

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Effets du creusement par tunnelier à pression de terre: Cas d'une section de mesure sur le chantier du métro de Toulouse

Impact of shallow earth-pressure balance tunneling: A monitoring section of the new Toulouse subway line

T. Bonnet-Eymard, F. Emeriault & R. Kastner
URGC Géotechnique, INSA Lyon, France

J.-Y. de Lamballerie
Maîtrise d'Oeuvre du Métro de l'Agglomération Toulousaine, Toulouse, France

J. Robert
Arcadis, Paris, France

RÉSUMÉ

Lors du creusement de la ligne B du métro de Toulouse, plusieurs sections de mesure ont été installées pour évaluer l'impact du creusement par Tunnelier à Pression de Terre sur le massif de sol environnant et le bâti. Cette communication présente les résultats d'une section incluant des mesures inclinométriques, extensométriques en forage, des relevés topographiques de précision du sol de surface et du bâti existant ainsi que des mesures de déformation dans les voussoirs en béton. Les résultats inhabituels obtenus s'expliquent en partie par les caractéristiques de l'horizon molassique surconsolidé traversé. Les paramètres de fonctionnement du tunnelier (tels que pression au front et volume injecté et pression d'injection du mortier de bourrage) sont également analysés.

ABSTRACT

The results of a shallow tunnelling monitoring section of Toulouse subway line B are presented: they include inclinometric casings, multipoint borehole extensometers, precision levelling of both the ground surface and an existing 8-storey building and strain measurements in the precast concrete lining segments. The geology mainly consisting in overconsolidated molasses partly explains the unusual observed movements. The analysis also takes into account the recorded parameters of the Earth-Pressure balanced Tunnel Boring Machine such as pressure at the excavation face and grouting pressure and injected volume of grout.

1 INTRODUCTION

L'impact que peut avoir le creusement de tunnels à faible profondeur en site urbain sur le massif de sol et le bâti existant a fait l'objet de nombreux travaux de recherche et de la mise au point de recommandations ou réglementations nationales ou internationales (AFTEC, 1995; Mair, 1993; Burland et al., 2001). Ces estimations sont issues de développements théoriques et numériques mais également d'observations in situ sur des projets de tunnels utilisant des techniques de creusement diverses. Dans le cas de tunneliers utilisant une technique de stabilisation du front (pression de boue, pression de terre ou d'air), les sollicitations induites dans le massif de sol sont complexes et ne sont actuellement représentées que de façon simplifiée, que ce soit au niveau de l'excavation proprement dite avec effet de surcoupe ou non, de l'avancée du bouclier ou de l'injection du mortier de bourrage dans le vide annulaire (Dias et al., 2000). De plus, les observations in situ rapportées dans la littérature correspondent généralement à des projets différents en diamètre du tunnel, profondeur, nature et caractéristiques mécaniques des terrains traversés ainsi que paramètres moyens de fonctionnement du tunnelier (pression de stabilisation, pression et volume de mortier injecté entre autres).

Les travaux de la nouvelle ligne de métro de Toulouse font intervenir pour la réalisation des 12,6 km de tunnel, quatre tunneliers différents (utilisant trois techniques de stabilisation du front différentes). De plus, la profondeur du tunnel et les horizons géologiques traversés ainsi que les conditions hydrogéologiques sont sensiblement identiques sur toute la longueur du projet. Le projet de recherche METROTOUL vise donc à établir une comparaison des effets du creusement de tunnel suivant le type de machine utilisé et les paramètres moyens de fonctionnement adoptés par l'équipe de pilotage. On trouvera dans Emeriault et al. (2005) un exemple de telles comparaisons sur plusieurs sections de mesure profondes.

La présente communication rapporte les résultats de l'instrumentation mise en place sur une section de mesure du

Lot n°5 réalisé par la technique de tunnelier à pression de terre, en particulier les effets induits sur le sol et le bâti existant.

