

CONSTATS SUR LES DEFORMATIONS LIEES AU CREUSEMENT DU TUNNELIER DE LA LIGNE 14 SUD

OBSERVATIONS RELATED TO DEFORMATIONS CAUSED BY LINE 14 TBM

Silvia DELATTRE LEVIS LEYSER¹, Anne BERGERE¹

¹ SETEC TERRASOL, Paris, France

RÉSUMÉ – L'instrumentation pour le suivi de l'avancement du tunnelier (Alisson) du Lot 02 de la Ligne 14 Sud a fourni des informations précieuses pour l'évaluation des calculs et du comportement des sols parisiens. Cet article présente quelques constats réalisés lors du creusement et la comparaison entre les mesures et les prévisions réalisées en phase étude basées sur des modèles aux éléments finis.

ABSTRACT – The instrumentation for monitoring the “Ligne 14 Sud” TBM (Alisson) progress provided valuable information for the evaluation of the tunnel design and the behavior of the Parisian soils. This article presents some observations made during the excavation and the comparison between monitoring and the prognostic made during the detailed design using finite element models.

1. Introduction

1.1. Contexte général du projet

Le prolongement de la ligne 14 Sud à Paris, sous maîtrise d'ouvrage RATP, connectera la station-atelier Olympiades existante à l'aéroport d'Orly (Lanquette et Prats, 2018).

Les constats présentés dans cet article sont issus de l'auscultation installée pour le Lot 02 du projet. Ce lot concerne 1/3 du linéaire du tracé du tunnel, avec :

- 4,8 km de tunnel réalisés par excavation au tunnelier pression de terre
- 1 gare : Le Kremlin-Bicêtre Hôpital (KBH)
- 5 ouvrages annexes : puits de ventilation, locaux techniques et accès pompier.

Le tunnel se termine dans la gare Maison-Blanche Paris XIII (MBP) incluse dans le projet de prolongement de la ligne 14 Sud mais faisant l'objet d'un marché séparé.

Le tracé traverse également la gare de Villejuif Institut Gustave Roussy (IGR) sous Maîtrise d'Ouvrage SGP et inclus dans le marché L15-T3c.

1.2. Contexte géotechnique

Le tunnel du Lot 02 s'inscrit dans l'ensemble géologique régional du bassin parisien et plus particulièrement dans la plaine alluviale de la Bièvre et le versant entre le Kremlin-Bicêtre et Villejuif (voir Figure 1).

Les terrains rencontrés sont composés de formations sédimentaires disparates dans leur nature, réparties en couches relativement horizontales : Remblais (Rb), Sables de Fontainebleau (SF), Travertin de Brie (TB), Glaises Vertes (GV), Marnes de Pantin (MP) et d'Argenteuil (MA), Masses et Marnes du Gypse (MFL), Marno-calcaire de Saint-Ouen (SO), Sables de Beauchamps (SB), Marnes et Caillasses (MC), Calcaires Grossiers (CG), Argiles Plastiques (AP) et Sables de l'Yprésien (Yp sab).

Les reconnaissances de sol ont permis d'évaluer les caractéristiques mécaniques à partir de paramètres sécuritaires (moyennes basses) et d'identifier les comportements spécifiques pour le pilotage du tunnelier (l'état d'altération / fracturation / dureté / colmatage) ainsi que les conditions hydrogéologiques (pressions hydrostatiques et nappes en charge).

Les paramètres des sols utilisés en phase études sont présentés dans le tableau suivant. Des variations ont été observés entre le Nord et le Sud du tracé, selon la profondeur des formations :

Tableau 1. Paramètres des sols utilisés pour les calculs en phase G2 PRO

Formation	Poids volumique		Caractéristiques Pressiométriques		Cisaillement				Etat de contrainte	
	g_h	g_d	E_M	p_l^*	C_{CT}	f_{CT}	c'	f'	OCR	K_o
	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[°]	[kPa]	[°]	[-]	[-]
Rb	20	17,5	5 - 10	0,5 - 1			0	28	-	0,53
SF	19,5	17	10 - 15	1 - 1,5			0	28	-	0,53
TB	20,5	18	10 - 12	1 - 1,2			10	30	-	0,50
GV	20	15	11 - 17	1,2 - 1,7	120 - 140	0	20	20	1,5	0,76
MSG	20	16	15	1,3	120	0	30	24	1,2	0,64
MP	19	15	20 - 70	2 - 6	140 - 200	0	30	24	1,2	0,64
MA	19,5	15	60 - 80	6 - 80	220	0	35	24	1,2	0,64
MFL	19,5	15	50 - 220	3,6 - 22	180 - 450	0	50	35	1,0	0,43
SO	18	15	70	5,5			70	30	-	0,50
SB	20,5	17,5	70	5,8			0	33	-	0,46
MC	20,5	17	31 - 34	2,9 - 3,1			20	32	-	0,47
CGsup	21	20	50 - 100	5 - 10			100	46	-	0,28
CGmoy	21	19	60 - 150	6 - 15			60	38	-	0,38
CGinf	22	21	100 - 120	10 - 12			100	46	-	0,28
FG	20	17,5	20 - 60	2 - 3,5	150	0	20	16	> 2	0,8 – 1,0
AP	20,5	17	12 - 60	0,9 - 3,6	100 - 170	0	20	16	> 2	0,8 – 1,2
YP sab	20,5	17,5	60 - 90	5 - 7			5	35	-	0,43

