

# IMPACT DE L'INSTALLATION PAR BATTAGE DU MONOPIEU SUR LA REPONSE HORIZONTALE EN CENTRIFUGEUSE

## IMPACT OF MONOPILE HAMMERING INSTALLATION ON THE HORIZONTAL RESPONSE IN CENTRIFUGE

Semaan MAATOUK<sup>1</sup>, Matthieu BLANC<sup>1</sup>, Luc THOREL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Gustave Eiffel, GERS-CG, Nantes, France

**RÉSUMÉ** – On examine l'influence de l'installation par battage de monopieux modèles en centrifugeuse sur la réponse horizontale à  $100\times g$ . Un dispositif expérimental a été développé pour installer en vol des monopieux, puis pour les charger latéralement sans arrêter la centrifugeuse. Les réponses horizontales sont étudiées pour deux méthodes d'installation: par battage à  $100\times g$  et par fonçage à  $1\times g$  dans du sable dense saturé.

**ABSTRACT** – We examine the influence of impact-driven installation on the horizontal response of small-scale monopiles in centrifuge at  $100\times g$ . A special device was developed to install monopiles in flight, and then apply lateral loading without stopping the centrifuge. The horizontal responses of the monopiles were investigated for two installation methods: impact driven at  $100\times g$ , and jacked at  $1\times g$  into saturated dense sand.

### 1. Introduction

Les monopieux utilisés comme fondations pour les éoliennes offshore sont souvent installés dans le fond marin par battage. Pour la conception de l'état limite de fatigue, la fréquence propre du système, régie par la rigidité de la fondation, est importante pour être estimée précisément (Arany et al., 2016). La rigidité de la fondation est considérablement influencée par les changements de l'état du sol, y compris la contrainte horizontale et l'indice des vides, due au processus d'installation (par exemple, Fan et al., 2021b ; Heins et Grabe, 2017 ; Maatouk et al., 2021 ; Murphay et al., 2018).

Dans la littérature, des essais en centrifugeuse ont servi à étudier la réponse du monopieu en utilisant différentes méthodes d'installation, y compris le fonçage et le battage (e.g., Dyson et Randolph, 2001 ; Kinkvort, 2012). Cependant, les essais nécessitaient l'arrêt de la centrifugeuse pour monter le dispositif de chargement latéral, ce qui a conduit à une perte de l'état du sol après l'installation. Récemment, Fan et al. (2021a) ont développé un dispositif miniature permettant de conserver l'état du sol post-installation dans la modélisation en centrifugeuse. Ils ont révélé que la réponse latérale globale du monopieu dans un sable sec était modifiée par le processus d'installation, ce qui a été confirmé numériquement par Bienen et al. (2021) et Fan et al. (2021c). Cependant, l'impact du mode d'installation sur la réponse horizontale du monopieu n'est toujours pas bien compris ni quantifié, en vue des applications industrielles.

Cette étude examine l'effet de l'installation du monopieu par battage sur la réponse horizontale ultérieure, dans un sable dense saturé. Un nouveau dispositif expérimental permet de réaliser, en centrifugeuse à  $100\times g$ , l'installation par battage d'un modèle de monopieu de 50 mm de diamètre jusqu'à 250 mm (5D) de profondeur en utilisant un marteau électromécanique, suivi d'un chargement latéral en tête du monopieu en utilisant un vérin électromécanique.

## 2. Essais en centrifugeuse

Les expérimentations ont été réalisées dans la centrifugeuse géotechnique (rayon = 5,5 m) de l'Université Gustave Eiffel (campus de Nantes). Les essais ont été effectués à 100 fois la gravité terrestre ( $N = 100$ ) sur un modèle de monopieu.

### 2.1. Monopieu modèle et instrumentation

Les détails du modèle de monopieu et de l'instrumentation ont été fournis par Maatouk et al. (2021). Le monopieu modèle en aluminium a un diamètre extérieur ( $D$ ) de 50 mm, une profondeur d'encastrement ( $L$ ) et une excentricité ( $l_e$ ) de 250 mm ( $5D$ ), ainsi qu'une épaisseur de 2,5 mm.