Le tunnelier de 7,72 m de diamètre traverse à ce niveau un horizon molassique argileux surconsolidé saturé sensiblement homogène (même si l'on peut noter la présence localisée de lentilles sableuses) surmonté d'alluvions sablo-limoneuses. Les tableaux 1 et 2 donnent les caractéristiques essentielles du tunnel et de l'horizon molassique.

Tableau 1. Caractéristiques de la section de mesure.

Couverture H (m)	9,20
Diamètre extérieur du bouclier D (m)	7,72
Épaisseur du vide annulaire e (m)	0,12
H/D	1,19
Niveau de la nappe (m)	- 1,5 / T.N.
Couverture molassique (m)	7,70
Présence de lentilles sableuses	oui
Contrainte verticale en clé estimée σ_{v0} (kPa)	191

Tableau 2. Caractéristiques de la molasse.

Poids volumique γ (kN/m ³)	22
Résistance au cisaillement c_u (kPa)	300
Cohésion c' (kPa)	30
Angle de frottement ϕ' (degrés)	32
Coefficient des terres au repos K_0	[1,0 ; 1,5]

2 PRÉSENTATION DE LA SECTION DE MESURE

L'équipement de la section comporte trois tubes inclinométriques ainsi que cinq extensomètres de forage multi-points avec acquisition automatique (une séquence de mesure complète toutes les cinq secondes). Une description complète de cette instrumentation est donnée sur les Figures 1 et 2. De plus, lors du passage du tunnelier, un nivellement de précision a été effectué en fin de foration de chaque anneau (1,4 m de longueur). Ces nombreux relevés concernent non seulement les têtes d'extensomètres, mais aussi des repères

implantés sur la chaussée et sur un bâtiment de type R+8 (structure sensiblement monolithique en béton armé). En outre, les déformations du revêtement du tunnel ont été mesurées dans l'anneau posé au droit de la section par cinq paires de jauges extensométriques à corde vibrante situées dans chacun des voussoirs constituant l'anneau (cinq voussoirs universels et un voussoir de clé). La section de mesure se situe environ 30 m après la sortie du tunnelier d'une future station (boîte rectangulaire de 15 m x 50 m en plan et 20 m de profondeur réalisée à l'aide de parois moulées de 1 m d'épaisseur).

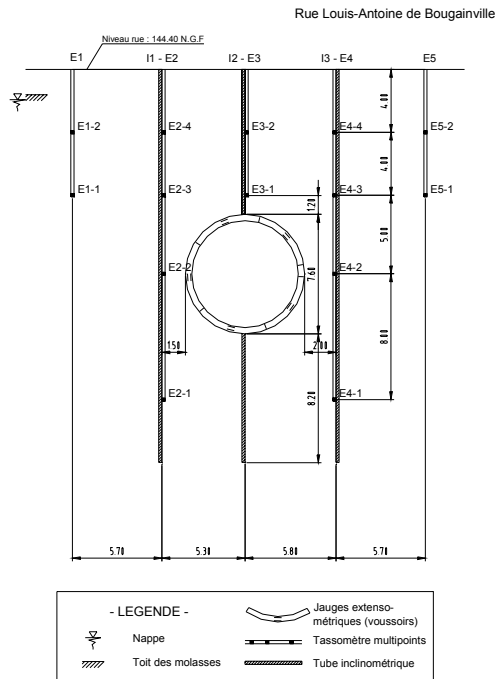


Figure 1. Description de la section de mesure

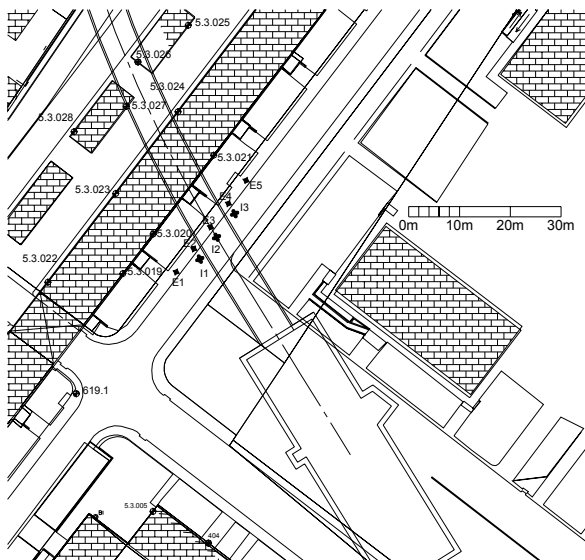


Figure 2. Positionnement en plan des différents instruments de mesure (en gris, les bâtiments intéressés par le creusement du tunnel)

