

COMPORTEMENT CYCLIQUE AXIAL DE PIEUX DANS LE SABLE - CALIBRATION DU PROGRAMME SCARP

AXIAL CYCLIC BEHAVIOUR OF PILES IN SAND – CALIBRATION OF THE SCARP PROGRAM

Zine Labidine DELIMI¹, Alain PUECH¹

¹ Fugro GeoConsulting, Nanterre, France

RÉSUMÉ – Le logiciel SCARP a été développé par le Professeur H. Poulos (1989). SCARP a pour objectif d'aider au dimensionnement de pieux soumis à des chargements cycliques axiaux. On s'est intéressé, dans ce travail, à caler les modèles de dégradation du frottement ainsi que les paramètres d'accumulation des déplacements cycliques dans un sable siliceux sur une base de données d'essais de pieux à grande échelle.

ABSTRACT – SCARP is a software program developed by Professor H. Poulos (1989). The main aim of SCARP is to assist in designing piles subjected to axial cyclic loadings. This work consists of calibrating the friction degradation models and the displacement accumulation parameters proposed in SCARP, for siliceous sand soils, on an available database of large scale pile tests.

1. Introduction

Dans le cadre du projet de recherche SOLCYP (Puech et Garnier, 2016), une base de données importante a été obtenue à partir d'essais à grande échelle de chargements axiaux statiques et cycliques, réalisés sur des pieux installés sur deux sites différents : Loon-Plage (sable dense des Flandres), et Merville (argile des Flandres).

Cet article présente les résultats de calibration des paramètres cycliques du programme SCARP dans un sable siliceux. SCARP permet de simuler les phénomènes de dégradation cyclique à l'interface sol-pieu, cette simulation se faisant par le biais d'algorithmes qui nécessitent un calage sur des données expérimentales bien documentées et de qualité.

La base de données expérimentales provient à la fois des essais de Loon-Plage réalisés, dans le cadre du projet SOLCYP (Benzaria, 2013) et des données des essais réalisés par l'Imperial College sur le site voisin à Dunkerque (Jardine et Standing, 2000) présentant les mêmes caractéristiques de sable.

2. Données expérimentales

2.1. Projet de recherche SOLCYP

Le site de Loon-Plage se situe à l'ouest de Dunkerque, dans le nord de la France. Le sable rencontré à Loon-Plage est un sable siliceux très fin ($D_{50} = 0,15$ mm), avec une densité relative d'environ 80%.

Le programme d'essais comporte 7 pieux dont 5 pieux forés et 2 pieux battus. Les pieux forés, de type CFA, font 420 mm de diamètre et comprennent deux pieux de longueur de fiche de 8 m destinés aux essais en compression, et trois pieux de longueur de fiche de 10,5 m destinés aux essais en traction. Les pieux battus sont fermés à la base, de longueur de fiche de 13 m, de diamètre $D = 406$ mm et d'épaisseur $e = 14$ mm.

2.2. Projet de recherche GOPAL

Dans le cadre du projet de recherche GOPAL, une série d'essais de chargements cycliques sur des pieux a été effectuée par Jardine et Standing (2000). Le site se situe à Dunkerque (Nord de la France) près de la mer, à quelques kilomètres du site de Loon-Plage. Le sable est un sable siliceux fin à moyen ($D_{50} = 0,25$ mm) d'une densité relative proche de 100%.

Le programme d'essais comportait 6 pieux battus de 457 mm de diamètre, entre 18.9 m et 19.32 m de longueur, et 13.5 mm d'épaisseur. Les pieux battus ont été soumis à différents chargements statiques et cycliques.

3. Programme numérique SCARP

3.1. Présentation du programme

SCARP a été mis au point par Poulos (1989) à l'Université de Sydney afin de calculer la réponse d'un pieu ou d'un groupe de pieux sous chargements statiques et/ou cycliques. Ce logiciel s'appuie sur la notion de continuum 1D avec mise en œuvre d'éléments frontières, en considérant que le comportement du sol est élastique. Le pieu est divisé en un nombre d'éléments de longueurs égales. À l'interface sol/pieu de chaque élément, un modèle d'interface avec possibilité de radoucissement élasto-plastique gouverne le comportement (Figure 1).

