

Diagrammes de stabilité cyclique de pieux dans les sables

Cyclic stability diagrams for piles in sands

Puech A., Benzaria O.
Fugro GeoConsulting, Nanterre, France

Thorel L., Garnier J.
IFSTTAR, Nantes, France

Foray P., Silva M.
3S-R, Grenoble, France

Jardine R.
Imperial College, London, UK

RÉSUMÉ: Cette communication rassemble des diagrammes de stabilité cyclique obtenus dans des sables siliceux denses et par des moyens expérimentaux variés : essais in situ sur pieux réels, essais sur pieux modèles en grande chambre d'étalonnage et essais sur pieux modèles centrifugés. Elle couvre le cas des pieux battus en traction et celui des pieux forés en compression. Les diagrammes cycliques de stabilité sont des outils précieux pour une première estimation de l'effet des chargements cycliques sur le comportement axial des pieux.

ABSTRACT: This paper gathers cyclic stability diagrams obtained from various experimental sources: in situ tests on actual piles, laboratory tests on model piles in a large calibration chamber and model piles in a centrifuge. Driven piles in tension and bored piles in compression are addressed. Cyclic stability diagrams are useful tools for a preliminary assessment of the effects of cyclic loadings on the behaviour of piles.

MOTS-CLÉS: pieu battu, pieu foré, chargement cyclique axial, diagramme de stabilité cyclique

KEYWORDS: driven pile, bored pile, axial cyclic loading, cyclic stability diagrams

1 INTRODUCTION

Le concept de diagramme de stabilité cyclique pour représenter de manière synthétique la réponse des pieux soumis à des chargements cycliques axiaux a été introduit dans les années 80 par Karlsrud et al. (1986) pour les argiles et par Poulos (1988) pour les sables.

Ce concept se révèle particulièrement utile pour juger en première estimation de l'effet potentiel des chargements cycliques sur la réponse des pieux (Jardine et al., 2012)

On dispose en pratique de peu d'éléments dans les sables. La présente communication propose des diagrammes cycliques applicables aux pieux battus et aux pieux forés dans les sables denses.

2 ESSAIS EN TRACTION

2.1 Essais de Dunkerque (ICL)

Sept pieux tubulaires en acier à base ouverte non instrumentés ont été testés par l'Imperial College de Londres (ICL) sur un site de sable marin dans le secteur Industriel Ouest du port de Dunkerque, France (Jardine & Standing, 2000). Le profil du sol est caractérisé par 3 m de remblai hydraulique sur du sable des Flandres. Le sable est composé principalement de quartz (84%), d'albite et microcline (8%) et de débris de coquillages CaCO₃ (8%). Les profils pénétrométriques (q_c) du site varient entre 10 et 35 MPa selon la profondeur et l'emplacement. La densité relative est en moyenne d'environ 75%. Des essais de cisaillement direct et triaxiaux indiquent un angle de frottement de pic ϕ' de 35 à 40° et une valeur d'état critique $\phi'_{cv} \sim 32^\circ$. Des renseignements supplémentaires sur les caractéristiques du site et les essais de laboratoire réalisés sont présentés par Jardine et al. (2006).

Les essais cycliques ont utilisé les installations du projet GOPAL (Parker et al., 1999). Au total 21 essais statiques et 14 essais cycliques ont été effectués sur les six pieux de réaction du projet GOPAL. Ces pieux ont été battus jusqu'à une profondeur d'environ 19 m avec une relation espacement/diamètre du pieu d'environ 15. Leur diamètre est de 457 mm.

Plusieurs séries de chargements cycliques ont été appliquées, entrecoupées d'essais statiques référentiels en traction, la plupart d'entre eux avec des cycles uniquement en traction pour mieux individualiser la distribution des charges entre la pointe et le frottement latéral.

La réponse des pieux au chargement cyclique est décrite dans Jardine & Standing, 2012 ; Tsuchi et al., 2012; Rimoy et al., 2013.

2.2 Essais en chambre d'étalonnage (3SR-ICL-SOLCYP)

Dans le cadre d'une coopération entre l'Imperial College de Londres (ICL), le Laboratoire 3SR de l'Université de Grenoble et le Projet SOLCYP, plusieurs séries d'essais ont été réalisées sur un pieu modèle instrumenté dans la chambre d'étalonnage du laboratoire 3SR de Grenoble. L'objectif initial était de tenter de reproduire à une échelle de laboratoire et dans un environnement contrôlé les résultats obtenus par Jardine et Standing, 2000 sur les pieux battus dans le sable de Dunkerque.

