

Essais cycliques axiaux sur des pieux forés dans l'argile surconsolidée des Flandres

Cyclic axial load tests on bored piles in overconsolidated Flanders clay

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, quatre pieux forés instrumentés ont été installés dans l'argile fortement surconsolidée des Flandres. Ces pieux de 13 mètres de fiche et 420mm de diamètre ont été soumis à des séries d'essais de chargements statiques et cycliques axiaux. Cette communication présente les principaux résultats des essais statiques conventionnels et des essais cycliques en compression répétés et alternés.

ABSTRACT: As part of the national project SOLCYP, four bored piles were installed in the high OCR Flanders clay. The 13m long, 420mm diameter instrumented piles were submitted to extensive series of static and cyclic load tests. This paper presents key results from conventional static tests and cyclic one-way and two-way tests in compression.

MOTS-CLES: SOLCYP, pieux forés, argile surconsolidée, chargements cycliques.

KEYWORDS : SOLCYP, bored piles, overconsolidated clay, 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 sable dense. Sur le site de Merville ont été installés quatre pieux métalliques battus, quatre pieux forés et deux pieux vissés moulés.

Un précédent article (Benzaria et al., 2012) était consacré à la description du contexte expérimental et à la présentation des résultats obtenus sur les pieux battus. Cette communication présente les résultats des essais statiques et cycliques exécutés sur les pieux forés.

2 ARGILE DES FLANDRES

Le site expérimental se situe sur la commune de Merville (59) dans le Nord de la France. Il se caractérise par une couverture de limons sableux à argileux de 3,5m d'épaisseur dans lequel fluctue la nappe phréatique (-2m environ lors des essais) sous laquelle on rencontre la formation d'argile des Flandres, particulièrement homogène sur toute la zone, et d'une puissance de 40m environ.

L'argile des Flandres, géologiquement comparable à l'argile de Londres et à l'argile de Boom, s'est déposée il y a 50 millions d'années (Eocène) dans un golfe marin qui couvrait toute la zone Nord de la France, de la Belgique et du Sud Est de l'Angleterre. Elle a été recouverte par des formations tertiaires dont la sédimentation s'est poursuivie jusqu'au Pleistocène supérieur. Le niveau du sol se situait alors probablement à 200m au-dessus du niveau actuel. Les formations sus-jacentes se sont érodées. Le processus d'érosion a été suivi au Quaternaire par le dépôt d'alluvions du Flandrien. Le matériau a été soumis à des cycles de chargement/déchargement et à des processus périglaciaires qui associés à des phénomènes de cimentation

chimique et de vieillissement ont fortement conditionné son degré de surconsolidation (OCR) apparent (Josseaume, 1998)

L'argile des Flandres présente des caractéristiques voisines de celles des argiles de Londres et de Boom (Borel et Reiffsteck, 2005) :

- faible teneur en eau (de l'ordre de 30%)
- forte plasticité (IP voisin de 50)
- forte fissuration notamment au-delà de 5m de profondeur

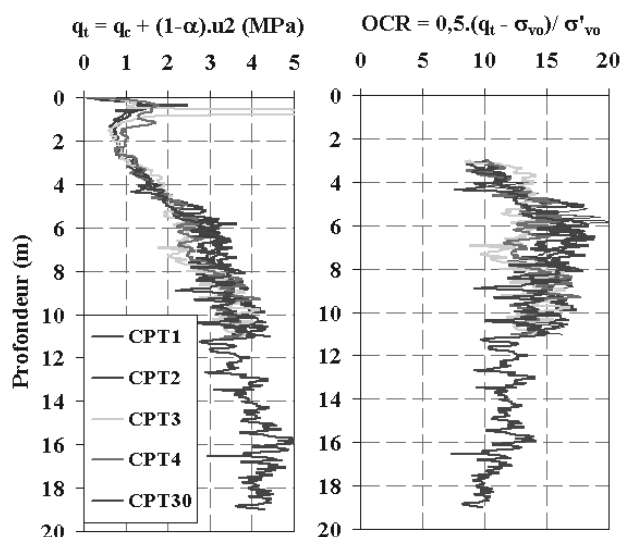


Figure 1. Profils de résistance au cône q_t et OCR sur le site de Merville

Une campagne spécifique d'investigations a été réalisée au droit du plot d'essais comportant des essais au piezocône (CPTU), des essais au pressiomètre Ménard (PMT), des carottages continus et une série d'essais de laboratoire sur carottes.

