PUITS ET GALERIE D'ESSAIS CALMETTE (LIGNE 11) : EFFICIENCE DU JET GROUTING ET DU BOULONNAGE DE FRONT DANS LES ARGILES VERTES

CALMETTE FULL SCALE TEST SHAFT AND GALLERY (LINE 11): EFFICIENCY OF JET GROUTING AND OF THE TUNNEL HEAD REINFORCEMENT IN PLASTIC CLAYS

Stéphane CURTIL[1], Benedikt STÜTZL[1], Cyril COPPALLE[2]
[1] *GEOS Ingénieurs Conseils, Rueil-Malmaison, France*
[2] *Keller Fondations Spéciales, Rungis, France*

RÉSUMÉ – La construction anticipée du puits et de la galerie Calmette avait pour objectif l'étude de l'efficience de la technique de jet-grouting et du clouage du front avec des boulons en fibre de verre dans les Argiles Vertes pour optimiser ensuite les dimensionnements des ouvrages principaux du prolongement de la ligne 11. Pour ce faire, une auscultation géotechnique et topographique exhaustive a été mise en place et une série d'essais géotechniques a été réalisée.

ABSTRACT – The anticipated construction of the Calmette shaft and gallery serves the purpose of studying of the effectiveness of the jet grouting technology in plastic clays and of the tunnel head reinforcement using fiberglass in the Argiles Vertes (plastic clay) in order to maximise the final design of the main works for the extension of the subway line 11. Therefore, an exhaustive geotechnical and topographic auscultation and monitoring program were set up.

1. Introduction

Le creusement 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. 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 avait comme objectif l'étude de l'efficience de la technique de jet grouting dans les argiles plastiques et l'étude de l'efficacité du clouage du front de taille avec des boulons en fibre de verre dans les Argiles Vertes, 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 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.

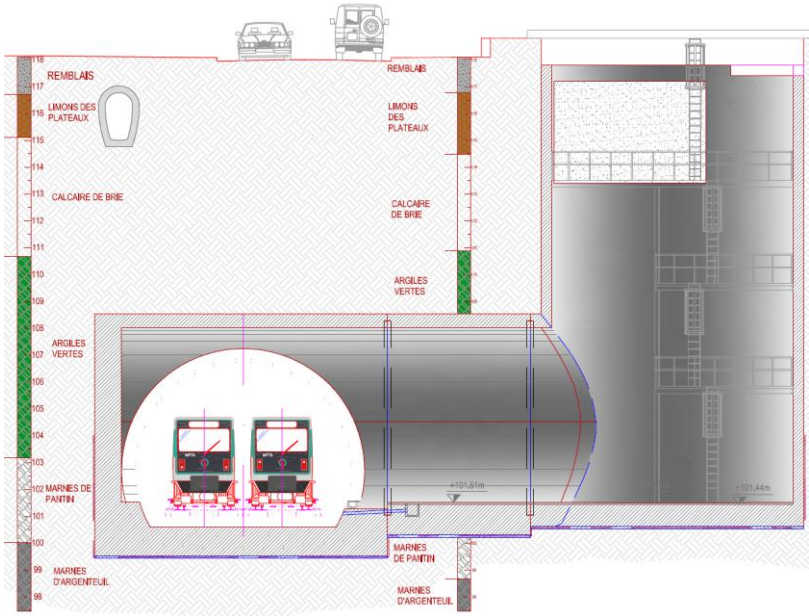

Figure 1. Vue en coupe du puits et de la galerie Calmette.

Pour suivre les déformations du terrain, du puits et de la galerie, un dispositif exhaustif d'auscultation géotechnique et topographique a été mis en place par GEOS. Il comprend un suivi topographique continu et automatisé 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. Au total 25 boulons en acier de 20 m de longueur et 44 boulons en fibres de verre entre 14 et 16 m de longueur ont été mis en place.

Les longueurs des passes de terrassement 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'essai de jet grouting

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. Différentes configurations de paramètres de jet (pression et vitesse de rotation/remontée) ont été testées. L'objectif visé pour le diamètre des colonnes était de 1 m.

