

Essais cycliques axiaux sur des pieux forés dans des sables denses

Cyclic axial load tests on bored piles in dense sands

Benzaria O.

Fugro GeoConsulting, Nanterre, France – IFSTTAR, Paris, France

Puech A.

Fugro GeoConsulting, Nanterre, France

Le Kouby A.

IFSTTAR, Paris, France

RÉSUMÉ : Dans le cadre du projet national SOLCYP, cinq pieux forés instrumentés ont été installés dans les sables denses des Flandres. Deux pieux de 8 mètres de fiche et 420 mm de diamètre ont été soumis à des séries d'essais de chargements statiques et cycliques axiaux en compression. Cette communication présente les résultats les plus significatifs des essais statiques conventionnels et des essais cycliques en compression.

ABSTRACT: As part of the national project SOLCYP, five bored piles were installed in dense Flanders sands. Two 8m long, 420mm diameter instrumented piles were submitted to extensive series of static and cyclic load tests in compression. This paper presents key results from conventional static tests and cyclic one-way tests in compression.

MOTS-CLÉS : SOLCYP, pieux forés, sables denses, chargements cycliques.

KEYWORDS : SOLCYP, bored piles, dense sands, cyclic loading.

1 INTRODUCTION

Le projet national SOLCYP (Puech et al., 2012) a pour objectif principal le développement d'une méthodologie pour le dimensionnement des pieux soumis à des chargements cycliques. Dans ce cadre, des essais sur pieux réels ont été conduits sur deux sites expérimentaux du Nord de la France: le site de Merville constitué d'argile des Flandres et le site de Loon-Plage constitué de sables denses. Sur le site de Loon-Plage ont été installés cinq pieux forés et deux pieux métalliques battus.

Les résultats obtenus sur les pieux battus et forés de Merville ont été partiellement publiés (Benzaria et al., 2012, 2013 ; Puech et Benzaria, 2013). Cette communication est centrée sur les résultats des essais statiques et cycliques en compression exécutés sur les pieux forés sur le site de Loon-Plage.

2 SABLE DES FLANDRES

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. La nappe phréatique au moment des essais se situait à environ 2m sous le niveau du terrain naturel.

Une campagne spécifique d'investigations a été réalisée au droit du plot d'essais comportant 4 essais au piézocône (CPTu), 2 essais au pressiomètre Ménard (PMT), 3 carottages continus et une série d'essais de laboratoire sur carottes (Figures 1 et 2). Le sable est un sable siliceux très fin (D_{50} voisin de 0,15mm) et mal gradué (coefficient d'uniformité $CU=0,98$). La formation est latéralement homogène et se caractérise par des valeurs de résistance au cône q_n croissant de 5 à 40MPa vers 8 m de profondeur pour se stabiliser ensuite entre 30 et 50MPa jusque vers 11,5m. Entre 12 et 16,5m se trouve une couche d'argile molle qui fait brutalement chuter les caractéristiques mécaniques. L'interprétation des CPT par la méthode de Jamiolkowski et al. (2003) (Figure 2) 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 par Kuwano sur le sable de Dunkerque (Kuwano, 1999 ; Jardine et Standing, 2000)

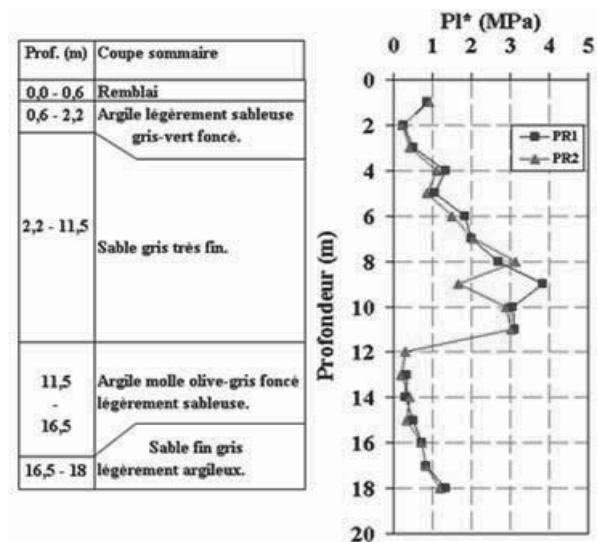


Figure 1. Profils stratigraphiques et pressiométriques à Loon-Plage

3 INSTALLATION ET CHARGEMENT DES PIEUX

Les deux pieux, F4 et F5, sont géométriquement identiques ($D=420$ mm, fiche 8m). Ils ont été exécutés par l'entreprise Botte Fondations à l'aide d'une tarière à axe creux vissée dans le sol sans extraction notable de matériau (Figure 3a) puis extraite sans dévissage tandis que le béton est injecté 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 (Figure 3b).

