

Perte de confinement au front d'un tunnelier et conséquences sur les pieux existants : analyses numériques d'essais en centrifugeuse

Volume loss on TBM front and consequences on existing piles: numerical analyses from centrifuge tests

Tobias BERGER^{1*}, Chedid SAADE², Jean-François BRUCHON¹, Alain NEEL², Matthieu BLANC², Luc THOREL²

1 Setec Terrasol, Paris, France

2 Univ Gustave Eiffel, GERS-CG, F-44344 Bouguenais, France

**tobias.berger@kit.edu*

RESUME : Le creusement au tunnelier à proximité de pieux existants fait intervenir de nombreuses interactions entre tunnelier, sol et pieux. Cette étude vise à mettre en lumière ces interactions à partir de rétro-analyses numériques d'essais réalisés en centrifugeuse. Elle a permis de comparer plusieurs méthodes de modélisation et de conclure sur leurs avantages et leurs domaines d'applicabilité.

Le modèle physique en centrifugeuse, développé et testé à l'Université Gustave Eiffel, comprend un cylindre horizontal rigide et fixe avec une trappe verticale également rigide mais mobile. L'ouverture progressive de cette trappe permet de simuler une phase d'excavation ou une réduction du confinement au front. Deux pieux ont été préalablement placés à proximité de la trappe. Ces pieux sont chargés sous une charge de service qui est maintenue constante au cours de l'essai. Une méthode consistant en la reproduction numérique complète des essais dans un modèle 3D aux éléments finis est confrontée à une méthode où les pieux sont modélisés séparément avec un modèle semi-analytique de type "t-z". Les résultats permettent de mettre en évidence la pertinence du modèle découplé pour estimer les tassements, tout en indiquant les limites de son applicabilité. Une étude des mécanismes en profondeur permet de mieux comprendre les effets d'une perte de confinement au front et d'en tirer des enseignements pour la modélisation numérique des interactions tunnelier-sol-pieu.

ABSTRACT: TBM tunneling near existing piles involves numerous interactions between the TBM, the ground and the piles. This study aims to highlight these interactions based on numerical back-analyses of centrifuge tests. It enabled several modeling methods to be compared and conclusions to be drawn about their advantages and their areas of applicability.

The physical centrifuge model, developed and tested at Université Gustave Eiffel, consists of a rigid, fixed horizontal cylinder with a vertical trapdoor that is also rigid but movable. Gradually opening this trapdoor simulates an excavation phase or a reduction in confinement at the face. Two piles were previously placed near the trapdoor. These piles are loaded under a service load which is maintained constant during the test.

A method consisting of complete numerical reproduction of the tests in a 3D finite element model is compared with a method in which the piles are modeled separately with a semi-analytical "t-z" model. The results highlight the relevance of the decoupled model for estimating settlements, while indicating the limits of its applicability. An in-depth study of the mechanisms provides a better understanding of the effects of loss of confinement at the face and offers insights for the numerical modeling of tunnel boring machine-soil-pile interactions.

Mots-clés : tunnel ; centrifugeuse ; modélisation numérique ; fondations profondes ; interaction sol-structure

1 INTRODUCTION

La densification de l'espace urbain représente un défi pour l'aménagement des villes. L'expansion des réseaux de transport souterrains au sein de métropoles de plus en plus denses impose le creusement de tunnels à proximité immédiate de fondations profondes existantes. Cette cohabitation étroite génère des interactions complexes entre le processus d'excavation

et les structures en place. Parmi les mécanismes critiques, la perte de confinement au front de taille d'un tunnelier et la perte de volume induite constituent des enjeux majeurs de dimensionnement et de gestion des risques, pouvant altérer la capacité portante des pieux environnants et provoquer des tassements différentiels critiques pour la stabilité générale de la structure. Cette étude s'inscrit dans le projet E-PILOT et s'appuie sur les résultats obtenus lors du projet TULIP (Berthoz et

al., 2022, 2023,) et d'autres travaux antérieurs (Bel, 2018).

La complexité de ces interactions tunnel-sol-pieu réside dans la réorganisation spatiale des contraintes au sein du massif lors du passage du tunnelier. Pour étudier ces phénomènes, le recours à la modélisation physique en centrifugeuse s'avère un moyen efficace. Ce dispositif permet de reproduire, sur des modèles réduits, des états de contraintes équivalents à ceux de prototypes réels à grande échelle. Cette étude s'appuie sur une campagne expérimentale menée à 60g sur les installations de l'Université Gustave Eiffel à Nantes (Saade et al., 2025a, 2025b, 2025c), simulant une décompression contrôlée par l'ouverture d'une trappe au sein d'un massif de sable de Fontainebleau NE34 (Dano et al., 2024).