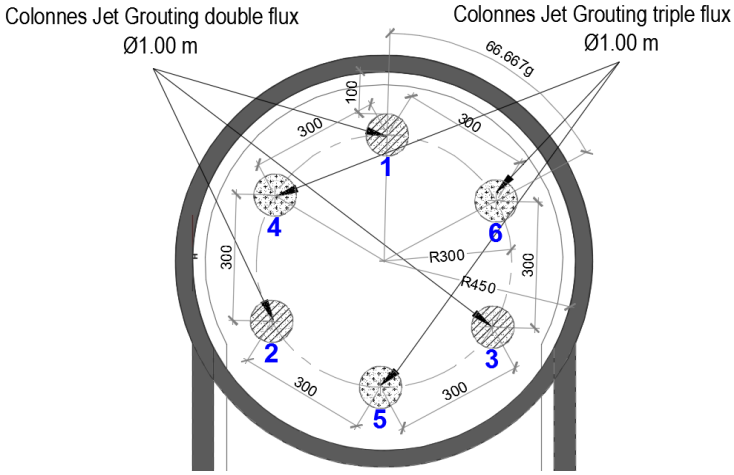

Figure 2. Implantation des colonnes de jet dans le futur puits.

Une série d'essais en laboratoire et in situ a permis de caractériser la résistance à la compression et les modules de déformation 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, puis une série d'essais en compression simple en laboratoire,
- des essais dilatométriques dans les sondages carottés verticaux.

Figure 3. 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 faible diamètre (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 (figures 3 et 4). 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).

Figure 4. Exemple de blocs de colonnes réalisées en jet double extraits lors du terrassement

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.

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

R_c (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

$E_{c,s}$ (MPa)	Nombre	Min.	Max.	Moyenne	
				arithmétique	harmonique
Argiles Vertes	14	300	1000	500	450
Marnes de Pantin	3	410	550	500	490

3. Auscultation et analyse de l'efficience du boulonnage du front

3.1. Moyens d'auscultation

Le dispositif d'auscultation, destiné à suivre les déformations liées aux différentes phases travaux était composé de :

- 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.

Lors de la réalisation des colonnes de jet, de la voute divergente et du renforcement de front de taille le théodolite automatique était en place et a permis de suivre les déformations en surface pendant ces phases de travaux. Ces mesures ont permis de montrer que 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.

Pendant le terrassement du puits et de la galerie Calmette, les différents dispositifs d'auscultation ont enregistré les déformations du terrain et des ouvrages qui ont été 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.

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

Les mesures topographiques par 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 (lignes rouges 1 à 4 de haut en bas dans la figure 5), perpendiculaires à l'axe de la galerie. La figure 5 montre les isovaleurs de tassement pour les passes de terrassement n° 05 (en haute à gauche) et n° 14 (à droite), en fin de terrassement de la galerie (en bas à gauche) et à la fin du mois d'auscultation (en bas à droite). La galerie est figurée par le rectangle noir de taille croissante.

L'analyse des tassements tout au long du creusement de la demi-section supérieure de la galerie et du mois d'auscultation 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,
- à la fin de la période d'auscultation, les tassements en surface 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 5).

