

## **Puits et galerie d'essais Calmette. RATP - Ligne 11 aux Lilas (France) : Auscultations géotechniques et rétro-analyse par modélisations éléments finis 3D. Analyse de l'efficacité du jet grouting dans des argiles plastiques.**

## **Calmette full scale test shaft and gallery. RATP - line 11 at Les Lilas (France): auscultation of the geotechnical behavior and retro-analysis by 3D finite element modeling. Analysis of the efficiency of jet grouting in plastic clays.**

### **Abstract**

Le puits et la galerie d'essais géotechniques Calmette ont été creusés en méthode traditionnelle dans le cadre des travaux préparatoires au prolongement de la ligne 11 de métro de Paris vers la station Rosny-Bois-Perrier.

La construction anticipée de l'ouvrage Calmette a un double objectif : (1) l'étude de l'efficacité de la technique de jet grouting dans les argiles plastiques et (2) le calage des paramètres géotechniques des sols à l'aide d'une modélisation aux éléments finis 3D, ajustée sur les déformations des terrains et de l'ouvrage, de manière à optimiser ensuite les dimensionnements des ouvrages principaux du prolongement de la ligne 11.

Pour analyser l'efficacité des différentes techniques de jet grouting dans les Argiles Vertes (argiles plastiques) et les Marnes de Pantin, un plot d'essai comprenant 6 colonnes a été réalisé. Une série d'essais en laboratoire et *in situ* a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques des colonnes de jet.

Pour fournir les données d'entrée à la rétro-analyse par éléments finis, une auscultation géotechnique et topographique exhaustive a été mise en place afin de surveiller les déformations du terrain, du puits et de la galerie : (1) topographie en continu en surface et en souterrain, (2) inclinomètres, (3) extensomètres, (4) jauges de contraintes et (5) profils de convergence.

Une modélisation aux éléments finis 3D avec le logiciel Z-Soil, de type rétro-analyse de calage des paramètres géotechniques, a été conduite afin de déterminer les paramètres géotechniques des sols à partir du comportement réel des ouvrages, y compris la voûte parapluie et le renforcement du front de taille par clous en fibre de verre.

### **Abstract**

Within the preparation for the extension of the line 11 of the parisian underground to Rosny-Bois-Perrier, the Calmette full scale test shaft and gallery were excavated using the conventional tunneling method.

The anticipated construction of the Calmette shaft and gallery serves a dual purpose: (1) the study of the effectiveness of the jet grouting technology in plastic clays and (2) the full scale calibration of the geotechnical soil properties using a 3D finite element model fitted on ground and structure deformations in order to maximise the final design of the main works for the extension of the subway line 11.

To analyse the different technologies of jet grouting in the Argiles Vertes (plastic clays) and Marnes de Pantin, 6 jet grouting columns were created in-situ. A set of laboratory and field tests were carried out to characterise the compressive strength and the deformation modulus of the jet grouting columns.

An exhaustive geotechnical and topographic auscultation and monitoring program were set up to control the deformation of the ground, the shaft and the gallery: (1) continuous topographic monitoring of the surface and underground, (2) inclinometers, (3) extensometers, (4) strain gauges and (5) convergence measurement profiles.

3D finite element modeling with the Z-Soil analysis software was used to determine equivalent geotechnical soil properties that fit the measured ground and structure deformations. It was also used to analyse the efficiency of the tunnel head and face reinforcement, using steel bolts and fiberglass.

**Keywords:** 3D finite element modeling, Auscultations, Fiberglass bolts, Jet Grouting, Plastic clay

# Puits et galerie d'essais Calmette. RATP - Ligne 11 aux Lilas (France) : Auscultations géotechniques et rétro-analyse par modélisations éléments finis 3D. Analyse de l'efficacité du jet grouting dans des argiles plastiques.

