

Modélisation en centrifugeuse du mode d'installation des monopieux d'éolienne offshore.

Semaan Maatouk

Université Gustave Eiffel, GERS-CG, Nantes, France

RESUME Les monopieux utilisés comme fondations pour les éoliennes offshore sont souvent installés dans le fond marin par battage. Au cours de l'exploitation des éoliennes, les monopieux sont soumis à des chargements horizontaux importants dus aux vents, aux courants et aux vagues. Cependant, le comportement latéral du monopieu est complexe en particulier pour de faibles profondeurs d'encastrement (tendance actuelle des applications industrielles).

C'est pourquoi un dispositif expérimental embarqué en centrifugeuse a été conçu pour examiner la réponse horizontale d'un monopieu battu à l'échelle 1/100 (prototype de 5 m de diamètre D) dans du sable dense saturé. En particulier, l'effet (i) de l'installation par battage jusqu'à $5D$ de profondeur, et (ii) de la profondeur d'encastrement ($L/D = 3$ à 5) sur la réponse latérale du monopieu sont étudiées en utilisant un monopieu instrumenté par fibres optiques. En outre, les résultats expérimentaux sont comparés avec la méthode de conception PISA en réalisant un modèle numérique aux éléments finis 1D.

Mots-clefs Monopieu, effet de la profondeur d'encastrement, impact de l'installation par battage, réponse latérale, modélisation en centrifugeuse.

I. INTRODUCTION

La conception des fondations sur pieux chargés latéralement est généralement réalisée à l'aide de la méthode dite des courbes de réaction, ou "p-y" (modèle de Winkler), développée pour les longs pieux flexibles. Cependant, avec l'essor de la production d'électricité à partir du vent ces dernières années, le diamètre des monopieux a augmenté avec la puissance des éoliennes ($D \sim 4$ à 10 m), et le rapport d'élancement a diminué ($L/D \sim 6$ à 3), ce qui entraîne une réponse moins flexible. Par conséquent, la méthode p-y conventionnelle n'est pas applicable aux monopieux utilisés pour les éoliennes. Récemment, des améliorations pertinentes des méthodes de conception ont été réalisées grâce à un projet de recherche connu sous le nom de PISA (Byrne *et al.*, 2015). Des composantes supplémentaires des réactions du sol sont incorporées, notamment un moment distribué le long du monopieu, un cisaillement et un moment à la base du monopieu. Il faudrait donc mieux comprendre le comportement complexe avant d'élaborer des normes pour la conception des monopieux.

Dans la plupart des publications, la réponse latérale du monopieu a été étudiée en négligeant l'effet de l'installation (e.g. Li *et al.*, 2020 ; Li *et al.*, 2021 ; Taborda *et al.*, 2020). Peu d'études ont porté sur l'effet de l'installation du monopieu sur la réponse horizontale, qu'elles soient expérimentales en centrifugeuse (Fan *et al.*, 2021a) ou numériques (Bienen *et al.*, 2021 ; Fan *et al.*, 2021b). Ils ont souligné l'importance de la considération du mode d'installation dans la conception des monopieux chargés latéralement, ce qui est proposé ici via la méthode dynamique de battage.

Cette étude vise à enrichir le comportement des monopieux chargés horizontalement en réalisant des essais en centrifugeuse sur un monopieu battu à l'échelle 1/100 (prototype de 5 m de diamètre D) dans du sable dense saturé. En particulier seront étudiés l'impact sur la réponse latérale du monopieu de : 1) l'installation par battage jusqu'à $5D$ de profondeur, 2) la profondeur d'encastrement ($L/D = 3$ à 5). En outre, les résultats expérimentaux sont comparés avec la méthode de conception PISA via un modèle numérique aux éléments finis 1D.

II. MODELISATION EN CENTRIFUGEUSE D'UN MONOPIEU BATTU CHARGE HORIZONTALEMENT

La modélisation physique en centrifugeuse est utilisée ici sur des modèles réduits de monopieu installés et testés en macro-gravité, permettant la reproduction de l'état de contrainte du sol prototype. La centrifugeuse géotechnique de l'Université Gustave Eiffel de 5,5 m de rayon a été utilisée pour réaliser les essais à 100 fois la gravité terrestre ($N = 100$).

La séquence des procédures de l'essai débute par la reconstitution de l'échantillon, puis l'implémentation du dispositif expérimental dans la nacelle de la centrifugeuse afin d'installer le monopieu par battage et de le charger horizontalement, sans arrêter la centrifugeuse, dans du sable dense saturé. Le détail du montage expérimental a été fourni par Maatouk *et al.* (2021).

