

Influence des chargements cycliques axiaux dans le comportement et la réponse de pieux battus dans le sable

Influence of cyclic axial loads in the behaviour and response of driven piles in sand

Silva M., Foray P.
Laboratoire 3SR, Grenoble, France

Rimoy S., Jardine R.
Imperial College London, London, UK

Tsuha C.
University of Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil

Yang Z.
Zhejiang University, Zhejiang, China

RÉSUMÉ: Cet article présente un nouveau diagramme de stabilité cyclique pour le frottement latéral ainsi que l'effet sur la capacité en traction des pieux modèle instrumentés soumis à des chargements cycliques axiaux suite à une large série d'essais en chambre d'étalonnage dans du sable siliceux. Les mesures locales des contraintes dans le sol (verticales, radiales et orthoradiales) à différentes distances de l'axe du pieu, ainsi que les mesures tangentielles et radiales à l'interface sol-pieu, permettent une analyse détaillée de l'évolution des chemins de contraintes locaux autour du pieu et au sein du massif lors des chargements cycliques et post-cycliques.

ABSTRACT: This paper presents a new cyclic stability diagram for the lateral friction and the effect on the tensile capacity of instrumented model piles subjected to axial cyclic loading across a wide range of calibration chamber testing in silica sand. Local measurements of stresses in the soil mass (vertical, radial and orthoradial) at different distances from the axis of the pile, as well as shear and radial stresses at the soil-pile interface, provide a detailed analysis of the evolution of local stress paths around the pile and the soil mass during cyclic and post-cyclic loading.

MOTS-CLÉS: Chambre d'étalonnage, chargement cyclique axial, interaction sol-pieu, diagramme de stabilité cyclique.

1 INTRODUCTION

Des fondations sur pieux de plateformes de pétrole/gaz et des turbines éolienne/marémotrice peuvent être soumises à des chargements cycliques de très longue durée en raison des conditions environnementales. Les longs pieux battus, installés par des cycles de charge-décharge, subissent une dégradation sévère du frottement lors de leur installation (Lehane et al. 1993, Kolk et al. 2005). Celle-ci peut être compensée par un phénomène de « cicatrisation » avec le temps (« ageing »), observé dans des expériences in-situ (Chow et al 1998, Jardine et al. 2006). Selon leur finalité (fondation d'ouvrages offshore ou d'éoliennes), ces pieux sont ensuite souvent soumis à des sollicitations cycliques de service (houle, vibrations) qui affectent également leur frottement. La réponse cyclique de l'interface sol-pieu a été étudiée en laboratoire à l'aide de pieux modèle dans des chambres d'étalonnage pressurisées (Chan & Hanna 1980, Al-Douri & Poulos 1994, Chin and Poulos 1996, Le Kouby et al. 2004). Ces essais ont montré que la contrainte de cisaillement décroît d'autant plus que l'amplitude des déplacements tangentiels augmente. Jardine et al. (2006) ont montré à partir des essais in-situ réalisés à Dunkerque (Chow et al. 1998) qu'alors que des cycles de grande amplitude dégradent la capacité du pieu en frottement, des cycles non alternés de faible amplitude accélèrent les effets bénéfiques du phénomène de « cicatrisation » (augmentation de la capacité avec le temps). Le Kouby et al. (2004) donnent des résultats similaires sur un pieu modèle de 20 mm de diamètre.

L'étude présentée ici a pour but de donner une meilleure compréhension, à une échelle de laboratoire et dans un environnement contrôlé, des résultats obtenus sur des pieux réels à Dunkerque par Jardine & Standing (2000), en mesurant, grâce à une instrumentation exceptionnelle de la chambre d'étalonnage et du pieu, les chemins de contraintes locaux, le long du pieu et au sein du massif lors des différentes phases d'installation, de repos et de chargement statique et cyclique du pieu. Ce travail fait partie d'un programme de recherche

commun entre le laboratoire 3SR et Imperial College London, ainsi que du projet National SOLCYP.

