

# L'effet de la méthode d'installation sur la capacité des pieux en traction

Ismat EL HAFFAR<sup>1</sup>, Matthieu BLANC<sup>2</sup>, Luc THOREL<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IFSTTAR, GERS Dept., Geomaterials & Models in Geotechnics Lab.,F-44344 Bouguenais, France, Ismat.el-haffar@ifsttar.fr

<sup>2</sup> IFSTTAR, GERS Dept., Geomaterials & Models in Geotechnics Lab.,F-44344 Bouguenais, France, Matthieu.blanc@ifsttar.fr

<sup>3</sup> IFSTTAR, GERS Dept., Geomaterials & Models in Geotechnics Lab.,F-44344 Bouguenais, France, Luc.thorel@ifsttar.fr

---

*RÉSUMÉ. Un programme expérimental utilisant un pieu modèle a été réalisé dans la centrifugeuse de l'IFSTTAR à 100×g pour étudier les effets des techniques d'installations sur la capacité des pieux en traction. Les pieux sont installés en utilisant plusieurs méthodes de fonçage à 1×g ou à 100×g dans le conteneur métallique de l'IFSTTAR rempli de sable Fontainebleau NE34 dense. Les différentes techniques de fonçage utilisées pour installer le pieu à 100×g montrent un gain intéressant dans la capacité de la traction du pieu foncé cycliquement par rapport à la capacité du pieu foncé d'une manière monotone. La dilatation du sable dense a été considérée comme un phénomène géomécanique possible qui pourrait être à l'origine de cette augmentation de la capacité des pieux cycliquement foncés.*

*ABSTRACT. An experimental program using a model pile has been realized in the centrifuge of IFSTTAR at 100×g to study the effects of installations technics on the axial capacity of piles. The piles are installed using several methods of jacking at 1×g or at 100×g in the metallic container of l' IFSTTAR filled with dense Fontainebleau NE34 sand. The different jacking technics used to install the pile at 100×g show an interesting gain in the tension capacity of the cyclically jacked pile compared to the capacity of monotonically jacked pile. The dilatation of the dense sand has been considered as a possible geomechanical phenomena which could originate this increase in the capacity of the cyclically jacked piles.*

*MOTS-CLÉS : pieux, capacité axial, modélisation physique, centrifugeuse.*

*KEY WORDS: piles, axial capacity, physical modelling, centrifuge.*

---

## 1. Introduction

Dans la littérature, l'utilisation des pieux battus et la capacité de ce type de pieux a été étudiée d'une manière approfondie (Randolph et al. 1994; Jardine et al. 2005; Puech et Benzaria 2013). Si ces études ont conduit à la réduction des incertitudes liées à la capacité axiale des pieux battus et à l'élaboration de certaines approches et normes bien utilisées pour le dimensionnement de ce type de pieux (API, Eurocode 7, ICP (Jardine et al. 2005)). Le procédé d'installation des pieux battus provoque un niveau élevé de bruit et de vibrations et de mouvements du sol. En alternative à cette méthode d'installation, l'utilisation des pieux foncés pouvant être placés à l'aide d'un vérin hydraulique a reçu une attention croissante dans ces dernières années, en raison de la possibilité de foncer ces pieux sans bruit ni vibration, ce qui leur permet d'être plus adaptés à l'utilisation urbaine et d'être acceptables par les limites européennes actuelles (Eurocode 3, White et al. 2002). Mais en comparaison avec les pieux battus, le comportement du pieu foncé n'est pas bien connu et peu de recherches ont été faites pour l'étudier et le comparer à la capacité des pieux battus (Yu et al. 2012; Yang et al. 2006). Afin de mieux comprendre les développements sur la capacité axiale des pieux foncés et de comparer ce type de pieux avec la capacité obtenue par les autres méthodes d'installation un programme expérimental a été organisé sur la centrifugeuse de l'IFSTTAR pour étudier la capacité axiale statique d'un pieu fermé dans du sable dense en utilisant différentes méthodes d'installation.