## Calmette full scale test shaft and gallery. RATP - line 11 at Les Lilas (France): auscultation of the geotechnical behavior and retro-analysis by 3D finite element modeling. Analysis of the efficiency of jet grouting in plastic clays.

Benedikt STÜTZL, GEOS, Rueil Malmaison, France

Stéphane CURTIL, GEOS, Rueil Malmaison, France

Célia WOLFF, GEOS, Rueil Malmaison, France

Cyril COPPALLE, Keller Fondations Spéciales, Rungis, France

### 1 Introduction

Le projet du puits et de la galerie d'essais géotechniques Calmette s'inscrit dans le prolongement de la ligne 11 de métro de Paris vers la station Rosny-Bois-Perrier. Etant les premiers ouvrages définitifs construits pour le prolongement de la ligne 11, ils ont une triple fonction : (1) avant le chantier de prolongement de la ligne 11, ils permettent de réaliser une série d'essais géotechniques *in situ* dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin, (2) pendant le chantier de prolongement de la ligne 11, ils servent d'ouvrage d'accès et (3) en service, ils servent d'ouvrage de ventilation du tunnel.

La construction anticipée de l'ouvrage Calmette a un double objectif : (1) l'étude de l'efficacité de la technique de jet grouting dans les argiles plastiques et (2) le calage des paramètres géotechniques des sols à l'aide d'une modélisation aux éléments finis 3D, ajustée sur les déformations des terrains et de l'ouvrage, de manière à optimiser ensuite les dimensionnements des ouvrages principaux du prolongement de la ligne 11.

Le projet se situe sur le plateau de Romainville, au Nord de l'anticlinal. Le secteur est structuré par deux buttes où le Calcaire de Brie (voire les Marnes à huîtres) affleure, séparées par un talweg creusé dans les Argiles Vertes. La galerie est réalisée dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin, le puits traverse également, en partie supérieure, les Limons des Plateaux et le Calcaire de Brie.

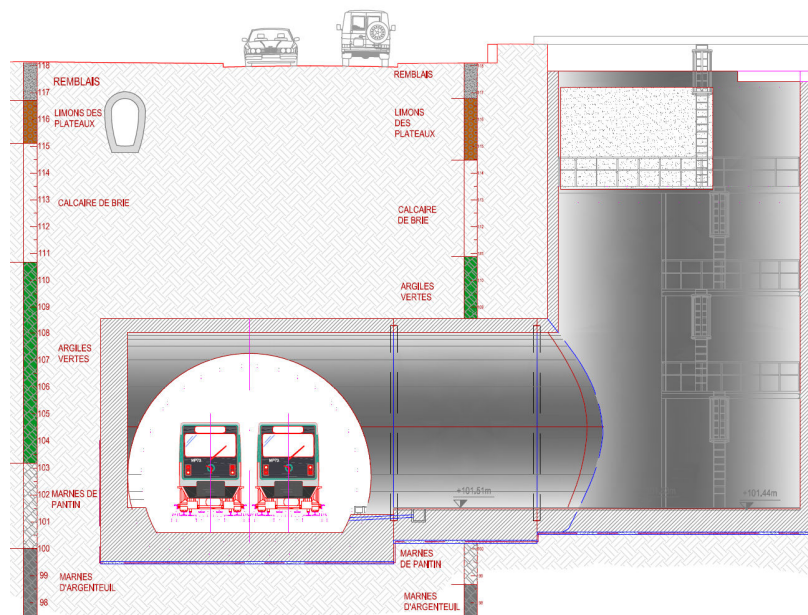


Figure 1. Vue en coupe du puits et de la galerie Calmette

Pour suivre les déformations du terrain, du puits et de la galerie, un dispositif d'auscultation géotechnique et topographique exhaustif a été mis en place par GEOS. Il comprend un suivi topographique en continu en surface et en souterrain, des inclinomètres, des extensomètres, un extrusomètre, des jauges de contraintes et des profils de convergence.