A. Reconstitution et saturation du massif de sable

Le massif de sable a été reconstitué dans un conteneur rectangulaire (FIGURE 1), en utilisant la méthode de pluviation dans l'air. Une densité relative de $82\% \pm 1,4\%$ a été obtenue avec le sable de Fontainebleau NE34 mal gradué (Maatouk *et al.*, 2020). Une fois le conteneur complètement rempli, l'échantillon a été saturé par un écoulement vertical ascendant, en injectant de l'eau à $1 \times g$ à travers quatre canaux de drainage au fond du conteneur (FIGURE 1).

B. Montage expérimental dans la nacelle

Ensuite, le conteneur a été placé dans la nacelle de la centrifugeuse. Des poutres de support ont été fixées sur les bords longitudinaux du conteneur. Un vérin hydraulique creux attaché à un moteur électrique a été positionné sur les poutres en I pour maintenir et contrôler le batteur. Un vérin électromécanique a été fixé sur les poutres en T pour charger latéralement le monopieu. De plus, deux capteurs laser, positionnés en face du monopieu (FIGURE 2), ont été montés sur une poutre attachée à la base de la poutre en I (FIGURE 3) pour mesurer les déplacements horizontaux au cours du chargement.

C. Modèle de monopieu instrumenté

Le monopieu modèle (FIGURE 2) est un tube d'aluminium long de 525 mm avec un diamètre externe (D) de 50 mm et une épaisseur (t) de 2.5 mm. Il est installé jusqu'à trois profondeurs d'encastrement différentes ($L = 250, 200$ et 150 mm) et chargé avec une excentricité (l_e) de 250 mm pour les trois cas.

Le modèle de monopieu est instrumenté avec deux fibres optiques identiques diamétralement opposées situées aux extrémités de la section transversale du monopieu dans le plan vertical incluant la direction du chargement. Sur chaque fibre, 10 réseaux de Bragg également répartis ont été implémentés à 25 mm au-dessus de la base du monopieu sur une portée de 225 mm (plus de détails dans Li *et al.*, 2020). Ces fibres optiques à réseaux de Bragg mesurent les déformations externes sur 10 sections transversales différentes du pieu, puis donnent, après calcul et

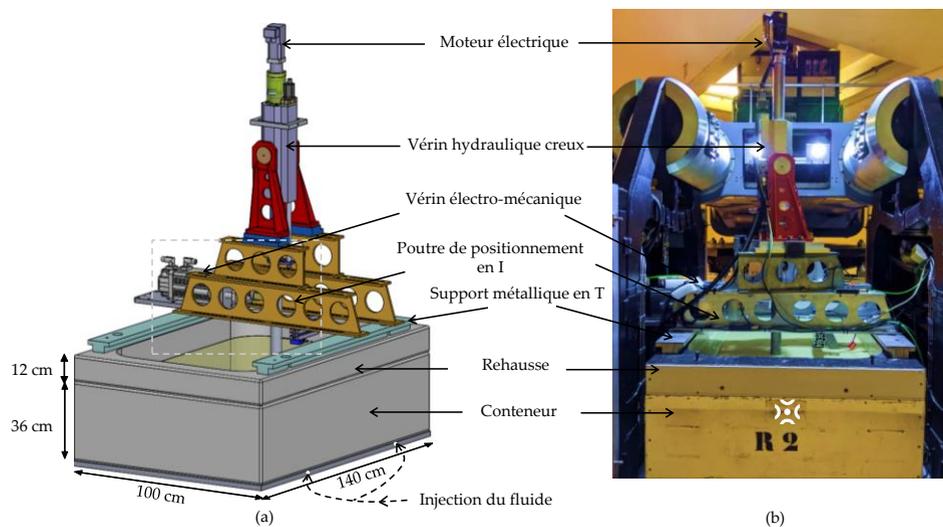


FIGURE 1. Montage expérimental : (a) schéma ; (b) vue dans la nacelle de la centrifugeuse

