



HAL
open science

Optimisation du dimensionnement de pieux hélicoïdaux pour fondations en milieu maritime

Jeanne Jacintha Naby, Jérôme Quirant, Julien Averseng

► To cite this version:

Jeanne Jacintha Naby, Jérôme Quirant, Julien Averseng. Optimisation du dimensionnement de pieux hélicoïdaux pour fondations en milieu maritime. Congrès Français du Génie Civil CFGC 2023, May 2023, Gif sur Yvette, France. hal-04805272

HAL Id: hal-04805272

<https://hal.science/hal-04805272v1>

Submitted on 26 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Optimisation du dimensionnement de pieux hélicoïdaux pour fondations en milieu maritime

Jacintha NABY ¹, Jérôme QUIRANT ², Julien AVERSENG ³

¹LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

²LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

³LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

RESUME

Le pieu hélicoïdal est un type de fondation légère qui mérite d'être étudié dans le cas d'ouvrages côtiers. Il se compose d'un fût muni d'une ou plusieurs hélices permettant de le « visser » dans le sol. En plus de sa bonne résistance structurelle aux forces de traction, compression et latérales, il est aussi facile et rapide à installer, ce qui le rend peu coûteux et respectueux de l'environnement. Comme tout autre structure de génie civil, le dimensionnement des pieux hélicoïdaux présente aussi une grande importance afin d'optimiser sa portance. La résistance des pieux hélicoïdaux varie en fonction du nombre d'hélices, de l'espacement entre hélices, de leur diamètre, de leur position ainsi que des caractéristiques du sol, notamment l'angle de frottement. Les études expérimentales faites dans la littérature jusqu'à présent sont toutes dans du sable sec. Or, la présence de l'eau et de l'air dans un sable modifie la cohésion des grains qui impactent à son tour la portance du sol. C'est la raison pour laquelle nous présentons une étude sur la portance en compression et en traction, à échelle réduite, en utilisant des pieux hélicoïdaux imprimés en 3D enfoncés dans un lit de billes de verre sec et totalement saturé. Le but est de faire varier les géométries des pieux hélicoïdaux, afin d'en tirer de nouvelles relations qui permettront l'optimisation lors de la conception, et aussi de pouvoir caractériser l'effet de l'eau dans l'interaction sol-structures.

Mots-clés : Pieu hélicoïdal, compression, traction, saturation, interaction sol-structure

I. INTRODUCTION

De nos jours, l'accès en toute autonomie dans la mer reste encore un problème en France (1). Un système de mise à l'eau fixe, ludique et thérapeutique, situé à Hyères, développé par l'association « un fauteuil à la mer » (2), solutionne ce problème. Mais, il n'est pas applicable partout vu sa non-conformité à la loi du littoral. Cette loi du 03 janvier 1986 précise que tout aménagement à la plage doit être démontable, transportable et à faible impact environnemental (2,3). C'est dans ce cadre que le projet POZEIA a vu le jour. Ce projet a pour objectif le développement d'un ponton d'accès en mer pour tous (Figure 1) à base de structures de tensegrité, léger, pliable/dépliable et modulaire. La partie superstructure de ce projet est déjà conçue, réalisée et validée sur le terrain par Issam HRAZMI et al. (2). Concernant la partie infrastructure, une solution basée sur des pieux hélicoïdaux est envisagée.

Les pieux hélicoïdaux, utilisés généralement dans des ouvrages maritimes, sont un type de fondation économique (4–8), réutilisable et respectueux de l’environnement (9,10). Ils résistent bien à la compression, traction et aux charges latérales (4). Le nombre d’hélices, leur position et leur pas (Figure 2), sont des paramètres qui pourront modifier leur capacité portante. Ali AhmedS et al. (5) et Al-Baghdadi T. (11) affirment aussi que la portance en compression augmente en fonction du diamètre et de la position des hélices. Abd el-Rahim HHA et al. (6) confirment dans leur étude que le diamètre et la profondeur d’encastrement des hélices aident les pieux à supporter les charges de compression et limitent le soulèvement. Salem et al. (10) indiquent aussi dans leur étude que la résistance au soulèvement varie en fonction du nombre d’hélices et de la profondeur d’encastrement. De plus, Wang D. et al. (7) expliquent que la capacité latérale ultime augmente avec l’augmentation du diamètre de l’hélice et diminue avec l’augmentation du pas de l’hélice. Abdrabbo FM et al. (12) indiquent aussi dans leur article que la portance des pieux hélicoïdaux dépend des propriétés du sol, de la profondeur d’encastrement et du nombre d’hélices.