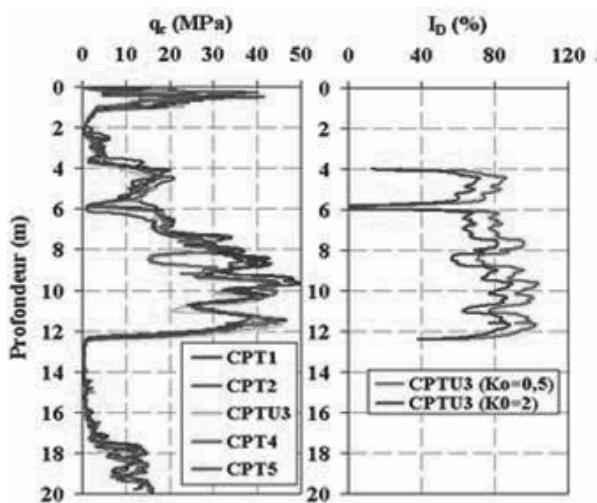


Figure 2. Profils pénétrométriques à Loon-Plage : résistance au cône q_c et indice de densité I_D .

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 chargements cycliques axiaux de type répété. Une description plus précise des modes de chargement est indiquée dans Benzaria et al. (2012).

La caractérisation complète d'un 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,

Q_{max} : charge maximale ($Q_{max} = Q_m + Q_c$)

N : nombre de cycles (les essais ont été conduits à la rupture ou à grand nombre de cycles $N > 1000$)

f : fréquence des cycles (en général 0,5Hz)

Q_u : capacité statique ultime selon le mode considéré.

L'essai est dit répété si $Q_c < Q_m$ et alterné si $Q_c > Q_m$.

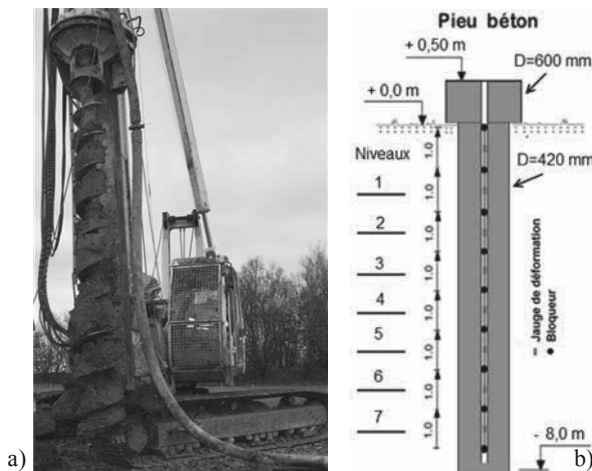


Figure 3. a) réalisation d'un pieu foré à l'aide d'une tarière à axe creux b) schéma d'instrumentation d'un pieu foré à l'aide d'extensomètres amovibles de type LCPC

Le dispositif de chargement des pieux est similaire à celui utilisé pour les pieux de Merville et décrit dans Benzaria et al. (2012).



Figure 4. Dispositif d'essais de chargement utilisé à Loon-Plage

4 ESSAIS STATIQUES

La Figure 5 montre la courbe charge-déplacement en tête obtenue pour l'essai statique de référence sur le pieu F4, vierge de tout chargement, ainsi que la courbe de mobilisation de l'effort en pointe et la courbe de fluage (représentant la vitesse de déplacement du pieu lors de chaque palier de chargement).

On note :

- une rupture de type ductile,
- une entrée du pieu en grands déplacements pour un déplacement en tête de l'ordre de 5% du diamètre. La charge de rupture Q_{uc} conventionnelle pour 10% de déplacement de la tête (42mm) peut être estimée à environ 1 100kN,
- une charge de fluage Q_F vers 850kN soit $Q_F/Q_{uc} \approx 0,77$,
- une mobilisation de l'effort de pointe retardée puis quasi linéaire jusqu'à 8% de déplacement relatif de la tête laissant préjuger d'une croissance de l'effort de pointe au-delà de la valeur conventionnelle à 0,1D.

