

# Validation d'un modèle numérique pour l'installation de pieux hélicoïdaux dans le sable à partir de données d'essais

## Validation of a Numerical Model for Helical Pile Installation in Sand Using Centrifuge Data

Laurent JOSSEAUME<sup>1,2\*</sup>, Zheng LI<sup>1</sup>, Luc THOREL<sup>1</sup>, Christelle N. ABADIE<sup>1</sup>, Roxana VASILESCU<sup>2</sup>

*1 Université Gustave Eiffel, Nantes, France*

*2 Entreprise PINTO, Fougères, France*

*\*ljosseume@pintogc.com*

**RESUME :** Les pieux hélicoïdaux sont de plus en plus utilisés comme éléments de fondation profonde en raison de leur installation rapide et simple, ainsi que de leur capacité à transférer des charges importantes. Malgré ces avantages pratiques, l'influence du processus d'installation sur leur comportement mécanique et leur capacité portante n'est pas encore entièrement comprise. Une prédiction précise du comportement des pieux nécessite une compréhension détaillée de l'interaction sol-pieu pendant l'installation, ce qui est difficile à obtenir expérimentalement. Cette étude vise à reproduire le processus d'installation des pieux hélicoïdaux à l'aide de simulations numériques avancées et à valider les résultats par rapport aux données issues d'essais en centrifugeuse. Les simulations sont réalisées avec le solveur Abaqus/Explicit, le processus d'installation étant modélisé via la méthode du couplage Eulérien-Lagrangien (CEL), permettant une représentation précise des grandes déformations et des déplacements du sol. Les résultats portent sur la comparaison des valeurs de force axiale et de couple d'installation obtenues numériquement avec celles mesurées lors des essais en centrifugeuse. Une concordance correcte est observée entre les deux approches, bien que le modèle numérique soit à améliorer pour reproduire précisément les mécanismes gouvernant l'installation des pieux hélicoïdaux. Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension des effets de l'installation et constituent une base pour l'amélioration des méthodes de conception.

**ABSTRACT:** Helical piles are increasingly used as deep foundation elements due to their rapid and straightforward installation, as well as their capacity to transfer significant loads. Despite these practical advantages, the influence of the installation process on their mechanical behavior and load-bearing capacity is not yet fully understood. Accurate prediction of pile performance requires a detailed understanding of soil-pile interaction during installation, which is difficult to obtain experimentally. This study aims to reproduce the installation process of helical piles using advanced numerical simulations and to validate the results against data from centrifuge tests. The simulations are carried out with the Abaqus/Explicit solver, with the installation process modeled using the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method, allowing for accurate representation of large deformations and soil displacements. The results focus on the comparison of axial force and installation torque obtained numerically and measured during centrifuge tests. A reasonable agreement is observed between the two approaches, although the numerical model requires further refinement to fully capture the mechanisms governing helical pile installation. These findings contribute to a better understanding of installation effects and provide a basis for improving design methodologies.

**Mots-clés :** Pieux hélicoïdaux ; Installation ; Sable ; Modélisation numérique

### 1 INTRODUCTION

Les pieux hélicoïdaux (PH) sont des systèmes de fondation constitués d'un fût creux en acier, sur lequel une ou plusieurs hélices sont soudées (Figure 1). Ils sont installés dans le sol par un mouvement de vissage, à l'aide d'une machine qui applique simultanément un couple de rotation et une force verticale pour enfoncer le pieu. Pour atteindre des couches de sol profondes et résistantes, il est possible de fixer des rallonges au PH.

Les PH, pouvant mobiliser la traction ou la compression, sont polyvalents. Ils peuvent servir de fondations pour des ouvrages de dimensions variées, tels que des bâtiments, des passerelles, des panneaux solaires, des éoliennes ou des installations temporaires. L'installation des PH est rapide et silencieuse. Elle ne génère pas de déblais, et les pieux sont immédiatement utilisables. L'hélice confère au PH une capacité de traction élevée, ce qui en fait un excellent système d'ancrage.