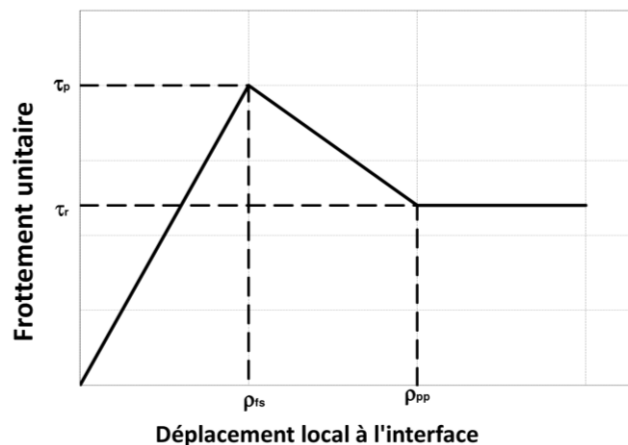


Figure 1. Modèle d'interface utilisé par SCARP (Poulos, 1989)

3.2. Approches de dégradation de frottement

Afin de simuler la dégradation du frottement en fonction du niveau de chargement cyclique et du nombre de cycles, SCARP propose deux modèles : le modèle de Matlock et Foo (1979) et le modèle de Poulos (1989).

3.2.1 Approche de Matlock et Foo

L'approche de Matlock et Foo (1979) utilise un facteur de dégradation D (défini comme le rapport entre le frottement après séquence cyclique et le frottement statique) appliqué pour chaque cycle, sur le pic de frottement τ_p d'un élément (Figure 1) si le frottement dans cet élément est mobilisé à 100% (partie plastique dans le modèle d'interface). La dégradation est gouvernée par un facteur λ qui contrôle la vitesse de dégradation, et une

valeur minimale D_{\min} qui est définie comme une asymptote (dégradation minimale). Le facteur de dégradation en fonction du cycle s'exprime par l'équation (1).

$$D_{\tau} = (1 - \lambda)(D'_{\tau} - D_{\tau\min}) + D_{\tau\min} \quad (1)$$

D_{τ} : valeur actuelle du facteur de dégradation pour le cycle actuel ;

D'_{τ} : valeur du facteur de dégradation pour le cycle précédent ;

$D_{\tau\min}$: valeur minimale du facteur de dégradation ;

λ : paramètre de vitesse de dégradation.

Cette expression peut s'appliquer de manière similaire pour la résistance en pointe et le module de cisaillement du sol (raideur de l'interface).

3.2.2 Approche de Poulos

Poulos (1981) a réalisé des essais à déplacement contrôlé sur un modèle de pieu de 20 mm de diamètre dans un massif de sable siliceux moyennement dense. L'auteur a appliqué plusieurs niveaux de déplacement cyclique pour tester leur influence sur la dégradation du frottement latéral. Les résultats après 10 cycles sont présentés sur la Figure 2 et montrent que la dégradation du frottement latéral augmente avec l'amplitude du déplacement cyclique local.

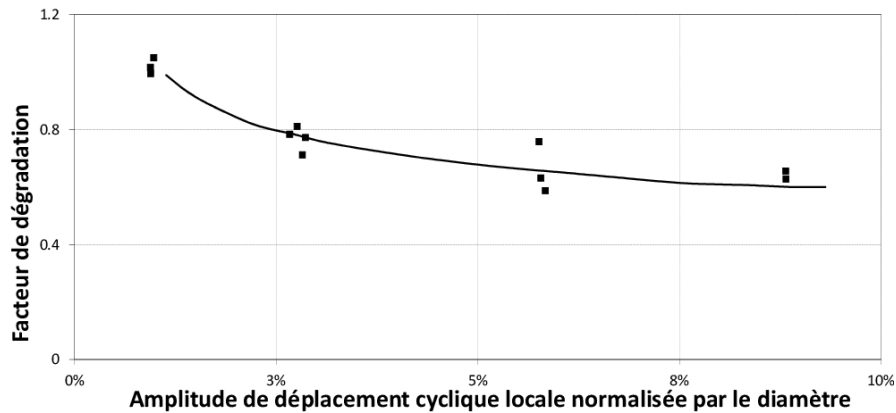


Figure 2. Influence de l'amplitude de déplacement sur la dégradation du frottement latéral (d'après Poulos, 1981)

