

Interaction pieux existants / tunnel : tassements de surface obtenus par corrélation d'images appliquée à des essais en centrifugeuse et comparaison à des calculs numériques

Pile / tunnel interaction : surface settlements obtained by image correlation applied to centrifuge tests and comparison with numerical modelling

Tobias BERGER¹, Chedid SAADE², Jean-François BRUCHON¹, Alain NEEL², Matthieu BLANC², Luc THOREL^{2*}

1 Terrasol, Paris, France

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

*luc.thorel@univ-eiffel.fr

RESUME : L'interaction sol-pieu-tunnel est étudiée dans un cas de déconfinement du front de taille par une approche double : modélisation physique en centrifugeuse et modélisation numérique. Le tassement en surface du massif de sable de Fontainebleau NE34 est comparé, d'une part en utilisant les mesures sur le modèle réduit centrifugé à l'échelle du 1/60^{ème} obtenues par une paire de caméras et un traitement par corrélation d'images, et d'autre part, via un modèle numérique aux éléments finis tridimensionnel, utilisant la loi de comportement HSS. La position de la cuvette de tassements et leurs ordres de grandeur sont confirmés.

ABSTRACT: The soil-pile-tunnel interaction is studied in a case of working face deconfinement using a dual approach: physical modelling in a centrifuge and numerical modelling. The surface settlement of the Fontainebleau NE34 sand massif is compared, on the one hand using measurements on the 1/60th scale centrifuge model obtained by a pair of cameras and digital image correlation processing, and on the other hand, via a three-dimensional finite element numerical model using the HSS constitutive law. The position of the settlement basin and its order of magnitude are confirmed.

Mots-clés : interaction tunnel-pieux ; modélisation numérique ; modélisation physique ; centrifugeuse ; traitement d'image

1 INTRODUCTION

L'urbanisation croissante et l'extension des besoins de transport souterrain en zone urbaine génèrent des situations d'interaction entre fondations de bâtiments existants et tunnel en création. Cette problématique est étudiée dans le cadre du projet ANR E-PILOT (2022-2026). On s'intéresse ici aux tassements induits en surface. A cette fin, une approche couplée de simulation numérique et de modélisation physique en centrifugeuse est adoptée.

Les tunnels ont fait l'objet de nombreuses études sur modèles réduits, portant sur la stabilité du front de taille sans (Chambon et Ringot, 1990 ; Chambon et Corté, 1991) ou avec boulonnage (Al Hallak et al.,

2001). Leca (2000) s'intéresse aux outils d'analyse de la stabilité de l'ouvrage, d'une part, et aux calculs en déplacements, d'autre part. En sol homogène, le calcul du tassement de surface dû au creusement d'un tunnel est une question véritablement tridimensionnelle (e.g. Bel, 2018), combinant des profils transverses d'allure gaussienne (Peck, 1969) et de profil axial de forme sigmoïdale (ou gaussienne cumulée). La cuvette de tassement souvent observée est-elle modifiée par la présence d'un pieu au voisinage du tunnelier ? Cette question est étudiée ici par le biais d'une approche couplée d'expérimentations sur modèles réduits centrifugés et de simulation numérique.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'interaction tunnel-sol-pieu est ici étudiée dans un massif de sable de Fontainebleau NE34 (Dano et al., 2024) dense ($I_D = 80\%$), sous une forme simplifiée où l'instabilité du front de taille est basée sur le principe de la « trap-door ». Il s'agit d'un piston de même diamètre D_t que le tunnel, dont le mouvement est contrôlé en vitesse de déplacement ($10^{-4}D_t$ par seconde). Les conditions aux limites sont ainsi maîtrisées au cours de l'expérimentation.