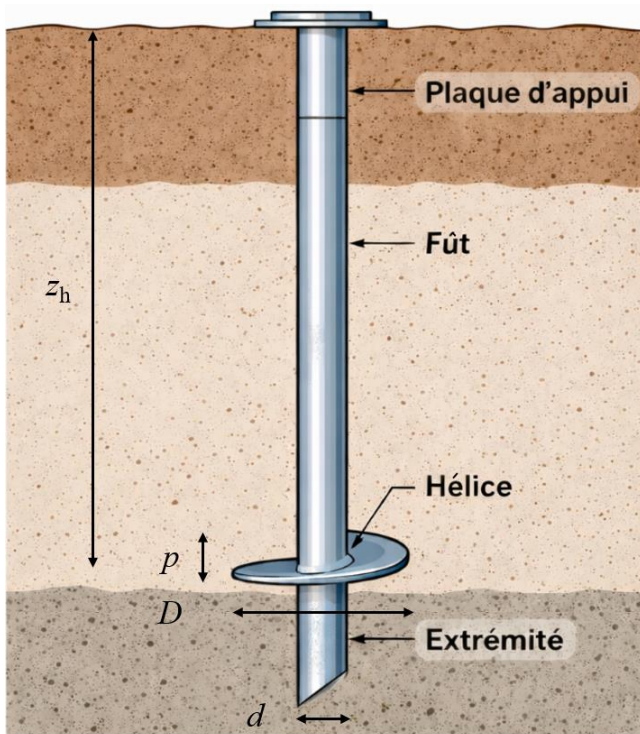


Figure 1 : Schéma d'un pieu hélicoïdal à une hélice dans le sol

De plus, les PH peuvent être retirés du sol par dévissage pour être réutilisés. Dans le contexte actuel de réduction de l'impact environnemental de la construction, encouragé par les normes telles que la RE2020 (Nicolas et Louis, 2020), les PH apparaissent comme une alternative prometteuse pour les fondations. Bien qu'ils soient largement utilisés dans certains pays, leur développement en France reste limité, principalement en raison du fait que les Eurocodes ne les couvrent pas.

La reprise des efforts des PH s'effectue principalement par la portance des hélices dans le sol, ainsi que par le frottement le long du fût. Plusieurs formules permettent de calculer cette résistance, comme celle de Perko (2009):

$$P_u = \sum_n q_{ult} A_n + \alpha z_h (\pi d) \quad (1)$$

Avec  $P_u$  la capacité ultime du pieu en (kN),  $n$  le nombre d'hélices,  $q_{ult}$  la pression ultime portante en (kPa),  $A_n$  la surface de la  $n^{\text{ème}}$  hélice ( $m^2$ ),  $\alpha$  le coefficient de frottement entre le pieu et le sol en ( $kN/m^2$ ),  $z_h$  la profondeur de la première hélice en (m) et  $d$  le diamètre du fût en (m).

Une autre méthode de prédiction de la capacité des PH repose sur la relation entre la capacité portante et le couple d'installation. Proposée initialement par Hoyt et Clemence (1989), cette approche (Eq. (2)) permet

d'estimer la capacité d'un pieu à partir du couple mesuré lors de son installation.

$$P_u = K_t T \quad (2)$$

Avec  $K_t$  le facteur de couple en ( $m^{-1}$ ) et  $T$  le couple d'installation en ( $kN \cdot m$ ). Le facteur  $K_t$  peut se calculer de différentes façons. L'avantage de cette méthode réside dans sa capacité à fournir une estimation de la capacité du pieu. Cependant, elle ne peut être utilisée qu'après l'installation du pieu.

Pendant l'installation, le pieu est enfoncé dans le sol par rotation, et les hélices pénètrent dans le sol.

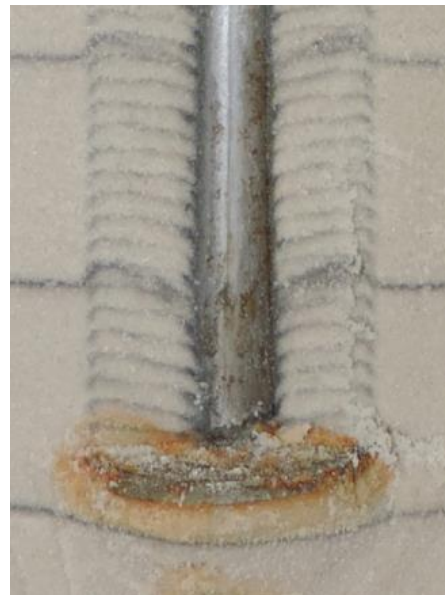


Figure 2 : Photographie des perturbations causées par l'installation d'un pieu hélicoïdal dans du sable (Schiavon, 2016).