L'objectif de cette étude est de confronter les résultats expérimentaux de ces essais à différentes stratégies de modélisation numérique pouvant être utilisées par les bureaux d'études. Il s'agit d'évaluer la pertinence de l'approche par éléments finis tridimensionnels, utilisant des lois de comportement avancées (modèle HSS), face à une méthode simplifiée par découplage également employée en ingénierie. À travers cette rétro-analyse, nous analysons les mécanismes de transfert de charge et les limites opérationnelles des outils de calcul afin de proposer des recommandations méthodologiques pour la pratique géotechnique.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODOLOGIE

2.1 Dispositif de la centrifugeuse

Le modèle physique consiste en un conteneur de 600 x 600 x 400 mm, rempli de sable de Fontainebleau NE34 mis en place par pluviation (Figure 1). La densité relative cible est de 80% (1,66 g/cm³). Le ratio entre le diamètre du pieu et celui des grains, supérieur à 50, permet d'affirmer que l'influence de la granulométrie sur la résistance structurale est négligeable à l'échelle du modèle. Le modèle est développé à échelle 1/60^e, en correspondance avec l'accélération de 60g imposée par la centrifugeuse (Garnier et al., 2007).

La simulation du tunnel est assurée par un cylindre métallique positionné horizontalement. À l'une de ses extrémités, un mécanisme de trappe peut être activé par un vérin pour créer une perte de volume et une décompression localisée, imitant ainsi une réduction de pression de confinement au front de taille d'un tunnelier.

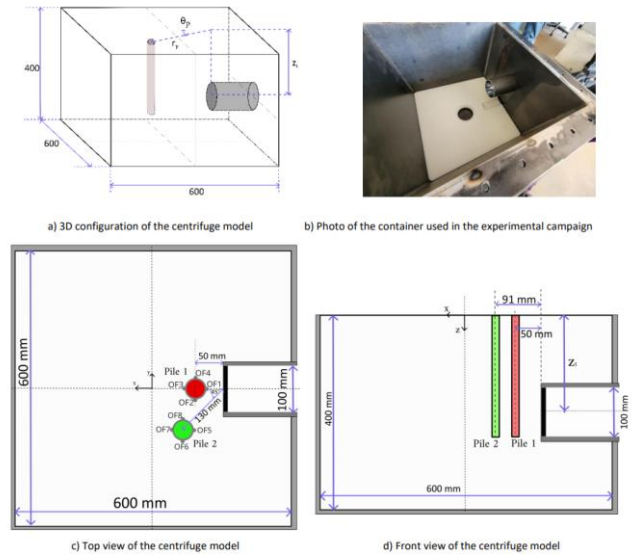


Figure 1 : Dispositif expérimental (Saade et al., 2025c)

Les pieux sont en aluminium creux, leurs dimensions correspondent à un pieu prototype de 15 m de longueur et 72 cm de diamètre. Les pieux, installés sous gravité terrestre, sont instrumentés : chaque pieu est équipé de quatre fibres optiques réparties tous les 25 mm le long du fût. La disposition des fibres optiques permet une mesure discrète des déformations et d'en déduire les efforts normaux et de flexion associés en fonction de la profondeur.

Tableau 1 Caractéristique géométriques

Paramètre	Modèle [mm]	Prototype [m]
Longueur du conteneur	600	36
Largeur du conteneur	600	36
Profondeur du conteneur	400	24
Diamètre du tunnel	100	6
Profondeur du tunnel	De 1.5D à 3D	
Diamètre extérieur du pieu	12	0,72
Epaisseur du pieu	1	0,06
Longueur du pieu	250	15

2.2 Chargement des pieux

Les campagnes d'essais comprenaient deux phases expérimentales distinctes :

- Essais à la rupture : réalisés sur des pieux non perturbés par l'ouverture de la trappe, ces essais de chargement statique jusqu'à la rupture ont permis de caractériser la capacité portante ultime des pieux et de calibrer le comportement d'interface sol-pieu (frottement et pointe) en amont des analyses d'interaction.
- Essais avec ouverture de la trappe : ces essais d'interaction tunnel-sol-pieu suivaient un protocole en deux temps. Dans un premier temps, les pieux étaient chargés jusqu'à un niveau de charge de service constant (environ 30% de la capacité ultime). C'est sous cette charge maintenue constante que la trappe était progressivement ouverte, simulant l'excavation ou une perte de volume au front. Cette approche permettait d'étudier la redistribution des efforts dans le pieu en conditions de service. Dans un second temps, les pieux étaient déchargés puis rechargés à la rupture après l'ouverture maximale de la trappe afin d'évaluer leur capacité portante.