Le conteneur E-Pilot (Figure 1) permet de reconstituer, par pluviation dans l'air, un massif de sable de 400mm de hauteur et de 600mm de côté. Le tube représentant le tunnel a une longueur de 150mm, un diamètre intérieur $D_t = 100\text{mm}$ et une épaisseur de 5 mm. La profondeur z_t de l'axe du tunnel peut être ajustée verticalement à $2D_t$, $2,5D_t$, $3D_t$, ou $3,5D_t$.

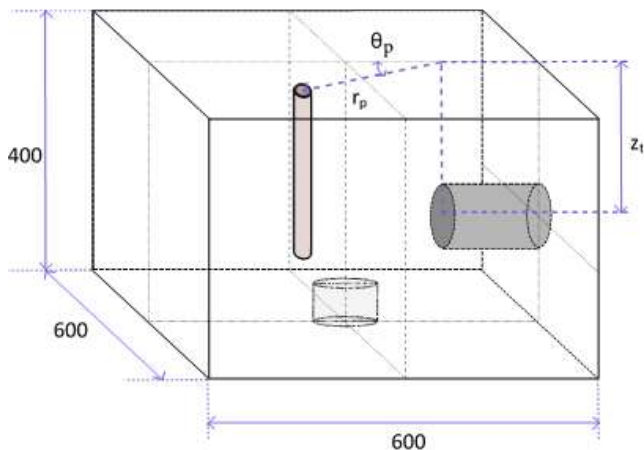


Figure 1. Schéma de principe du conteneur E-Pilot

Le pieu, dont la position est repérée par rapport au front de taille initial (r_p , et θ_p) est installé sous gravité terrestre, puis chargé aux états limites de service.

Un jeu de deux caméras de haute résolution (5328×4608 pixels) est positionné sur le bord du conteneur (Figure 2) de façon à reconstituer la surface des tassements par corrélation d'image. Ces caméras professionnelles (Figure 3) (modèle a2A5328-4gmPRO) sont équipées d'objectifs Fujinon (modèle CF16ZA-1S) de distance focale 16mm.

Avec l'ouverture de la trappe, des tassements et des déplacements horizontaux irréguliers de la surface peuvent se produire. À l'aide des méthodes de mesure conventionnelles, il peut être difficile de capturer ces déformations avec une précision suffisante. Dans cette étude, la surveillance de la surface a été réalisée à l'aide de la paire de caméras combinée à la technique de corrélation d'images numériques (DIC) proposée par Solav et al. (2022). Cette méthode comprend deux étapes principales : premièrement, l'étalonnage optique de la paire de caméras, et deuxièmement, le

traitement d'images qui génère une représentation 3D de la surface, à partir de laquelle le tassement peut être estimé.

L'étalonnage a été effectué à $1\times g$ à l'aide d'un damier noir et blanc de 8×11 carrés dont la longueur des côtés est de 15 mm. Environ 50 paires d'images ont été prises avec les deux caméras et utilisées pour l'étalonnage, qui a été effectué à l'aide de la plateforme open source fournie par Solav et al. (2022).

