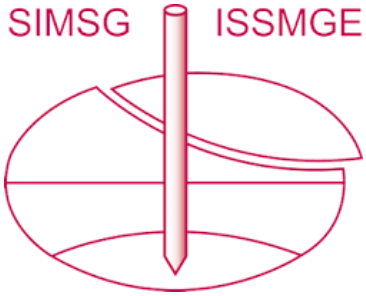
INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING



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.

Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
© 2005–2006 Millpress Science Publishers/IOS Press.
Published with Open Access under the Creative Commons BY-NC Licence by IOS Press.
doi:10.3233/978-1-61499-656-9-1577

Influence du jet grouting sur le creusement d'un tunnel : Cas du métro d'Alger

Influence of jet grouting on the excavation of a tunnel: Case of the Algiers subway

M. Akchiche
Laboratoire de Géotechnique, Intrastructures Urbaines, Environnement et Aménagement, F.G.C./U.S.T.H.B., BP.32 El-Alia, Algérie
R. Bahar
Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement, Université de Tizi-Ouzou, 15000, Algérie
Y. Boudar
Entreprise Métro d'Alger, Algérie
B. Cambou
Laboratoire de Tribologie et de Dynamique des Systèmes. Ecole centrale Lyon, France

RÉSUMÉ

En sites urbains, les mouvements induits par le creusement d'un tunnel à faible profondeur peuvent causer des désordres considérables aux constructions voisines. Le creusement, effectué entièrement dans la marne du tunnel sous l'Hôpital Mustapha sur la ligne 1 du métro d'Alger, présente de sérieuses difficultés liées principalement à la présence de bâtiments en surface et à la faible épaisseur de la marne au-dessus de la voûte du tunnel. Cette épaisseur est inférieure à un mètre, voir nulle par endroit, le long du tracé. Dans ce cas, le risque à la fois de venue de sables silteux saturés qui surmontent cette couche de marne, associé ou non à la rupture de la marne est très grand. Le creusement du tunnel a nécessité l'utilisation d'un jet grouting pour améliorer la résistance du tunnel et limitant également les mouvements en surface. Cette communication présente le tunnel et l'influence de l'utilisation d'un tel système de renforcement sur les mouvements de bâtiments existants en surface. Les résultats de prédictions de ces mouvements à l'aide de méthodes empiriques, analytiques et numériques sont également présentés, et confrontés aux mesures in situ.

ABSTRACT

In urban sites, the movements induced by the excavation of a tunnel to low depth can cause considerable disorders with close constructions.The excavation entirely in the marl of the tunnel under the Mustapha Hospital on line 1 of the subway of Algiers presents serious difficulties related mainly on the presence of buildings on the surface and the thickness of the marl above the vault of the tunnel.

This thickness is lower than one meter, even null by place, along the layout. In this case, the risk at the same time of saturated silteux sand arrival which surmounts this layer of marl, associated or not the rupture of the marl is very great. The digging of the tunnel required the use of a jet grouting to improve resistance of the ground furnishs above the vault. This treated layer acts like a vault umbrella making it possible to avoid the collapse of the face of the tunnel and also limiting the movements on the surface. This communication has the tunnel and the results of the use of such a system of reinforcement on the movements of existing buildings on the surface. The results of predictions of these movements using empirical, analytical and numerical methods are also presented and compared with in situ measurements.

1 INTRODUCTION

La maîtrise des déformations et de la stabilité de l'avant et à l'arrière du front de taille et son amélioration par un renforcement adéquat est un sujet de grande importance en travaux souterrains, en raison des conséquences qui pourraient être dramatiques principalement en zones urbaines. Au-delà de la stabilité, il est tout aussi important de maîtriser les mouvements du terrain à lavant du front. Ces mouvements peuvent être très importants si le front de taille n'est pas suffisamment stable ou si le tunnel à une forte interaction avec des ouvrages existants. Toute perte de volume peut en effet engendrer des tassements de surface et donc des dommages aux constructions existantes à l'intérieure de la zone d'influence. Pour les terrains meubles, les déplacements peuvent induire une perte significative de résistance, et déclencher ainsi une rupture précoce.

De plus en plus d'ouvrages souterrains sont réalisés dans des terrains de qualité médiocre et dans des environnements sensibles aux déformations, ce qui a conduit à utiliser fréquemment des techniques de pré-soutènement (pré-voûtes, boulonnage du front de taille, jet grouting …), qui viennent agir sur le terrain dans la zone du front de taille et parfois même loin en avant.