La chambre de calibration a une hauteur de 1,5m et un diamètre de 1,2m. Dans sa paroi intérieure, une membrane en latex et une couche de graisse en silicone ont été mises comme système d'anti frottement pour avoir un meilleur contrôle des conditions Ko du sol. Un système d'isolation permet d'effectuer les essais à une température constante comprise entre 18 et 19°.

Le sable utilisé est le sable de Fontainebleau NE34, ($d_{50} = 0,2 \text{ mm}$, $\gamma_{\max} = 17,2 \text{ kN/m}^3$ et $\gamma_{\min} = 14,2 \text{ kN/m}^3$). Pour l'ensemble des essais présentés, ce sable été mis en place par pluviation en obtenant un indice de densité relative compris entre 0,65 et 0,70. Le massif de sable est soumis à une pression

verticale appliquée sur la surface du massif de 150 kPa, correspondant à une résistance de pointe pénétrométrique q_c de 20 à 23 MPa.

Le pieu modèle instrumenté a été développé par ICL et est décrit en détail dans Jardine et al (2009). C'est un pieu à base fermée de 36 mm de diamètre, instrumenté en 3 niveaux le long du fût pour mesurer les contraintes tangentielles et radiales dans la surface du pieu. Chaque niveau d'instrumentation inclut aussi un capteur de force. Pour les derniers essais réalisés, il a été équipé d'un capteur de force en pointe.

L'installation initiale du pieu a été effectuée jusqu'à une profondeur d'environ 1 m par des cycles d'enfoncement successifs de 5 à 20 mm à une vitesse de 0,2 mm/s, suivis d'une décharge complète, de façon à simuler les effets d'un processus de battage.

Le programme expérimental a inclus quatorze essais cycliques autant sous contrôle de déplacement que sous contrôle en charge pour des cycles alternés et non-alternés (seulement en traction).

Une première partie des résultats concernant les essais de chargement cyclique a été présentée par Tsuha et al. (2012). On trouvera de plus amples informations dans Rimoy et al., 2013

2.3 Critères de rupture

L'application de cycles sur un pieu installé dans du sable provoque une succession de petits glissements relatifs sol-pieu dont le cumul détermine le déplacement global. La vitesse de déplacement initiale est fonction de l'amplitude Q_c et du niveau de chargement maximal Q_{max} mais ces mêmes paramètres conditionnent également l'évolution du frottement qui peut se détériorer pour des cycles de grande amplitude ou s'améliorer pour des cycles de faible amplitude (Tsuha et al., 2012). Sur un pieu sollicité en traction, la vitesse initiale se modifie pour :

- soit conduire vers la rupture : dans ce cas la vitesse s'accroît. La rupture peut être définie de manière conventionnelle (par exemple pour un déplacement de la tête du pieu de 0,1D) ou lorsque se produit une accélération brutale du taux de déplacement ;
- soit conduire vers la stabilisation : la vitesse décroît continuellement jusqu'à passer en dessous d'un seuil où on peut considérer que les déplacements cumulés deviennent non significatifs.

2.4 Diagrammes de stabilité cyclique

La caractérisation complète d'un essai de chargement cyclique suppose la définition des paramètres suivants :

- Q_m : valeur moyenne de la charge sous chargement cyclique,
- Q_c : demi-amplitude du chargement cyclique,
- N_f : nombre de cycles conduisant à la rupture,
- N : nombre de cycles appliqués en l'absence de rupture,
- f : fréquence des cycles (en général 0,5Hz)

L'essai est dit répété (one-way) si $Q_c < Q_m$ et alterné (two-way) si $Q_c > Q_m$. On définit de plus :

Q_u : capacité statique ultime selon le mode considéré (Q_{ut} en traction et Q_{uc} en compression).

Il est pratique de présenter les résultats d'essais de chargements cycliques dans un diagramme où chaque série de chargement est identifiée par le couple de paramètres normalisés Q_m/Q_u et Q_c/Q_u . Ce type de représentation permet de bien visualiser les zones de fonctionnement sous chargements répétés et sous chargements alternés. Si on affecte chaque point du nombre de cycles N_f ayant provoqué la rupture ou du nombre de cycles N appliqué sans provoquer la rupture on peut définir des zones de « stabilité » ou d'« instabilité » du pieu. On voit que la taille de ces zones dépend du (des) critère(s) de rupture choisis.