Les études citées ci-dessus concernent toutes des sols secs. Or, il est connu, comme mentionné par Etienne Guyon et al. (13), que la présence de l’eau et de l’air entre les grains crée des forces capillaires. Ces forces de cohésion varient en fonction de la teneur en eau jusqu’à s’annihiler à la saturation. L’eau modifie ainsi les propriétés mécaniques du sol.

Ainsi, dans cette présente étude, nous allons nous focaliser sur deux paramètres et leur impact sur la portance : la géométrie du pieu hélicoïdal lui-même (nombre d’hélices, dimensions, etc.) et la présence d’eau dans le sol.



FIGURE 1. Ponton d’accès en mer pour tous (1)



FIGURE 2. Pieux hélicoïdaux

II. EXPERIMENTATIONS

Cette étude expérimentale consiste en une série d’essais menés à l’aide d’une machine universelle sur des pieux hélicoïdaux, imprimés en 3D à échelle réduite, enfoncés dans un conteneur rempli de billes de verre sèches et saturées. L’objectif est d’améliorer les modèles prédictifs de calcul de la capacité en compression et en traction de ces pieux hélicoïdaux ainsi que de caractériser l’impact de l’eau dans l’interaction sol-structure.

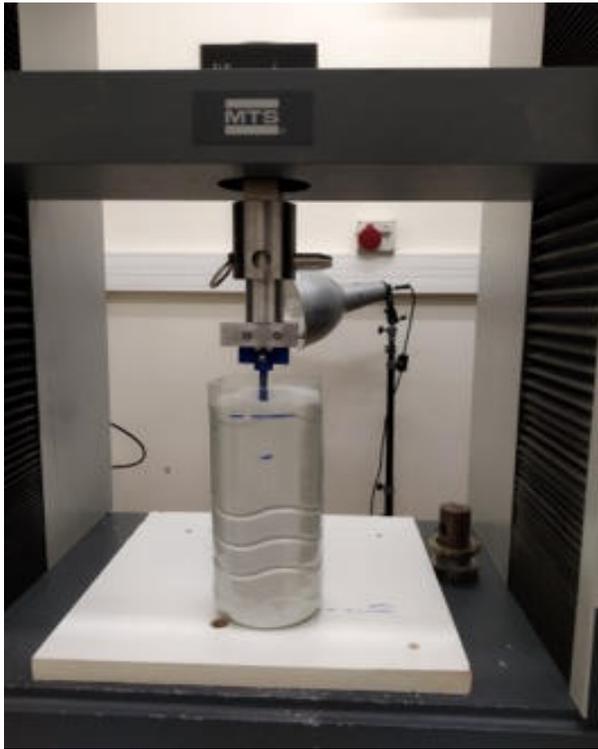


FIGURE 3. Pieux hélicoïdaux soumis en traction enfoncés dans de billes de verre sèches

