

Comportement d'une paroi moulée en site urbain: Modélisations et mesures

Diaphragm wall's behavior: Predictions and measures

E. Vanoudheusden*, G. Petit* & J. Robert
Arcadis ESG, Toulouse () et Paris, France*

F. Emeriault & R. Kastner
URGC Géotechnique, INSA, Lyon, France

RÉSUMÉ

Cette communication présente les résultats des diverses instrumentations mises en place lors des travaux d'excavation d'une station de métro en site urbain. Les résultats de mesures sont comparés aux calculs obtenus par des modélisations aux coefficients de réaction et aux éléments finis. Cette analyse a permis de mettre en évidence les limites des modèles aux coefficients de réaction dans le cas particulier de cette station où butons passifs et tirants actifs sont mis en œuvre conjointement.

ABSTRACT

This paper presents the results of instrumentations implemented during the excavation works of a subway station in an urban site. These results are compared with the results of the subgrade reaction method (SGRM) and finite element method. This study shows limits of SGRM when passive struts and prestressed anchors are used simultaneously.

1 INTRODUCTION

Lors de travaux de creusement en site urbain, on s'attache à limiter les déplacements et les déformations du terrain encaissant. Pour ce faire, les excavations sont réalisées à l'abri de parois de forte inertie avec mise en œuvre de niveaux multiples de butons ou d'ancrages souvent précontraints.

Cette communication présente les résultats d'une campagne de mesures effectuée pendant les travaux d'excavation d'une des futures stations de la ligne B du métro de l'Agglomération Toulousaine, la station « Canal du Midi ». Celle-ci possède la particularité d'être réalisée directement au contact du canal en eau, ouvrage classé au patrimoine mondial de l'humanité par l'UNESCO. Les poussées sont reprises par deux niveaux de tirants précontraints encadrés par deux lits de butons.

La modélisation du comportement de la paroi a été réalisée durant les études d'exécution à l'aide d'un logiciel aux coefficients de réaction. Cette méthode, d'utilisation courante, s'appuie sur une simplification mathématique, non justifiée physiquement (Balay, 1984, Monnet 1994, Schmitt 1998), ce qui complique la détermination des paramètres constituant les lois de réaction. Les résultats des calculs avec cette méthode sont ici confrontés aux mesures de chantier et aux résultats d'une modélisation aux éléments finis.

2 SITE ET INSTRUMENTATION

La station « Canal du Midi » présente une emprise de 15 m x 50 m et une hauteur excavée voisine de 21 m. Elle est située sous une partie du Canal du Midi côté sud et longe l'Hôtel de Police côté nord (Figure 1). L'environnement bâti présente quelques constructions de type R+2 sans sous-sol. La station est construite à l'abri de parois moulées de 1 m d'épaisseur et 24,4 m de hauteur. Ces parois sont réalisées à partir de la cote 135,2 NGF jusqu'à 110,8 NGF. Les poussées sont reprises par une ligne de

butons de tête (cote 133 NGF - diamètre 508 mm), puis deux lignes de tirants précontraints (cote 128,5, longueur libre 8 m, longueur de scellement 15 m, et cote 123,5 NGF, longueur libre 5m, longueur de scellement 15 m) et enfin une ligne de butons de pied (cote 120 NGF - diamètre 711 mm) (Figure 2). L'ensemble est mis en œuvre au fur et à mesure du creusement. Le fond de fouille est situé à la cote 115,5 NGF. Les pressions d'eau s'appliquant en phase service sur la paroi sur la hauteur des molasses sont rabattues en phase travaux par perçage de la paroi et mise en place de lits de barbacanes afin de minimiser les efforts de poussée à reprendre par les butons et tirants.

Plusieurs sondages carottés ont été réalisés autour de la future station. On retiendra que :

- les terrains (dénommés classiquement molasse) sont essentiellement argileux des cotes 131 à 123,5 NGF, sableux de 123,5 à 116,7 NGF puis à nouveau argileux ;
- ces terrains sont surmontés par 5 m d'alluvions et remblais ;
- le niveau de la nappe phréatique se trouve à 1,2 m sous le niveau du terrain naturel.

