



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Effet des caractéristiques d'élasticité sur la déformabilité d'un massif de sol lors de l'excavation d'un ouvrage souterrain.

Effect of elasticity characteristics on the deformability of a soil mass during the excavation of an underground structure.

Toufik Kheffache^{a,*}, Rima Sedira^a, Mustapha Maza^b

^a Université A.Mira, Bejaia, Faculté de Technologie, Laboratoire de Génie de la Construction et Architecture (LGCA), Bejaia, Algerie.

^b Université A.Mira, Bejaia, Faculté de Technologie, Département des Mines et Géologie, Bejaia, Algerie.

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 26 Février 2026

Révisé : 5 Mars 2026

Accepté : 6 Mars 2026

Mots clés:

Sol

Excavation

Elasticité

Déformation

Keywords :

Soil

Excavation

Elasticity

Deformations

RESUME

Le creusement d'ouvrages souterrains, notamment peu profonds, provoque des déformations importantes du massif de sol, pouvant entraîner des instabilités à proximité de l'ouvrage et en surface. La prévision des mouvements et des mesures de stabilisation reste complexe en raison des nombreux facteurs impliqués, tels que les conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques, ainsi que les dimensions et la profondeur de l'excavation. La réponse du massif dépend principalement de sa capacité à se déformer sans rupture. Ce travail étudie l'influence des paramètres d'élasticité sur la déformabilité du sol lors du creusement d'une excavation peu profonde. Une modélisation par éléments finis permet de réaliser une analyse paramétrique de la rigidité. Les résultats montrent une forte sensibilité des déplacements aux paramètres élastiques et soulignent la nécessité d'une estimation fiable de la rigidité pour prédire correctement le comportement du massif et assurer la sécurité des ouvrages souterrains.

ABSTRACT

The excavation of underground structures, particularly shallow ones, causes significant deformations of the soil mass, potentially leading to instabilities both near the structure and at the surface. Predicting these movements and implementing stabilization measures remains complex due to the numerous factors involved, such as geological, geotechnical, and hydrogeological conditions, as well as the dimensions and depth of the excavation. The soil mass's response depends primarily on its capacity to deform without failure. This work investigates the influence of elasticity parameters on soil deformability during shallow excavation. Finite element modelling enables a parametric analysis of stiffness. The results demonstrate a high sensitivity of displacements to elastic parameters and highlight the need for reliable stiffness estimation to accurately predict soil mass behaviour and ensure the safety of underground structures.

* Corresponding author.

E-mail address: toufik.kheffache@univ-bejaia.dz

1 Introduction

Les ouvrages souterrains couvrent une large diversité de types, d'utilisations et de dimensions, allant des tunnels routiers et ferroviaires aux galeries techniques et aux cavités de stockage. Leur construction s'effectue entièrement dans des massifs géologiques composés de sols hétérogènes, ce qui introduit inévitablement des incertitudes importantes liées à la connaissance du terrain et aux prédictions du comportement et de l'interaction sol-structure [1 - 4]. Ces incertitudes sont accentuées par l'hétérogénéité des sols, la présence de discontinuités géologiques, et la variabilité des conditions hydromécaniques, qui influencent profondément le comportement mécanique global du massif et des ouvrages [5, 6].

Le creusement de structures souterraines génère souvent de grandes déformations dans le massif environnant, pouvant provoquer des désordres géotechniques internes, des tassements superficiels, voire des dommages aux structures adjacentes. Ces phénomènes sont bien documentés dans la littérature, soulignant l'importance de prises en compte des déformations induites par le creusement pour garantir la sécurité et la durabilité des ouvrages [7 - 9].

Toute intervention visant à limiter les déformations induit par le creusement d'une cavité ou d'un tunnel souterrain dans un massif de sol, qu'il s'agisse de soutènements temporaires, de pré-confinements du sol ou de modifications de la séquence d'excavation conduit à une modification significative des caractéristiques mécaniques et géotechniques du massif. Cette modification se manifeste notamment par des changements dans les modules d'élasticité, la résistance au cisaillement, et les réponses visco-élasto-plastiques des sols [10].

Les paramètres élastiques du sol, tels que le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν , jouent un rôle déterminant dans le comportement déformable du massif de sol lors du creusement d'un tunnel. Plus précisément, l'incertitude sur les caractéristiques d'élasticité du massif due à une sous-estimation ou une sur-estimation, ce peut conduire à des prévisions très divergentes de tassements et de contraintes résiduelles autour de l'excavation. Des études ont montré que même de petites variations dans les valeurs attribuées aux modules d'élasticité et de déformation peuvent modifier substantiellement les résultats d'une analyse géotechnique, en particulier lorsqu'une modélisation non linéaire et multi-physique est impliquée [11, 9].

