

NOUVELLES PROCEDURES POUR LE DIMENSIONNEMENT DE PIEUX SOUS CHARGE LATÉRALE CYCLIQUE DANS LE SABLE

NEW PROCEDURES FOR DESIGNING PILES UNDER LATERAL CYCLIC LOADING IN SAND

Frédéric ROSQUOËT¹, Jacques GARNIER², Meriam KHEMAKHEM – BEN AMOR³, Alain PUECH³

¹ Laboratoire LTI (AE3899), Amiens, France

² IFSTTAR, Nantes, France

³ Fugro GeoConsulting SA, Nanterre, France

RÉSUMÉ – L'effet des charges latérales cycliques sur les pieux peut être pris en compte soit en étudiant simplement les évolutions du déplacement de la tête du pieu et du moment maximum (méthode globale), soit en décrivant les modifications des courbes de réaction P-y (méthode locale). Un paramètre de dégradation permettant de prendre en compte l'effet des cycles est proposé pour les deux approches.

ABSTRACT – The effect of lateral cyclic loads on piles can be taken into account by simply considering the evolution of the pile head displacement and of the maximum bending moment (global method) or by describing the changes in the P-y reaction curves (local method). A degradation law is given for taking into account the effect of cycles for both approaches.

1. Introduction

Les charges latérales cycliques sur les pieux peuvent être d'origine environnementale (houle, vent, marées...), ou dues à des sollicitations mécaniques (accostage ou amarrage de bateaux par exemple) ou encore thermiques. Les techniques de type « rainflow analysis » permettent de ramener ces chargements réels à des séries de cycles identiques caractérisées par trois paramètres : la charge maximum appliquée, l'amplitude de variation de la charge et le nombre de cycles.

Des études souvent assez récentes ont été effectuées sur des modèles réduits testés en centrifugeuse (Kishida et al., 1985 ; Rosquoët, 2004 ; Kikuchi, 2008 ; Rakotonindriana, 2009 ; Zhang et al., 2011 ; Klinkvort, 2012 ; Khemakhem, 2012). L'intérêt des modèles réduits de pieux (Garnier, 1995) est de permettre de multiplier les essais et réaliser des études paramétriques conséquentes afin d'améliorer la compréhension de ces phénomènes à multiples variables. Une meilleure connaissance de la réponse des pieux sous charge latérale cyclique doit permettre d'optimiser leur dimensionnement.

D'autres travaux ont porté sur des essais de chargement de pieux sur sites réels (Long et Vanneste, 1994 ; Lin et Liao, 1999 ; Hadjadjji et al., 2002) et l'ensemble des données ainsi recueillies a été exploitée dans le cadre du projet SOLCYP pour développer de nouvelles méthodes de dimensionnement des pieux sous sollicitations cycliques. La première approche proposée (méthode globale) permet d'évaluer directement l'influence du chargement latéral cyclique sur le déplacement horizontal de la tête du pieu et sur le moment maximum. La seconde approche (méthode locale) consiste à décrire les modifications engendrées par les cycles sur les courbes de transfert de charge dites « courbes P-y ».

Par rapport aux méthodes actuelles très simplificatrices (API RP2GEO ou ISO 19904-4), ces deux méthodes présentent l'intérêt de prendre en compte le nombre et les caractéristiques des charges cycliques.

2. Méthode globale

2.1. Principe

Les charges latérales cycliques sont caractérisées par le nombre de cycles N , la valeur moyenne de la charge latérale H_m ; la demi-amplitude de la composante cyclique H_c et la charge maximale appliquée H_{max} (Figure 1).

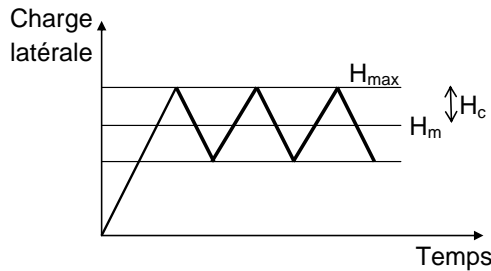


Figure 1. Notation concernant la charge latérale cyclique.