Le puits, d'un diamètre de 9 m et d'une profondeur de 18 m, ainsi que la galerie, d'un diamètre de 7 m et d'une longueur de 17 m, ont été réalisés en méthode conventionnelle. La galerie a été creusée par demi-section. Pour le terrassement de la demi-section supérieure, une voûte divergente a été mise en œuvre par forepoling et le front de taille a été renforcé de boulons en fibre de verre. Les longueurs des passes de terrassements ont varié entre 80 cm et 1 m. Après le terrassement de la demi-section supérieure, les travaux ont été arrêtés pendant un mois, de manière à suivre l'évolution dans le temps des déformations des ouvrages et des terrains. Avant le terrassement de la demi-section inférieure, le revêtement en béton armé de la demi-section supérieure a été mis en place et des micropieux ont été réalisés pour le supporter. Le revêtement définitif a été dimensionné pour résister aux pressions de gonflement dans les Argiles Vertes.

## 2 Plot d'essais géotechnique

Pour analyser la performance du jet grouting dans les Argiles Vertes (argiles plastiques) et les Marnes de Pantin, un plot d'essai comprenant 6 colonnes a été réalisé par Keller Fondations Spéciales dans l'emprise du futur puits. L'objectif était de tester, *in situ*, les différentes techniques de jet grouting : 3 colonnes ont donc été réalisées avec la technique en jet double (coulis enrobé d'air) avec pré-découpage au préalable (à l'eau et l'air) et les 3 autres colonnes ont été réalisées en jet triple, tous en faisant varier les paramètres de jet (pression et vitesses de rotation/remontée). L'objectif visé pour le diamètre des colonnes était de 1 m.

Une série d'essais en laboratoire et *in situ* a permis de caractériser la résistance à la compression et les modules de déformations des colonnes de jet grouting. Pour cela, il a été réalisé :

- des sondages carottés avec prélèvement d'échantillons intacts, verticaux dans les colonnes en place et horizontaux dans les colonnes lorsqu'elles ont été découvertes lors du terrassement du puits,
- des essais dilatométriques dans les sondages carottés verticaux,
- une série d'essais en compression simple en laboratoire.

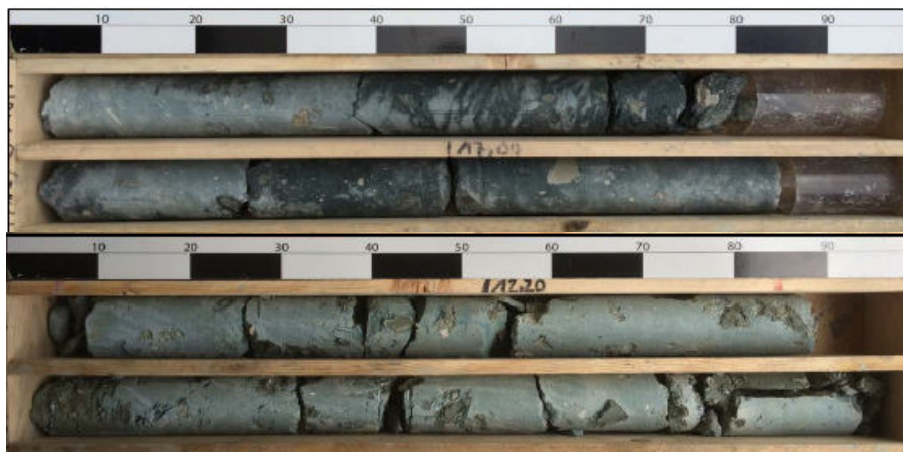


Figure 2. Exemple de carottes extraites dans les 3 colonnes réalisées en jet double

Lors du terrassement du puits, seules les colonnes effectuées en jet double se sont révélées être présentes sur toute la hauteur attendue (jusqu'au fond du puits). La technique du jet triple s'est révélée moins efficace que la technique de jet double pour la mise en œuvre de colonnes de jet grouting dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin. Seuls des bouts des colonnes réalisées en jet triple, de faibles diamètres (moins de 20 cm pour la majorité), ont été observés, de manière discontinue, à différentes profondeurs).