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'influence de l'estimation des propriétés élastiques du sol sur la variabilité spatiale des déformations à l'intérieur d'un massif stratifié, associées à l'excavation, en tenant compte explicitement de la présence de plusieurs couches géotechniques aux propriétés mécaniques distinctes. Pour ce faire, une étude paramétrique est menée à l'aide d'un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis, afin de quantifier l'impact des variations des paramètres élastiques sur les déformations générées par l'excavation. Les résultats obtenus mettent en évidence la sensibilité du comportement déformable du massif à la rigidité des différentes couches de sol. Cette étude constitue un outil d'analyse des incertitudes liées à l'estimation des propriétés géotechniques, particulièrement critiques dans le contexte du creusement des ouvrages souterrains. Elle permet également de formuler des recommandations visant à améliorer la caractérisation des paramètres mécaniques et, par conséquent, à renforcer la fiabilité des conceptions et des prédictions du comportement des massifs stratifiés.

2 Présentation du massif et de l'ouvrage

L'ouvrage souterrain étudié est implanté dans une couche du massif constituée exclusivement d'un sol marneux. Les calculs par éléments finis ont été réalisés sur une section représentative de l'ouvrage, adoptée dans l'hypothèse d'un modèle en déformation plane, afin d'analyser le comportement géotechnique du massif lors des différentes phases de creusement. La section géotechnique adoptée pour l'étude, présentée dans le tableau 1, met en évidence la succession stratigraphique suivante :

- 0 à 6 m de profondeur : Terrain quaternaire
- 6 à 11,5 m de profondeur : Molasse sableuse
- Au-delà de 11,5 m de profondeur : Marnes

L'excavation considérée présente une ouverture intérieure de 8,82 m pour une hauteur de 7,74 m, tandis que la clé du tunnel est située à une profondeur de 15 m sous le terrain naturel. Ces caractéristiques géométriques ont été intégrées dans le modèle numérique afin de reproduire fidèlement les conditions réelles de l'ouvrage. Pour les calculs, les caractéristiques moyennes de chaque couche ont été adoptées, conformément à la section géotechnique choisie.

Tableau 1 : Caractéristiques géotechniques du massif de sol.

Formation	$\gamma_d(\text{kN/m}^3)$	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$E_{\text{(initial)}}(\text{MPa})$	ν	$C_u(\text{kPa})$	ϕ_u°
Quaternaire	19	22	120	0.25	30	27.5
Molasse	17	20.5	120	0.25	5	32.5
Marnes	22	24	500	0.3	250	30

3 Modélisation du problème

Dans le cadre de la modélisation numérique du massif et du creusement du tunnel à l'aide du programme par éléments finis, la définition des conditions initiales constitue une étape fondamentale pour assurer la fiabilité des résultats [12, 8]. Dans notre cas la modélisation repose sur l'utilisation de deux modes complémentaires. Le premier, correspondant aux conditions hydrauliques, permet de générer les pressions interstitielles initiales au sein du massif de sol, en tenant compte de l'état hydrogéologique avant excavation. Le second, relatif à la configuration géométrique, vise à définir la géométrie initiale du massif et à établir le champ de contraintes effectives initiales, garantissant ainsi une représentation réaliste de l'état mécanique du sol avant toute intervention.

Les conditions aux limites du modèle sont définies de manière à représenter de façon réaliste l'interaction entre la zone étudiée et le massif environnant supposé quasi infini. Les déplacements horizontaux sont annulés le long des frontières latérales du domaine de calcul, ce qui empêche tout mouvement global du modèle tout en autorisant les déformations verticales naturelles du sol. A la base du modèle, les déplacements verticaux sont bloqués afin de simuler la présence d'un substratum rigide et d'assurer la stabilité globale du système.

Ce choix de conditions aux limites permet de reproduire le confinement latéral exercé par le massif environnant tout en évitant les mécanismes de corps rigide. Il contribue également à limiter les effets de bord et à réduire l'introduction de rigidités susceptibles d'affecter la distribution réelle des contraintes et des déplacements autour du tunnel [13].

Après la création du modèle géométrique et la génération du maillage par éléments finis, l'état de contrainte et la configuration initiale sont spécifiés dans la section dédiée aux conditions initiales du programme de saisie des données. Cette phase d'initialisation permet d'établir le champ des contraintes effectives ainsi que la distribution des pressions correspondant à l'état naturel du sol avant toute excavation. Elle permet d'assurer la cohérence du modèle numérique et la fiabilité des résultats obtenus.

