
Modélisation numérique de l'effet de la construction d'un ouvrage souterrain sur les terrassements en surface. Application au Métro d'Alger.

Djenane Mohamed ⁽¹⁾, Hamami Mounir ⁽²⁾, Hammoud Farid ⁽³⁾

¹ Maître assistant, Département de génie civil, Université de Jijel

² Professeur, Département de génie civil, Université de Skikda

³ Maître de conférences, Département de génie civil, Université de Batna

RÉSUMÉ. En site urbain, le creusement des tunnels à faible profondeur peut induire des mouvements de terrain qui sont susceptibles de provoquer des déformations et dans des cas extrêmes des dégâts importants aux structures en surface. Ce travail traite une analyse numérique, avec paramétrage géotechnique, de l'effet du creusement d'un tunnel à faible profondeur sur une structure à étage multiple centrée au dessus de l'axe d'un tunnel. L'étude est effectuée à l'aide du code de calcul Plaxis 8.2 qui est basé sur la méthode des éléments finis (MEF) en déformation plane. L'analyse s'applique à un cas réel en l'occurrence le métro d'Alger, l'excavation a été réalisée selon la Nouvelle Méthode Autrichienne (NMA) en tenant compte du déconfinement. Les résultats sont présentés en terme de déplacements et efforts internes et ont mis en évidence une influence manifeste de l'écoulement, et à un degré moindre le rabattement de la nappe et le module d'Young.

Mots clé: déformation plane, interaction sol-structure, MEF, NMA, Plaxis, tunnel.

1. Introduction et problématique

L'encombrement de la surface du sol dans les villes rend nécessaire la construction d'ouvrage souterrain (voiries et métros).

- Les problèmes majeurs liés à la construction de ces ouvrages sont :
- La stabilité du terrain à proximité du front de taille
- Le choix du type de soutènement et de revêtement
- La maîtrise des mouvements engendrés en surface par le creusement en particulier ; lorsque l'ouvrage est construit à une faible profondeur ou à proximité d'autres structures (en site urbain)
- Maîtrise des phénomènes hydrauliques (présence d'une nappe aquifère)

2- Modélisation du métro d'Alger

2.1 Hypothèses géométriques et géotechniques

La section de calcul a été choisie dans le tronçon Hamma/Jardin d'Essai, vers le PK5.100-5.200. Cette section se trouve entièrement dans les marnes compactes [7].

| Formations | γ_d (kN/m ²) | γ (kN/m ²) | E_0 (MPa) | E_∞ (MPa) | ν | K_0 | Court terme | | Long terme | |
|-------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------|---------------------|-------|-------|----------------|-----------------|---------------|----------------|
| | | | | | | | C_u (kPa) | ϕ_u (°) | C' (kPa) | ϕ' (°) |
| Quaternaire | 19 | 22 | 120 | 100 | 0.25 | 0.54 | 30 | 27.5 | 10 | 27.5 |
| Molasse | 17 | 20.5 | 120 | 100 | 0.25 | 0.46 | 5 | 32.5 | 0 | 32.5 |
| Marnes | 22 | 24 | 500 | 350 | 0.30 | 0.50 | 250 | 30.0 | 150 | 30.0 |

Tab 2.1: Caractéristiques géotechniques du sol.

| Formations | k_h (m/jour) | k_v (m/jour) | R_i Rigidité des interfaces |
|-------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|
| Quaternaire | 12,96 | 12,96 | 1 |
| Molasse | 4,32 | 4,32 | 1 |
| Marnes | $8,6 \cdot 10^{-9}$ | $8,6 \cdot 10^{-9}$ | 1 |

Tab 2.2 Perméabilités du sol et rigidité des interfaces.

| Rigidité | Soutènement provisoire | | Revêtement définitif | | Superstructure | |
|--|------------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------|------------|
| | Court terme | Long terme | Court terme | Long terme | Court terme | Long terme |
| Rigidité normale EA (kN/m) | $2,45.10^6$ | $2,45.10^6$ | $1,2.10^7$ | 6.10^6 | 5.10^6 | 5.10^6 |
| Rigidité de flexion EI (kN.m ² /m) | $7,82.10^3$ | $7,82.10^3$ | $2,5.10^5$ | $1,25.10^5$ | $2,6.10^4$ | $2,6.10^4$ |

Tab 2.3 : Caractéristiques mécaniques des soutènements, des revêtements et de la superstructure.

