

## MODELISATION PHYSIQUE DE PIEUX HELICOÏDAUX DANS DU SABLE

### PHYSICAL MODELLING OF HELICAL PILE ANCHORS IN SAND

Cristina H.C. TSUHA<sup>1</sup>, Nelson AOKI<sup>1</sup>, Gérard RAULT<sup>2</sup>, Luc THOREL<sup>2</sup>, Jacques GARNIER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Geotechnics, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, Brésil, [cristhc@terra.com.br](mailto:cristhc@terra.com.br), [nelson.aoki@uol.com.br](mailto:nelson.aoki@uol.com.br)

<sup>2</sup> Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, [Gerard.Rault@lcpc.fr](mailto:Gerard.Rault@lcpc.fr), [Luc.Thorel@lcpc.fr](mailto:Luc.Thorel@lcpc.fr), [Jacques.Garnier@lcpc.fr](mailto:Jacques.Garnier@lcpc.fr)

**RÉSUMÉ** – Une relation théorique entre la charge d'arrachement et le couple nécessaire à la mise en place de pieux hélicoïdaux dans un massif de sable est vérifiée expérimentalement en centrifugeuse. Des pieux modèles avec plusieurs configurations d'hélices (nombre et diamètre) ont été installés puis arrachés dans des massifs de sable reconstitués.

**ABSTRACT** – A theoretical relationship between the uplift capacity and the installation torque of helical piles anchors in sand was verified using centrifuge modelling. Model piles with different dimensions (number of helices and diameter) were tested (pile installation and pull-out tests) in reconstituted sand samples.

#### 1. Introduction

Les pieux hélicoïdaux sont utilisés comme fondations pour les tours et les pylônes autoportants ou haubanés. Ils sont constitués d'une tige métallique de section circulaire avec hélice soudée (une ou plusieurs). Le diamètre des hélices est choisi en considérant la capacité portante du sol et la charge de l'ouvrage à supporter. Ce type de pieu est installé par rotation dans le sol (vissage) à l'aide de moteurs hydrauliques montés sur un équipement léger. Des corrélations empiriques entre le couple appliqué pendant l'installation et la capacité portante du pieu sont habituellement utilisées pour contrôler sa mise en place. Il est enfoncé jusqu'à ce que la valeur du couple appliqué ait atteint un seuil particulier. Différentes relations théoriques entre la charge d'arrachement et le couple nécessaire pour le fonçage des pieux vissés ont été rapportés dans la littérature géotechnique (Narasimha Rao et al., 1989; Ghaly et al., 1991; Ghaly et Hanna, 1991; Perko, 2000).

Tsuha (2007) a proposé une méthode théorique simplifiée pour estimer la charge d'arrachement des pieux hélicoïdaux dans du sable à partir du couple mesuré à la fin de l'installation. Une approche expérimentale basée sur la modélisation physique en centrifugeuse au LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) à Nantes, a apporté un ensemble de résultats qui permettent de valider cette relation. Les modèles réduits de pieux hélicoïdaux ont été installés dans les massifs de sable reconstitués de deux différentes densités. Les essais de chargement ont été opérés dès la fin de la mise en place des pieux.

## 2. Relation théorique

La vérification de la relation proposée par Tsuha (2007) entre le couple et la charge d'arrachement correspondant aux hélices des pieux hélicoïdaux dans un massif de sable, s'appuie sur la géométrie de la Figure 1 qui montre la distribution du couple d'installation et de la charge d'arrachement du pieu hélicoïdal avec 3 hélices.