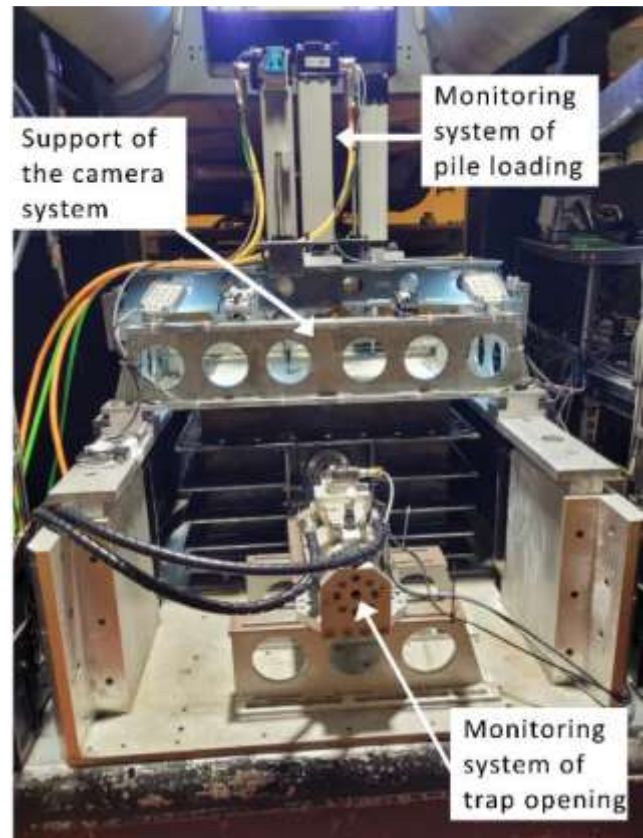


Figure 2 Dispositif installé dans la nacelle de la centrifugeuse

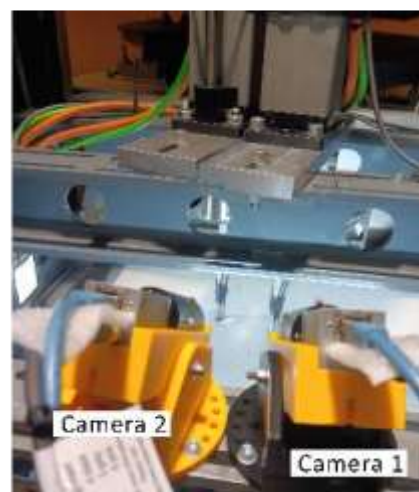


Figure 3 Caméras de haute résolution visant la zone des pieux

3 PROGRAMME EXPERIMENTAL

L'ensemble des expérimentations réalisées en centrifugeuse représente 7 conteneurs au total. Ceux où la corrélation d'image a été réalisée sont au nombre de 2 (Tableau 1). Les expérimentations ont été menées sous une macrogravité de $60\times g$, correspondant à un modèle réduit à l'échelle de 1/60. Les relations de similitude (Garnier et al., 2007) permettant de relier les données du modèle (réduit) à celles du prototype (en vraie grandeur) indiquent que les tassements mesurés en centrifugeuse sont 60 fois plus petits qu'en vraie grandeur.

Tableau 1. Caractéristiques des essais réalisés

N°	z_t/D_t [-]	r_p/D_t [-]	θ_p [°]
C01	2	0,5	0
		1,3	45
C03	3	0,5	0
		1,3	45

4 TASSEMENTS DE SURFACE EXPERIMENTAUX

Après étalonnage, des paires d'images ont été capturées pendant les essais en centrifugeuse à différentes étapes de l'ouverture de la trappe. Les images de référence correspondent à l'état de la trappe ouverte à 0 %. Les paires d'images enregistrées à des déplacements successifs de $0,01D_t$, $0,02D_t$, $0,03D_t$, $0,04D_t$, $0,05D_t$ ont été traitées par rapport à cette référence. Cette surveillance basée sur l'imagerie a été appliquée avec succès pour deux profondeurs de trappe : C01 ($z_t = 2D_t$) et C03 ($z_t = 3D_t$). La Figure 4 présente les tassements de surface induits après un déplacement de 5 mm de la trappe pour les deux configurations : l'affaissement de surface est plus prononcé lorsque la trappe est positionnée à une profondeur moindre ($z_t = 2D_t$). En revanche, l'affaissement est moins important et moins propagé latéralement lorsque la trappe est située plus profondément, à $z_t = 3D_t$.

La Figure 5 montre l'évolution du tassement de surface pendant l'ouverture de la trappe pour une profondeur de trappe $z_t = 2D_t$. Les images indiquent que le tassement augmente progressivement et se propage latéralement sur la surface à mesure que la trappe s'ouvre. On observe également que le tassement maximal se produit directement au-dessus de la trappe, atteignant son pic de 0,5 mm de tassement à une ouverture de trappe de 5 mm.