2.3 Configurations du tunnel

Les essais avec ouverture de trappe sont réalisés pour quatre profondeurs différentes du tunnel. Ceci a pour objectif d'observer les différences du comportement des pieux pour des zones de perturbation variées. La couverture en clé du tunnel varie de 1,5D (configuration C01) à 3D (configuration C04), avec D le diamètre du tunnel. Le procédé expérimental et les charges imposées aux pieux sont identiques pour toutes les configurations.

3 RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1 Déplacements

L'étude des déplacements montre que la réponse des pieux suit un processus en deux phases distinctes. Dans un premier temps, le pieu P1 (le plus proche de la trappe) s'enfonce de manière quasi-linéaire avec l'ouverture de la trappe jusqu'à un certain seuil. Au delà, un phénomène de poinçonnement se produit, marqué par une accélération brutale du tassement du pieu, qui devient alors nettement supérieur à celui du sol environnant (Figure 2). Le pieu P2, plus éloigné et désaxé par rapport à l'axe du tunnel, ne subit pas de déplacements significatifs. Cette observation a pu être

faite dans toutes les configurations testées et sont indépendantes de la profondeur du tunnel.

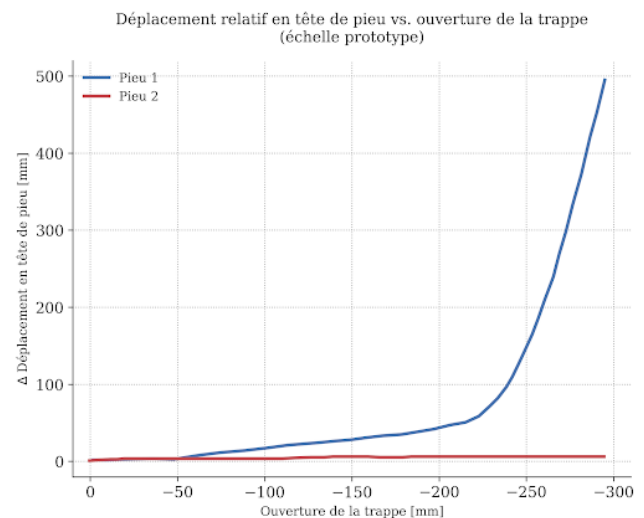


Figure 2 : Evolution du déplacement des pieux en fonction de l'ouverture de la trappe, essai C03

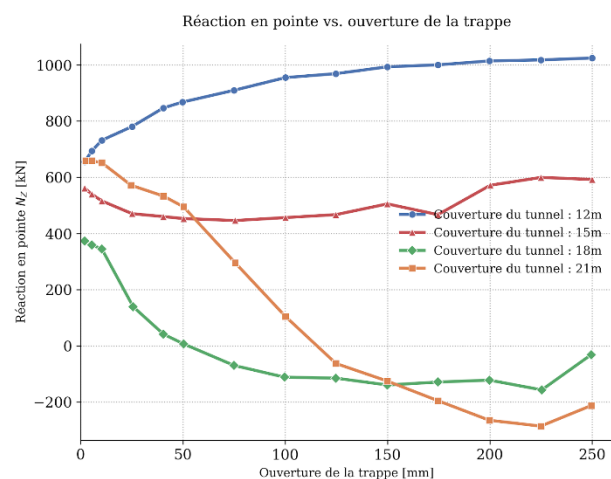


Figure 3 : Evolution de l'effort de pointe en fonction de l'ouverture de la trappe

3.2 Redistribution des efforts

Concernant la redistribution des efforts, les mesures révèlent une modification nette des efforts le long des pieux. L'ouverture de la trappe entraîne une décompression du sol, voir un frottement négatif, qui réduit quasi-instantanément la capacité portante du sol dans la zone perturbée autour de la trappe. Pour compenser cette perte de capacité portante le long du fût, une mobilisation accrue des zones non perturbées est constatée. Pour les configurations les moins profondes du tunnel, l'effort de pointe augmente lié à la réduction du frottement mobilisé. A l'inverse, l'effort de pointe diminue dans les configurations les plus profondes du tunnel, mobilisant une augmentation du frottement ().

