs

Ces mesures sont reparties en fonction des zones :

 Réalisation, depuis les zones accessibles depuis la surface, de colonnes de jet grouting jointives capables de reprendre la descente de charge et de les répartir uniformément sur le revêtement du tunnel (Figure 7),

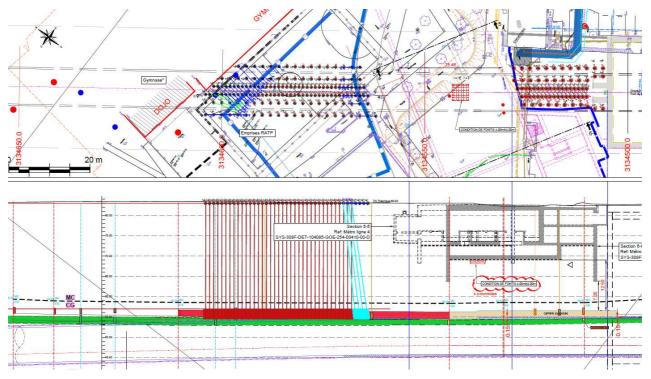


Figure 7. Elaboration de plan de jet grouting de part et d'autre de la station M4

Renforcement des voussoirs avec un ferraillage mixte à 135kg/m³ d'armature HA et 4 HEB 240 noyés dans les voussoirs, notamment sous la station de métro M4 d'autant plus que les carrières sous cette station n'ont fait l'objet que d'un comblement gravitaire (Figure 8)

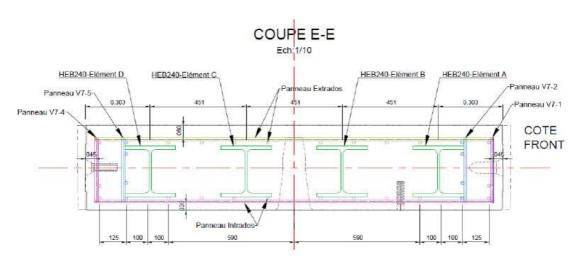


Figure 8. Schéma voussoir mixte

 Renforcement des mesures d'auscultation avant le passage sous la M4 afin d'ajuster les paramètres de pilotage en fonction des résultats constatés.

Ces dispositions ont permis de traverser les carrières sans générer de désordre en surface. Toutefois, le tunnelier quant à lui ne s'en est pas sortie sans dommage : l'éventualité de rencontrer des objets

métalliques était bien identifiée dans le RRT (Registre des Risques Techniques) comme le risque principal lié à un passage du tunnelier dans les carrières, et en effet, à plusieurs reprises, il a été retrouvé dans le tapis ce type d'objets (train de tige de forage, échelons métalliques : cf. Figure 9) ce qui a causé plusieurs jours d'arrêt et la nécessité de remplacement de dizaines de molettes et autres outils de coupe.



Figure 9. Exemples d'objets métalliques rencontrés lors de la traversée des carrières

7.2 Tunnelier est

7.2.1 Géologie du secteur est :

Depuis son départ de Cachan, le tunnelier a d'abord plongé vers la cuvette de la Bièvre en suivant la géomorphologie des terrains de l'Eocène inférieur et moyen qui s'approfondissent pour passer sous les terrains de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène non érodés formant le plateau de Villejuif (butte témoin).

Le tunnelier a ainsi commencé par traverser en front mixte le Calcaire Grossier inférieur puis les Argiles Plastiques localement sableuses. A l'amorce de la cuvette de la Bièvre, il a entamé sa remontée rencontrant le Calcaire Grossier moyen, supérieur, puis les Marnes et Caillasses au cœur de la cuvette frôlant les éboulis de pentes du coteau de Villejuif qui forme le versant Est de la vallée de la Bièvre.

En sortant de la cuvette, le tunnelier a poursuivi sa remontée (pente de 4,75%) dans la stratigraphie locale en traversant successivement et en front mixte les sables de Beauchamp, le marno-calcaire de Saint-Ouen, les Marnes Infragypseuses pour enfin rencontrer les formations du Ludien qu'il ne quittera plus jusqu'à son terminus. Actuellement, le tunnelier creuse en pleine section dans la base des Masses et Marnes de Gypse. A son arrivée à proximité de la gare de Villejuif IGR, puis sur tout le plateau de Villejuif, le tunnelier creusera en front mixte la partie sommitale des Masses et Marnes de Gypse et la base des Marnes Supragypseuses (faciès d'Argenteuil).