## 2. Méthodologie

### 2.1. MODELISATION A LA CENTRIFUGEUSE

Malgré l'existence de plusieurs techniques utilisées dans les études géotechniques, la modélisation par centrifugation reste l'une des techniques les plus utilisées et les plus puissantes dans ce domaine grâce aux avantages que l'utilisation de la centrifugeuse peut donner concernant la répétabilité des études et le coût réduit que l'utilisation de la modélisation par centrifugation peut offrir par rapport à l'utilisation des tests in-situ.

La modélisation par centrifugation consiste en l'utilisation d'un petit modèle installé dans un champ de gravité élevé pour permettre la réplique de l'état de contrainte qui existe dans le sol au niveau du prototype. Cette technique est basée sur quelques lois de similitude qui doivent être respectées, alors afin de pouvoir tester un modèle à l'échelle  $1/N$ , la centrifugeuse doit appliquer un niveau d'accélération de  $N$  fois la gravité de la terre. Tous les tests présentés dans cet article ont été effectués à un niveau d'accélération de 100 fois la gravité de la Terre ( $100\times g$ ).

### 2.2. PIEU MODELE

Le pieu modèle utilisé dans cette étude est un pieu rugueux et rigide qui a les dimensions suivantes  $B = 18$  mm et  $D = 250$  mm. Il représente un pieu prototype de 1,8 m de diamètre et 25 m de profondeur d'encastrement.

Le pieu modèle est relié au vérin hydraulique de manière à ce qu'aucun moment de flexion ne puisse être développé et la capacité totale du pieu peut être directement connue en utilisant un capteur situé entre la tête du pieu et le vérin hydraulique (fig. 1-a).

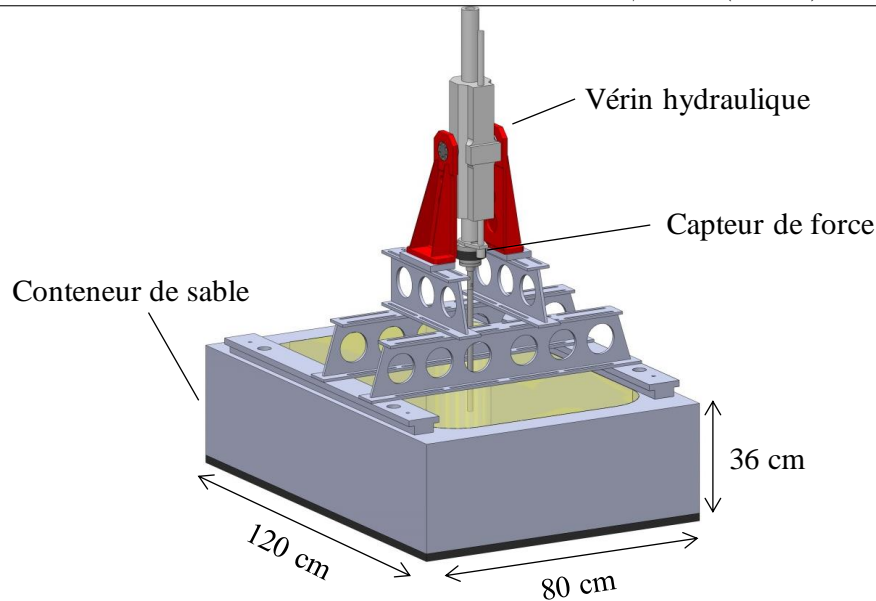
### 2.3. SOL MODELE

Le sol modèle est le sable de Fontainebleau NE34, qui a une densité minimale de  $1,46 \pm 0,002$  g / cm<sup>3</sup> et une densité maximale de  $1,71 \pm 0,001$  g / cm<sup>3</sup> testé en laboratoire selon la norme et un diamètre de particule moyen de 0,2 mm (Dano et al. 2004).

Dans cette campagne expérimentale, le conteneur rectangulaire rigide de l'IFSTTAR est rempli de sable en utilisant la technique de pluviométrie développée à l'IFSTTAR pour obtenir la densité de sable relative désirée de 99%.

### 2.4. L'INSTALLATION DES PIEUX ET CAMPAGNE EXPERIMENTALE

Deux types de techniques d'installation sont utilisés dans cette étude; la première est utilisée pour représenter les effets d'installation et les contacts entre le pieu et le sol qui peuvent être développés lors de l'installation des pieux forés. La deuxième technique est utilisée pour représenter les effets de l'installation et le déplacement du sol qui se développent lors de l'installation des pieux foncés.



