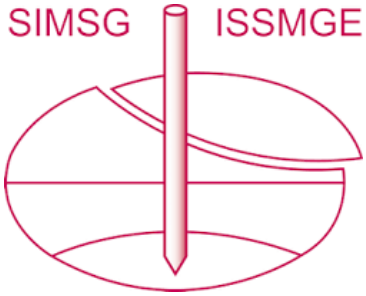
INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING



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.

Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Kastner, Emeriault, Dias, Guilloux (eds)
© 2002 Spécifique, Lyon. ISBN 2-9510416-3-2

Analyse des soulèvements induits par l'agrandissement d'une grande excavation

H. Le Bissonnais
Terrasol, Montreuil (93), France

S. Bretelle
Bouygues Offshore, St Quentin en Yvelines (78), France

Résumé : L'étude porte sur l'évaluation des déformations engendrées par les travaux d'excavation réalisés à l'occasion de l'extension d'une station de métro : il a été comparé à l'aide de calculs éléments finis l'influence du choix de la modélisation (modèle bidimensionnel ou tridimensionnel) ainsi que l'influence de la loi de comportement des sols (loi élastoplastique avec élasticité linéaire ou loi de type Hardening Soil, élastoplastique, mais non linéaire dans le domaine élastique). L'importance d'un modèle de comportement de sols différenciant les phases de chargement et les phases de déchargement est démontrée. Dans tous les cas, l'utilisation du modèle Hardening Soil conduit à des soulèvements cinq fois plus faibles que l'approche classique en élasticité linéaire. De même, l'effet tridimensionnel du problème est analysé : les soulèvements sont quatre fois plus faibles avec un modèle tridimensionnel qu'avec une approche bidimensionnelle.

1 PRESENTATION

Les soulèvements induits par les travaux d'excavation des ouvrages souterrains ou des fouilles à ciel ouvert sont toujours difficiles à évaluer par les méthodes classiques de dimensionnement. Le retour d'expérience montre que les calculs ont généralement tendance à surestimer ces soulèvements, conduisant à un surdimensionnement de l'épaisseur de béton ou du ferraillage des radiers des tunnels ou des fouilles. Une trop grande simplification des modèles et l'utilisation de lois de comportement du sol peu adaptées au phénomène de déchargement sont souvent à l'origine de ces résultats.

A l'occasion des études d'avant projet menées par SETEC TPI pour l'extension de plusieurs stations de la ligne A du métro de Toulouse, nous avons été amenés à comparer plusieurs modèles de calculs (modèle bidimensionnel, modèle tridimensionnel de la station existante et modèle tridimensionnel de la station avec son extension) en utilisant deux types de loi de comportement pour chaque modèle.

2 LE PROJET D'EXTENSION DES STATIONS

2.1 Géométrie de l'ouvrage

La station existante a été réalisée à l'abri de parois moulées avec des dimensions de 15 m de largeur, 37 m de longueur, et un niveau des voies se situant environ à 16 m de profondeur par rapport au terrain naturel. L'extension permettra de porter la longueur de la station à 52 m de longueur (15 m d'extension). Le métro existant en tunnel dans la zone d'extension doit être maintenu en service pendant les travaux.

2.2 Contexte géologique

Les reconnaissances géotechniques successives ont mis en évidence la stratigraphie suivante :

- la couverture est constituée, en partant du terrain naturel, de 5 m d'alluvions, de 3 m de sables puis de molasse,
- Le terrain encaissant du tunnel est constitué de molasse argileuse.

La nappe a été identifiée dans les sables.

3 LES MODELES

Les calculs ont été menés à l'aide du logiciel éléments finis PLAXIS version 7.2 pour les calculs bidimensionnels et Plaxis 3D Tunnel version 1.2 pour les calculs tridimensionnels.
Trois modélisations ont été réalisées :

- Un modèle bidimensionnel supposant une tranchée infinie (480 nœuds, 219 éléments) :

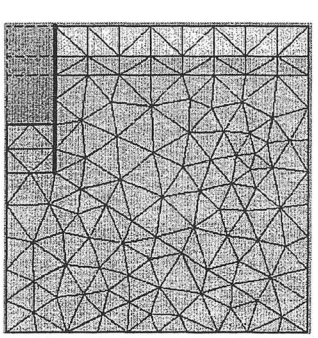


Figure 1. Modèle bidimensionnel.