2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

2.1 La chambre d'étalonnage

La grande chambre d'étalonnage du Laboratoire 3S-R a été adaptée de façon à maîtriser les conditions environnementales (température, pression, alimentation électrique) sur des périodes de longue durée (plusieurs mois), afin de pouvoir mesurer les phénomènes de « cicatrisation » du frottement après cyclage et après une longue période de repos. Une isolation complète de la cuve ainsi qu'un système de chauffage/refroidissement des parois ont été réalisés de façon à minimiser les variations de température dans la cuve. La pressurisation des membranes a été conçue pour fonctionner en cas de panne du réseau.

La chambre d'étalonnage de Grenoble est composée de trois éléments cylindriques de 50 cm de hauteur et d'un diamètre interne de 1.2 m. Le fond de la chambre et le couvercle supérieur sont constitués de plaques rigides d'une épaisseur de 100 mm. Une pression verticale d'environ 150 kPa est imposée par une membrane en caoutchouc remplie d'eau, qui est fixée sous le couvercle supérieur et contrôlée par un système d'interface eau/air. Une membrane en latex de 2 mm d'épaisseur a été installée sur la paroi interne de la chambre afin de mieux fournir des conditions K_0 au bord de la cuve. Une couche de graisse de silicone entre cette membrane et la paroi de la chambre permet de réduire le frottement entre le mur et la masse de sable et d'assurer une meilleure homogénéité des contraintes à l'intérieur du sol.

Un système d'isolation thermique formé de serpentins en cuivre autour de la cuve permet de travailler avec une température presque uniforme entre 18 et 19 degrés.

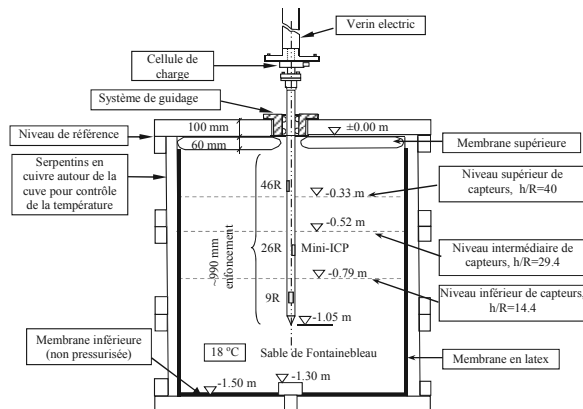


Figure 1: Modifications apportées à la chambre d'étalonnage du laboratoire 3S-R.

Pour les essais présentés ici, la chambre d'étalonnage a été remplie avec du sable siliceux de Fontainebleau NE34 commercialisé par l'entreprise Sibelco. En utilisant une technique de remplissage par pluviage, nous obtenons une densité du massif moyennement dense à dense, $D_r=72\%$. Le tableau 1 montre les propriétés mécaniques du sable.

Tableau 1: Propriétés mécaniques du sable NE34

G_s	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	e_{max}	e_{min}	γ_{max} (kN/m^3)	γ_{min} (kN/m^3)
2.65	0.150	0.210	0.230	0.90	0.51	17.2	14.2

Plusieurs essais pénétrométriques ont été effectués sur des échantillons de sable NE34 sous 150 kPa avec une résistance en pointe quasi-constante de 21 ± 2 MPa. Des détails supplémentaires sur les propriétés mécaniques du sable sont décrits dans Yang et al. (2010).