On reproduit sur les Figures 1 et 2 les diagrammes cycliques obtenus pour les essais de Dunkerque (Jardine and Standing,

2012) et pour les essais en chambre de calibration (Tsuha et al., 2012).

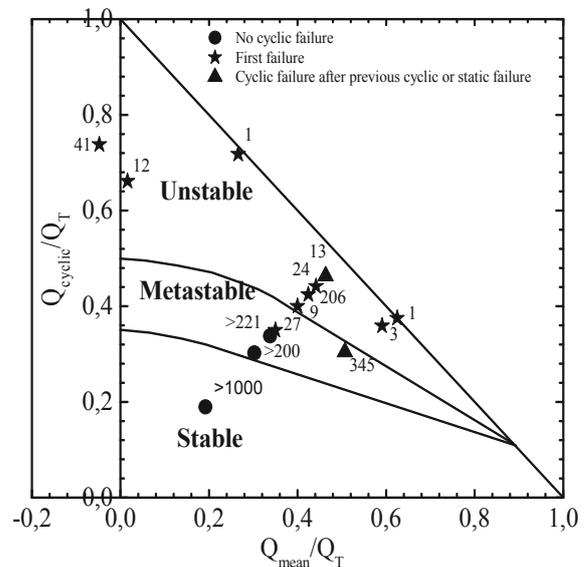


Figure 1 : Diagramme de stabilité cyclique des pieux battus de Dunkerque (d'après Jardine and Standing, 2012)

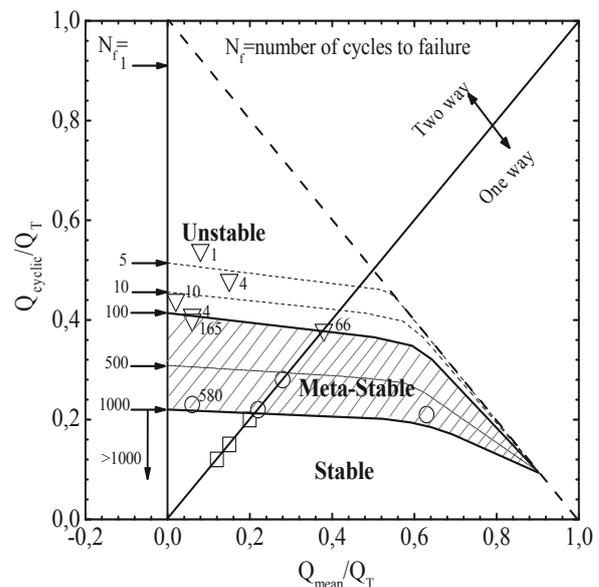


Figure 2 : Diagramme de stabilité cyclique des pieux modèles en chambre de calibration (d'après Tsuha et al., 2012)

Pour ces deux diagrammes, la rupture est atteinte lorsque le déplacement de la tête du pieu atteint 0,1D. La zone *instable* caractérise les essais ayant atteint le critère de rupture avant 100 cycles. La zone *stable* correspond à une zone de faible amplitude de chargement cyclique dans laquelle les pieux ont été soumis à plus de 1000 cycles sans accumuler de déplacements significatifs (pour les deux types de pieux) ou pour lesquels la vitesse de déplacement était inférieure à 1mm pour 1000 cycles (pieux de Dunkerque). Entre ces deux zones se situe une zone qualifiée de *métastable* dans laquelle les pieux atteignent la rupture entre 100 et 1000 cycles ou développent des taux de déplacement pouvant faire craindre des ruptures au-delà de 1000 cycles.

Il est intéressant de mentionner que les trois zones de stabilité resteraient inchangées si on adoptait un critère de rupture à $0,03 D$ comme pour les pieux en compression ci-après.

3 ESSAIS EN COMPRESSION

3.1 Essais de Loon-Plage (SOLCYP)

Dans le cadre du projet national SOLCYP (Puech et al., 2012) des essais sur pieux réels ont été conduits sur le site de Loon-Plage constitué de sables denses. Cinq pieux forés et deux pieux métalliques battus ont été installés et soumis à des séries de chargements statiques et cycliques. Les résultats obtenus sur les pieux forés sont présentés dans Benzaria et al. (2013).

Le site expérimental se situe sur la commune de Loon-Plage (59) près de Dunkerque dans le Nord de la France. Il se caractérise par une couverture de remblais récents (0-0,6m) et d'argile sableuse (0,6-2,2m) sous laquelle on rencontre la formation de sable des Flandres.