Le secteur du Lot 02 est concerné par l'existence des anciennes carrières souterraines du Calcaire Grossier sur un linéaire d'environ 2 km, entre les PM 2350 et PM 4350. Une campagne de comblement et traitement a été réalisée avant le passage du tunnelier sous ces carrières (Bonfils et al., 2021).

1.3 Tunnel et tunnelier

Le tunnel réalisé présente les caractéristiques suivantes :

- Linéaire : 4847,43 m / Ø excavation (Ø roue de coupe) : 8,83 m
- Ø extrados tunnel : 8,45 m / Ø intrados tunnel : 7,75 m
- Epaisseur voussoir : 35 cm / Vide annulaire : 19 cm

La mise en œuvre de 2316 anneaux, composés de 7 voussoirs en béton armé préfabriqués, tous les 2 m (localement 1,5 m) permettent de soutenir l'extrados excavé après la mise en œuvre d'une injection de mortier.

Les caractéristiques du tunnelier sont les suivants :

- Ø Bouclier : 8,79 m
- Pression de service : 5 bars
- Longueur du tunnelier + train suiveur : 14 + 99 m

Le tunnelier est équipé d'un dispositif d'injection de bentonite qui permet :

- Une injection sous pression dans la chambre de travail pour limiter les pertes de confinement à l'air ;
- Une injection autour de la jupe pour garantir le confinement et limiter les convergences autour du bouclier.

La pression dans la chambre d'abattage est mesurée par des capteurs positionnés à différents niveaux. Ces capteurs permettent d'enregistrer les variations des pressions de confinement au front et d'en déduire le taux de remplissage de la chambre. Ils enregistrent également les pertes du confinement à l'air dans les terrains ouverts ou fracturés.

Le pilotage du tunnelier a été adapté (essentiellement pour le remplissage de la chambre et la pression au front) en fonction des conditions réellement rencontrées et de la réaction de la machine.

2. Calculs en phase études

Pendant les études G2 AVP et G2 PRO, plusieurs calculs aux éléments finis ont été menés pour l'estimation de la pression de confinement nécessaire au front du tunnelier. Un total de 41 coupes simplifiées au Plaxis 2D, calées par 3 modèles Plaxis 3D, a été réalisé (Janin, 2017).

Dans les modèles 2D simplifiées, le passage du tunnelier est simulé par une désactivation du volume à l'intérieur du tunnel. Lors de cette phase, un taux de déconfinement non corrigé ($\lambda = 0,8$ à $0,9$ selon le calage avec les modèles 3D) est considéré et la pression totale de confinement à l'intérieur de l'excavation est modélisée explicitement. Le tableau ci-après reprend les différentes phases du calcul Plaxis 2D pour l'excavation au tunnelier en « champs libre » :

Tableau 2. Phases de calcul sur Plaxis 2D en G2 PRO

Phase	Type de Calcul	Etapes de construction
Phase initiale	Initialisation de K_0	Détermination de l'état de contrainte in situ avant excavation.
Phase 1	Plastic	Remise des déplacements à 0. Excavation du tunnel avec un taux de déconfinement ($\lambda = 0,8$ à $0,9$ selon le calage avec les modèles 3D) + modélisation explicite de la pression totale de confinement.
Phase 2	Plastic	Pose des voussoirs, annulation de la pression de confinement et fin du déconfinement.

Pour les coupes avec des ouvrages sensibles et des carrières, ces ouvrages sont implémentés dans le modèle avant la Phase 1 (excavation du tunnel).

Les hypothèses suivantes ont été prises en compte pour les calculs :

- Pression de confinement au front : entre 0 et 400 kPa à l'axe avec un gradient vertical ΔP de 15 kPa/m ;
- Pression d'injection maintenue constante le long de la jupe (égale à pression de confinement appliquée au front) ;
- Pression de clavage non modélisée ;
- Remplissage total du vide annulaire.

Pour l'ensemble des couches de sol, une loi de comportement élasto-plastique avec écrouissage de type HSM (Hardening Soil Model) a été considérée.

Les calculs ont été menés en contraintes effectives dans les sols perméables et en contraintes totales dans les sols argileux.