L'analyse des moments fléchissants, déduits des mesures par fibres optiques, souligne l'asymétrie de la sollicitation. Le moment fléchissant est particulièrement marqué sur le pieu P1, le plus proche de la zone d'influence du tunnel, alors que les sollicitations sur le pieu P2 restent négligeables. Ces résultats confirment que l'interaction tunnel-sol-pieu ne se limite pas à des tassements verticaux, mais génère des sollicitations transverses (flexion-cisaillement) liés aux déplacements horizontaux du sol vers le front du tunnel.

4 MODELES DE CALCUL ET CALAGES

Deux approches de calcul sont proposées (Figure 5). Une première approche s'appuie uniquement sur Plaxis 3D (approche classique). Une deuxième approche consiste à une modélisation distincte des interactions tunnel-sol et sol-pieu associant une modélisation 3D avec Plaxis et une modélisation semi-analytique avec Foxta (approche aux « interactions simplifiées »). Dans cette dernière approche, le conteneur de la centrifugeuse est alors modélisé sans pieu, et l'état de contrainte-déformation obtenu sans pieu est ensuite imposé au pieu modélisé dans Foxta. Le choix est fait pour les deux approches d'appliquer les mêmes dimensions au modèle numérique que dans la centrifugeuse, sans prendre en compte les dimensions minimales usuelles pour ce type de modèle (Möller, 2006).

Des modèles spécifiques sont montés afin de réaliser le calage du comportement des pieux à partir des essais menés à la rupture réalisés sur des pieux éloignés de la trappe. La précision du calage est évaluée selon trois critères pour les deux approches : la concordance de la courbe charge-déplacement, le niveau d'effort mobilisé en pointe de pieu et la distribution du frottement latéral le long du fût.

Avec le module Taspie+ de Foxta (Caira et al. 2024), la calibration repose sur la définition de courbes de transfert de charge (type t-z), modélisées par des ressorts trilineaires. Ces courbes relient le tassement du pieu au frottement latéral le long du fût et à la résistance mobilisée en pointe. La validation est obtenue lorsque le profil d'effort normal calculé et la courbe de chargement globale présentent une correspondance acceptable avec les résultats expérimentaux.

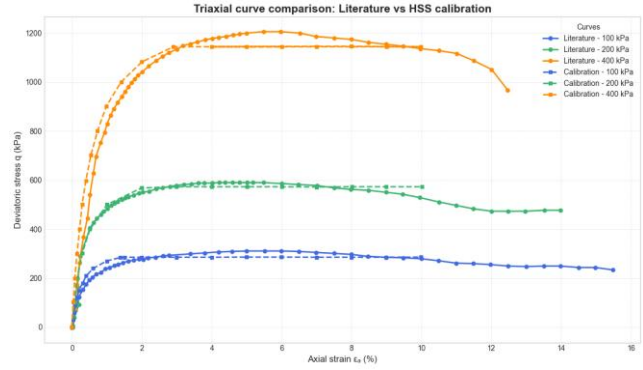


Figure 4 : Comparaison à l'essai triaxial entre le modèle géotechnique de sol retenu et un sol similaire de référence

Pour la modélisation tridimensionnelle sur Plaxis 3D, le calage suit un processus itératif plus complexe, particulièrement avec l'utilisation du modèle de comportement avancé Hardening Soil with Small Strain (HSS) pour le sable NE34. La méthode commence par la détermination de valeurs initiales issues de la littérature (Dano et al., 2024 et de corrélations usuelles (Schanz et al., 1999, Gilleron et al., 2016). Ces paramètres sont ensuite affinés numériquement en simulant un essai de chargement jusqu'à la rupture. Enfin, le modèle HSS calé est vérifié en simulant un essai triaxial et en le comparant à des essais expérimentaux (Figure 4).

Une attention particulière est portée aux paramètres d'interface, modélisés par une loi élastique parfaitement plastique à critère de Mohr-Coulomb. Les analyses ont montré qu'il est nécessaire de réduire le module élastique de l'interface pour obtenir un comportement cohérent avec les observations.