Ce processus entraîne un cisaillement du sol autour des hélices, provoquant son remaniement et une altération de sa structure initiale. Une fois le pieu complètement enfoncé, une colonne de sol remaniée a été formée le long de son fût. Dans le cas d'un sable dense, ce phénomène tend à le rendre plus lâche. Ce mécanisme a été observé et documenté par Schiavon *et al.* (2016) (Figure 2). Il est généralement recommandé, pour limiter les perturbations dans le sol lors de l'installation, d'installer le pieu avec une vitesse verticale ( $v$ ) et une vitesse de rotation ( $\omega$ ) qui concordent avec le pas de l'hélice du pieu.

Cette installation, générant des modifications de contrainte importantes dans le sol, est à la fois complexe et indispensable pour comprendre le comportement des PH. La présente étude se concentre sur la modélisation numérique de l'installation de PH dans du sable sec, dans le but de reproduire le

Tableau 1 : Propriétés du sable HN38 (Schiavon et al. 2018).

$d_{50}$ (mm)	$C_u$	$d_r$	$e_{min}$	$e_{max}$	$\gamma_d^{(min)}$	$\gamma_d^{(max)}$
0,12	1,97	0,87	0,72	1,17	12	15,36

processus d'installation en centrifugeuse et de comparer les résultats numériques avec les données expérimentales.

Le document est organisé de manière à présenter d'abord la méthode utilisée, puis à discuter des résultats obtenus ainsi que de leur analyse, avant de proposer enfin des conclusions et des perspectives pour les recherches futures.

## 2 METHODES

### 2.1 Essai en centrifugeuse

Des essais en centrifugeuse ont été réalisés. La modélisation physique en centrifugeuse consiste à tester un modèle réduit à l'échelle  $1/N$  soumis à une accélération centrifuge égale à  $N$  fois la gravité terrestre (Schofield, 1980). Cette approche permet de reproduire, au sein du modèle, des niveaux de contraintes dans le sol représentatifs de ceux existant à l'échelle du prototype. L'interprétation des résultats nécessite l'application de lois de similitudes afin de transposer les grandeurs mesurées du modèle vers l'échelle du prototype. Les principales lois d'échelle utilisées dans cette étude sont récapitulées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Lois de similitudes (Garnier 2007)

Mesure	Facteur d'échelle
Gravité	$N$
Distance	$1/N$
Vitesse	$1$
Contrainte	$1$
Force	$1/N^2$

Si les expérimentations de PH en centrifugeuse sur le campus de Nantes de l'université Gustave Eiffel remontent aux travaux de doctorat de Tsuha (2007), on exploite ici les travaux de Schiavon et al. (2018) à la centrifugeuse géotechnique du campus de l'université Gustave Eiffel de Nantes.

Le pieu prototype était un pieu à une seule hélice, comportant une plaque hélicoïdale de 0,33 m de diamètre ( $D$ ), 15 mm d'épaisseur et 97 mm de pas ( $p$ ), ainsi qu'un fût plein circulaire de 0,1 m de diamètre ( $d$ ). L'essai a été réalisé à 10 g. L'hélice était installée à une profondeur ( $z_h$ ) de  $7,4D$ . Le PH a été installé à une vitesse de rotation de 5,3 tr/min respectant un avancement de 1 pas par tour ( $AR = 1$ ) dans du sable

d'Hostun HN38 (Tableau 1). Le sable, sec, a été déposé par pluviométrie dans l'air dans un conteneur de dimension 1200 mm en longueur, 800 mm en largeur et 360 mm en hauteur.

### 2.2 Modélisation numérique

#### 2.2.1 Modèle CEL et conditions aux limites

Le modèle numérique a été développé à l'aide d'Abaqus/Explicit (Simulia, 2024). L'installation a été simulée avec la méthode du couplage Eulérien-Lagrangien (CEL) (Zhang et al., 2025), afin de capturer le comportement du sol soumis à de grandes déformations. Cette approche, qui combine les avantages des formulations eulérienne et lagrangienne, repose sur un schéma d'intégration temporelle explicite. Dans ce cadre, le PH est modélisé comme un corps solide en formulation lagrangienne, dont les nœuds suivent les déplacements du matériau. Le sol, quant à lui, est représenté en formulation eulérienne, dans laquelle le maillage demeure fixe tandis que le matériau peut s'écouler à travers celui-ci.