**Figure 1.** Montage expérimental (dimension intérieur)

Dans la première méthode (MJP1G), les pieux sont foncés à  $1\times g$  à la profondeur d'ancrage souhaitée de 250 mm avant l'application du niveau de  $100\times g$  et l'essai de traction lui-même.

Dans la deuxième méthode, chaque pieu est foncé en vol jusqu'à 250 mm de profondeur et les tests sont effectués à  $100\times g$  sans arrêter la centrifugeuse mais différentes techniques de fonçage sont utilisées pour étudier l'influence de ces techniques sur la capacité axiale des pieux :

MJP100G : Le pieu a été foncé d'une manière monotone avec une vitesse de 0,1 mm/s puis un essai de traction a été réalisé.

CJP25: Le pieu est foncé en utilisant une série de paliers de fonçage où chaque palier est égal à 25 mm en utilisant la même vitesse du test précédent puis la force a été relâchée jusqu'à zéro. Le fonçage continue de la même manière et l'étape précédente est répété tous les 25 mm pour atteindre l'encastrement requis de 250 mm ; puis à la fin du fonçage un test de traction a été réalisé.

CJP10, CJP5 et CJP2.5 suivent la même procédure d'installation que CJP25 ; la seule différence est la longueur des paliers de fonçage qui est de 10 mm pour CJP10, 5 mm pour CJP5 et 2,5 mm pour CJP2.5.

Dans la figure 2, un graphique de chargement vs déplacement du test CJP25 présente en exemple de fonçage par paliers. Tous les essais qui seront présentés (tableau 1) sont choisis entre les essais réalisés dans des conteneurs de sable dense et avant l'installation et la réalisation des essais une phase de stabilisation est réalisée dans la centrifugeuse sur chaque conteneur où l'accélération centrifuge est augmentée à  $100\times g$  et stabilisée à ce niveau pendant deux minutes puis l'accélération est abaissée à  $1\times g$ . Après avoir répété deux fois la même procédure de stabilisation, si le pieu utilisé est foncé à  $100\times g$ , l'accélération de la centrifugeuse est portée à  $100\times g$  et maintenue à ce niveau et le fonçage à l'aide d'un vérin hydraulique commence. Dans le cas contraire, si le pieu utilisé est foncé à  $1\times g$ , la centrifugeuse sera arrêtée et le pieu sera foncé à  $1\times g$ .