Pour les sols argileux, ayant une faible perméabilité, les paramètres de résistance au cisaillement ainsi que le module de déformation non drainés ont été retenus. Pour les autres formations, les paramètres drainés ont été considérés.

Dans les zones des carrières, les calculs ont mis en évidence l'augmentation du tassement absolu et de la largeur de la cuvette de tassement en surface lors du passage du tunnelier dans les Argiles Plastiques, comparé à son passage en front plein dans le Calcaire Grossier. Le tunnel a été ainsi rapproché des carrières du Calcaire Grossier, gardant une distance minimale de 3 m entre le toit du tunnel et le plancher des carrières, pour s'éloigner au maximum des Argiles Plastiques présentes au-dessous du Calcaire Grossier. (Bonfils et al., 2021)

La pression de confinement à l'axe du tunnelier est alors dimensionnée pour respecter les 2 principaux critères : les seuils de déformation admissible en surface et les seuils de déformation admissible au niveau du plancher des carrières souterraines.

La figure suivante montre le résultat final des analyses de la phase études. Dans la partie supérieure du graphique, sont montrés les tassements en surface soit en « champs libre » soit avec les ouvrages sensibles. Dans la partie inférieure du graphique, figurent les pressions retenues à l'axe pour limiter les tassements au seuil admissible correspondant.

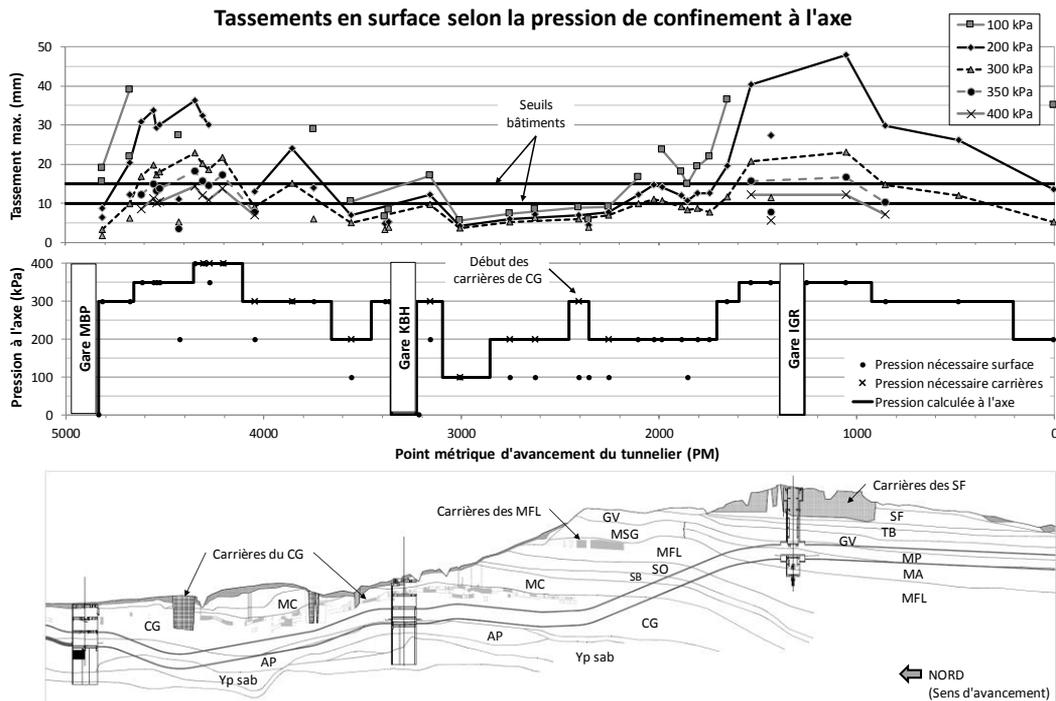


Figure 1. Pressions de confinement obtenues par les calculs en phase G2 PRO et coupe géologique longitudinale du tracé

3. Auscultation mise en place pour la surveillance du creusement du tunnel

L'auscultation mise en place pour la surveillance du creusement a été la suivante :

- *Auscultation des avoisinants* : dans la zone d'influence géotechnique, des mesures optiques automatiques dans les 3 dimensions ont été réalisées sur l'ensemble des bâtis et ouvrages.
- *Nivellement de surface* : des mesures topographiques manuelles ont été réalisées sur la voirie et dans les espaces disponibles à l'axe du tunnel (permettant le suivi des tassements à l'avancement du tunnelier) et selon des sections perpendiculaires au tracé (Sections du type A – afin d'obtenir des cuvettes de tassement).
- *Auscultation en forage* : des inclinomètres et extensomètres automatiques ont été installés en forages de part et d'autre et à l'axe du tunnel (Sections du type B – afin d'apprécier les mouvements du terrain en profondeur).
- Les zones sous carrières ont été équipées d'extensomètres automatiques en forage, positionnés en limite intérieure de la bande comblée le long du tracé du tunnel.

