

DEVELOPPEMENT D'UN BATTEUR POUR INSTALLER DES MONOPIEUX D'EOLIENNES EN MER EN CENTRIFUGEUSE

DEVELOPMENT OF A HAMMER TO DRIVE MONOPILES OF OFFSHORE WIND TURBINES IN CENTRIFUGE

Semaan MAATOUK¹, Matthieu BLANC¹, Luc THOREL¹

¹ Université Gustave Eiffel, GERS-GMG, Nantes, France

RÉSUMÉ – Un nouveau batteur en vol a été développé à l'Université Gustave Eiffel pour installer en centrifugeuse à 100xg des monopieux modèles supportant des éoliennes en mer. Ce batteur embarqué en centrifugeuse utilise un moteur électrique pour remonter le mouton. Il permet d'installer des monopieux ouverts en pointe de 5 m de diamètre jusqu'à plus de 20 m de profondeur.

ABSTRACT – A new in-flight hammer has been especially designed at the Gustave Eiffel University to drive in centrifuge at 100xg a model monopile for offshore wind turbine. The model pile driving device uses an electro-mechanical lift system to drive open ended aluminium piles into saturated dense sand. A recap of centrifuge pile drivers is presented as well as the development of a powerful pile driving hammer and the driving curve of a 5 m diameter prototype pile.

Keywords: Centrifugeuse; batteur; monopieu; éolienne en mer; sable.

1 Introduction

Les parcs éoliens offshore sont en développement depuis 1991 pour produire une énergie propre et renouvelable. Dans les eaux côtières peu profondes, où le fond marin est inférieur à 35 m, les fondations de type "monopieu" sont à ce jour la solution de fondation privilégiée pour les éoliennes offshore. Ces pieux sont des tubes ouverts en acier de grand diamètre, souvent installés dans des sables denses, généralement de 8 à 10 m de diamètre, de 30 à 50 m de long et pesant jusqu'à 1000 tonnes (Byrne et al., 2019).

Les fondations monopieux sont généralement installées par battage. Leur installation en mer peut durer jusqu'à plusieurs heures selon les dimensions des pieux, les conditions du sol et l'énergie d'impact développé par le batteur. Cette technique implique généralement des milliers de coups sur la tête du pieu. Trois principaux paramètres du batteur permettent de générer l'énergie souhaitée, à savoir la fréquence, la masse du mouton et la hauteur de chute. Un récapitulatif (complété par rapport à Levacher et al., 2008) des différents batteurs en vol développés en centrifugeuse est présenté dans le tableau 1.

Avec l'augmentation de la capacité des turbines (réduisant le coût de l'énergie renouvelable), des marteaux de plus en plus puissants sont nécessaires pour installer des monopieux de grand diamètre. Cependant, il existe peu d'études qui s'intéressent à l'installation des pieux de grand diamètre par battage (Heins et al., 2018, Fan et al., 2019). La présente étude décrit le développement d'un nouveau marteau électromécanique embarqué en centrifugeuse à 100 x g produisant une énergie d'impact de 3,2 J pour installer un monopile modèle de 50 mm de diamètre dans un sable dense

Tableau 1. Récapitulatif des principaux batteurs embarqués en centrifugeuse.

type de batteur	niveau de g	masse du mouton (g)	hauteur de chute (mm)	Fréquence (Hz)	Références
Pneumatique	100	95	62	2.5	Nunez et al., (1988)
Pneumatique	100	70 (max)	0 – 20 chute libre	0 – 20	De Nicola et al., (1994)
Electro-magnétique	31.2	163.8	0 – 32 chute libre	0.6	Levacher D. et Cottineau L.M.(1996)
Electro-mécanique	50	240 (max)	40 – 55 chute libre	35	Van Zeban et al., (2018)

saturé. Le nombre de coups du marteau est étudié en fonction de la profondeur de pénétration du monopieu.

2 Méthode

2.1. Modélisation physique en centrifugeuse

La modélisation physique en centrifugeuse est utilisée ici sur des modèles réduits installés dans un champ de macro gravité permettant la reproduction de l'état de contrainte du sol prototype. La centrifugeuse géotechnique de l'Université Gustave Eiffel (figure 1) a un rayon de 5,5 m et sa nacelle pivotante permet l'installation d'une masse embarquée de 2000 kg à 100 x g.