Comme développé par Li et al. (2020), dix paires de fibres optiques à réseau de Bragg ont été implémentées dans l'épaisseur du monopieu dans le plan vertical incluant la direction de chargement pour mesurer les déformations axiales induites au cours du chargement, qui à leur tour donnent le moment de flexion du monopieu à dix niveaux différents (Figure 1). En outre, deux capteurs laser horizontaux ont été positionnés en face du monopieu (Figure 1) pour mesurer les déplacements horizontaux tout au long du chargement. Le monopieu a également été instrumenté par un capteur de déplacement potentiométrique (Figure 1) pour mesurer la hauteur interne de la colonne du sol pendant l'installation afin de vérifier si aucun bouchon ne s'est constitué dans le monopieu pendant la phase d'installation.

### 2.2. Campagne expérimentale

Deux chargements horizontaux monotoniques ont été réalisés à  $100 \times g$  sur le modèle de monopieu installé selon deux méthodes différentes. Le premier essai, appelé "ID100g", a

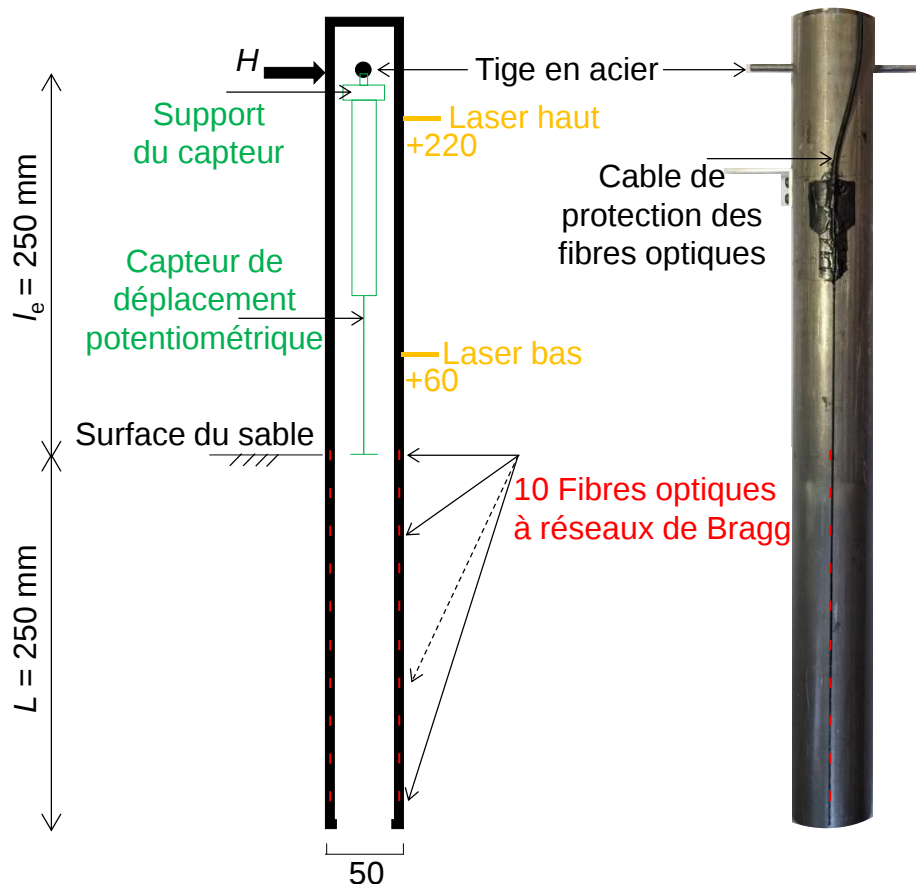


Figure 1. Monopieu modèle instrumenté

été installé par battage à  $100\times g$ , tandis que le second, appelé "J1g", a été effectué par fonçage à  $1\times g$  (e.g. Li et al., 2021) et a été utilisé uniquement à titre de comparaison pour quantifier l'impact de l'installation par battage sur la réponse du monopieu. Un résumé des essais effectués est présenté dans le Tableau 1.

La séquence des procédures de l'essai débute par la préparation de l'échantillon, puis l'installation du monopieu et enfin l'application du chargement.

### 2.3. Préparation de l'échantillon

L'échantillon a été préparé en utilisant la technique de pluviation dans l'air dans un conteneur rectangulaire. Une densité relative de  $82\% \pm 1,4\%$  a été obtenue avec le modèle de sable de Fontainebleau NE34 mal gradué utilisé (Maatouk et al., 2020).

Une rehausse de 120 mm de hauteur (Figure 2a) a été fixée au-dessus du conteneur une fois celui-ci complètement rempli. Ensuite, l'échantillon a été saturé avec de l'eau du robinet à  $1\times g$  à travers quatre canaux de drainage situés au fond du conteneur (Figure 2a).