Cette auscultation précise et adaptée, ainsi que le suivi détaillé par l'Entreprise et le Maître d'œuvre, ont permis d'adapter en temps réel le pilotage du tunnelier et de maîtriser les tassements en surface (Coblard et al., 2021). Dans le cadre de cet article, cette auscultation a aussi permis d'observer la propagation des déformations entre le creusement du tunnel (correspondant à la source des déformations) et la surface.

4. Constats et analyses des mesures enregistrées

4.1. Pression de confinement

En général, pendant le creusement du tunnel de la Ligne 14 Sud, les pressions de confinement nécessaires pour la limitation des tassements en surface ont été inférieures à celles obtenues en calcul.

Le graphique suivant (Figure 2) montre la comparaison entre les pressions calculées et les pressions mesurées dans le capteur le plus élevé dans la chambre d'abattage, équivalent à la pression en voûte. Dans les terrains imperméables saturés présents sur une grande partie du linéaire (PM 0 au PM 2200), la pression en voûte correspond à la pression de la bulle d'air dans la chambre d'abattage. Le gradient de pression mesuré sur la hauteur de la roue de coupe est maximum de 10 kPa (~ gradient de la pression hydrostatique).

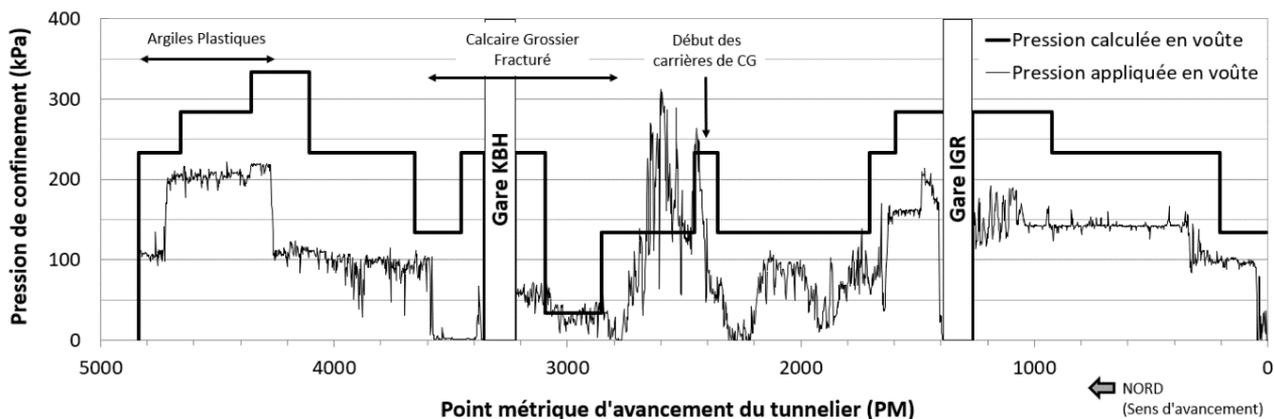


Figure 2. Pression de confinement calculée X appliquée en voûte du tunnelier

Autour du PM 2600, le tunnelier arrive dans un contexte géologique différent avec les carrières du Calcaire Grossier sous forte couverture. Le Calcaire Grossier est de bonne qualité et les carrières sont dans un état de stabilité tout à fait convenable. Dans cette zone de test de pilotage, la pression en voûte appliquée est volontairement forte pour limiter les déformations autour du tunnel et surtout au niveau des carrières.

Entre les PM 2800 et PM 3600, la couverture diminue et l'état du Calcaire Grossier se dégrade. Des pertes de pression de la bulle d'air comprimée ont été fréquentes dans le Calcaire Grossier fracturé. Les pressions appliquées en voûte sont alors très faibles malgré un taux de remplissage de la chambre d'abattage fortement augmenté jusqu'à 90 % sur ce tronçon.

Après le PM 4200, des pressions plus fortes ont pu être appliquées après l'approfondissement du tunnel dans les Argiles Plastiques imperméables.

Sur les tassements en surface, nous constatons :

- De manière générale, les tassements mesurés sont du même ordre de grandeur que les tassements calculés (de l'ordre du centimètre). Les cuvettes de tassements mesurés sont légèrement plus serrées que les cuvettes calculées avec une allure de gaussienne très similaire.
- Figure 3 : Les tassements observés en surface sont de l'ordre de quelques millimètres et ils atteignent jusqu'à 10 mm dans des zones particulières (zone d'arrêt du tunnelier / terrain environnant altéré). Seule la zone du démarrage du tunnelier correspond au tassement maximum observé de 20 mm sur la section B01 (vitesse du tunnelier réduite, pression au front très faible, volume de mortier très faible également).