2.2 Le pieu d'essai Mini-ICP

Le pieu utilisé correspond au pieu modèle Mini-ICP développé par l'Imperial College London et décrit par Jardine et al. 2009. C'est un pieu tubulaire en acier à base fermée de 36mm de diamètre avec un cône solide de 60° à sa pointe. Il est composé de trois niveaux d'instrumentation (ou clusters) identifiés selon leur distance à la pointe en: A (9R), B (24) et C(44), R étant le diamètre du pieu. Chacun de ces clusters contient une cellule de charge axiale, qui peut être utilisée pour calculer la moyenne de frottement dans le fût du pieu; un capteur de contraintes en surface (SST: surface stress transducer) pour mesurer la contrainte totale radiale et la contrainte de cisaillement; un capteur de température MEMS et un inclinomètre. À partir de l'essai ICP03, une cellule de charge axiale a été ajoutée près de la pointe du pieu pour mieux séparer les contributions de la pointe et du frottement latéral dans la capacité totale du pieu.

Le pieu a été installé jusqu'à une profondeur finale de 0.98m par fonçage avec des cycles de charge-décharge en simulant la dégradation des efforts radiaux comme dans une installation par battage. La vitesse de pénétration varie entre 0.5 et 2 mm/s et l'amplitude des cycles d'enfoncement successifs est de 5, 10 ou 20 mm. La décharge de chaque cycle a été menée jusqu'à obtenir une charge en tête du pieu nulle.

2.3 Mesure des contraintes dans le massif

36 mini-capteurs Kyowa et TML de capacités variant de 500 kPa à 7 MPa selon leur distance au pieu, ont été mis en place sur trois niveaux comportant chacun douze capteurs, de façon à mesurer les contraintes verticales, radiales et orthoradiales sur des rayons concentriques à des distances de 2R à 16R. Leur étalonnage sous chargement cyclique a été effectué à Imperial College en suivant le protocole établi par Zhu et al 2009. La réponse de chaque capteur est représentée par une série de courbes d'hystérésis selon l'histoire de charge précédente.

3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Après une certaine période de cicatrisation post-installation, un premier essai en compression et un essai en traction ont été effectués pour définir la capacité du pieu avant les chargements cycliques. Plusieurs séries d'essais de faible et de haut niveau de chargement cyclique ont ensuite été effectuées, ainsi que des essais de traction pour évaluer l'effet des charges dans la réponse du pieu à l'arrachement.

Les essais cycliques ont été caractérisés selon deux paramètres de charge; Q_{cyclic} et Q_{mean} correspondant respectivement à la moitié de l'amplitude de chaque cycle et à la valeur moyenne de charge. Les essais de faible niveau en charge ont été effectués sous chargement contrôlé (FC), uniquement en traction (non alterné). Ces essais ont mobilisé jusqu'à 60% de la capacité totale du pieu en tension, Q_t . Les cycles de charge de haut niveau alternés (compression et traction) ont été conduits en déplacement contrôlé (DC). Les cycles ont été appliqués à une fréquence relativement basse, allant de moins de 0,5 cycles par minute pour les essais alternés, à presque 2,5 cycles par minute pour les essais de faible charge.

Des essais de traction statique post-cyclique ont été réalisés, avec un taux de déplacement de 0,01 mm/s, afin de vérifier les capacités à l'arrachement disponibles après chaque chargement cyclique. Comme indiqué par Jardine et al (2006), les essais préalables peuvent influencer sur les capacités développées lors des essais ultérieurs. Le tableau 2 résume les différentes séries d'essais cycliques réalisées.