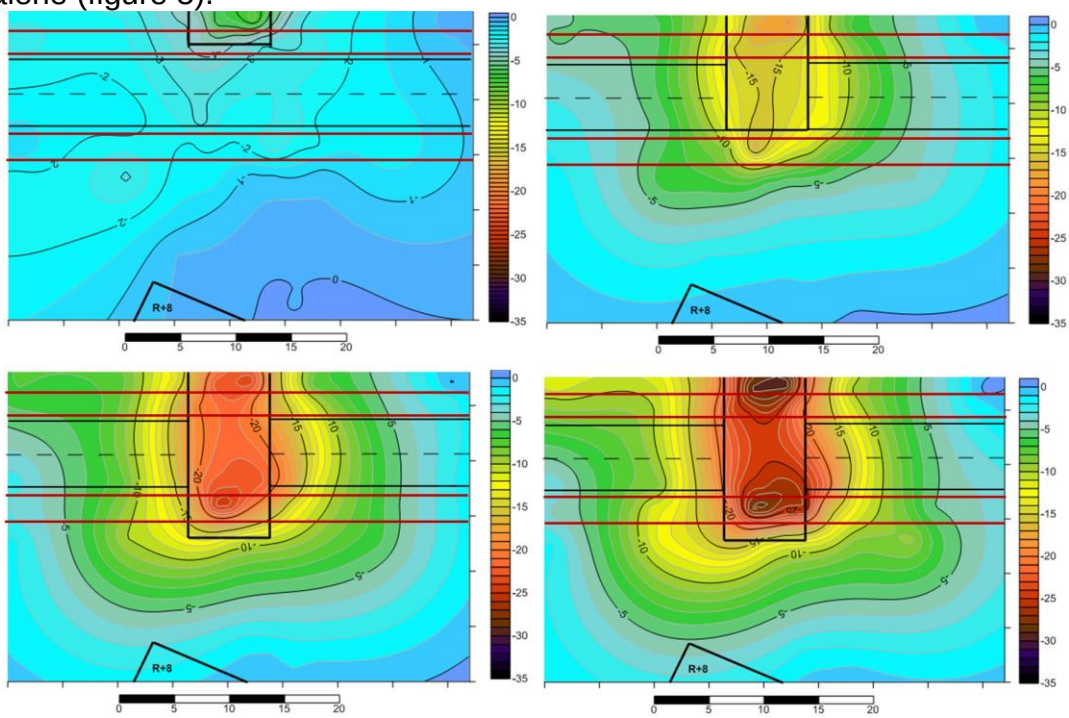

Figure 5. Vue en plan de l'évolution des tassements en surface (isovaleurs en mm) lors de l'excavation de la galerie (rectangle noir).

3.3. Extrusion et analyse de l'efficience du boulonnage du front

Préalablement aux travaux de terrassement de la demi-section supérieure, GEOS a estimé, à l'aide du logiciel Geotunnel, l'extrusion moyenne du front de taille à 1 cm en tenant compte du renforcement du front de taille et des caractéristiques intrinsèques des sols. Les figures 6 et 7 montrent l'implantation des boulons en acier et en vibre de verre ainsi que la position de l'extrusomètre (l'étude d'exécution a été réalisée par le bureau d'études ENSER).

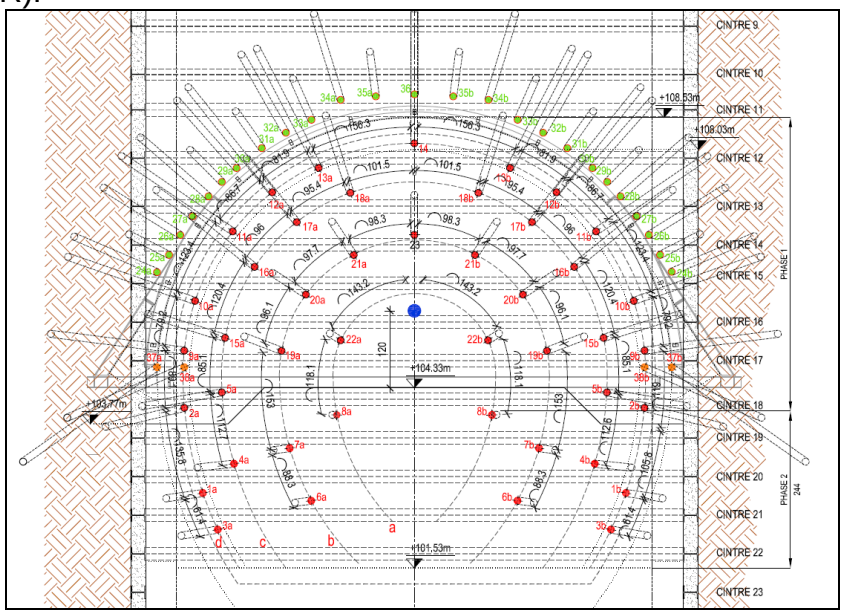

Figure 6. Vue sur le front de taille avec renforcement. En rouge : boulon en vibre de verre – en vert : boulon en acier de la voute divergente – en bleu : extrusomètre.