4 Résultats et discussions

4.1 Déplacements totaux cas du massif initial

4.1.1 Déplacements totaux cas du massif initial

La figure 1 illustre la réponse du massif de sol au creusement d'une excavation souterraine peu profonde, à travers la distribution des déplacements et l'évolution des tassements en surface. Elle présente le champ des déplacements verticaux obtenu par calcul aux éléments finis après l'excavation. On observe une concentration marquée des déformations à proximité immédiate de la galerie, traduisant la redistribution des contraintes consécutive à la suppression du confinement initial. Les déplacements décroissent rapidement avec l'éloignement par rapport à l'ouvrage, confirmant que l'influence du creusement demeure essentiellement localisée autour de la cavité.

La forme quasi elliptique des isovaleurs de déplacement est caractéristique d'un comportement dominé par les propriétés élastiques du sol, avec une propagation progressive et atténuée des déformations vers la surface. Il est également observé que le déplacement maximal se situe au niveau de la clé de l'excavation, puis se propage en diminuant à la fois vers la surface et latéralement. Ce mode de distribution des déplacements est conforme aux observations rapportées dans la littérature, notamment dans les travaux de [12,14].

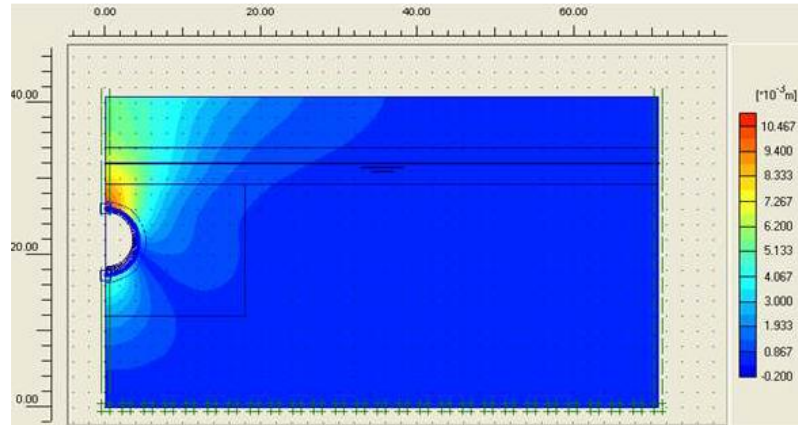


Fig. 1- Isovaleurs des déplacements totaux

4.1.2 Evolution du tassement de surface

La figure (2) montre l'évolution du tassement de surface en fonction de la distance horizontale par rapport à l'axe de l'excavation. Les résultats montrent un tassement maximal au droit du tunnel, atteignant une valeur d'environ 5 mm, traduisant l'influence directe du creusement sur la surface du terrain. Ce tassement décroît rapidement lorsque la distance horizontale augmente, ce qui indique une concentration des déformations dans la zone proche de l'ouvrage.

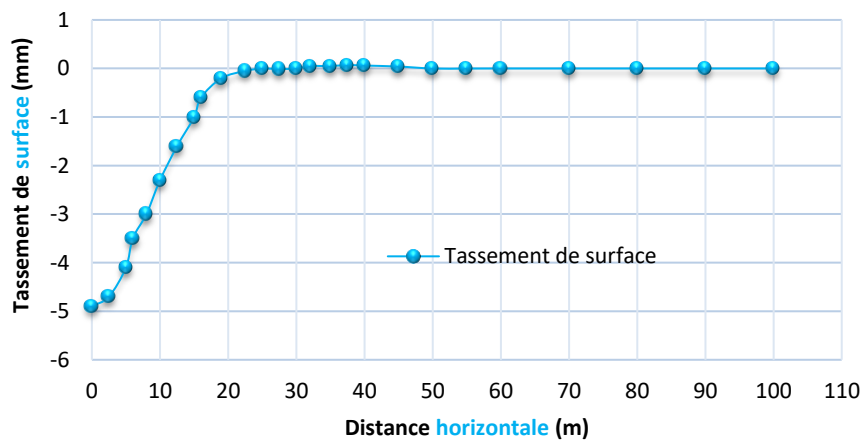


Fig. 2- Tassement en surface en fonctions de la distance horizontale

Entre 0 et environ 20 m, la diminution du tassement est particulièrement marquée, ce qui correspond à la zone de transfert principal des déformations induites par l'excavation. Au-delà de cette distance, la pente de la courbe devient plus faible et le tassement tend progressivement vers des valeurs quasi nulles, devenant négligeable à partir de 40 à 50 m. Ce comportement met en évidence l'extension limitée de la cuvette de tassement et confirme que l'impact du creusement reste essentiellement localisé [14].