L'objectif des mesures est de contrôler les sollicitations dans les éléments de reprise de poussée et les déplacements de la paroi moulée. L'instrumentation mise en œuvre (Fig. 1 à 3) comporte des jauges de déformation à cordes vibrantes sur deux butons pour chacun des deux lits de butons (B1 à B4), des cales dynamométriques sur les têtes de deux tirants pour chacun des deux lits de tirants (A33 - A34 et B33 - B34) et deux tubes inclinométriques dans la paroi moulée (longueur totale 30 m, soit 5m sous la paroi). Le premier tube inclinométrique I1 a été positionné dans la paroi du côté du canal, mais ce tube a été endommagé et rendu inutilisable avant la phase de terrassement à 126 NGF ; un autre tube I2 a donc été mis en place rapidement, en face du premier.

Une mesure de chacun des instruments a été faite à la fin de chaque phase de travaux, et parfois au cours d'une phase.

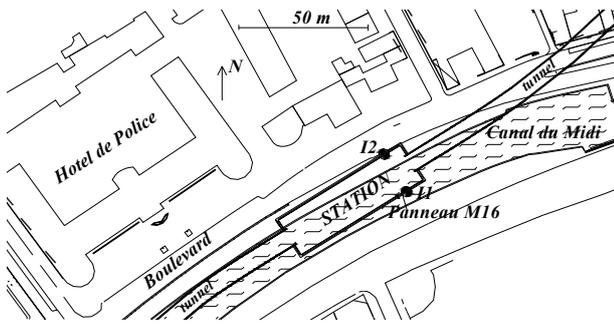


Figure 1. Vue en plan de la station

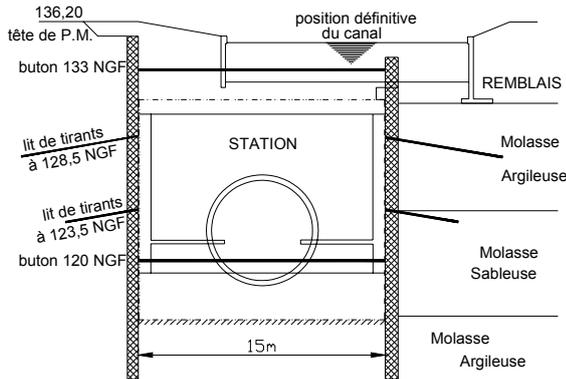


Figure 2. Coupe de la station et emplacement des butons et tirants

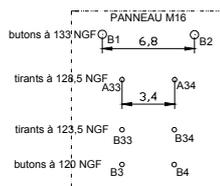


Figure 3. Position des éléments instrumentés sur le panneau M16

3 MODÉLISATION AUX COEFFICIENTS DE RÉACTION

Lors des études d'exécution, le comportement de la paroi moulée durant les travaux a été modélisé à l'aide du logiciel RIDO (RFL 2003). Dans cette approche, le sol est schématisé par des ressorts horizontaux dont le comportement est élastique parfaitement-plastique caractérisé par le module de réaction k_h et les paramètres de résistance au cisaillement du sol.

Le logiciel ne permettant pas la modélisation simultanée des deux parois, il avait été choisi, lors des études d'exécution, de ne modéliser que le comportement de la paroi côté boulevard. Les résultats présentés correspondent au comportement à court terme de la paroi (durant les phases de creusement).

Les différents paramètres de sol pris en compte sont résumés dans le Tableau 1. Les valeurs de cohésion de la molasse argileuse sont prises égales à 300 kPa en butée et à 100 kPa en poussée pour tenir compte de la baisse de cohésion liée à la décompression du matériau. Les valeurs du coefficient de réaction ont été déterminées à partir de l'abaque de Chadeisson (Monnet, 1994), fonction des valeurs de cohésion et d'angle de frottement définies au CCTP à partir d'essais de laboratoire sur des échantillons carottés. Les coefficients K_a et K_p sont calculés par résolution des équations d'équilibre limite plastique de Boussinesq-Rankine. Le produit d'inertie de la paroi moulée et les rigidités des butons et tirants sont calculés à partir du module d'Young du béton et des caractéristiques des éléments de reprise de charge (voir Tableau 2).

À chaque phase d'excavation, pour simuler le pompage réalisé en fond de fouille, le niveau d'eau est porté 50 cm sous le

niveau d'excavation. La présence des barbacanes (tous les deux mètres verticalement) est simulée défavorablement par une pression d'eau constante égale à 10 kPa sur toute la hauteur de molasse excavée. Les phénomènes d'écoulement n'ont pas été modélisés.