La charge d'arrachement  $Q_u$  (Figure 1) est définie par :

$$Q_u = Q_h + Q_s \quad (1)$$

où :  $Q_u$  = la charge d'arrachement

$Q_h$  = la charge d'arrachement relative aux hélices

$Q_s$  = la résistance par frottement latéral sur la tige du pieu

La charge d'arrachement relative aux hélices  $Q_h$  est décrite par:

$$Q_h = \sum_{i=1}^N Q_{hi} \quad (2)$$

où :  $Q_{hi}$  = la charge d'arrachement relative à l'hélice  $i$ , indice variant de 1 à  $N$

$N$  = le nombre d'hélices

Le couple nécessaire à l'installation des pieux hélicoïdaux  $T$  est donné par :

$$T = T_h + T_s \quad (3)$$

où :  $T$  = le couple d'installation

$T_h$  = le couple d'installation repris par les hélices

$T_s$  = le couple d'installation repris par frottement latéral

La part du couple d'installation reprise par les hélices  $T_h$  est définie par :

$$T_h = \sum_{i=1}^N T_{hi} \quad (4)$$

où :  $T_{hi}$  = la portion du couple d'installation reprise par l'hélice  $i$

La relation proposée entre la charge d'arrachement relative aux hélices  $Q_h$  et le couple d'installation repris par les hélices  $T_h$  à la fin de la mise en place des pieux vissés dans un massif de sable, est donnée par l'équation :

$$Q_h = \frac{2T_h}{d_c \cdot tg(\theta + \delta_r)} \quad (5)$$

où :  $d_c$  = diamètre du cercle correspondant à la surface de l'hélice où les forces sont concentrées pendant l'installation du pieu (Equation 6 et Figure 2)

$\theta$  = l'angle de l'hélice formé avec l'horizontale au diamètre  $d_c$  (Equation 7 et Figure 2)

$\delta_r$  = l'angle de frottement résiduel à l'interface entre l'hélice et le sable

$$d_c = \frac{2}{3} \left[ \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \right] \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{p}{\pi d_c} \right) \quad (7)$$

où : D = diamètre de l'hélice  
 d = diamètre de la tige  
 p = pas de l'hélice au diamètre  $d_c$

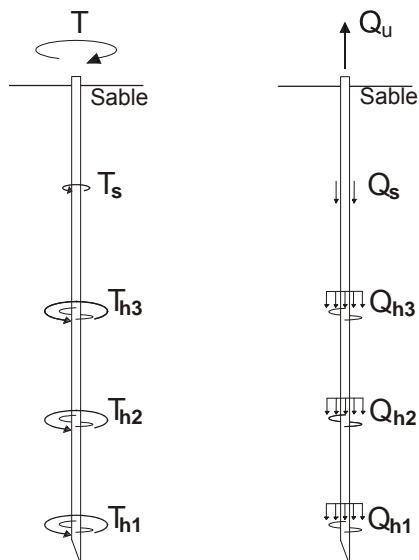


Figure 1. Distribution du couple d'installation et de la charge d'arrachement du pieu

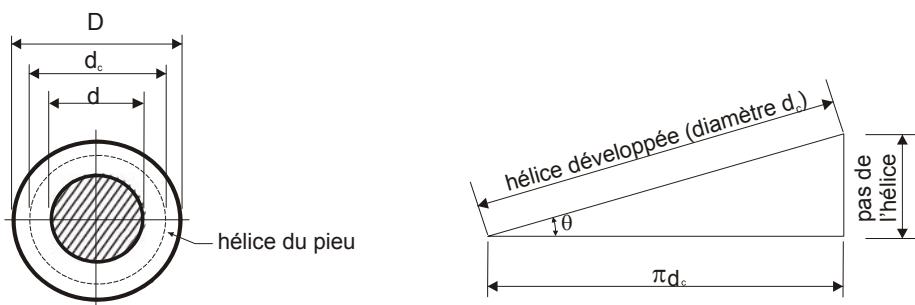


Figure 2. Hélice du pieu hélicoïdal

### 3. Validation expérimentale au moyen d'un modèle centrifugé

#### 3.1. Dispositif expérimental

##### 3.1.1. Modélisation physique en centrifugeuse

La modélisation physique en centrifugeuse est une alternative expérimentale qui permet la réalisation d'essais sur différents modèles de pieux hélicoïdaux dans le même massif (dont les propriétés sont connues). Ces essais ont pour justification première de permettre de recréer au sein du corps d'épreuve, qui sera, si possible,

construit à chaque fois à partir des mêmes matériaux que le prototype, le même champ de forces de masse que dans l'ouvrage vraie grandeur (Corté, 1989).

