

Impact de la construction de tunnels urbains sur les mouvements de sol : Incidence du mode de pressurisation du front

Emilie Vanoudheusden

LGCIE - Département Génie Civil & Urbanisme - INSA Lyon Bât. JCA Coulomb –
69621 Villeurbanne Cedex

RESUME. La ligne B du métro de Toulouse a été excavée en grande partie au moyen de tunneliers à front pressurisé dans une géologie homogène constituée de molasses. Ce papier présente l'instrumentation mise en place sur ce chantier, et l'analyse déduite de ces observations en termes de comportement général du massif de sol lors de l'excavation aux tunneliers et l'influence des paramètres de fonctionnement de ces tunneliers sur les mouvements de surface. L'importance de l'état de surconsolidation des terrains sur les mouvements du massif de sol est mise en évidence.

MOTS-CLÉS : tunnelier à front pressurisé, déplacements verticaux et horizontaux, état surconsolidé

ABSTRACT. The Toulouse's underground line B has been excavated in homogenous molasses by tunnel boring machines (TBM) with face support. This article presents the soil mass movements measured during TBM excavation and the influence of tunneling parameters on surface vertical movements. The consequence of the initial overconsolidated state of the soil is shown.

KEYWORDS : tunnel boring machines TBM, vertical and horizontal movements, overconsolidated state

1. INTRODUCTION

Lors de la réalisation de tunnels à faible profondeur, une attention particulière est portée pour la maîtrise des mouvements du massif de sol et des bâtiments alentours.

Lors d'une excavation en méthode conventionnelle, les mouvements verticaux attendus en surface se répartissent sur une section transversale à l'axe comme une cuvette ayant une forme de Gauss, dont l'expression analytique est :

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad [\text{Eq. 1}]$$

où $S(x)$ est le tassement à la distance x au centre de la cuvette, $S_{\max}$ le tassement maximal mesuré à l'aplomb de l'axe du tunnel, et i la distance du centre au point d'inflexion de la courbe. En profondeur, la représentation des mouvements verticaux par une courbe de Gauss reste valable. A la profondeur z , une relation entre i et la profondeur de l'axe du tunnel H a été établie :

$$i = K(H - z) \quad [\text{Eq. 2}]$$

Le coefficient K a été estimé à 0,5.

Les mouvements horizontaux sont dirigés vers l'axe du tunnel, et localisés au niveau de celui-ci. Ces mouvements sont reliés empiriquement aux déplacements verticaux.

Mais les travaux d'excavation réalisés au moyen de tunneliers à front pressurisé ont montré une diminution notable des mouvements classiquement mesurés. Cela est en partie dû au confinement latéral et frontal des parois par les structures rigides des tunneliers. De ce fait, des observations sur chantiers sont nécessaires afin d'établir de nouvelles relations ou modèles permettant la prévision de ces mouvements. Dans le cadre du chantier de la ligne B du métro de Toulouse, le projet METROTOUL a ainsi été mis en place ; son objectif était d'organiser, de suivre et d'analyser les mesures des mouvements réalisées sur le chantier afin d'améliorer les connaissances sur les mouvements induits par les tunneliers à front pressurisé.

2. LE CHANTIER DE LA LIGNE B DU METRO DE TOULOUSE

La ligne B du métro de Toulouse a été excavé sur 12,6 km au moyen de 4 tunneliers utilisant 3 techniques différentes de pressurisation du front : les lots situés aux extrémités de la ligne ont utilisé des tunneliers à pression de terre ; en zone urbaine, le tunnel a été excavé par un tunnelier à pression de boue, et dans le centre historique, les tunnels ont été réalisés par tunnelier à pression d'air. Les diamètres excavés varient de 5,6 à 7,8 m, pour une couverture de terrain de 1,2 à 3 diamètres.

La ville de Toulouse est implantée sur la plaine alluviale de la Garonne, creusée dans des terrains d'âge tertiaire, appelés molasse. Ce substratum se présente sous des formes lithologiques variées à faciès détritiques et à répartition lenticulaire. Les terrains sont peu perméables, sauf au niveau des lentilles sableuses. Sur l'ensemble du tracé, la géologie peut être considérée comme relativement homogène, ce qui permet l'étude des analogies et des différences de mouvement de terrain liés aux différentes techniques de pressurisation du front utilisées sur le chantier.

Une caractérisation mécanique du substratum molassique, réalisée en laboratoire, a révélé un comportement fortement surconsolidé ; le coefficient des terres au repos K_0 a été évalué à 1,4 à 25 m de profondeur et à 1,8 à 15 m.