D'un point de vue hydrogéologique, dès le départ de Cachan, le creusement s'est effectué sous l'influence de la nappe du Calcaire grossier, soutenue par les Argiles Plastiques. Cette nappe est en équilibre avec la nappe alluviale de la Bièvre, elle-même en équilibre avec la nappe du Marno-calcaire de Saint-Ouen soutenue par les Sables de Beauchamp. Sur le plateau de Villejuif, au sein des Masses et Marnes de Gypse, des circulations d'eau qui se développent dans les bancs horizons gypseux pourront être rencontrées localement.

7.2.2 Avancement du tunnelier Est :

Le tunnelier Amandine, rejoignant la gare de Villejuif Louis Aragon depuis la gare de Cachan, a commencé son périple de 3425 m fin avril 2019.

Il a actuellement parcouru 1300 ml environ et devrait traverser la gare de Villejuif IGR, située au pied de l'Institut Gustave Roussy, au printemps 2020 et arriver à son terminus à l'automne 2020.

Depuis son départ, le tunnelier a déjà traversé plusieurs zones à fort enjeux géotechniques telles que :

• le passage sous une ancienne carrière adjacente au château Raspail (bâti très sensible) entre le PM360 et le PM380 dans le parc du même nom sur la commune de Cachan,

le franchissement de plusieurs réseaux d'eau sensibles et en charge comme le SIAAP au PM370 ou encore l'enchainement des réseaux ovoïdes EDP sous le coteau de Villejuif à savoir les aqueducs de la Vanne au PM1060, l'aqueduc de Médicis au PM1110, dont la structure maçonnée a nécessité un confortement préalable (blindage bois) et enfin la conduite d'Orly au PM1180.

Le franchissement de ces zones a pu être réalisé sans encombre en restant en dessous des seuils de déformations autorisés pour ces différentes structures et sans qu'aucun désordre n'ait été constaté.

Toutefois, la zone la plus délicate qu'a eu à franchir le tunnelier est et qui avait été identifiée dès le démarrage de la phase conception est la « cuvette de la Bièvre » dont les premiers retours d'expérience sont présentés ci-après.

7.2.3 Retour sur un passage dans une zone délicate : le franchissement de la cuvette de la Bièvre

Contexte:

La cuvette de la Bièvre qui a été traversée par Amandine en octobre 2019 est une zone qui s'étend dans le centre-ville de Cachan entre le PM700 et le PM900 environ et dont le cours d'eau est aujourd'hui canalisé en souterrain.

Le profil en long géologique et le tracé du tunnelier dans cette zone sont présentés en Figure 10.

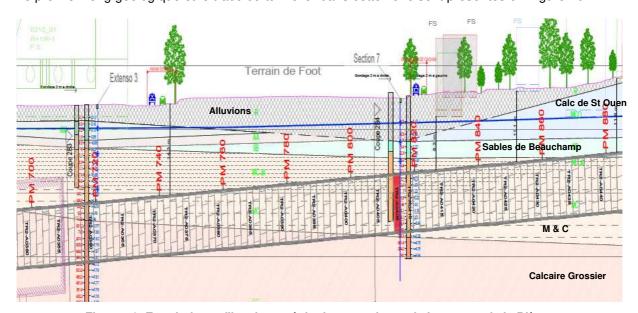


Figure 10. Extrait du profil en long géologique au niveau de la cuvette de la Bièvre

En altimétrie, le TN est compris entre 43.5 et 46 m NGF jusqu'au PM 850 avant de remonter fortement à l'amorce du coteau de Villejuif (52 m NGF au PM900).

D'un point de vue géomorphologique et géologique, cette cuvette s'est formée dans la zone où les terrains de l'Eocène inférieur et moyen qui constituent l'ensemble du secteur centre et qui commencent à plonger à partir de la gare de Cachan, passent sous les terrains de l'Eocène supérieur (Sables de Beauchamp et Marnes Infra gypseuses) et ceux du Ludien (Masses et Marnes de Gypse, Marnes Supragypseuses) qui constituent le socle du plateau de Villejuif.

Au niveau de cette cuvette, le tunnelier remonte rapidement (pente de 5.5%) après avoir plongé sur les 500 premiers mètres en suivant l'interface Calcaire Grossier inférieur / Argile Plastique. Cette remontée s'effectue dans les Marnes et Caillasses à l'entrée de la cuvette, puis les Sables de Beauchamp et les Marno-calcaires de St-Ouen à l'amorce du coteau de Villejuif.