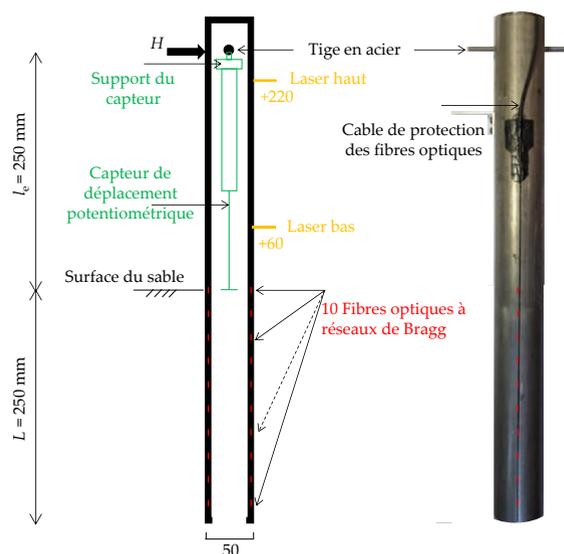


FIGURE 2. Monopieu modèle instrumenté avec une profondeur d'encastrement de $5D$

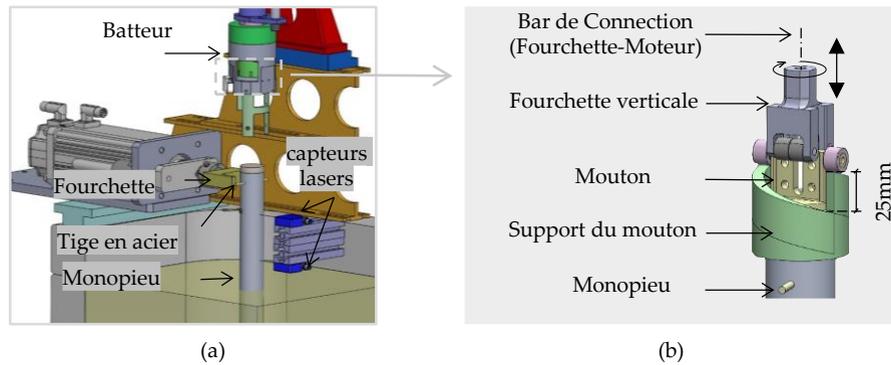


FIGURE 3. (a) Détails du chargement latéral du monopieu ; (b) détails du processus de battage (zoom de la partie encadrée dans la FIGURE 1a)

étalonnage, le moment de flexion du pieu à ces niveaux. En outre, un capteur de déplacement potentiométrique a été fixé à l'intérieur du tube pour vérifier qu'aucun bouchon ne s'est créé pendant l'installation du monopieu.

D. Installation du monopieu par battage

Le monopieu a été installé par battage à $100\times g$ (afin de simuler un prototype de 5 m de diamètre) en utilisant un marteau électromécanique attaché à un vérin hydraulique pour suivre la descente du monopieu. Le marteau est composé de trois pièces (FIGURE 3) : une fourchette verticale fixée à une barre, à l'intérieur du vérin hydraulique, relié au moteur ; un mouton en forme d'ailette (les ailes sont enveloppées par deux roulements cylindriques diamétralement opposés) qui peut se déplacer librement à l'intérieur de la fourchette ; et un support du mouton fixe en forme de vague sur lequel reposent les roulements. Après avoir activé le moteur, la barre de connexion tourne, permettant ainsi la rotation de la fourchette verticale et donc la chute libre du mouton rotatif à la hauteur requise pour battre le monopieu. Le vérin vertical est asservi pour suivre la pénétration du monopieu. Ensuite, le mouton rotatif poursuit un mouvement ascendant autour de son support qui permet d'installer le monopieu à raison de deux coups par tour. Ce processus a été répété comme une boucle jusqu'à ce que le monopieu atteigne la profondeur désirée.

E. Chargement latéral du monopieu

Après avoir installé le monopieu à la profondeur souhaitée, le batteur et le vérin hydraulique ont été soulevés (en vol) afin de libérer l'espace autour de la tête du monopieu pour la phase de chargement. Ensuite, sans arrêter la centrifugeuse pour maintenir l'état de contrainte, le chargement latéral a été appliqué au centre de la section transversale du monopieu. Ceci a été réalisé en poussant la tige en acier qui traverse le monopieu perpendiculairement à la direction de chargement grâce à une fourchette fixée au vérin électromécanique (FIGURE 3).

III. IMPACT DU BATTAGE DU MONOPIEU SUR LA REPONSE HORIZONTALE

Deux essais de chargement monotonique ont été effectués à $100\times g$ dont le premier a été installé par battage à $100\times g$ avec une énergie modèle de 0,032 J par coup à $1\times g$, tandis que le second

(essai de référence) a été réalisé par fonçage à $1\times g$ avec une vitesse de 1 mm/s ; ce dernier, par comparaison, sert à quantifier l'impact du battage sur la réponse du monopieu.