Les essais ont été réalisés sur la centrifugeuse du LCPC (Garnier et al.1999).

### 3.1.2. Pieux modèles

Trois types de modèles réduits de pieux ont été réalisés avec ou sans hélices (Figure 3) de telle façon à estimer la part du couple et de la charge reprise par les hélices seules. Les modèles de pieux hélicoïdaux sont composés d'une ou plusieurs hélices soudées sur une même tige à intervalle de trois fois le diamètre de l'hélice. Quels que soient le nombre et le type d'hélice, tous les pieux modèles ont une longueur 355 mm. Ainsi douze modèles différents de pieux sont disponibles (Tableau I et Figure 4). Compte tenu des fiches différentes selon le modèle de pieu, les échelles de réduction correspondantes pour les 3 types de modèles sont 1/21,44 ; 1/21,71 et 1/22.



Figure 3. Modèles de pieux avec et sans hélices

Tableau I. Dimensions des pieux modèles (M) et prototype (P)

Modèle de pieu	Nombre d'hélices	Diamètre tige $d_M (d_P)$ (mm)	Diamètre hélice $D_M (D_P)$ (mm)	Pas de l'hélice $p_M (p_P)$ (mm)	Distance entre la première hélice et la pointe $h_{bM} (h_{bP})$ $h_b$ (mm)	Fiche prototype (m)
1	1	3,0 (64,3)	10 (214)	3,0 (64,3)	10 (214)	3,1
2	2	3,0 (64,3)	10 (214)	3,0 (64,3)	10 (214)	3,1
3	3	3,0 (64,3)	10 (214)	3,0 (64,3)	10 (214)	3,1
4	1	4,5 (97,7)	15 (326)	3,2 (69,5)	10 (217)	4,6
5	2	4,5 (97,7)	15 (326)	3,2 (69,5)	10 (217)	4,6
6	3	4,5 (97,7)	15 (326)	3,2 (69,5)	10 (217)	4,6
7	1	6,0 (132)	20 (440)	3,5 (77)	10 (220)	6,2
8	2	6,0 (132)	20 (440)	3,5 (77)	10 (220)	6,2
9	3	6,0 (132)	20 (440)	3,5 (77)	10 (220)	6,2
10	-	3,0 (64,3)	-	-	-	3,1
11	-	4,5 (97,7)	-	-	-	4,6
12	-	6,0 (132)	-	-	-	6,2

### 3.1.3. Les massifs de sol

Les massifs ont été reconstitués avec du sable de Fontainebleau, par pluviation automatique dans l'air, dans des conteneurs rectangulaires rigides (1200 mm x 800 mm x 360 mm). Deux densités différentes ont été retenues (Tableau II).

Tableau II. Propriétés du sable utilisé

Massif	Propriété	Valeur
Conteneur 1	Poids volumique	15,46 kN/m <sup>3</sup>
	Angle de frottement	31°
Conteneur 2	Poids volumique	16,30 kN/m <sup>3</sup>
	Angle de frottement	41°

### 3.2. Procédure d'essais

#### 3.2.1. Mise en place

Après installation du conteneur dans la centrifugeuse, chaque pieu modèle a été mis en place dans le sable, en vol à 22 g, au moyen du dispositif présenté (Figure 5), par fonçage puis vissage. Les profondeurs finales des pieux modèles installés dans le massif varient avec le diamètre de l'hélice (Figure 4). Pendant le fonçage, les mesures de couple, déplacement, vitesse de fonçage et force sur les pieux sont enregistrées par le système d'acquisition de données embarqué en centrifugeuse.