- Pour un tassement observé en surface quasi similaire, les pressions de confinement appliquées augmentent légèrement en voûte de 100 à 150 kPa pour une couverture qui augmente de 20 à 30 m. Pour ces mêmes configurations, le calcul dimensionne une augmentation de pression de confinement bien plus élevée de 130 à 230 kPa.
- L'exception est observée quand le creusement atteint les Argiles Plastiques, où une pression de confinement plus forte est requise pour limiter les tassements en surface.
- Figure 4 : Dans le Calcaire Grossier, les tassements mesurés sont directement liés à l'état d'altération et de fracturation du terrain et donc à la possibilité de maintenir la pression en voûte. La Figure 5 illustre cette zone délicate où le tunnelier perdait régulièrement la pression de la bulle d'air comprimée. Les tassements ont atteint des valeurs proches de 10 mm, contre 4 à 5 mm dans les zones où le Calcaire Grossier se présentait plus sain.
- Figure 6 : Le comportement déformable des Argiles Plastiques mis en évidence lors des études a été mesuré. Même si la pression appliquée a été plus faible que celle calculée, elle a été environ 3 fois plus forte que celle appliquée dans le Calcaire Grossier pour un tassement en surface équivalent.

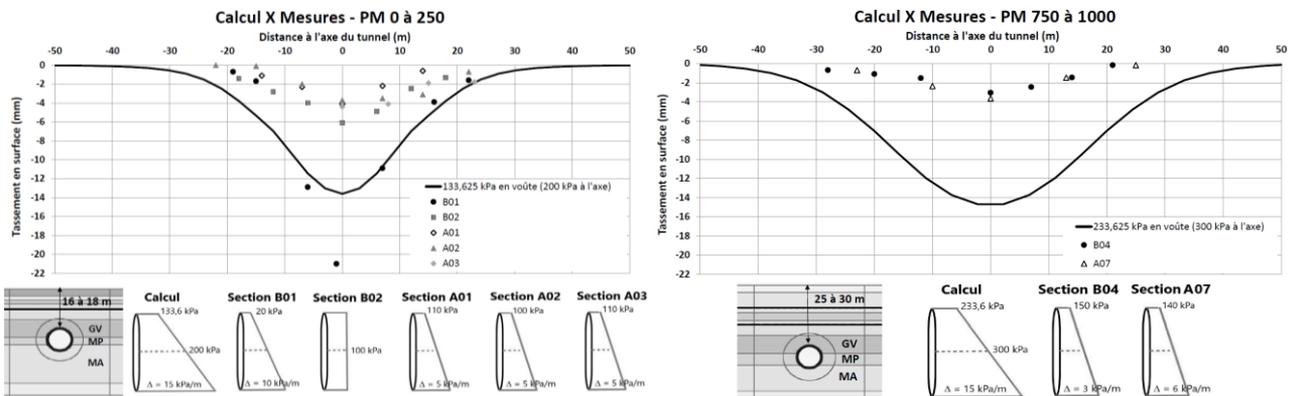


Figure 3. Points de mesures en surface de sections excavées dans les sols argilo-marneux (GV, MP et MA). Le calcul est représenté par le trait plein.

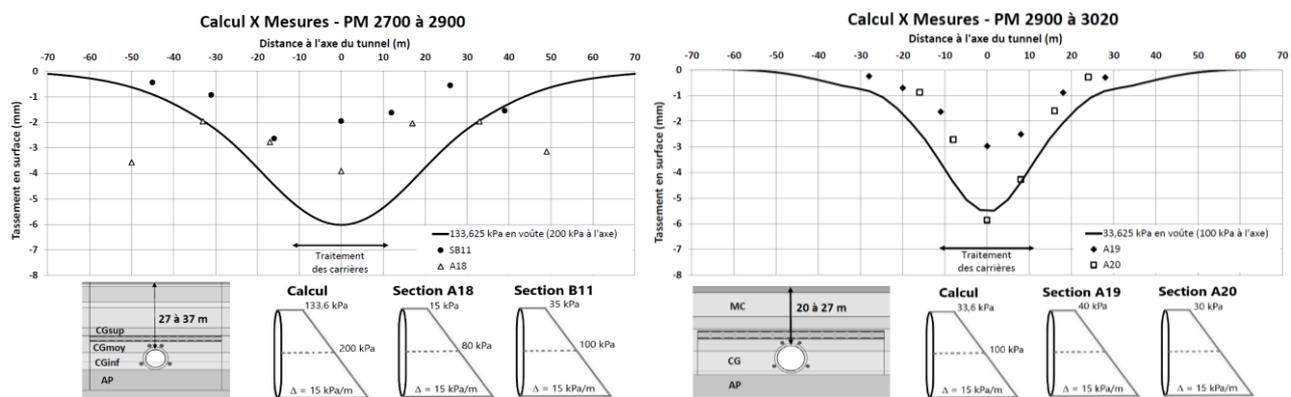


Figure 4. Points de mesures en surface de sections excavées dans le Calcaire Grossier. Le calcul est représenté par le trait plein.