Pour les deux essais, le comportement global du monopieu représenté, au niveau du sol, par le moment de flexion M_G et la charge horizontale H_G en fonction de la rotation θ_G et de la déflexion normalisée du monopieu y_G/D est présenté à l'échelle prototype dans les FIGURE 4a et FIGURE 4b respectivement. θ_G et y_G sont inférés en utilisant les mesures des fibres optiques et du déplacement du laser supérieur, comme détaillé dans Maatouk *et al.* (2021). Des comparaisons qualitatives et quantitatives sont réalisées.

A. Comparaison qualitative

La FIGURE 4 montre des évolutions monotones croissantes des résistances. L'amélioration (Δ) apportée par l'installation par battage montre deux phases, séparées par $\theta_G = 0,7^\circ$ ou $y_G = 0,03D$. Durant la première phase du chargement latéral, cette amélioration est plus prononcée et peut être justifiée par une augmentation de la contrainte radiale le long du fût du monopieu lors de l'installation en vol par rapport à celle obtenue par l'installation par fonçage. Ensuite, Δ décroît progressivement jusqu'à stabilisation pour des amplitudes de chargement élevées mobilisant le sol dans une zone de plus en plus éloignée du monopieu. Ces résultats sont cohérents avec l'étude de Fan *et al.* (2021a).

B. Comparaison quantitative

La quantification de l'impact de l'installation par battage sur le comportement latéral du monopieu a été réalisée en se basant sur deux critères :

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

Le TABLEAU 1 présente la rigidité sécante à $\theta_G = 0,5^\circ$ et la résistance latérale mobilisée à $y_G = 0,1D$. L'installation en vol a amélioré la rigidité sécante de 1,6 (FIGURE 4a) et 2,1 (FIGURE 4b) ;

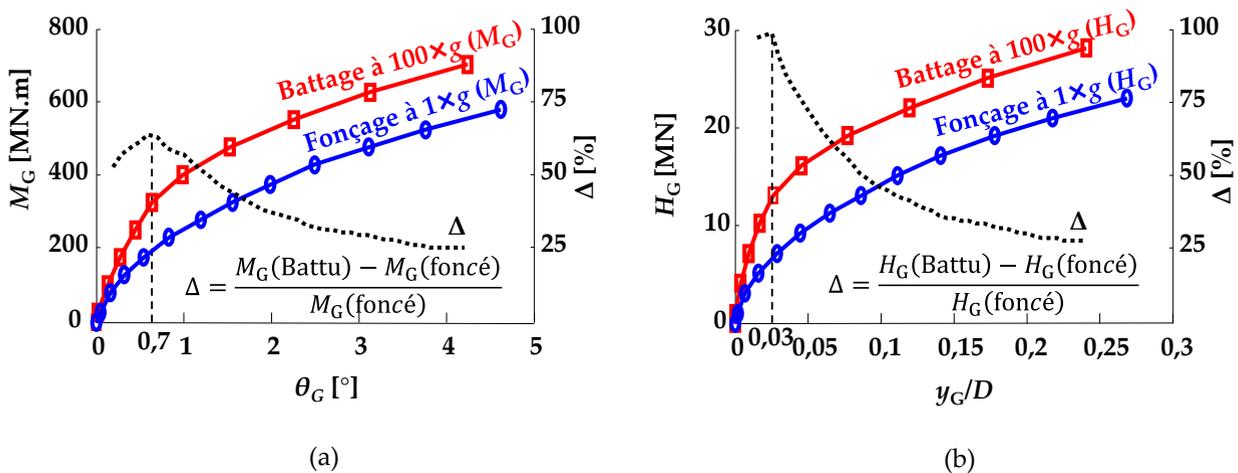


FIGURE 4. Réponse globale du monopieu pour les deux différentes méthodes d'installation (par battage à $100\times g$ et par fonçage à $1\times g$) : (a) le moment de flexion représenté en fonction de la rotation ($M_G-\theta_G$) ; (b) la charge horizontale tracée en fonction de la déflexion normalisée (H_G-y_G/D). Ainsi que, l'amélioration Δ apportée par l'installation par battage

tandis que la résistance latérale a augmenté de 45%. La résistance latérale obtenue dans cette étude est légèrement supérieure à celle rapportée par Fan *et al.* (2021a), qui ont obtenu une valeur de 31% pour un élancement de $3,1D$ dans du sable sec avec une densité relative de 38% et $l_e = 3,8D$.