Une grande variété de techniques d'excavation a été développée, qui utilisent différentes méthodes pour renforcer et soutenir l'avant de l'excavation. Il est donc important d'évaluer et de comparer l'effet de ces méthodes.

Nous présentons dans cette article un tunnel de grand gabarit, de 10 mètre de diamètre, creusé par des moyens manuels avec un mode de creusement en section divisée. La stabilisation du front de taille est assurée par des colonnes de jet grouting installées à l'avancement.

Un important dispositif de mesure a été mis en place pour suivre l'évolution des mouvements de terrain en temps réelle (24 mois est plus).

En matière de stabilité du front de taille, en terrain argileux, les travaux de Broms et al. (1967) et Peck, (1969) proposent d'introduire la notion de facteur de charge « N ». Des avancées assez conséquentes ont été acquises vers la fin des années quatre-vingt on peut citer en particulier les travaux de Mair, (1979); Davis et al. (1980). L'utilisation de ces méthodes analytiques demande toutefois quelques précautions car elles ont été développées pour des terrains homogènes.

Par ailleurs, une démarche analogue a été suivie par plusieurs auteurs. On peut citer les travaux de Peck (1969), Farmer (1977), Poupelloz (1984) et Attewell (1984) qui sur la base de résultats expérimentaux proposèrent des expressions qui généralement prennent en considération peu de paramètres (la profondeur, le diamètre, la nature du sol). On se propose dans ce travail d'étudier quelques unes de ces approches.

Différents développements ont également été entrepris en matière d'analyse du phénomène d'interaction sol, structure et mode de creusement, par l'utilisation de calculs numériques. La modélisation numérique se base souvent sur une analyse 2D, mettant en application des modèles de comportement élastoplastiques, qui sont censés décrire le comportement des états limites de déconfinement des sols.

Le but principal de la modélisation numérique est d'évaluer:

- L'influence du jet grouting sur les déformations du sol à l'avant et l'arrière du front du tunnel.
- L'interaction du sol, du jet grouting et du soutènement.
- L'influence de la variation du paramètre de déconfinement du sol sur la modélisation du comportement du tunnel.

Dans la modélisation de l'excavation du tunnel, on prendra en compte cinq phases de travaux.

Les résultats obtenus sont fonctions des propriétés mécaniques des sols, du procédé d'excavation et du soutènement mis en place. Ces résultats dépendent évidemment de la méthode de calcul utilisées, et pour ce qui concerne la modélisation numérique de la valeur du taux de deconfinement utilisé.

En conclusion, une comparaison des résultats de mesure in situ avec les prédictions du modèle numérique est présentée.

2 PRESENTATION DU PROJET ET DE LA METHODE DE CREUSEMENT

La région d'Alger, est constituée de plusieurs ensembles géomorphologiques (le Sahel d'Alger, la plaine de la Mitidja, l'atlas Blideen). L'analyse de la campagne de reconnaissance a montré que le sous-sol présente une structure assez homogène, représenté essentiellement par quatre grands ensembles lithologiques distincts. De bas en haut en distingue :

- La formation du Plaisancien : marne grise à grise verdâtre,
- La formation de l'Astien : des grès, sable fin à grossier,
- La formation du Plio-quaternaire : argile brun à marron,
- La formation du Quaternaire : colluvions et alluvions et des remblais.

En notera qu'il existe deux zones aquifères qui surplombe la formation du plaisancien.

La région d'Alger est une zone sismique active, du fait de sa position géographique à la limite des deux plaques tectoniques, qui sont en continuel rapprochement, l'Afrique et l'Europe.

Le tunnel étudier est de profil en fer à cheval sans radier voûté; il est situé à faible profondeur (de 10 à 25 m) dans une zone fortement urbanisée et traverse des terrains de qualité très médiocre. Les caractéristiques géotechniques moyennes des différents horizons sont résumées dans le tableau 1.

L'excavation du tunnel est basée initialement sur des critères de la méthode NATM (New Austrian Tunneling Method). Deux galeries (Fig. 1) ont été réalisées sur tout le tronçon d'étude.

Une première technique à été adoptée utilisant deux phases de creusement: la demi-section supérieure et la demi section inférieure. Cette technique a rapidement montré ses limites. Vu la médiocrité du terrain traversé ainsi que les tassements observés en surface il a été décidé de changer de technique de creusement.