Les caractéristiques du pieu sont le diamètre B , la fiche D et la rigidité en flexion EI . Dans un massif de sol donné, selon la valeur de EI , le pieu peut être rigide (ses déformations propres sont négligeables) ou flexibles (ses déformations se superposent au déplacement d'ensemble et les conditions à la pointe du pieu n'interviennent plus dans sa réponse).

Dans la méthode globale, le pieu doit d'abord être dimensionné sous la charge statique H_{max} , par les méthodes habituelles en utilisant les courbes P-y statiques classiques (Norme française NF P 94-262, Recommandations API RP 2GEO, par exemple). Ce premier calcul fournit en particulier le déplacement y_1 de la tête du pieu et le moment maximum $M_{max,1}$ (au premier chargement sous H_{max}). Des expressions sont proposées donnant les valeurs des rapports y_N/y_1 et $M_{max,N}/M_{max,1}$ permettant de déterminer le déplacement y_N et le moment $M_{max,N}$ au $N^{\text{ième}}$ cycle. L'analyse des données expérimentales a montré que l'effet des charges cycliques fait intervenir :

- le nombre de cycles N ;
- l'intensité de la charge cyclique (par le rapport H_c / H_{max}) ;
- la rigidité relative (par le rapport EI / EI_{fl} où EI_{fl} est la rigidité limitant le domaine des pieux flexibles).

2.2. Détermination de la rigidité relative

Les limites entre pieux rigides et pieux flexibles données par différents auteurs reposent sur la longueur de transfert $L_0 = (4EI/E_s)^{1/4}$. Elles supposent que le massif de sol est constitué d'un matériau homogène élastique de module E_s et cette hypothèse est très rarement acceptable. Il est par contre possible de définir ces limites pour des situations plus réalistes et pour un pieu et un massif de sol donnés. Les méthodes de calcul utilisant les courbes de réaction P-y permettent en effet d'étudier très facilement l'effet de la rigidité EI sur le déplacement du pieu. A titre d'exemple, la figure 2 montre l'évolution, en fonction de la rigidité EI , du déplacement de la tête d'un pieu de 12 m de fiche et 0,72 m

de diamètre, en place dans un sable dense et soumis à une charge latérale en tête de 1600kN.

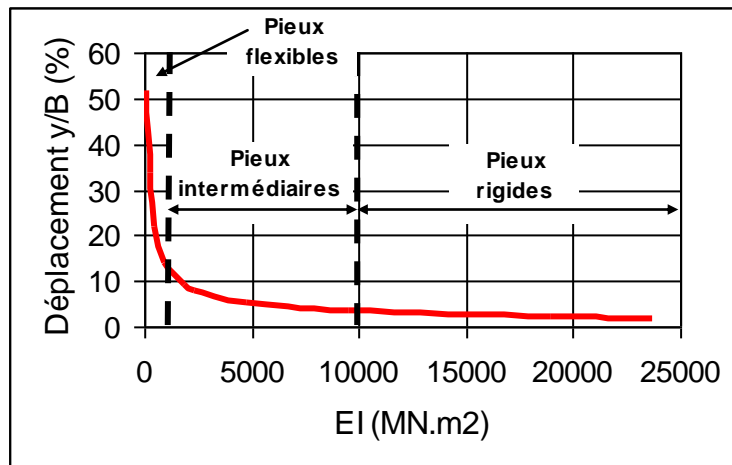


Figure 2. Effet de la rigidité EI sur le déplacement latéral d'un pieu.