TABLEAU 1. 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]
Battage à $100\times g$	541	553	515	20,6
Fonçage à $1\times g$	337	259	355	14,2

IV. EFFET DE LA PROFONDEUR D'ENCASTREMENT DU MONOPIEU SUR LA REPONSE HORIZONTALE

L'impact de la profondeur d'encastrement du monopieu sur son comportement latéral a été étudié en réalisant trois essais de chargement monotone sur un monopieu battu jusqu'à 250 mm ($5D$), 200 mm ($4D$) ou 150 mm ($3D$) de profondeur dans du sable dense saturé d'eau. Les résultats expérimentaux à l'échelle prototype sont comparés avec ceux obtenus par le modèle numérique aux éléments finis 1D implémenté dans le langage de programmation Python. L'approche numérique est basée sur un modèle de Winkler généralisé tel qu'il est employé dans le modèle de conception PISA (Burd *et al.*, 2020). Des comparaisons qualitatives et quantitatives sont effectuées.

A. Comparaison qualitative

La FIGURE 5 présente, au niveau du sol, la comparaison des courbes $M_G-\theta_G$ et H_G-y_G/D pour les

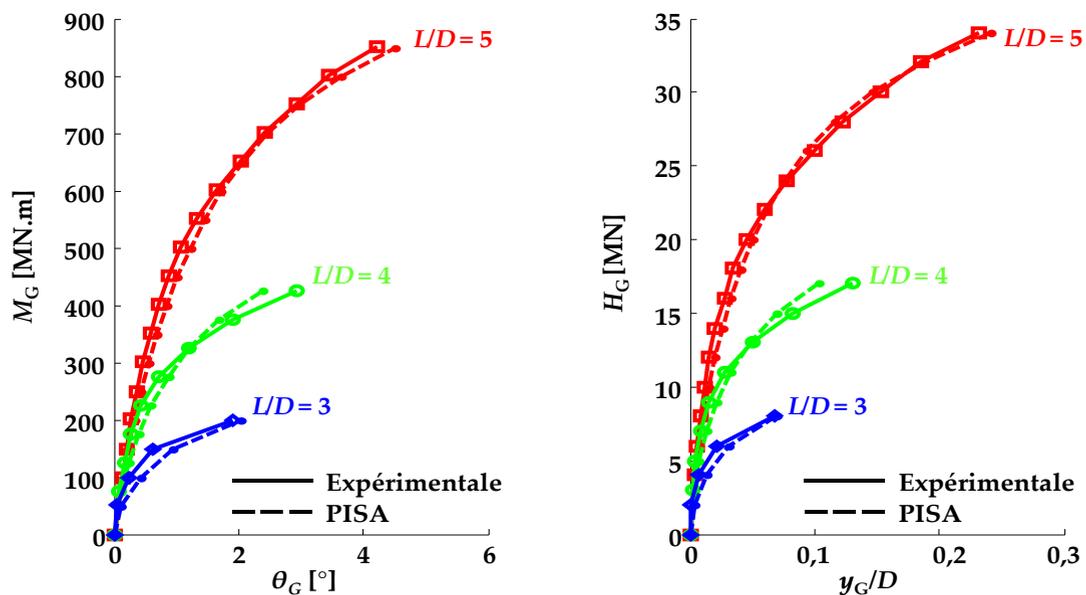


FIGURE 5. Comparaison de la réponse globale du monopieu entre les essais en centrifugeuse et la méthode de conception PISA pour les trois différentes profondeurs d'encastrement de 5, 4 et $3D$.

trois différentes profondeurs d'installation du monopieu ($5D$, $4D$ et $3D$) entre les essais modèles centrifugés et la modélisation numérique. Les résultats montrent que pour la même résistance, la rotation ou la déflexion normalisée diminue avec l'augmentation du rapport d'élanement. Cela confirme que le monopieu le plus élancé peut mieux résister aux chargements et aux moments de renversement. Globalement, la réponse du monopieu dérivée de la modélisation numérique, correspond bien à celle déduite des essais en centrifugeuse pour les trois différentes profondeurs d'encastrement.