La forme générale de la courbe correspond à une cuvette de tassement classique, fréquemment observée dans les ouvrages souterrains peu profonds. Cette évolution est cohérente avec les principes de la mécanique des sols et confirme la pertinence du modèle numérique employé pour la prédiction des déplacements de surface induits par le creusement du tunnel.

4.1.3 Déplacements en fonction de la profondeur

La figure (3) présente l'évolution du déplacement vertical en fonction de la profondeur, mesuré à l'aplomb de la clé de l'excavation, pour le cas du sol initial. Les résultats mettent en évidence une augmentation progressive des déplacements avec la profondeur, traduisant une concentration des déformations dans les zones proches de l'ouvrage souterrain. La forme

de la courbe reflète un gradient de déformation continu, sans discontinuité marquée, ce qui suggère un comportement globalement homogène du massif dans son état initial.

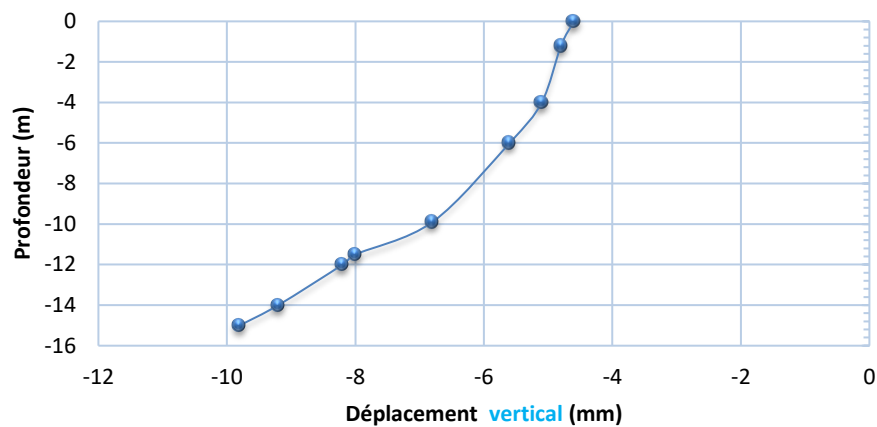


Fig. 3- Déplacements de référence à l'aplomb de la clé de l'excavation.

Les déplacements restent relativement faibles à proximité de la surface, puis augmentent de manière plus marquée à mesure que l'on se rapproche de la clé de l'excavation. Le déplacement maximal est observé à la profondeur correspondant à la clé, avec une valeur de l'ordre de 10 mm, indiquant que cette zone constitue le secteur le plus sollicité mécaniquement lors du creusement. Ce comportement est cohérent avec la redistribution des contraintes induite par l'excavation, qui entraîne un relâchement des contraintes verticales [4, 15].

L'analyse conjointe des déplacements verticaux en profondeur, présentés à la figure 3, et des tassements de surface, illustrés par la figure 2, permet de mieux comprendre les mécanismes de déformation induits par le creusement du tunnel. Les résultats montrent que les déplacements maximaux se concentrent à proximité de la clé de l'excavation, où le relâchement des contraintes est le plus important, tandis que leur amplitude décroît progressivement vers la surface.

4.2 Influence du module d'élasticité du sol

Afin de mettre en évidence l'influence des incertitudes liées à l'estimation du module d'élasticité du sol lors des campagnes d'études géotechniques ou lors de traitement avant creusement, sur la prévision du comportement du massif après excavation, une étude paramétrique a été réalisée. Pour les analyses de creusement de tunnels, l'utilisation d'un module compatible avec le niveau réel de déformation attendu est essentielle pour éviter la sous- ou surestimation des tassements. Dans cette analyse, une augmentation de 20 % du module d'élasticité a été successivement supposée pour chacune des couches géotechniques, puis une diminution de même amplitude a été considérée.

4.2.1 Evolution du tassement de surface

Les courbes de tassement en surface ainsi que les courbes de déplacement vertical en fonction de la profondeur ont ensuite été tracées pour chacun des cas étudiés, permettant d'évaluer la sensibilité de la réponse du massif aux variations du module d'élasticité (figure 4).

Les résultats montrent que le tassement maximal est observé à proximité de l'axe de l'ouvrage, puis décroît progressivement avec l'augmentation de la distance, traduisant une répartition spatiale classique des déformations induites par le creusement.