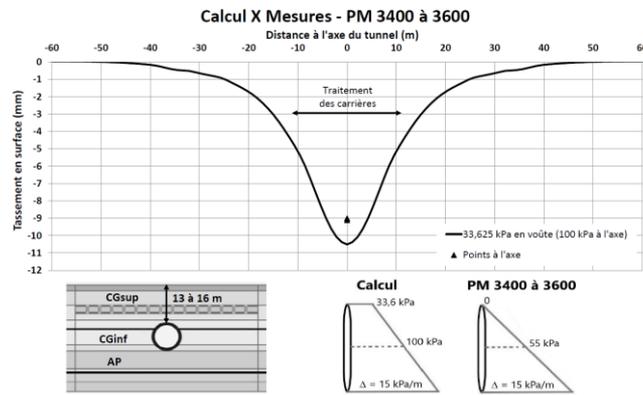


Figure 5. Points de mesures en surface d'une section excavée dans le Calcaire Grossier avec pression de confinement en voûte nulle. Le calcul est représenté par le trait plein.

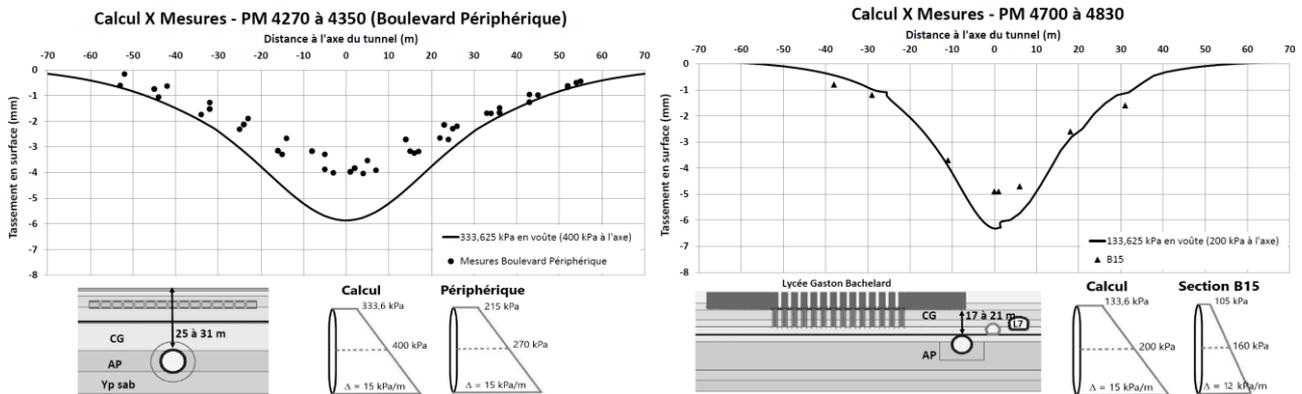


Figure 6. Points de mesures en surface de sections excavées dans les Argiles Plastiques. Le calcul est représenté par le trait plein.

4.2. Vitesse d'avancement du tunnelier

La vitesse d'avancement du tunnelier est un paramètre important pour le pilotage. Ce paramètre n'est pas ou peu considéré dans les calculs et c'est d'ailleurs un paramètre que l'on ne peut pas contrôler en études.

De manière générale, les tassements se stabilisent rapidement derrière le passage du tunnelier. Ce n'est pas le cas si le tunnelier s'arrête. Le graphique suivant montre 3 cibles topographiques de surface à l'axe du tunnel en 3 points métriques différents, avec une lithologie équivalente :

- La première, au PM 1407, a présenté un tassement d'environ de 10 mm lié à la reprise du creusement après passage du tunnelier dans la Gare IGR (démarrage avec une très faible pression de confinement) ;
- La deuxième, au PM 1493, a présenté un tassement de l'ordre de 6 mm après passage du tunnelier. Ce tassement, pourtant, a progressé jusqu'à atteindre 8 mm, 1 mois après le creusement. Cette période a été marquée par deux arrêts d'environ 2 semaines chaque, juste après avoir dépassé la cible.
- La troisième cible, au PM 1569, a tassé de seulement 4 mm après le passage du tunnelier, mais elle avait déjà présenté un tassement d'environ 2 mm pendant le deuxième arrêt alors que le tunnelier n'était pas encore passé.

Ces mesures mettent en évidence l'effet du temps entre le creusement et la pose des voussoirs sur le comportement du sol (ici, des sols meubles saturés). La pression au front du tunnelier a été enregistrée pendant les arrêts et celle-ci a été maintenue quasi-stable. Les tassements ne semblent pas liés à une diminution de la pression au front pendant les arrêts. Comme le tunnel est dans des sols imperméables saturés, il est très probable que les tassements observés pendant les arrêts soient de la « consolidation » des sols avec un rééquilibrage des pression interstitielles autour du tunnel.