### 2.4. Installation du monopieu par battage

L'installation par battage a été réalisée en vol à  $100\times g$  à l'aide d'un marteau électromécanique contrôlé par un vérin hydraulique creux pour suivre la descente du monopieu (Figure 2).

Le principe du marteau est basé sur un mouvement combiné de rotation et de remontée du mouton avant la chute libre. La rotation du mouton est réalisée en faisant tourner la fourchette qui est reliée à un moteur électrique par l'intermédiaire d'une barre de connexion située à l'intérieur de la tige du vérin hydraulique. Les formes de la fourchette et du support du mouton permettent le mouvement ascendant du mouton par rotation.

L'énergie modèle délivrée à  $1\times g$  était de 0,032 J par coup. Ceci a été réalisé en utilisant un modèle de mouton de 0,164 kg et une hauteur de chute de 20 mm (Figure 2b).

### 2.5. Chargement latéral du monopieu

Après l'installation, pour les deux essais, le système vertical a été soulevé (Figure 2c) afin de libérer l'espace autour de la tête du monopieu pour la phase de chargement latéral. La principale différence étant uniquement l'état de contrainte induit par l'installation du monopieu. Pour l'essai 'J1g', la centrifugeuse a été mise en rotation avant la phase de chargement latéral. Alors que pour l'essai 'ID100g', le chargement horizontal a été appliqué directement, sans arrêter la centrifugeuse après l'installation, afin de maintenir l'état du sol induit après l'installation.

Le chargement latéral a été appliqué au centre de la section transversale du monopieu en poussant la tige en acier qui traverse le monopieu perpendiculairement à la direction du chargement (Figure 1) en utilisant une fourchette attachée à un vérin électromécanique horizontal (Figure 2c).

## 3. Résultats de l'installation par battage

Le nombre de coups cumulé ( $n$ ) et l'énergie de battage ( $\xi$ ), définis par Maatouk et al. (2021), sont représentés à l'échelle prototype dans la Figure 3 en fonction de la fiche du monopieu normalisé. Le monopieu est initialement enfoncé autour de  $0,65D$  ( $s_0$ ) sous son propre poids

Tableau 1. Détails des essais réalisés

| Essai  | Phase d'installation                   | Phase de chargement                       |
|--------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| ID100g | Battage à $100\times g$ avec 5 coups/s | Monotonique à $100\times g$ avec 0,1 mm/s |
| J1g    | Fonçage à $1\times g$ avec 1 mm/s      | Monotonique à $100\times g$ avec 0,1 mm/s |

avant d'être battu. Ensuite, le battage commence, au cours duquel le nombre de coups ainsi que l'énergie délivrée requise par mètre de pénétration augmentent avec la profondeur de pénétration. 3846 coups sont nécessaires pour enfoncer le monopieu jusqu'à  $5D$ .

Pendant l'installation du monopieu, le capteur de déplacement potentiométrique a révélé que le sol entre dans le monopieu au même rythme qu'il avance. Par conséquent, aucun bouchon ne s'est créé pendant l'installation en vol.