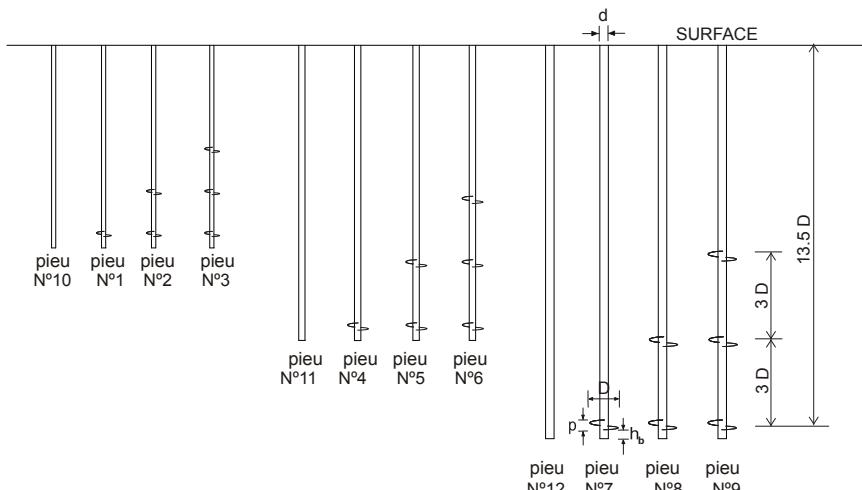


Figure 4. Pieux modèles installés dans le massif

#### 3.2.2 Essais de chargement

Le chargement du pieu à hélice est opéré dès la fin de la mise en place. Une courte période d'attente peut être observée entre les phases de placement et d'arrachage. L'arrachement est réalisé à une vitesse constante (1 mm/s).

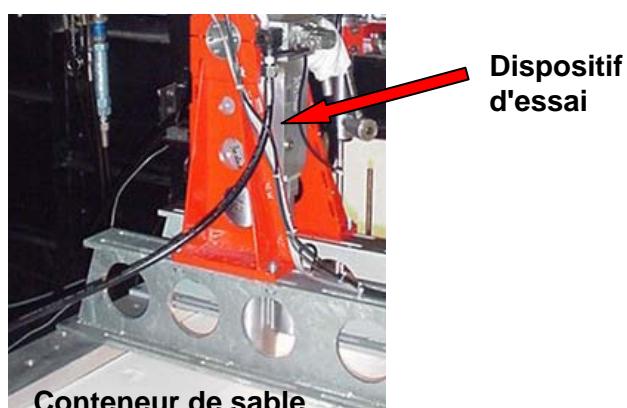


Figure 5. Dispositif d'essai positionné sur le conteneur

### 3.3. Résultats et discussion

Les résultats des essais en centrifugeuse convertis en prototype (vraie grandeur) sont présentés dans le Tableau III. Pour l'estimation du couple on a adopté la valeur moyenne mesurée à la fin du vissage. Pour la charge d'arrachement on a adopté la valeur de pic (la valeur maximale).

Les valeurs de couple à la fin du fonçage et de la charge d'arrachement des pieux 10, 11, 12 sans hélice (Figure 4) correspondent au frottement latéral sur les tiges des pieux 1 à 9 mobilisé pendant l'installation et l'arrachement des pieux ( $T_s$  et  $Q_s$ ).

Les valeurs du couple d'installation repris par les hélices  $T_h$  et de la charge d'arrachement relative aux hélices  $Q_h$  ont été obtenues par la différence entre les résultats des essais des pieux avec hélices et des pieux sans hélice, avec les mêmes diamètres de tige et profondeur d'installation.

La Figure 6 (résultats convertis en prototype) montre les variations du couple nécessaire pour le fonçage des pieux 1, 2, 3 et 10 enregistrées lors de l'installation dans le massif de sable dense (conteneur 2).