Tableau 1 : Paramètres de sol - modélisation RIDO

Type de sol	γ kN/m ³	γ' kN/m ³	K_0	c_u kPa	ϕ_u degrés	D_a	D_p	k_h kPa/m
REMBLAIS	20	11	0.5	0	25	0	-0.66	18000
MOLASSES :								
- argileuses	22	12	1	300/100	0	0	-0.66	40000
- sableuses	21	11	1	0	35	0	-0.66	40000

D_a et D_p = rapports δ/ϕ en poussée et en butée (δ : angle de frottement sol-paroi) ; k_h = coefficient de réaction du sol.

Tableau 2 : Caractéristiques des éléments de reprise - modèle RIDO

EI kNm ² /m	Rigidités (kN/m)			
	buton 133	buton 120	tirant 128,5	tirant 123,5
918946	495179	606193	18290	22680

3.1 Déplacements de la paroi moulée

La Figure 4 présente les résultats du calcul de la déformée de la paroi. Pour une comparaison avec les résultats expérimentaux, la mesure zéro est prise alors que l'excavation est à la cote 126 NGF. Au cours de la phase d'excavation de 126 à 123 NGF, on voit la formation d'un « ventre » vers la fouille à la cote 123,5 NGF. Ce ventre se décale logiquement vers le bas au fur et à mesure des phases d'excavation, pour atteindre finalement son maximum à la cote 117,7 NGF lors de la dernière phase d'excavation, avec un déplacement d'environ 7,5mm. La modélisation fait apparaître aussi un mouvement du pied de la paroi vers la fouille. Au maximum, à la fin des travaux d'excavation, le pied s'est décalé de 1,5 mm. On remarquera que la mise en place du tirant à 123,5 NGF entraîne un déplacement de la paroi de 1 mm vers les terres, déplacement non réaliste a priori.

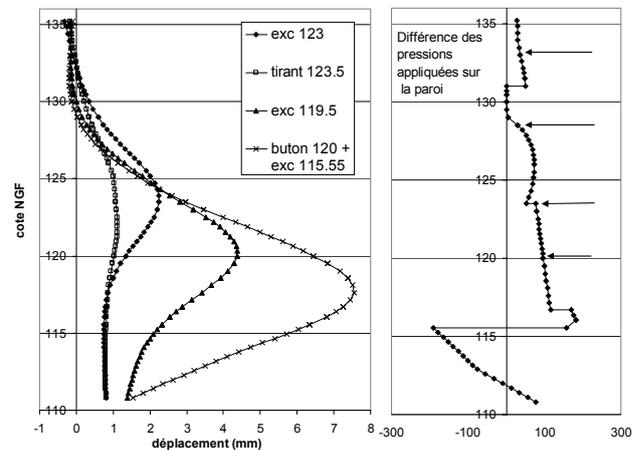


Figure 4. Calcul RIDO aux coefficients de réaction - Déformée horizontale de la paroi et diagramme de pression différentielle

3.2 Efforts dans les butons

La Figure 5 présente les résultats des calculs des efforts dans les butons mis en place à la cote 133 NGF (calcul RIDO). Lors de la phase d'excavation qui suit la mise en place, les efforts augmentent jusqu'à un peu plus de 800 kN. La mise en tension du premier lit de tirants fait diminuer cette valeur (600 kN), laquelle reste stable par la suite. Les efforts calculés dans les butons mis en place à la cote 120 NGF atteignent 1250 kN lors de la phase d'excavation à 115,5 NGF.

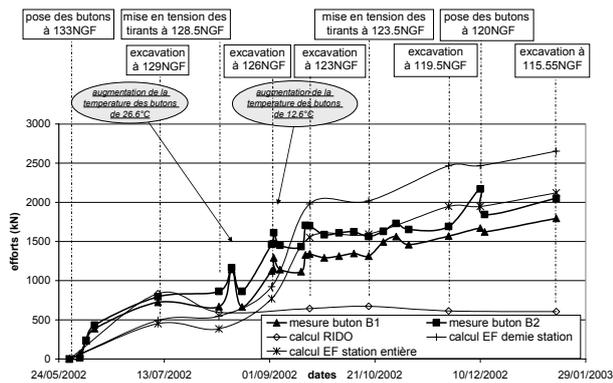


Figure 5. Efforts dans les butons à 133 NGF - Résultats des mesures et des modélisations

3.3 Efforts dans les tirants

Le calcul des efforts dans les deux lits de tirants précontraints montre très peu de variation (au maximum +7% par rapport à la tension de départ).