Tableau 2 Paramètres numériques

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Poids volumique	γ	15,3	kN/m ³
Module de rigidité sécant	$E_{50,ref}$	30	MPa
Module tangent œdométrique	$E_{oed,ref}$	30	MPa
Module de décharge-recharge	$E_{ur,ref}$	90	MPa
Exposant de puissance	m	0,5	-
Angle de frottement	ϕ'	36	°
Angle de dilatance	ψ	6	°
Coefficient de Poisson (décharge)	ν_{ur}	0,2	-
Coefficient de pression au repos	K_0	0,41	-

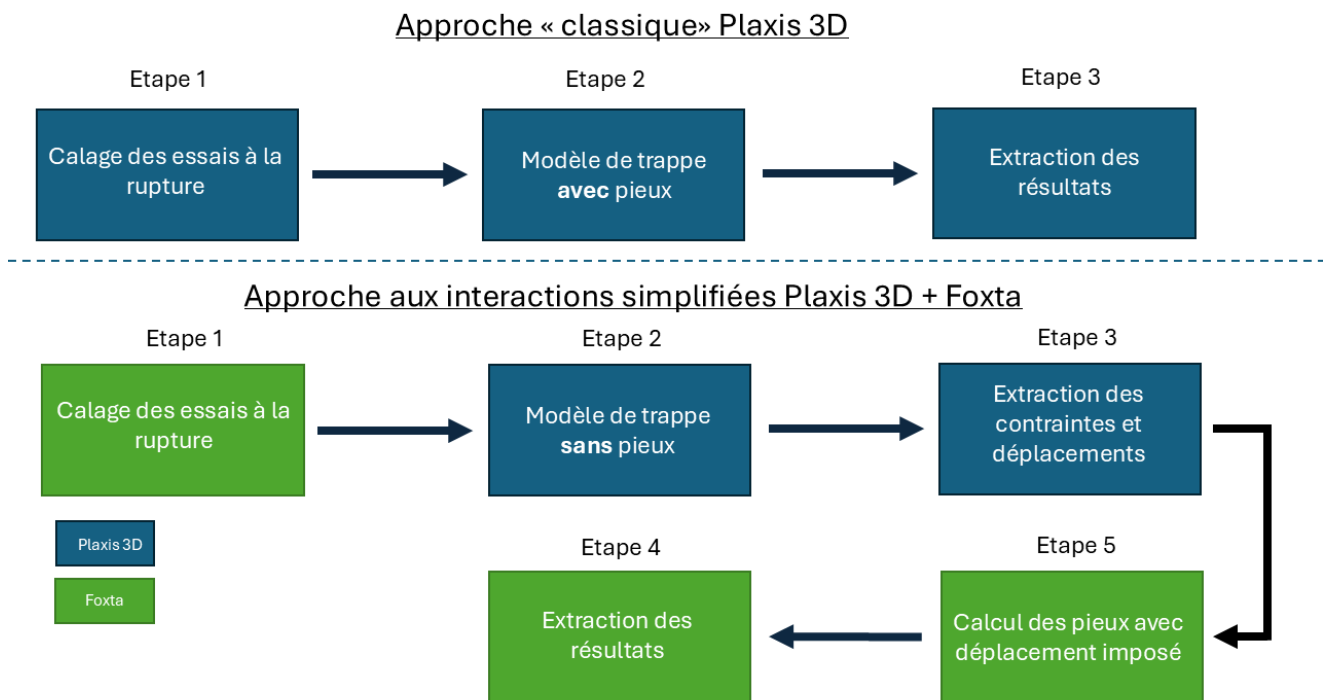


Figure 5 : Logigramme des deux approches employées

5 RETRO-CALCUL DES ESSAIS AVEC OUVERTURE DE TRAPPE

5.1 Résultat de l'analyse

L'analyse des résultats issus de la confrontation entre les essais en centrifugeuse et les modélisations numériques met en évidence une capacité de prédiction satisfaisante du modèle HSS (Hardening Soil Small Strain) pour appréhender les mécanismes d'interaction sol-tunnel-pieu. En configuration plein champ, la rétro-analyse confirme que les paramètres de rigidité aux petites déformations permettent de reproduire avec une grande fidélité la largeur et la courbure de la cuvette de tassement mesurée par corrélation d'images numériques. Cette correspondance valide l'approche numérique pour la propagation des déplacements du sol induits par la perte de confinement au front de taille.