La deuxième technique retenue a intégré la réalisation de colonnes de jet grouting horizontal quasi-parallèles au tunnel. Il a été retenu la réalisation de deux auréoles pour former ainsi une voûte parapluie (32 colonnes).

Ce creusement est réalisé en cinq étapes (Fig. 1):

- Creusement des deux galeries gauche et droite,
- Mise en place du soutènement des galeries,
- Mise en place du jet grouting,
- Excavation de la demi-section supérieure,
- Mise en place du soutènement provisoire : cintre métallique et béton projeté sur une épaisseur de 15 cm.

Il faut noter que les moyens de mesures ont été mis en place après la réalisation des deux galeries, et avant le jet grouting.

Il faut retenir également qu'un tassement initial de 20 à 32 mm, causé par le creusement de ces deux galeries, à été enregistré au droit des constructions existantes.

3 LE DISPOSITIF D'AUSCULTATIONS

Deux plots d'essais ont été mis en place. Le premier, situé au début du tracé, avant le creusement, a comme objectif principal d'optimiser les paramètres de pilotage du jet grouting. Le second a pour objectif d'analyser l'évolution de certains paramètres de creusements en vue d'une éventuelle correction pour optimiser le procédé.

Le dispositif d'auscultation est constitué par :

- Des points de repère disposés au niveau de la paroi moulé,
- Des points de repère disposés sur le tracé: il a été procédé à la réalisation de 24 profils, chacun comprenant 7 points de mesure (Fig.2).
- Des cordes de convergences dans le tunnel,
- Des points de repère disposés sur les pieds de cintre.

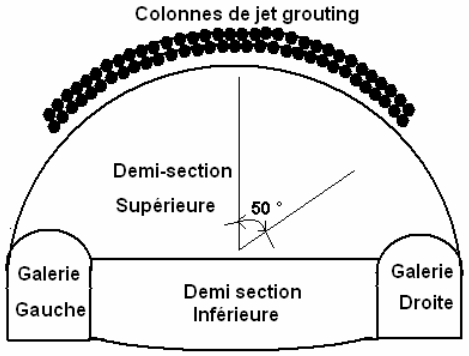


Figure 1. les étapes de creusement du tunnel du métro d'Alger.

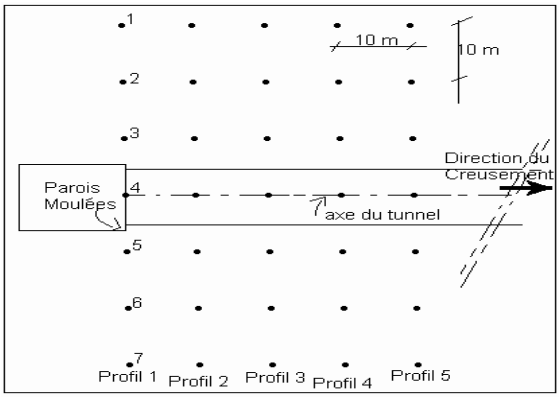


Figure 2. Implantations en surface des profils de mesure de ta ssement par rapport à l'axe du tunnel.

Tableau 1 : Caractéristiques géotechniques moyennes des couches de sols de la zone d'étude.

Nature	Argile sablo-limoneuse	Argile marneuse	Sable fin à grossier	Marne grise compacte
γ_h kN/m^3	20.7	20.6	18	21
W (%)	19.7	22.6	24.4	22.6
S_r (%)	93	100	75	100
W_L(%)	52	53	/	68
I_P (%)	23.5	27	/	35

3.1 *Mise en place du jet grouting*

Le contrôle de l'efficacité des colonnes jet grouting a nécessité :

- la réalisation de 12 colonnes (Fig. 3) d'essai horizontal d'inclinaison 5° et de longueur de 10 et 12 m (3 colonnes de 10 m et 9 colonnes de 12 m).
- un contrôle continue de certaines variables (qualité du mélange sol/ciment, diamètre de colonne, résistance du mélange sol/ciment).

Pendant l'injection du jet grouting, un contrôle continue a été mis en place pour mesurer les pertes de coulis et les changements de conditions de travail. A partir de ces observations, les caractéristiques retenues pour le jet grouting sont: un mélange eau-ciment (1.0/1.0), des valeurs de pression d'injection égales à 35 MPa, une vitesse de traction de la foreuse de 1.0 m/minute, une longueur de trou de forage de 17.40 m et une longueur de jet grouting de 12.00 m.