3 AVANCEMENT ET PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT DU TUNNELIER

Le tunnelier présente au voisinage de la section (de -15 à +20 m) une vitesse de progression sensiblement constante de 0,5 m/h. Un arrêt de deux jours (pour le week-end) a été observé alors que la roue de coupe était à une distance +20 m de la section.

Les paramètres principaux enregistrés par le tunnelier sont reportés sur les Figures 3 et 4 : la pression de confinement du front P_{front} (rapportée à la contrainte verticale initiale en clé σ_{v0}) est représentée sur la Figure 3 alors que la Figure 4 montre l'évolution des paramètres d'injection du vide annulaire (pression d'injection $P_{\text{injection}}$ moyenne par anneau rapportée à σ_{v0} ainsi que le volume de mortier injecté $V_{\text{injection}}$ rapporté au volume théorique du vide annulaire $V_{\text{théorique}}$). Les principaux résultats sont présentés dans le tableau 3.

Après la sortie de la station, le rapport $P_{\text{front}}/\sigma_{v0}$ croît rapidement jusqu'à atteindre une valeur fluctuant entre 0,5 et 1,1. Ces valeurs sont moins stables que celles mesurées sur d'autres sections (Emeriault et al., 2005) mais restent voisines des valeurs observées par ailleurs (approximativement 0,75). Ces valeurs permettent d'assurer, dans le contexte géologique de l'agglomération toulousaine, une stabilité suffisante du front d'excavation puisque qu'aucun mouvement de sol majeur n'est mesuré à l'approche ou lors du passage du bouclier.

Les paramètres d'injection du vide annulaire s'avèrent être sensiblement constants sur la plage [-20 m ; +50 m] autour de la section de mesure. La pression moyenne d'injection est légèrement supérieure à la contrainte totale verticale initiale en clé σ_{v0} (en moyenne 1,05) et le volume de mortier injecté est supérieur au volume théorique (en moyenne un rapport de 1.1 est observé). Ces valeurs sont à rapprocher de celles obtenues par Emeriault et al. (2005) : $P_{\text{injection}}/\sigma_{v0}$ respectivement égaux à 1,00 et 1,24 pour un rapport $V_{\text{injection}}/V_{\text{théorique}}$ égal à 1,20 et 1,18. Ces valeurs induisent, comme il sera constaté dans le paragraphe suivant, un soulèvement du sol de surface au moment de l'échappement de la jupe et de l'injection, puis un tassement final millimétrique.

Tableau 3. Paramètres moyens de fonctionnement du tunnelier.

Pression de confinement du front P_{front} (kPa)	[85 ; 220]
Pression interstitielle en clé U (kPa)	73
Rapport $P_{\text{front}}/\sigma_{v0}$	[0,5 ; 1,1]
$P_{\text{injection}}$ (kPa)	476
Rapport $P_{\text{injection}}/\sigma_{v0}$	1,05
Rapport $V_{\text{injection}}/V_{\text{théorique}}$	1,11

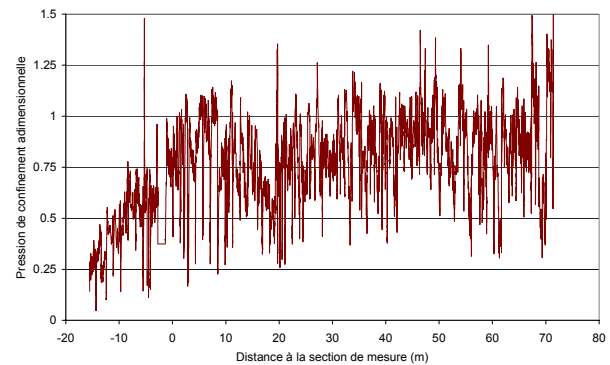


Figure 3. Évolution de $P_{\text{front}}/\sigma_{v0}$ avec l'avancement du tunnelier