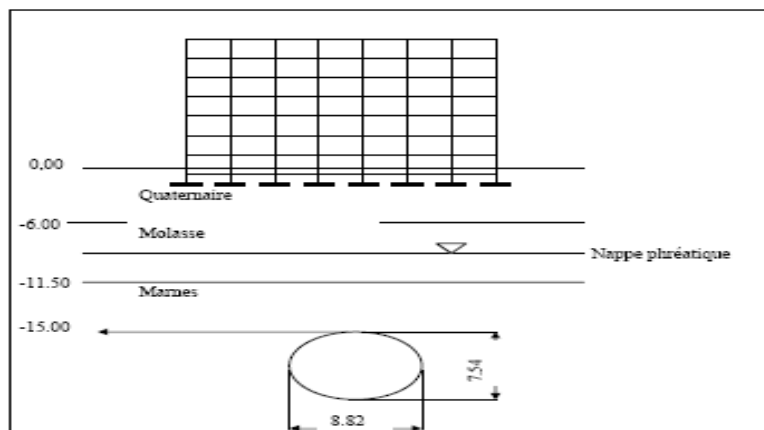


Fig 2.1:Coupe retenue pour le calcul.

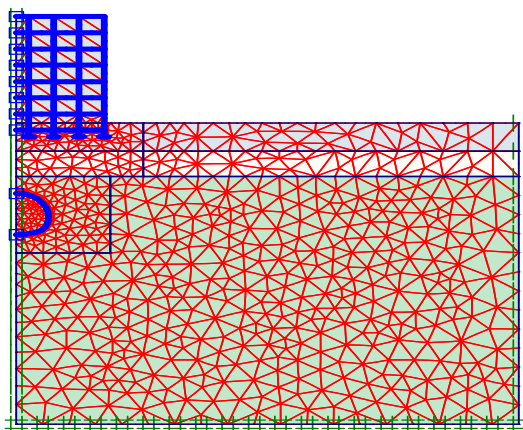


Fig 2.2: Modèle utilisé pour la simulation du métro d'Alger(Génération du maillage).

En vue de déterminer l'influence du creusement et des différents paramètres géotechniques sur les tassements en surface et les déplacements verticaux à l'aplomb de la clé de voûte, compte tenu de la symétrie du problème suivant un axe vertical, ce modèle est limité à un demi espace. Il présente une extension latérale de 80 m depuis l'axe de l'ouvrage et descend verticalement jusqu'à 65 m au dessous de la surface du sol [14]. Le modèle de référence comporte :

- 1389 éléments triangulaires à six nœuds ;
- 2898 nœuds ;
- 4047 points de contrainte.

La loi retenue pour le contact entre le soutènement provisoire et terrain est de l'adhérence parfaite, selon l'esprit même de la méthode de creusement NATM. Les calculs ont été menés en élasto-plasticité en retenant une loi de comportement élastique linéaire pour le soutènement et le revêtement et une loi élasto-plastique avec un critère de rupture de Mohr-Coulomb pour les différents terrains [5] .

Les conditions aux limites du modèle sont les suivantes :

- déplacement horizontal nul suivant les limite latérales du modèle ;
- déplacement vertical nul suivant la base du modèle.

2.2 Phasage des calculs [2] et [4]

- **Phase 0** : Initialiation des contraintes (contraintes géostatiques) ;
- **Phase 1** : Creusement du tunnel avec un déconfinement β_1 ($\sum M_{stage} = 0,4$) ;
- **Phase 2** : Installation du soutènement provisoire , le déconfinement passe de β_1 à β_2 ($\sum M_{stage} = 0,6$) ;
- **Phase 3** : Fin du déconfinement ($\sum M_{stage} = 1$) ;
- **Phase 4** : Prise en compte des caractéristiques à long terme des terrains ;
- **Phase 5** : Installation du revêtement définitif avec les caractéristiques à long terme des terrains
- **Phase 6** : Prise en compte des caractéristiques à long terme du revêtement .