Le sable est un sable siliceux très fin (D_{50} voisin de 0,15mm) et mal gradué (coefficient d'uniformité $CU=0,98$) très proche de celui rencontré sur le site voisin des essais ICL (même origine). La formation est latéralement homogène et se caractérise par des valeurs de résistance au cône q_n croissant de 5 à 40 MPa vers 8 m de profondeur pour se stabiliser ensuite entre 30 et 50 MPa jusque vers 11,5m. L'interprétation des CPT conduit à un indice de densité I_D compris entre 0,7 et 0,9 (sable dense à très dense).

Une série d'essais triaxiaux monotones a donné un angle de frottement interne φ'_{cv} voisin de 31° en bon accord avec les valeurs trouvées sur le sable de Dunkerque (Jardine et Standing, 2000).

Les deux pieux F4 et F5 sont géométriquement identiques ($D=420\text{mm}$, fiche 8m). Ils ont été exécutés à l'aide d'une tarière à axe creux vissée dans le sol sans extraction notable de matériau puis extraite sans dévissage tandis que le béton est déversé simultanément par l'axe creux. Les pieux sont équipés d'un train d'extensomètres amovibles de type LCPC introduits dans un tube de réservation positionné entre les armatures.

Les pieux ont été testés trois mois environ après leur mise en place. Les programmes de chargement comportaient des essais statiques de référence à paliers d'une heure selon la norme NF P 94-150, des essais de chargement rapides (réduction des paliers à 3mm) et des essais de chargement cycliques axiaux de type répété à la fréquence de 0,5Hz. Une description plus précise des modes de chargement est indiquée dans Benzaria et al. (2012).

3.2 Essais sur modèles réduits centrifugés (SOLCYP)

Une campagne d'expérimentations sur modèles réduits centrifugés a été réalisée sur la centrifugeuse géotechnique de l'IFSTTAR à Nantes (Guefrech et al., 2012). Les pieux d'élanement 31 sont réalisés à l'échelle $1/23^{\text{ème}}$. Leur diamètre est de 18 mm. Leur surface est parfaitement rugueuse. Ils sont mis en place selon un procédé non refoulant consistant essentiellement à mettre le sable en place par pluviation alors que le pieu est déjà pré-positionné dans le conteneur. Cette technique simule un pieu moulé en place comme les pieux forés à la tarière creuse du site de Loon-Plage.

Le sable de Fontainebleau NE34 sec est en tout point identique à celui utilisé au laboratoire 3SR pour les essais en chambre d'étalement et présente des propriétés physiques et mécaniques très voisines de celle du sable des Flandres.

On s'intéresse dans ce qui suit à une série d'essais réalisés dans un massif à forte densité ($I_D \approx 0,7$) à la fréquence de 1Hz. Seuls les essais de chargement cyclique en compression répétée sont analysés.

3.3 Critère de rupture

La définition de critères de rupture en compression est plus délicate qu'en traction. En effet, quelle que soit la vitesse de déplacement initiale (sur les premiers cycles), les déplacements tendent globalement vers la stabilisation. Cette observation est commune aux pieux in situ (Benzaria et al., 2013) et aux pieux modèles (Guefrech et al., 2012). En effet, même s'il y a dégradation rapide du frottement, le déplacement du pieu provoque une mobilisation progressive de l'effort de pointe qui ralentit progressivement les tassements.

Le critère de rupture ne peut alors être défini de manière conventionnelle (e.g. $0,1D$) mais doit s'exprimer en termes de déplacement cyclique acceptable. Ce critère pourra être franchi sur les tous premiers cycles en cas de chargement très sévère (avec une vitesse de déplacement forte voire croissante) mais plus généralement au bout d'un nombre de cycles plus ou moins important et avec une vitesse de déplacement décroissante.