L'OCR a été estimé à partir du CPT et de la relation de Mayne (1991) : $OCR = k \cdot (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}$ avec $k=0,5$. Le facteur k est fonction du type de matériau. La valeur de 0,5 a été retenue car elle donne des valeurs d'OCR compatibles avec l'épaisseur de surcharge supposée et le gradient de $q_n = q_t - \sigma_{v0}$ dans l'argile profonde (au-delà de 8m). A noter que pour l'argile de Londres, Powell et al., 1989 suggèrent des valeurs de k supérieures à 1.

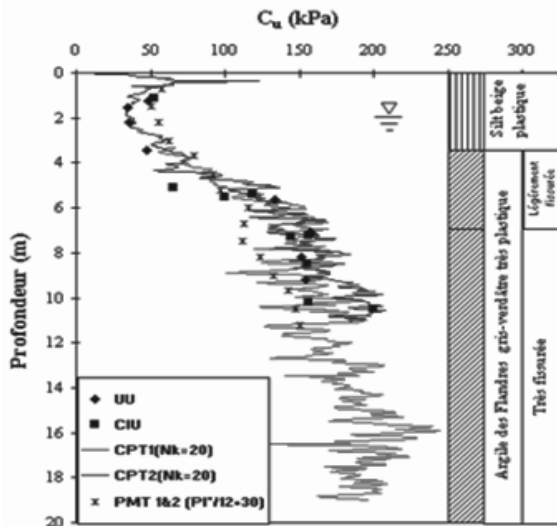


Figure 2. Conditions de sol au niveau du plot d'essais de Merville

Les essais triaxiaux de type UU (non consolidé, non drainé) ou CIU (consolidé isotropiquement, non drainé) montrent des ruptures prématurées de type fragile, caractéristiques de ce type d'argile plastique fissurée et fortement surconsolidée. La rupture se caractérise par la formation de plans de cisaillement contenant des particules réorientées, comme noté par Bond et Jardine (1991). Les valeurs de la résistance au cisaillement non drainée C_u sont corrélées à la résistance au cône par un facteur N_{kt} élevé, $[N_{kt} = (q_t - \sigma_{v0}) / C_u = 20]$, compatible avec la nature du matériau. Les valeurs de pression limite pressiométrique nette sont assez bien reliées à C_u par la relation d'Amar et Jezequel (1998) : $C_u = p_l^* / 12 + 30$, avec C_u en kPa et p_l^* en MPa

3 INSTALLATION ET CHARGEMENT DES PIEUX

Les quatre pieux sont géométriquement identiques ($D=420\text{mm}$, fiche 13m). Ils ont été exécutés 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. La partie basse est munie d'un manchon télescopique. 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).

Les pieux ont été testés deux mois 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 (1999), des essais de chargement rapides (réduction des paliers à 3mm) et des essais de chargement cycliques axiaux de type répété ou alterné. Une description plus précise des dispositifs (Figure 4) et 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 $N > 1000$)

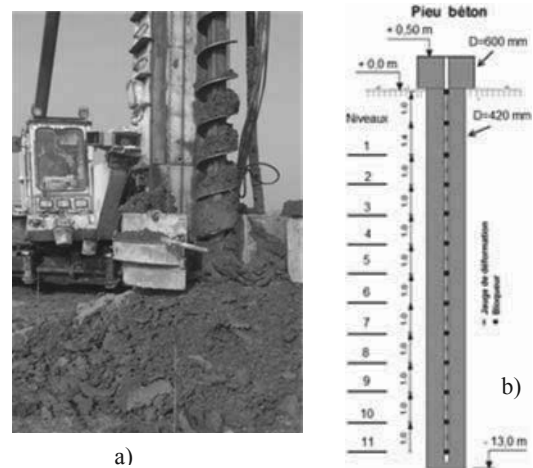


Figure 3. Pieux forés a) tarière à axe creux. b) schéma d'instrumentation à l'aide d'extensomètres amovibles de type LCPC.



Figure 4 : Dispositif de chargement des pieux en compression.

- 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 $Q_c > Q_m$.