2.3 Etude paramétrique

Le modèle de référence à 6 nœuds a été pris comme base pour cette étude paramétrique, elle concerne l'influence de:

- des paramètres géotechniques (ϕ, E, ν);
- L'effet du rabattement de la nappe phréatique;
- L'effet de l'écoulement.

La cohésion n'a pas montré une influence sur les tassements . Les courbes des figures 2.3 à 2.12 illustrent l'influence de ces paramètres sur les tassements en surface et les déplacements verticaux au dessus de la clé de voûte.

Influence du coefficient de poisson

Fig 2.3 : Tassement en surface

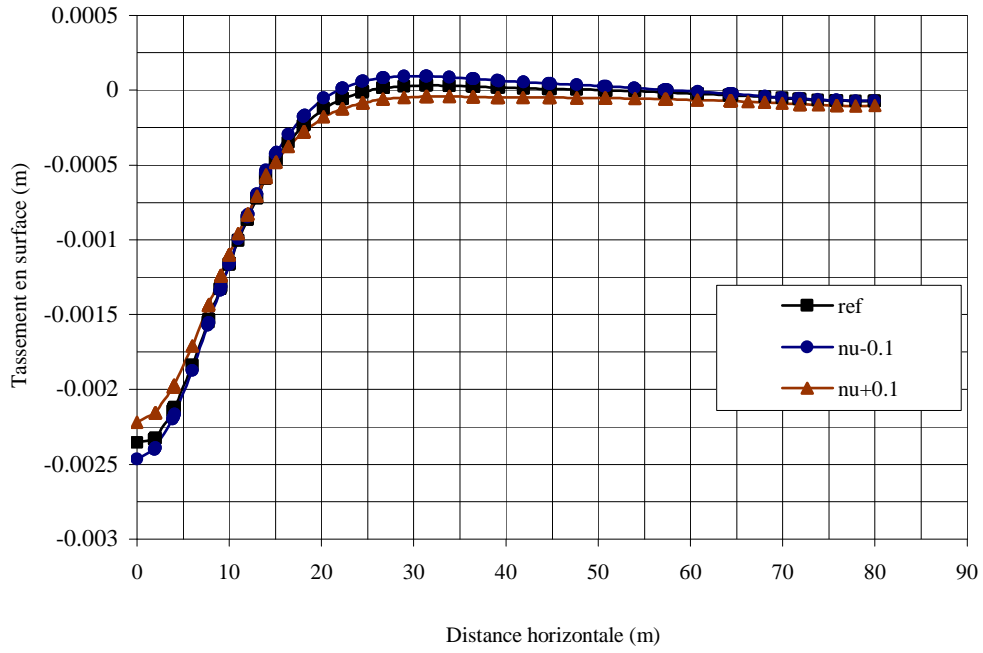
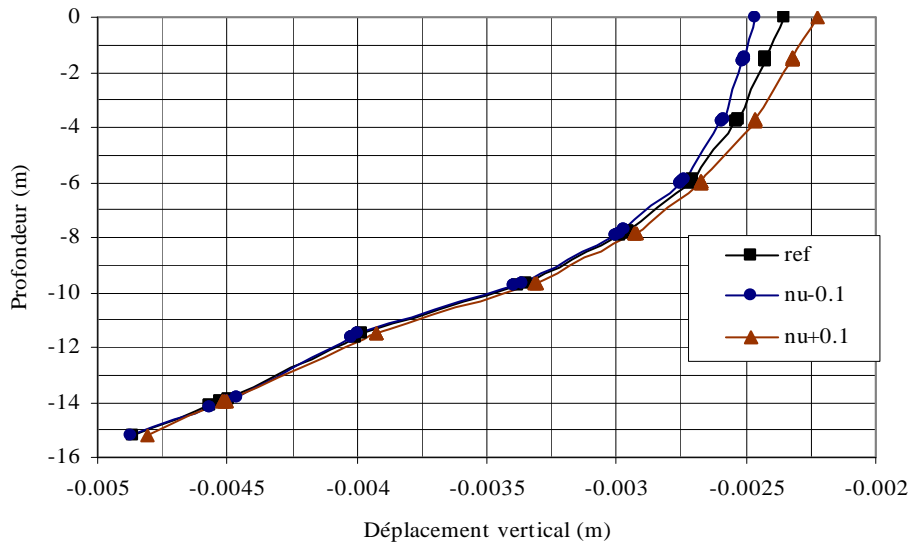