Le test présenté est effectué sur un pieu à l'échelle 1/100 soumis à 100 fois la gravité terrestre (100xg). Dans ce cas, les principales lois d'échelle (Garnier et al., 2007) utilisées pour relier le prototype en vraie grandeur au modèle réduit sont répertoriées dans le tableau 2: par exemple $x^* = x^{\text{model}} / x^{\text{prototype}}$.

Concernant l'écoulement d'eau, il suit la loi Darcy. Les processus de diffusion sont, en centrifugeuse, N^2 fois plus rapide qu'à l'échelle prototype. Par contre, le marteau doit battre à N fois la vitesse du prototype. Ainsi la vitesse de diffusion du fluide doit être réduite d'un facteur N dans le modèle. Cela peut être réalisé soit en réduisant la taille des particules du sol, soit en utilisant un fluide poreux visqueux (Kutter B.L., 1994). Cependant, pour cette étude préliminaire, l'échantillon de sol est saturé d'eau au lieu d'un fluide visqueux. Cela induit une courbe de battage qui ne représente pas le phénomène réel à l'échelle de l'ingénierie.

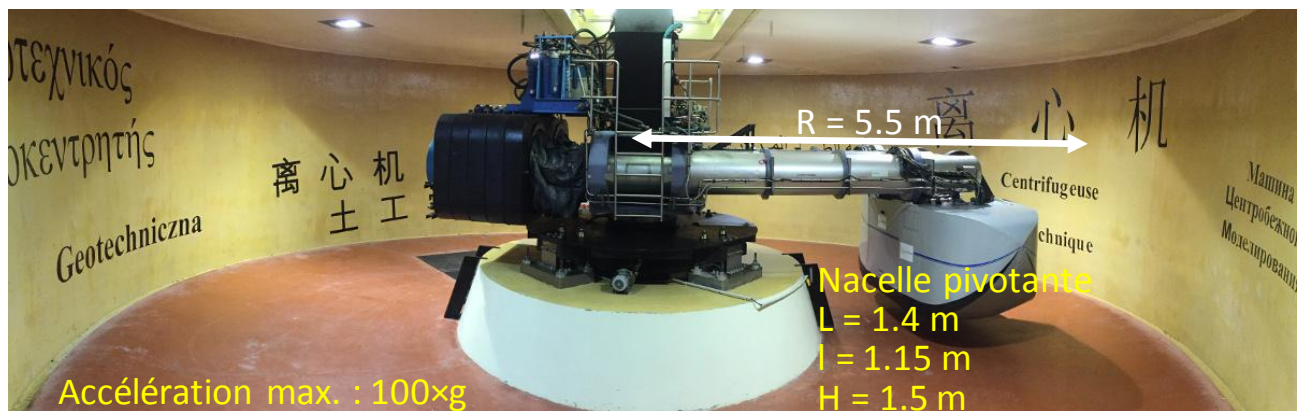


Figure 1. Centrifuge géotechnique de l'Université Gustave Eiffel.

Tableau 2. Lois de similitudes (avec N = 100).

Parameter	Notation	Unité	facteur d'échelle
Distance	x^*	L	1/N
Stress	σ^*	M/LT ²	1
Density	ρ^*	M/L ³	1
Gravity	g^*	L/T ²	N
Deformation	ε^*	-	1
Velocity	v^*	L/T	1
Acceleration	a^*	L/T ²	N
Frequency	f^*	1/T	N
Force	F^*	ML/T ²	1/N ²
Mass	m^*	M	1/N ³
Energy	E^*	ML ² /T ²	1/N ³
Blow count	n^*	-	1

2.2. Sol model

Le sol modèle est constitué d'un sable NE34 de Fontainebleau (tableau 3) à granulométrie resserrée avec une densité relative d'environ 80% obtenue par pluviation dans l'air dans conteneur rectangulaire de dimensions internes 1200 mm x 800 mm x 360 mm (longueur x largeur x hauteur).