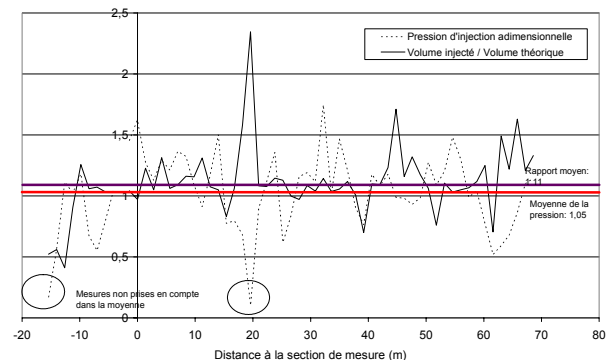


Figure 4. Évolution de $P_{\text{injection}}/\sigma_{v0}$ et $V_{\text{injection}}/V_{\text{théorique}}$

4 DÉPLACEMENTS AU SEIN DU MASSIF DE SOL

Les déplacements au sein du massif de sol sont mesurés par des inclinomètres et extensomètres multi-points qui permettent d'obtenir une cartographie des mouvements induits par le passage du tunnelier. Ces mesures sont complétées par un relevé topographique des têtes d'extensomètres. La Figure 5 montre que l'ensemble des travaux de creusement se traduit par des mouvements du sol de surface peu importants : on observe au maximum un tassement de surface de l'ordre de 1,5 mm. A l'approche de la roue de coupe, les mouvements observés restent dans l'incertitude de mesure. En revanche pour une position de la roue de coupe voisine de + 6 m, on voit apparaître un soulèvement de la surface du sol qui peut être attribué à un effet de l'injection du mortier de bourrage. Par la suite, cet effet disparaît (le mortier perd sa consistance liquide par essorage au bout d'une dizaine de mètres) et un tassement progressif est observé qui se stabilise rapidement.

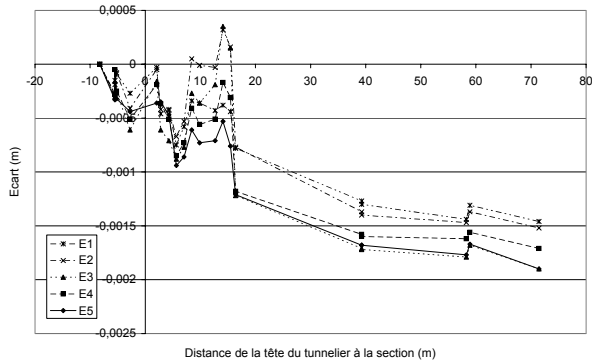


Figure 5. Evolution de l'altitude des têtes d'extensomètres

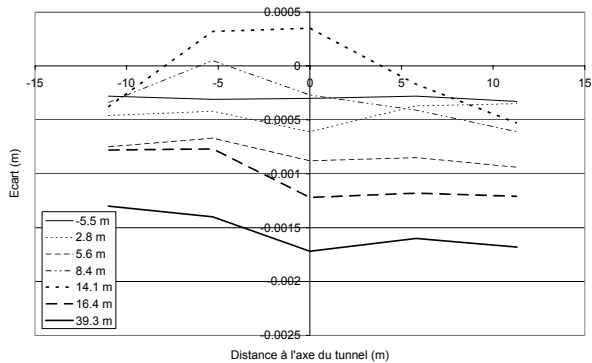


Figure 6. Représentation de la surface du sol pour différentes positions du tunnelier par rapport à la section de mesure (référence prise à -8,25 m).