3. L'INSTRUMENTATION

L'instrumentation mise en place est de 2 types.

D'une part, pour analyser les mouvements du massif de sol pendant le passage des tunneliers, 12 sections de mesures ont été instrumentées. Les moyens mis en place ont permis de mesurer les mouvements verticaux (5 tassomètres multipoints, voir *Figure 1*) et les mouvements horizontaux (3 inclinomètres). Ils ont aussi permis l'évaluation des pressions interstitielles dans le sol et des contraintes dans le revêtement (par le biais des jauges extensométriques). Un suivi topographique en surface complète le dispositif.

D'autre part, afin de suivre et d'analyser les mouvements de terrain sur l'ensemble de la ligne, des points de nivellement en surface ont été positionnés sur chaussées tous les 30 m le long du tracé, sur des profils transversaux de 5 points répartis sur 20 m de part et d'autre du tunnel ; les façades de bâtiments ont aussi été équipées de repères. Les mesures ont été réalisées quotidiennement lors du passage du tunnelier au niveau du point, puis quelques mesures à moyen terme.

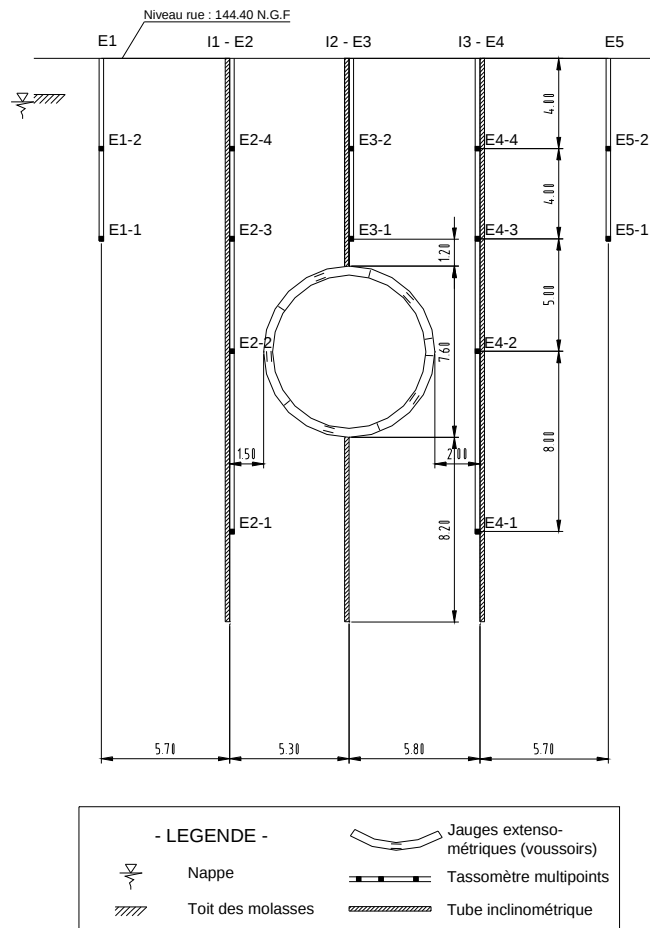


Figure 1 : Instrumentation typique d'une section de mesures (cas de la section S52 Bougainville).

4. RESULTATS DES MESURES SUR SECTIONS

Les mouvements en surface et dans le massif de sol se sont révélés d'amplitudes millimétriques. Néanmoins, la qualité et la multiplicité des mesures ont permis de mettre en évidence un comportement atypique de la molasse, comportement que l'on mesure sur les différentes sections de mesures (Vanoudheusden, 2006). Ce comportement est décrit ci-dessous.

4.1. NIVELLEMENT DE SURFACE

La Figure 2 présente l'évolution des mouvements des points de surface pour différentes positions du tunnelier par rapport à la section de mesures. On repère que les mouvements principaux sont mesurés après le passage du front sous la section de mesure : un soulèvement d'autant plus fort que le point est proche de l'axe est mis en évidence.