La couverture de terrains au droit de cette « cuvette » est composée de remblais anthropiques atteignant jusqu'à 5m d'épaisseur localement, d'Alluvions Modernes et Anciennes de la Bièvre, d'une faible épaisseur de Sables de Beauchamp altérés et de marno-calcaires altérés et enfin les Marnes et Caillasses eux aussi altérées au contact des terrains alluvionnaires. La nappe alluviale de la Bièvre est rencontrée à 5 mètres sous le TN.

A noter qu'au stade de la conception, en raison d'un décalage en plan du tracé, une incertitude subsistait sur la présence, sous les terrains alluvionnaires, d'éboulis de pente qui forment le coteau de Villejuif. Ces éboulis avaient été identifiés dans certains sondages se trouvant assez éloignés du nouveau tracé.

En phase EXE, des reconnaissances complémentaires et des investigations géophysiques par sismique « passive » (procédé SISSTERRA® mis au point par SIXENSE dont un des autres objectifs étaient la détection de cavité dans les terrains gypseux) ont permis de vérifier l'absence d'éboulis au droit de la cuvette.

Compte-tenu du contexte, le passage sous la cuvette de la Bièvre constituait un secteur particulièrement délicat du fait :

- d'une faible couverture de terrains : entre 16 m au PM700 et 11.5 m aux PM820 et PM860,
- de terrains de couvertures de caractéristiques mécaniques faibles en partie supérieure (remblais, alluvions),
- d'un contexte assez urbanisé avec la présence de bâtis très sensibles situés au droit de la couverture minimum, ainsi que la présence d'un stade de football recevant du public (écoles, clubs, associations) tous les jours.

Les enjeux étaient donc le maintien absolu d'un confinement minimal notamment lors des arrêts du week-end et la maitrise des tassements avec l'application d'une pression de confinement suffisante pour respecter les seuils mais inférieure à la pression de soulèvement qui est faible dans la zone (comprise entre 240 et 300 kPa dans la zone).

La zone a fait l'objet d'un monitoring important (figure 11) réalisé par SIXENSE. Il est constitué :

- de cibles topographiques sur bâtis et en voirie. Ces cibles sont relevées de manière automatique (théodolite) et à haute fréquence : une mesure toutes les vingt minutes environ,
- de cibles topographiques « virtuelles » appelées point CENTAURES®. Ces cibles ont été mises en place dans les zones où il était impossible d'installer de cibles « physiques ». C'était le cas en particulier sur le terrain de football en gazon synthétique,
- de deux extensomètres 3 points situés à l'entrée de la cuvette (PM700) et au niveau du point de couverture minimale (PM820). L'ancre la plus profonde était située à moins de 2m au-dessus de la voûte du tunnel.

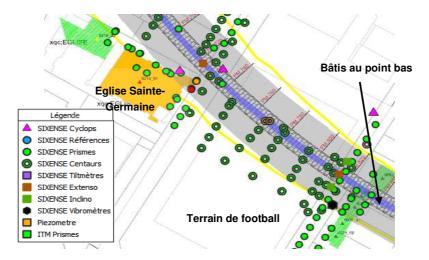


Figure 11. Dispositif d'auscultation mis en place pour la traversée de la cuvette de la Bièvre

Présentation des tassements mesurés

A l'issue des différents calculs de phase EXE, la planche de consigne prévoyait une pression de consigne de 200 kPa pour la traversée de la cuvette. En pratique, sur la base du retour d'expérience des tassements observés depuis le début du creusement et pour avoir une sécurité supplémentaire vis à vis de la pression de soulèvement, il a été retenu une pression moyenne comprise entre 190 et 200 kPa.

Les tassements longitudinaux suivants ont été observés à l'axe (Figure 12) :

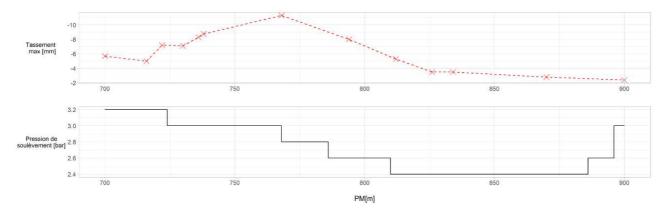


Figure 12. Cuvette de tassement longitudinale obtenue sous la Bièvre pour une pression de confinement de 195 kPa en moyenne.