L'augmentation du module d'élasticité entraîne une réduction sensible des tassements de surface, ce qui reflète un comportement plus rigide du massif et une meilleure capacité à reprendre les contraintes induites par l'excavation. À l'inverse, la diminution du module d'élasticité conduit à une amplification des tassements, en particulier dans la zone proche du tunnel, soulignant la forte sensibilité de la réponse du massif à ce paramètre mécanique.

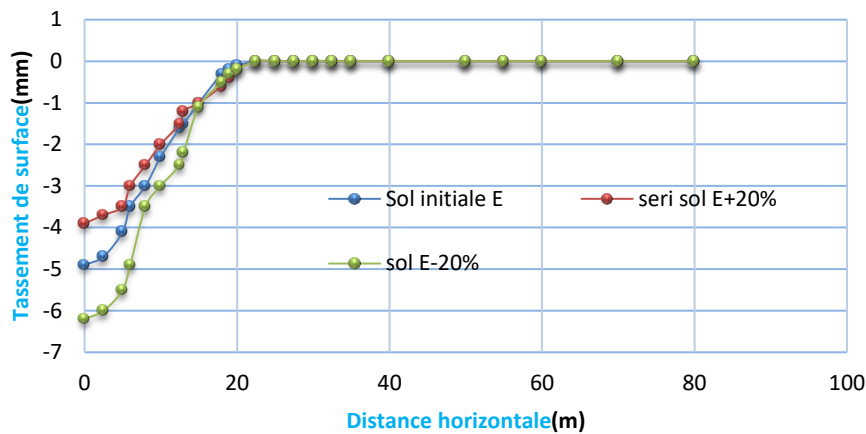


Fig. 4- Influence du module d'élasticité sur les tassements en surface.

Par ailleurs, les écarts entre les différentes courbes deviennent négligeables au-delà d'une certaine distance, indiquant que l'influence des variations du module d'élasticité reste essentiellement localisée autour de l'ouvrage. Ces résultats mettent en évidence l'importance d'une estimation fiable du module d'élasticité lors des investigations géotechniques, afin d'assurer une prédiction réaliste des tassements et une conception sûre des ouvrages souterrains [11, 16].

4.2.2 Déplacements en fonction de la profondeur

Les résultats présentés sur la figure (5) mettent en évidence la forte dépendance des déplacements dans le massif à l'aplomb en clé du tunnel vis-à-vis du module d'élasticité du sol. La réduction de la rigidité du massif entraîne une augmentation significative des déplacements, tandis qu'une augmentation modérée du module E conduit à une diminution notable des tassements en clé, pour l'ensemble des profondeurs considérées [17]. Cette sensibilité souligne le rôle déterminant de la rigidité du sol dans le contrôle des déformations induites par le creusement.

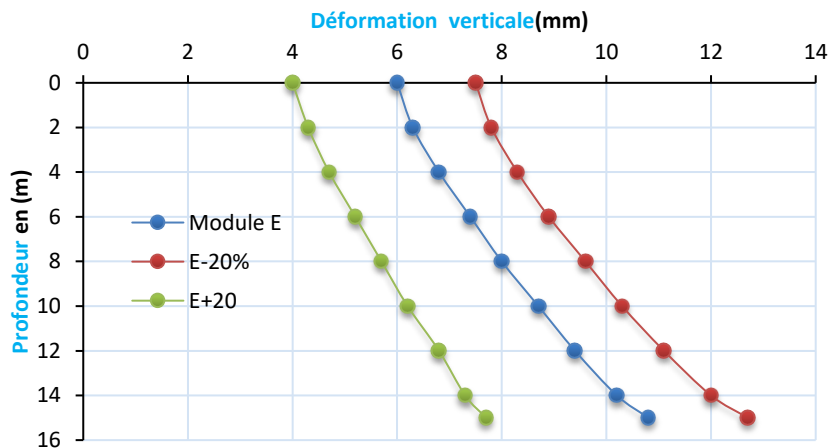


Fig. 5- Influence du module d'élasticité sur les déplacements à l'aplomb de la clé du tunnel.

Ces observations permettent d'établir un lien direct avec l'intérêt des techniques de renforcement du sol. En effet, les méthodes de pré-consolidation ou de renforcement, telles que le jet grouting, les injections de coulis, le clouage ou le pré-confinement du massif, ont pour effet principal d'augmenter la rigidité globale du sol, se traduisant mécaniquement par une élévation du module d'élasticité équivalent [13, 17]. Les résultats obtenus montrent que cette augmentation de rigidité se traduit par une réduction efficace des déplacements en clé du tunnel et, par conséquent, par une limitation des tassements et des désordres potentiels.