Une fois le conteneur rempli de sable, une rehausse d'une hauteur de 120 mm (figure 2 (a)) est placée sur ce dernier. Ainsi, le massif peut être saturé par un écoulement vertical ascendant à travers quatre canaux de drainage situés à la base du conteneur. Le niveau d'eau se situe à environ 40 mm au-dessus de la surface de sable.

2.3. Monopieu modèle

Le monopieu modèle est une tube d'aluminium ouvert long de 525 mm avec un diamètre externe de 50 mm et une épaisseur de 2.5 mm. Ceci représente, à 100xg un monopieu prototype de 52.2 m de long avec un diamètre externe de 5 m et une épaisseur e 0.25 m

2.4. Description du batteur

Le montage expérimental présenté à la figure 2(a) permet l'installation en vol du monopieu par battage à 100xg. L'énergie d'impact choisie pour installer le pieu modèle jusqu'à une profondeur de 210 mm est de 3,2 J par coup (3200 kJ à l'échelle du prototype). Dans ce système, un vérin hydraulique à fût creux est fixé au-dessus de la rehausse. Un moteur électrique, lui-même fixé au-dessus de ce vérin, fait tourner une tige à l'intérieur du fût du vérin. A l'extrémité basse de cette tige est fixée à une fourchette qui permet la translation verticale du mouton rotatif (figure 2 (b)). Sur ce mouton, deux roulements en cylindres diamétralement opposés reposent sur un support en forme de vague. En tournant, le mouton remonte jusqu'à en haut de la vague, puis chute d'une hauteur pouvant aller jusqu'à 25 mm.

Pendant l'installation du pieu, le vérin vertical suit le pieu pénétrant le sol en maintenant une hauteur de chute choisie. Pour ce faire, un capteur de déplacement laser, fixé sur le vérin vertical, mesure la distance avec une cible fixée sur le pieu (figure 2(a)). En ajustant cette distance, la hauteur de chute peut être maîtrisée durant le battage du pieu.

Tableau 3. Caractéristiques du sable de Fontainebleau NE34 (Li et al., 2020).

Sand	d_{60}/d_{10}	d_{50} (μm)	ρ_{d-min} (kg/m^3)	ρ_{d-max} (kg/m^3)
Fontainebleau NE34	1.53	210	1434	1746