4 ESSAIS STATIQUES

La Figure 5 montre la courbe charge-déplacement en tête obtenue pour l'essai statique de référence sur le pieu F1, vierge de tout chargement, ainsi que la courbe de fluage représentant la vitesse de déplacement du pieu lors de chaque palier de chargement.

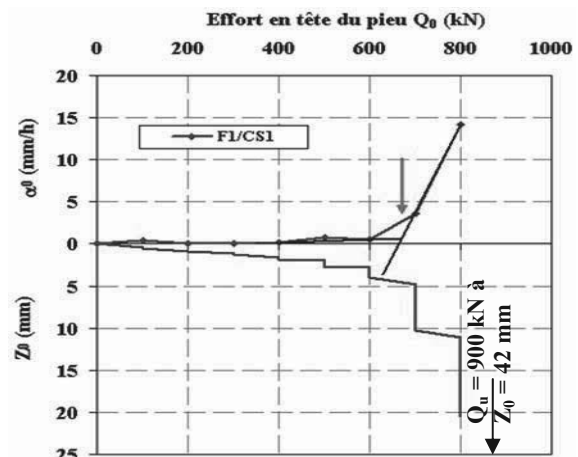


Figure 5. Courbe charge-déplacement en tête et courbe de fluage obtenues pour l'essai statique de référence sur le pieu F1.

On note :

- une rupture de type ductile (contrairement aux observations de Benzaria et al., 2012 sur le pieu battu) ;
- une entrée du pieu en grands déplacements pour un déplacement en tête de l'ordre de 3% du diamètre. La charge de rupture Q_{uc} conventionnelle pour 10% de déplacement de la tête peut être extrapolée avec confiance à 900kN ;
- une charge de fluage Q_F nette vers 670kN soit $Q_F/Q_{uc} \approx 0,75$.

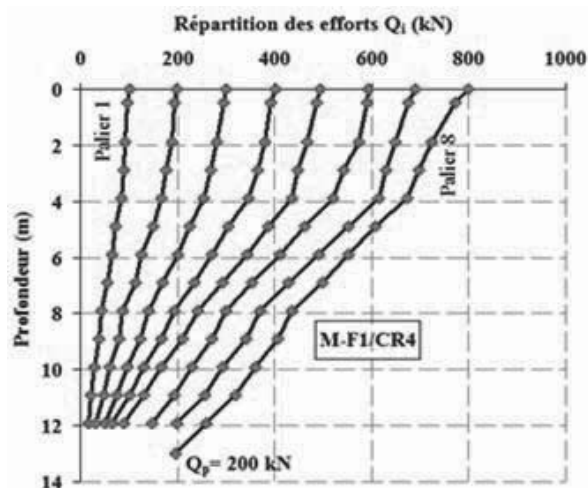


Figure 6. Distributions des charges obtenues pour l'essai statique de référence sur le pieu F1.

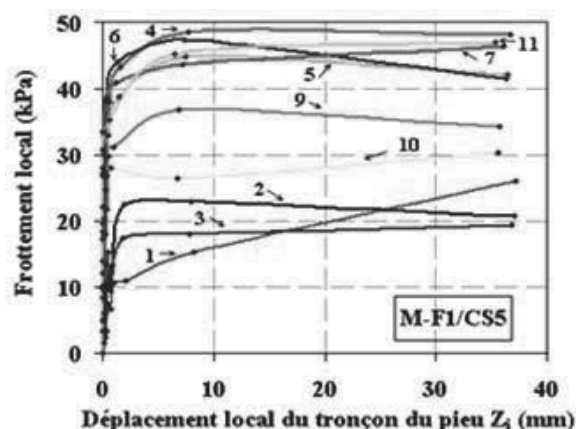


Figure 7. Courbes locales de mobilisation du frottement latéral obtenues pour l'essai statique de référence sur le pieu F1.

Les mesures extensométriques ont permis de déterminer la distribution des charges le long du pieu (Figure 6) 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 7. La mobilisation du frottement est très rapide (entre 1 et 2%) du diamètre du pieu. Le caractère ductile de la rupture est confirmé. Les frottements sont modestes ($f < 50$ kPa) et très inférieurs à ceux observés sur les pieux métalliques battus installés sur ce même site.

5 ESSAIS CYCLIQUES

5.1 Essais cycliques répétés

La Figure 8 représente la séquence d'essais de chargements réalisés sur le pieu F2. Leurs caractéristiques sont données dans la Tableau 1.