La technique de jet double, au contraire, a délivré des colonnes continues avec des diamètres équivalents variant de 0,9 m à 1,5 m dans les Argiles Vertes, avec en moyenne un diamètre de 1,0 m à 1,2 m pour un objectif de 1 m.

Lors du carottage dans les colonnes ainsi que pendant le terrassement, il a pu être observé que les colonnes étaient constituées de coulis avec quelques inclusions d'Argiles Vertes. Les colonnes réalisées dans les Argiles Vertes et Marnes de Pantin correspondent donc plus à une substitution des sols en place par du coulis de ciment qu'à un mélange de sol en place avec du coulis de ciment (figure 2). Le pré-découpage dans ces terrains réputés non injectables est indispensable afin d'obtenir cette substitution quasi-intégrale du volume de sol. Le fait que l'argile soit presque intégralement remplacée par du coulis dans les colonnes conduit à une importante amélioration des caractéristiques mécaniques globales et permet d'obtenir des résistances importantes dans les terrains argileux (tableau 1).

**Tableau 1. Résistance en compression uniaxiale de la matrice des colonnes de jet grouting**

R <sub>c</sub> (MPa)	Nombre	Min.	Max.	Moyenne	
				arithmétique	harmonique
Argiles Vertes	14	1,5	10,5	5,5	4,9
Marnes de Pantin	3	10,7	11,6	11,3	11,3

**Tableau 2. Module sécant stabilisé d'élasticité de la matrice des colonnes de jet grouting**

E <sub>c,s</sub> (MPa)	Nombre	Min.	Max.	Moyenne	
				arithmétique	harmonique
Argiles Vertes	14	300	1000	500	450
Marnes de Pantin	3	410	550	500	490

L'analyse des résultats des essais en compression simple montre des résultats très dispersés. En effet, aussi bien les résistances en compression uniaxiale que les modules sécants stabilisés d'élasticité sont très variables selon les profondeurs et non corrélés avec les paramètres du jet grouting. Une part de variabilité des résultats peut s'expliquer par la présence de nodules d'argile inclus dans les échantillons. Néanmoins, on constate que les valeurs de compression simple sont globalement au-dessus de celles des retours d'expérience (Bustamante, 2002) jusqu'ici obtenues pour des colonnes en simple jet.

### 3 Auscultation

#### 3.1 Moyens d'auscultation

Le dispositif d'auscultation, destiné à suivre les déformations liées aux travaux comprend :

- un théodolite automatique accompagné de 73 cibles de haute précision au sol et sur des bâtiments avoisinants,
- 4 forages équipés avec des extensomètres, 4 forages équipés avec des inclinomètres et 2 forages équipés simultanément en inclinomètres et en extensomètres
- 1 extrusomètre implanté dans l'axe de la galerie,
- 3 profils de convergence en puits avec un suivi manuel et 4 profils de convergence dans la demi-section supérieure avec un suivi automatique en continu,
- 2 sections de soutènement de la galerie équipée en jauges de contraintes.

Pendant le terrassement du puits et de la galerie Calmette, les différents dispositifs d'auscultation enregistrent les déformations du terrain et des ouvrages qui sont liées en grande partie aux travaux en cours, mais aussi aux effets différés des travaux précédents : réalisation des colonnes de jet, du boulonnage de front et de la voûte parapluie. En effet, la réalisation des colonnes de jet grouting et de la voûte parapluie dans des terrains à très faible perméabilité a provoqué des soulèvements importants du terrain allant jusqu'à 35 mm juste après la fin de la réalisation des colonnes de jet grouting et jusqu'à 25 mm après la fin de la réalisation de la voûte parapluie et du renforcement du front de taille.