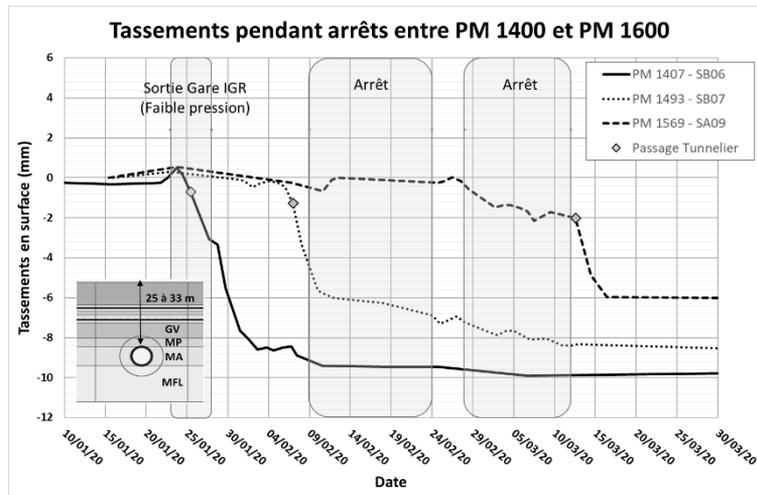


Figure 7. Tassements mesurés pendant 2 arrêts du tunnelier

4.3. Déformations autour du tunnel

Les mesures issues des extensomètres nous renseignent sur la propagation de la déformation du sol entre le tunnel et la surface. Ces mesures sont automatiques et très précises.

Les mesures sur le profil de la première section SB01 montrent que les déformations remontent en surface très rapidement (configuration de 16 m de couverture dans des sols meubles saturés imperméables).

Les déplacements verticaux du sol proches du tunnel sont forts, 40 mm pour la cellule située à 2 m au-dessus de la voûte du tunnel. Le tassement mesuré en surface atteint 21 mm.

Le graphique suivant montre les valeurs de déplacements verticaux obtenues avec les calculs de la phase étude et avec ce même calcul recalé au niveau du tassement en surface de 21 mm avec le même diagramme de pression de confinement. Les déplacements verticaux calculés autour du tunnel sont faibles par rapport à ceux observés (27 mm calculés comparés aux 40 mm observés). Dans ce cas, la sous-estimation du déplacement vertical du sol juste au-dessus du tunnel est du même ordre de grandeur que le tassement mesuré en surface. Ce constat montre que le sol adopte probablement un comportement plus déformable autour du tunnel que les modèles de calcul ne reproduisent pas. C'est une piste d'amélioration à envisager sur les lois de comportement des sols adoptées dans nos modèles.

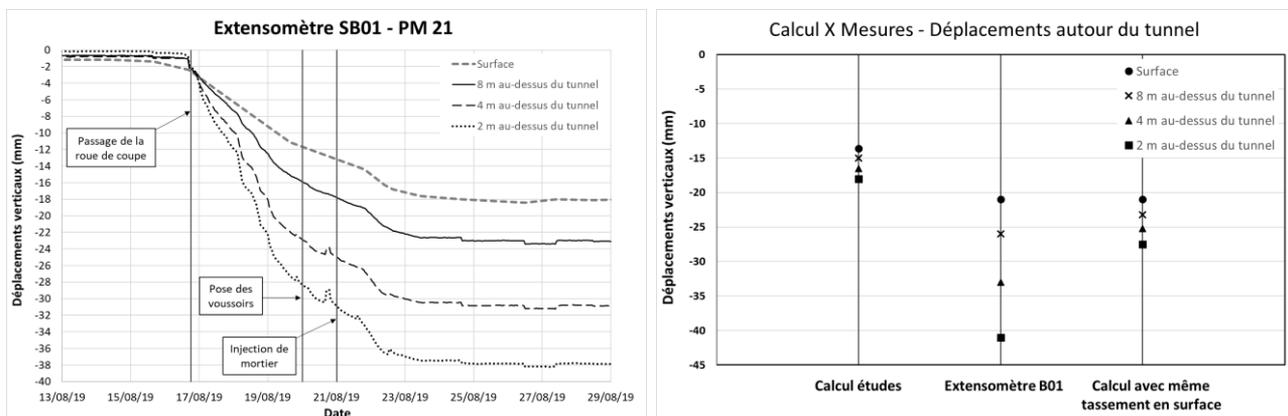


Figure 8. Mesures des déplacements verticaux de l'extensomètre SB01 (gauche) / Mesures de l'extensomètre SB01 comparées aux calculs (droite)