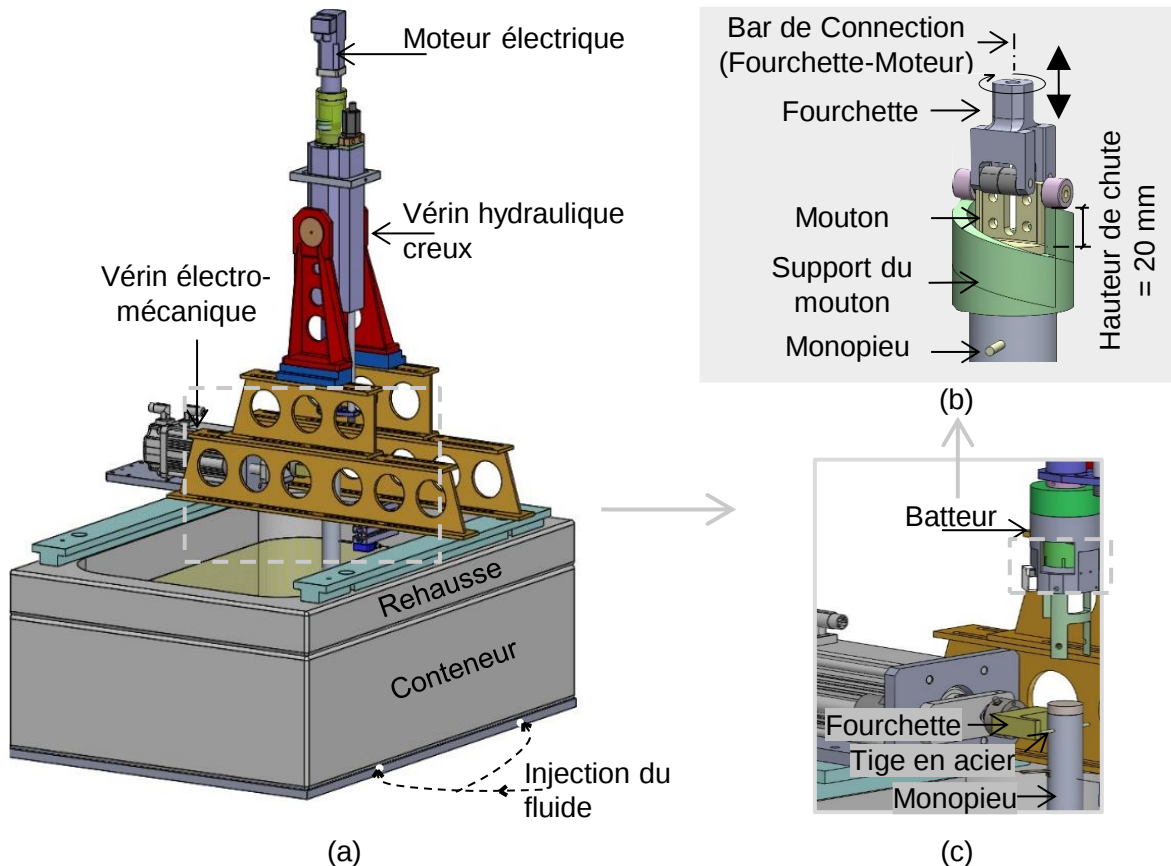


Figure 2. (a) Montage expérimental, (b) détails du processus de battage, (c) détails du chargement latéral

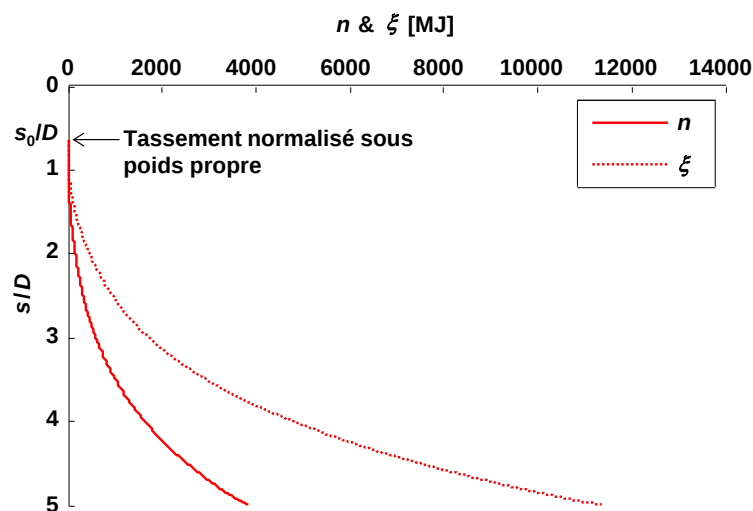


Figure 3. Nombre de coups ( $n$ ) et énergie cumulé ( $\xi$ ) à l'échelle prototype en fonction du tassement du monopieu normalisé

#### 4. Impact du battage du monopieu sur la réponse latérale

Pour les deux méthodes d'installation, les comportements globaux du monopieu sont présentés dans la Figure 4. Ceux-ci représentent, au niveau du sol, la charge horizontale  $H_G$  et le moment de flexion  $M_G$  en fonction du déplacement normalisé du monopieu  $y_G/D$  et de sa rotation autour de l'axe neutre  $\theta_G$ . La déflexion et la rotation du monopieu sont obtenues à l'aide d'une procédure dérivée des mesures des fibres optiques et du déplacement du laser supérieur, comme détaillé dans Maatouk et al. (2021). Des comparaisons qualitative et quantitative sont effectuées.

