

BASE DE DONNEES D'ESSAIS DE PIEUX CENTRIFUGES : TRACTION POUR ANCRAGE D'EOLIENNE FLOTTANTE

DATA BASE OF CENTRIFUGE PILE TESTS : TENSION LOADING FOR ANCHORAGE OF FLOATING WIND TURBINES

Luc THOREL¹, Ismat EL HAFFAR^{1,2}, Matthieu BLANC¹.

¹ GERS-GMG, Univ. Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-44344 Bouguenais, France

² Fugro GeoConsulting, Bruxelles, Belgique

RÉSUMÉ – Les principaux paramètres de la base de données « piles-ancors » incluant 190 essais sur modèles réduits centrifugés de pieux soumis à des chargements de traction, sont présentés ici : densité, saturation, mise en place, profondeur d'encastrement, sollicitation monotone, cyclique ou combinée.

ABSTRACT – The main parameters of the data base « piles-anchors » which includes 190 tests on small scale centrifuged models of piles subjected to tension loading are presented : density, saturation, installation, embedment, monotonic, cyclic or combined loadings.

1. Introduction

Dans le cadre de la transition énergétique et du développement des énergies marines renouvelables, l'Ifsttar a débuté en 2017, en réponse à un appel à projet du Weamec, le programme de recherche REDENV-EOL qui porte sur la Réduction de l'emprise environnementale d'éolienne flottante avec des fondations de type pieu. L'idée est ici de réduire la longueur des lignes d'ancrages, en privilégiant les lignes tendues qui font travailler le pieu d'ancrage en traction, en mobilisant la résistance verticale de l'interaction sol pieu.

190 essais en traction sur des pieux cylindriques fermés ou des pieux hélicoïdaux ont été réalisés et regroupés dans une base de donnée qui est présentée ici. Quatre pieux lisses (Fig.1) foncés en vol à 100xg dans du sable de Fontainebleau NE34, dense ou lâche, sec ou saturé, sont soumis ensuite à une traction verticale. Cinq pieux hélicoïdaux mono-hélice (Fig.1) de diamètre différent sont installés en vol par vissage à 10 profondeurs relatives différentes, dans du sable de Hostun HN38, dense ou lâche, sec ou saturé. Les efforts d'installation sont mesurés. Les pieux hélicoïdaux sont soumis à des sollicitations monotones, cycliques voire monotone post-cyclique.

L'ensemble de ces essais est regroupé dans une base de données dont les caractéristiques détaillées sont présentées ici.

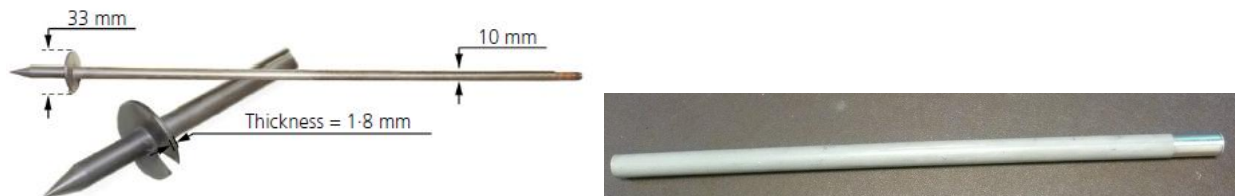


Figure 1. Pieux modèles. Exemple de pieu hélicoïdal mono-hélice en acier (à gauche, Schiavon et al. 2018) et de pieu cylindrique fermé en aluminium (D=18mm, longueur d'encastrement 250mm, El Haffar, 2018).

2. Matériels et matériaux

Les expérimentations ont été conduites dans la centrifugeuse géotechnique de l'Univ. Gustave Eiffel. Il s'agit de modèles réduits de pieux lisses installés dans du sable généralement très dense, en vol (c'est-à-dire dans des conditions de contraintes semblables à celles d'un massif en vraie grandeur), puis soumis à une charge de traction coaxiale. La figure 2 présente l'exemple d'un essai sur un pieu cylindrique fermé ($D=18\text{mm}$) dans un sable dense saturé, incluant la phase de fonçage (avec un vérin hydraulique piloté en déplacement), puis la phase de chargement en traction. La procédure est détaillée dans El Haffar et al. (2017).