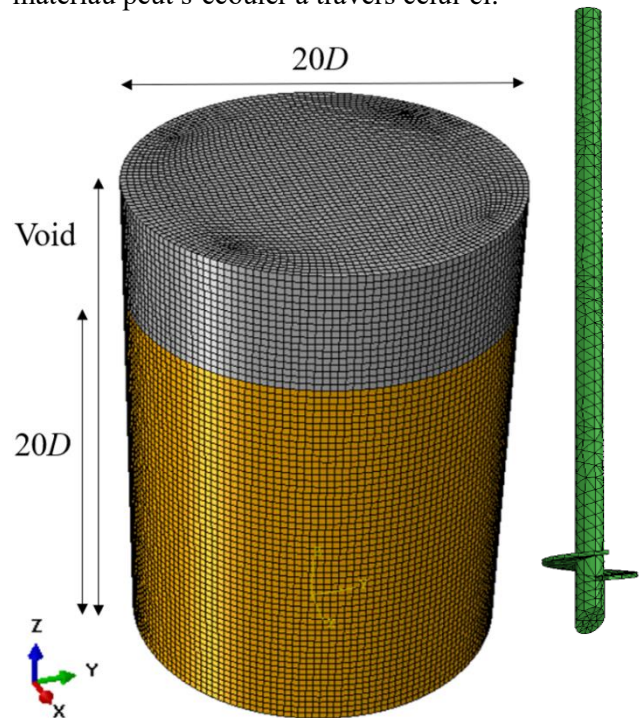


Figure 3 : Modèle aux éléments finis du sol et du pieu

Pour l'analyse de l'installation d'un PH, la méthode CEL s'avère particulièrement pertinente, car elle gère

Tableau 3 : Paramètres du sable utilisés pour la simulation numérique

$G$	$\nu$	$n_h$	$\varphi_{cs}$ (°)	$\psi_a$ (°)	$e$	$e_0$	$\lambda_c$	$\xi_c$
125	0,05	0,4	37,2	17	0,729	0,98	0,05	0,31

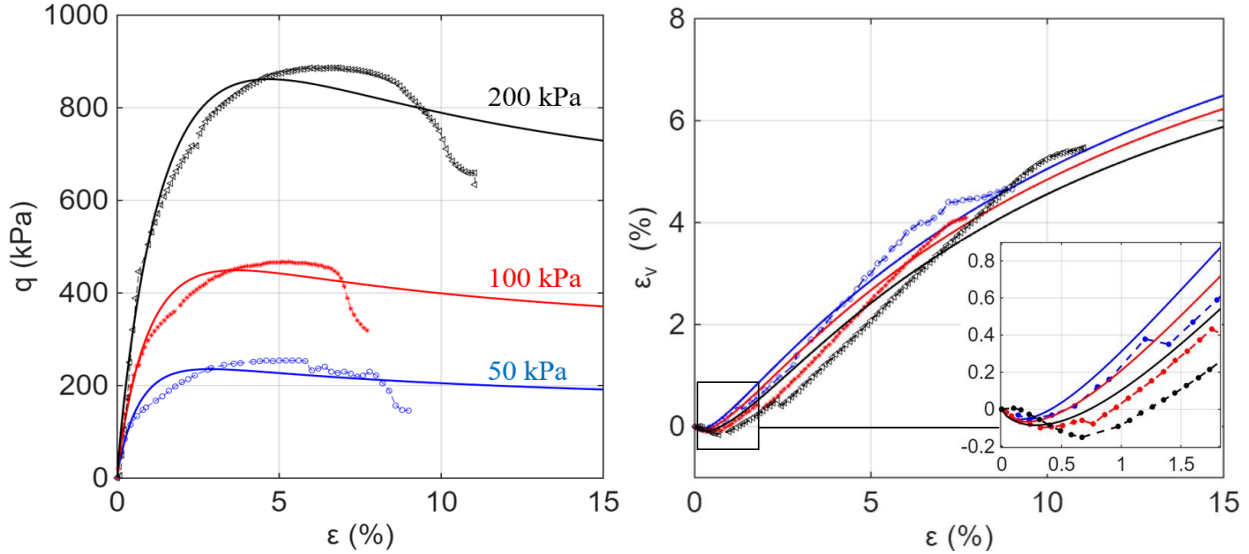


Figure 4 : Contrainte déviatorique vs déformation axiale (à gauche) et déformation volumique vs déformation axiale (à droite et en bas) : expérimentations et modélisation hypoplastic

efficacement les conditions de contact complexes (Qiu *et al.*, 2011) et permet de simuler de manière réaliste les grandes déformations ainsi que les mouvements localisés du sol générés lors de la pénétration du pieu.