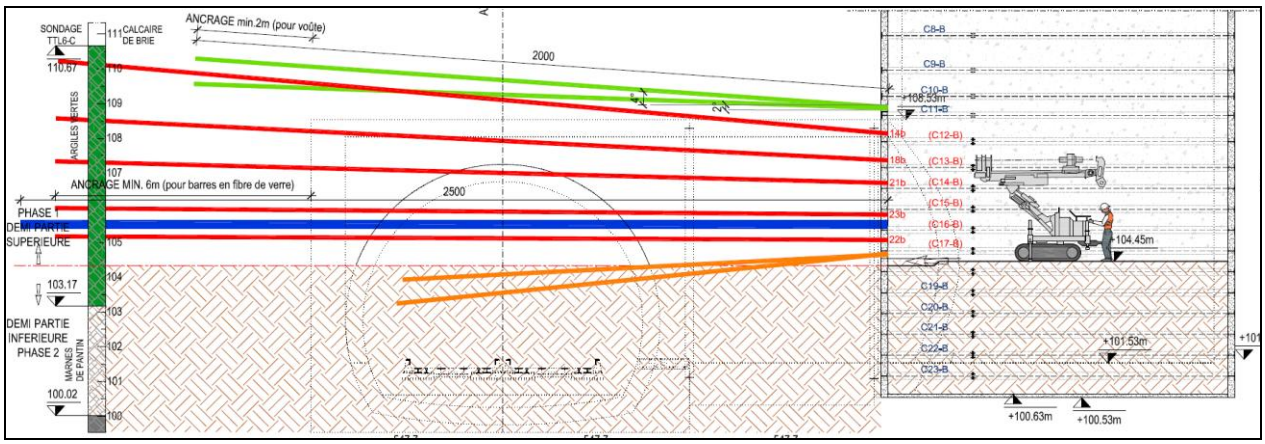

Figure 7. Vue longitudinale du renforcement du front de taille

Pour analyser l'efficacité du renforcement du front de taille, GEOS a analysé :

- la part des tassements en surface acquis en amont du front de taille,
- les courbes extrusométriques pendant la réalisation de l'ouvrage de raccordement entre le puits et la galerie,
- les tassements en surface pendant la réalisation de l'ouvrage de raccordement.

Les courbes extrusométriques ainsi que les tassements en amont du front de taille résultent des caractéristiques intrinsèques du sol et du renforcement du front de taille seulement. Ainsi, pour exclure les effets de la voûte parapluie sur les tassements observés, GEOS a analysé les tassements en surface et les courbes extrusométriques lors de la réalisation de l'ouvrage de raccordement avant le début du terrassement de la galerie.

La figure 8 montre les trois mesures extrusométriques effectuées pendant la réalisation de l'ouvrage de raccordement et avant le début du terrassement de la galerie. On note qu'à la fin de la réalisation de cet ouvrage l'extrusion atteint une valeur de 7 mm au niveau de la dernière bague qui se situe à environ 90 cm du front de taille. L'extrapolation au niveau du front donne une valeur de 9 mm. Selon la position de l'extrusomètre dans la section, il est retenu que la valeur mesurée correspond à une moyenne. La valeur calculée de l'extrusion moyenne (1 cm) est donc très proche de l'extrusion moyenne mesurée (9 mm).