Une représentation de ces résultats en terme de cuvette transversale (Fig. 6) montre que les soulèvements sont restreints à une bande de l'ordre de 15 m de largeur totale, mais qu'en revanche les tassements sont plus étendus, la largeur de la cuvette dépassant 25 m. La succession soulèvement/tassement induit ainsi un profil de sol en surface assez éloigné des formes habituelles observées (représentées par une courbe de Gauss dans l'approche de Peck par exemple).

Les mouvements horizontaux au sein du massif sont nettement plus importants que les mouvements verticaux. La Figure 7 montre que les mouvements transversaux correspondent à une convergence progressive des terres vers le tunnel de l'ordre de 6,3 mm maximum en clé. Ceux-ci apparaissent alors que la roue de coupe a dépassé la section de 5 m environ. Ces mouvements sont stabilisés après environ 30 m, c'est-à-dire après essorage et consolidation du mortier de bourrage. Le rapport important (environ 4) constaté entre les mouvements horizontaux et verticaux dans le massif peut être attribué au caractère surconsolidé de la molasse et à la valeur de K_0 supérieure à 1,0 (vraisemblablement proche de 1,2).

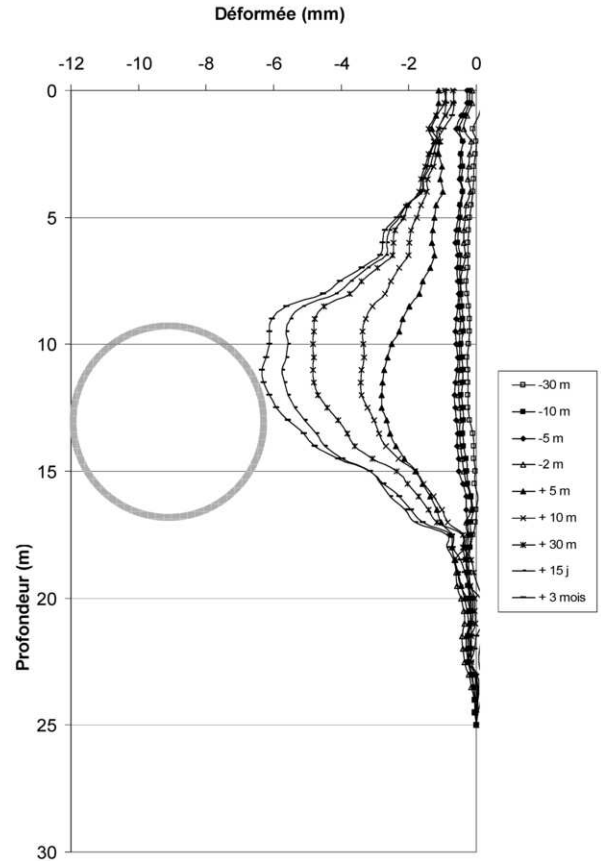


Figure 7. Mouvements horizontaux transversaux mesurés dans l'inclinomètre latéral I3.

L'acquisition avec une période de 5 s des mouvements verticaux dans les extensomètres multipoints permet de visualiser très nettement l'effet du creusement à diverses profondeurs et distances à l'axe du tunnel (Fig. 8 et 9). Combinées avec les relevés topographiques, ces mesures permettent de déterminer les mouvements verticaux absolus au sein du massif.

On constate que l'ancre la plus profonde de l'extensomètre latéral E2 (noté E2-1) est fixe (son mouvement absolu est voisin de zéro sur l'ensemble de la campagne de mesures). L'ancre E2-2, située au niveau de l'axe du tunnel, subit dans un premier temps un tassement de 1,5 mm lié à l'excavation et au passage de la jupe. L'injection de mortier de bourrage permet de réduire ce tassement de 0,75 mm de manière quasi immédiate. Par la suite, une stabilisation du mouvement est obtenue progressivement avec une valeur du tassement voisine de celle du point en surface.