Selon Poulos, la dégradation de frottement est estimée en utilisant l'expression de l'équation (1) mais avec des paramètres λ et D_{\min} différents pour chaque niveau d'amplitude de déplacement cyclique local. Ce modèle peut s'appliquer de manière similaire pour la résistance en pointe et le module de cisaillement du sol.

3.3. Accumulation du déplacement cyclique en tête du pieu

Les déplacements permanents (accumulation du déplacement cyclique en tête du pieu) sont calculés, dans SCARP, à partir d'une expression empirique basée sur le travail de Diyaljee et de Raymond (1982) :

$$S_p = BN^m e^{nX} \quad (2)$$

avec :

S_p : accumulation de déplacement cyclique en tête ;

B : déplacement permanent généré par le premier cycle d'un faible niveau de chargement ;

N : nombre de cycles ;
 m, n : paramètres déterminés expérimentalement ;
 X : niveau de chargement correspondant au ratio de la charge cyclique maximale sur la résistance ultime en statique.

Lorsque le pieu est soumis à une succession de combinaisons de chargements cycliques, la prise en compte des cycles des chargements précédents se fait par une procédure de nombre de cycles équivalents.

4. Calibrage des paramètres SCARP

Le calibrage des paramètres cycliques de SCARP est basé sur l'analyse des données expérimentales des projets SOLCYP et GOPAL. Afin d'étudier la dégradation de frottement, seuls les essais de pieux battus ou forés sollicités en tension et dont la capacité pré-cyclique est bien connue sont utilisés. L'ensemble des essais considérés est présenté dans le Tableau 1.

Tableau 1. Essais cycliques considérés dans la calibration de SCARP

Projet/type de pieu	Pieux Battus	Pieu foré
SOLCYP	L-B2/TC1, L-B2/TC2, L-B2/TC3, L-B2/TC4,	L-F2/TC1
GOPAL	2.R5.CY2, 2.R3.CY2, 3.R6.CY6, 2.R4.CY2, 3.R4.CY6	-

La base de données utilisée comporte 9 essais de pieux battus tandis qu'un seul essai cyclique en tension sur pieu foré est à notre disposition. Les paramètres cycliques pour les pieux forés proposés dans cet article sont donc à considérer avec précaution.

4.1. Calage du modèle de sol en statique

Dans cette étape, le modèle de sol construit est calé sur les essais statiques disponibles, le paramètre à caler étant principalement le module d'élasticité du sol. Toutefois, on peut être amené à ajuster le frottement tout en gardant la même distribution de frottement que celle obtenue par la méthode ICP de dimensionnement de pieux battus (Jardine et al., 2005). Le calage du frottement est obtenu lorsque la capacité du pieu calculée est égale à celle de la capacité pré-cyclique de référence. Un exemple est montré sur la figure 3.

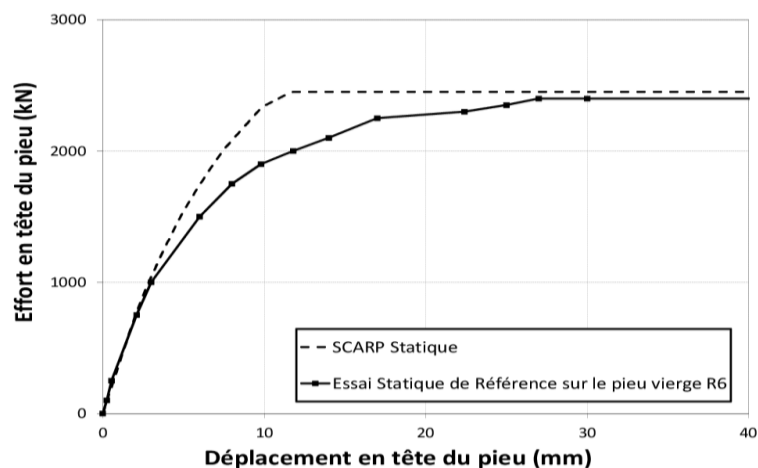


Figure 3. Exemple de simulation statique d'un pieu battu (Pieu R5, projet GOPAL)