Le tassement maximal enregistré lors de la traversée est ainsi de 11 mm environ aux alentours du PM770/780 pour une couverture de 13.5/14 m environ. Au niveau des zones de couverture minimale, un tassement de 4 mm environ est observé au PM820 contre moins de 3 mm au PM860.

Il apparait que pour une pression de soulèvement supérieure à 2.8 bars, les tassements augmentent à mesure que la couverture diminue. Dès que la pression de soulèvement devient inférieure ou égale à 2.8 bars, les tassements diminuent avec la couverture.

A partir du PM870 environ, les tassements continuent de diminuer malgré une augmentation de la pression de soulèvement au-delà de 2.8 bars. Ce phénomène est lié à l'augmentation rapide de la couverture d'une part, et à la nature des terrains dans cette zone d'autre part. En effet, dans ce secteur, on sort de la cuvette et les terrains alluvionnaires disparaissent. Les terrains de couverture en voûte du tunnelier à savoir les sables de Beauchamp et surtout le marno-calcaire de Saint-Ouen sont rencontrés sur une épaisseur importante (Figure 10) et possèdent de bien meilleures caractéristiques mécaniques qu'au niveau de la cuvette.

Cinématiques de développement des tassements

Lorsque l'on rentre dans le détail de l'évolution des tassements au fur et à mesure de l'avancée du tunnelier dans la cuvette, il apparait deux cinématiques distinctes.

Ces cinématiques sont bien mises en évidence par les extensomètres situés respectivement à l'entrée de la cuvette (PM720) et au point de couverture minimale (PM820) en partie est de la cuvette.

Le premier extensomètre (Figure 13) montre un tassement continu des ancres au fur et à mesure de l'avancée du tunnelier avec logiquement un tassement croissant des ancres avec la profondeur.

L'amorce de tassements s'effectue à 8/9 m en avant du front. Au passage de la roue de coupe, le tassement enregistré en surface est de l'ordre de 0.7/0.8 mm soit environ 10% du tassement final. Les ancres dans le terrain ne subissent pas de déformations significatives avant 4/5 m derrière le front puisque leur tassement absolu est identique au tassement de surface qui sert de référence.

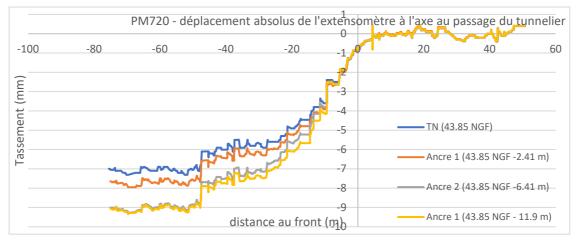


Figure 13. Déformations enregistrées dans le terrain à l'entrée de la cuvette (PM720).

Le second extensomètre (figure 14) a un comportement sensiblement différent. Il apparait en effet que les phases de tassements des ancres sont entrecoupées de phases de soulèvement avec in fine un tassement qui décroit avec la profondeur.

L'amorce des tassements en surface est très proche du front (de l'ordre du mètre) et peu de tassement s'y développe : de l'ordre de 4 à 5% du tassement final.

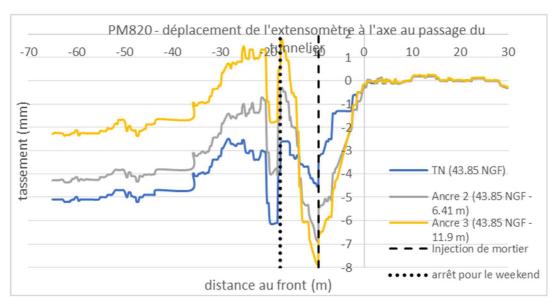


Figure 14. Déformations enregistrées dans le terrain au point bas de la cuvette en partie Est (PM820)

En découpant les courbes selon le schéma de fonctionnement du tunnelier, il ressort que le tassement se développe de manière continue jusqu'à 10m derrière le front soit au passage du bouclier et de la jupe. Cette partie du tunnelier subit l'influence de la pression de confinement appliquée par le tunnelier.

A partir de ce point, il est observé un soulèvement simultané du TN et des ancres avec un soulèvement relatif plus important pour l'ancre la plus proche du tunnel qui va se soulever de pratiquement 2mm par rapport à sa position initiale. Ce soulèvement se poursuit jusqu'à environ -17.5m du front qui correspond à l'arrêt du tunnelier pour le week-end.

Au niveau du tunnelier, la zone à partir de 10m derrière la roue de coupe correspond à la fin de la jupe et aux points d'injection du mortier de bourrage.