L'extraction de la jupe (corps rigide du tunnelier) entraîne la création d'un vide tout autour de l'anneau ; ce vide est rapidement rempli par le mortier injecté sous pression. Les mesures de nivellement de surface montre un léger tassement au moment de cette extraction (mesure à +8,5 m), suivi d'un nouveau soulèvement ; ce soulèvement est maximal lors de la mesure à +12,6 m. A cet instant, la « cuvette » de soulèvement peut être approché par une courbe de Gauss inversé (Eq. 1) pour laquelle $S_{\max} = 1,1 \text{ mm}$ et $i = 5 \text{ m}$ coté gauche et 8 m coté droit. Ceci équivaut alors à un coefficient K (Eq. 2) qui varie entre 0,3 et 0,48, et un gain de volume de 0,03 à 0,47 % du volume excavé.

A long terme, les mouvements se stabilisent en seulement 2 jours, soit quand le front du tunnelier est situé environ 80 m après la section. Au final, les points proches de l'axe se sont soulevés, alors que les points situés à 12 m de l'axe montrent un tassement.

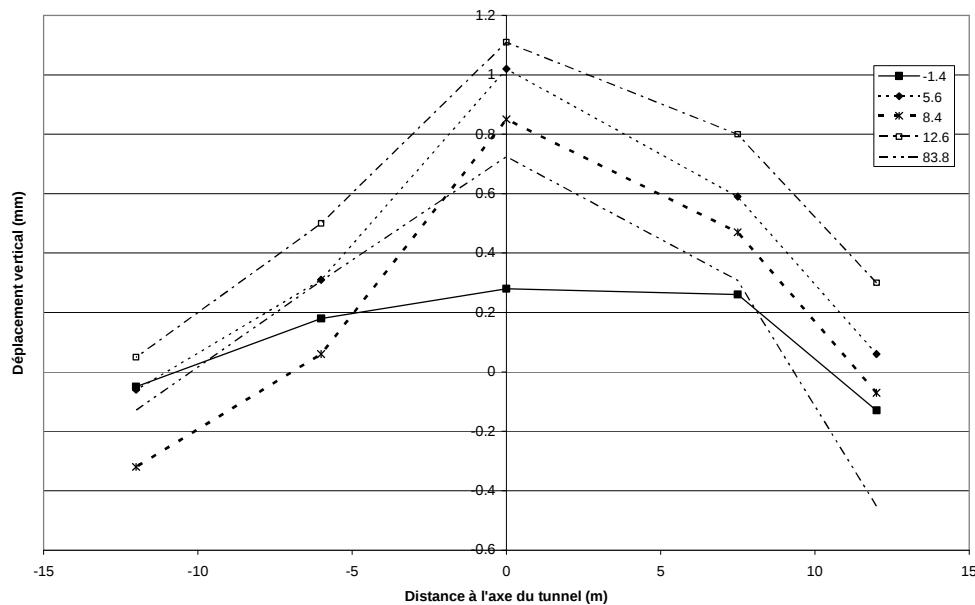


Figure 2 : Déplacement vertical des repères en surface pour différentes positions du front du tunnelier.

4.2. DEPLACEMENTS VERTICAUX EN PROFONDEUR

Les déplacements verticaux sont mesurés au moyen d'extensomètres en forages (ou tassomètres). Les déplacements absolus sont calculés à partir des déplacements relatifs des ancrages et de la mesure de nivellement réalisé sur la tête de l'extensomètre.

Les ancrages montrent des comportements similaires, quelque soit leur profondeur : pendant le passage du tunnelier, les ancrages montrent un soulèvement, suivi d'un tassement avant l'extraction de la jupe. Le soulèvement maximal mesuré atteint 0,5 mm.

Ce comportement est cohérent avec les mesures de nivellement en surface.

4.3. DEPLACEMENTS HORIZONTAUX EN PROFONDEUR

Les inclinomètres permettent la mesure des déplacements horizontaux à différentes profondeurs.

Les mesures réalisées ont montré que, dans l'axe du tunnel, le mouvement horizontal de convergence du terrain vers le front du tunnelier était inférieur à l'incertitude sur cette mesure (1 mm environ). Cela indique une bonne tenue des terrains par les pressions de confinement dans les chambres d'abattage.

Latéralement au tunnel, des mouvements de convergence sont initiés avant ou juste après le passage du front. On observe la formation d'un ventre au niveau du tunnel. Ce ventre évolue progressivement avec l'avancée du tunnelier. Les mouvements ne sont pas encore stabilisés 15 jours après le passage du front.

4.4. BILAN DES MOUVEMENTS INDUITS PAR LE CREUSEMENT AU TUNNELIER

Les différentes mesures réalisées sur les sections ont permis de mettre en évidence un comportement atypique du terrain lors de l'excavation au tunnelier ; ce comportement est illustré par la Figure 3 qui présente les mouvements mesurés alors que le front est 30 m après la section de mesure. On repère une convergence horizontale des terrains au niveau du tunnel, associée à des soulèvements ; de plus l'amplitude des déplacements horizontaux est 3 à 4 fois plus importante que celle des mouvements verticaux.