Tableau 2: Programme d'essais de chargement cyclique

ID	N of cycles	Description	Q_{cyclic} / Q_T	Q_{mean} / Q_T
ICP1-OW1 (FC)	1000	0 à -4,0 kN	0,22	0,22
ICP1-TW1 (DC)	100	-4 à 5 mm	0,41	0,06
ICP2-OW1 (FC)	1000	0 à -3,0kN	0,12	0,12
ICP2-OW2 (FC)	1000	0 à -4,8 kN	0,20	0,20
ICP2-OW3 (FC)	500	0 à -6,8 kN	0,28	0,28
ICP2-TW1 (DC)	100	-2,0 à 3,0 mm	0,48	0,15
ICP3-OW1 (FC)	100	0 à -9,6 kN	0,38	0,38
ICP3-TW1 (FC)	287	-5,0 à +8,0kN	0,54	0,08
ICP3-TW2 (FC)	199	-5,0 à +5,0kN	0,40	0,06
ICP3-TW3 (FC)	50	-5,0 à +7,0 kN	0,44	0,02
ICP3-TW4 (FC)	37	-5,0 à +10,0kN	0,44	0,02
ICP4-OW1 (FC)	7000	0 à -3,5 kN	0,15	0,15
ICP4-TW1(FC)	600	-4,0 à +4,0kN	0,23	0,06
ICP4-OW2 (FC)	50	-2,3 à -4,6 kN	0,21	0,63

OC = cycles non alternés, et TC = cycles alternés

4 RÉSULTATS DES ESSAIS CYCLIQUES NON ALTERNÉS À FAIBLE AMPLITUDE

4.1 Evolution des contraintes le long du pieu et au sein du massif

Les mesures de contrainte effectuées au sein du massif et le long du pieu permettent de préciser les mécanismes conduisant à l'amélioration ou à la dégradation du frottement. La Figure 2 montre l'évolution des contraintes radiales dans le sol à différentes distances du pieu. On constate une décroissance de ces contraintes radiales avec le nombre de cycles, plus accentuée lors de cycles alternés. La même situation est vérifiée avec les contraintes radiales le long du pieu, accentuée lors des grands cycles mais avec des amplitudes plus grandes. On remarque également dans la Figure 2, que le chargement statique effectué entre les deux séries de cycles entraîne une nette augmentation des contraintes près du pieu après les petits cycles (effet de la dilatance).

La distribution des contraintes dans le massif du sol à différentes distances de l'axe du pieu a été interprétée par Jardine et al. 2012 en utilisant l'information des capteurs.

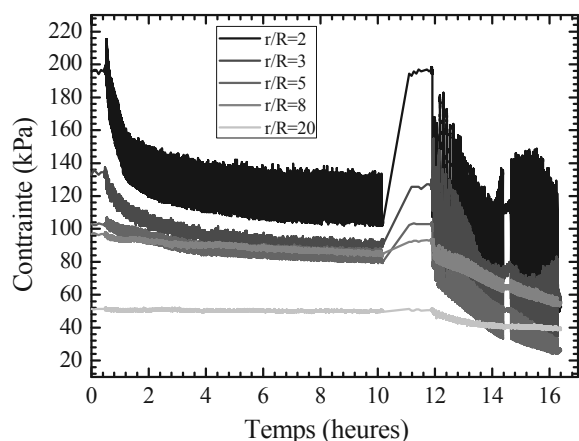


Figure 2: Evolution des contraintes radiales dans le sol : De 0 à 9,6h : 1000 cycles non alternés de faible amplitude (ICP1-OW1) ; de 10,4 à 14,7h : 100 cycles alternés de grande amplitude (ICP01-OW1).

La mesure simultanée des contraintes radiales et tangentielles permet de tracer les chemins de contraintes suivis par le sol au contact du pieu. Les petits cycles non alternés, tels que ceux représentés sur la Figure 3 pour les trois niveaux le long du pieu, provoquent un déplacement des chemins de contraintes vers la gauche, traduisant une tendance à la contractance de l'interface et donc sa densification. C'est cette densification qui produit ensuite une augmentation de la dilatance et l'amélioration de la capacité. Lorsque l'amplitude de ces cycles non alternés augmente, les cycles s'approchent de la droite de rupture en traction (Yang et al 2010).