Ainsi, le soulèvement observé est engendré par la pression d'injection de mortier.

Finalement, comme pour le premier extensomètre, le tassement se stabilise pour l'ensemble des ancres à une cinquantaine de mètres derrière le front. Mais, il est nettement plus faible alors que la couverture est bien plus faible.

A la lecture de ces courbes il apparait que c'est la pression d'injection de mortier qui en est la principale cause du soulèvement. Ce soulèvement engendre un phénomène de compensation qui a pour conséquence un tassement final faible malgré la couverture de terrain.

Comparaison des mesures avec les tassements attendus

Une coupe Plaxis a été réalisée en phase conception au point de couverture minimale de 12.9m au PM820. Suite à la modification du tracé, cette coupe est désormais représentative de la zone centrale de la cuvette (PM800 environ).

Les calculs ont été réalisés pour différentes pressions de confinement

En figure 15 sont représentées les différentes cuvettes ou demi-cuvettes transversales de tassements obtenues grâce au monitoring pour une pression de confinement comprise entre 190 et 200 kPa. Y figurent également, les cuvettes obtenues avec Plaxis en champs libre, pour des pressions de confinement de 175, 200 et 225 kPa.

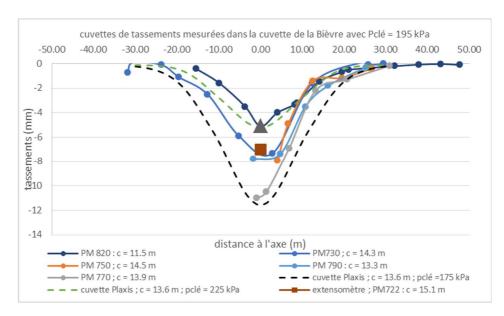


Figure 15. Comparaison entre les cuvettes transversales mesurées et les cuvettes théoriques obtenues sous Plaxis 2D.

Les cuvettes ainsi mesurées s'inscrivent toutes dans les plages prévues par le calcul hormis celle du point bas au PM820. On constate notamment une bonne corrélation en particulier au niveau du tassement maximal à l'axe entre la cuvette située au PM790 sous 13.3 m de couverture avec la cuvette Plaxis sous 12.9m de couverture et 200 kPa de confinement.

Les cuvettes mesurées semblent toutefois légèrement plus étroites que celles du modèle Plaxis ce qui reste à nuancer compte-tenu de l'imprécision de mesures inhérentes au procédé Centaure (cibles virtuelles).

On note par ailleurs une légère dissymétrie de certaines cuvettes. Elle peut être liée à l'angle de visée trop aigue sur certaines cibles virtuelles qui engendrent plus d'imprécisions dans la mesure et/où à une variation latérale de la géologie.

La cuvette au PM820 sort légèrement du fuseau. Cela est esentiellement lié à la non prise en compte dans le modèle Plaxis 2D de la pression d'injection du mortier de bourrage dont on a vu qu'elle jouait un rôle majeur lorsque la pression de soulèvement est inférieure à 2.8 bars. A cela s'ajoute une géologie sans doute légèrement plus favorable à l'abord du coteau de Villejuif. En effet dans cette zone, les alluvions disparaissent au profit des Sables de Beauchamp et des Marno-calcaires de Saint-Ouen qui, bien qu'en partie altérés, possèdent de meilleures caractéristiques que les alluvions ou les éboulis.

Les tros pavillons sensible situés à l'axe (maisons individuels de type R+1 fondées superficiellement) situés dans la zone de couverture minimale ont également subit l'influence du mortier de bourrage. Les tassements mesurés sont ainsi nettement moins importants que prévus : tassements maximums de l'ordre de 5mm contre 30mm admissibles pour le bâti le plus sensible.

En conclusion, il apparait que les tassements en champ libre obtenus lors de la traversée de la Bièvre par le tunnelier ont été dans les ordres de grandeurs attendus et même inférieurs aux attentes dans les zones de couvertures minimales du fait de la pression d'injection de mortier de bourrage, permettant un passage du tunnelier sans dommage sur les pavillons sus jacent.

• Déformations de l'Eglise Sainte-Germaine

L'église Sainte-Germaine, comprise entre le PM720 et le PM730, dont la façade la plus proche est située à moins de 5 m du tunnel avait été identifiée comme très sensible et vulnérable avec par conséquent des seuils de déformations limites faibles (10 mm en tassement absolu maximum et 0.5 mm/m en tassement différentiel).

