PRISE EN COMPTE DU POIDS DU MASSIF DE REACTION DANS LA SIMULATION D'UN ESSAI DE CHARGEMENT STATIQUE D'UN PIEU

INFLUENCE OF THE WEIGHT OF THE REACTION FRAME IN THE SIMULATION OF A STATIC LOAD TEST OF A PILE

Hadia ZAITER¹, Emmanuel BOURGEOIS², Hussein MROUEH¹

¹ Laboratoire de génie civil et géo-environnement (LGCgE) – Université de Lille - Sciences et Technologies, Villeneuve d'Ascq, France

² Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée, France

RÉSUMÉ – Au cours du projet TULIP (2019-2023), piloté par la Société du Grand Paris, les déplacements, les déformations et la variation des efforts dans trois pieux expérimentaux ont été mesurés lors du passage d'un tunnelier de la ligne 16 du Grand Paris Express. La majorité des simulations numériques conduites au cours du projet ont assez mal représenté la variation d'effort axial dans le pieu P3 due au passage du tunnelier. La charge appliquée au pieu était de 206 tonnes ; pour charger le pieu avec un vérin hydraulique, un massif de réaction d'un poids d'environ 300 tonnes avait été mis en place au-dessus de chaque pieu ; or, dans les modélisations, ce massif de réaction n'était pas représenté. On montre ici que la prise en compte du massif, sans modifier les paramètres géométriques ou géotechniques du problème, réduit l'écart entre les simulations et les mesures.

ABSTRACT – During the TULIP project (2019-2023), led by Société du Grand Paris, the deformations and forces in three instrumented piles were measured before and during the passage of a tunnel-boring machine on line 16 of the Grand Paris Express. In the majority of the numerical simulations carried out during the project, the distribution of axial force in the pile, after the initial loading and before the passage of the tunnel-boring machine, was clearly different from the measures. The load applied to the pile was 206 tons; to load the pile with a hydraulic jack, a reaction frame weighing around 300 tons was placed above each pile; however, in the simulations, the reaction frame was not represented. This paper shows that taking the frame into account reduces the gap between simulations and measurements.

Mots clés : méthode des éléments finis, fondation profonde, interaction sol-structure

1. Introduction

Le projet TULIP (2019-2023), piloté par la Société du Grand Paris, avec le concours du Centre d'Etudes des Tunnels, de l'ENTPE et de l'Université Gustave Eiffel, a permis de réaliser une expérimentation en vraie grandeur pour étudier l'influence du passage d'un tunnelier sur le comportement de fondations profondes. On a mesuré les déplacements, les déformations et la variation des efforts dans trois pieux expérimentaux instrumentés lors du passage d'un tunnelier de la ligne 16 du Grand Paris Express. Le comportement de l'un des pieux, appelé P3, a été étudié dans le cadre d'un exercice de prévision proposé à la profession (Berthoz *et al.*, 2022) et de deux thèses ((Mohamad, 2022), et (Michalski, 2023)). Une partie de l'exercice de prévision consistait à évaluer les efforts dans le pieu P3 avant le passage du tunnelier, sous l'effet d'une charge verticale de 2060 kN.

Des mesures de déformation verticale dans le pieu ont été effectuées à l'aide de capteurs à cordes vibrantes, placés sur quatre filants d'armatures, et à sept profondeurs

(Mohamad, 2022). Les efforts déduits des mesures sont représentés en rouge dans la Figure 1. La quasi-totalité de l'effort exercé en tête est reprise par frottement latéral et surtout dans les sept premiers mètres, principalement dans les remblais et dans la partie supérieure des calcaires de Saint-Ouen, l'effort de pointe est quasi-nul.

Cependant, la Figure 1 montre un écart important entre les mesures et les simulations numériques réalisées par les différents participants à l'exercice de prévision. En particulier, près de la surface, la courbe tirée des mesures montre une variation plus rapide de l'effort avec la profondeur, semblant indiquer que le frottement latéral le long du pieu est sousestimé dans les calculs, dans la couche de remblais (notée R) et la couche de calcaire de Saint-Ouen (notée CSO). Malgré différentes études paramétriques, cette différence n'a pas pu être réduite en modifiant les caractéristiques de ces couches et de l'interface sol- pieu.