Concernant les fondations, la redistribution des efforts axiaux observée expérimentalement est qualitativement bien capturée par l'approche classique. Le modèle reproduit le transfert de charge du frottement latéral vers la pointe à mesure que l'ouverture de la trappe progresse, témoignant d'une

bonne simulation de la décompression du massif en périphérie du tunnel. Dans certaines configurations, l'approche classique surestime les déplacements du pieu (Figure 7). Toutefois, cette approche parvient à attraper le point critique par une divergence du calcul.

Pour l'approche découplée, les résultats en déplacement ne sont pas obtenus en continu mais uniquement pour certaines ouvertures de trappe choisies et extraites vers Foxta. Les déplacements obtenus ainsi que l'évolution de l'effort normal le long du pieu sont satisfaisants, et ceci également pour les configurations où l'approche classique était moins précise. Cependant, le modèle numérique découplé tend à sous-estimer systématiquement le tassement des pieux lorsque l'ouverture de la trappe dépasse un certain seuil, autour du point critique. Cette difficulté de convergence quantitative s'explique par une double interaction entre pieu et sol et l'effet de poinçonnement du pieu qui accentue les déformations et génère des plastifications supplémentaires (Figure 66). En conséquence, les résultats montrent que la méthode simplifiée peut conduire à une surestimation de la résistance, car elle considère le pieu comme un élément passif dans un champ de déplacement imposé, négligeant ainsi les influences réciproques identifiées lors de la rétro-analyse sur Plaxis 3D.

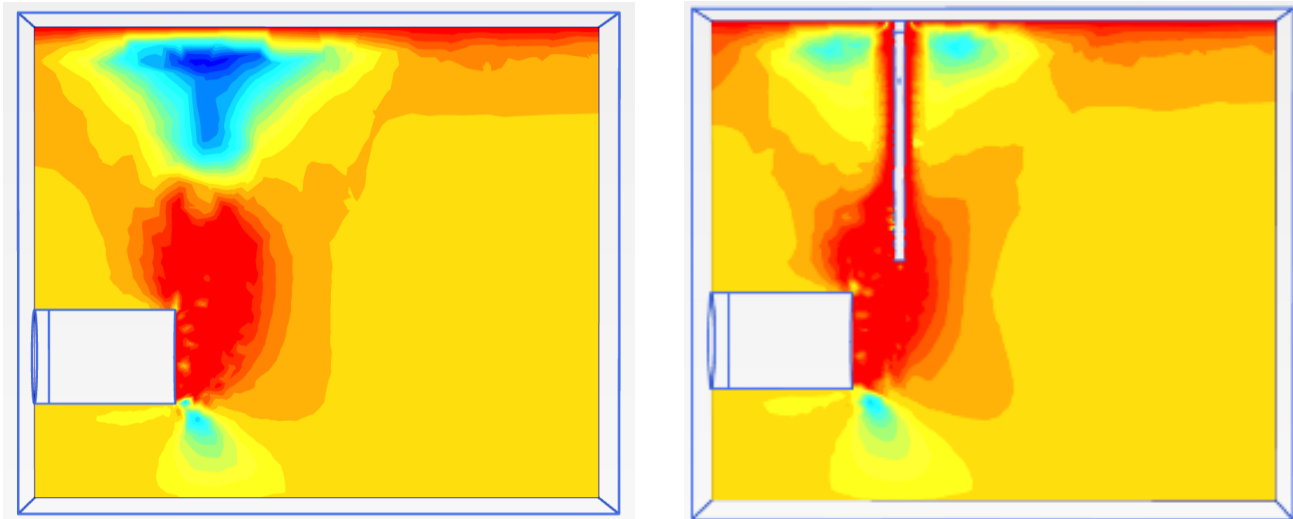


Figure 6 : Plastifications après ouverture de la trappe de 100mm (prototype) pour les deux méthodes employées (rouge : critère plastique atteint)

5.2 Observations sur les méthodes utilisées

L'évaluation de l'interaction tunnel-sol-pieu à travers la confrontation de deux approches met en lumière des compromis entre exhaustivité et efficacité calculatoire. La modélisation complète par éléments finis tridimensionnels sous Plaxis 3D offre l'approche la plus exhaustive en traitant le problème de manière totalement couplée. Cette méthode permet de capturer l'interaction réciproque entre la fondation, le massif et le tunnel, assurant une cohérence continue des champs de contraintes et de déformations, particulièrement lorsqu'une zone plastique importante se forme autour du pieu et du tunnel. Cependant, cette précision s'accompagne d'une complexité de mise en œuvre accrue en termes de calage des paramètres du modèle, temps de calculs et d'exploitation.