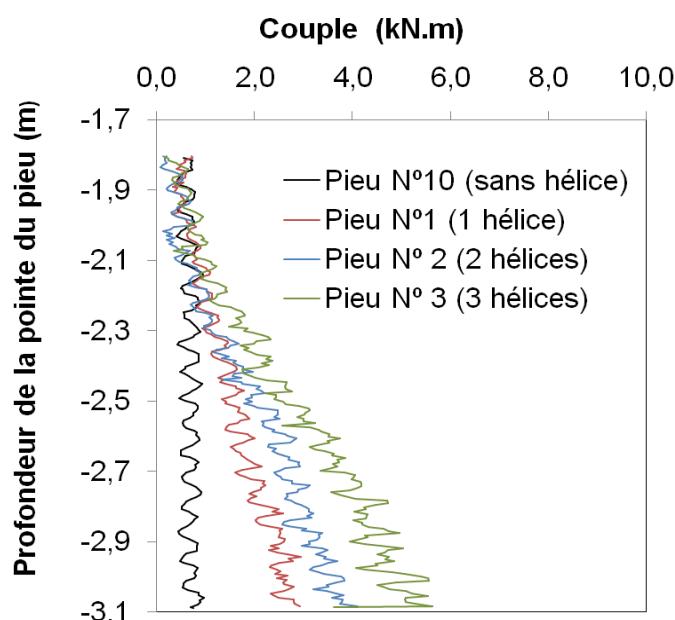


Figure 6. Courbe couple x profondeur de la pointe des pieux modèles N°1, N°2, N°3 et N°10 installés dans le conteneur 2 (valeurs en prototype)

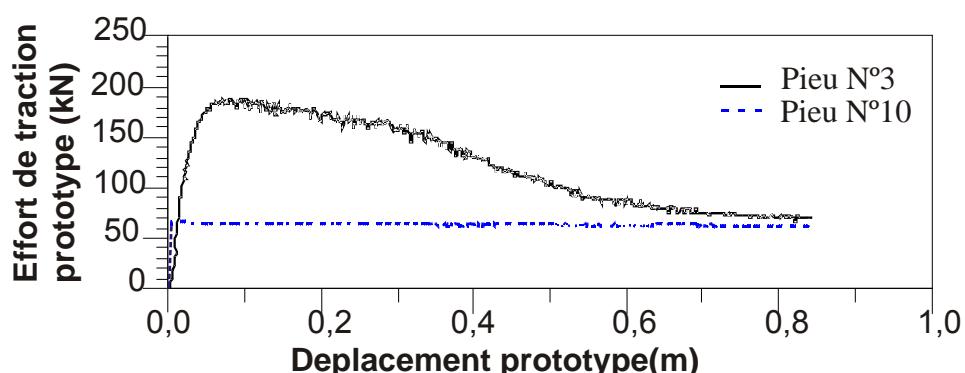


Figure 7 - Courbe effort de traction x déplacement des pieux modèles N°3 (avec hélice) et N°10 (sans hélice) installés dans le conteneur 2

La Figure 7 permet d'estimer la part reprise par les hélices seules, déduction faite du frottement mesuré sur le fut du pieu sans hélice. On constate (Tableau III) que les résultats du couple d'installation repris par les hélices  $T_h$  et de charge d'arrachement relative aux hélices  $Q_h$  des pieux hélicoïdaux sont fortement influencés par la densité du massif.

Tableau III. Résultats des essais en centrifugeuse (convertis en prototype)

Massif	Pieux modèle N°	Couple d'installation repris par les hélices $T_h$ (kN.m)	Charge d'arrachement relative aux hélices $Q_h$ (kN)
Conteneur 1 (densité = 15,46 kN/m <sup>3</sup> )	1	0,3	14
	2	0,4	19
	3	1,0	43
	4	1,6	46
	5	3,2	83
	6	3,3	112
	7	4,1	69
	8	4,9	108
	9	5,3	150
Conteneur 2 (densité = 16,30 kN/m <sup>3</sup> )	1	1,9	60
	2	2,8	88
	3	4,1	116
	4	7,7	177
	5	12,5	234
	6	10,7	275
	7	22,4	413
	8	35,1	475
	9	35,1	475