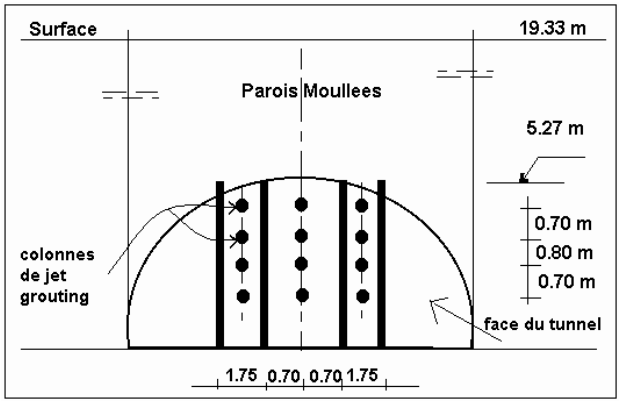


Figure 3. Implantation des colonnes de jet grouting horizontal sur la face du tunnel coté parois moulées.

3.2 *Vitesse de creusement*

Les deux galeries ont été déjà réalisées avec des phases de creusement de un mètre avec mise en place du soutènement. Le creusement tenant compte du jet grouting (Fig. 1) a respecté le phasage suivant :

- Mise en place du jet grouting « 5 jours »,
- Creusement de la demi section supérieure et mise en place du soutènement sur une distance de 5,40 m,
- Reprise du jet grouting.

4 REACTION DU SOL LORS DU CREUSEMENT DU TUNNEL

4.1 *Effets longitudinaux :*

L'analyse des résultats des mesures obtenues met en évidence quatre phases de comportement du terrain (Figs. 4 et 5):

Phase 1, à l'approche du front : On note que, dans tous les cas, le tassement avant l'arrivé du front reste faible, indiquant un bon maintien du front de taille par le jet grouting.

Phase 2, passage du front : On constate un déclenchement de tassement immédiat qui est favorisé par le refoulement latéral du terrain au niveau des pieds de cintres. Cela est mis en évidence par les mesures des déplacements latéraux des pieds des cintres gauche et droit.

Phase 3, à l'arrière du front : Les mouvements verticaux se poursuivent et peuvent être éventuellement attribués à la nature du soutènement qui favorise la création de vide derrière le soutènement favorisant ainsi la compression du terrain.

Phase 4, l'effet du temps : Après un certain temps, en observe une tendance à la stabilisation. Le mouvement peut être dû à plusieurs facteur dont le fluage du terrain, la déformation du soutènement etc..

4.2 *Effets transversaux*

L'interprétation des mesures de nivellement a été menée sur la base de l'approximation de la cuvette de tassement (S) par la courbe de Gauss (Peck et Attewel, 1969).

$$S=S_{max}.\exp\left(-y^2/2i^2\right) \quad (1)$$

« S_{max}» est la valeur maximale de tassement, et « i » représente la distance du plan médian au point d'inflexion de la courbe de Gauss (tableau 2). Pour la valeur de l'écart type « i » de nombreux auteurs (Peck, 1969; Schmidt, 1969; Rankin, 1980; O'Reilly and New, 1972; Oteo-et al., 1996; et Akchiche et al., 2000 etc…) ont proposé des approximations fonction de la nature du sol, de la profondeur (H) et du diamètre (D) du tunnel (tableau 2) (H=18 m, D=10 m).

Pour le tassement maximal, nous utiliserons la formulation proposée par Myrianthis (1974) (équation 2) où A et n dépendent de la nature du sol (A=0.35 et n= 0.41), car elle a donnée de très bons résultats pour les prédictions des tassements de la galerie de reconnaissance (Akchiche, 1996).

$$\frac{H}{2.R}=A\left(S_{max}/R\right)^{-n} \quad (2)$$

Les résultats de calcul donnent un tassement de l'ordre de 92 mm (Fig. 7).

Tableau 2: Valeur de l'écart type « i » donnée par différents auteurs

Auteurs	Expression de i
Attewel (1977)	i = 0,5 H
Clough et al. (1981),	$i = 0,5\ H^{0.8}\ D^{0.2}$
O'Reilly (1982)	i = 0,5 H ou i = 0,43 H +1,1
Rankin (1987),	i = 0,5 H
Chapeau (1991)	i = 0,2 H
Akchiche et al. (2000)	i=0,51.H–0.63
Oteo-et al., (1996)	i=0,525.H–0,21.D

5 MODELISATION DU CREUSEMENT

Un calcul numérique avec un modèle bidimensionnel a été réalisé avec le code CESAR-LCPC Ver. 4.0, bien adapté pour évaluer les effets de l'excavation sur son environnement immédiat (sol environnant, surface, soutènement provisoire etc…).