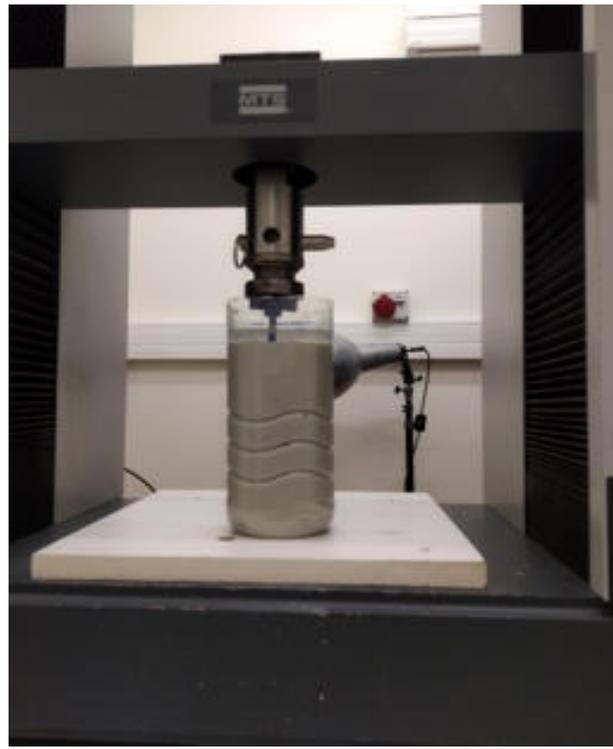


FIGURE 4. Pieux hélicoïdaux soumis en compression enfoncés dans de billes de verre saturées en eau

A. Matériaux et matériels utilisés

1. Billes de verre

Selon Garnier et al. (14), le rapport entre le diamètre du fût et le diamètre moyen des grains doit être supérieure à 35 afin de respecter l'interaction sol-structure et les règles de similitude. Dans notre cas, nous utilisons des billes de verre dont la plage granulométrique s'étend de 70 à 110 μm comme sol-modèle, ce qui donne un rapport d'échelle de 72, largement suffisant par rapport à la condition minimale.

Les propriétés physiques de ce mélange (Tableau 1) se rapprochent assez bien de celles d'un sable réel issu de la plage de Carnon (France) qui a été également caractérisé : masse volumique 2604 kg/m^3 , masse volumique apparente 1429 kg/m^3 et porosité 51%.

TABLEAU 1. Caractéristiques du mélange de billes de verre utilisé

	Valeurs
Masse volumique [kg/m^3]	2449
Masse volumique apparente [kg/m^3]	1432
Porosité [%]	46
Angle de frottement [$^\circ$]	21

2. Pieux hélicoïdaux

Les pieux hélicoïdaux testés sont construits à échelle 1/8. Leurs géométries sont variables et sont définies par le rapport du diamètre D des hélices sur celui du fût, les espacements S entre hélices, les positions H_b des hélices les plus basses ainsi que leur nombre n (Tableau 2).

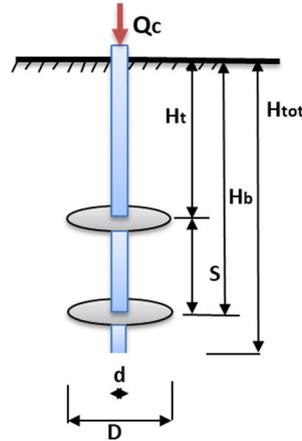


FIGURE 5. Paramètres géométriques des pieux hélicoïdaux testés

TABLEAU 2. Géométries des pieux hélicoïdaux testés

	N° model	Model	Htot [mm]	Ht [mm]	Hb [mm]	d [mm]	D [mm]	S [mm]	n [-]
Variation de D	1	D/d=1,50	125	83,25	112,5	6,5	9,75	29,25	2
	2	D/d=2,00	125	83,25	112,5	6,5	13,01	29,25	2
	3	D/d=2,75	125	83,25	112,5	6,5	17,89	29,25	2
	4	D/d=4,00	125	83,25	112,5	6,5	26,03	29,25	2
Variation de S	5	S/D=0,50	125	103,55	112,5	6,5	17,89	8,95	2
	6	S/D=2,00	125	76,72	112,5	6,5	17,89	35,78	2
	7	S/D=2,25	125	72,24	112,5	6,5	17,89	40,26	2
	8	S/D=4,75	125	27,52	112,5	6,5	17,89	84,98	2
Variation de Hb	9	Hb/Htot=0,10	125	-		6,5	17,89	-	1
	10	Hb/Htot=0,50	125	-		6,5	17,89	-	1
	11	Hb/Htot=0,90	125	-		6,5	17,89	-	1
	12	Hb/Htot=1,00	125	-		6,5	17,89	-	1
Variation de n	13	n=1	125	-		6,5	17,89	-	1
	14	n=2	125	72,24		6,5	17,89	40,26	2
	15	n=3	125	72,24 31,98		6,5	17,89	40,26	3