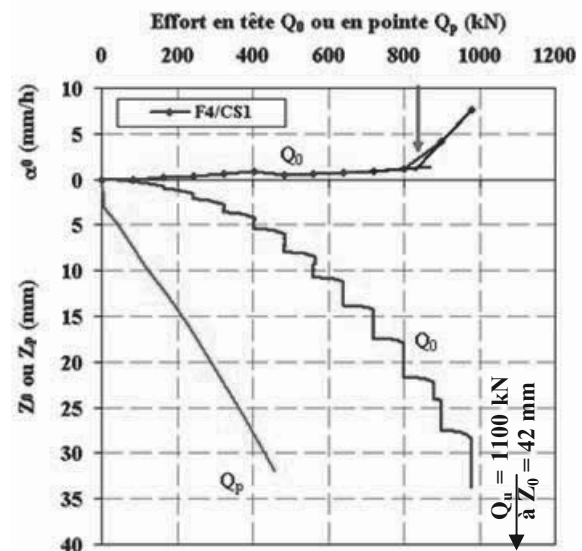


Figure 5. Essai statique de référence sur le pieu F4. Courbes de charge-déplacement en tête, de mobilisation de l'effort de pointe et de fluage.

Les mesures extensométriques ont permis de déterminer la distribution des charges le long du pieu (par éléments de 1m) ainsi que les courbes locales de mobilisation du frottement latéral selon la procédure décrite dans Benzaria et al. (2012). Les courbes locales de transfert de charges (dites aussi courbes t-z) sont données sur la Figure 6 pour les seuls niveaux correspondant au sable des Flandres. La mobilisation du frottement est très progressive : le déplacement local à la

rupture est de l'ordre de 3 à 5% du diamètre du pieu. Le caractère ductile de la rupture est confirmé. Les frottements sont modestes ($f < 45\text{kPa}$).

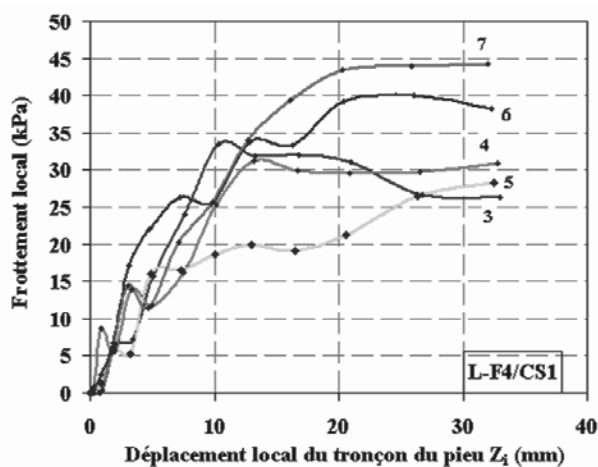


Figure 6. Courbes de mobilisation des frottements locaux obtenues lors de l'essai statique de référence sur le pieu F4.

5 ESSAIS CYCLIQUES

5.1 Essais cycliques sur pieu vierge

La Figure 7 représente la séquence d'essais de chargements réalisés sur le pieu F5 vierge de tout chargement. Leurs caractéristiques sont données dans le Tableau 1

Tableau 1 : Caractéristiques des chargements appliqués au pieu F5
C : cyclique Q_{uc} : 1100 kN (pieu F1)

Test F5-	Type	Date	f (Hz)	Q_m / Q_{uc}	Q_c / Q_{uc}	N
Installation		25/11/11				
CC1	C	08/03/12	0,5	0,36	0,27	14
CC2	C	08/03/12	0,5	0,27	0,09	5000
CC3	C	08/03/12	0,5	0,36	0,18	280

L'essai CC1 a été réalisé avec un taux de chargement relativement modeste ($Q_{max}/Q_{uc} = 0,63$). Il a été arrêté prématurément en raison de l'instabilité d'un pieu de réaction mais il est manifeste que la rupture était imminente après seulement 14 cycles. La rupture est définie pour un déplacement cyclique permanent de la tête du pieu de 3% du diamètre soit 12mm.

L'essai CC2, enchaîné avec un taux nettement plus faible ($Q_{max}/Q_{uc} = 0,35$), a pu être conduit à 5000 cycles mais pour un déplacement additionnel permanent de plus de 16mm.

L'essai CC3 ($Q_{max}/Q_{uc} = 0,54$) a provoqué un déplacement supplémentaire de 6mm pour seulement 280 cycles.