Fig 2.4 : Déplacement à l'aplomb de la clé de voûte



Influence du module d'Young E

Fig 2.5: Tassement en surface

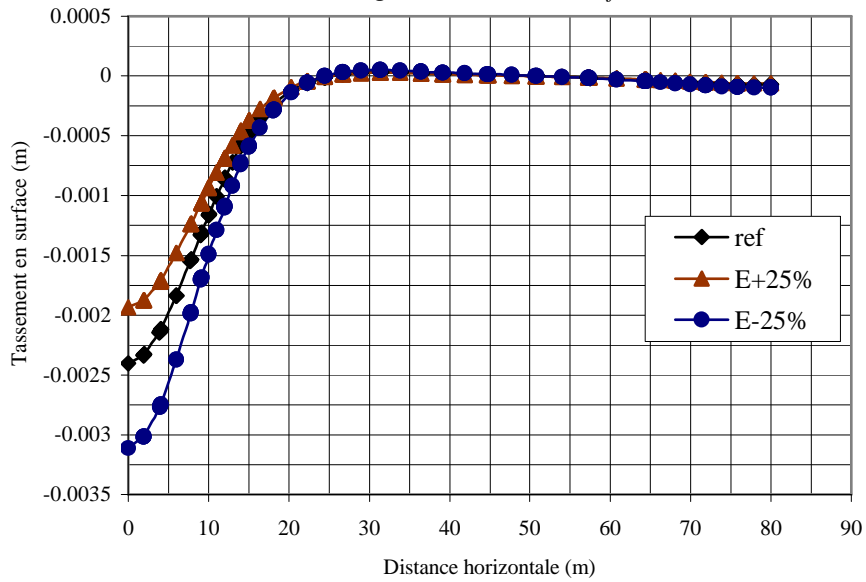
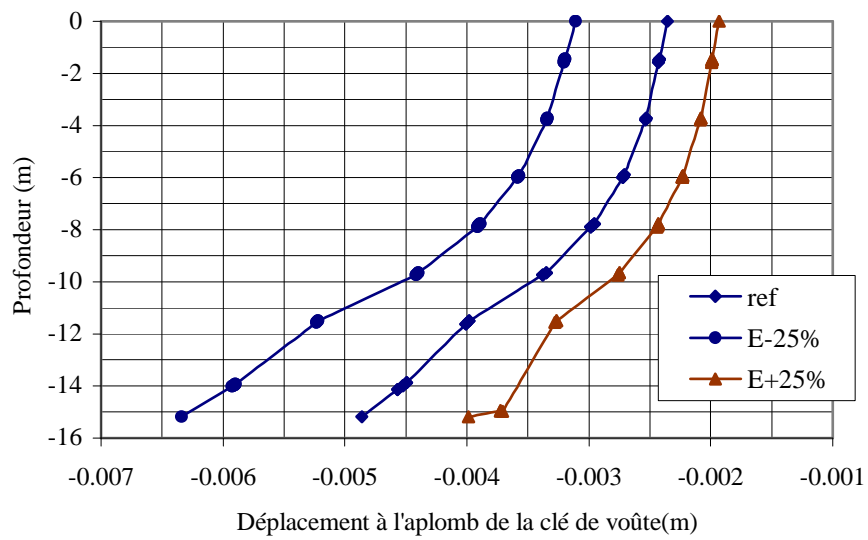