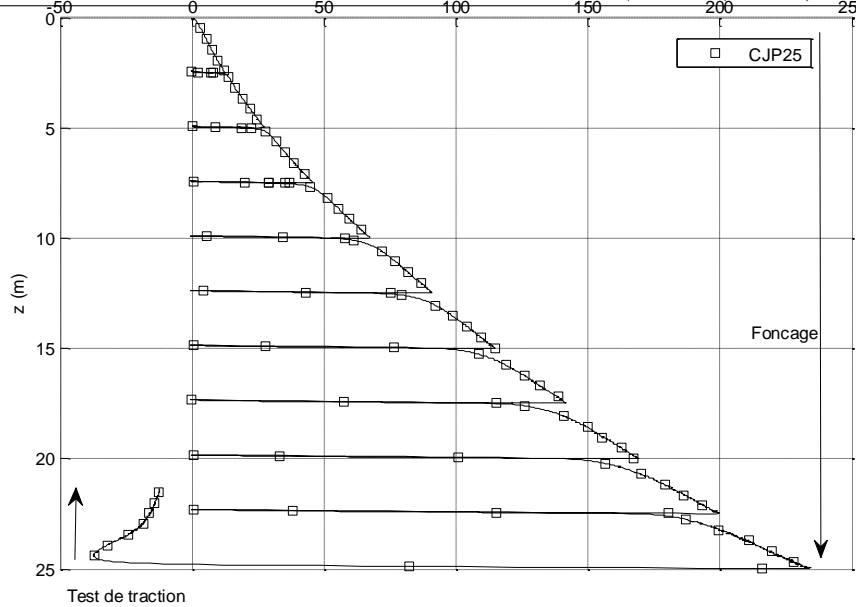


Figure 2. Pieu foncé en utilisant des paliers de 2.5 m

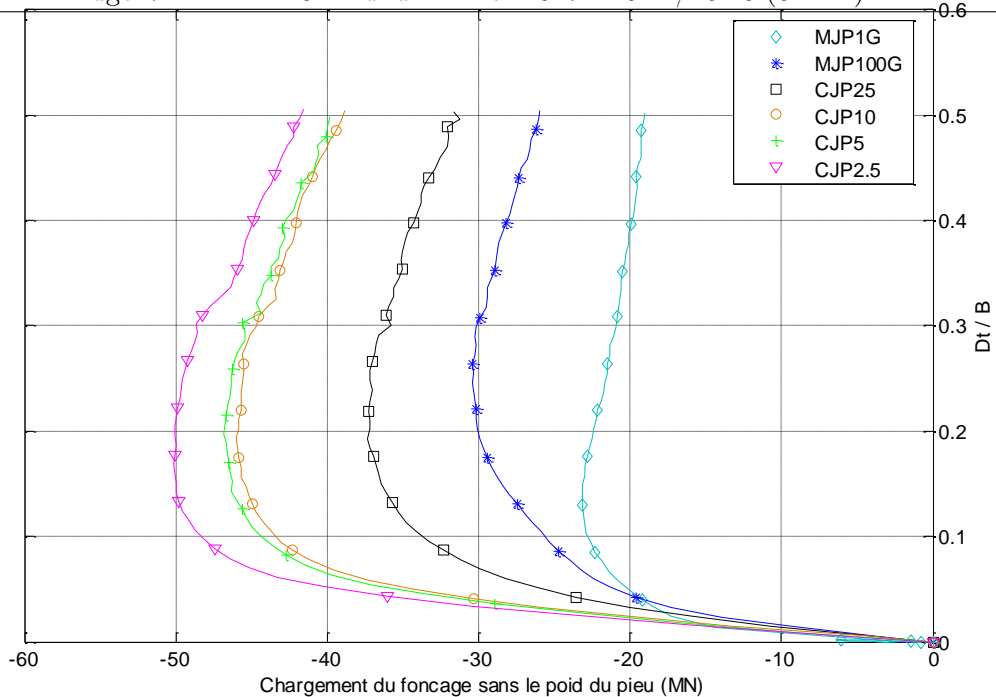
Tableau 1. Campagne expérimentale

Test	Description
MJP1G	Pieu foncé à 1×g
MJP100G	Pieu foncé d'une manière monotone à 100×g
CJP25	Paliers de fûtage de 25 mm
CJP10	Paliers de fûtage de 10 mm
CJP5	Paliers de fûtage de 5 mm
CJP2.5	Paliers de fûtage de 2.5 mm

### 3. Analyses des tests de traction

Avec le développement de l'utilisation des fondations profondes dans les nouveaux projets d'ingénierie, l'utilisation des pieux non seulement en compression mais aussi en traction se propage (maintien des tours électriques, applications dans les éoliennes en mer,...). Cette propagation dans l'utilisation des pieux en traction a conduit à l'augmentation des études réalisées sur la capacité de traction des pieux. Dans la suite de ces travaux, la capacité de traction des pieux utilisés dans cette campagne a été étudiée et tous les résultats obtenus à partir les différentes techniques d'installation utilisées sont rassemblés dans un graphique (figure 3), où seulement la partie de traction des courbes chargement-déplacement est représentée et le déplacement de traction est normalisé par le diamètre du pieu, et dans le tableau 2. La méthode utilisée pour déterminer et extraire la capacité de traction des pieux à partir de la courbe force-déplacement est bien expliquée dans Blanc et Thorel (2016).

Tout d'abord, la figure 3 montre que la capacité de traction du pieu MJP100G foncé à 100×g est supérieure à la capacité du pieu MJP1G foncé à 1×g mais il n'y a pas de grande différence entre les deux pieux.