- Un modèle tridimensionnel correspondant à la réalisation de la station existante (37 m de longueur) (17082 nœuds, 6027 éléments):

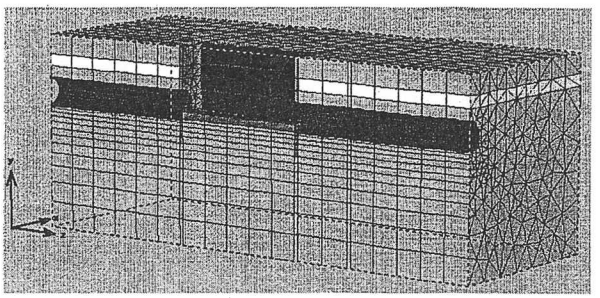


Figure 2. Modèle tridimensionnel. Station existante.

- Un modèle tridimensionnel correspondant à l'extension de la station sur une longueur complémentaire de 15 m, en prenant en compte le tunnel existant :

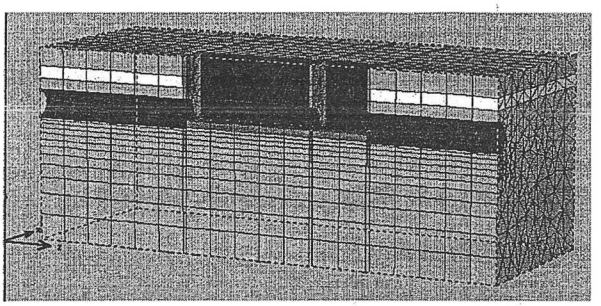


Figure 3. Modèle tridimensionnel. Extension de la station.

4 LES LOIS DE COMPORTEMENT

4.1 Loi élastoplastique en élasticité linéaire

Une loi élastoplastique classique de type Mohr-Coulomb a d'abord été utilisée, comme pour la plupart des projets classiques dimensionnés en éléments finis. Les caractéristiques mécaniques adoptées pour définir cette loi en élasticité linéaire avec un module de déformation unique sont les suivantes :

Sols	γ (kN/m^3)	c' (kPa)	ϕ (°)	E (MPa)	ν	k (m/s)
Alluvions	19	1	35	36	0.3	10^{-7}
Sables	19	1	35	60	0.3	10^{-5}
Molasse argileuse	19	10	30	180	0.3	10^{-7}

Tableau 1. Caractéristiques loi de Mohr-Coulomb.

Le module d'Young E est déterminé à partir de la méthode pressiométrique ($E = E_M/\alpha$, E_M étant le module pressiométrique et α le coefficient rhéologique caractérisant le sol dans la méthode pressiométrique de MENARD). L'angle de dilatance ψ est pris égal à $\varphi - 30°$, soit 0° pour la molasse et 5° pour les Alluvions et sables.

4.2 Loi de type Hardening Soil

La loi Hardening Soil du logiciel Plaxis (modèle de sol écrouissable) est une loi hyperbolique de type élastoplastique formulée dans le cadre de la plasticité avec écrouissage. Ce modèle du deuxième ordre permet de simuler le comportement des sables, des graves et des argiles surconsolidées.

La loi Hardening Soil introduit plusieurs modules de déformation en chargement et en déchargement :

- Un module E_{50} correspondant au module sécant à 50 % de la résistance en compression. Il est pris égal à 5/3 du module pressiométrique.
- Un module oedométrique, pris égal à la moitié du module E_{50}.
- Un module de déchargement E_{ur} pris égal à 5 fois le module pressiométrique E_M.

Sols	$E_{50}=5/3E_M$ (MPa)	$E_{oed}=1/2E_{50}$ (MPa)	$E_{ur}=5E_M$ (MPa)	p_{ref} (kPa)	ν
Alluvions	30	15	90	50	0.2
Sables	30	15	90	110	0.2
Molasse argileuse	200	100	600	185	0.2

Tableau 2. Caractéristiques loi Hardening Soil.

5 RESULTATS

Les calculs présentés ci-après sont effectués suivant la méthode des éléments finis, avec le logiciel PLAXIS Version 7.2 pour les calculs 2D, et Plaxis 3D tunnel version 1.2 pour les calculs tridimensionels.

5.1 Modèle 2D (tranchée infinie)

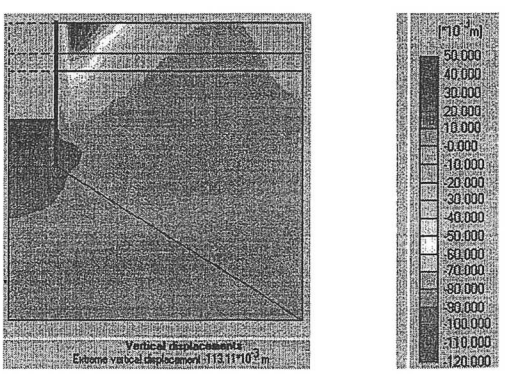


Figure 4 : Déplacement verticaux

Loi Mohr-Coulomb en 2D

Le soulèvement en fond de fouille atteint 50 mm, valeur non acceptable pour le projet, les travaux devant se faire sans interruption du trafic.