Cette figure permet de distinguer les trois types de comportement :

- Pieux rigides pour $EI > EI_{ri} \sim 10000 \text{ M.m}^2$ pour lesquels la rigidité EI n'a plus d'effet significatif sur le déplacement de la tête du pieu (car il ne se déforme pratiquement pas) ;
- Pieux flexibles pour $EI < EI_{fi} \sim 1000 \text{ M.m}^2$ pour lesquels la rigidité EI gouverne très largement le réponse du pieu ;
- Pieux intermédiaires lorsque la rigidité EI est comprise entre ces deux bornes EI_{fi} et EI_{ri} .

2.3. Effet des cycles sur le déplacement de la tête du pieu

La synthèse des données disponibles, réalisée dans le cadre du projet SOLCYP, a montré que le déplacement de la tête du pieu en fonction du nombre de cycles suit le plus souvent une loi logarithmique (Figure 3).

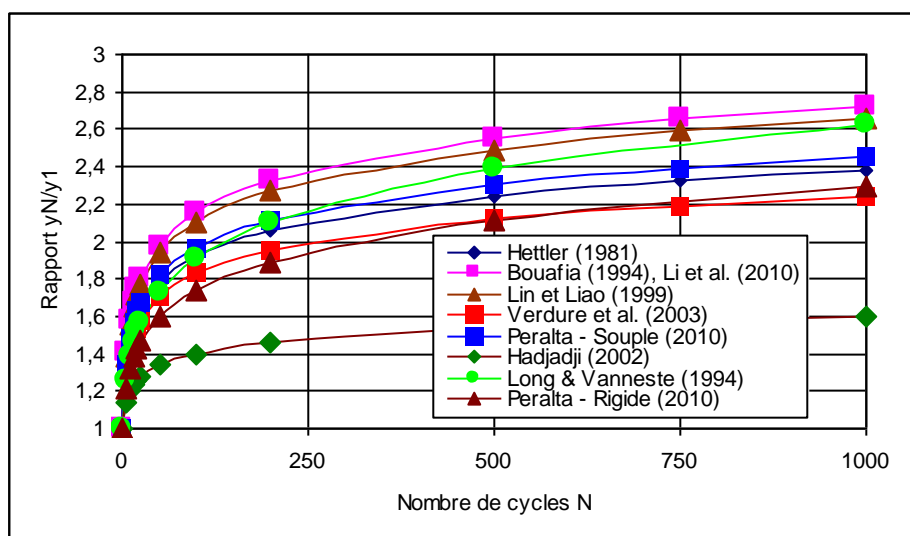


Figure 3. Evolution du déplacement du pieu avec le nombre de cycles selon différents auteurs (Garnier et al., 2010).

Les études expérimentales conduites sur des sols sableux par Rosquoët (2004) et Rakotonindriana (2009) ont permis de préciser ces lois logarithmiques et montré qu'elles dépendent de la demi-amplitude des cycles (H_c) et de la valeur de la charge maximale (H_{max}) comme le montre l'exemple de la figure 4.