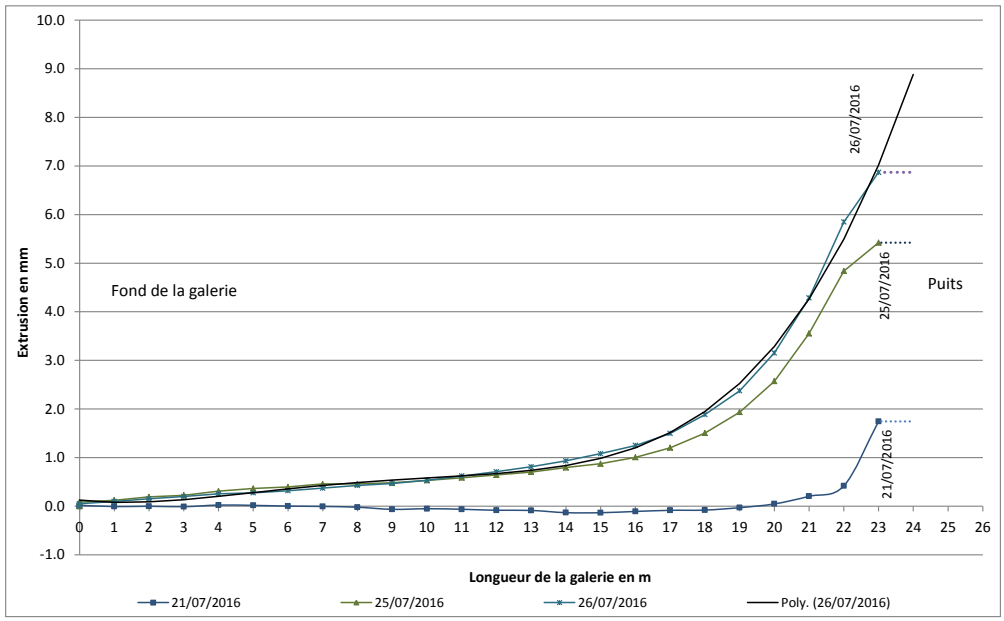

Figure 8. Analyse des courbes extrusométriques avant le terrassement de la galerie

Pour analyser la cohérence entre l'extrusion et les tassements en surface, GEOS a comparé le volume de la cuvette de tassement en surface et le volume de sol lié à l'extrusion au front de taille. La figure 9 montre la vue en plan de la zone pour laquelle le volume en surface a été calculé, la position de l'ouvrage de raccordement est figurée par le rectangle noir, la future galerie est figurée en pointillés noir.

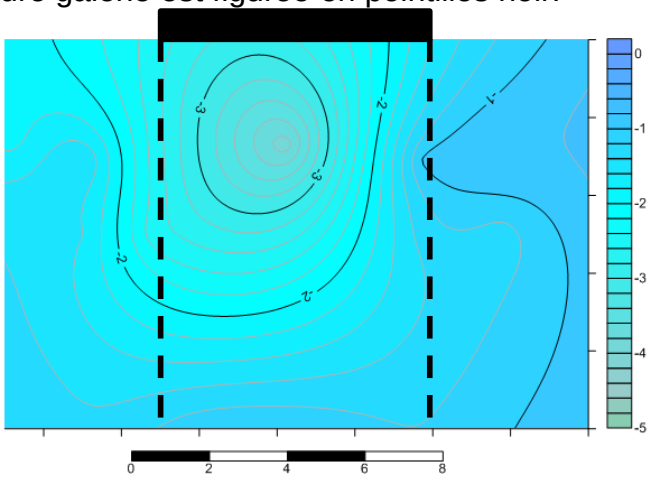

Figure 9. Cuvette de tassements lors de la réalisation de l'ouvrage de raccordement

On obtient ainsi, en surface, un volume de 0,26 m^3 et un volume d'extrusion de 0,23 m^3 en profondeur. Etant du même ordre de grandeur, notamment vis-à-vis des faibles amplitudes de tassement en surface et des précisions de mesures, ces volumes sont cohérents entre eux. Le tassement en surface atteint une valeur maximale d'environ 3,5 mm. Le renforcement du front de taille a donc permis de limiter les tassements liés à l'extrusion du front de taille à quelques millimètres.

3.4. 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 (figure 7),
- 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 moyenne 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 totale cumulée des terrains 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. Conclusions

Les travaux et auscultations 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 bien 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 phases d'avancement du front de taille, 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. Le renforcement du front de taille a permis de limiter les tassements liés à l'extrusion à quelques millimètres seulement et a montré ainsi son efficacité.

5. Références bibliographiques

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.

Jassionnesse, C., 1998. Contrôle de la déformation du massif renforcé par boulonnage au front de taille d'un tunnel. Thèse INSA Lyon, 1998.