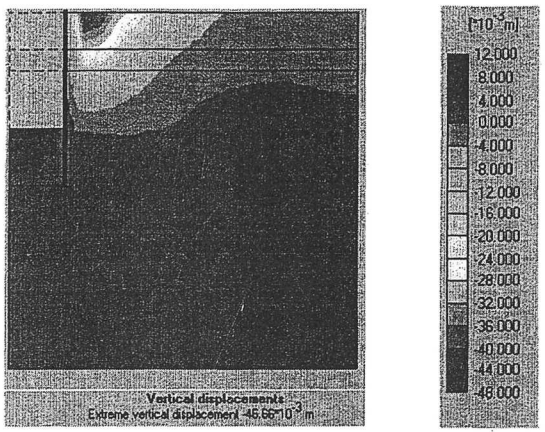


Figure 5. Déplacements verticaux.
Loi Hardening Soil en 2D.

Avec ce type de loi de comportement, le soulèvement atteint 12 mm, soit une réduction de facteur 4 du déplacement (50 mm avec Mohr-Coulomb).

5.2 Modèle 3D station existante (37 m)

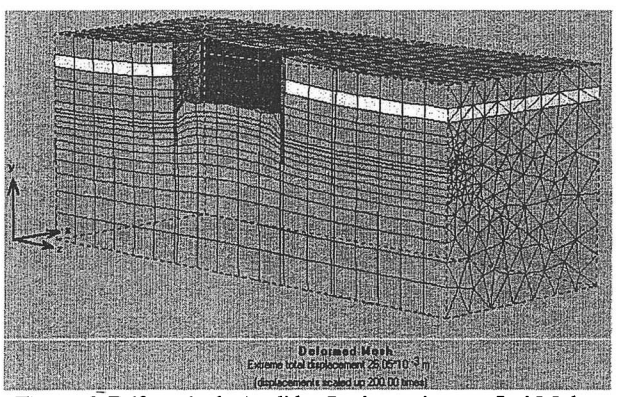


Figure 6. Déformée du modèle. Station existante. Loi Mohr-Coulomb.

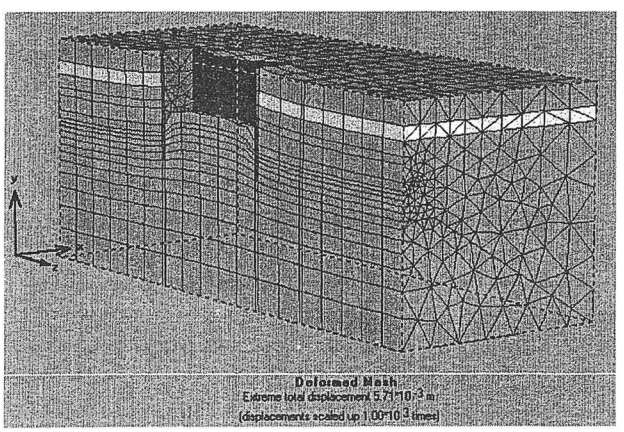


Figure 7. Déformée du modèle (station existante). Loi Hardening Soil.

Le soulèvement maximal au centre du radier est de 26 mm avec la loi Mohr-Coulomb et de 6 mm avec le modèle Hardening Soil.

5.3 Modèle 3D extension de la station (+15 m)

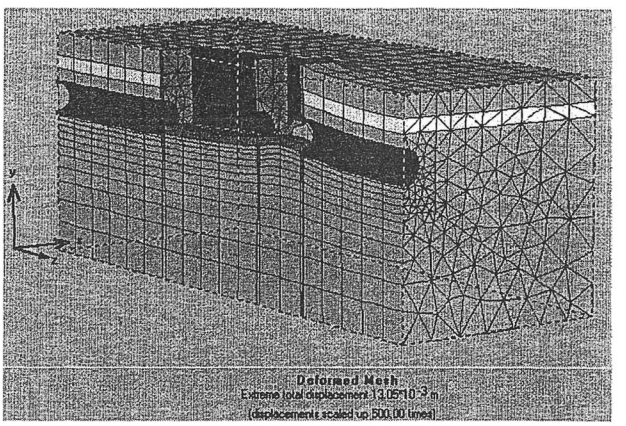


Figure 8. Déformée du modèle (extension). Loi Mohr-Coulomb

Le soulèvement maximal au centre du radier de l'extension est de 13 mm, soit deux fois plus faible que pour la fouille de 37 m.