Précisons que ce profil SB01 correspond à celui du démarrage du tunnelier. Le vide annulaire n'a pas été entièrement rempli par le mortier (9.0 m³/anneau injecté X 10.2 m³/anneau théorique). Lors du chantier, l'épaisseur du mortier a été mesurée autour des anneaux au niveau des jonctions du tunnel avec les rameaux. Celui-ci est réparti quasi-uniformément autour des anneaux et l'épaisseur mesurée est de 17 à 19 cm pour une épaisseur théorique de 19 cm. Cette observation est importante car elle explique les faibles tassements mesurés en surface même avec l'application d'une pression de confinement en voûte inférieure à celle définie en étude. Les tassements évoluent même après le passage du tunnelier du fait des pertes de volume à l'avant et le long du bouclier mais restent limités lorsque le vide annulaire est rempli par le mortier.

Nous rappelons qu'en étude, il est considéré que les convergences maximales autour du tunnel sont atteintes lorsque le sol est en contact avec les voussoirs (cas des sols fortement déformables) ce qui constitue une hypothèse relativement défavorable pour le dimensionnement de la pression de confinement.

5. Maîtrise des déformations des sols autour du tunnel

La maîtrise des déformations des sols autour du tunnel commence par les reconnaissances des sols (identification de l'état d'altération / fracturation / dureté / colmatage des sols) et des conditions hydrogéologiques qui doivent être parfaitement reconnues en phase étude. La gestion des déformations des sols en phase chantier est réalisée par le pilotage du tunnelier et des pressions qui l'entourent (au front, le long de la jupe, celle du mortier). Ce pilotage s'appuie sur des modélisations du creusement, adoptant une sécurité accrue sur la pression de confinement, paramètre dont les déformations des sols présentent une forte dépendance. Cette sécurité est liée :

- à la connaissance insuffisante du comportement du terrain dans les conditions de l'excavation qui nous oblige souvent à travailler avec des paramètres de sols sécuritaires (équivalent à des moyennes basses) ;
- à la connaissance insuffisante de l'état de contraintes dans le massif avant le creusement du tunnel ;
- au caractère tridimensionnel de l'excavation ;
- et dans le cas du tunnelier, au choix de certains paramètres comme le volume et la pression de mortier, la vitesse du tunnelier qui jouent également un rôle considérable sur les tassements générés en surface.

Il est important prévoir des valeurs sécuritaires, car les situations comme perte de pression et arrêt de chantier sont impossibles à prévoir en avance. Il serait, néanmoins, pertinent de proposer en étude une pression de confinement « prudente » comme cela est le cas aujourd'hui mais aussi une pression de confinement « raisonnable » avec une sécurité limitée et contrôlée, qui permettrait à l'équipe de pilotage de mieux appréhender l'incrément de pression nécessaire à mettre en œuvre pour gérer le creusement en zones sensibles.

Dans ce sens, des adaptations peuvent être envisagées pour les calculs des tunnels excavés au tunnelier. Notamment au vu des paramètres de calcul, en considérant des jeux de valeurs les plus probables et des jeux de valeurs représentatives (Burlon, 2022).

6. Références bibliographiques

- Bonfils N., Bergère A., Coblard M., Lanquette F., Doussau de Bazignan B., Thouvenin G. (2021). Prolongement de la ligne 14 au Sud : Injections des anciennes carrières de Calcaire Grossier. XVI^{ème} Congrès International de l'AFTES, Paris, 17 pages.
- Burlon S., Valdeyron G. (2022). Les latitudes offertes par l'Eurocode 7 et les normes géotechniques. Journée Scientifique et Technique : Optimisation des ouvrages géotechniques du 07/04/2022.

- Coblard M., Delattre Levis Leyser S., Bergère A., Nguyen The Dung L. (2021). Excavation au tunnelier sous les carrières souterraines du Calcaire Grossier de Paris – Retour d'expérience de la ligne 14 Sud. Travaux – Revue Technique des Entreprises de Travaux Publics, n°974, pp. 66-71.
- Dano C. (2014). Étude du creusement de tunnels au tunnelier dans les Argiles Plastiques de la région parisienne. Thèse professionnelle MASTER AFTES.
- Delattre Levis Leyser S. (2015). Etude du creusement d'excavations souterraines en région parisienne dans le cadre du réseau de transport du Grand Paris. Thèse professionnelle MASTER AFTES.
- Janin J.P. (2017). Apports de la simulation numérique tridimensionnelle dans les études de tunnels. Revue Française de Géotechnique, vol. 150, n°3, 13 pages.
- Lanquette F., Prats D. (2018). Prolongement de la ligne 14 au Sud – Conception des structures souterraines (tunnel, ouvrages annexes et gares). Travaux – Revue Technique des Entreprises de Travaux Publics, n°947, pp. 92-100.