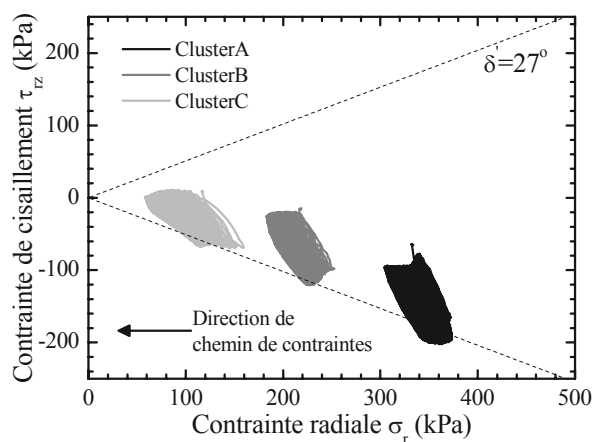


Figure 3: Chemins de contraintes à la surface du pieu. Essai Mini-ICP2. Cycles non alternés de faible amplitude.

A l'inverse, les chemins de contraintes des grands cycles alternés traversent l'équivalent d'une « ligne de changement de phase » et produisent des alternances de dilatance/contractance et une désorganisation du sol autour de l'interface. On peut remarquer qu'on retrouve pour ces chemins de contraintes la forme en « ailes de papillon » qu'on observe lors d'essais de cisaillement cyclique à volume constant ou à rigidité normale contrôlée (Fakharian & Evgin 1997, Mortara et al. 2007).

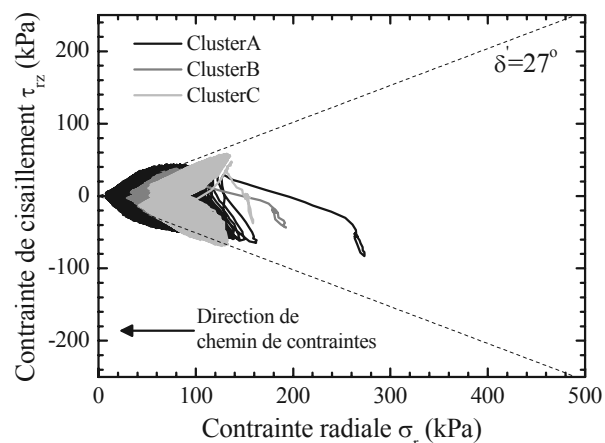


Figure 4: Chemins de contraintes à la surface du pieu. Essai Mini-ICP4. Cycles alternés de forte amplitude.

4.2 Capacité du pieu à l'arrachement avant et après chargement

Le tableau 3 montre les essais statiques effectués après chaque essai cyclique pour évaluer l'effet de ceux-ci sur la capacité à l'arrachement.

Tableau 3: Programme d'essais de chargement cyclique

Essai	Essai précédent (selon Tableau II)	Q_r (kN)	Variation entre essais (%)
ICP1-T1	1ère compression	9,2	-
ICP1-T2	ICP1-OW1	10,8	17,4%
ICP1-T3	ICP1-TW1	4,9	-54,6%
ICP2-T1	1ère compression	12,1	-
ICP2-T2	ICP2-OW1	13,2	9,1%
ICP2-T3	ICP2-OW2	14	6,1%
ICP2-T4	ICP2-OW3	13,7	-2,1%
ICP2-T5	ICP2-TW1	8,7	-36,5%
ICP3-T1	1ère compression	12,5	-
ICP3-T2	ICP3-OW1	10,9	-12,8%
ICP3-T3	ICP3-TW1,2,3,4	4,8	-56,0%
ICP4-T1	1ère compression	11,5	-
ICP4-T2	ICP4-OW1	13,9	20,9%
ICP4-T3	ICP4-TW1	5,5	-60,4%
ICP4-T4	ICP4-OW2	6	9,1%

Comme indiqué, selon l'amplitude de la charge cyclique, il est possible d'obtenir une augmentation de la résistance, ce que proposent Jardine et al (2006) dans des essais sur le terrain.