4 RÉSULTATS DE L'INSTRUMENTATION

4.1 Déplacements de la paroi moulée - Suivi inclinométrique

Le premier tube inclinométrique, posé du côté du Canal du Midi (Figure 1), a été rendu inutilisable lorsque le terrassement atteignait la cote 126 NGF. Les mesures effectuées avec ce premier tube montrent un déplacement de la paroi globalement linéaire entre la cote 125 NGF (pas de déplacement significatif) et la tête du tube (déplacement maximum de 3 mm).

Le tube inclinométrique I2 a été installé en face du premier, du côté du boulevard ; la mesure initiale a pu être effectuée lorsque le terrassement était à 126 NGF. Les résultats des mesures sur ce tube sont présentés sur la Figure 6. Le scellement du tube I2 sur les deux premiers mètres étant défectueux, les valeurs ne sont pas représentatives du déplacement de la tête de la paroi, c'est pourquoi on n'a représenté les mesures qu'à partir de la cote 134 NGF.

On observe, dès la phase de terrassement à 123 NGF, la formation d'un « ventre ». Cette déformation de la paroi est stable durant la phase de mise en place et de mise en tension de la ligne de tirants à 123,5 NGF. Ce ventre se décale progressivement vers le bas avec le terrassement ; la mesure du 4 février 2003 montre un maximum de déformée de la paroi de 18 mm autour de la cote 123,5 NGF, valeur largement supérieure au calcul (+240%). En faisant l'hypothèse que la base du tube inclinométrique est fixe, on note un déplacement de 3 mm au pied de la paroi (110,8 NGF). En tête, le déplacement est de 7 mm, alors que le calcul ne prévoyait aucun déplacement significatif.

4.2 Efforts dans les butons

Des mesures régulières ont été faites ponctuellement grâce aux jauges de contraintes mises en place sur les butons. La Figure 5 présente les résultats de ces mesures dans les butons B1 et B2 appartenant au premier lit (133 NGF).

De la mise en place des butons à la mise en tension du lit de tirants à 128,5 NGF, les efforts dans les butons ont le comportement attendu au regard des calculs effectués durant les études d'exécution : les efforts augmentent de 400 kN lors de l'excavation à 131,5 NGF et de 350 kN lors de l'excavation à

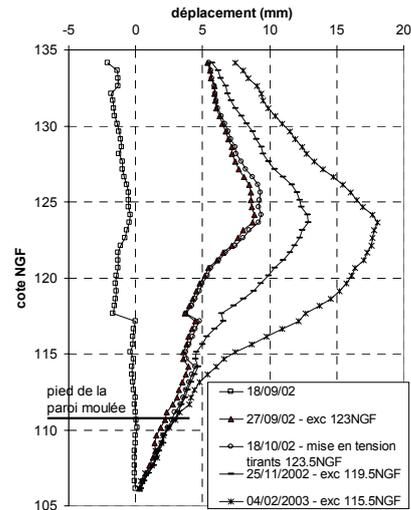


Figure 6. Déformée horizontale de la paroi - mesures en I2

129 NGF, puis sont stables durant la phase de foration et de mise en place des tirants. Par la suite, le comportement diffère de celui attendu : au lieu de se stabiliser, les efforts dans les butons continuent à augmenter lors des différentes phases de terrassement, pour atteindre au final 400% des efforts calculés.

Au vu de ces résultats, il a été procédé à plusieurs actions de prévention telles que la mise en place d'un lit supplémentaire de butons précontraints juste au dessus du premier lit de butons. Ces actions sont sans conséquence pour les comparaisons mesures/calculs puisqu'elles ont été réalisées après la fin des travaux d'excavation.

L'influence de la température sur les mesures des jauges de contraintes a pu être évaluée : les deux mesures du 3 septembre 2002, alors qu'aucune phase d'excavation n'était en cours, ont montré un écart de température de 12,6°C et un écart de contrainte de l'ordre de 140 kN, soit une influence d'environ 10 kN par degré. Cet écart peut être dû pour parti à la dilatation du bouton (ce qui augmente l'effort) et aux erreurs de mesures engendrées par les variations de température.

Les efforts dans les butons B3 et B4 du deuxième lit de butons à 120 NGF montrent un comportement de reprise de poussée proche des calculs ; les efforts atteignent 115% du calcul pour B3 et 145% pour B4.

4.3 Efforts dans les tirants

Le suivi des efforts dans les tirants montre très peu de variations (moins de 100 kN pour les tirants à 128,5 NGF précontraints à 1600 kN et moins de 150 kN pour ceux à 123,5 NGF précontraints à 1200 kN). Les efforts mesurés sont similaires aux efforts attendus au regard des calculs d'exécution.