4.2. Calage des paramètres de dégradation de frottement

4.2.1 Paramètres du modèle de dégradation de Matlock et Foo

Les paramètres du modèle de dégradation de Matlock et Foo (1989) calés sur les essais de pieux disponibles sont respectivement : ($\lambda = 0.02$, $D_{\min} = 0.2$) pour les pieux battus et ($\lambda = 0.02$, $D_{\min} = 0.3$) pour le pieu foré.

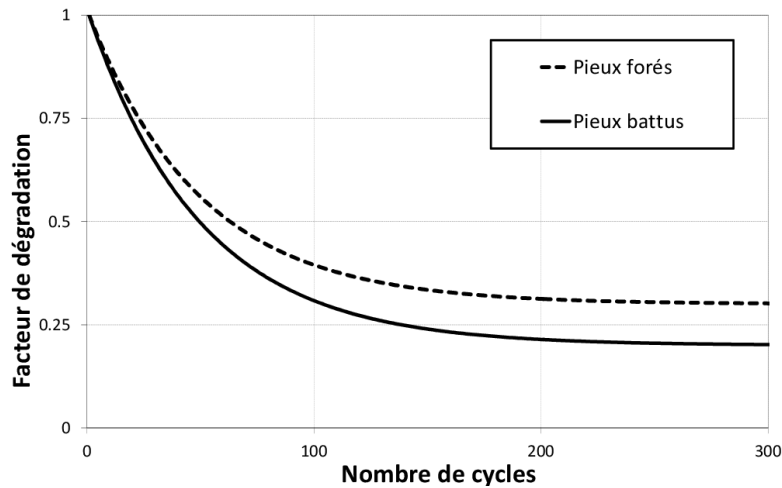


Figure 4. Modèle de dégradation calé de Matlock et Foo (1979). Pieux battus et forés.

Pour un même nombre de cycles, la dégradation des éléments plastifiés est un peu plus forte pour les pieux battus que pour le pieu foré. Ce résultat peut paraître étonnant dans la mesure où la perte globale de capacité est plus sévère sur le pieu foré que sur les pieux battus. En réalité, l'entrée en plasticité des éléments le long du pieu est contrôlée par la rigidité axiale des pieux, ce qui explique cet apparent paradoxe.

4.2.2 Paramètres du modèle de dégradation de Poulos

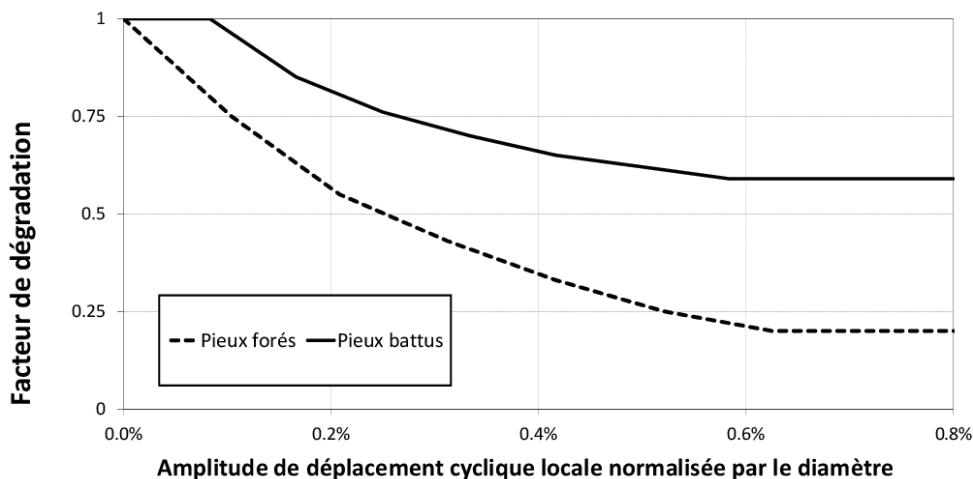


Figure 5. Dégradation minimale de l'approche de Poulos (1981) en fonction de l'amplitude de déplacement cyclique local. Pieux battus et forés.