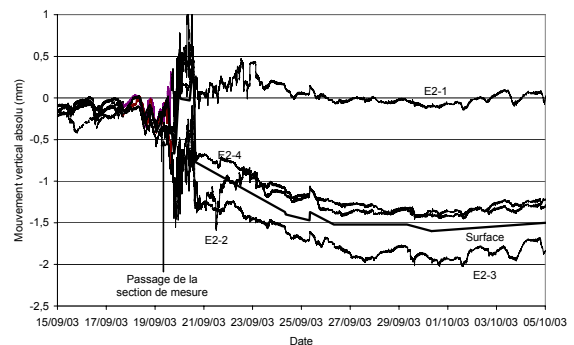


Figure 8. Mouvements verticaux dans les quatre ancres de l'extensomètre latéral E2 (mouvements absolus)

Les deux ancres les moins profondes E2-3 et E2-4 (respectivement situées à $-8,0$ et $-4,0$ m) présentent des mouvements quasi identiques à ceux de la surface, l'écart étant toujours voisin de $0,25$ à $0,35$ mm.

Des résultats sensiblement identiques à ceux de la Figure 8 ont été obtenus pour l'extensomètre latéral E4, symétrique de E2. En revanche, les extensomètres extrêmes E1 et E5 se sont avérés trop courts, les deux points de mesure présentent des mouvements verticaux très proches des mouvements de la surface. En ce qui concerne l'extensomètre central E3, les deux points de mesure sont fortement perturbés par le passage du tunnelier au droit de la section mais *in fine* ne présentent qu'un tassement de $0,1$ à $0,25$ mm supérieur à celui de la surface, indiquant ainsi un tassement en bloc du sol situé à l'aplomb du tunnel.

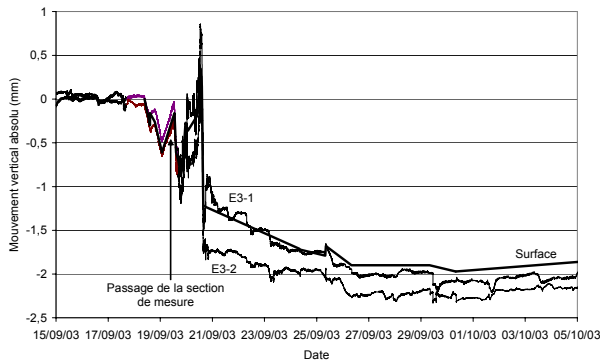


Figure 9. Mouvements verticaux dans les deux ancres de l'extensomètre central E3 (mouvements absolus)

5 DÉFORMATIONS DANS LE REVÊTEMENT

Sur l'ensemble des cinq paires de jauges installées dans les éléments de voussoirs, on n'observe entre leur pose et trois mois après la mise en place de l'anneau que des déformations en extension. Ces résultats sont surprenants, car dans l'exploitation des résultats la référence est prise lorsque les éléments de voussoirs sont sur parc donc non sollicités. Ils illustrent la difficulté d'interprétation de ce type de mesures.

6 IMPACT SUR LE BÂTI EXISTANT

L'impact du creusement limité en surface (les tassements observés à long terme sont inférieurs à $1,5$ mm) n'a pas permis d'utiliser l'ensemble des relevés topographiques effectués, en particulier ceux menés par le groupement d'entreprises. En effet, ces relevés ayant pour principal objectif de vérifier que les travaux n'induisent pas de tassements excessifs pouvant entraîner des désordres dans le bâti, ont une précision intrinsèque qui s'avère être de l'ordre de grandeur des tassements observés.

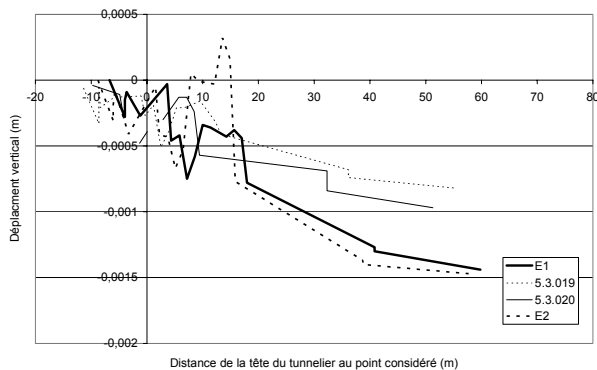


Figure 10. Évolution comparée de l'altitude des points 5.3.019, 5.3.020 et des têtes d'extensomètre E1 et E2.