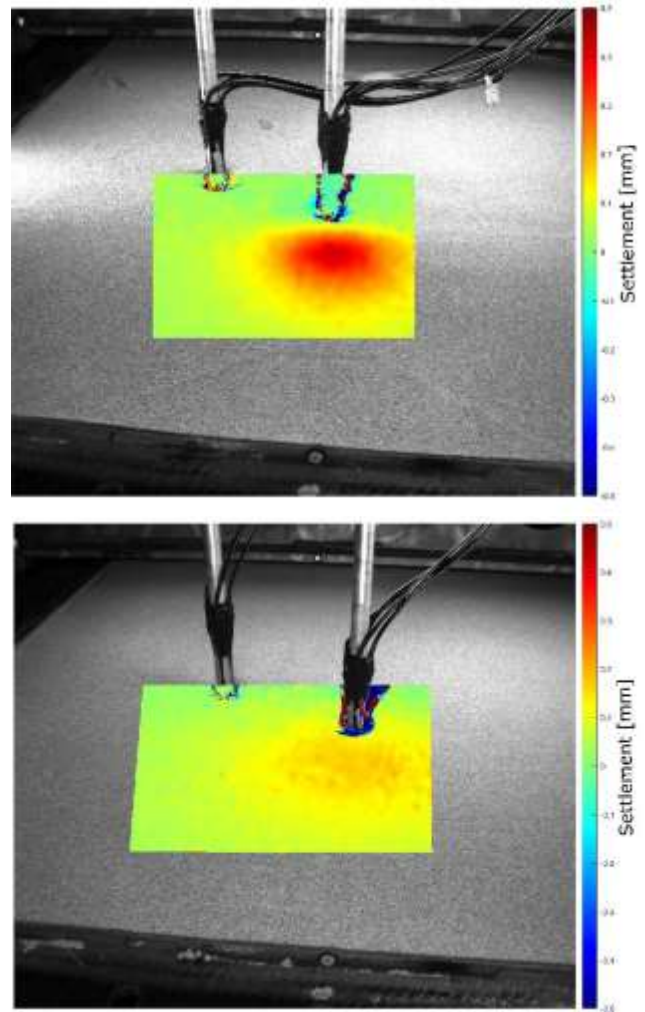


Figure 4 Tassement de surface pour C01 ($z_t = 2D_t$, en haut) et pour C03 ($z_t = 3D_t$, en bas), pour un déplacement arrière du front de taille de 5mm (en grandeur du modèle réduit)