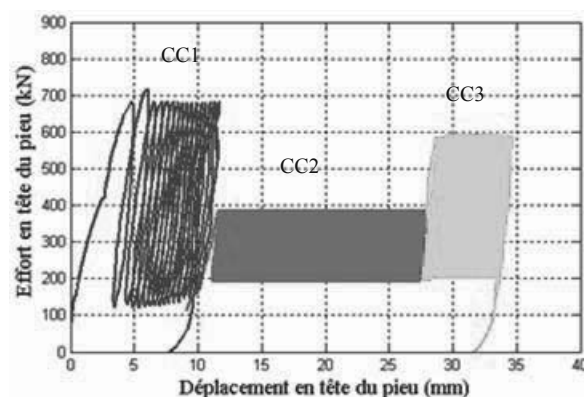


Figure 7. Courbes charges-déplacements en tête obtenues lors des essais de chargements réalisés sur le pieu F5.

Il est à noter que la vitesse d'évolution des déplacements en tête pour un nombre de cycles donné augmente avec le taux de chargement. Cependant pour chacun des essais cette vitesse décroît avec le nombre de cycles (Figure 8). Cette observation peut paraître contradictoire avec le constat de rupture.

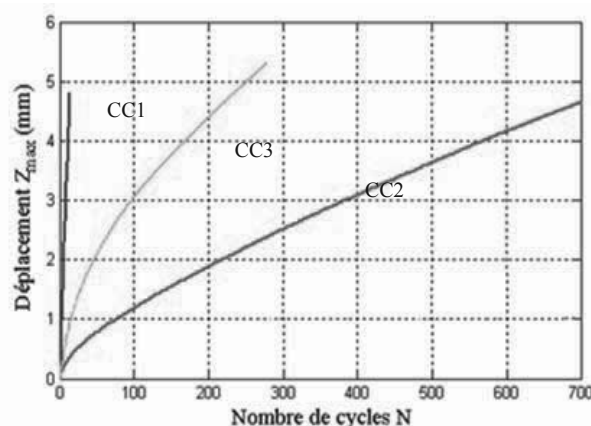


Figure 8. Courbes déplacement en tête en fonction du nombre de cycles obtenues lors des essais de chargements réalisés sur le pieu F5.

Une observation fine des phénomènes générés par les chargements cycliques sur un pieu dans un sable permet de mieux comprendre cet apparent paradoxe. Les cycles provoquent une succession de petits glissements relatifs sol-pieu dont le cumul détermine le déplacement global. La vitesse de déplacement est fonction de l'amplitude et du niveau de chargement mais ces paramètres conditionnent également l'évolution du frottement qui peut se détériorer (cycles sévères) ou s'améliorer (petits cycles). Sur un pieu sollicité en traction, la vitesse initiale se modifie pour conduire vers la rupture de plus en plus rapide ou vers la stabilisation (Tsuha et al., 2012). La rupture peut être indifféremment définie de manière conventionnelle (par exemple 0,1D) ou en terme de déplacement acceptable. Sur un pieu en compression, le déplacement s'accompagne d'une mobilisation progressive de l'effort de pointe de sorte que dans tous les cas le pieu tend vers la stabilisation. Il en résulte que le critère de rupture doit être défini en terme de déplacement acceptable et non de manière conventionnelle. Le critère peut être alors atteint aussi bien en phase de vitesse de déplacement croissante que décroissante. Dans le premier cas, le nombre de cycles amenant à la rupture est faible. Dans le deuxième cas il peut être très élevé. On peut alors introduire la notion de zones instables et métastables (e.g. Puech et al, 2013).

5.2 Effet de l'histoire des chargements

La Figure 9 montre l'histoire des chargements du pieu F4, détaillée dans le Tableau 2.

L'essai CC1 a été exécuté après que le pieu ait été amené à la rupture (essai S1). Malgré son faible taux de chargement ($Q_{max}/Q_{uc} = 0,31$) le critère de rupture est atteint avant 2000 cycles. La capacité post cyclique (essai R1) ne semble toutefois pas affectée par cette série de cycles de faible amplitude.