Des modélisations numériques et une analyse de sensibilité aux paramètres ont mis en évidence l'importance de l'état surconsolidé de la molasse sur ce comportement atypique (on a calculé un coefficient des terres au repos K_0 proche de 1,8 à 25 m de profondeur). En effet, l'excavation induit une réorganisation des contraintes au sein du massif, à savoir en particulier un relâchement des contraintes horizontales fortes initialement.

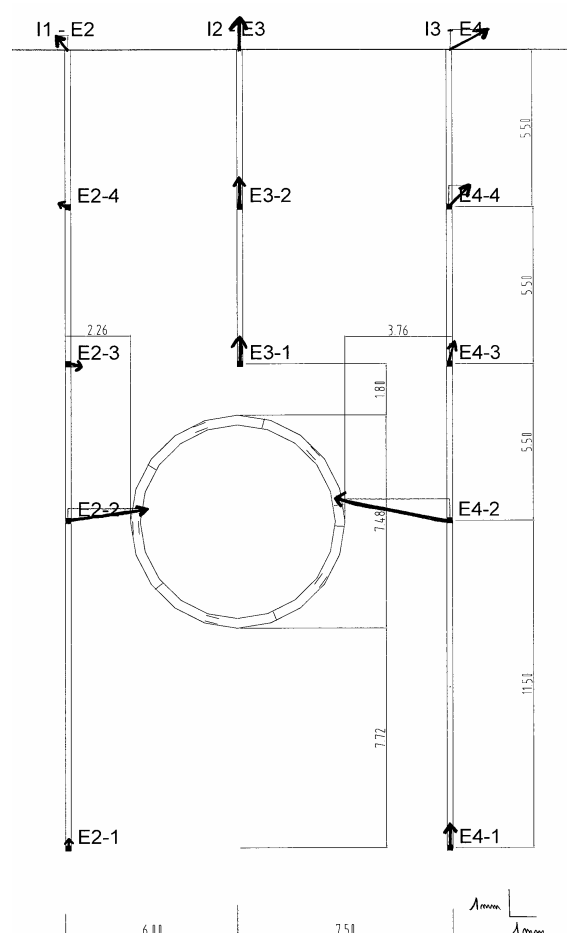


Figure 3 : Mouvements induits par le creusement au tunnelier (mesure à moyen terme : front du tunnelier 30 m après la section).

Si les mesures obtenues à partir de ces sections ont permis l'observation du comportement particulier de la molasse lors de l'excavation, elles n'ont pas permis de vérifier l'influence de la conduite du tunnelier sur ces mouvements. Pour mettre en évidence cette influence, une analyse a été menée sur l'ensemble des points de nivellement de surface du tracé, en corrélation avec les paramètres de creusement des tunneliers.

5. INFLUENCE DU FONCTIONNEMENT DES TUNNELIERS SUR LES MOUVEMENTS DE SURFACE

5.1. LES PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DES TUNNELIERS

Les organes de fonctionnement d'un tunnelier sont contrôlés par un automate. Ainsi plus de 100 paramètres sont enregistrés en continu pendant toute la durée des travaux. A partir de la littérature et des observations réalisées sur le terrain, une première sélection des paramètres influents sur les mouvements du sol a été réalisée. Ces paramètres sont la vitesse d'avancement du tunnelier, la pression de confinement du front, la pression moyenne d'injection du mortier et le volume total injecté, la pression hydraulique de travail sur la roue de coupe, la poussée totale des vérins de poussée, le temps mis pour réaliser entièrement un anneau (excavation + pose des voussoirs), la surcoupe, les paramètres de guidage du tunnelier et l'énergie nécessaire pour l'excavation.

5.2. LES MESURES DE NIVELLEMENT

L'analyse des mesures réalisées avant le passage du tunnelier a permis d'estimer l'incertitude sur les mesures de nivellement. L'erreur sur ces mesures est ainsi estimée à $\pm 0,5$ mm. De plus, cette analyse a mis en évidence un mouvement naturel de soulèvement et de tassement de la surface de l'ordre du millimètre. L'amplitude des mouvements mesurés étant faible (en général inférieur à 5 mm), cette incertitude et ce mouvement naturel ont une influence non négligeable. Afin de limiter leur influence, il a été décidé d'analyser les mesures uniquement à court terme, soit sur la période où le front d'excavation est situé entre 50 m en amont du repère de nivellement, et 50 à 100 m en aval de celui-ci. La différence d'altitude du repère calculé durant cette période est considéré constituer le déplacement du sol, imputable au creusement du tunnel par le tunnelier.