La loi de comportement retenue pour le sol est la loi élasto-plastique parfaite avec le critère de Mohr-Coulomb et une règle d'écoulement non associée qui nécessite peut de paramètre.

Ce creusement est réalisé en cinq étapes, avec et sans mise en place du jet grouting et d'élément de soutènement provisoire (Fig. 6). Le deconfinement retenue et de l'ordre de 60 % (akchiche, 1996) avec un k_0=0.7. Les résultats numériques obtenues, pour un calcul avec jet grouting et sans mise en place du jet grouting sont donnés sur la figure 7

6 DISCUSSIONS DES RESULTATS OBTENUS

L'analyse des observations expérimentales et des calculs effectués sur un tronçon de tunnel excavé à une faible profondeur permet de donner les conclusions suivantes :

- Les mesures des tassements en surface, en dehors des emprises des bâtiments existants est de l'ordre de 65 mm après plusieurs mois d'observations.

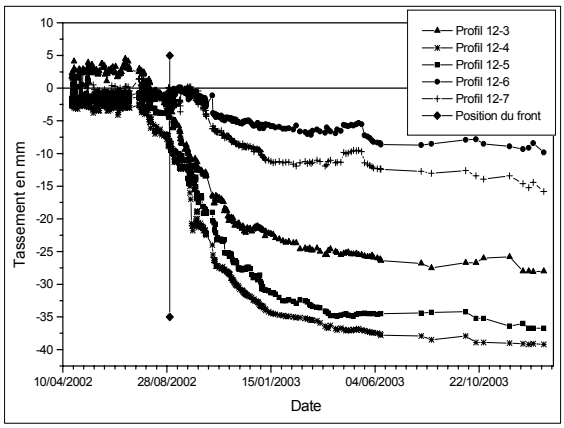


Figure 4. Evolution du tassement du profil 12.

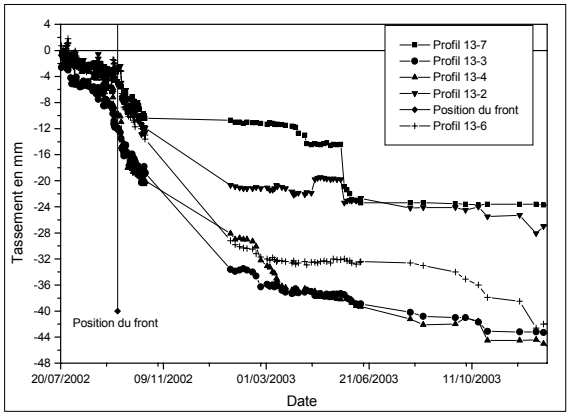


Figure 5. Evolution du tassement du profil 13.

- La prévision des tassements par les différentes méthodes donne des différences pouvant aller du simple au double. La méthode analytique retenue est celle de Myrianthis (1974) qui à déjà été utilisée avec succès en donnant de bons résultats pour la galerie de reconnaissance (Akchiche, 1996). Le tassement maximal obtenus est de 92mm.
- Les calculs numériques prédisent des tassements de surface de l'ordre de 93 mm sans la mise en place du jet grouting. Ces tassements peuvent donc engendrer des dommages importants sur les bâtiments existants. L'utilisation du jet grouting s'est donc avéré indispensable et justifié. Avec l'utilisation du jet grouting, le tassement obtenu est de 60 mm.

Par ailleurs, il ressort de cette étude, que l'utilisation des méthodes empiriques de prédiction du tassement et de la forme de la cuvette peuvent donner de très bonnes informations sur les risques que peut provoquer la construction du tunnel sur les constructions existantes, que ce soit au-dessus ou à une certaine distance de l'axe du tunnel. Des perspectives très intéressantes sont tirées des mesures ou il a été observé des accélérations de tassement après le passage du front de taille qui pourraient être liées a un déconfinement des pieds droit. Il serait donc intéressant a ce niveau de faire un jet grouting perpendiculaire à l'axe du tunnel pour éviter un deconfinement important.