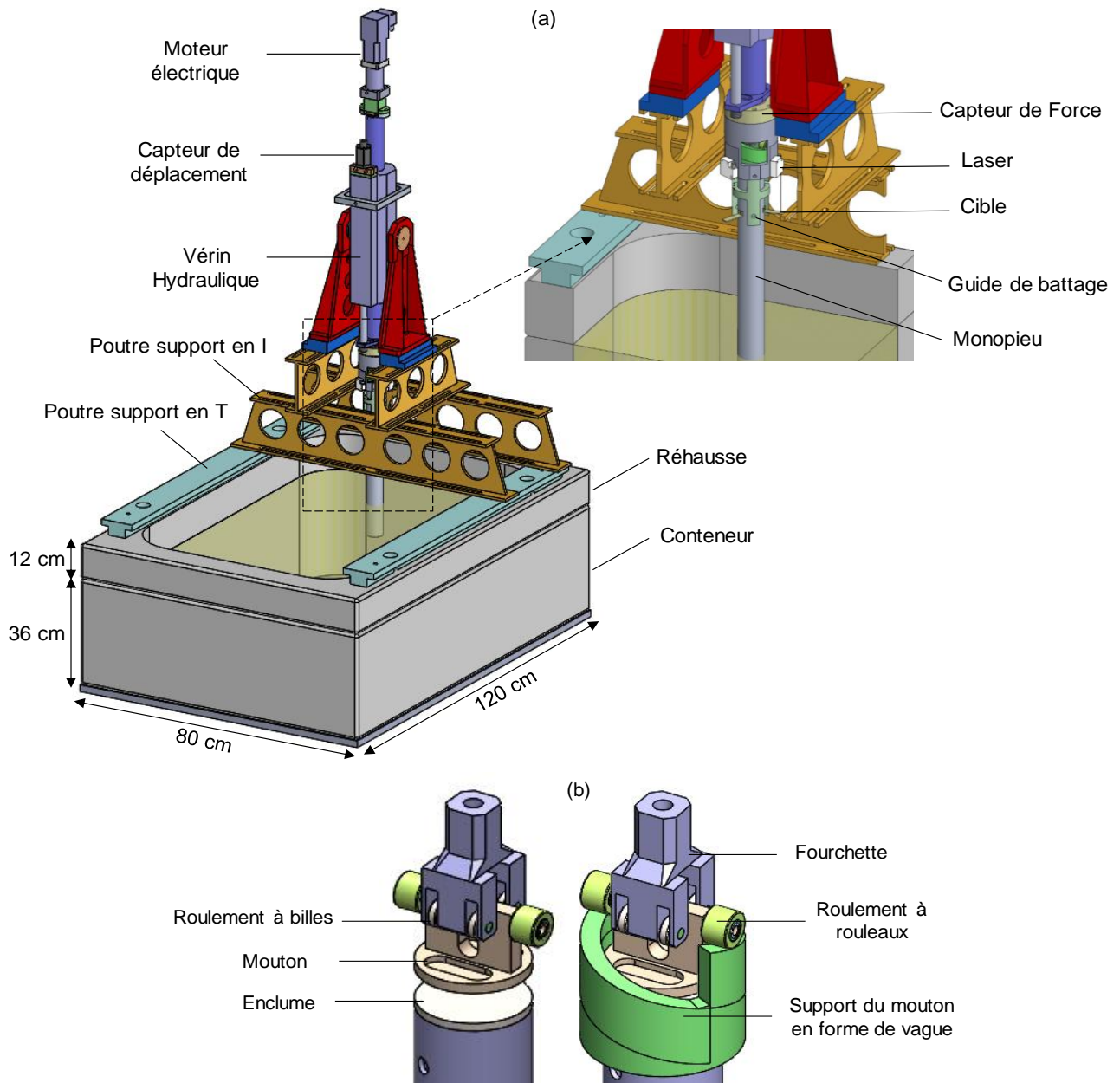


Figure 2. (a) Dispositif embarqué en centrifugeuse - batteur en vol, (b) Détails du système de chute libre.

L'énergie d'impact du batteur peut varier en ajustant de la hauteur de chute et de la masse du mouton. La masse du mouton utilisé dans cette étude est de 160 grammes et reste constant durant l'installation. Par contre, la hauteur de chute peut être ajustée au cours du battage entre 0 et 25 mm. Dans le cas présent, une hauteur de chute constante de 20 mm a été retenue pour battre un monopieu modèle de 50 mm de diamètre à 100xg.

3 Résultats

Sur site, les monopieux sont généralement installés par battage. Cette méthode d'installation a été reproduite en centrifugeuse à 100xg. La figure 3 montre le nombre de coups de marteau cumulé enregistré lors de l'installation en fonction de la fiche du monopieu. L'ordonnée à l'axe d'origine représente la pénétration du monopieu sous son poids propre à 100 x g. Avant de commencer le battage, cette profondeur est d'environ 2,8 m à l'échelle du prototype, soit 56% du diamètre du pieu. 4932 coups sont