Fig 2.6 : Déplacement à l'aplomb de la clé de voûte



Influence de l'angle de frottement φ

Fig 2.7: Tassement en surface

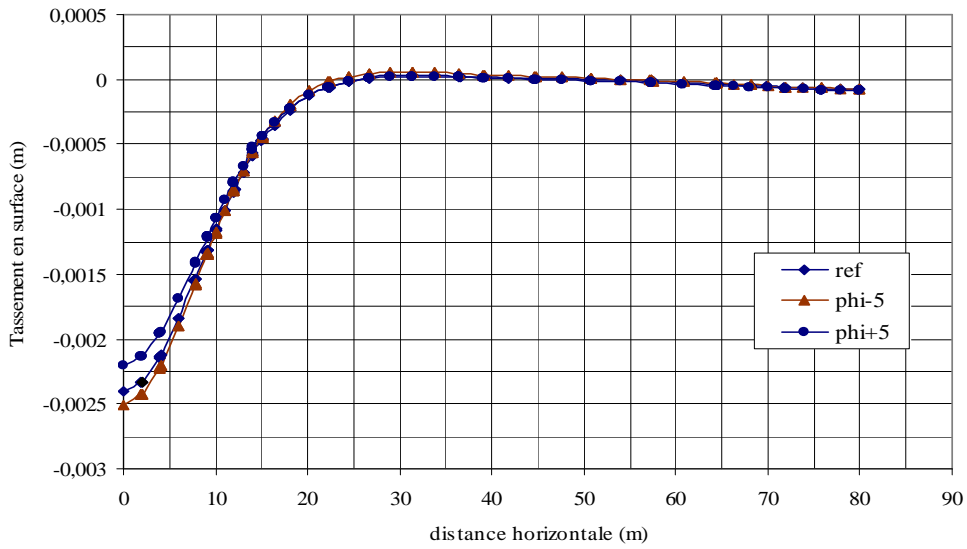
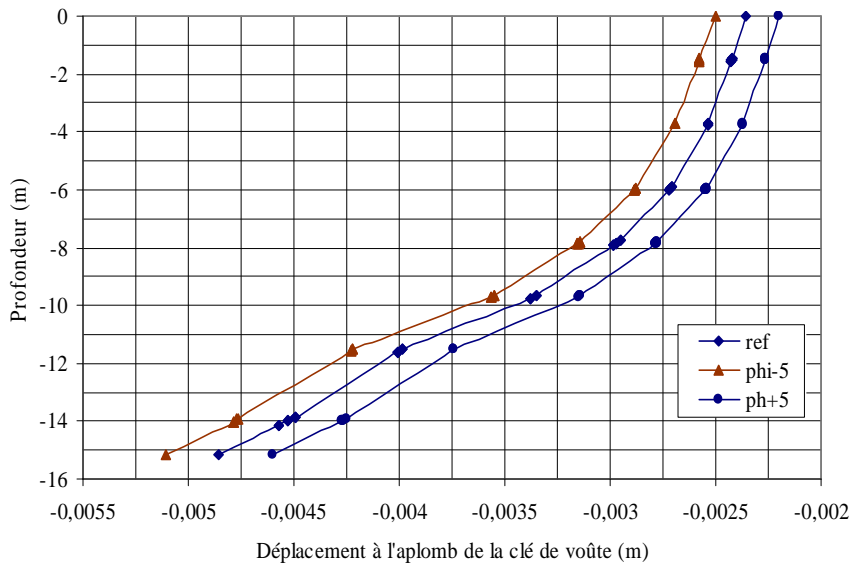