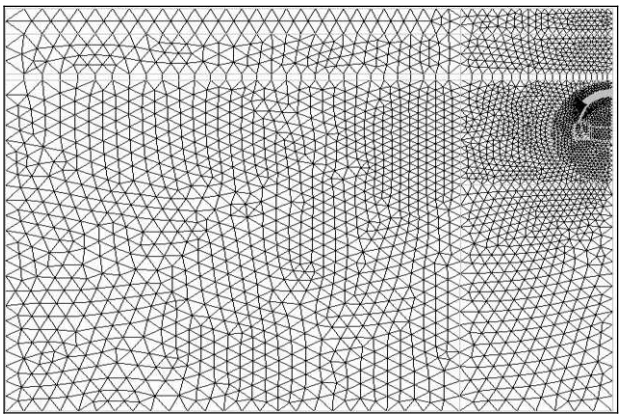


Figure 6. Maillage retenue pour le modèle bidimensionnel.

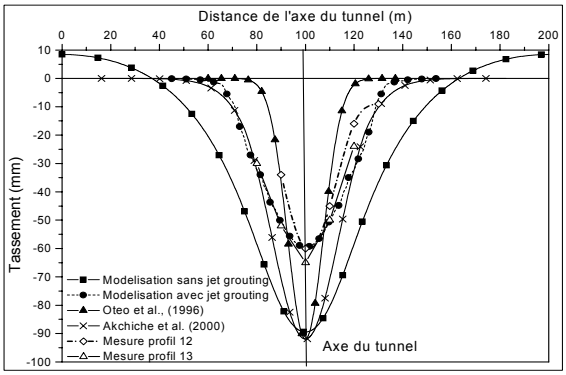


Figure 7. Evolution du tassement obtenue par les méthodes analytique, ainsi que les résultats de calcul de la modélisation numérique du creusement du tunnel avec et sans jet grouting.

BIBLIOGRAPHIES

Akchiche M. and Bahar R. 2000. Estimate of compressing of surface by the empirical méthods Case of the Subway Of Algiers, Biskra.

Akchiche M. 1996, Analyse de l'adaptation de la méthode convergence confinement au tunnels peu profonds, application au tunnel du métro d'alger, thèse de magister, IGC, USTHB.

Broms and bennermar H. 1967, stability of clay at vertical openings, journal of the soil mechanics and foundations divisions, ASCE, sm1, janv, pp.71-94.

Chapeau. 1991. Auscultation du sol pendant le creusement, TOS n°.107, pp. 235-245.

Clough, G.W. and Schn-dt, B. 1981. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay, Soft clay engineering, Amsterdam: Elsevier, pp. 569-634.

Davis e.h. and Mair r.j. 1980. Analyse tridimensionnelle de la stabilité d'un tunnel au voisinage du front de taille dans une roche élastoplastique, publication du laboratoire de géotechnique de l'école polytechnique de Lausanne pp. 1130-1135.

Farmer I.W. 1977. Case histories of settlement above tunnels in clay, proceding of conference " large ground movements and structures" cadiff pp 357-371.

Mair r.j. 1979., centrifugal modelling of tunnel construction in soft clay, ph.d. thesis , university of Cambridge.

Myrianthis M. L. 1974. Quelques relations phénoménologiques sur le tassement d'un terrain de faible résistance surmontant un tunnel, Annales de l'institut technique du batiment et des travaux publics, Supplément au N°.317.

O'Reilly, M.P., New, B.M. 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitudes and prédiction, Tunnellini 82, London: IMM, pp. 173-181.

Oteo C.S and Sagaseta C. 1996. Some spanish experience on measurement and evaluation of ground displacements around urbaine tunnel. In R. J.Mair and R.N.Taylor (eds) ; Proc. Int. Symp. London 15-17 April, Rotterdam, Balkema.

Peck R. B. 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. Proc. 7 th ICSMFE, mexico, State of the art. Volumez : 225-290.
Poupelloz B. 1984, Tassements engendrés par le creusement des galeries de petite section a faible profondeur-exemple en région parisienne, rapport laboratoire régional de l'est parisien.
Rankin, W.J., 1987. Ground movements resulting from urban tunnelling: prédictions and effects, Geological society engineering geology special publications, ft'5, pp. 79-92.
Schmidt T. B. 1969, Settlement and ground mouvement associated with tunneling in soil. PHD Thesis, University of Illinois, USA.