Par ailleurs, l'écart croissant entre les courbes avec la profondeur indique que l'efficacité dans le cas d'un renforcement devient d'autant plus marquée que le niveau de confinement et les sollicitations autour de l'ouvrage sont élevées. Ceci met

en évidence que le renforcement du sol constitue une mesure particulièrement pertinente dans les zones critiques de l'excavation, notamment à proximité de la clé et dans les horizons les plus sollicités.

4.3 Influence de la variabilité du coefficient de poisson

Le coefficient de Poisson ν constitue un paramètre élastique fondamental intervenant dans la description du comportement mécanique des sols. Il régit la relation entre les déformations longitudinales et transversales et contrôle, de ce fait, la répartition entre déformations volumiques et déformations de cisaillement au sein du massif [18]. Par conséquent, ν joue un rôle déterminant dans la modélisation du comportement déformable du sol sous chargement, notamment dans l'analyse des redistributions de contraintes et des champs de déplacements induits par les ouvrages souterrains. Dans cette partie de ce travail les résultats de l'étude de l'effet de la variation de ce coefficient sur les déplacements au sein du massif du sol lors du creusement de l'excavation sont présentés.

4.3.1 Evolution du tassement de surface

La figure (6) met en évidence l'évolution du tassement de surface en fonction de la distance horizontale pour différentes valeurs du coefficient de Poisson du sol. Les résultats montrent que le tassement maximal est enregistré à proximité immédiate de l'axe de l'excavation, ce qui traduit la concentration des déformations dans la zone directement affectée par le creusement du tunnel. Ce tassement décroît progressivement avec l'augmentation de la distance horizontale, pour devenir quasi nul au-delà de 40 à 50 m, indiquant une influence limitée du creusement sur les zones éloignées.

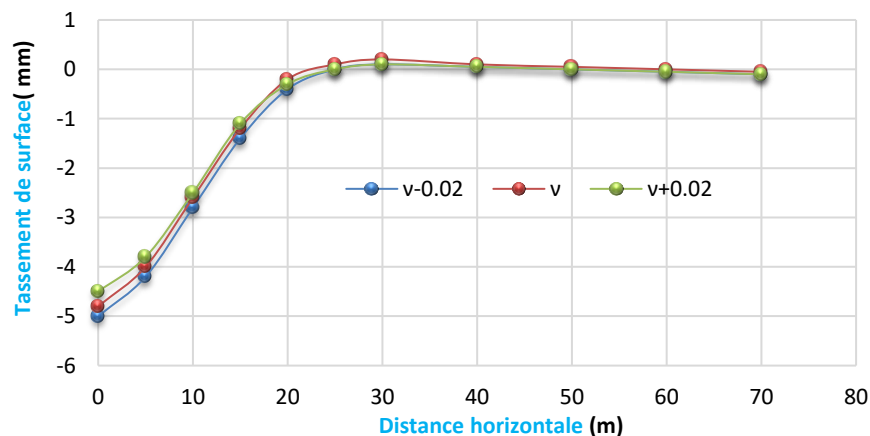


Fig. 6- Influence du coefficient de poisson sur les tassements en surface.

L'analyse comparative des résultats révèle que l'augmentation du coefficient de Poisson conduit à une légère diminution du tassement maximal en surface. Ce comportement s'explique par une redistribution plus importante des déformations latérales au sein du massif lorsque ν augmente, ce qui atténue les déplacements verticaux en surface. Toutefois, les écarts observés entre les différentes valeurs de ν restent relativement modestes, soulignant que l'effet du coefficient de Poisson, bien que perceptible, demeure secondaire par rapport à l'influence du module d'élasticité sur l'amplitude globale des tassements.

Enfin, la forme générale des courbes correspond à une cuvette de tassement typique des excavations souterraines, caractérisée par un affaissement maximal au droit de l'ouvrage et une récupération progressive des déplacements vers la surface libre. Ces résultats confirment la cohérence du modèle numérique et mettent en évidence l'importance d'une estimation réaliste des paramètres élastiques pour une prédiction fiable des déformations induites par le creusement des tunnels.

4.3.2 Déplacements en fonction de la profondeur

La figure (7) présente l'évolution des déformations verticales en fonction de la profondeur pour la valeur de référence du coefficient de Poisson ν ainsi que pour deux cas de variation. De manière générale, les déformations augmentent

progressivement avec la profondeur, atteignant leur maximum à proximité de la clé de l'excavation, ce qui traduit l'intensification des effets du relâchement des contraintes dans cette zone [17,18, 19].