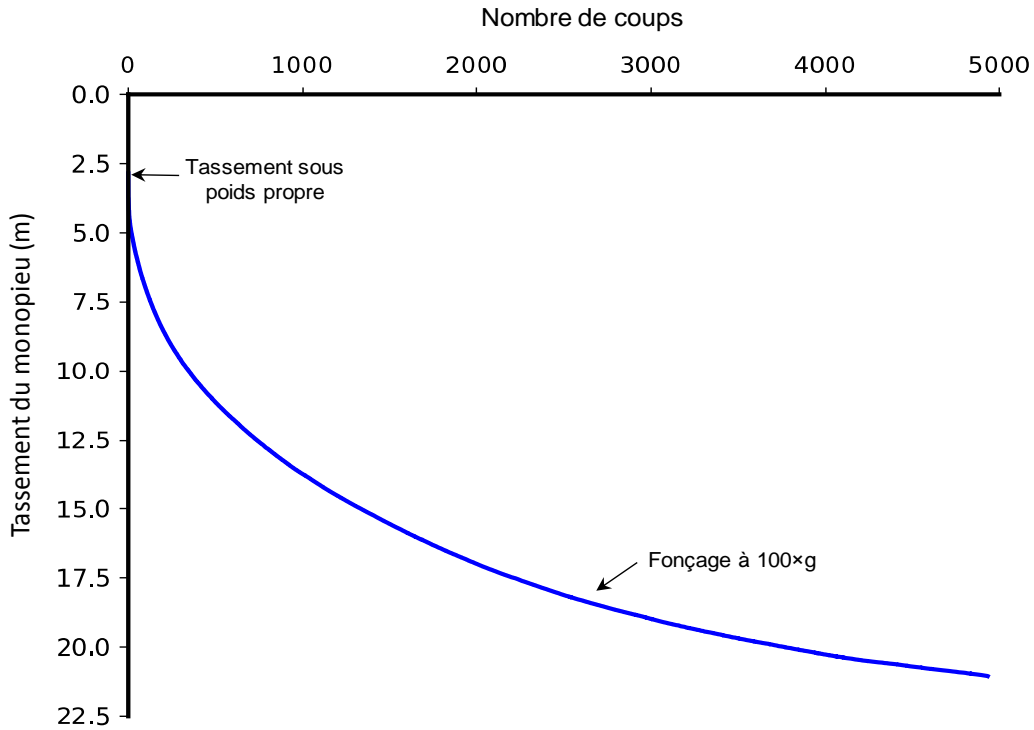


Figure 3. Courbe de battage (échelle prototype).

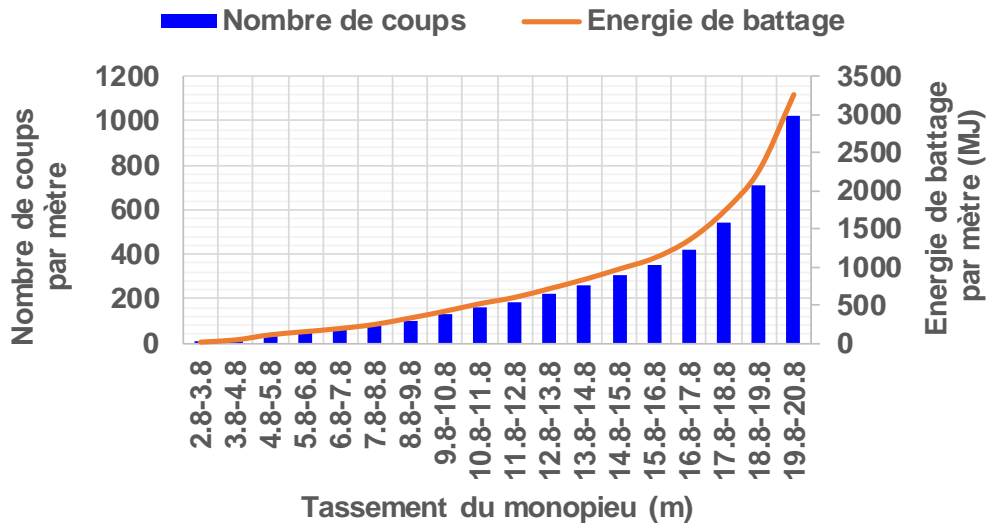


Figure 4. Nombre de coups et énergie de battage nécessaire par mètre lors de l'installation (échelle prototype).

nécessaires pour enfoncer le pieu jusqu'à 21 m. Comme prévu, le nombre de coups ainsi que l'énergie délivrée requise par mètre de pénétration augmentent de façon exponentielle avec la profondeur de pénétration (figure 4).

4 Conclusions

Un nouveau batteur en vol a été conçu pour installer en centrifugeuse à 100xg un monopieau ouvert en peinture à l'échelle 1/100 de 50 mm de diamètre. Ce batteur permet la chute libre sur 20 mm d'un mouton de 160 grammes. Ainsi, l'énergie délivrée par coup est de 3,2 J. Pour installer le monopieau modèle dans un sable de Fontainebleau dense et

saturé d'eau, 4932 coups sont nécessaires pour pénétrer le sol jusqu'à 21 m de profondeur.