3. Conteneur

Hamed M. et al. (15) ainsi que Abbas HO et al. (16) expliquent que la contrainte de rupture dans le sol s'étend sur le plan sur une largeur d'au moins $2,5D$ et sous la pointe du pieu de $2D$ jusqu'à $4D$. Le bac utilisé, de dimension $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ (hauteur), respecte ainsi les conditions permettant de limiter les effets de bord.

4. Banc d'essai :

Une machine universelle MTS avec un capteur de force de capacité 500 N est utilisée pour la mise en charge en compression et traction.

B. Protocole d'essai

Les essais de compression et traction sont d'abord faits dans des billes de verre sèches puis dans des billes de verre saturées. Les procédures d'expérimentation sont les suivantes :

1. Dans le cas des essais saturés, verser d'abord l'eau en quantité suffisante pour la saturation dans le conteneur : le volume d'eau nécessaire est calculé en fonction de la porosité et du volume de billes de verre dans le conteneur. On considère que les billes de verre sont totalement saturées quand la hauteur de l'eau dépasse celle des billes de verre ;
2. Disposer les billes de verre couche par couche dans le conteneur à l'aide d'un entonnoir dans le but d'uniformiser leur mise en place jusqu'à atteindre la hauteur nécessaire ;
3. Laisser les billes de verre se tasser pendant 20 minutes afin que les particules profitent de l'effet de gravité (17) ;
4. Installer les pieux hélicoïdaux par rotation manuelle jusqu'à la profondeur d'encastrement souhaitée ;
5. Essai par application de la charge de compression/traction à une vitesse de 0,5 mm/min (18) jusqu'à l'atteinte d'un déplacement de 5 mm.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, nous allons montrer les résultats des essais de compression et traction dans les cas secs et saturés. Pour l'analyse, nous avons opté pour une limite de sollicitation définie en déplacement à 1,2 mm, soit 1% de la hauteur du pieu hélicoïdal.

A. Essais en compression

1. Résultats

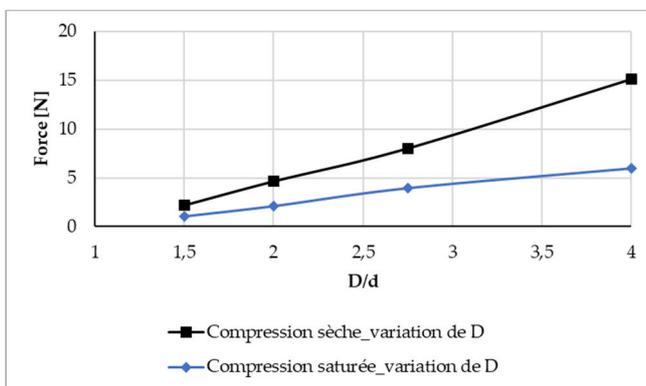


FIGURE 6. Compression sèche et saturée avec la variation du diamètre d'hélice D

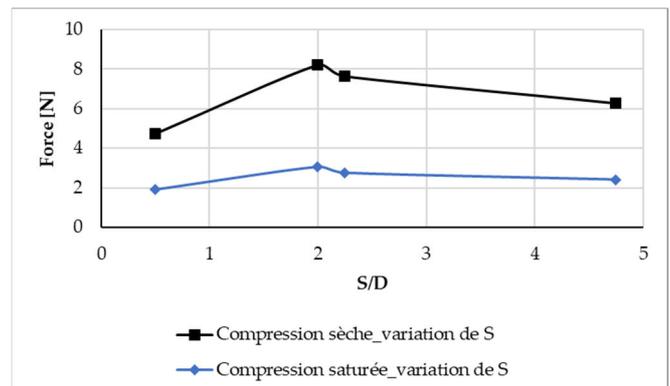


FIGURE 7. Compression sèche et saturée avec la variation de l'espacement d'hélices S