L'observation de la répartition de ces déplacements laisse apparaître 2 types de comportement du sol : dans certaines zones, la cuvette des déplacements peut être approchée par une courbe de Gauss, similaire à celles observées lors des creusements par méthode conventionnelle (Figure 4 – notée zone de tassement pur) ; dans d'autres zones, les repères proches de l'axe montrent un tassement moindre que des points plus éloignés, voire parfois un soulèvement (Figure 5 – notée zone de soulèvement au centre).

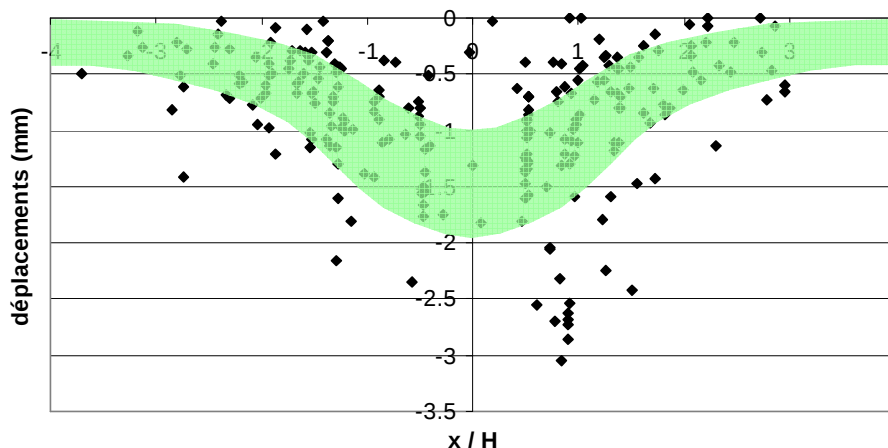


Figure 4 : Cuvette des déplacements observables dans la zone de tassement pur
 x : distance à l'axe, H : profondeur de l'axe du tunnel.

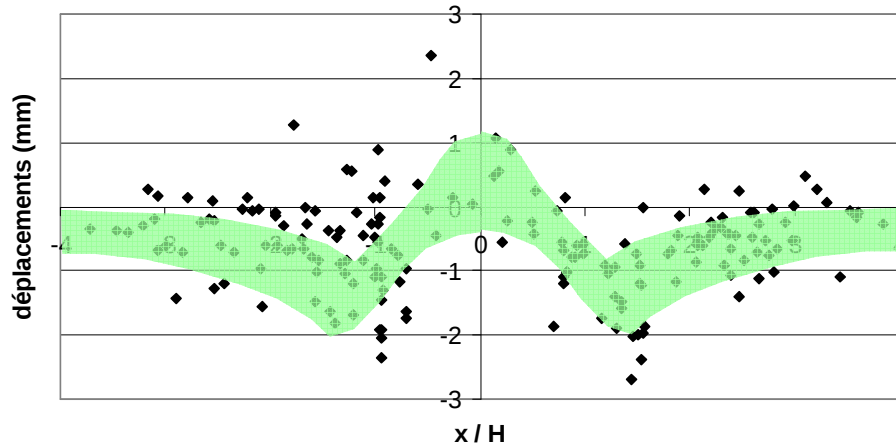


Figure 5 : Cuvette des déplacements observables dans la zone de soulèvement au centre.

5.3. METHODOLOGIE POUR LA DETERMINATION DE LA RELATION DE CORRELATION

5.3.1. Expression de la relation

Le but de cette analyse est de définir, pour chaque technique d'excavation utilisée sur ce chantier (terre, boue et air) les paramètres de creusement des tunneliers P_j qui influencent le plus les déplacements en surface $Depl$. Les observations précédentes ont montré que les cuvettes de déplacements pouvaient être exprimées comme la somme de 2 courbes de Gauss, l'une modélisant le tassement des points éloignés de l'axe, et l'autre le soulèvement des points proches ; d'où, en tenant compte des équations Eq. 1 et Eq. 2, la relation :

$$Depl = \frac{1}{K_1 H} \exp\left(\frac{-x^2}{2K_1^2 H^2}\right) (\alpha_1 + \alpha_2 \overline{P_{2_1}} + \dots + \alpha_n \overline{P_{n_1}}) - \frac{1}{K_2 H} \exp\left(\frac{-x^2}{2K_2^2 H^2}\right) (\alpha_{n+1} + \alpha_{n+2} \overline{P_{2_2}} + \dots + \alpha_{2n} \overline{P_{n_2}}) \quad [\text{Eq. 3}]$$

Les inconnues sont les valeurs de K_1 et K_2 , et les α_i . Cette équation non linéaire est résolue par la méthode itérative des moindres carrés dite de Gauss-Newton.