Le sol a été modélisé par un cylindre de 6,6 m (20D) de hauteur et de même diamètre. Ce cylindre était enfermé dans un domaine eulérien de 8,6 m de hauteur et de 6,6 m de diamètre. Le PH avait les mêmes dimensions que le pieu de l'essai en centrifugeuse mais la simulation a été réalisée à l'échelle du prototype (Figure 3).

Le domaine du sol a été discrétisé à l'aide d'un maillage tridimensionnel composé d'éléments eulériens de type EC3D8R et d'une taille de 120 mm, résultant en un total de 219744 éléments. Concernant le PH, il a été discrétisé par 4492 éléments tétraédriques de type C3D10, qui est un type d'élément adapté aux géométries complexes, comme celle du PH.

Les conditions aux limites du massif de sol étaient les suivantes : le déplacement vertical était bloqué sur sa partie inférieure, et les déplacements selon les directions  $x$  et  $y$  étaient bloqués sur le côté du massif. Parallèlement, le PH a été contraint en rigidité, de manière à assurer que ses déplacements et rotations reproduisent fidèlement ceux imposés au point de chargement de référence.

## 2.2.2 Loi de comportement du sable et calibration des paramètres

Le pieu a été modélisé comme un corps rigide en acier avec une masse volumique  $\rho_{acier} = 7800 \text{ kg/m}^3$ , un

module d'Young  $E = 200 \text{ GPa}$  et un coefficient de poisson  $\nu = 0,27$ . Le coefficient de frottement entre le pieu et le sol est estimé à 0,5. Un modèle hypoplastique simple « Hypoplastic » basé sur l'état critique a été utilisé pour modéliser le comportement du sable HN38. Ce modèle constitue une extension de la loi de comportement proposée par Li *et al.* (2014), en intégrant de manière rigoureuse l'état critique au moyen d'une nouvelle équation d'état caractérisant la distance entre l'état actuel du sable et la ligne d'état critique dans le plan  $e$ - $\log(p')$ . Ce modèle comporte huit paramètres constitutifs : le module de cisaillement  $G$ , le coefficient de Poisson  $\nu$ , le facteur de non-linéarité  $n_h$ , l'angle de frottement à l'état critique  $\varphi_{cs}$ , l'angle de dilatance initial  $\psi_a$ , ainsi que les trois paramètres associés à l'état critique  $e_0$ ,  $\lambda_c$  et  $\xi_c$ . Les paramètres de cette loi ont été calibrés grâce aux essais triaxiaux réalisés par Schiavon (2016) sur du sable HN38 et les angles de frottement  $\varphi_{cs}$  et de dilatance  $\psi_a$  du sable ainsi que les autres paramètres de l'état critique  $e_0$ ,  $\lambda_c$  et  $\xi_c$  ont été déterminés. L'indice des vides à l'état critique  $e_c$  a été caractérisé grâce à l'équation (3) (Li et Wang, 1998):

$$e_c = e_0 - \lambda_c \left( \frac{p_c}{p_{atm}} \right)^\xi \quad (3)$$

Une sous-routine de matériau définie par l'utilisateur (VUMAT) (car la simulation est explicite) a été implémentée dans le logiciel Abaqus (Simulia 2024), les propriétés du sable utilisé sont résumées dans le