Le calage consiste ici à chercher les paramètres du modèle de dégradation (λ , D_{\min}) pour différentes amplitudes de déplacement cyclique local. Le modèle de dégradation a une allure similaire à celle obtenue par Poulos (1981) sur des pieux en modèle réduit dans un sable siliceux (Figure 2). Le paramètre λ est similaire à celui de l'approche de Matlock et Foo ($\lambda = 0.02$), tandis que D_{\min} varie en fonction de l'amplitude de déplacement cyclique local normalisée par le diamètre (Figure 5). La dégradation est plus forte sur le pieu foré

que sur les pieux battus, ce qui est en accord avec les résultats d'essais d'interface à rigidité constante effectués par ailleurs (Pra-ai et al., 2016).

5.4.3 Comparaison des approches de dégradation de frottement

La Figure 6 présente un exemple de distribution de l'effort dans un pieu en fonction de la profondeur normalisée pour la longueur du pieu, avant et après une séquence cyclique. Pendant le test L-F2-TC1 (projet SOLCYP), le pieu a subi un chargement cyclique entre 0.5 MN et 2 MN.

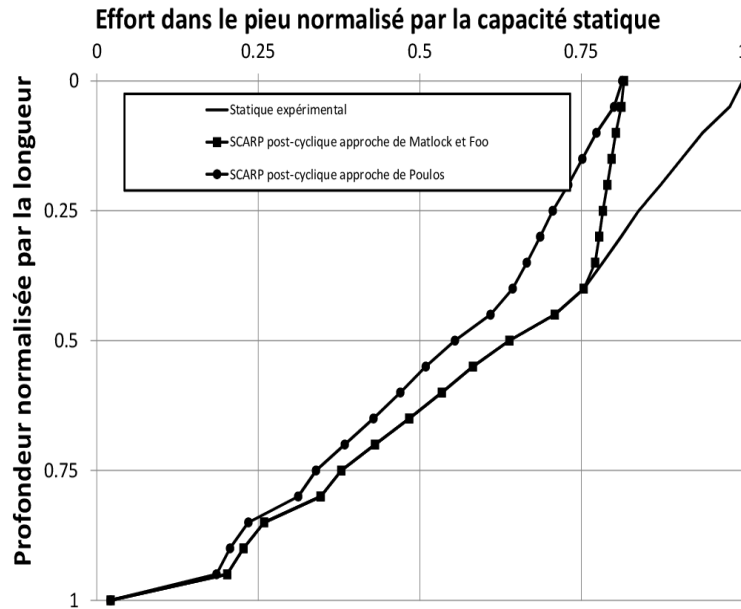


Figure 6. Exemple de distribution de l'effort dans le pieu en fonction de la profondeur avant et après la séquence cyclique – (Essai 2.R5.CY2, projet GOPAL).