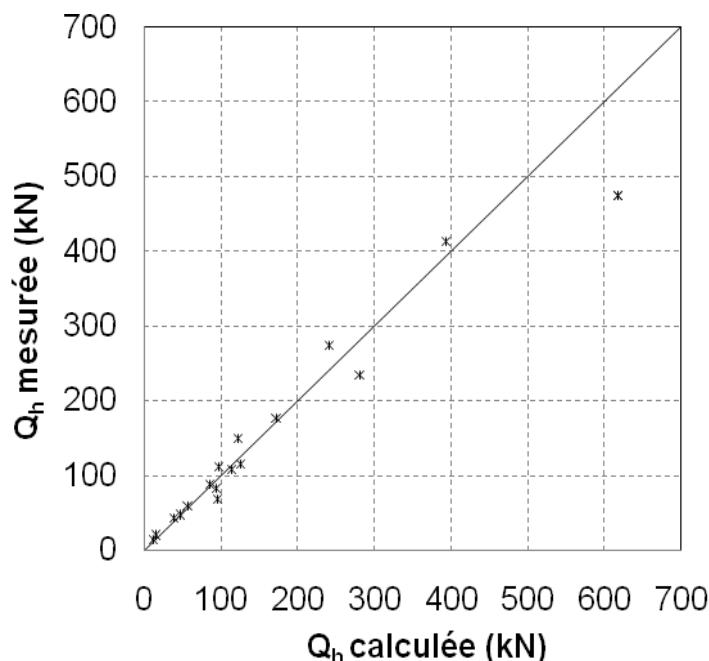


Figure 8 - Comparaisons entre les valeurs calculées et les résultats expérimentaux de la charge d'arrachement relative aux hélices  $Q_h$  (en données prototypes)

Pour vérifier la relation physique de l'équation 5, on a substitué les valeurs de  $T_h$  (Tableau III) et de  $\delta_r$  dans cette expression pour calculer les valeurs de  $Q_h$ . Les valeurs de  $\delta_r$  ont été obtenues par des essais de cisaillement d'interface entre la lame d'hélice et le sable, exécutés au LCPC (10,1° pour l'échantillon de sable du conteneur 1 et 15,1° pour l'échantillon de sable du conteneur 2).

La Figure 8 montre la comparaison entre les valeurs calculées et les résultats expérimentaux de la charge d'arrachement relative aux hélices  $Q_h$  (transformées en prototype). La résistance  $Q_h$  calculée est obtenue par la relation (5) à partir du couple mesuré lors de l'installation des pieux. On observe une bonne concordance entre les valeurs théoriques et les résultats expérimentaux obtenus sur les modèles réduits testés en centrifugeuse.

#### 4. Conclusion

Cette approche expérimentale, réalisée en centrifugeuse, fournit des données essentielles pour la vérification d'une méthode de calcul de la charge d'arrachement relative aux hélices des pieux hélicoïdaux dans du sable à partir du couple mesuré en fin d'installation. La comparaison entre valeurs mesurées et valeurs calculées valide la relation théorique proposée qui permet une excellente prévision de la résistance des pieux.

La relation entre le couple de fonçage et la résistance à l'arrachement mobilisés par les hélices s'avère valide quelque soit le nombre d'hélices (jusqu'à 3 avec une distance minimum entre les hélices égale à 3D) et leur diamètre (entre 21 et 44 cm).

#### 5. Références bibliographiques

- Corté J.F. (1989) L'essor de la modélisation en centrifugeuse en géotechnique. Revue Française de géotechnique, 48, 7-13.
- Garnier, J., Derkx, F., Cottineau, L.M., Rault, G. (1999) Études géotechniques sur modèles réduits centrifugés – Evolution des matériels et techniques expérimentales, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 223, 27-50.
- Ghaly, A., Hanna, A. (1991) Experimental and theoretical studies on installation torque of screw anchors. Canadian Geotechnical Journal 28 (3), 353-364.
- Ghaly, A., Hanna, A., Hanna, M. (1991) Installation torque of screw anchors in sand. Soils and Foundations 31(2), 77-92.
- Narasimha Rao, S., Prasad, M.D., Shetty, M.D., Joshi, V.V. (1989) Uplift capacity of screw pile anchors. Geotechnical Engineering 20 (2), 139-159.
- Perko, H.A. (2000) Energy method for predicting the installation torque of helical foundations and anchors. New Technological and Design Developments in Deep Foundation Technologies, ASCE, 342-352.
- Tsuha, C.H.C. (2007) Theoretical model to control on site the uplift capacity of helical screw piles embedded in sandy soil. Ph.D. thesis, Department of Geotechnics, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, Brazil.