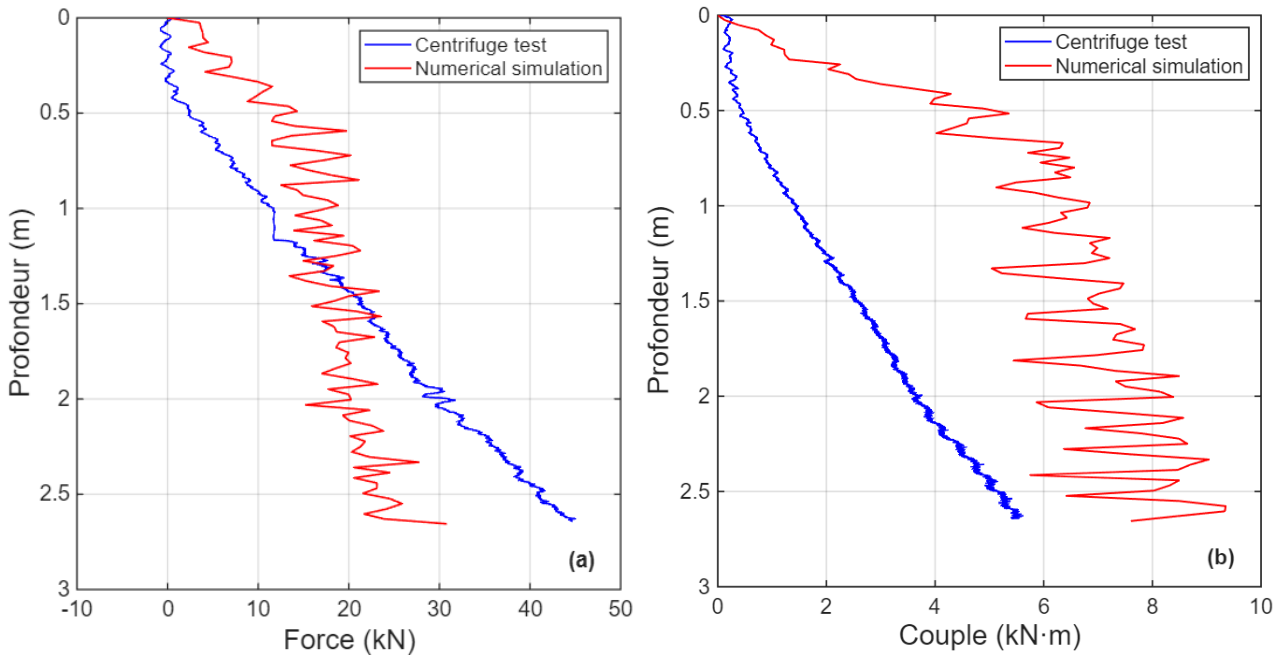


Figure 5 : Force (a) et couple (b) en fonction de la profondeur (m) lors de l'installation d'un essai en centrifugeuse et d'une modélisation numérique

Tableau 3. La reproduction des tendances des essais triaxiaux tant en contrainte qu'en déformation est encourageante (Figure 4).

### 2.2.3 Ajustement

Pour éviter la divergence des calculs de la simulation numérique, des ajustements de la simulation ont dû être faits. Une cohésion artificielle de 5 kPa a été ajoutée, ce qui n'est pas réaliste mais permet de stabiliser et de faciliter la convergence de la simulation.

La simulation initialement lancée nécessitait un temps de calcul de plus d'un mois. Des ajustements ont donc été apportés au modèle afin de réduire cette durée. La première solution consistait à diminuer le temps alloué à la phase d'installation, ce qui a impliqué d'accélérer la vitesse verticale ainsi que la vitesse de rotation du pieu. Cependant, bien que la tendance générale des valeurs de force et de couple ait été correctement reproduite, celles-ci restaient significativement inférieures à celles observées lors des essais en centrifugeuse. Cette divergence est très probablement liée à l'accélération de la vitesse verticale et de rotation du pieu. Pour corriger cet effet, il a été décidé de réduire manuellement le niveau de gravité et d'augmenter la densité des matériaux, afin de maintenir un niveau de contraintes équivalent dans le sol tout en conservant des temps de calcul raisonnables. Cette méthode correspond à la technique de « mass scaling » avec une valeur de 5000.

## 3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La figure 5 présente l'évolution du couple d'installation et de la force axiale en fonction de la profondeur lors de l'installation d'un pieu hélicoïdal, comparant les mesures obtenues en centrifugeuse et celles issues de la modélisation numérique.