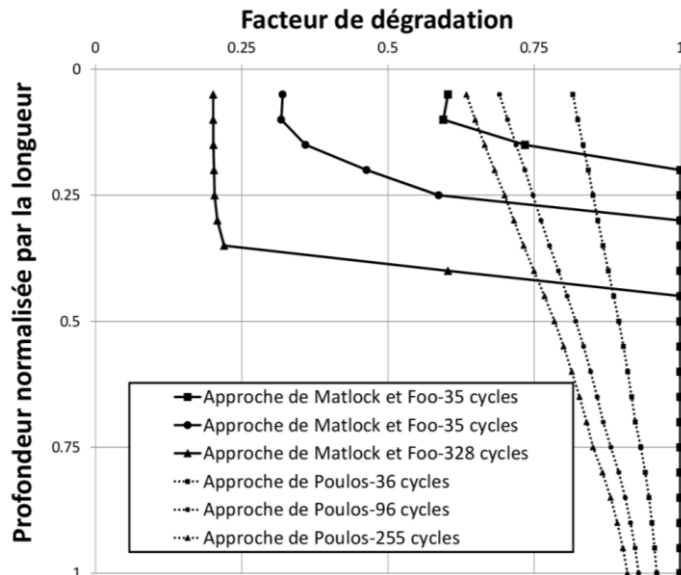


Figure 7. Exemple de distribution du facteur de dégradation en fonction de la profondeur après la séquence cyclique – (Essai 2.R5.CY2, projet Gopal).

Les deux modèles de dégradation donnent des résultats satisfaisants; une rupture après 283 cycles obtenue par l'approche de Matlock et Foo et une rupture après 343 cycles obtenue par l'approche de Poulos, contre une rupture expérimentale observée

après 367 cycles. Cependant, bien que les deux approches soient capables de quantifier la dégradation, la répartition de cette dernière en fonction de la profondeur est totalement différente.

La figure 7 montre la variation du facteur de dégradation en fonction de la profondeur pour l'essai 2.R5.CY2 (projet GOPAL). L'approche de Matlock et Foo dégrade sévèrement les couches en surfaces (jusqu'à 80% de dégradation des éléments d'interface plastifiés en faible profondeur), tandis que l'approche de Poulos consiste à dégrader le frottement tout le long du pieu avec une dégradation maximale en surface (correspondant à un déplacement cyclique maximal), décroissant ensuite progressivement avec la profondeur

4.3. Calage des paramètres d'accumulation de déplacement cyclique

Les paramètres expérimentaux m et n pour la formule de Dyaljee et Raymond diffèrent en fonction des niveaux de chargements cycliques par rapport à la capacité statique. Il ressort que :

- Pour les pieux stables (déplacements cycliques faibles pour un grand nombre de cycles), les valeurs de m se situent dans la fourchette $0.1 < m < 0.15$ avec $n = 7.6$;
- Pour les pieux métastables (déplacements cycliques significatifs pouvant conduire à la rupture pour un nombre de cycles important, typiquement $N > 100$), les valeurs de m se situent dans la fourchette $0.3 < m < 0.4$ avec $n = 7.6$;
- Pour les pieux forés des valeurs de $m=0.6$ et de $n=7.6$ sont obtenues à partir du seul essai disponible.

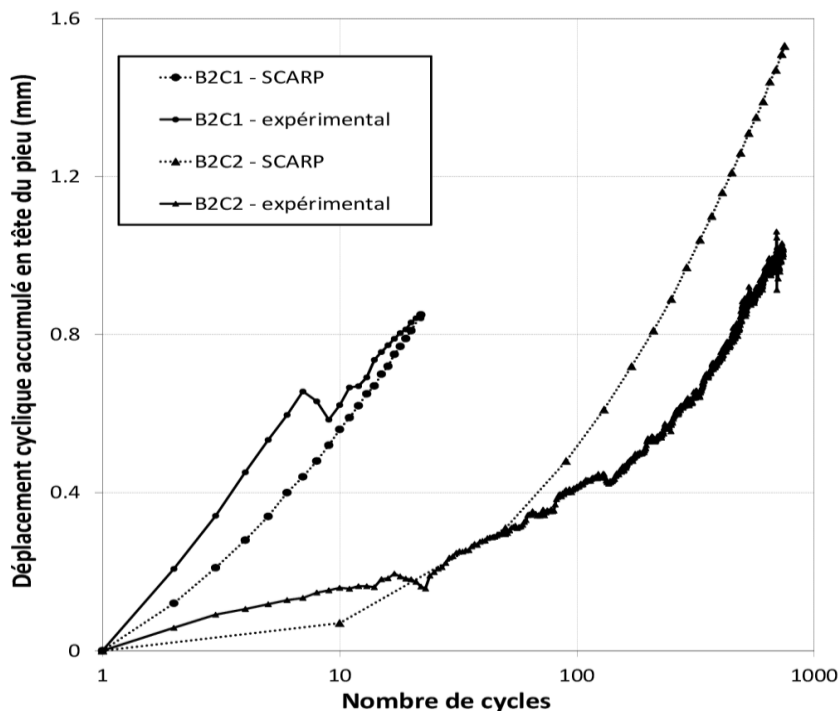


Figure 8. Exemple de simulation de l'accumulation de déplacement cyclique en tête (Essai B2C1 et B2C2, projet SOLCYP)