Fig 2.8: Déplacement à l'aplomb de la clé de voûte



Influence du rabattement de la nappe

Fig 2. 9 : Tassement en surface

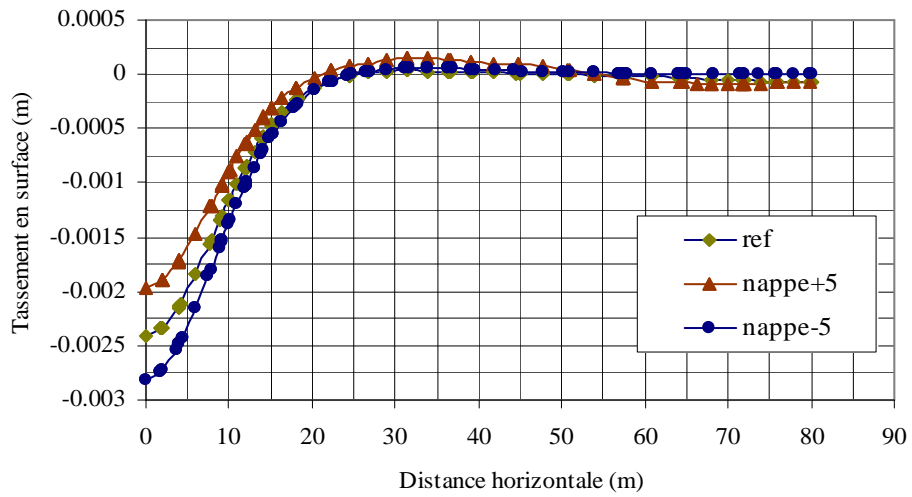
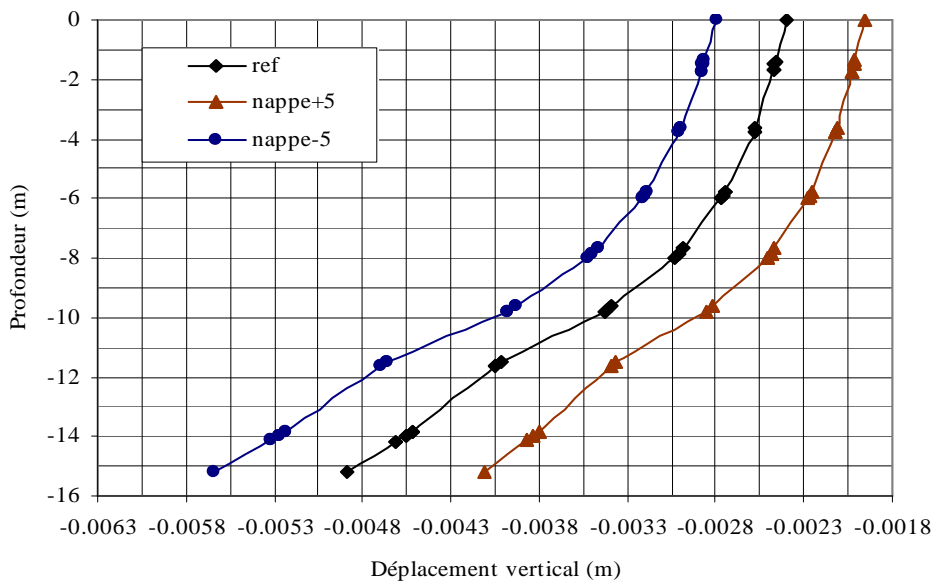


Fig 2.10 : Déplacement à l'aplomb de la clé de voûte



Influence de l'écoulement

Fig 2.11: Tassement en surface

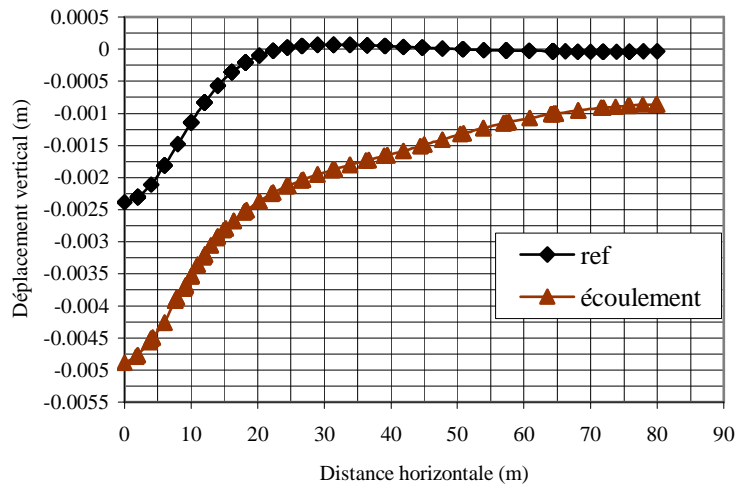
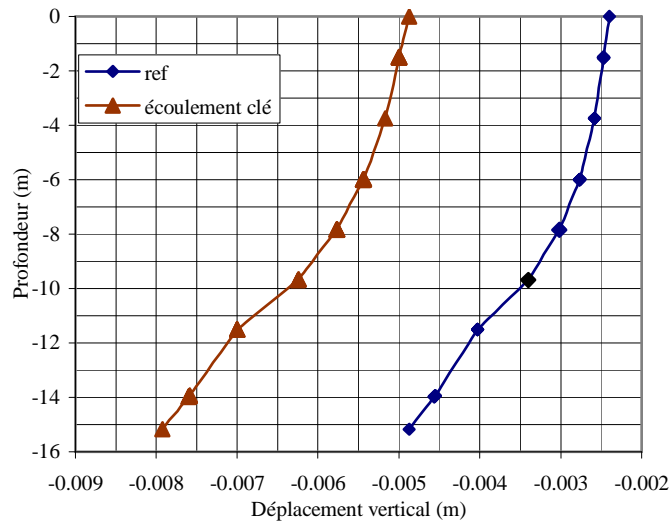