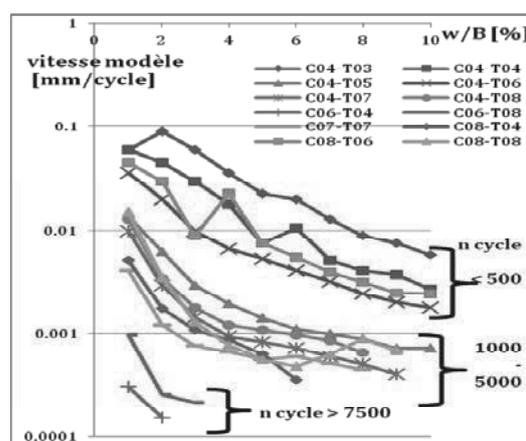


Figure 3 : Vitesses de déplacements des pieux en compression pour les essais en centrifugeuse

L'analyse des vitesses de déplacement effectuée sur les pieux modèles centrifugés illustre les phénomènes en jeu (Figure 3). On distingue trois familles d'essai : a) les essais pour lesquels un tassement de $0,1D$ est atteint en moins de 500 cycles et qui présentent une décroissance permanente de la vitesse de tassement ; b) ceux pour lesquels ce tassement est atteint entre 1000 et 5000 cycles avec une vitesse de tassement qui semble se stabiliser ; c) ceux pour lesquels la vitesse de tassement devient rapidement très faible ($< 0,5$ mm pour 1000 cycles). L'évolution vers des déplacements importants est alors improbable.

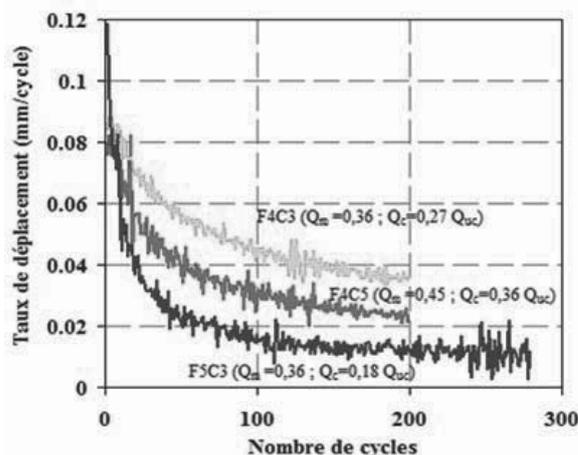


Figure 4 : Vitesses de déplacement des pieux en compression pour les essais de Loon-Plage

La Figure 4 montre le même type d'évolution des vitesses de déplacement pour les pieux de Loon-Plage.

3.4 Diagrammes de stabilité cyclique

On présente sur les Figures 5 et 6 les diagrammes de stabilité cyclique obtenus pour les essais cycliques en compression sur pieux forés de Loon-Plage et les pieux moulés en centrifugeuse.

Pour ces deux diagrammes, la rupture est définie pour un déplacement du pieu de 0,03 D. La zone *instable* caractérise les essais ayant atteint le critère de rupture avant 100 cycles. La zone *stable* correspond à une zone de faible amplitude de chargement cyclique dans laquelle les pieux n'ont pas atteint le critère de rupture et les vitesses de déplacement sont faibles. Entre ces deux zones se situe la zone qualifiée de *métastable* dans laquelle les pieux atteignent la rupture entre 100 et 1000 cycles.

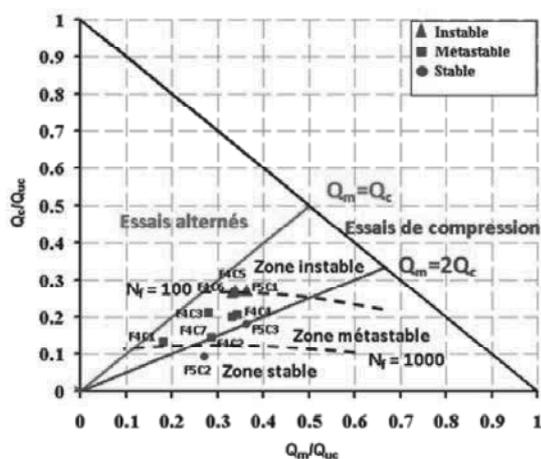


Figure 5 : Diagramme de stabilité cyclique pour les pieux forés de Loon-Plage

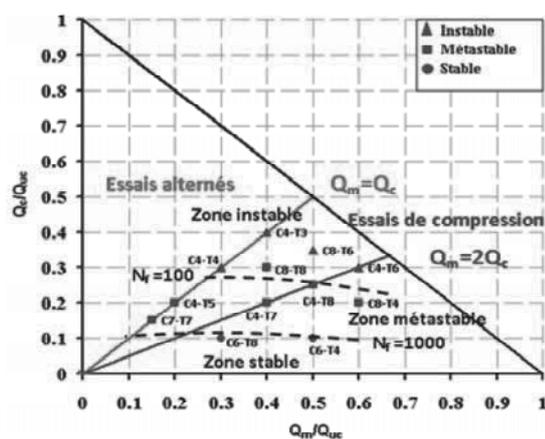


Figure 6 : Diagramme de stabilité cyclique pour les pieux moulés en centrifugeuse

On constate une bonne concordance entre les deux diagrammes. Il est recommandé de ne pas extrapoler les données dans le domaine des essais alternés. Les données disponibles (non montrées ici) indiquent en effet une forte réduction des zones métastable et stable dans le domaine alterné.