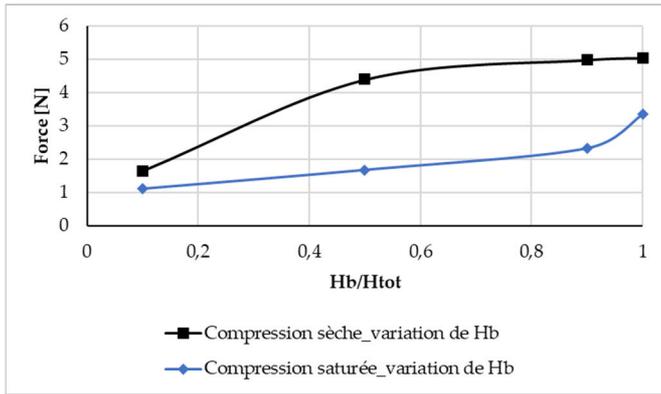


FIGURE 8. Compression sèche et saturée avec la variation de la position d’hélice H_b

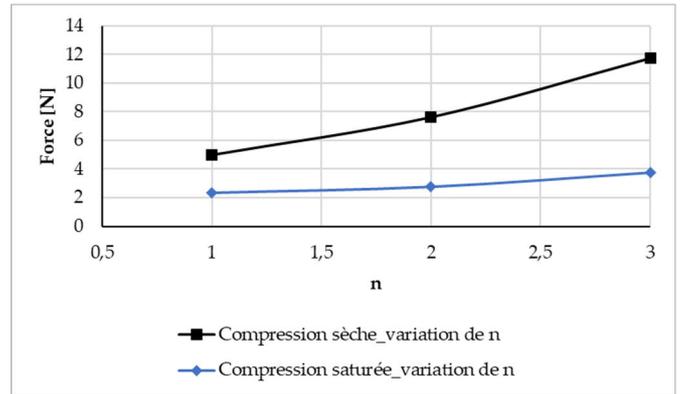


FIGURE 9. Compression sèche et saturée avec la variation du nombre d’hélice n

2. Discussion

L’allure des courbes des essais de compression obtenues est généralement identique dans les cas secs et saturés :

- la portance en compression augmente en fonction du diamètre de l’hélice D ;
- la force de compression atteint sa valeur maximale dans le cas de $S/D= 2$;
- la figure 8 montre que le pieu hélicoïdal est plus performant quand l’hélice inférieure est plus profonde ;
- la figure 9 présente la croissance de la force de compression avec le nombre d’hélices.