### 3.2 Evolution des déformations en surface lors du terrassement de la demi-section supérieure

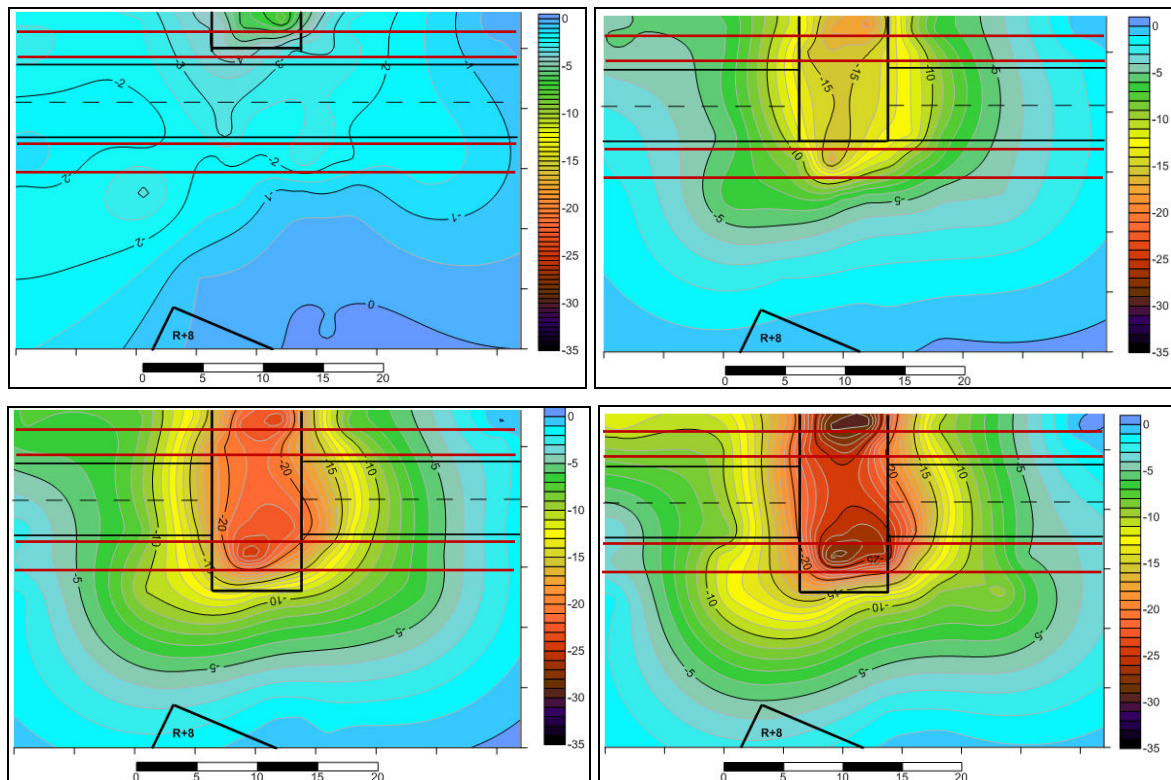
Le théodolite automatique a permis de suivre en continu l'évolution des tassements pendant le terrassement du puits et le creusement de la galerie, puis pendant le mois d'auscultation sans travaux. Ainsi, il a été possible d'analyser l'évolution de la cuvette des tassements au niveau de 4 lignes de mesures en surface, perpendiculaires à l'axe de la galerie (tableau 3 et figure 3).