Il est important de signaler que les mesures de déformations du pieu ont été « remises à zéro » avant l'application de la charge : la courbe rouge correspond donc en fait à la différence entre les efforts dans le pieu juste avant et juste après le chargement, et pas à la différence entre les efforts dans le pieu avant installation du massif de réaction et après le chargement. Pour charger le pieu avec un vérin hydraulique, un massif de réaction d'environ 300 tonnes avait été mis en place au-dessus du pieu. Cependant, dans les modélisations, le massif de réaction n'était pas représenté, et l'influence de sa mise en place sur les contraintes dans le sol, dans le pieu et à l'interface sol-pieu n'était donc pas prise en compte. On présente ici des simulations en condition axisymétrique et tridimensionnelles, dans lesquelles on prend en compte explicitement le poids du massif de réaction.

2. Présentation générale du site et du plot expérimental

La lithologie du site est présentée dans la Figure 2 (Berthoz et al., 2022). Elle comporte, à partir de la surface, une succession de couches décrites comme suit : remblais (R), calcaire de Saint-Ouen (CSO), Sables de Beauchamp (SB), Marnes et Caillasses (MC) et le Calcaire Grossier (CG), qui est nettement plus raide que les formations sus-jacentes. Le tunnel, dont le diamètre est de 10 m et sa profondeur de 21 m, n'est pas pris en compte dans les modélisations présentées ici. Les épaisseurs des couches sont données dans le Tableau 1 (Berthoz et al., 2022). La nappe est supposée fixe à 11,5 m de profondeur. Le pieu étudié, P3, a un diamètre de 500 mm et une longueur de 20 m.



Figure 2. Coupe transversale (a) et vue aérienne (b) de l'expérimentation TULIP. (Berthoz et al., 2022)

La réaction nécessaire pour que le vérin puisse exercer la force verticale voulue sur le pieu est fournie par un massif de réaction, constitué de poutres en acier (Figure 3), qui pèse environ 300 tonnes. Il repose sur le sol par l'intermédiaire de deux poutres parallèles de 12,5 m de long sur 2 m de large, et espacées de 2,70 m.



Figure 3. Système de chargement des pieux (Mohamad, 2022)

3. Calcul de référence et variante prenant en compte le massif de réaction

3.1. Choix généraux de modélisation

En raison de la symétrie du pieu et de l'orientation horizontale des couches de sol sous l'emprise du site d'essai, on propose, en première approche, de faire des calculs en condition axisymétrique malgré l'asymétrie du massif de réaction. La limite inférieure du maillage est placée à la base de la couche de Marnes et Caillasses en raison de la rigidité du calcaire grossier. D'autre part, dans le maillage, la couche de Calcaire de Saint-Ouen (CSO) est subdivisée en deux parties : CSOsec au-dessus de la nappe et CSOsat endessous. Tous les calculs sont faits en condition drainée, négligeant ainsi les variations du champ de pression interstitielle dans le terrain. Le pieu est discrétisé par des éléments surfaciques, et considéré comme élastique linéaire, avec un module de Young variant selon la profondeur : il vaut 37,8 GPa en surface et augmente de 540 MPa par mètre de profondeur (Mohamad, 2022). On place des éléments d'interface sans épaisseur (« éléments de joint » de CESAR) entre le pieu et le sol environnant. En première approche, ils ont été considérés comme adhérents (pas de glissement sol-pieu). La Figure 4 présente le maillage retenu. Il comporte 2275 éléments triangulaires à interpolations quadratiques.





3.2. Caractéristiques des couches de sol

(Berthoz et al., 2022) ont adopté pour les différentes couches de sol le modèle Hardening Soil Model (Schanz et al., 1999). On fait ici le même choix, sauf pour la couche de remblais, pour laquelle on choisit le modèle élastique linéaire parfaitement plastique avec critère de Mohr Coulomb. Les valeurs des paramètres, données dans le Tableau 1, sont tirées de (Mohamad, 2022).