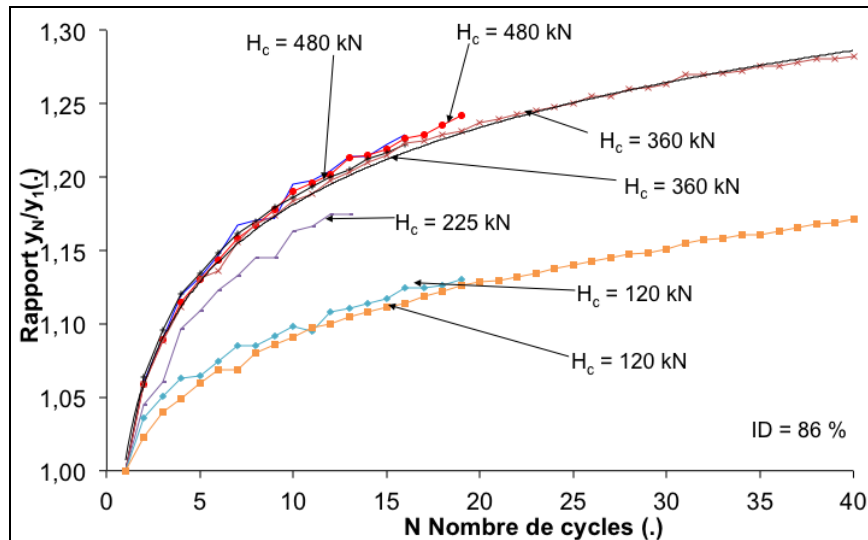


Figure 4. Evolution du rapport y_N / y_1 sous la charge maximale $H_{max} = 960$ kN en fonction du nombre de cycles pour différentes demi-amplitudes H_c (Rosquoët, 2004).

A l'issue de ces études, qui ont porté sur des pieux flexibles, une expression approchée, validée jusqu'à près de 100 000 cycles, a pu être proposée donnant l'évolution du rapport y_N / y_1 en fonction du nombre de cycles. Cette relation (1) montre le rôle essentiel du rapport H_c / H_{max} .

$$\text{Pieux flexibles} \quad \frac{y_N}{y_1} = 1 + 0,235 \times \text{Log}(N) \times \left(\frac{H_c}{H_{max}} \right)^{0,35} \quad (1)$$

En exploitant les résultats de Lin et Liao (1999) qui ont analysé les données d'essais obtenus sur une trentaine de sites, il a été possible de généraliser l'expression (1) aux cas de pieux de différentes rigidités relatives

$$\text{Cas général} \quad \frac{y_N}{y_1} = 1 + \frac{0,235}{CR} \times \text{Log}(N) \times \left(\frac{H_c}{H_{max}} \right)^{0,35} \quad (2)$$

dans laquelle CR est un coefficient de rigidité relative donné par la relation (3).

$$CR = \left(\frac{EI}{EI_{fl}} \right)^{1/5} \quad (3)$$

3. Méthode locale

3.1. Principe

La méthode locale repose sur l'hypothèse qu'il est possible de modéliser l'effet des cycles à partir des courbes P-y statiques, par une diminution de la réaction P mobilisée (pour un déplacement y donné). Cette méthode a déjà été proposée par plusieurs auteurs et adoptée dans les recommandations de l'industrie offshore (API, ISO). Cette approche de type « enveloppe » présente l'avantage d'une mise en œuvre aisée dans les logiciels de type « poutre élastique » sur appuis élasto-plastiques. Elle s'avère toutefois très simplificatrice car les courbes P-y cycliques réelles sont en fait beaucoup plus complexes et constituées d'une succession de boucles complètes dont la forme évolue avec les cycles. Dans le cas présent, l'influence des cycles sur la « dégradation » des réactions latérales mobilisées dans le sol, est simplement introduite au moyen d'un coefficient d'abattement r_c (dit P-multiplier) à appliquer aux courbes P-y statiques.

Il est évident que ces coefficients r_c de réduction des réactions P doivent dépendre du nombre de cycles et de leurs caractéristiques, ce dont ne rend pas compte la méthode plus grossière retenue par l'API.

De premières expressions ont été proposées par Rosquoët (2004) pour un nombre de cycles assez faible (N jusqu'à 15) et pour des charges H_{max} limitées à environ 30% de la charge limite (Tableau 1). Le coefficient r_c dépend du nombre de cycles et du rapport H_c/H_{max} .