5 ANALYSE

5.1 Comparaison des mesures et du modèle aux coefficients de réaction

Les mesures effectuées au cours des travaux ont montré un comportement non attendu des éléments de soutènement. Les efforts dans le premier lit de butons ont été supérieurs aux calculs de 400%. Les déformations horizontales maximales de la paroi ainsi que le déplacement en pied ont été doublés. Ces divergences entre mesures et calculs aux coefficients de réaction ont déjà été mises en évidence. Les travaux de Masrouri sur modèles réduits (Masrouri et al., 1991) ont montré la formation d'une concentration de pression liée à l'effet de voûte au droit

de butons plus ou moins rigides non précontraints. Le modèle aux coefficients de réaction ne permet pas de traduire correctement ce phénomène, ce qui entraîne une sous-évaluation des efforts dans les butons.

5.2 Etude de sensibilité du modèle aux coefficients de réaction

Au vu des résultats, une étude de sensibilité aux paramètres a été menée sur le modèle utilisé au cours des études d'exécution. Celle-ci ne permet pas de retrouver l'allure de la courbe d'évolution des efforts mesurés durant les travaux.

En ce qui concerne la détermination des coefficients de réaction des sols, au lieu d'utiliser l'abaque de Chadeisson (Monnet 1994), on a calculé, à chaque phase de terrassement, de nouveaux coefficients à partir des formules de Balay (1985). La modélisation donne alors une évolution des efforts plus proche de celle mesurée jusqu'à la phase de mise en tension du deuxième lit de tirants à 123,5 NGF, mais ensuite, le modèle diverge et prédit une stabilisation des efforts dans les butons.

Il apparaît ainsi clairement que la méthode de calcul aux coefficients de réaction n'est pas adaptée à la configuration particulière de cette excavation où butons passifs et tirants actifs sont mis en œuvre conjointement. Suite à ce constat, un modèle aux éléments finis a été développé.

5.3 Modèle aux éléments finis

Ce modèle aux éléments finis a été développé avec le logiciel Plaxis, version 8. Dans un premier temps, pour mettre en évidence les limites de la méthode aux coefficients de réaction, les mêmes paramètres de sols sont utilisés en ce qui concerne γ , γ' , c_{us} , ϕ_u et K_0 (Tableau 1). Les modules d'Young utilisés sont égaux à $2,5 \cdot 10^4$ kPa pour les remblais et à $2,5 \cdot 10^5$ kPa pour les molasses argileuses et sableuses (définis au CCTP, corrélation à partir du module pressiométrique). Le coefficient de Poisson ν est égal à 0,49 pour les argiles et 0,3 pour les sables. Un coefficient multiplicateur R_{inter} permet de caractériser le cisaillement à l'interface sol-structure en fonction des caractéristiques de cisaillement du sol; on a pris $R_{inter} = 0,67$ (il est apparu qu'une valeur de 0,67 ou de 1 était sans grande conséquence sur les efforts dans les butons et la déflexion de la paroi). La loi de comportement de sol retenue est de type Mohr-Coulomb, drainée pour la molasse sableuse uniquement (la modélisation de type Hardening Soil a montré des résultats équivalents en terme de déplacement de paroi et d'efforts dans les butons). Les valeurs qui caractérisent la paroi et les éléments de reprise sont résumées dans le Tableau 3. Les conditions hydrauliques sont analogues à celles du modèle aux coefficients de réaction, à savoir, un abaissement du niveau d'eau coté fouille à chaque phase de terrassement, et une pression d'eau s'appliquant sur la paroi moulée égale à 10 kPa sur la hauteur de molasse excavée. Les phénomènes d'écoulement n'ont pas été modélisés.

Tout d'abord, cette modélisation donne des résultats similaires à la modélisation aux coefficients de réaction au niveau du dimensionnement de la paroi moulée, puisque l'on obtient le même ordre de grandeur pour les moments fléchissants.

Cependant, en termes d'efforts dans les butons les résultats sont très différents. Comme on peut le voir sur la Figure 5 - calcul EF demie station, on retrouve clairement l'allure des mesures réalisées durant les travaux, avec une erreur maximale de 57% vis-à-vis de B1 et de 46% vis-à-vis de B2. En terme de déplacement de paroi (Figure 7), la modélisation prédit la formation d'un ventre se déplaçant progressivement vers le bas. Le maximum de déplacement (16,8 mm à 122 NGF) obtenu lors de la dernière phase est proche des 18 mm mesurés lors des travaux. Le déplacement du pied de la paroi (5,8 mm) est supérieur à la mesure et le déplacement en tête est quasiment nul. En ce qui concerne les efforts dans les tirants et dans le deuxième lit de butons, les valeurs calculées sont similaires aux valeurs mesurées.