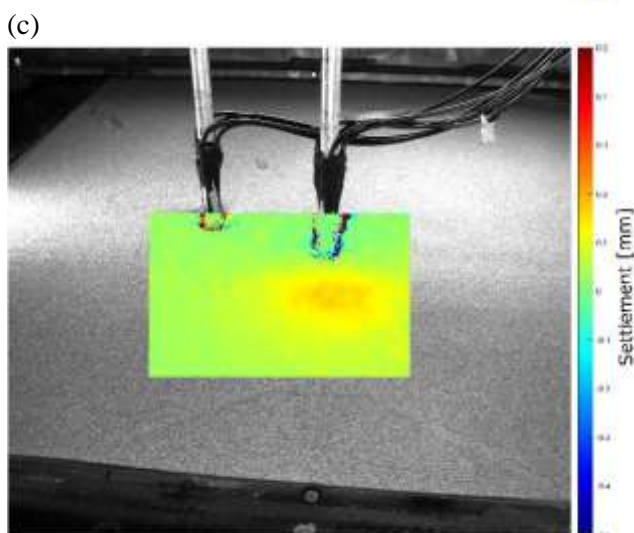
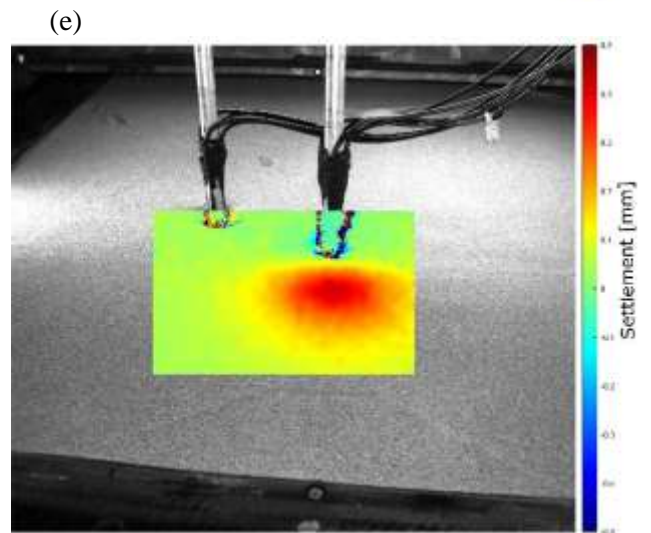
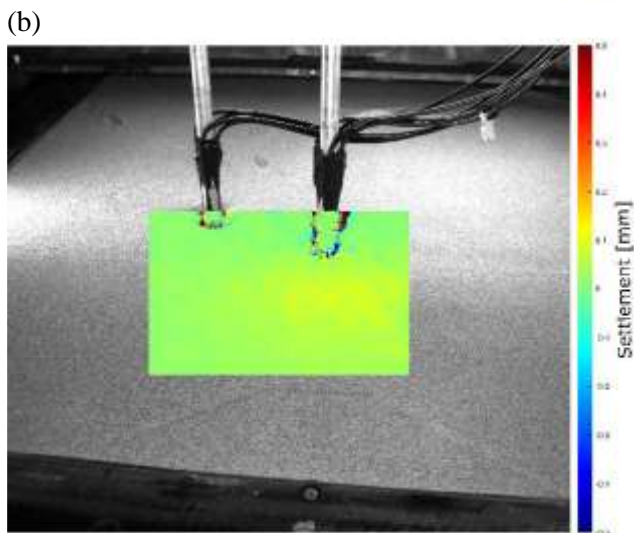
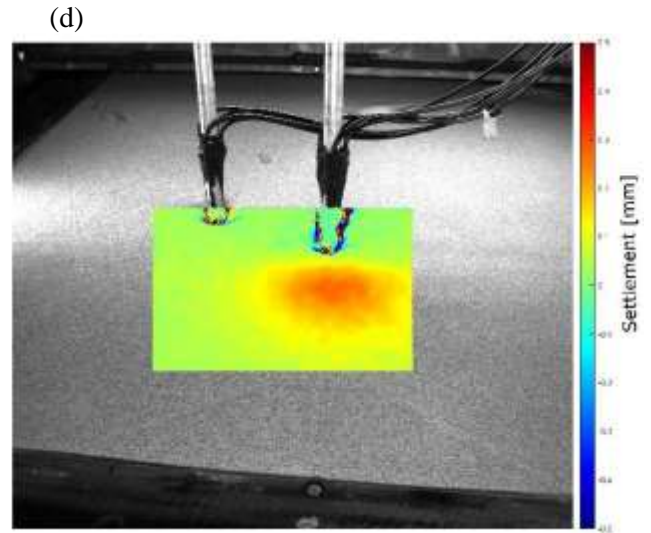
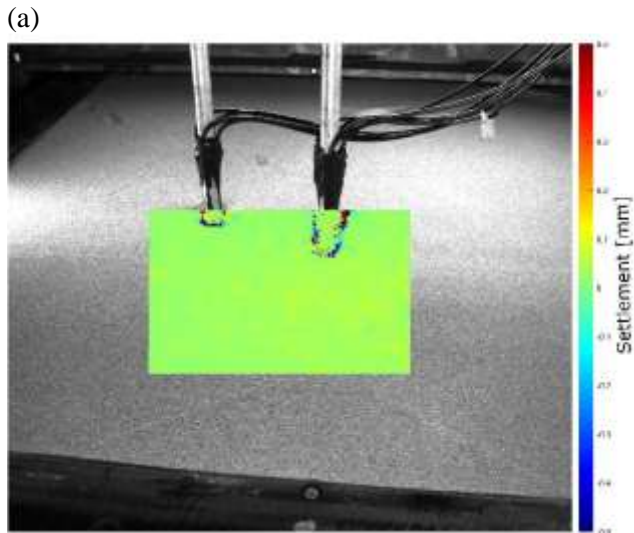