B. Essais en traction

1. Résultats

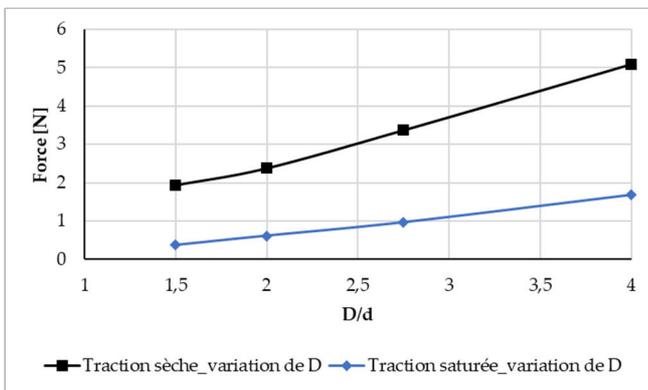


FIGURE 10. Traction sèche et saturée avec la variation du diamètre d’hélice D

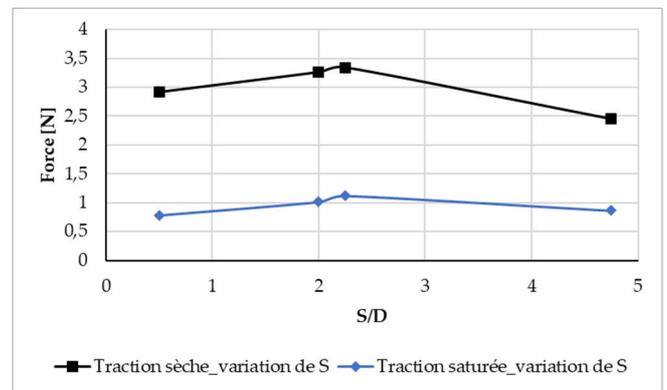


FIGURE 11. Traction sèche et saturée avec la variation de l’espace d’hélices S

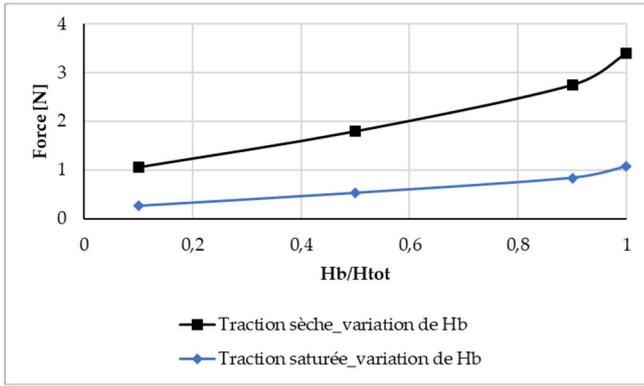


FIGURE 12. Traction sèche et saturée avec la variation de la position d’hélice Hb

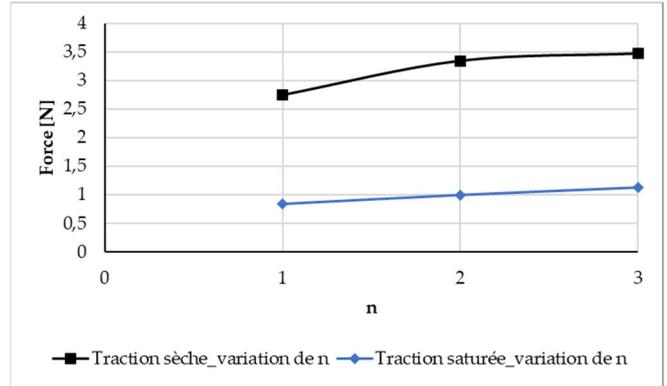


FIGURE 13. Traction sèche et saturée avec la variation du nombre d’hélice n

2. Discussion

Comme dans la partie précédente, les courbes des essais en traction sèche et saturée montrent les mêmes tendances :

- la figure 10 illustre que la portance en traction augmente avec le diamètre de l’hélice. Cela est dû à l’augmentation de la surface de contact d’hélice-sol ;
- l’espacement optimal des hélices semblent obtenus pour un rapport S/D de l’ordre de 2 à 2,25 ;
- la figure 12 présente l’élévation de la portance avec la profondeur de l’hélice inférieure ;
- la portance en traction croît légèrement avec le nombre d’hélices mais semble atteindre un plateau à partir de n=3.

IV. MODELES DE COMPORTEMENT

Les modes de rupture peuvent être modélisés pour les pieux hélicoïdaux en compression. Ils se comportent de deux façons distinctes selon la valeur du rapport d’espacement des hélices S et du diamètre moyen des hélices D (10,19,20).

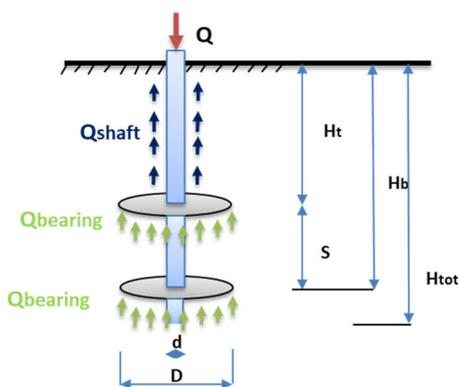


FIGURE 14. Modèle de travail individuel (IBM)