##### 4.1. Comparaison qualitative

Pour les deux essais, deux tendances différentes sont observées :

- Pour de faibles amplitudes de chargement, la résistance latérale augmente jusqu'à ce que  $\theta_G = 0,7^\circ$  ou  $y_G = 0,03D$  (soit 0,15 m).
- Ensuite, cette augmentation est moins prononcée.

L'amélioration ( $\Delta$ ) apportée par l'installation en vol par battage est également présentée sur la Figure 4. Cette amélioration correspond à la différence de la résistance latérale entre les deux essais, normalisée par la résistance du monopieu de l'essai J1g. Initialement, cette amélioration est beaucoup plus prononcée et peut être expliquée par une augmentation de la contrainte horizontale le long du fût du monopieu lors de l'installation en vol par rapport à celle dérivée de l'installation par fonçage à  $1 \times g$ . Puis, dans la deuxième phase après la ligne pointillée,  $\Delta$  diminue progressivement jusqu'à atteindre un plateau pour des amplitudes de chargement élevées mobilisant le sol très loin. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Fan et al. (2021a).

##### 4.2. Comparaison quantitative

Deux critères pertinents ont été choisis pour quantifier l'effet de l'installation par battage sur la réponse latérale du monopieu :

- $\theta_G = 0,5^\circ$  : état limite de service d'une éolienne offshore (DNVGL, 2016)
- $y_G = 0,1D$  : état limite ultime pour des grand amplitudes de déplacements.

La rigidité sécante à  $\theta_G = 0,5^\circ$  et la résistance latérale mobilisée à  $y_G = 0,1D$  sont résumées dans le Tableau 2. L'installation en vol a amélioré la rigidité sécante de 1,6-2,1 ; tandis que la résistance latérale a accru de 45%. La résistance latérale obtenue dans notre étude est légèrement supérieure à celle rapportée par Fan et al. (2021a), qui ont obtenu une valeur de 31% pour un élanement de  $3,1D$  dans du sable sec avec une densité relative de 38% et  $l_e = 3,8D$ .

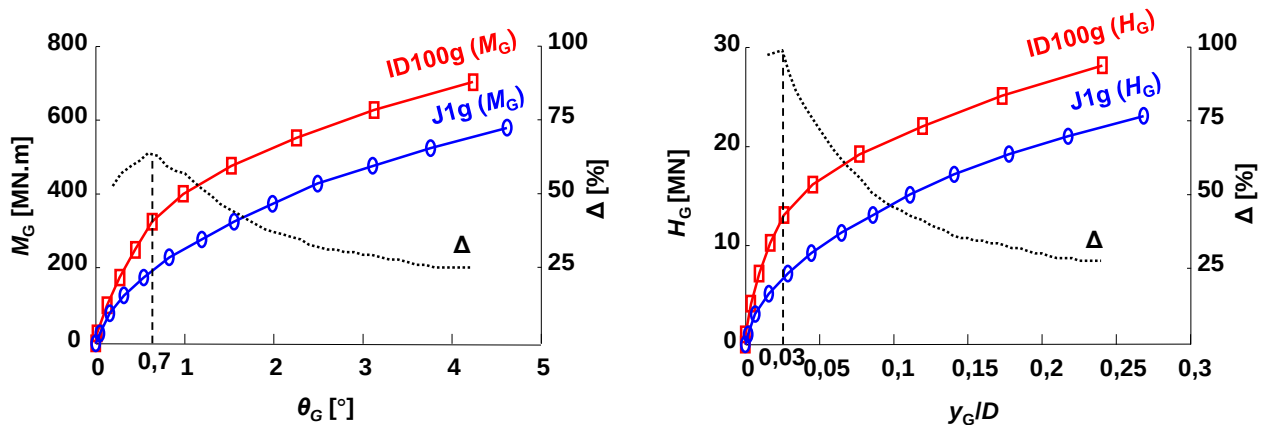


Figure 4. Au niveau du sol, le moment de flexion  $M_G$  et la charge horizontale  $H_G$  en fonction de la rotation  $\theta_G$  et du déplacement normalisé du monopieu  $y_G/D$ .