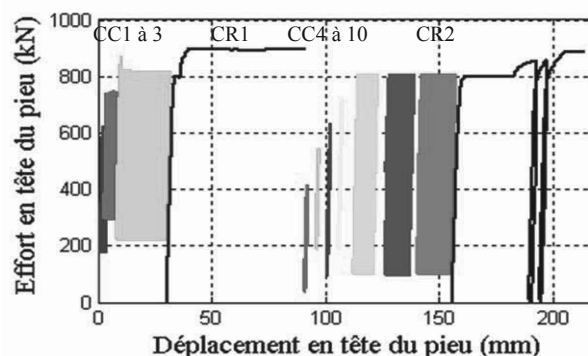


Figure 8. Courbes charge-déplacement en tête obtenues lors d'essais de chargements statiques et cycliques sur le pieu F2.

On observe que :

- le taux de chargement maximal contrôle la réponse du pieu ;
- lorsque ce taux demeure inférieur à un seuil critique, les déplacements restent non significatifs y compris pour de grands nombres de cycles ($N > 1000$). Les boucles d'hystérésis sont fermées (Figure 9) ;
- lorsque le seuil critique est franchi, le pieu cumule rapidement des déplacements le conduisant vers la rupture. Les essais CC3, CC8, CC9 et CC10 ont dépassé 12mm (3%D) de déplacement cyclique permanent considéré comme critère de rupture (Figure 8) ;
- le seuil critique est très voisin de $Q_{max}/Q_{uc} = 0,9$
- les chargements cycliques, y compris lorsqu'ils conduisent à la rupture, n'ont pas significativement affecté la capacité statique du pieu.

Tableau 1 : Caractéristiques des chargements appliqués au pieu F2
C : cyclique R : statique rapide $Q_{uc} = 900$ kN (pieu F1)

Test F2-	Type	Date	f (Hz)	Q_m/Q_{uc}	Q_c/Q_{uc}	N
Installation		16/03/2011				
CC1	C	16/05/2011	0,5	0,50	0,25	3408
CC2	C	17/05/2011	0,5	0,58	0,25	4834
CC3	C	17/05/2011	0,5	0,58	0,33	2021
CR1	R	17/05/2011				
CC4	C	17/05/2011	0,5	0,25	0,20	1013
CC5	C	17/05/2011	0,5	0,40	0,20	1000
CC6	C	17/05/2011	0,5	0,40	0,30	1088
CC7	C	17/05/2011	0,5	0,50	0,30	602
CC8	C	17/05/2011	0,5	0,50	0,40	81
CC9	C	17/05/2011	0,1	0,50	0,40	24
CC10	C	17/05/2011	0,5	0,50	0,40	85
CR2	R	17/05/2011				

La comparaison des essais CC9 et CC10 effectués à mêmes taux de chargement met en outre en évidence un effet de fréquence dans le domaine proche de la rupture : la rupture est accélérée lorsque la fréquence diminue.

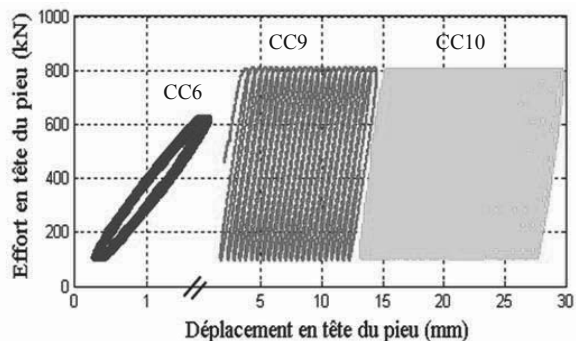


Figure 9. Courbes charge-déplacement en tête obtenues d'essais de chargements réalisés sur le pieu F2.

5.2 Essais cycliques alternés

Neuf essais cycliques alternés ont été effectués sur le pieu F3. Les caractéristiques de ces essais sont telles que $Q_m/Q_{uc} < 0,2$ et $0,2 < Q_c/Q_{uc} < 0,5$. Pour des raisons de montage hydraulique (deux vérins en opposition de phase), il n'a pas été possible d'appliquer une charge maximale Q_{max} supérieure à $0,7 Q_{uc}$.

Tous les essais effectués dans ces conditions sont du type stable avec des boucles d'hystérésis fermées comme illustré sur la Figure 10.