L'inspection de l'église en amont des travaux a révélé la présence d'une fissuration traversante perpendiculaire au tunnel.

Il a donc été décidé très tôt, au démarrage des travaux, de protéger cette église par un rideau de pieux jointifs mis en place parallèlement au tracé entre le tunnel et l'Eglise afin de minimiser au maximum les tassements.

Les tassements maximaux mesurés sont présentés en figure 16.

Ils sont ainsi compris entre quelques centièmes de millimètres et 2mm au plus proche du tunnel.

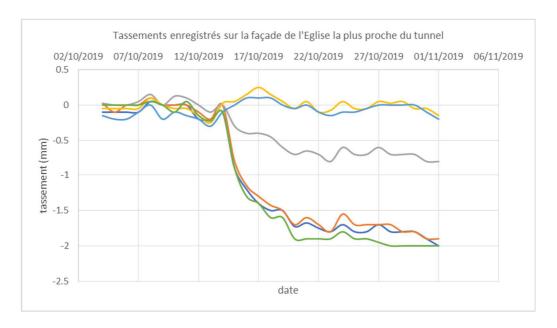


Figure 16. Tassements absolus mesurés au niveau de l'Eglise St-Germaine après passage du tunnelier

Sur le graphique suivant (figure 17) sont superposés les tassements mesurés dans la partie du bâtiment la plus proche du tunnel (façade principale) et la cuvette de tassement transversale mesurée environ 2 mètres plus loins en champs libre (PM730).

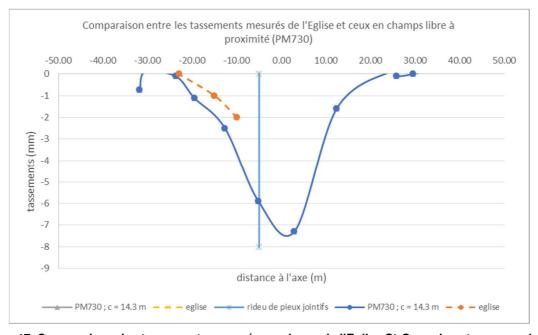


Figure 17. Comparaison des tassements mesurés au niveau de l'Eglise St-Germaine et ceux en champs libre à proximité immédiate

Il apparait ainsi clairement que les tassements mesurés au niveau de l'église sont presque deux fois plus faibles que ceux obtenus en champs libre c'est à dire hors de la zone du rideau de pieux jointifs attestant ainsi de son efficacité.

Au final, les déformations mesurées sont nettement inférieures aux seuils admissibles avec :

- un tassement absolu maximum de 2mm au plus près du tunnel, ce qui est conforme aux calculs EXE,
- un tassement différentiel maximum de 0.2 mm/m.

8 Conclusion

Après un peu moins d'un an, les deux tunneliers Ellen et Amandine ont creusé respectivement 2400 et 1300 ml de tunnel, soit un peu moins de la moitié du tronçon T3C.

Le premier tunnelier « centre » (Ellen) a atteint des vitesses de creusement de l'ordre de 490 ml /mois (sur 5 jours), avec jusqu'à 28 ml excavés en une journée. En moyenne, depuis le démarrage de ce tunnelier, la vitesse est de l'ordre de 205 m/mois, y compris période de démarrage en mode dégradé et arrêts pour maintenance et vacance. Pour ce tir, le choix du tracé restant sous les carrières avec un front mixte Calcaire Grossier / Argile plastique semble à ce stade pertinent, avec des vitesses cohérentes avec les hypothèses de planning et une bonne maitrise des déformations, avec des pressions de confinement restant raisonnables (moins de 2 bars en voûte). Le passage sous les ouvrages les plus sensibles (Voies LGV et voie du métro à proximité de la gare de Chatillon) s'est déroulé sans difficulté.

Le deuxième tunnelier « est » (Amandine), du fait d'une géologie plus contrastée et plus variée n'a pas encore atteint les cadences prévues, avec une vitesse moyenne en 9 mois de l'ordre de 135 m/mois. Le passage le plus sensible de ce tir (cuvette de la Bièvre avec une couverture faible et présence de pavillons en surface) a néanmoins été franchi avec une très bonne maitrise des déformations et des pressions de confinement.

9 Références

Le Bissonnais., et al. 2017. La ligne 15 Sud-Ouest du Réseau de Transport du Grand Paris : Conception et enjeux géotechniques du tronçon T3C. Congrès international de l'AFTES Paris 2017.