L'analyse comparative met en évidence une influence mesurable du coefficient de Poisson sur l'amplitude des déformations. Lorsque ν diminue, les déformations verticales deviennent légèrement plus importantes, traduisant un comportement plus compressible du massif et une moindre capacité à redistribuer les contraintes latérales. En revanche, l'augmentation de ν conduit à une réduction des déformations verticales, en raison d'une mobilisation accrue des déformations transversales qui limite la compression verticale.

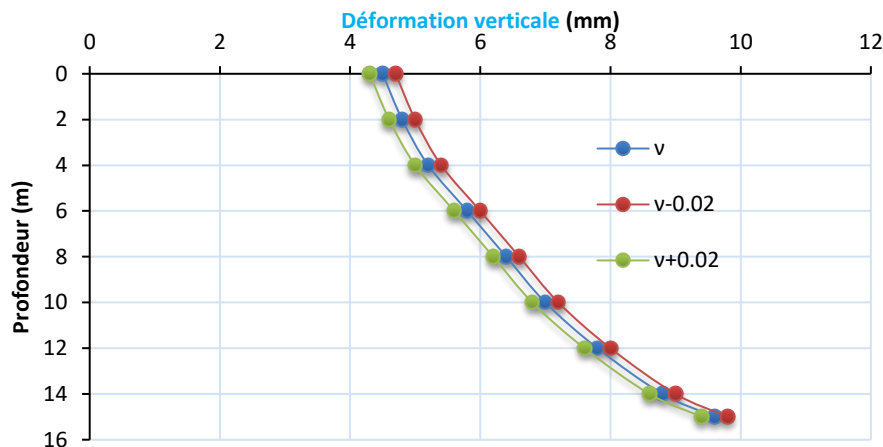


Fig. 7- Influence du coefficient de poisson sur les déplacements l'aplomb de la clé du tunnel.

Toutefois, les écarts observés entre les trois courbes restent relativement modérés, ce qui indique que l'influence du coefficient de Poisson, bien que perceptible, demeure secondaire par rapport à celle du module d'élasticité dans la maîtrise de l'amplitude globale des déplacements. L'effet de ν apparaît principalement comme un paramètre contrôlant la redistribution des déformations plutôt que leur intensité absolue.

Ces résultats confirment que la variation du coefficient de Poisson modifie essentiellement la répartition interne des contraintes et des déformations dans le massif, avec un impact plus marqué aux profondeurs proches de l'excavation.

5 Conclusion

Cette étude a permis d'analyser, à travers une modélisation numérique par éléments finis, le comportement déformable d'un massif de sol constitué de plusieurs couches de différentes caractéristiques, soumis au creusement d'un tunnel peu profond, en mettant l'accent sur l'influence des paramètres élastiques du sol. Le modèle numérique utilisé reproduit les principales étapes d'excavation et l'évolution des champs de déplacements dans le massif environnant.

Les résultats obtenus confirment que le creusement induit une redistribution significative des contraintes autour de l'ouvrage, se traduisant par une concentration des déplacements à proximité de la clé de l'excavation et par la formation d'une cuvette de tassement caractéristique en surface. L'amplitude des déformations décroît progressivement avec la distance horizontale et la profondeur, mettant en évidence une influence essentiellement localisée du creusement, conforme aux observations classiques en mécanique des sols.

L'étude paramétrique réalisée souligne le rôle prépondérant du module d'élasticité dans la maîtrise des déformations. Une variation de $\pm 20\%$ de ce paramètre entraîne des écarts significatifs sur les tassements en surface et les déplacements en profondeur, démontrant la forte sensibilité du modèle à la rigidité du massif. Ces résultats confirment que toute incertitude dans l'estimation du module d'élasticité peut conduire à une sous- ou surestimation notable des déplacements, avec des conséquences potentielles sur la conception et la sécurité des ouvrages souterrains.

En revanche, l'influence du coefficient de Poisson apparaît plus modérée. Bien qu'il affecte la redistribution interne des contraintes et la répartition entre déformations volumiques et de cisaillement, son impact sur l'amplitude globale des tassements reste secondaire comparativement à celui du module d'élasticité.

Ainsi, cette recherche met en évidence l'importance d'une caractérisation géotechnique rigoureuse des paramètres élastiques, en particulier du module d'élasticité compatible avec le niveau réel de déformation attendu. Elle confirme également l'intérêt des techniques de renforcement du sol, qui agissent principalement par augmentation de la rigidité équivalente du massif, permettant de limiter efficacement les déplacements en clé et les tassements de surface.