Fig 2.12 : Déplacement à l'aplomb de la clé de voûte



| Le paramètre | Tassement en surface (mm) | Variation en (%) |
|-------------------|---------------------------|------------------|
| 6n | 2,405 | - |
| E+25% | 1,935 | -20 |
| E-25% | 3,111 | +29 |
| v+0,1 | 2,208 | -8 |
| v-0,1 | 2,467 | +3 |
| $\varphi-5^\circ$ | 2,506 | +4 |
| $\varphi+5^\circ$ | 2,201 | -8 |
| Nappe+5m | 1,961 | -18 |
| Nappe-5m | 2,807 | +17 |
| Ecoulement | 4,889 | +103 |

Tab 3.4 : Influence des paramètres géotechniques sur le tassement en surface (étude comparative avec le modèle de référence).

NB : Le signe (+) indique une augmentation, le signe (-) une diminution.

Conclusion générale

On a établi un modèle de calcul pour un projet réel, il n'est pas la solution idéale mais une approche raisonnable.

On a fait varier plusieurs paramètres géotechniques et étudier leur influence.

L'étude paramétrique a mis en relief l'influence importante de trois paramètres à savoir le module d'Young, le rabattement de la nappe et l'écoulement sur les tassements en surface.

On aurait pu faire varier d'autres paramètres, propriétés d'interfaces, la rigidité de revêtement, ainsi que la combinaison de plusieurs paramètres à la fois et voir leur influence.

L'étude paramétrique est très précieuse, elle peut compenser les aléas des investigations géotechniques du terrain.

Cette étude n'a pas montré l'influence du creusement sur la superstructure, il serait nécessaire d'étudier l'influence de l'avancement du front de taille sur un modèle tridimensionnel.

Références bibliographiques

AFTES,(1998), Dossier pilote des tunnels genie civil, centre d'etude des tunnels,Paris.

Boulon.M, Flavigny.E, Malecot.Y,Simon.B,Babin.C,Bernhard,(2004) . La pratique éclairée des elements finis en geotechnique, tome 1et2,Paris.

Bouvard.a,Lecoanet.,Colombet.G,Esteulle.F.(1992).Ouvrages souterrains, presses de l'E.N.P.C,Paris.

Brinkgreve, R.B.J. , P.A. Vermeer (2002), PLAXIS : Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 8. Balkema.

Cordary.A ,1994, Mécanique des sols, lavoisier tec&doc,Paris.

Dreux.G, Festa.J,(1998), Nouveau guide du beton et de ses constituants , eyrolles, Paris.

Etudes géotechnique et géologique, (2003), EMA(Entreprise Métro d'Alger).

Fine. J,1998, Le soutènement des galeries minières,cours de l'école des mines de Paris.

Gesta.P,(2004), Travaux souterrains techniques de l'ingénieur , T.O.S ,Paris.

Habib.P,(1997), Genie geotechnique, ellipse, Paris.

Martin.F, Saïtia.A,(2006), Mécanique des roches et travaux souterrains, centre d'etude des tunnels , Paris.

Panet.M,(1995), Le calcul des tunnels par la methode convergence-confinement , presse de l'E.N.P.C, Paris.

Prat.M, Bisch.E, Millard.A, Mestat.P, Cabot.G.P, (1995), La modelisation des ouvrages, hêrmes ,Paris.

Prat. M, Mestat.P ,1999,Ouvrages en interaction hêrmes,Paris.

Robitaille.V, Tremblay.D,(1997), Mécanique des sols,theorie et pratique, modulo, Canada.