**Figure 3.** Comparaison des tests en traction

En revanche, en ce qui concerne la comparaison de la capacité de traction des pieux foncés à 100×g en utilisant les différentes techniques de fonçage, le graphique montre clairement que la capacité de traction des pieux (voir tableau 2) augmente avec l'augmentation du nombre des paliers cycliques. Ces résultats soulèvent quelques questions sur (1) la raison de ce gain de capacité avec l'augmentation des paliers cycliques utilisés lors du fonçage des pieux et à propos (2) la capacité de traction ultime réelle de ces pieux qui doit être utilisée dans d'autres calculs: par exemple, dans la constitution du diagramme de stabilité cyclique (Poulos et al. 1988) qui est utilisé pour préciser la stabilité des pieux sous charge cyclique.

Il est connu que la capacité en traction des pieux est essentiellement dérivée du frottement latéral (Al-Mhaidib et Edil 1999), c'est pourquoi les phénomènes qui conduisent à cette augmentation de la capacité de traction doivent être en relation avec le frottement latéral des pieux. En comparaison avec d'autres études, ces résultats montrent une contradiction avec le principe de la fatigue du frottement observé lors du battage des pieux où l'on constate que la contrainte latérale développée lors de l'installation dynamique est moindre que la contrainte latérale développée autour du pieu pendant l'installation monotone (White et Lehane 2004).

Le phénomène qui peut donner ce type de gain dans la capacité est la dilatation du sable car lors de l'installation des pieux avec refoulement dans du sable dense le sol connaît des niveaux élevés de cisaillement et les sols ont tendance à se dilater générant des contraintes de contact latérales élevées (Swan, 2017). Cette conclusion est en bon accord avec les résultats trouvés par Lehane et White 2005 : l'installation cyclique crée soit une dilatation plus importante lors du chargement du pieu ou un confinement plus rigide à la suite de la densification du sol environnant. Lehane et White ont également constaté dans leur étude où ils avaient étudié différentes techniques d'installation semblables à celles utilisées dans notre étude, que la capacité de retrait des pieux installés de façon monotone était de seulement 60% de celle des pieux cycliquement installés. L'idée de la dilatation se retrouve également dans les travaux de Lings et Dietz 2005 où ils ont observé que dans le cas des surfaces intermédiaires et rugueuses en contact avec du sable, le mouvement des particules se caractérise de plus en plus par un roulement, ce qui entraîne une dilatation et que l'augmentation de la rugosité et de la densité entraînent une dilatation accrue et une augmentation de la résistance résultante.

En plus de la comparaison entre les essais expérimentaux, certains résultats des normes utilisées pour le dimensionnement des pieux sont présentés dans le tableau 2. La méthode ICP qui est une méthode basée sur le test CPT mais avec l'utilisation de 35° (Tejchman et Wu 1995) comme angle de frottement entre le pieu rugueux et le sable qui semblait être plus adéquat à nos conditions d'études (densité de sable, rugosité du pieu ...) que le 29° proposé dans le document ICP donne un niveau de force supérieur à celui du pieu foncé d'une manière

monotone à 100×g (MJP100G) en phase de LAPI 2017 dans l'appareil NF 2017 à 1600 (02 méthode) des conservatives et donnent des résultats inférieurs aux expérimentations.

**Tableau 2.** Capacité statique ultime en traction

Test	Traction Prototype (MN)
MJP1G	-23
MJP100G	-30
CJP25	-37
CJP10	-46
CJP5	-47
CJP2.5	-50
ICP	-37
API	-20
NF	-11

#### 4. Conclusion

Le pieu modèle de 250 mm de profondeur d'encastrement et 18 mm de diamètre a été testé dans la centrifugeuse de l'IFSTTAR à 100×g pour déterminer la capacité axiale. Plusieurs techniques d'installation ont été utilisées et les résultats sont présentés.

Tout d'abord la comparaison concerne la capacité de traction des pieux où l'effet des techniques d'installation sur la capacité de soulèvement des pieux a été étudié. La différence la plus importante a été trouvée dans les pieux foncés à 100×g entre les pieux monotoniement foncés ou en utilisant plusieurs types de paliers de fonçage et les résultats montrent un gain jusqu'à 67% dans la capacité de soulèvement avec l'augmentation des paliers d'installation cyclique. Ces résultats soulèvent de nombreuses questions sur l'origine de ce gain dans la capacité; Une explication a été développée et discutée dans cet article reliant le gain de la capacité avec la dilatation du sable observée habituellement dans les cas de contact de surface rugueuse avec du sable dense.