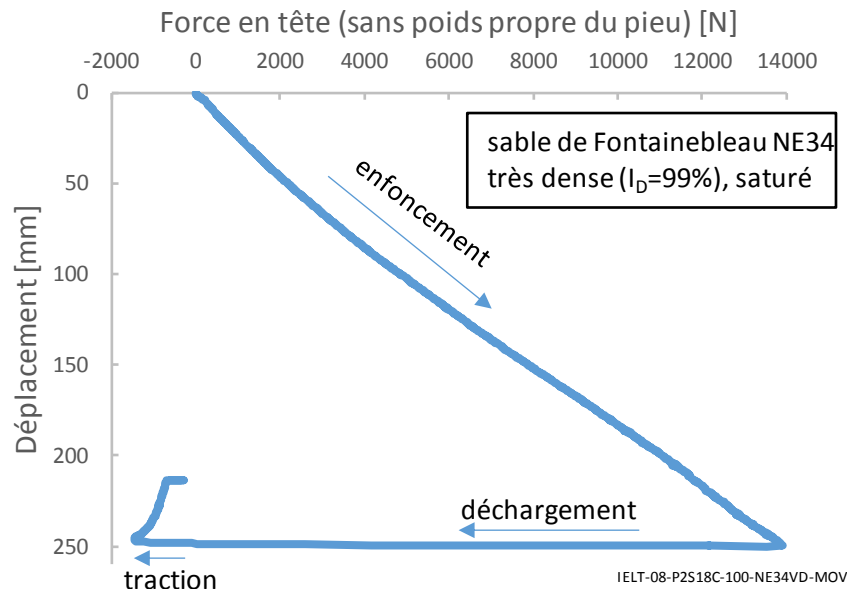


Figure 2. Courbe effort déplacement (grandeurs modèles) d'un pieu lisse cylindrique fermé installé dans un sable très dense saturé, puis chargé en traction ($D=18\text{mm}$, d'après El Haffar, 2018).

Pour les pieux hélicoïdaux, la procédure, décrite par Schiavon et al. (2018) inclut une phase d'installation à déplacement et rotation du pieu contrôlés, puis des phases de chargement monotones ou cycliques (Fig.3).

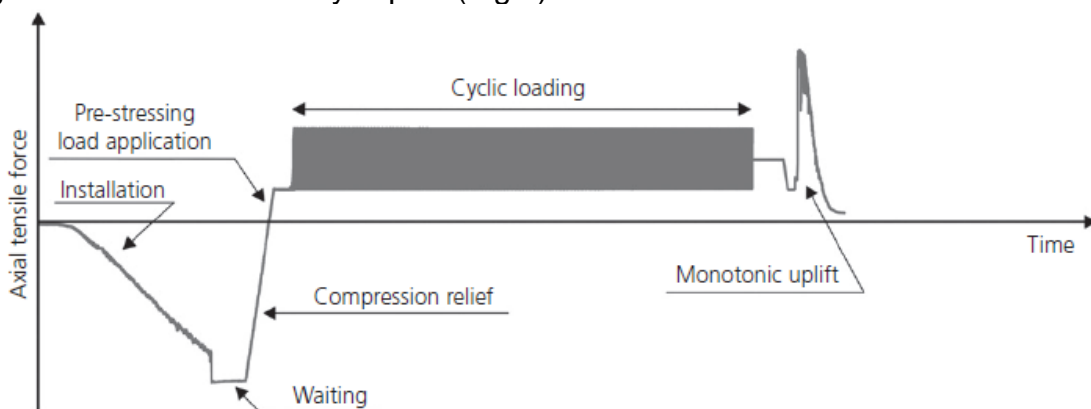


Figure 3. Exemple de l'évolution de l'effort axial au cours du temps d'un essai sur pieu hélicoïdal, incluant les phases d'installation, de chargement cyclique, puis monotone post-cyclique (Schiavon et al., 2018).

Le tableau 1 présente les paramètres de géométrie, d'échelle (une maquette à l'échelle $1/N$ est testée sous une accélération centrifuge de N fois l'accélération de la pesanteur terrestre), et de chargement appliqués. Certains essais ont été réalisés dans du sable sec et d'autres dans du sable saturé.