5 Perspectives

Afin d'étudier le processus de battage, un accéléromètre sous l'enclume et une mesure de la force en tête du tube seraient nécessaires. De plus, l'échantillon de sable devrait être saturé de fluide visqueux afin vérifier les lois de similitudes sur le temps. Une fois le monopieu installé, sans arrêter la centrifugeuse, un vérin électromécanique positionné horizontalement pourrait venir charger (monotoniquement ou cycliquement) un monopieu instrumenté de fibres optiques à réseaux de Bragg de fibres afin d'étudier les courbes P-y (Li et al., 2020).

6 Remerciements

Le premier auteur souhaiterait remercier l'Université Gustave Eiffel et la Région Pays de Loire pour le financement de sa bourse de thèse. Ce nouveau dispositif expérimental a été développé dans le cadre du projet SOLCYP+ supporté par France Energies Marines et l'ANR (ANR-10-IEED-0006-18). Les auteurs souhaitent également remercier le WEAMEC au travers des projets REDENV-EOL et JE-CORECT), la Région Pays de Loire, Nantes Métropoles et CARENE pour leur support financier.

Pour finir, un grand remerciement est adressé à l'équipe technique de la centrifugeuse sans qui ce batteur n'aurait pu voir le jour.

7 References

- Byrne, B.W., Burd, H.J., Zdravkovic, L., McAdam, R.A., Taborda, D.M.G., Houlsby, G.T., Jardine, R.J., Martin, C.M., Potts, D.M., Gavin, K.G. 2019. PISA: new design methods for offshore wind turbine monopiles. *Revue Française de Géotechnique*, 158(3). <https://doi.org/10.1051/geotech/2019009>.
- De Nicola, A. and Randolph, M.F. 1996. Development of a miniature pile driving actuator. *Proceedings Centrifuge 94*, Editor Leung, Lee and Tan, Rotterdam: A.A. Balkema, 473-478.
- Fan, S., Bienen B. and Randolph, M.F. 2019. Centrifuge study on effect of installation method on lateral response of monopiles in sand. *International Journal of physical modelling in Geotechnics*. <https://doi.org/10.1680/jphmg.19.00013>.
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S.M., Culligan, P.J., Goodings, D., König, D., Kutter, B., Phillips, R., Randolph, M.F., Thorel, L. 2007. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *International Journal of physical modelling in Geotechnics*, 17(3), 1-24.
- Heins, E., Bienen, B., Randolph, M.F., Grabe, J. 2018. Effect of installation method on static and dynamic load test response for piles in sand. *International Journal of physical modelling in Geotechnics*. <https://doi.org/10.1680/jphmg.18.00028>.
- Kutter, B.L. (1994). "Recent advances in centrifuge modelling of seismic shaking," state-of-the-Art Paper. *Proceedings 3rd International Conference on recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil dynamics*, St. Louis, 2, pp. 927-942.
- Levacher, D., Cottineau, L.M. 1996. Pile driving hammers in centrifuge modelling, 6th International Conference and Exhibition on Piling and deep foundations, Bombay, India, 15 – 17 January, 8p.
- Levacher D., Morice Y., Thorel L., 2008 Miniature pile drivers for centrifuge testing. 8th Int. Conf. Application of Stress Wave theory to piles. *Science, Technology and Practice*. J.A. Santos (Ed.) Lisbon 8-10 sept. ISBN 978-1-58603-907-7, IOS Press, pp.359-364.

- Li ZS., Blanc, M., Thorel, L. 2020. Using FBGS to estimate the horizontal response of a monopile in a geotechnical centrifuge. International Journal of physical modelling in Geotechnics. <https://doi.org/10.1680/jphmg.19.00022>.
- Nunez, I.L., Hoadley, P.J., Randolph, M.F., Hullet, J.M. 1998. Driving and tension loading of piles in sand on a centrifuge. Proceeding Centrifuge 88, Editor Kimura, Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 353-362.
- Van Zeban J.C.B, Azua-Gonzalez C., Alvarez Grima M., Van't Hof C., Askarinejad A., (2018). Design and performance of an electro-mechanical pile driving hammer for geo-centrifuge. Proceedings of the International Conference on Physical modelling in Geotechnics, London, UK, 1, pp. 469-473.