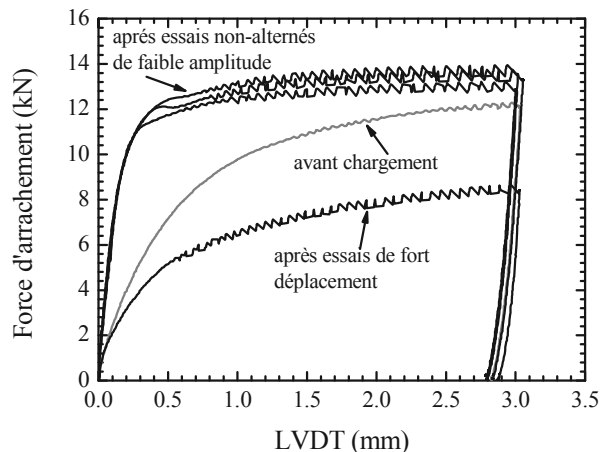


Figure 5: Courbes force d'arrachement-déplacement du pieu avant et après application des cycles Essai ICP2.

Les essais d'arrachement avant et après l'application de cycles, présentés dans la Figure 5 pour les essais Mini-ICP2, montrent clairement que l'application des cycles non alternés de

faible amplitude améliore la capacité du pieu en raison de la densification de l'interface, alors que les cycles de grande amplitude avec passage de la traction à la compression produisent une nette dégradation de cette capacité due à la désorganisation de l'interface.

4.3 Diagramme de stabilité cyclique

Une première partie des résultats concernant les essais de chargement cyclique a été résumée par Tsuha (2012). On a analysé l'évolution du frottement latéral du pieu et sa stabilité selon le nombre et le type de cycles appliqués (réversibles ou non réversibles), l'amplitude et la valeur moyenne de la charge. La Figure 6 montre le diagramme de stabilité cyclique établi à partir de la totalité des essais réalisés. Trois zones ont été identifiées pour le comportement du pieu.

- Stable, correspondant à une zone de faible amplitude au niveau de la charge et où le pieu peut être soumis à plus de 1000 cycles sans accumuler une déformation importante.
- Métastable, correspondant à une déformation importante ou une rupture entre 100 et 1000 cycles.
- Instable, correspondant à une rupture obtenue en moins de 100 cycles.

La rupture cyclique a été définie comme ; i) un déplacement permanent atteignant 10% du diamètre (i.e. 3.6 mm), ou ii) un taux de déplacement montrant une augmentation forte, en considérant comme « lent » un taux inférieur à 1 mm/10⁴ cycle, et « rapide » un taux supérieur à 1 mm/100 cycle.

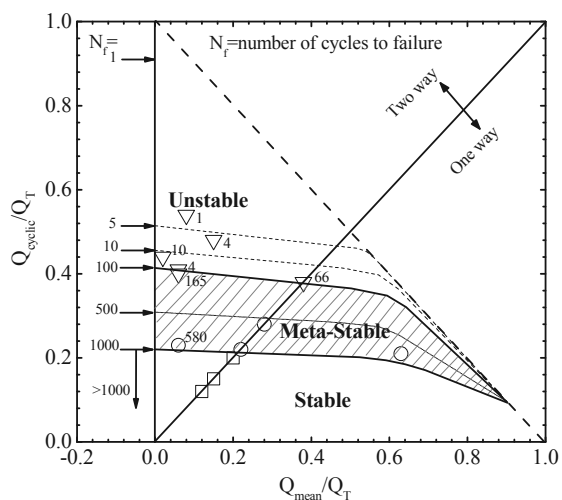


Figure 6: Diagramme de stabilité cyclique essais ICP1-4 (d'après Tsuha et al., 2012)

5 CONCLUSION

La mesure des chemins de contraintes le long de pieux instrumentés avec précision, ainsi que ceux au sein du massif de sol au voisinage du pieu, permet de mieux appréhender les mécanismes gouvernant la dégradation ou l'amélioration du frottement lors de sollicitations cycliques. Elle permet en particulier de faire le lien entre les états « stable », « métastable » et « instable » dans les diagrammes classiques de stabilité cycliques et le comportement élémentaire des interfaces par rapport à leur « ligne de transformation de phase » ou « droite caractéristique ».