Tableau 1. Répartition des géométries, densités et types de chargement des 190 essais.

pieu			Echelle [-]	Sable	Nombre d'essais		Chargement				
type	Diamètre D [mm]	Profondeur relative z/D [-]			sec	saturé	m	c	m-c	m-c-pc	c-pc
Cylindre fermé	12	20,83	1/100	NE34	1 MD	1+1 MD	3	0	0	0	0
	14	17,86	1/100	NE34	1+1 MD	1+1 MD	4	0	0	0	0
	16	15,63	1/100	NE34	1+1 MD	1+1 MD	4	0	0	0	0
	18	13,89	1/100	NE34	1+1 MD	1+1 MD	4	0	0	0	0
Mono-hélice d=10mm	40	6	1/10	HN38	4	9	0	0	0	6	7
	33	6 - 7,4 - 7,8 - 8	1/10	HN38	20	41	5	10	1	7	38
	25	6 - 8 - 9,6 - 10 - 12 - 14	1/10	HN38	12	36	3	0	1	17	27
	18	6 - 8 - 10 - 10,5 - 13,3	1/10	HN38	15	17	10	0	7	11	4
	13	6 - 8 - 18,5	1/10	HN38	5	3	4	0	3	1	0
Mono-hélice instrumenté d=10mm	33	7,4	1/10	HN38	13	0	0	0	0	0	13

MD : moyennement dense / D : diamètre de l'hélice ou du pieu cylindrique / d : diamètre du fut du pieu hélicoïdal
 m : monotone initial / c : cyclique / pc : monotone post-cyclique

La géométrie des hélices est précisée dans le tableau 2 (Schiavon, 2018).

Tableau 2. Géométrie des pieux hélicoïdaux

Pieu hélicoïdal	D/d	D (mm)	d (mm)	t _h (mm)	φ _h (°)
HA13	1.3	13	10	1.0	6
HA18	1.8	18	10	1.0	6
HA25	2.5	25	10	1.5	6
HA33	3.3	33	10	1.5	6
HA40	4.0	40	10	2.0	6

D : diamètre de l'hélice / d : diamètre du fut / t_h : épaisseur de l'hélice / φ_h : angle de l'hélice

La profondeur relative de la pointe des pieux cylindriques fermés prend 4 valeurs différentes représentées de façon équilibrée, tandis que 11 profondeurs d'hélice ont été testées, quatre d'entre elles représentant la quasi-totalité de la population (Fig. 4). Les profondeurs relatives testées permettent ainsi de balayer plusieurs configurations, mais aussi, pour certaines d'entre elles de tester des combinaisons et intensités de chargement différentes.

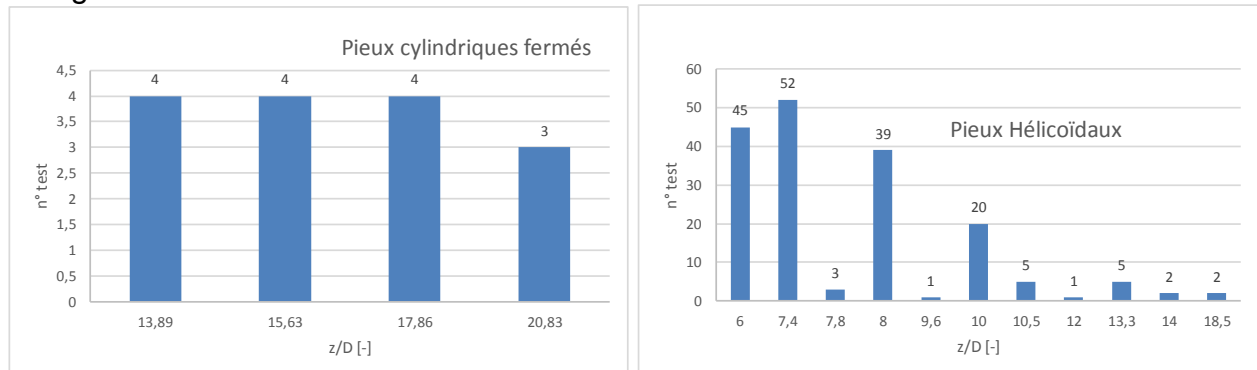


Figure 4. Profondeur relatives : d'encastrement des pieux cylindriques fermés (à gauche) et d'enfouissement de l'hélices des pieux hélicoïdaux (à droite).

3. Sollicitations cycliques

Les sollicitations cycliques sont contrôlées en force et prennent la forme d'un sinus temporel. De ce fait la sollicitation est caractérisée par sa fréquence et par deux paramètres : la charge verticale moyenne V_m et la demi-amplitude cyclique V_c (Fig.5 gauche). En introduisant la charge ultime V_{ut} en traction, on peut représenter dans un diagramme adimensionnel l'ensemble des conditions de chargements cycliques des expérimentations (Fig.5 droite).