Tableau 1. Première formulation du coefficient r_c en fonction de H_c / H_{max} pour N jusqu'à 15 cycles (Rosquoët, 2004)

Profondeur relative	$0 < \frac{z}{B} < 1,5$	$1,5 < \frac{z}{B} < 3$	$3 < \frac{z}{B} < 5$	$\frac{z}{B} > 5$
Coefficient r_c	$r_c = 0,87 - 0,24 \frac{H_c}{H_{max}}$	$r_c = 0,94 - 0,12 \frac{H_c}{H_{max}}$	$r_c = 0,97 - 0,06 \frac{H_c}{H_{max}}$	$r_c = 1$

3.2. Charge limite conventionnelle

La charge appliquée en tête de pieu est caractérisée par la charge maximale H_{max} dont la valeur conditionne largement l'intensité de l'effet des cycles. De façon plus précise, l'effet des cycles est d'autant plus fort que la charge H_{max} se rapproche de la résistance limite du pieu H_{lim} et le rapport H_{max}/H_{lim} doit donc nécessairement intervenir dans la dégradation des courbes P-y statiques.

Cette charge limite est communément déterminée, soit à partir de considérations sur la courbure de la courbe effort-déplacement, soit en fixant une valeur arbitraire au déplacement relatif y/B . Une nouvelle méthode est proposée qui permet la détermination d'une valeur plus précise et explicite de H_{lim} (Figure 5).

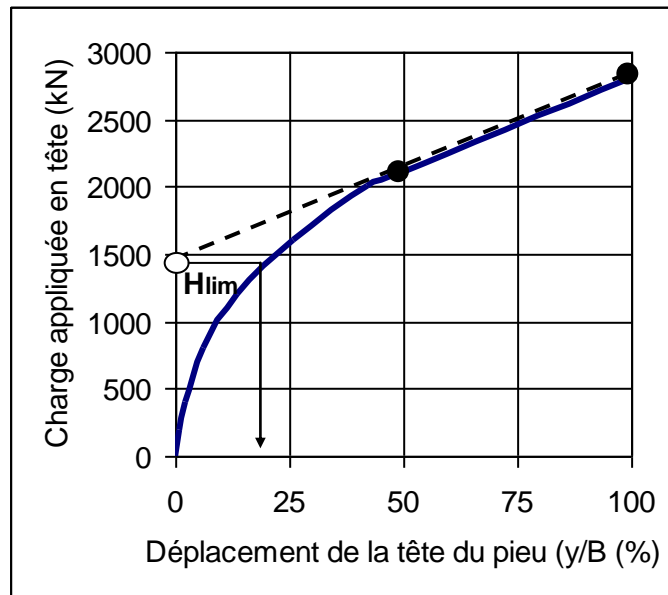


Figure 5. Exemple de détermination de la charge limite conventionnelle H_{lim} .

La valeur de la charge limite conventionnelle est donnée par la relation suivante :

$$H_{lim} = 2H\left(\frac{y}{B} = 0,5\right) - H\left(\frac{y}{B} = 1\right) \quad (4)$$

où $H(y/B=0,5)$ et $H(y/B=1)$ sont respectivement les valeurs des charges appliquées en tête du pieu qui conduisent à un déplacement latéral au niveau du sol respectivement égal à $B/2$ et B (B étant le diamètre du pieu). La seule connaissance de ces deux données permet la détermination de la charge limite conventionnelle. Dans l'exemple présenté (pieu de 12 m de fiche et 0,72 m de diamètre dans un sable dense), la charge limite conventionnelle est $H_{lim} = 1410$ kN correspondant à un déplacement de la tête du pieu y/B d'environ 18%.

3.3. Coefficients d'abattement

Il a ensuite été possible d'introduire l'effet du rapport H_{max}/H_{lim} dans les coefficients r_c du tableau 1 et d'étendre le domaine d'application de la méthode locale à un plus grand nombre de cycles (jusqu'à $N=2000$). Les expressions généralisées du coefficient r_c sont reproduites dans le tableau 2.

Tableau 2. Expression des coefficients r_c à appliquer aux courbes P-y statiques.