En perspective, l'intégration d'approches probabilistes ou fiabilistes, tenant compte explicitement de la variabilité spatiale des paramètres mécaniques, constituerait une extension pertinente de ce travail afin d'améliorer la robustesse des prédictions et la maîtrise du risque associé aux excavations souterraines.

REFERENCES

- [1]- W. Mohamad, Effet de la construction des tunnels sur les fondations profondes : cas du Grand Paris Express. Thèse de doctorat, Université Gustave Eiffel, 2022. NNT : 2022UEFL2049
- [2]- C.X. Guo, L.F. Fan, K.H. Han, P.F. Li, M.J. Zhang, Progressive failure analysis of shallow circular tunnel based on the functional catastrophe theory considering strain softening of surrounding rock mass. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 131 (2023) 104799. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104799>
- [3]- A. Bouafia, Development of p-y curves for single piles based on full-scale lateral load tests and the cone penetration test (CPT) in clayey soil. *J. Mater. Eng. Struct.*, 11(1) (2024) 79–96.
- [4]- N.T.C. Nhung, Q.M. Tran, The effects of ground vibration induced by construction activities of urban railways in Hanoi. *J. Mater. Eng. Struct.*, 7(4) (2020) 703–710.
- [5]- Z. Zhou, Y. Chen, Z. Liu, L. Miao, Theoretical prediction model for deformations caused by construction of new tunnels undercrossing existing tunnels based on the equivalent layered method. *Comput. Geotech.*, 123 (2020) 103565. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103565>
- [6]- T.Z. Li, X.L. Yang, Stability of plane strain tunnel headings in soils with tensile strength cut-off. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 95 (2020) 103138. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103138>
- [7]- M. Panet, A. Bouvard, B. Dardard, P. Dubois, O. Givet, A. Guilloux, J. Launay, N.M. Duc, J. Piraud, H. Tournery, H. Wong, AFTES Recommendations on the convergence-confinement method. Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain AFTES, 2001, pp.125–145.
- [8]- C. Hou, X. Yang, Three-dimensional face stability of tunnels in unsaturated soils with nonlinear soil strength. *Int. J. Geomech.*, 21(4) (2021) 06021006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001916](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001916)
- [9]- E. Vanoudheusden, 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 Lyon, France, 2006.
- [10]- H.F. Wang, M. Lou, X. Chen, Y. Zhai, Structure–soil–structure interaction between underground structure and ground structure. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 54 (2013) 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.07.015>
- [11]- V. Savatier, R. Deluzarche, J.F. Serratrice, Variation des modules en fonction du niveau de déformation d'après des essais in-situ et des essais de laboratoire. Application au metro Toulousain . Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Champs-sur-Marne, France, 2018.
- [12]- G. Galli, A. Grimaldi, A. Leonardi, Three-dimensional modelling of tunnel excavation and lining. *Comput. Geotech.*, 31(3) (2004) 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2004.02.003>
- [13]- C. Toraldo, G. Modoni, M. Ochmanski, P. Croce, The characteristic strength of jet-grouted material. *Géotechnique*, 68(3) (2018) 262–279. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.320>
- [14]- C.J. Lee, B.R. Wu, H.T. Chen, K.H. Chiang, Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 21(2) (2006) 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.06.003>
- [15]- J. Xu, J. Deng, X. Wang, Z. Wang, Z. Yang, X. Cheng, Roof stability of tunnels with varied burial depth in rock strata following a modified HB criterion. *Can. Geotech. J.*, 62 (2025) 1–24. <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0767>
- [16]- J.F. Serratrice, J.P. Magnan, Analyse et prévision des tassements de surface pendant le creusement du tunnel nord de la traversée souterraine de Toulon. *Bull. Lab. Ponts Chaussées*, 237 (2002) 5–36.
- [17]- L. Causse, R. Cojean, J.A. Fleurisson, Analyse de l'influence du creusement d'un tunnel au sein d'un versant instable subissant un mouvement gravitaire profond. Journées Aléa Gravitaire, France, 2013.
- [18]- S. Coquillay, Prise en compte de la non-linéarité du comportement des sols soumis à de petites déformations pour le calcul des ouvrages géotechniques. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 2005.
- [19]- S.V. Sivapriya, M. Muttharam, R. Sivaraj, Modulus and stiffness of laterally loaded single free headed pile in stratified soil. *J. Mater. Eng. Struct.*, 10(1) (2023) 105–113.