En revanche, la Figure 10 montre que les mouvements observés (relevés topographiques de précision réalisés par les partenaires du projet de recherche METROTOUL) sur les points 5.3.019 et 5.3.020 fixés en pied de façade sud du bâtiment R+8 sous lequel le tunnelier progresse, sont sensiblement différents de ceux des têtes d'extensomètres E1 et E2 pourtant situés à des distances horizontales de l'axe du tunnel voisines. La structure étant rigide, les tassements sont plus réduits. En revanche, ce faible nombre de points de mesure ne permet pas de vérifier que la largeur de la cuvette est plus importante.

Les Figures 3 et 4 montrent que, au droit des points 5.3.019 et 5.3.020, c'est-à-dire pour une distance à la section de mesure de $+10$ m environ, les paramètres principaux de fonctionnement du tunnelier sont très voisins de leur valeur moyenne (même si P_{front} est légèrement plus faible). Cependant, la présence du bâtiment d'une part limite les effets de soulèvement dus à l'injection du mortier et, d'autre part, lisse les tassements du fait de la rigidité en flexion de la structure.

7 CONCLUSION

L'ensemble de la campagne de mesures a montré que, dans le contexte géologique particulier de la molasse surconsolidée de Toulouse, le creusement de tunnel par tunnelier se traduit par des mouvements verticaux du sol de faible amplitude (de l'ordre de $1,5$ mm de tassement) avec une phase de soulèvement liée à l'injection de mortier de bourrage. Ces tassements sont associés avec des déplacements horizontaux de l'ordre de $6,3$ mm au maximum au niveau de la clé du tunnel. L'impact sur le bâtiment suivi topographiquement est également très limité : les résultats sont proches de la précision de la mesure (tassement maximum de 1 mm) mais montrent une évolution similaire à la surface libre du sol. L'analyse des paramètres de creusement a permis de montrer que les rapports $P_{\text{front}}/\sigma_{v0}$, $P_{\text{injection}}/\sigma_{v0}$ et $V_{\text{injection}}/V_{\text{théorique}}$ ont des valeurs voisines de celles observées dans le même contexte géologique pour des technologies de tunnelier différentes qui s'avèrent induire les mêmes types et amplitudes de mouvement.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cette communication ont été financés dans le cadre du projet de recherche METROTOUL par le Ministère de la Recherche au travers du Réseau Génie Civil & Urbain (RGC&U) en partenariat avec la Société du Métro de l'Agglomération Toulousaine (SMAT) représentée par Mme B. Reynaud. Les auteurs souhaitent également remercier l'ensemble des entreprises impliquées dans les travaux de creusement de la ligne B du métro de Toulouse pour l'aide qu'elles ont pu apporter, en particulier dans la collecte des données.

RÉFÉRENCES

- AFTES, 1995. Tassements liés au creusement des ouvrages en souterrain, *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, 132 : 373-395.
- Mair, R.J. 1993. Subsurface settlement profiles above tunnel in clay, *Géotechnique*, Vol. 43(2): 315-320.
- Burland, J.B., Standing, J.R. and Jardine, N. 2001. *Building response to tunnelling – Case studies from construction of the Jubilee Line Extension, London*, CIRIA: Thomas Telford.
- Dias D., Kastner R. and Maghazi M., 2000. Three dimensional simulation of slurry shield tunneling. *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, Kusakabe, Fujita & Miyazaki eds., Balkema, Rotterdam, 351-356.
- Emeriault F., Bonnet-Eymard T., Kastner R., Vanoudheusden E., Petit G., Robert J., de Lamballerie J.-Y. and Reynaud B. 2005. Ground movements induced by earth-pressure balanced, slurry shield and compressed-air tunneling techniques on the Toulouse subway line B. *Proc. of ITA-AITES 2005*, 7-12 May 2005, Istanbul, Turkey.