5. Conclusions

La simulation de la réponse globale des pieux sous chargement cyclique par SCARP est relativement satisfaisante, les modèles calés par les deux approches réussissant à prévoir des conditions de rupture voisines de celles obtenues expérimentalement.

L'approche de Matlock et Foo dégrade sévèrement les couches en surface, car elle consiste à dégrader les éléments où le frottement est mobilisé à 100% (élément d'interface plastifié). La mobilisation totale du frottement dans chaque élément dépend principalement du déplacement de glissement statique. Or ce dernier peut varier notablement le long du pieu car il dépend de plusieurs paramètres : module d'élasticité du sol et du pieu, frottement, diamètre etc. Il peut en résulter une distribution peu réaliste de la dégradation (Figure 7).

L'approche de Poulos donne une distribution de dégradation tout le long du pieu qui paraît plus vraisemblable. La dégradation est maximale en surface, là où l'amplitude de déplacement cyclique est maximale. Elle décroît ensuite progressivement avec la profondeur. L'approche de Poulos, consistant à relier directement la dégradation du frottement à l'amplitude de déplacement cyclique normalisée par le diamètre du pieu est une approche simplifiée. Les travaux SOLCYP ont montré, par ailleurs, que, si l'amplitude cyclique est une cause essentielle de la chute des contraintes radiales, celle-ci dépend également d'autres paramètres tels que l'amplitude moyenne et la rigidité du pieu.

Les paramètres calés de l'accumulation du déplacement cyclique en tête du pieu sont calculés dans SCARP de manière explicite par une formule empirique basée sur les travaux de Dyaljee et Raymond. Elle contient deux paramètres expérimentaux m et n qui ont pu être calés à partir de la même base de données. Les valeurs sont compatibles avec celles données initialement par Poulos (1981).

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'Energie, 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.

7. Références bibliographiques

- Benzaria O., Puech A., Le Kouby A. (2013) Essais cycliques axiaux sur des pieux forés dans des sables denses. *Proc. ICSMGE, 18th Paris, 2013*.
- Dyaljee V. A., Raymond, G. P. (1982) Repetitive Load Deformation of Cohesionless Soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proc. ASCE, Vol. 108, N° GT10*.
- Jardine, R.J., Chow, F.C., Overy R., and Standing J. (2005). ICP design methods for driven piles in sands and clays. *Thomas Telford*
- Jardine R. J., Standing J R.,(2000) Pile Load Testing Performed for HSE Cyclic Loading Study at Dunkirk France, Dept of Civil & Environmental Engineering Imperial College of Science & Technology. Vol. 1 et 2.
- Matlock H., Foo S. H. C. (1979) Axial analysis of piles using a hysteretic and degrading soil model. *Numerical Methods in Offshore Piling. ICE, London, pp.127-133.*,
- Poulos, H.G. (1989) Scarp Users's Manual. Center for Geotechnical Research. The University of Sydney.
- Poulos H.G. (1981) Cyclic Axial Response of Single Pile. *Journal of Geot. Eng. Div., ASCE, Vo1.107, No.GT7, pp.41-58*.
- Pra-ai S., Pittos G., Boulon M., Puech A. (2016) Cisaillement direct cyclique sol-structure en vue du calcul des pieux, *JNGG 2016, Nancy (à paraître)*.
- Puech A., Garnier J. (2016) Recommandations Solcyp pour le dimensionnement des pieux sous chargements cycliques, *JNGG 2016, Nancy (à paraître)*.