**Tableau 3. Evolution des tassements dans l'axe de la galerie**

Tassement	lors du passage du front de taille		Final (mm)
	(mm)	(% du tassement final)	
Ligne 1	6	20	30
Ligne 2	7	27	26
Ligne 3	13	48	27
Ligne 4	19	68	28

L'analyse des tassements à différents moments permet de constater que :

- quand le front de taille se situe au droit de la coupe considérée, les tassements en surface atteignent une valeur variant entre 6 et 19 mm dans l'axe de la galerie,
- pour les deux lignes de mesure proches du puits, le frottement des terrains sur le soutènement du puits réduit significativement les tassements en surface avant le passage du front de taille,
- à la fin de la période d'auscultation, les tassements varient entre 6 et 19 mm au bord de l'emprise de la galerie et entre 25 et 30 mm dans l'axe de la galerie (figure 3).



**Figure 3. Isovaleurs des tassements (mm), la galerie est figurée par le rectangle noir de taille croissante. Les lignes rouges correspondent aux lignes de mesures en surface : 1 à 4 de haut en bas. En haut : terrassement de la passe n° 05 (à gauche) et n° 14 (à droite). En bas : fin de terrassement de la galerie (à gauche) et fin du mois d'auscultation (à droite)**

### 3.3 Cohérence des mesures et comportement global des ouvrages

L'examen global des données d'auscultation permet de mettre en lumière plusieurs particularités du comportement de l'ouvrage :

- les tassements observés sont importants et atteignent une amplitude maximale de 30 mm environ lors de l'excavation de la demi-section supérieure de la galerie,
- les extensomètres montrent de manière nette un tassement des terrains situés latéralement aux piédroits de la galerie entre 6 et 14 m de profondeur et un comportement de tassement monolithique des terrains situés au-dessus de la galerie,
- les tassements en surface déterminés à l'aide des extensomètres (points fixes en profondeur sous la galerie) et les tassements mesurés au niveau des points topographiques sont cohérents,
- l'extrusion du front de taille mesurée reste faible avec en moyen 1 à 2°mm entre chaque passe de terrassement, soit un volume total d'extrusion du front sur le linéaire d'excavation correspondant à une avancée du front d'environ 1,8°cm à 3,6 cm (pour 18 passes de terrassement),
- les déformations mesurées sur les cintres sont très faibles (1 à 2 mm de convergence des cintres et 5 à 6 mm de tassement d'ensemble) et sont apparues de manière différée par rapport à la pose des cintres (5 à 10 jours).

## 4 Rétro-analyse de calage des paramètres géotechniques à l'aide d'une modélisation éléments finis 3D

Les modélisations aux éléments finis 3D conduites par GEOS avec le logiciel Z-Soil, de type rétro-analyse de calage des paramètres géotechniques, ont permis de déterminer des paramètres géotechniques de sols à partir du comportement de l'ouvrage réel, mais également de valider l'efficacité de la voûte parapluie et du boulonnage de front par clous en fibre de verre.

Les paramètres géo-mécaniques des terrains ajustés au moyen de la modélisation intègrent à la fois le comportement des sols et les effets spécifiques liés aux méthodes d'excavation et de soutènement de l'ouvrage. La rétro-analyse consiste ici à caler le modèle numérique sur les données d'auscultation en faisant varier différents paramètres. Dans le détail, l'étape de rétro-analyse proprement dite a été précédé par :

- une première étape de modélisation avec les caractéristiques de sol du marché de travaux et le phasage de construction théorique qui a servi pour le dimensionnement des soutènements de l'ouvrage,
- une étude de sensibilité du modèle numérique pour étudier l'impact de différentes données d'entrée sur les résultats des modélisations.