Tableau 2 : Caractéristiques des chargements appliqués au pieu F4
S : statique conventionnel R : statique rapide C : cyclique

Test F4-	Type	Date 2012	f (Hz)	Q_m / Q_{uc}	Q_c / Q_{uc}	N
Installation		25/11/11				
CS1	S	01/03/12				
CC1	C	02/03/12	0,5	0,18	0,13	1819
CR1	R	02/03/12				
CC2	C	02/03/12	0,5	0,36	0,18	200
CC3	C	02/03/12	0,5	0,36	0,27	200
CC4	C	02/03/12	0,5	0,47	0,25	100
CC5	C	02/03/12	0,5	0,45	0,36	200
CR2	R	02/03/12				
CR3	R	27/03/12				

Une série de quatre essais d'amplitudes et taux moyens croissants (CC2 à CC5) est ensuite enchaînée, provoquant des déplacements significatifs (environ 25mm pour seulement 700 cycles cumulés). L'essai statique rapide R2 indique que la rigidité du pieu a fortement augmenté. L'essai statique R3 confirme ce résultat et montre que la capacité post cyclique du pieu est maintenant de 1480 kN soit un accroissement de 27% par rapport à l'essai S1 sur le pieu vierge.

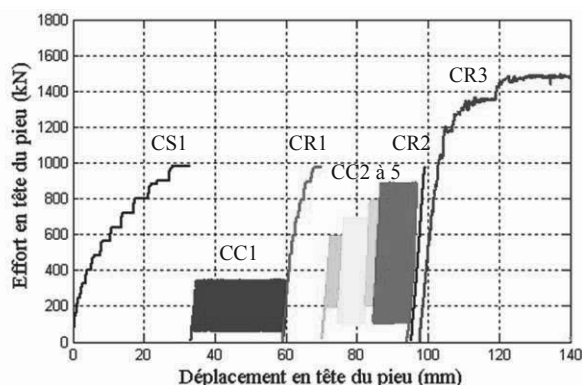


Figure 9. Courbes charge-déplacement en tête obtenues lors des essais de chargements réalisés sur le pieu F4.

6 CONCLUSIONS

On a présenté les résultats des essais statiques et cycliques en compression effectués sur les pieux forés à la tarière creuse installés sur le site de Loon-Plage constitué de sable dense des Flandres.

Sous chargement statique la rupture est ductile et la mobilisation du frottement nécessite des déplacements globaux et locaux importants entre 3 et 5% du diamètre du pieu.

Le comportement cyclique est très fortement dépendant de l'histoire des chargements. D'une manière générale, les pieux forés apparaissent très sensibles aux chargements répétés. Des déplacements importants peuvent être générés avant de pouvoir bénéficier d'une capacité en pointe suffisante pour stabiliser le pieu. La rupture doit donc être définie par un critère en déplacement et non de manière conventionnelle.

Une interprétation plus approfondie des résultats reste à proposer après traitement complet des autres données recueillies (essais alternés et essais en traction) et en liaison avec le comportement mécanique du sable des Flandres.

7 REMERCIEMENTS

Les résultats présentés dans cette communication ont été acquis dans le cadre du Projet National Français SOLCYP. SOLCYP est un projet de recherche sur le comportement des pieux soumis à des sollicitations cycliques, regroupant 12 entreprises et bureaux d'études du génie civil et 6 organismes universitaires et de recherche. Il est piloté par l'IREX et financé par les partenaires, l'Agence Nationale de la Recherche, le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie et la Fédération Nationale des Travaux Publics. Les auteurs remercient les partenaires du projet d'avoir autorisé la publication de ces données.

8 REFERENCES

- AFNOR.1999. NF P 94-150-2. 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 l'argile des Flandres. *Proceedings 18th ICSMGE, Paris*
- Jamiolkowski, M.B., Lo Presti, D.C.F. & Manassero, M. 2003. Evaluation of Relative Density and Shear Strength of Sands from CPT and DMT. *Soil Behavior and Soft Ground Construction*, ASCE, GSP No. 119, 201-238.
- Jardine, R.J., Standing, J.R.: OTO 2000. 008 - Pile Load Testing Performed for HSE Cyclic Loading Study at Dunkirk, France; Volume 1".
- Kuwano R. 1999, "The stiffness and yielding anisotropy of sand." PhD thesis, University of London (Imperial College).
- 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
- Puech A. et Benzaria O. 2013. Effet du mode de mise en place sur la réponse statique et cyclique de pieux dans l'argile surconsolidée des Flandres. *Proceedings 18th ICSMGE, Paris*
- Puech A., Benzaria O., Thorel L., Garnier J., Foray P. et Jardine R. 2013. Diagrammes de stabilité cyclique de pieux dans les sables. *Proceedings 18th ICSMGE, Paris*
- Tsuhra C.H.C., Foray P.Y., 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), June 2012, 393–410,