Couche	R	CSOsec	CSOsat	SB	MC
Modèle de comportement	Mohr-Coulomb	HSM	HSM	HSM	HSM
Epaisseur (m)	3,5	8	1,8	10,2	11,3
Poids volumique (kN/m ³)	19	18	18	21	20
E (MPa)	307	-	-	-	-
E ₅₀ ^{ref} (MPa)	-	180	327	504	790
E _{ur} ref (MPa)	-	541	982	1510	2370
p ^{ref} (kPa)	-	71	111	142	198
ν	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
c (kPa)	0	10	10	5	15
<i>φ</i> (°)	28	33	33	35	38
ψ (°)	0	3	3	5	8
R _f	-	0,95	0,95	0,95	0,95
m (-)	-	0,5	0,5	0,5	0,5

Tableau 1. Paramètres géométriques et mécaniques des couches de sol

3.3. Calcul de référence et variante proposée

Le calcul de référence consiste à initialiser les contraintes (effectives) dans le massif puis à appliquer une pression surfacique uniforme sur la tête du pieu. Les contraintes initiales sont supposées géostatiques, définies par le poids volumique (déjaugé) et le coefficient de poussée des terres au repos K₀, défini par K₀ = 1 - sin(ϕ) dans chaque couche. La pression appliquée est égale à q =10,5 MPa correspondant à une charge de 2060 kN.

La variante proposée consiste à enchaîner deux phases de calcul. Dans la première phase, on initialise les contraintes effectives par la même procédure et on applique, à la surface du massif une pression uniforme entre 0,85 et 4 m de distance par rapport à l'axe de symétrie. Cette pression est prise égale à p = 60 kPa, ce qui donne une résultante verticale totale égale à 3000 kN, soit le poids du massif de réaction ; dans la deuxième phase, on représente l'action du vérin par la combinaison d'une pression uniforme égale à 10,5 MPa appliquée sur la tête du pieu et une traction appliquée à la surface du massif (entre 0,85 et 4 m de l'axe de symétrie), égale à p = 41,2 kPa, ce qui correspond à une résultante de réaction verticale vers le haut, égale à 2060 kN.

3.4. Résultats

La Figure 5 montre la variation de force axiale dans le pieu. L'écart entre le calcul et les mesures est nettement plus faible pour la variante proposée que pour le calcul de référence. Par exemple, à 8 m de profondeur, le calcul de référence surestime la variation de l'effort axial de 40 % ; la variante donne un bien meilleur accord sur toute la hauteur du pieu.





3.5. Comparaison des variations des déformations

(Mohamad, 2022) explique de manière plus précise comment les résultats des mesures ont été interprétés ; les déformations verticales mesurées ont été multipliées par l'aire de la section du pieu et par le module de Young (qui varie avec la profondeur). Cependant, ce traitement comporte une approximation, parce que la variation de contrainte verticale dépend aussi de la déformation latérale du pieu. On recalcule ici les déformations mesurées et on les compare avec les déformations données par le calcul (Figure 6). La conclusion obtenue précédemment reste valable si on s'intéresse aux déformations.





4. Discussion

Les résultats obtenus montrent l'apport incontestable d'une prise en compte plus précise du poids du massif de réaction. On discute ici l'influence de certaines hypothèses de calcul.

4.1. Modélisation 3D



Figure 7. Maillage du modèle 3D

L'hypothèse principale jusqu'à présent a été de simplifier la géométrie pour un calcul axisymétrique. On présente ici un modèle tridimensionnel, avec le même phasage de calcul, dans lequel on représente un quart du pieu et de la surface où s'applique le poids du massif de réaction. Le maillage utilisé (Figure 7) comporte 45000 éléments tétraédriques à interpolation quadratique et 63500 nœuds. Il correspond à une zone de 20m x 20m en surface.



Figure 8. Résultats du calcul en condition tridimensionnelle

La Figure 8 montre un très bon accord entre les résultats des calculs tridimensionnels et axisymétriques. Cette conclusion est intéressante parce que le calcul axisymétrique dure moins d'une minute alors que le calcul tridimensionnel dure environ quinze minutes.

4.2. Modèle de comportement dans la couche des remblais et prise en compte de la variation du module dans le pieu

La Figure 9 (a) montre la variation de l'effort axial dans le pieu, calculée en utilisant le modèle HSM (au lieu de Mohr-Coulomb) dans la couche de remblai, en se basant sur les valeurs fournies dans (Mohamad, 2022). Le module pris en compte dans le calcul de référence avec Mohr Coulomb est égal au module E_{ur}^{ref} du calcul avec le modèle HSM. Cependant, le calcul avec le modèle HSM donne un accord nettement moins satisfaisant avec les mesures.