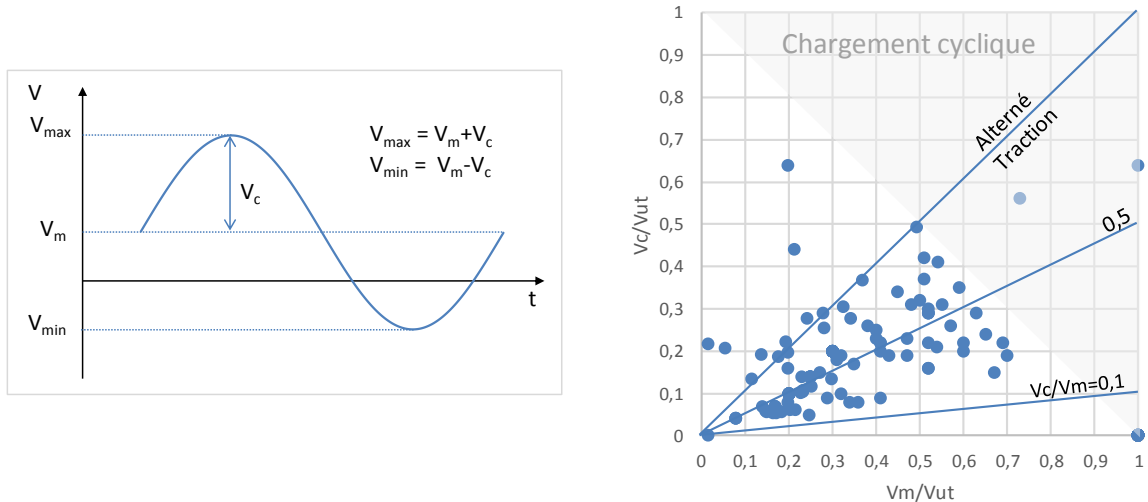


Figure 5. Sollicitations cycliques : forme du chargement sinusoïdal (à gauche) et combinaisons des différents chargement appliqués (à droite).

La plupart des essais cycliques (92%) suivent des chargements en traction ($V_m > V_c$) et quelques chargements alternés sont aussi inclus. La distribution des types de sollicitations selon le rapport V_c/V_m (Fig.6) montre une grande variété, ainsi que 3 valeurs prédominantes qui correspondent à un alignement des points d'essais de la figure 5 selon une fonction linéaire (de coefficient directeur 0.5 par exemple).

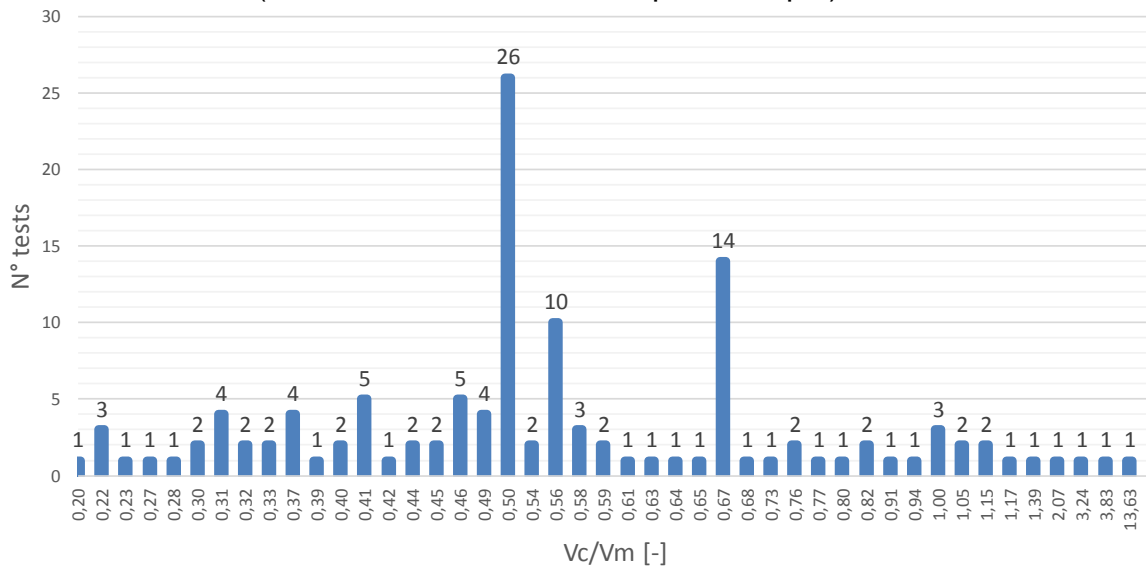


Figure 6. Distribution du rapport charge cyclique sur charge moyenne

L'un des objectifs de l'étude du comportement d'un pieu sous sollicitation cyclique est d'identifier les déplacements accumulés au cours des cycles et pouvant potentiellement mener à la rupture. Le nombre de cycles appliqués varie énormément