B. Comparaison quantitative

Une comparaison quantitative de la rigidité sécante définie à $\theta_G = 0,5^\circ$ entre les résultats expérimentaux et numériques est effectuée. Dans les deux cas, l'amélioration de la rigidité sécante entre le pieu le plus court ($L = 3D$) et le pieu moyennement élancé ($L = 4D$) est environ deux fois supérieure à celle observée entre le pieu moyennement élancé et le pieu le plus élancé ($L = 4D$ et $5D$ respectivement).

V. CONCLUSIONS

Ces travaux ont été menés afin d'enrichir la connaissance du comportement des monopieux battus chargés horizontalement dans du sable dense saturé. En particulier, l'effet de l'installation par battage jusqu'à $5D$ de profondeur, et du rapport d'élanement ($L/D = 3$ à 5) sur la réponse latérale du monopieu sont explorées expérimentalement et les résultats obtenus sont comparés avec la méthode de conception PISA. Il a été pour cela nécessaire de réaliser : (1) une campagne expérimentale sur un monopieu modèle de 50 mm de diamètre en utilisant un nouveau dispositif qui permet de combiner, en centrifugeuse à $100\times g$, l'installation par battage suivi du chargement latéral du monopieu ; (2) un modèle numérique aux éléments finis 1D tel qu'il est employé dans le modèle de conception PISA.

Les principales conclusions exploitées des résultats sont : (1) l'impact du battage est plus prononcé pour de faibles amplitudes de chargement horizontal. En ce qui concerne l'état limite de service, l'installation par battage en vol a amélioré la rigidité sécante de 2 fois par rapport à l'installation par fonçage à gravité terrestre. Tandis que, pour un chargement horizontal important, mobilisant le sol très loin, la capacité latérale est accrue de 45% ; (2) le monopieu le plus élancé peut mieux résister aux chargements et aux moments de renversement ; (3) la méthode de conception PISA capte bien le comportement global des monopieux battus centrifugés chargés latéralement.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier l'Université Gustave Eiffel et la Région Pays de Loire pour le financement apporté à ces travaux, ainsi que le Weamec via le projet REDENV-EOL, le CPER PRIIC-MER et le projet ANR SOLCYP+ pour leurs apports quant aux développements expérimentaux et à l'instrumentation. De plus, un remerciement est adressé à l'équipe de la centrifugeuse pour leur support technique dans la réalisation des essais.

REFERENCES

- Bienen, B., Fan, S., Schröder, M., and Randolph, M.F. (2021). Effect of the installation process on monopile lateral response. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 1-19. <https://doi.org/10.1680/jgeen.20.00219>.
- Burd, H.J., Taborda, D.M.G., Zdravković, L. *et al.* (2020). PISA design model for monopiles for offshore wind turbines: application to a marine sand. *Géotechnique*, 70(11), 1048-1066, <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.277>.
- Byrne, B.W., McAdam, R., Burd, H.J. *et al.* (2015). New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications. In *Frontiers in offshore geotechnics III* (Meyer V (ed)). CRC Press/Balkema, Leiden, the Netherlands, pp. 705-710.
- DNVGL (Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd) (2016). Standard DNVGL-ST-0126: *Support Structures for Wind Turbines, April 2016*. DNVGL, Høvik, Norway.
- Fan, S., Bienen, B., and 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*, 21(1), 40-52. <https://doi.org/10.1680/jphmg.19.00013>.
- Fan, S., Bienen, B., and Randolph, M.F. (2021b). Effects of monopile installation on subsequent lateral response in sand. II: Lateral loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(5), 04021022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002504](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002504).
- Li, Z.S., Blanc, M., and Thorel, L. (2020). Using FBGS to estimate the horizontal response of a monopile in a geotechnical centrifuge. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 20(3), 164-174. <https://doi.org/10.1680/jphmg.19.00022>.
- Li, Z.S., Blanc, M., and 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., and Thorel, L. (2020). Development of a Hammer to drive monopiles of offshore wind turbines in Centrifuge. In Laue J. and Bansal T. (eds), *4th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, 89-93. Luleå University of Technology, Sweden.
- Maatouk, S., Blanc, M., and Thorel, L. (2021). Impact driving of monopiles in centrifuge: effect on the lateral response in sand. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 1-14. <https://doi.org/10.1680/jphmg.21.00035>.
- Taborda, D.M.G., Zdravković, L., Potts, D.M. *et al.* (2020). Finite-element modelling of laterally loaded piles in a dense marine sand at Dunkirk. *Géotechnique*, 70(11), 1014-1029, <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.PISA.006>.