Dans l'essai en centrifugeuse, la force axiale atteint une valeur maximale d'environ 45 kN, tandis que le couple maximal mesuré est proche de 5,5 kN·m. Ces maxima sont observés à la profondeur finale. On observe une tendance générale : à mesure que la profondeur augmente, la force d'enfoncement et le couple requis croissent également. Cela s'explique par : 1) l'augmentation de la surface de contact entre le pieu et le sol, qui accroît le frottement latéral, 2) l'accroissement de la contrainte verticale dans le sol avec la profondeur, ce qui renforce sa résistance au cisaillement. Dans la simulation numérique, le couple maximal obtenu est d'environ 8 kN·m, et la force maximale atteint environ 26 kN. Les écarts par rapport aux mesures expérimentales correspondent à des erreurs respectives d'environ 31 % pour le couple et 42 % pour la force, indiquant une surestimation et une sous-estimation notable des efforts d'installation dans le modèle numérique, particulièrement à faible profondeur. Dans l'ensemble, les deux approches montrent des tendances cohérentes : une augmentation progressive des efforts avec la profondeur, traduisant l'accroissement de la résistance du sol et de la mobilisation des hélices au fur et à mesure de la

pénétration. Toutefois, plusieurs écarts notables se dégagent entre les deux résultats. Les courbes expérimentales présentent une croissance quasi linéaire du couple et de la force avec la profondeur. La simulation numérique suit d'abord une évolution similaire, puis montre une réduction nette de la pente, ce qui conduit à une divergence progressive avec l'essai. Le couple est systématiquement surestimé, parfois avec des valeurs proches du double des mesures expérimentales, tandis que la force est d'abord surestimée avant d'être sous-estimée en profondeur, en raison du changement de coefficient directeur de la courbe numérique.

On remarque que la simulation numérique présente un bruit important dans les résultats, qui fluctuent. Cela est dû à la simulation de grandes déformations avec la méthode explicite (Simulia 2024).

#### 4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'installation d'un pieu hélicoïdal à une hélice dans un sable dense et sec est simulée numériquement via l'approche CEL. Le processus d'installation a capturé les principales tendances d'évolution du couple et de la force.

Cependant, la comparaison présente des écarts importants sur le couple et la force. De plus, les résultats contiennent encore un bruit numérique important. Les travaux futurs porteront également sur l'étude de différentes configurations, telles que la géométrie, le niveau de saturation, la densité du sol ainsi que le chargement axial ou latéral après installation.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'entreprise PINTO et l'ANRT pour leur soutien financier ainsi que l'équipe technique du laboratoire GERS-CG de l'université Gustave Eiffel.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 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*. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 7(3), pp.1–23.
- Hoyt, R. M., et S. P. Clemence. 1989. *Uplift capacity of helical anchor in soil*.
- Li, X. S., et Y. Wang. 1998. « Linear Representation of Steady-State Line for Sand ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124 (12): 1215-17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:12\(1215\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:12(1215))
- Li, Z., P. Kotronis, et S. Escoffier. 2014. « Numerical Study of the 3D Failure Envelope of a Single Pile in Sand ». *Computers and Geotechnics* 62: 11-26. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.06.004>
- Nicolas, Cabassud, et Bourru Louis. 2020. *RÉGLEMENTATION ENVIRONNEMENTALE DES BÂTIMENTS NEUFS (RE 2020)*.
- Perko, H. A. 2009. *Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation*. 1<sup>re</sup> éd. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470549063>
- Qiu, G., S. Henke, et J. Grabe. 2011. « Application of a Coupled Eulerian–Lagrangian Approach on Geomechanical Problems Involving Large Deformations ». *Computers and Geotechnics* 38 (1): 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.09.002>
- Schiavon, J. A. 2016. « Behaviour of Helical Anchors Subjected to Cyclic Loadings ». Doutorado em Geotecnia, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.18.2017.tde-10072017-090437>
- Schiavon, J., C. Tsuha, et L. Thorel. 2016. « Scale Effect in Centrifuge Tests of Helical Anchors in Sand ». *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 16 (4): 185-96. <https://doi.org/10.1680/jphmg.15.00047>.
- Schofield, A. N. 1980. « Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations ». *Géotechnique* 30 (3): 227-68. <https://doi.org/10.1680/geot.1980.30.3.227>
- Simulia. 2024. « Abaqus Finite Element Analysis | SIMULIA - Dassault Systèmes ». <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus>
- Tsuha, Cristina De Hollanda Cavalcanti. 2007. « Modelo teórico para controle da capacidade de carga à tração de estacas metálicas helicoidais em solo arenoso ». Doutorado em Geotecnia, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.18.2007.tde-06052008-151518>
- Zhang, L., H. Zhou, J. Wang, et C. Jiang. 2025. « Numerical Investigation of Advancement Ratio and Helix Plate Number on Stress Response and Soil Disturbance during Helical Pile Installation in Sand ». *Computers and Geotechnics* 189: 107676. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107676>