Profondeur relative	$0 < \frac{z}{B} < 1,5$	$1,5 < \frac{z}{B} < 3$	$3 < \frac{z}{B} < 5$	$\frac{z}{B} > 5$
Coefficient r_c	$(1 - 4R1)(1 + 4R2)$	$(1 - 2R1)(1 + 2R2)$	$(1 - R1)(1 + R2)$	$r_c = 1$

où R1 et R2 prennent les valeurs suivantes :

$$R1 = \frac{\text{Log}(N) + 3 \frac{H_c}{H_{\max}}}{20} \quad \text{et} \quad R2 = \frac{2,5 \left(1 - \frac{2H_{\max}}{H_{\text{lim}}} \right)}{100} \quad (5)$$

La figure 6 montre à titre d'exemple les valeurs prises par le coefficient r_c dans le cas $H_c/H_{\max}=0,5$ et $H_{\max}/H_{\text{lim}}=0,5$.

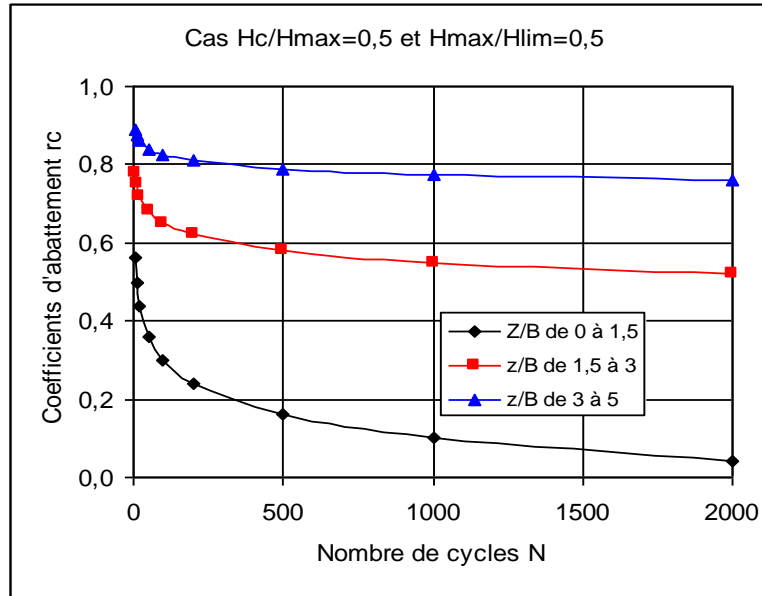


Figure 6 – Valeurs du coefficient r_c dans le cas $H_c/H_{\max}=0,5$ et $H_{\max}/H_{\text{lim}}=0,5$.

4. Conclusion

Une importante base de données d'essais de pieux dans le sable a été constituée dans le cadre du projet SOLCYP. Deux procédures de prise en compte de l'effet des cycles sur la réponse transversale des pieux flexibles sont proposées : une méthode globale et une méthode locale de type P-y. Les deux méthodes permettent de prendre en compte le nombre de cycles ainsi que les caractéristiques du chargement H_c et H_{\max} sur la réponse du pieu. Il s'agit d'une avancée par rapport à la méthode des courbes enveloppes P-y dites « cycliques », utilisées en offshore, mais qui ne prennent les cycles en compte que de manière forfaitaire sans intervention explicite du nombre de cycles ni de leurs caractéristiques.

Il est important de noter que la méthode locale a été établie dans le cas d'un sable de compacité moyenne à forte (I_D supérieure à 50%) pour lequel l'effet des cycles tend à dégrader la réponse du sol et pour un pieu souple (qui est le cas le plus défavorable vis-à-vis de l'effet des cycles). Un complément d'étude permettra de tenir compte de la rigidité du pieu.

5. Remerciements

Les travaux présentés ont été effectués dans le cadre du projet de recherche collaborative SOLCYP. Le financement a été assuré par l'Agence Nationale de la Recherche (volet ANR-SOLCYP), douze entreprises des secteurs du Génie Civil et de l'Énergie, le Ministère du Développement Durable (MEDDE), la FNTP et la Région Pays de la Loire (volet PN-SOLCYP). Le Projet était piloté par l'IREX.