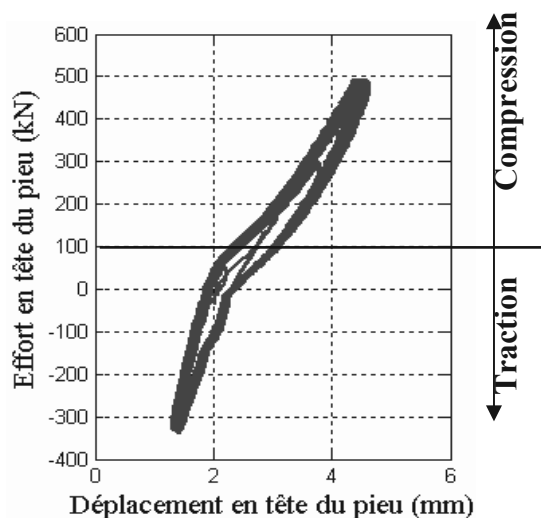


Figure 10, Courbe charge-déplacement en tête obtenue lors de l'essai de chargement CC9 réalisé sur le pieu F3.

5.3 Notion de stabilité cyclique

L'ensemble des résultats obtenus en compression pure et en traction alternée (mais également en traction pure et en traction alternée) suggèrent que pour le type de matériau et de pieu considéré il existe deux zones de fonctionnement bien différenciées :

- une zone dans laquelle les chargements cycliques même en grand nombre ($N > 1000$) ont peu d'effet sur le comportement du pieu : accumulation non significative des déplacements permanents, rigidité cyclique constante ;
- une zone dans laquelle le pieu évolue très rapidement vers la rupture.

La zone de stabilité cyclique est étendue mais pourrait être affectée par le caractère répété ou alterné des chargements.

L'analyse complète des résultats et la définition de critères de rupture précis devrait permettre de proposer ultérieurement des diagrammes de stabilité cyclique au sens de Poulos (1988) ou Karlsrud et al. (1986)

6 CONCLUSIONS

On a présenté des résultats d'essais statiques et cycliques en compression pure et alternée effectués sur des pieux forés à la tarière creuse installés sur le site de Merville constitué d'argile surconsolidée des Flandres.

Sous chargement statique la rupture n'est pas fragile contrairement aux observations faites sur les pieux battus. Les frottements mobilisés sont nettement inférieurs (Benzaria et al., 2012).

Il semble exister sous chargement cyclique une zone étendue à l'intérieur de laquelle la stabilité est assurée pour un grand nombre de cycles. Le seuil critique, au moins pour les essais répétés, semble voisin de $Q_{max}/Q_{uc} = 0,9$. Les chargements cycliques, y compris lorsqu'ils conduisent à la rupture, n'affectent pas significativement la capacité statique du pieu.

Un article à cette même conférence (Puech et Benzaria, 2013) analyse le comportement statique des deux types de pieux battus et forés en liaison avec la nature et le comportement mécanique de l'argile 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 and bored piles in overconsolidated clay, *Offshore Site Investigation and Geotechnics*, SUT, London.
- Bond A.J. and Jardine R.J. 1991. Effects of installing displacement piles in a high OCR clay. *Géotechnique*, 41(3) 341-363.
- Borel S. and Reiffsteck P. 2006. Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. *Géotechnique et Risques Naturels*, LCPC, GT81.
- Josseume H. 1998. Propriétés mécaniques de l'argile des Flandres à Dunkerque et Calais. *Revue Française de Géotechnique*, N°84.
- Karlsrud, K., Nadim F. and T. Haugen (1986). Piles in clay under cyclic loading: Field tests and computational modeling. Proc., 3rd int. Conf. on Nun. Meth. In offshore Piling, 165-190, Nantes, France, May 1986.
- Mayne P.W. 1986. CPT indexing of in situ OCR in clays. Proceedings ASCE Spec. Conf. "In situ 86", Blacksburg, Virginia.
- Powell J.J.M., Quaterman R.S.T. and Lunne T. 1989. Interpretation and use of piezocone test in UK. *Proc. Geotechnology Conference: penetration testing in UK, Birmingham*, Thomas Telford, London.
- 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 de pieux dans l'argile surconsolidée des Flandres. *Proceedings 18th ICSMGE, Paris*.