L'ensemble des essais effectués jusqu'à présent montre que l'application d'un grand nombre de petits cycles non alternés produit une densification de l'interface sol-pieu, favorisant le développement d'une dilatance lors d'un chargement ultérieur et donc une amélioration de la capacité du pieu à l'arrachement.

A l'inverse les grands cycles alternés produisent une désorganisation de l'interface et une diminution de la dilatance

lors d'un chargement ultérieur et une dégradation de la capacité à l'arrachement. Ce phénomène est analogue à celui conduisant à une dégradation du frottement le long des pieux battus lors de leur installation.

6 RÉFÉRENCES

- Al-Douri R. and Poulos H.G. 1994. Cyclic Behaviour of Pile Groups in Calcareous Sediments. *Soils and Foundations* 34, 49-59.
- Chan S. and Hanna T. H. 1980. Repeated loading on single piles in sand. American Society of Civil Engineers. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 106 (2), 171-188.
- Chin J. T. and Poulos H.G. 1996. Tests on model jacked piles in calcareous sand. *Geotechnical Testing Journal* 19(2), 164-180.
- Chow F.C., Jardine R.J., Bruzy F., Nauroy J.F. 1998. Effects of time on capacity of pipe piles in dense marine sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124(3), 254-264.
- Fakharian K. and Evgin E. 1997. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123(12), 1096-1105.
- Foray P., Tsuha C.H.C., Silva M., Jardine R.J. et Yang Z. 2010. Stress paths measured around a cyclically loaded pile in a calibration chamber. Proc. Int. Conf. on Physical Modelling in Geomechanics, ICPMG 2010, Zurich, Switzerland.
- 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., Chow F., Overy R., Standing J. 2005. ICP Design Methods for Driven Piles in Sands and Clays, Thomas Telford.
- 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. *Géotechnique* 56 (4), 227-244.
- Jardine R.J., Zhu B.T., Foray P., Dalton C.P. 2009. Experimental arrangements for the investigation of soil stresses developed around a displacement pile. *Soil and Foundations* 49(5), 661-673.
- Jardine R., Zhu B., Foray P., Yang Z., 2012. Interpretation of stress measurements made around closed-ended displacement piles in sand. *Géotechnique*. Accepted.
- Kolk H.J, Baaijens A.E, Vergobbi P., 2005. Results of axial load tests on pipe piles in very dense sands: the EURIPIDES JIP Proc. 1st Int. Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, ISFOG 2005, Perth, W.A., pp. 661- 667.
- Lehane B. M., Jardine R. J., Bond A. J., Frank R., 1993. Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests. *Journal of Geotechnical Engineering* 119(1), 19-35.
- Le Kouby, A., Canou, J., and Dupla, C. 2004. Behaviour of model piles subjected to cyclic axial loading. *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*: 159-166. Triantafyllidis (ed).
- Mortara G., Mangiola, A., Ghionna, V.N. 2007. Cyclic shear stress degradation and post-cyclic behaviour from sand-steel interface direct shear tests. *Canadian Geotechnical Journal* 44(7), 739-752.
- Tsuha C.H.C., Foray P., Jardine R.J., Yang Z.X., Silva M., Rimoy S. 2012. Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading. *Soils and Foundations* 52(3), 393-410.
- Yang Z.X., Jardine R.J., Zhu B.T., Foray P., Tsuha C.H.C., 2010. Sand grain crushing and interface shearing during displacement pile installation in sand. *Géotechnique* 60(6), 469-482.
- Zhu B.T., Jardine R.J., Foray P., 2009. The use of miniature soil stress measuring sensors in applications involving stress reversals. *Soils and Foundations* 49(5), 675-688.