Figure 5 Essai C01 ($z_t = 2D_t$). Evolution du tassement de surface pour un déplacement du « front de taille » de $0,01D_t$ (a), $0,02D_t$ (b), $0,03D_t$ (c), $0,04D_t$ (d), $0,05D_t$ (e)

5 MODELISATION NUMERIQUE

La confrontation entre les mesures expérimentales en centrifugeuse et les modélisations numériques permet d'évaluer la pertinence du modèle numérique et des lois de comportement choisies. Le modèle numérique correspondant aux essais est un modèle tridimensionnel réalisé sur Plaxis 3D à l'échelle prototype (Berger, 2025). Le conteneur, le tunnel et la trappe ont été modélisées comme des corps rigides. L'ouverture de la trappe est simulée par un déplacement imposé de plaque au front de taille.

La loi de comportement HSS (Hardening Soil-with Small strain extension) a été choisie pour sa bonne capacité à modéliser les cuvettes de tassement, spécifiquement pour des déformations faibles et des

situations de déchargement Les paramètres ont été déterminés de manière itérative à partir de données de la littérature (Dano et al., 2024), de corrélations internes au bureau d'études et des paramètres par défaut du programme. Le calage du modèle s'est fait grâce aux essais à la rupture sur deux pieux non soumis à l'ouverture de la trappe, et est évalué selon trois critères : la courbe effort-déplacement, la réaction et pointe, et l'effort normal le long du pieu. La pertinence du choix des paramètres est finalement évaluée à partir d'un essai triaxial numérique dont les résultats sont comparés à un sable similaire de la littérature. Les résultats du calage sont présentés dans le Tableau 2

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 oedométrique	$E_{oed, ref}$	30	MPa
Module de décharge-recharge	$E_{ur, ref}$	90	MPa
Exposant de puissance	m	0,5	-
Angle de frottement	ϕ'	36	°
Angle de dilataance	ψ	6	°
Coefficient de Poisson (décharge)	ν_{ur}	0,2	-
Coefficient de pression au repos	K_0	0,41	-

6 RESULTATS DU CALCUL DU TASSEMENT

La comparaison entre les résultats expérimentaux et la modélisation numérique a été effectuée pour une profondeur du tunnel $z_t = 2D_t$ (configuration C01) (Berger, 2025). On observe une cuvette de tassement localisée et centrée sur le pieu le plus proche du tunnel (Figure 6). La cuvette est toutefois asymétrique est orientée vers le second pieu, contrairement aux résultats expérimentaux pour la même ouverture de trappe (Figure 5e).

À l'échelle de la centrifugeuse, les profils de tassement expérimentaux révèlent des amplitudes comprises entre 0,25 et 0,5 mm pour un rayon $R \leq 2D_p$. Dans cette même zone, les simulations numériques prédisent des déplacements verticaux plus faibles, de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm. Malgré cet écart,

une convergence satisfaisante est observée entre les deux approches en ce qui concerne l'ordre de grandeur des phénomènes étudiés. On note également la différence de comportement entre les pieux selon leur position, également observée par d'autres méthodes de surveillance des déplacements.