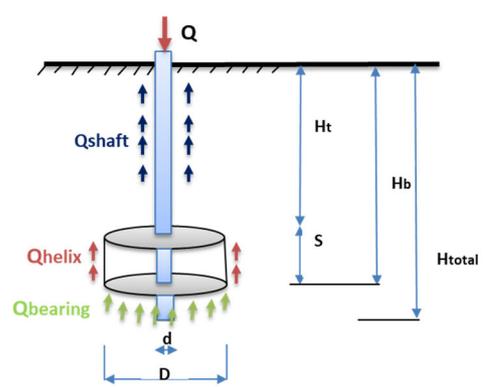


FIGURE 15. Modèle de cisaillement cylindrique (CSM)

- Pour $S/D > 2,25$ (Figure 14) : il s'agit d'un modèle de travail individuel (IBM) où les hélices se comportent de manière indépendante ; dans ce cas, la force de frottement du fût Q_{shaft} ainsi que les résistances de portance des hélices $Q_{bearing}$ s'associent pour obtenir la portance totale Q du pieu hélicoïdal :

$$Q = Q_{shaft} + Q_{bearing} \quad (1)$$

Avec :

$$\begin{cases} Q_{shaft} = 0,5\pi d H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan\varphi \\ Q_{bearing} = \gamma' H A_{helix} N_q \end{cases} \quad (2)$$

Où :

H_{eff} : Longueur efficace du pieu au-dessus de l'hélice supérieure [m] ;

γ' : Poids volumique effectif du sol [kN/m³]

K_s : Coefficient de pression latérale des terres en compression [-]

φ : Angle de frottement interne [°]

H : Profondeur d'encastrement de l'hélice [m]

A_{helix} : Aire de l'hélice [m²]

N_q : Facteur de capacité portante pour le sol sans cohésion [-]

- Pour $S/D < 2,25$ (Figure 15) : il s'agit de la méthode de cisaillement cylindrique (CSM) pour laquelle on considère que les hélices travaillent ensemble ; dans ce cas, la portance du pieu hélicoïdal est la somme des forces de frottement engendrées par le fût Q_{shaft} , par le sol piégé entre les hélices Q_{helix} , ainsi que la portance de l'hélice inférieure $Q_{bearing}$:

$$Q = Q_{shaft} + Q_{bearing} + Q_{helix} \quad (3)$$

Avec :

$$\begin{cases} Q_{shaft} = 0,5\pi d H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan\varphi \\ Q_{bearing} = \gamma' H A_{helix} N_q \\ Q_{helix} = 0,5\pi D \gamma' [H_b^2 - H_t^2] K_s \tan\varphi \end{cases} \quad (4)$$

Les formules (3) et (4) nous montrent la dépendance de plusieurs paramètres de calcul à l'angle de frottement qui varie en fonction de la quantité d'eau dans le sol. Cette dépendance se traduit par une chute de la résistance avec la réduction de l'angle de frottement.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats d'essais obtenus montrent que les pieux hélicoïdaux présentent des résistances supérieures en compression qu'en traction, confirmant les résultats de Sakr (21). De plus, dans les essais de compression et de traction, la performance des pieux hélicoïdaux dans le cas sec est supérieure par rapport au cas saturé, de l'ordre de 33 à 68% de différence pour la compression et de 65 à 81% pour la traction. Cette perte provient de la diminution de la résistance par frottement (formules (3) et (4)) à cause de la présence de pressions interstitielles sur le plan de rupture comme l'interprète Recordon (22) dans son étude.

La suite des travaux va consister à vérifier l'adéquation entre les essais et les modèles en calant les différents paramètres.