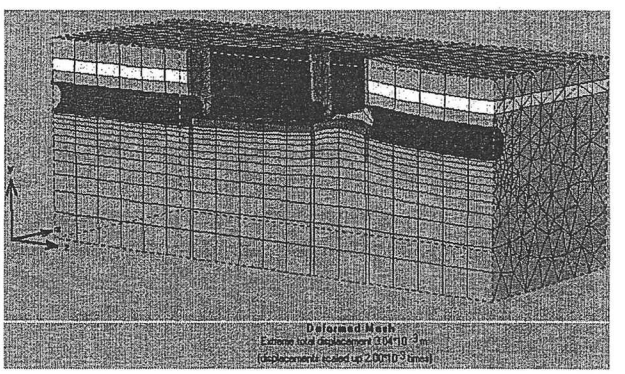


Figure 9. Déformée du modèle (extension) Modèle Hardening soil

Le soulèvement maximal au centre du radier de l'extension est de 3 mm.

Cette réduction de facteur 4 du soulèvement de radier en comparaison au calcul avec la loi de Mohr-Coulomb (réduction déjà constatée sur le calcul sans extension) est essentiellement la conséquence de l'utilisation d'un module de déchargement E_{ur} plus de 3 fois supérieur au module de déformation unique utilisé en Mohr-Coulomb, résultat accentué par la prise en compte du phénomène d'écrouissage dans la loi Hardening Soil.

5.4 Synthèse

Le Tableau 3 et la Figure 10 ci-dessous synthétise les soulèvements obtenus en fond de fouille dans les différents cas de calcul.

Soulèvements maximum	Modèle 2D (tranchée infinie)	Modèle 3D station existante (37m)	Modèle 3D extension station (15m)
Mohr-Coulomb	50 mm	26 mm	13 mm
Hardening Soil	12 mm	6 mm	3 mm

Tableau 3. Synthèse des résultats.

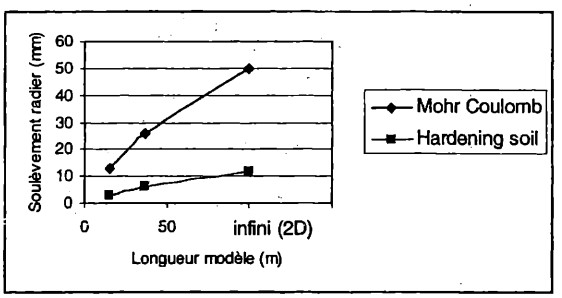


Figure 10. Evolution des soulèvements.

Ces résultats montrent en premier lieu l'importance du comportement tridimensionel du phénomène représenté. La modélisation 3D d'une station de 37 m de longueur conduit à des soulèvements deux fois plus faibles que la modélisation 2D. La modélisation de l'extension de la station en 3D conduit à des soulèvements de 13 mm, quatre fois plus faibles que la modélisation 2D.

En second lieu, l'importance d'un modèle de comportement des sols différenciant les phases de chargement et les phases de déchargement est démontrée. Dans tous les cas, l'utilisation du modèle Hardening Soil conduit à des soulèvements cinq fois plus faibles que dans l'approche classique avec Mohr-Coulomb.

En comparant les résultats extrêmes de nos calculs, on met en évidence :

- des soulèvements de 50 mm en 2D avec une loi de type Mohr-Coulomb, inacceptables pour le projet,
- des soulèvements de 3 mm en 3D pour une extension de station de longueur limitée à 15 m, et avec un modèle Hardening Soil.

6 CONCLUSION

Cette étude montre qu'un trop grande simplification des modélisations des ouvrages et des lois de comportement des sols en calculs éléments finis peut conduire dans certains cas à des résultats exagérément pessimistes pouvant remettre en cause la faisabilité du projet. Cela est particulièrement sensible dans le cas des fouilles de petites dimensions où l'effet tridimensionnel est loin d'être négligeable. Le progrès des outils de calculs (simplification de la procédure de réalisation des maillages permettant le montage de modèles 3D plus rapidement, ordinateurs de plus en plus puissant et de plus en plus rapides) permet actuellement d'obtenir une bonne approche de ce type de problème dans un délai et un coût tout à fait raisonnables.

L'utilisation de lois de comportement plus adaptées au phénomène de déchargement permet également d'évaluer les soulèvements en fond de fouille de manière plus réaliste.

Le modèle tridimensionnel doit néanmoins encore être réalisé avec un certain nombre de précautions : un raffinement trop important du maillage conduit très rapidement à un modèle très lourd et difficile à maîtriser pouvant conduire à plus d'interrogation que de réponse.

De même, l'utilisation de loi de type Hardening Soil nécessite une bonne connaissance du matériau modélisé, et donc une campagne de reconnaissances de sol adaptée et permettant une bonne estimation des paramètres caractérisant la loi. La réalisation d'essais pressiométriques cycliques et d'essais triaxiaux cycliques est à proposer plus systématiquement pour ce type d'ouvrage.