Le graphique de droite sur la Figure 7 montre la répartition de la pression différentielle s'exerçant sur la paroi après la dernière phase d'excavation dans le cas du calcul aux éléments finis. Ce graphique met en évidence les concentrations de pression importantes au droit des tirants et butons dans la molasse. Le phénomène d'effet de voûte est donc bien modélisé par le calcul EF, au contraire du calcul aux coefficients de réaction (Figure 4).

Afin d'exploiter les possibilités fournies par le logiciel Plaxis, on a complété le modèle précédent en modélisant l'ensemble de la station. Le comportement modélisé des deux parois est similaire au cas de la demie station. En ce qui concerne les butons du premier lit (Figure 5, calcul EF station entière), outre une valeur un peu faible pour la première phase de terrassement, les autres valeurs sont très proches de la mesure du buton B2 (au maximum +24%). Pour les butons du deuxième lit ainsi que pour les tirants, les valeurs calculées et mesurées restent proches. Ainsi, le modèle complet, dans ce cas de station sans dissymétrie notable, n'apporte que peu d'amélioration dans la comparaison avec les valeurs mesurées.

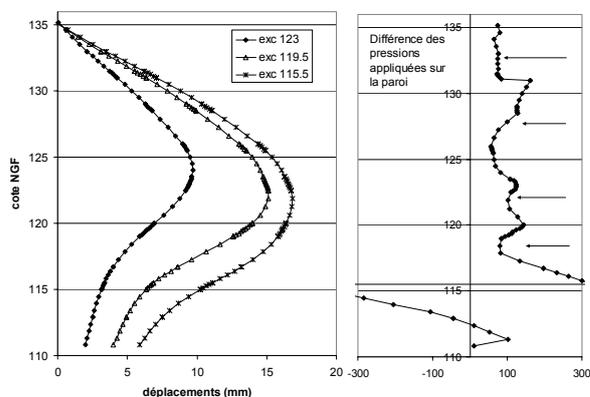


Figure 7. Calcul aux éléments finis - Déformée horizontale de la paroi et diagramme des pressions différentielles

Tableau 3 : Caractéristiques des éléments de reprise – modèle Plaxis

	Paroi	Buton 133	Buton 120	Tirants
EI (kNm)	$1 \cdot 10^6$	/	/	/
EA (kN/m)	$1 \cdot 10^7$	$4,2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^5$
Lspac (m)	/	6,8	3,4	3,4
Lutile (m)	/	8,4	8,4	/

EI : rigidité, EA : raideur axiale, Lspac : espacement, Lutile : longueur utile

6 CONCLUSION

Cette étude a permis de confronter les résultats d'instrumentation et de modélisation dans le cas d'une grande excavation où butons passifs et tirants précontraints sont mis en œuvre conjointement. Il a été mis en évidence des divergences très importantes entre les résultats de calculs utilisant le coefficient de réaction et les mesures, aussi bien en terme d'efforts dans les butons que de déplacements horizontaux de la paroi. Un second modèle, réalisé à l'aide d'un logiciel aux éléments finis, a montré qu'il permettait d'appréhender correctement les sollicitations aussi bien dans les butons rigides que dans les tirants beaucoup plus souples.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier le groupement d'entreprises Campenon Bernard – Eiffage TP impliqué dans les travaux de creusement du tunnel et des stations du lot 2 de la ligne B du

méto de Toulouse pour l'aide qu'il a pu apporter, en particulier dans la collecte des données.

RÉFÉRENCES

- Balay, J. 1985. Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction. LCPC, *Note d'information technique*.
- Masrouri, F. et Kastner, R. 1991. Essais sur modèle de rideaux de soutènement ; confrontation à diverses méthodes de calcul. *Revue française de Géotechnique*, 55, 17-33.
- Monnet, A. 1994. Module de réaction, coefficient de décompression, au sujet des paramètres utilisés dans la méthode de calcul élastoplastique des soutènements. *Revue française de Géotechnique*, 66, 67-72.
- Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analysis, version 8 user manual*. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 2002.
- RFL 2003*. Notice d'utilisation RIDO 4.
- Schmitt, P. 1998. De l'élasticité linéaire au coefficient de réaction : théories, observations et ordres de grandeur. *Revue française de Géotechnique*, 85, 79-87.