À l'inverse, l'approche découplée via la combinaison Plaxis/Foxta permet de gérer plus simplement la partie pieu et calage de leur comportement à partir des courbes de transfert de charge (t-z). En appliquant aux pieux les déplacements du sol obtenus préalablement en champ libre, cette technique réduit le temps de simulation par environ trois, offrant une réactivité précieuse en phase de prédimensionnement. Si Foxta permet une gestion fine et spécifique du frottement négatif, la comparaison avec les données expérimentales révèle une tendance à sous-estimer le tassement des pieux lorsque les pertes de volume deviennent importantes au front du tunnel. Cette divergence s'explique par les limites du modèle découplé utilisé qui n'intègre pas l'influence du pieu sur l'état de contrainte du sol à proximité du tunnel,

qui en réalité existe et favorise les instabilités observées proche de la rupture. Il convient de noter que les écarts significatifs entre la méthode découplée et les résultats expérimentaux n'interviennent qu'à partir d'une perte de volume au front d'au moins 3%. Les pertes de volumes sont toutefois toujours très inférieures à 3% pour des tunneliers à pression de terre (Michalski, 2023, Mohamad, 2022).

Pour toutes les approches considérées, les informations apportées par les essais préalables menés

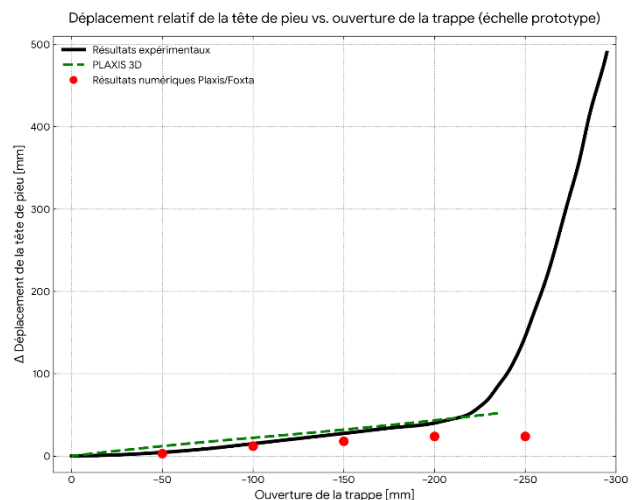


Figure 7 : Comparaison des résultats en déplacement entre essais expérimentaux et les deux méthodes employées (essai C04)

jusqu'à la rupture ont été très précieuses dans la constitution de modèles géotechniques fiables.

En conclusion, si l'approche simplifiée demeure pertinente pour des niveaux de sollicitations/déformations modérés, la modélisation 3D complète s'avère complémentaire pour l'analyse de configurations plus complexes nécessitant une

restitution fidèle des mécanismes de plastification/poinçonnement.

6 CONCLUSIONS

Cette étude a permis de caractériser les mécanismes complexes d'interaction entre le creusement d'un tunnel et les fondations profondes à travers une analyse couplant expérimentation en centrifugeuse et modélisation numérique. L'analyse s'est appuyée sur des essais en modèle réduit réalisés à l'Université Gustave Eiffel, reproduisant des pertes de volume contrôlées au front de taille. Ces données expérimentales ont servi de base au calibrage d'un modèle numérique tridimensionnel utilisant la loi de comportement HSS, choisie pour sa capacité à restituer la rigidité du sol aux petites déformations et au déchargement. En parallèle, une approche simplifiée par découplage via le logiciel Foxta a été évaluée afin de juger de sa pertinence pour la pratique de l'ingénierie.