selon l'intensité du chargement, entre 3 et 10 000 cycles. Le déplacement maximum observé atteint 1.5 D et le critère d'ELS utilisé correspondant à un déplacement cumulé de 0.1D.

La fréquence du signal sinusoïdal appliqué n'est pas le paramètre étudié en priorité, l'idée étant de se situer dans le cadre de chargements quasi-statiques. Seulement 3 fréquences (grandeur modèle) ont été testées : 0,3Hz (56% des cas), 0,4 Hz (1%) dans les sables saturés et 1Hz (43%) dans les sables secs.

4. Structuration et données numériques

La structuration de la base (Fig.7) fait appel à d'autres fichiers contenant des informations détaillées qui ne sont pas dans le fichier de données stricto sensu, telles que les caractéristiques du sol utilisé, la nature de la campagne expérimentale, les propriétés du pieu, le montage expérimental ou les conditions de chargement.

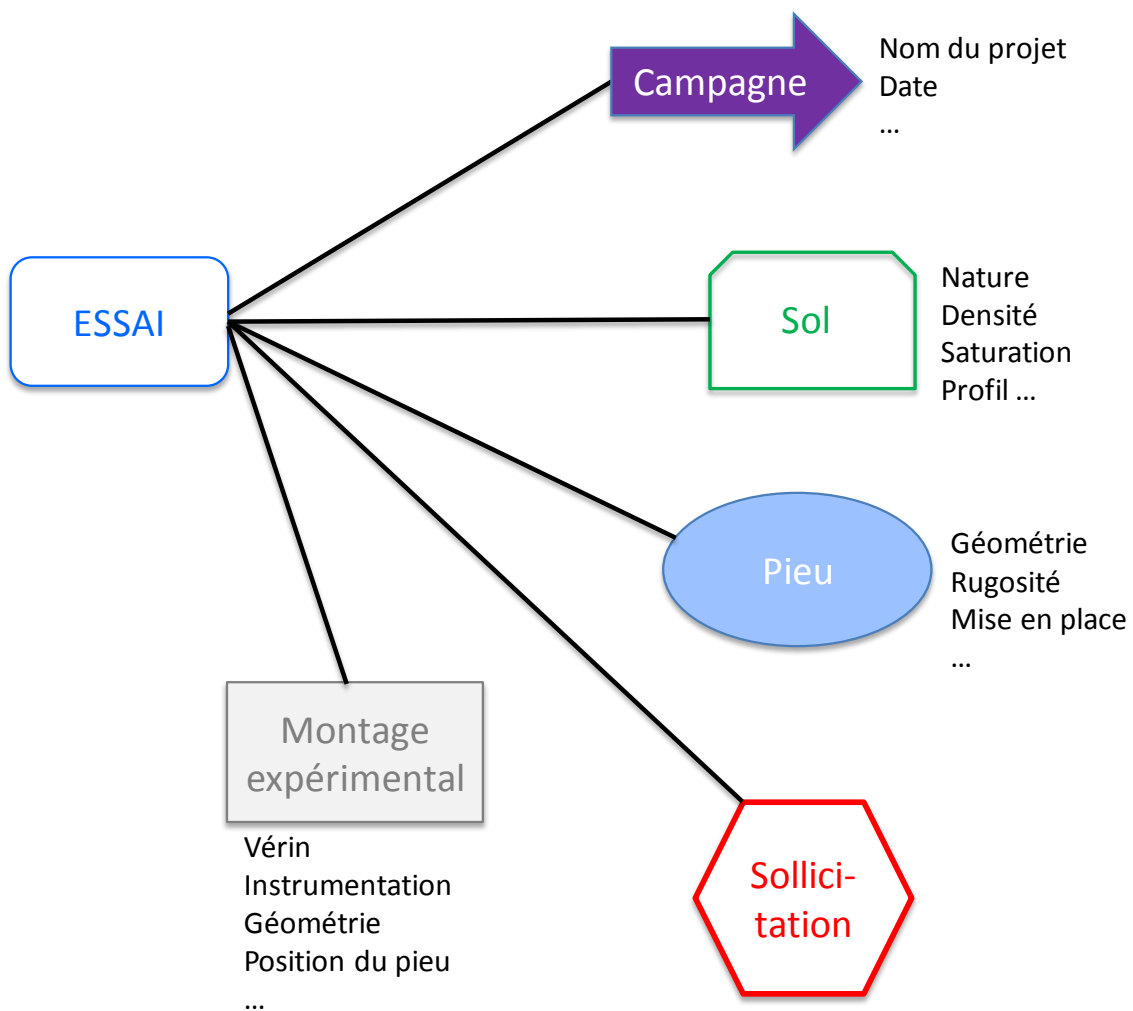


Figure 7. Structure de la base de données.

Le fichier de chaque essai suit une organisation particulière, à commencer par son nom, qui suit une nomenclature spécifique (Fig. 8). La terminaison dépend du type de logiciel utilisé pour éditer les données (e.g. .txt ou .xls). Chaque fichier contient en première colonne le temps, puis dans les autres colonnes les données enregistrées.

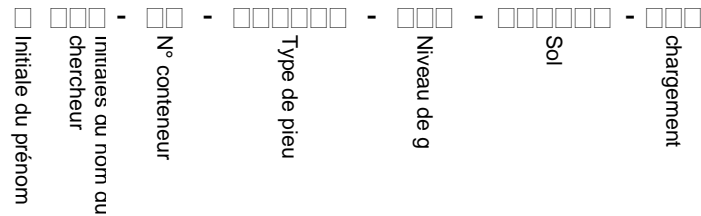


Figure 8. Nomenclature des noms de fichier. Chaque rectangle □ correspond à un caractère alphanumérique

Le fichier correspondant à l'essai de la figure 2 s'intitule IELT-08-P2S18C-100-NE34VD-MOV et correspond au codage :

- Ismat **EL** Haffar **Thèse**
- Conteneur n°**08**
- Pieu n°**P2**, lisse (**S**mooth), de diamètre **18**mm, fermé à la base (**C**losed)
- Accélération centrifuge de **100**xg correspondant à un essai au 1/100^{ème}
- Sable de Fontainebleau **NE34** très dense (**V**ery **D**ense)
- Sollicitation **MO**notone **V**erticale