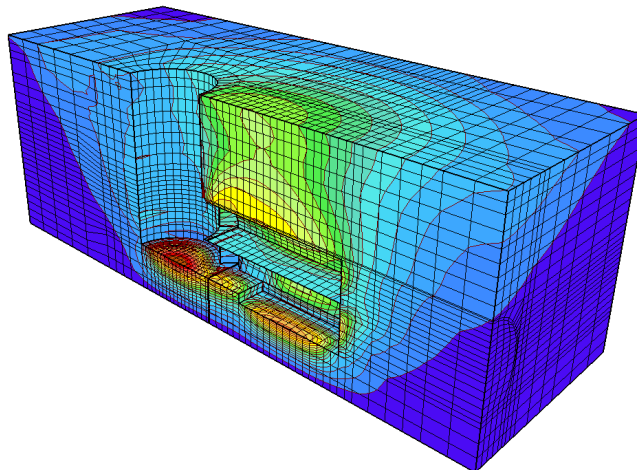


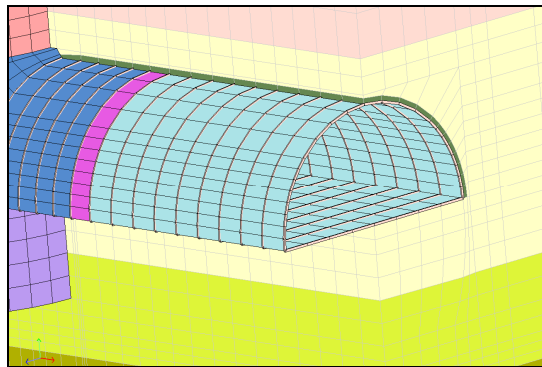
Figure 4. Modèle EF 3D complet - Déplacements verticaux

Pour cela, deux modèles ont été créés en utilisant le logiciel Z-Soil.

- un modèle 2D de la demi-section supérieure de la galerie, qui a permis de réaliser une partie de l'étude paramétrique,
- un modèle 3D complet modélisant le puit et la galerie avec le phasage de construction, les renforcements de voûte et le clouage du front de taille. Il a été utilisé pour réaliser une rétro-analyse sur la base des données d'auscultation (figure 4).

Les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin ont été modélisées à l'aide d'une loi de comportement HSM. Le soutènement du puits et de la galerie ont été modélisés de deux manières distinctes :

- puits : il a été modélisé à l'aide d'élément « coque » (shell) avec les caractéristiques d'une section mixte déduites des caractéristiques des cintres et du béton projeté.
- galerie : les cintres ont été modélisés comme élément « poutre » (beam) avec les caractéristiques géométriques de la section et le module d'Young de l'acier, et le béton projeté comme élément « coque » (shell) intégrant son épaisseur et son module d'Young (figure 5).



**Figure 5. Modélisation du soutènement de la galerie**

Le calcul initial de dimensionnement de l'ouvrage (étude d'exécution) et l'étude de sensibilité ont donné des prévisions de tassements en surface très inférieures à ceux qui ont été observés au cours du chantier et de la phase d'auscultation de 1 mois après travaux. La rétro-analyse de calage géotechnique des paramètres géo-mécaniques montre que les simulations menées en dégradant seulement les paramètres de sol ne permettent pas de recalibrer le modèle numérique 3D sur les observations de terrain (extrusion du front, tassement en surface, déformation des piédroits). En effet, l'obtention de tassements numériques identiques à ceux mesurés sur site par dégradation des paramètres mécaniques des sols ne peut pas être obtenue par des variations de paramètres mécaniques dans une plage de valeurs réalistes. D'autres pistes d'analyse ont alors été poursuivies pour faire converger le modèle numérique vers les déformations mesurées in-situ. Il a été notamment retenu une activation du soutènement décalée de 2, 3, 4 et 5 passes à l'arrière du front de taille, permettant ainsi un déconfinement plus important des terrains avant la mobilisation du soutènement.

Les différentes analyses paramétriques conduites ont montré que seules des simulations autorisant une plus grande convergence des terrains, en retardant la mise en place du soutènement de la galerie, permettent de retrouver des tassements en surface similaires à ceux mesurés. Le paramètre déterminant l'amplitude des tassements induits en surface par l'excavation de la demi-section supérieure d'une galerie, à faible profondeur dans les Argiles Vertes, est la décompression et la déformation des terrains avant mise en place du soutènement. La modélisation avec une activation du soutènement 2 à 5 passes après l'excavation est ainsi une façon pertinente d'aborder la rétro-analyse sur cet ouvrage.