REFERENCES

1. Hrazmi I. Solution structurelles d'accès d'accès facilité à la mer. Université de Montpellier; 2021.
2. Hrazmi I, Averseng J, Quirant J, Jamin F. Deployable double layer tensegrity grid platforms for sea accessibility. *Engineering Structures*. 15 mars 2021;231:111706.
3. Jamin F, Averseng J, Quirant J, Vigan-amouri S. La mer accessible à tous: les systèmes de tensegrité déployables au service de l'autonomie. :7.
4. Mohajerani A, Bosnjak D, Bromwich D. Analysis and design methods of screw piles: A review. *Soils and Foundations*. 1 févr 2016;56(1):115-28.
5. Ali AhmedS, Salim NahlaM, Baqir HusamH. Numerical Modelling of Axially Loaded Helical Piles: Compressive Resistance. Karkush M, Choudhury D, Fattah M, éditeurs. *E3S Web Conf*. 2021;318:01018.
6. Abd el-Rahim HHA, Taha YK, Mohamed WE din E sharif. THE COMPRESSION AND UPLIFT BEARING CAPACITIES OF HELICAL PILES IN COHESIONLESS SOIL. *JES Journal of Engineering Sciences*. 1 nov 2013;41(6):2055-64.
7. Wang D, Merifield R s., Gaudin C. Uplift behaviour of helical anchors in clay. *Canadian Geotechnical Journal*. juin 2013;50(6):575-84.
8. Aydin M, Bradka TD, Kort DA. Osterberg Cell Load Testing on Helical Piles. 26 avr 2012;66-74.
9. Lateral Performance of Helical Pile in Cohesionless Soil [Internet]. *springerprofessional.de*. [cité 11 janv 2022]. Disponible sur: <https://www.springerprofessional.de/en/lateral-performance-of-helical-pile-in-cohesionless-soil/19012158>
10. Salem T, Hussein M. AXIAL TENSILE CAPACITY OF HELICAL PILES FROM FIELD TESTS AND NUMERICAL STUDY. *Port-Said Engineering Research Journal*. 1 sept 2017;21(2):111-9.

11. Al-Baghdadi T, Brown M, Knappett J, Ishikura R. Modelling of laterally loaded screw piles with large helical plates in sand. In: Meyer V, éditeur. *Frontiers in Offshore Geotechnics III* [Internet]. CRC Press; 2015 [cité 7 janv 2022]. p. 503-8. Disponible sur: <http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/b18442-62>
12. Abdrabbo FM, El Wakil AZ. Laterally loaded helical piles in sand. *Alexandria Engineering Journal*. déc 2016;55(4):3239-45.
13. Guyon E, Delenne JY, Radjai F. *Matière en grains*. Odile Jacob. 2017. 331 p.
14. Garnier J, Gaudin C, Springman SM, Culligan PJ, Goodings D, König D, et al. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*. sept 2007;7(3):01-23.
15. Hamed M, Canakci H, Khaleel O. Performance of Multi-Helix Pile Embedded in Organic Soil Under Pull-out Load. *Transp Infrastruct Geotech*. mars 2019;6(1):56-66.
16. Abbas HO, Ali OK. Parameters Affecting Screw Pile Capacity Embedded in Soft Clay Overlaying Dense Sandy Soil. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*. 1 mars 2020;745(1):012117.
17. Chen Y, Deng A, Wang A, Sun H. Performance of screw–shaft pile in sand: Model test and DEM simulation. *Computers and Geotechnics*. 1 déc 2018;104:118-30.
18. Joshi RC, Achari G, Kaniraj SR. Effect of loading history on the compression and uplift capacity of driven model piles in sand. *Can Geotech J*. 1 avr 1992;29(2):334-41.
19. Knappett J, Brown M, Brennan A, Hamilton L. OPTIMISING THE COMPRESSIVE BEHAVIOR OF SCREW PILES IN SAND FOR MARINE RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS. 2014.
20. Nasr M. Performance-Based Design for Helical Piles. In: *Contemporary Topics in Deep Foundations* [Internet]. Orlando, Florida, United States: American Society of Civil Engineers; 2009 [cité 21 janv 2022]. p. 496-503. Disponible sur: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41021%28335%2962>
21. Sakr M. Installation and performance characteristics of high capacity helical piles in cohesionless soils. *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*. 2011;39-57.
22. Recordon Ed. Influence de l'eau dans les problèmes de stabilité. *Bulletin technique de la Suisse romande*. 1974;