4 CONCLUSION

Cette communication rassemble des diagrammes de stabilité cyclique obtenus dans des sables siliceux denses et par des

moyens variés : essais in situ sur pieux réels, essais sur pieux modèles en chambre d'étalonnage et essais sur pieux modèles centrifugés. Elle couvre le cas des pieux battus en traction et celui des pieux forés en compression.

Les diagrammes cycliques de stabilité sont des outils précieux pour juger de la sévérité des chargements cycliques sur le comportement axial des pieux.

L'attention est attirée sur la difficulté de définir des critères de rupture significatifs, notamment en compression. L'interprétation des diagrammes ne peut être dissociée des critères choisis pour les élaborer.

5 REMERCIEMENTS

La rédaction de cette communication a été rendue possible par la collaboration de nombreux chercheurs et organismes. Les auteurs remercient tous leurs collègues impliqués dans ces recherches et les différents organismes ayant autorisé la publication des résultats.

6 REFERENCES

- AFNOR.1999. NF P 94-150. Norme Française. Sols: Reconnaissance et Essais – Essai statique de pieu sous effort axial – Partie 1: en compression et Partie 2: en traction
- Benzaria O., Puech A., and Le Kouby A. 2012. Cyclic axial load-tests on driven piles in overconsolidated clay, *Offshore Site Investigation and Geotechnics*, SUT, London
- Benzaria A., Puech A. et Le Kouby A. 2013. Essais cycliques axiaux sur des pieux forés dans des sables denses. *Proceedings 18th ICSMGE*, Paris
- Guefrech A., Rault G., Chenaf N., Thorel L., Garnier J., Puech A. 2012. Stability of cast in place piles in sand under axial cyclic loading. *Proc. 7th Int. Conf. Offshore Site investigation and Geotechnics*. London. 12-14 sept. pp.329-334.
- Jardine, R.J. and Standing, J.R. 2000. Pile load testing performed for HSE cyclic loading study at Dunkirk, France. Two Volumes. *Offshore Technology Report OTO 2000 007; Health and Safety Executive*, London. 60p and 200p.
- Jardine, R.J., Standing, J.R. & Chow, F.C. 2006. Some observations of the effects of time on the capacity of piles driven in sand. *Geotechnique*, 56 (4), 227-244.
- Jardine, R., Bitang, Z., Foray, P., & Dalton, C. 2009. Experimental Arrangements for Investigation of Soil Stresses Developed around a Displacement Pile. *Soils and Foundations*, 49(5), 661–673.
- Jardine, R.J. and Standing. 2012. Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand. *Soils and Foundations*, 52(4), 723–736.
- Jardine R, Puech A and Andersen K. 2012. Cyclic loading of offshore piles: potential effects and practical design. *Proc.7th Int. Conf. on Offshore Site Investigations and Geotechnics*, SUT., London.
- Karlsrud K., Nadim F. and Haugen, T. 1986. Piles in clay under cyclic axial loading - Field tests and computational modeling. *Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Offshore Piling*, Nantes, France
- Parker, E. J., Jardine, R.J., Standing, J.R. and Xavier, J. 1999. Jet grouting to improve offshore pile capacity. *Offshore Technology Conference*, Houston, OTC 10828.
- Poulos H.G. 1988 Cyclic stability diagram for axially loaded piles. *Journal of Geot. and Geoenv. Eng.* 114 (8): 877-895 .
- Puech A., Canou J., Bernardini C., Pecker A., Jardine R., and Holeyman A. 2012. SOLCYP: a four year JIP on the behavior of piles under cyclic loading. *Offshore Site Investigation and Geotechnics*, SUT, London
- Rimoy S., Jardine R. and Standing J. 2013. Displacement response to axial cyclic loading of driven piles in sand. *Proceedings 18th ICSMGE*, Paris
- Tsuha, C., Foray, P., Jardine, R., Z.X., Y., Silva, M., & Rimoy, S. 2012. Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading. *Soils and foundations*, 52(3), 393–410.