En plus, une comparaison avec les normes a été effectuée. Ces normes montrent des résultats conservatifs par rapport au travail expérimental et aucun moyen n'a été trouvé dans ces méthodes pour prédire le gain de capacité trouvé dans les tests de traction. De plus, aucune recommandation n'a été donnée dans ces normes pour tenir compte de l'influence que l'installation cyclique peut avoir sur la capacité axiale des pieux.

#### 5. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier IFSTTAR et la région des Pays de la Loire pour le financement de la thèse dans laquelle ces résultats ont été obtenus et les personnels de la centrifugeuse de l'IFSTTAR pour leur soutien technique et leur aide lors du programme des tests à la centrifugeuse.

#### 6. Bibliographie

- [MHA 99] AL MHAIDIB A.I., EDIL T.B., « Effects of Pile Installation Method on Uplift Capacity of Piles in Sand », *The Fourth Saoudi Engineering Conference*, Jeddah 1995, 73-79.
- [API 11] API RP 2GEO, *Geotechnical and foundation design considerations*, 2011, 120p.
- [BLA 16] BLANC M., THOREL L., « Effects of cyclic axial loading sequences on piles in sand », *Géotechniques Letters* 6, 2016, 1-5.
- [DAN 04] DANO C., HICHER C.-Y., TAILLIEZ C., « Engineering properties of grouted sands », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, Vol 130 No 3 p 328.

- [EUR 05] EUROCODE 7, *Geotechnical design – Part 1 general rules*, 2005, NF EN 1997, 145p.
- [JAR 05] JARDIN R., CHOW F., OVERY R., STANDING J., « ICP design methods for driven piles in sands and clays », *Thomas Telford*, 2005, London, 105p.
- [LEH 05] LEHANE B.M., WHITE D.J., « Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles in sand », *Can. Geotech.J.*, 2005, 42:1039-1052.
- [LIN 05] LINGS M.L., DIETZ M.S., « The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation », *SOILS AND FOUNDATIONS*, 2005, Vol 45, No 6, 1-14.
- [NOR 12] NORME FRANCAIS, *Justification des ouvrages géotechniques-Norme d'application nationale de l'Eurocode 7*, 2012, NF P 94-262.
- [POU 88] POULOS H.G., « Cyclic stability diagram for axially loaded piles », *J. Geotech. Engrg*, 1988, 114. 877-895.
- [PUE 13] PUECH A., BENZARIA O., « Effects of installation method on the static behaviour of piles in highly overconsolidated Flanders clay », *Proceedings of TC 209 Workshop – 18th ICSMGE, Paris 4 september 2013*, 2013, Design for cyclic loading: Piles and other foundations. 69-72.
- [RAN 94] RANDOLPH M.F., DOLWIN J., BECK R., « Design of driven piles in sand », *Géotechnique* 44, 1994, No. 3, 427-448.
- [SWA] SWAN C.C., *Supplemental Notes : Changes in soil during pile driving*, 53:139 Foundation engineering. Vue en 2017 <http://www.engineering.uiowa.edu/~swan/courses/53139/notes/changes-in-soil-during-pile-driving.pdf>
- [TEJ 95] TEICHMAN J., WU. W., « Experimental and numerical study of sand-steel interfaces », *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 1995, vol 19, 513-536.
- [WHI 02] WHITE D., FINLAY T., BOLTON M., BEARSS G., « Press-in piling: Ground vibration and noise during pile installation », *Proceedings of the International Deep Foundations Congress*, Orlando, USA 2002, ASCE Special Publication 116. pp363-371.
- [WHI 04] WHITE D.J., LEHANE B., « Friction fatigue on displacement piles in sand », *Géotechnique* 54, 2004, No. 10, 645-658.
- [YAN 06] YANG J., THAM L.G., LEE P.K.K., CHAN S.T., YU F., « Behaviour of jacked and driven piles in sandy soil », *Géotechnique* 56, 2006, No. 4, 245-259.
- [YU 12] YU F., KOU H., LIU J., YANG Y., « Jacking Installation of Displacement Piles : from Empiricism toward Scientism », *EJGE*, 2012, vol. 17 Bund. J. 1381-1390.