Figure 9. Effort normal dans le pieu P3 après chargement calculé en condition axisymétrique (a) utilisation du HSM dans la couche de remblai (b) comparaison E_{pieu} constant et variable

Le calcul de référence prend en compte un module de Young variable dans le pieu. On a refait un calcul en utilisant un module de Young constant ($E_{pieu} = 37,8$ GPa). La Figure 9 (b) montre clairement que les résultats sont pratiquement inchangés.

5. Conclusion

Cette communication propose une interprétation de l'écart observé entre les modélisations et les résultats de mesure, pour la variation de l'effort axial dans le pieu P3 du projet TULIP lors du chargement initial de 206 t. La variante proposée consiste à prendre en compte le poids du massif de réaction et l'action du vérin hydraulique pour l'application de la surcharge en tête de pieu. Elle permet de retrouver des résultats en bon accord avec les mesures. Cette discussion montre l'importance de bien s'attacher à comparer des choses comparables dans l'analyse en retour des expérimentations en vraie grandeur.

En première approche, on a réalisé des calculs en condition axisymétrique : on a ensuite vérifié que les conclusions sont identiques si l'on fait un calcul en condition tridimensionnelle. On a donc validé le calcul axisymétrique, bien que la géométrie réelle du chargement apporté par le massif de réaction soit très loin de respecter la symétrie de révolution ; le calcul axisymétrique présente l'avantage d'une plus grande rapidité d'exécution.

D'autre part, dans l'exemple présenté, on a obtenu des résultats plus proches des mesures en adoptant le modèle de Mohr Coulomb (avec E = 307 MPa) dans la couche de remblai qu'avec le HSM (avec E_{ur}^{ref} = $3 E_{50}^{ref} = 307 \text{ MPa}$, p_{ref} = 17 kPa et m =0,5).

On a également constaté que les efforts calculés en prenant un module de Young constant dans le pieu (Epieu = 37,8 GPa) sont pratiquement identiques à ceux obtenus avec le calcul de référence, où l'on avait considéré un module augmentant avec la profondeur.

Enfin, on peut rappeler que les calculs présentés ont été effectués en supposant des joints adhérents entre le pieu et le sol : on pourrait approfondir l'influence de l'interface solpieu (notamment pour les phases de creusement du tunnel, non étudiées ici). On pourrait aussi chercher à prendre en compte l'effet de la mise en place du pieu lui-même, et faire le même type de comparaison pour les deux autres pieux du projet TULIP.

6. Remerciements

Les résultats présentés dans cette communication ont été acquis dans le cadre du Projet ANR E-PILOT ANR-21-CE22-0011 (Etude de l'impact sur les Pieux LOrs du passage d'un Tunnelier). E-PILOT est un projet de recherche sur l'effet du passage d'un tunnelier sur les fondations existantes regroupant quatre bureaux d'étude du génie civil, deux maîtres d'ouvrage et quatre organismes universitaires et de recherche. Il est piloté par l'Université Gustave Eiffel et financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et le Ministère de la Transition écologique. Les auteurs remercient les partenaires du projet d'avoir autorisé la publication de ces données.

7. Références

- Berthoz, N., Bourgeois, E., Branque, D., Michalski, A., Mohamad, W., Le Kouby, A., Szymkiewicz, F., & Kreziak, C. (2022). Impact du creusement au tunnelier sur un pieu : synthèse de l'exercice de prévision TULIP. *Revue Française de Géotechnique*, 173, 2. https://doi.org/10.1051/geotech/2022015
- Michalski, A. (2023). Evaluation de l'impact du creusement au tunnelier à front pressurisé sur des fondations profondes [Thèse de doctorat]. Université de Lyon.
- Mohamad, W. (2022). Effet de la construction des tunnels sur les fondations profondes : Cas du Grand Paris Express [Thèse de Doctorat]. Université Gustave Eiffel.
- Schanz, T., Vermeer, P. A., & Bonnier, P. G. (1999). The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*.