Les résultats obtenus démontrent que l'excavation du tunnel induit une réduction systématique de la capacité du pieu situé à proximité immédiate du tunnel, et provoquent des transferts de charge entre la pointe et le fût pour maintenir l'équilibre de la fondation. La confrontation des différents outils numériques indique que, bien que la méthode simplifiée présente des limites pour prédire les déplacements les plus importants, elle offre une précision satisfaisante pour les niveaux de sollicitation courants. La tendance à sous-estimer les déplacements du pieu n'intervient que pour des niveaux de perturbations proches de la rupture. Cette étude conclut que le choix d'une stratégie de modélisation doit résulter d'un compromis entre la complexité des phénomènes à prendre en compte, le nombre de paramètres à caler et les délais d'étude.

L'étude a permis de montrer l'intérêt de l'association entre les essais en centrifugeuse et les modèles numériques ; celle-ci pourrait encore trouver des applications sur l'évaluation des cuvettes de tassement ou la flexion des pieux.

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 4

bureaux d'étude du génie civil, 2 maîtres d'ouvrage et 4 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.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bel, J., 2018. Modélisation physique de l'impact du creusement d'un tunnel par tunnelier à front pressurisé sur des fondations profondes. PhD-Thesis. Université de Lyon. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-01814852v1>
- Berthoz, N., Bourgeois, E., Branque, D., Kreziak, C., Le Kouby, A., Michalski, A., Mohamad, W., Soyez, L. and Szymkiewicz, F., 2023. Impact du creusement au tunnelier sur des fondations profondes : principaux enseignements du projet de recherche TULIP.
- Berthoz, N., Bourgeois, E., Branque, D., Michalski, A., Mohamad, W., Le Kouby, A., Szymkiewicz, F. and Kreziak, C., 2022. Impact du creusement au tunnelier sur un pieu : synthèse de l'exercice de prévision TULIP. Revue Française DOI 10.1051/geotech/2022015. de Géotechnique. 2022. N° 173, pp. 2.
- Cuira, F. and Alzate, A. M., 2024. Manuel utilisateur - Partie C.6 - Notice technique du module TASPIE+. 2024. Terrasol. Disponible à l'adresse : <https://terrasol.setec.fr/wp-content/uploads/sites/12/2025/03/Foxtav4-Manuelutilisateur-PartieC.6-TASPIE-indD-Novembre2024.pdf>
- Dano Ch., Thorel L., Dupla JC., Benahmed N., Li Z. 2024. Compilation des propriétés physiques et mécaniques du sable de Fontainebleau NE34/ Compilation of physical and mechanical properties for NE34 Fontainebleau sand . Rev. Fran. Geotech., 179, 6. <https://doi.org/10.1051/geotech/2024027>
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S.M., Culligan, P.J., Goodings, D., Konig, D., Kutter, B., Phillips, R., Randolph, M.F., Thorel L. 2007 Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. Int. J. Physical Modelling in Geotechnics ISSN 1346-213X, vol7, n°3, pp 1-24. doi.org/10.1680/ijpmpg.2007.070301
- Gilleron, N., Bourgeois, E. and Saitta, A., 2016. Utilisation du hardening soil model dans l'étude du creusement de tunnels superficiels. In : JNGG 2016- Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Nancy, France. 2016. pp. 8p.
- Michalski, A., 2023. Évaluation de l'impact du creusement au tunnelier à front pressurisé sur des fondations profondes : expérimentation en vraie grandeur et modélisation numérique. PhD-Thesis. Vaulx-en-Velin, École nationale des travaux publics de l'État.
- Mohamad, W., 2022. Effet de la construction des tunnels sur les fondations profondes : cas du Grand Paris Express. PhD-Thesis. Université Gustave Eiffel.

- Möller, S.C., 2006. Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Stuttgart : Inst. für Geotechnik. Mitteilung / Institut für Geotechnik Stuttgart, 54. ISBN 978-3 921837-54-2. Space
- Saade, C., Blanc, M. and Thorel, L., 2025a. Centrifuge Modeling Database of Pile Failure Tests. Nantes : Université Gustave Eiffel.
- Saade, C., Blanc, M. and Thorel, L., 2025b. Centrifuge Modeling Database on the Effect of Tunneling on Loaded Piles Using a Trapdoor Displacement System. Nantes : Université Gustave Eiffel.
- Saade, C., Blanc, M. and Thorel, L., 2025c Centrifuge modeling of the effect of tunneling on the response of loaded piles. Nantes : Université Gustave Eiffel.
- Schanz, T., Vermeer, P.A. and Bonnier, P.G., 1999. The hardening soil model: Formulation and verification. In : Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 Years of PLAXIS. Rotterdam. 1999. London Clay.