5.3.2. Procédure

La procédure établie pour la détermination des paramètres les plus influents est basée sur une élimination progressive des paramètres les moins influents : on commence la procédure avec l'ensemble des paramètres retenus, et on détermine le paramètre dont la participation est la plus faible vis-à-vis du coefficient de détermination R^2 ; ce paramètre est alors désigné comme le moins influent, il est éliminé de l'ensemble des paramètres retenus, et la procédure reprend afin d'éliminer les paramètres suivants un à un. Cette procédure s'arrête quand l'élimination de n'importe quel paramètre dégrade de manière trop importante la qualité du modèle. On trouvera de plus ample détails de cette procédure dans Vanoudheusden *et al.* (2007).

5.3.3. Résultats

Cette analyse a été réalisée indépendamment sur l'ensemble des mesures de 2 lots excavés l'un au tunnelier à pression de terre, et l'autre au tunnelier à pression de boue. On a ainsi mis en évidence la

pression hydraulique de travail de la roue de coupe comme un paramètre de creusement des tunneliers influent sur les mouvements verticaux de surface. Ce paramètre apportant une indication à la fois sur la nature des terrains excavés et sur le remplissage de la chambre (c'est-à-dire le confinement lui-même), on comprend qu'il puisse jouer sur les tassements et les soulèvements de surface. Il conviendra donc de porter une attention particulière à ce paramètre pendant les futurs travaux d'excavation au tunnelier.

6. CONCLUSION

En conclusion, nous insisterons sur l'apport de la mise en place de cette instrumentation sur ce chantier pour la compréhension de l'impact du creusement d'un tunnel au tunnelier à front pressurisé dans la molasse toulousaine. En effet, l'étude des mesures a montré qu'à partir d'une instrumentation adaptée il est possible de mesurer, d'analyser et de comprendre comment le massif de sol est sollicité et réagit à cette excavation, et d'appréhender l'interaction qui existe entre le sol et le tunnelier.

Malgré des amplitudes de mouvements faibles, la qualité et la quantité des mesures ont permis une exploitation intéressante.

Un comportement atypique du massif de sol a été mis en évidence : une convergence horizontale des terrains associée à des soulèvements. Ce comportement a pu être imputé à l'état de surconsolidation du sol.

A partir de l'ensemble des mesures de nivellement réalisées sur le tracé, une méthodologie a été mise en place pour repérer les paramètres de fonctionnement des tunneliers les plus influents sur les mouvements de surface. Le paramètre de pression de la roue de coupe a ainsi été mis en évidence. Cette méthodologie de traitement a fait ces preuves dans ces conditions défavorables du fait des faibles mouvements ; elle pourra maintenant être efficacement mise en œuvre sur d'autres chantiers dans des conditions géologiques différentes.

7. REMERCIEMENTS

L'auteur souhaite remercier le Ministère de la Recherche (au travers du RGC&U) pour le soutien financier de ces travaux de recherche, ainsi que le bureau d'étude ARCADIS ESG, SYSTRA et le groupement de Maîtrise d'œuvre et le laboratoire URGC de l'INSA de Lyon pour le soutien scientifique.

8. REFERENCES

Peck R.B. (1969) « Deep excavations and tunneling in soft ground » Proceedings of the 7th International Congress of Soil Mechanics and Foundations Engineering, Mexico, p. 225-285.

Vanoudheusden E. (2006) « Impact de la construction de tunnels urbains sur les mouvements de sol et le bâti existant. Incidence du mode de pressurisation du front », Thèse de doctorat, INSA de Lyon.

Vanoudheusden E., Emeriault F., Kastner R., Robert J. (2007) « Corrélations entre paramètres de creusement de tunneliers à front pressurisé et tassements de surface – Application au cas de la ligne B du métro de Toulouse » Proceedings of the XIV ECSMGE, Madrid, (sous presse).