Les données de chacun des essais de la base seront enregistrées sur un système « dataverse », accessible librement prochainement pour les essais publiés dans la littérature, et identifiés par un numéro DOI : https://research-data.ifsttar.fr/dataverse/piles-anchors_in_sand.

5. Conclusions

Un aperçu d'une nouvelle base de données d'expérimentations réalisées dans la centrifugeuse géotechnique de l'Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes, est présenté ici. L'ensemble des essais réalisés concernent un chargement en traction. Cette base inclut des pieux cylindriques fermés sous sollicitation monotone et des pieux hélicoïdaux mono-hélices sous sollicitations monotones ou cycliques. Tous les pieux modèles sont installés en macrogravité.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le WEAMEC (Projets REDENV-EOL and JE-CORECT), la Région des Pays de la Loire, Nantes Metropole et la CARENE pour leur soutien financier, qui ont permis la réalisation de cette étude. Des remerciements particuliers sont adressés à l'équipe de la centrifugeuse de l'Université Gustave Eiffel pour leur soutien technique et leur assistance durant ces campagnes expérimentales.

7. Références

- El Haffar I., Blanc M., Thorel L. (2017). Impact of pile installation method on the axial capacity in sand. *Géotechnique Letters*, 7, 260-265, <http://dx.doi.org/10.1680/jgele.17.00036>
- El Haffar (2018). Physical Modelling and study of the behavior of deep foundations of offshore wind turbines. Ph.D thesis Univ. Bretagne Loire, Sciences pour l'Ingénieur
- Schiavon J.A., Tsuha C., Neel A., Thorel L. (2018). Centrifuge modelling of a helical anchor under different cyclic loading conditions in sand. *International journal on physical modelling in geotechnics*. <https://doi.org/10.1680/jphmg.17.00054>, 19(2): 72–88
- Schiavon J.A. (2018). Effect of the helix-to-shaft diameter ratio on the behaviour of single-helix anchors subjected to cyclic loading. Scientific mission report. IFSTTAR-USP Partenariat structurant international HELICAL PILE. 108p.