Tableau 2. Rigidité sécante et résistance latérale pour  $\theta_G = 0,5^\circ$  et  $y_G = 0,1D$  respectivement

| Essai  | Rigidité sécante      |                  | Résistance latérale |            |
|--------|-----------------------|------------------|---------------------|------------|
|        | $k_{M,\theta}$ [MN.m] | $k_{H,y/D}$ [MN] | $M_G$ [MN.m]        | $H_G$ [MN] |
| ID100g | 541                   | 553              | 515                 | 20,6       |
| J1g    | 337                   | 259              | 355                 | 14,2       |

## 5. Conclusions

Un nouveau dispositif a été développé pour combiner, en centrifugeuse à  $100\times g$ , l'installation par battage d'un modèle de monopieu de 50 mm de diamètre jusqu'à  $5D$  de profondeur, suivie d'un chargement horizontal.

Pour quantifier l'impact de l'installation par battage sur la réponse globale du monopieu, deux méthodes d'installation sont explorées—l'installation par battage à  $100\times g$ , et l'installation par fonçage à  $1\times g$ —dans du sable dense saturé d'eau.

L'effet du battage est plus localisé dans le voisinage du monopieu, et est plus prononcé pour une gamme étroite de déplacement latéral. Cette amélioration a diminué progressivement au fur et à mesure que la résistance augmente jusqu'à atteindre un plateau pour des amplitudes de chargement élevées mobilisant le sol loin du monopieu.

## 6. Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien de l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du Programme des Investissements d'Avenir (ANR-10-IEED-0006-08), ainsi que de France Energies Marines (SOLCYP+) et du Weamec (REDENV-EOL).

Le premier auteur souhaiterait remercier l'Université Gustave Eiffel et la Région Pays de Loire pour le financement de sa bourse de thèse. De plus, un grand remerciement est adressé à l'équipe technique de la centrifugeuse sans qui ces essais n'auraient pu avoir lieu.

## 7. Références bibliographiques

- Bienen B., Fan S., Schröder M. et Randolph M.F. (2021). Effect of the installation process on monopile lateral response. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1680/jgeen.20.00219>.
- DNVGL (Det Norske Veritas et Germanischer Lloyd) (2016) Standard DNVGL-ST-0126: Support Structures for Wind Turbines, April 2016. DNVGL, Høvik, Norway.
- Dyson G.J. et Randolph M.F. (2001). Monotonic lateral loading of piles in calcareous sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, n°4, pp. 346-352, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:4\(346\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(346)).
- Fan S., Bienen, B. et Randolph M.F. (2021a). Centrifuge study on effect of installation method on lateral response of monopiles in sand. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, vol. 21, n°1, pp. 40-52, <https://doi.org/10.1680/jphmq.19.00013>.
- Fan S., Bienen B. et Randolph M.F. (2021b). Effects of monopile installation on subsequent lateral response in sand. I: Pile installation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 147, n° 5, 04021021, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002467](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002467).
- Fan S., Bienen B. et Randolph M.F. (2021c). Effects of monopile installation on subsequent lateral response in sand. II: Lateral loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 147, n° 5, 04021022, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002504](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002504).

- Heins E. et Grabe J. (2017). Class-A-prediction of lateral pile deformation with respect to vibratory and impact pile driving. *Computers and Geotechnics*, vol. 86, pp. 108-119, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.01.007>.
- Klinkvort R.T. (2012). Centrifuge Modelling of Drained Lateral Pile-Soil Response – Application for Offshore Wind Turbine Support Structures. Doctoral dissertation, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, See <https://core.ac.uk/reader/18600667>.
- Li Z.S., Blanc M. et Thorel L. (2020). Using FBGS to estimate the horizontal response of a monopile in a geotechnical centrifuge. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, vol. 20, n° 3, pp.164-174, <https://doi.org/10.1680/jphmg.19.00022>.
- Li Z.S., Blanc M. et Thorel L. (2021). Effects of embedding depth and load eccentricity on lateral response of offshore monopiles in dense sand: A centrifuge study. *Géotechnique*, <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00200>.
- Maatouk S., Blanc M. et Thorel L. (2020). Development of a Hammer to drive monopiles of offshore wind turbines in Centrifuge. In Laue J. and Bansal T. (eds), 4<sup>th</sup> European Conference on Physical Modelling in Geotechnics, pp. 89-93. Luleå University of Technology, Sweden.
- Maatouk S., Blanc M. et Thorel L. (2021). Impact driving of monopiles in centrifuge: effect on the lateral response in sand. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, pp. 1-14, <https://doi.org/10.1680/jphmg.21.00035>.
- Murphy G., Igoe D., Doherty P. et Gavin K. (2018). 3D FEM approach for laterally loaded monopile design. *Computers and Geotechnics*, vol. 100, pp. 76-83, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.03.013>.