Les calculs de rétro-analyse ont également été l'occasion de comparer deux méthodes de modélisation du renforcement par clouage du front de taille par des boulons en fibre de verre. L'effet du boulonnage du front a été modélisé en simulant le renforcement soit par un milieu équivalent, soit par modélisation unitaire des boulons. Les résultats montrent que, dans notre cas d'étude, le matériau équivalent pour le renforcement du front de taille est une façon adéquate, pertinente et rapide de modélisation qui permet d'obtenir des résultats très similaires (2 à 4 % d'écart sur les tassements calculés en surface) à ceux d'une modélisation unitaire des boulons de renforcement.



## 5 Conclusion

Les travaux, auscultations et modélisations mises en œuvre sur le puits et la galerie Calmette dans le cadre du projet de prolongement de la ligne 11 de la RATP ont apporté de nombreux éléments techniques de compréhension du comportement des sols et des ouvrages géotechniques.

Pour le renforcement des argiles par jet grouting, la technique du jet double avec pré-découpage dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin a permis d'obtenir localement une importante amélioration des caractéristiques mécaniques par substitution quasi intégrale des sols par du coulis ciment. La technique de jet triple quant à elle s'est révélée moins efficace pour la mise en œuvre de colonnes de jet grouting dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin.

Lors des travaux de terrassement de la demi-section supérieure de la galerie, le dispositif d'auscultation a mis en évidence des tassements importants en surface. Ces déformations résultent des travaux en cours, mais également pour une certaine partie des effets différés des travaux précédents, tels que la réalisation des colonnes de jet, du boulonnage de front et de la voûte parapluie.

Les études d'exécution de l'ouvrage au moyen des paramètres géomécaniques du marché de travaux, l'étude de sensibilité du modèle ainsi que les calculs de rétro-analyse ont montré qu'une simple dégradation des paramètres de sol dans une plage de valeurs réalistes n'était pas suffisante pour recalculer le modèle numérique 3D sur les déformations observées *in situ* et qu'il est très important de pouvoir intégrer dans la modélisation les conditions réelles de réalisation des terrassements et des soutènements. Ces adaptations de la modélisation, pour être pertinentes, nécessitent un suivi renforcé des conditions réelles d'exécution de l'ouvrage.

Ces différentes analyses montrent d'une part qu'une modélisation par éléments finis 3D est importante car elle fournit des éléments fiables de compréhension du comportement des sols, des ouvrages et de leur interaction, mais d'autre part qu'une telle approche n'est pas en capacité d'intégrer tous les paramètres les plus complexes des travaux géotechniques. Ainsi, il convient d'avoir toujours une approche prudente et raisonnable dans l'interprétation des modélisations par éléments finis 3D, en retenant qu'une modélisation complexe peut seulement chercher à se rapprocher au mieux des observations faites sur le terrain, mais ne permettra jamais de représenter tous les mécanismes en jeu, qui ne peuvent pas toujours être compris dans toute leur complexité et tous leurs détails.

## 6 Références

- Bustamante, M., 2002. Les colonnes de jet grouting : dimensionnement et contrôle. Séminaire Franco-Tunisien : Pathologie des sols et des fondations, Hammamet, 7-8 février 2002.
- Dias, D., Kastner R., Jassionnesse C, 2002. Sols renforcés par boulonnage. Etude numérique et application au front de taille d'un tunnel profond. Géotechnique, N 01, Vol.GE 52. pp.15-27.
- Guilloux, A., 2016. Les projets d'ouvrages géotechniques : apports de l'observation et de la modélisation. Revue Française de Géotechnique. 2016, 146, 1.
- Jassionnesse, C., 1998. Contrôle de la déformation du massif renforcé par boulonnage au front de taille d'un tunnel. Thèse INSA Lyon, 1998.