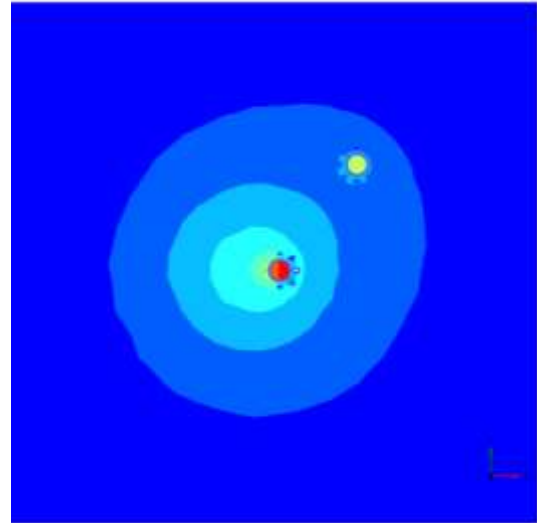


Figure 6 : Cuvette de tassement numérique de l'essai C01 ($z_t = 2D_t$)

7 CONCLUSIONS

Les tassements obtenus sur modèle réduit par mesure optique de corrélation d'image permettent d'accéder à des valeurs de 0,8mm sur le modèle réduit (soit 48mm en vraie grandeur). Les résultats montrent des tendances cohérentes avec les observations faites dans la littérature :

- Toutes choses égales par ailleurs, plus le tunnel est proche de la surface, plus les tassements sont grands ;
- Plus le front de taille recule, plus le tassement se développe en surface ; La simulation numérique a permis de confirmer l'ordre de grandeur et la position de la cuvette de tassement.

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

- Al Hallak, R., Leca, E., Magnan, J.P., Ganier J. (2001) Etude expérimentale et numérique du renforcement du front de taille par boulonnage dans les tunnels en terrain meuble. GT72 Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Série Géotechnique. 192p. <https://collections.univ-gustave-eiffel.fr/ouvrages/lcpc/ERLPC/ERLPC-GT-LCPC-GT72.pdf>
- ANR-E-Pilot (2022) Etude de l'impact sur les pieux lors du passage d'un tunnelier <https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE22-0011>
- Berger, T. (2025). Analysis of modelling tools for tunnelling in complex configurations. Mémoire de Master. Paris : École nationale des ponts et chaussées ; Munich : Technische Universität München.
- Bel, J., (2018) Modélisation physique de l'impact du creusement d'un tunnel par tunnelier à front pressurisé sur des fondations profondes. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale MEGA. <https://theses.fr/2018LYSET002>
- Chambon, P., Ringot J.F. (1990) Etude sur modèles réduits centrifugés. Application aux tunnels à faible profondeur en terrain meuble pulvérulent. Vidéo de 10min. <https://clap.univ-eiffel.fr/videos/etude-sur-modeles-reduits-centrifuges/>
- Chambon, P., Corté J.F. (1991) Etude sur modèles réduits centrifugés. Application aux tunnels à faible profondeur en terrain meuble pulvérulent. GT48 Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Série Géotechnique. 174p. <https://collections.univ-gustave-eiffel.fr/ouvrages/lcpc/ERLPC/ERLPC-GT-LCPC-GT48.pdf>
- Dano, C., Thorel, L., Dupla, J.C., Benahmed, N., Li Z. (2024) Compilation des propriétés physiques et mécaniques du sable de Fontainebleau NE34. Rev. Fran. Geotech., 179, 6. <https://doi.org/10.1051/geotech/2024027>
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S.M., Culligan, P.J., Goodings, D., König, 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/ijpmg.2007.070301
- Leca, E., (2000). Etude du comportement des tunnels creusés en terrains meubles. GT66 Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Série Géotechnique. 100p. <https://collections.univ-gustave-eiffel.fr/ouvrages/lcpc/ERLPC/ERLPC-GT-LCPC-GT66.pdf>
- Peck, R.B., (1969), Deep excavations and tunneling in soft ground, 7ème Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Mexico, Volume des états de l'art, pp. 225-290.
- Solav, D., Silverstein, A. (2022) DuoDIC: 3D Digital Image Correlation in MATLAB. Journal of Open Source Software, 7(74), 4279, Doi : 10.21105/joss.04279