6. Références bibliographiques

- API RP2GEO (2011) API Recommended Practice, Geotechnical and Foundation Design Considerations, First Edition, April 2011.
- Bouafia A. (1994) *Etude expérimentale du chargement latéral cyclique répété des pieux isolés dans le sable en centrifugeuse*, Can. Geotech. J., 31, pp. 740-748.
- Garnier J., (1995). *Modèles réduits en mécanique des sols*. Les modèles réduits en Génie Civil, Colloque A.U.G.C., pp. 21-44.
- Garnier J., Rosquoët F., Khemakhem M., Rakotonindriana J., Thorel L., Le Kouby A. et Chenaf N. (2010) *Pieux sous charges latérales cycliques*, Rapport IFSTTAR, ANR, 95p.
- Hadjadji T., Frank R. & Degny E. (2002) *Analyse du comportement expérimental de pieux sous chargements horizontaux*, LCPC, Etudes et Recherches, GT74, 303p.
- Hettler A. (1981) *Verschiebungen starrer und elastischer Gründungskörper in Sand bei monotoner und zyklischer Belastung*, In A. Blinde, G. Gudehus, O. Natau (Ed.), Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 90, Karlsruhe.
- ISO 19901-4 (2003) Petroleum and Natural Gas Industries, Specific requirements for offshore structures, Part 4: Geotechnical and Foundation Design Considerations.
- Khemakhem M. (2012). *Etude expérimentale de la réponse aux charges latérales monotones et cycliques d'un pieu foré dans l'argile*. Thèse de doctorat, ECN, 336 p.
- Kikuchi Y. (2008). *Lateral resistance of piles in sand under repeated horizontal loading*. 2nd BGA Int. Conf. on Foundations, ICOL 2008, Dundee, Balkema, pp. 1225-1236.
- Kishida H. Suzuki Y. & Nakai S. (1985). *Behavior of a pile under horizontal cyclic loading*. 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., San Francisco, Balkema, pp. 1413-1416.
- Klinkvort R.T. (2012). *Centrifuge modelling of drained lateral pile – soil response*. PhD Thesis, DTU, Technical University of Denmark, 232 p.
- Li Z., Haigh S.K & Bolton M. (2010) *Centrifuge modelling of mono-pile under cyclic lateral loads*, Int. Conf. Physical Modelling in Geotechnics, ICPMG 2010, Zurich, Springman, Laue & Seward (Ed.), Taylor & Francis, Vol. 2, pp. 965-970.
- Lin S.S. & Liao J.C. (1999) *Permanent strains of piles in sand due to cyclic lateral loads*, J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, 125, 9, pp. 798-802.
- Long J.H. & Vanneste G. (1994) *Effects of cyclic lateral loads on piles in sand*, J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, 120, 19, pp. 225-244.
- Peralta P.K. (2010) *Investigations on the Behavior of Large Diameter Piles under Long-Term Lateral Cyclic Loading in Cohesionless Soil*, Degree of Doctor of Engineering, Leibniz University Hannover, 223 p.
- Rakotonindriana J. (2009). *Comportement des pieux et des groupes de pieux sous chargement latéral cyclique*. Thèse de doctorat ENPC, 381 p.
- Rosquoët F., (2004). *Pieux sous charge latérale cyclique*. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale & Université de Nantes, 305 p.
- Rosquoët F., Thorel L., Garnier J., Canepa Y. (2007). *Horizontal cyclic loading of piles installed in sand*. Soils and Foundations, october, Vol.47, No.5, pp. 821-832.
- Verdure L., Levacher D. & Garnier J. (2003) *Effet des cycles sur le comportement d'un pieu isolé dans un sable dense sous chargement latéral*, Revue Française de Génie Civil, Vol. 7, N°9, pp.1185-1210.
- Zhang C., White D. & Randolph M. (2011). *Centrifuge modelling of the cyclic lateral response of a rigid pile in soft clay*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 717, pp. 717-729.