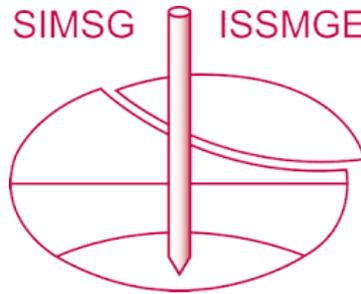


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Capacité portante et tassement des pieux basés sur l'essai de chargement de pointe pénétrométrique

Bearing capacity and settlement of pile based on cone loading test

Philippe Reiffsteck

IFSTTAR, Paris, France, philippe.reiffsteck@ifsttar.fr

Henk Van de Graaf,

Lankelma, Oirschot, Pays-Bas

Catherine Jacquard,

Fondasol, Avignon, France

ABSTRACT: The Cone Loading Test (CLT) consists in stopping the static penetration at a desired level and carrying out a loading of the cone by successive steps. Considering that the cone of the penetrometer is a reduced model pile, a direct outcome of the CLT is its ability to be a tool for foundation design. For this purpose, a direct method using the cone resistance and limit sleeve friction of the CLT test has been proposed to calculate the bearing capacity and predicting the settlement of a pile. This method is a new approach to transform the CLT test curves of cone loading and friction mobilization in load-displacement curve of a pile (t-z curves).

RÉSUMÉ : L'essai de chargement de pointe (CLT) consiste à interrompre la pénétration statique à une cote souhaitée et à réaliser un chargement par paliers successifs de la pointe pénétrométrique. En considérant que la pointe du pénétromètre est un modèle réduit de pieu, une retombée directe de l'essai CLT est sa capacité à être un outil de dimensionnement de fondations. A cet effet, une méthode directe utilisant la résistance de pointe et le frottement latéral limite de l'essai CLT a été proposée pour calculer la capacité portante et prédire le tassement d'un pieu. Cette méthode consiste en une nouvelle approche transformant les courbes de chargement et celles de mobilisation de frottement d'un essai CLT point par point en courbe charge-déplacement d'un pieu (courbes t-z).

KEYWORDS: in situ testing, cone penetrometer, pile, design method.

MOTS CLÉS : reconnaissance géotechnique, pénétromètre à cône, pieux, dimensionnement.

1 INTRODUCTION

Après plusieurs tentatives pour développer une méthode d'essai au pénétromètre basée sur l'essai à la plaque ou les méthodes d'essai de chargement statique de pieu pour obtenir un rapport de contrainte-déformation (Haefeli and Fehlmann, 1957; Ladanyi, 1976; Sanglerat, 1974), Reiffsteck et al. (2009) ont proposé une nouvelle procédure. Cet essai, appelé l'essai de chargement de pointe (Cone Loading Test), peut être effectué pendant un essai de pénétration statique au cône classique (CPT) en tant qu'essai complémentaire.

Après un essai de dissipation, un chargement de la pointe est fait par dix paliers successifs maintenus chacun pendant 60 secondes, jusqu'à ce que la résistance de pointe du sol soit atteinte (Faugeras et al, 1983; Arbaoui et al., 2006; Reiffsteck et al., 2009). La courbe de chargement relie la pression appliquée sur la pointe au tassement mesuré en tête du train de tiges à la fin de chaque palier de chargement (Figure 1a). Les courbes se composent d'une partie linéaire en petites déformations, puis d'une partie incurvée au début de la plasticité et d'une partie linéaire à un niveau plus élevé de déformations.

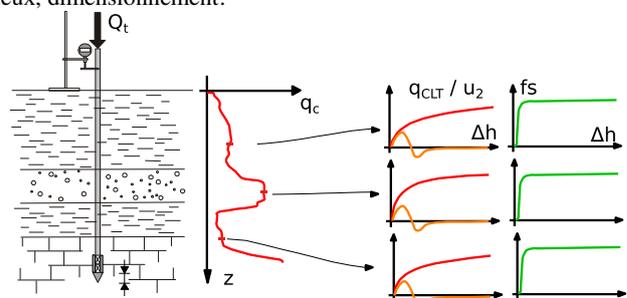


Figure 1. Principe de l'essai de chargement de pointe.

Cet essai peut être réalisé avec une pointe électrique normalisée (CEN/ISO, 2005). En cas d'utilisation d'un piézocône, la variation de la pression interstitielle et la résistance au cisaillement sur manchon de frottement sont mesurées. L'essai de chargement de pointe exige des corrections résultant de l'effet de la compression élastique des tiges ou des conditions initiales de l'essai. Le calcul de la correction consiste à évaluer l'effort moyen déduit de la différence entre la force mesurée en tête et celle au niveau de la pointe (Ali, 2008). À des faibles profondeurs, le flambement des tiges est négligé, mais si des essais plus profonds sont envisagés, l'utilisation de l'inclinomètre est suggérée (CEN/ISO, 2005).

2 MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT DES PIEUX

La détermination de la capacité portante d'un pieu est encore une opération délicate. Généralement, la capacité portante R_u d'un pieu est calculée de la façon suivante :

$$R_u = R_{pu} + R_{su} \quad [1]$$

où: R_{pu} est la capacité portante en pointe du pieu et R_{su} est la charge limite de frottement latéral.

Cette séparation de la charge limite du pieu en deux termes est un processus commun de toutes les méthodes de conception utilisées dans la pratique : méthode pénétrométrique, pressiométrique ou à partir de l'essai de pénétration au carottier SPT. La capacité en pointe est liée à une valeur moyenne de la résistance au cisaillement déduite des essais de laboratoire ou des essais in situ, et multipliée par un facteur lié au mécanisme de rupture et ajusté en fonction du type de sol et du mode de mise en place. La charge limite de frottement axial dépend du changement des propriétés de sol à proximité du pieu après qu'il ait été installé, notamment : la variabilité de sol et l'interaction complexe sol-pieu. Par conséquent, pour chaque segment du fût du pieu, la charge limite de frottement doit être calculée à partir de la résistance au cisaillement multipliée par un paramètre qui dépend des facteurs d'influence.

En considérant que la pointe pénétrométrique est un modèle réduit de pieu, et que la déformation du sol autour de la pointe indique des effets semblables à ceux observés autour d'un pieu pendant le chargement, alors les courbes de chargement de pointe reflètent l'interaction entre un pieu et le sol environnant.

Une répercussion très utile et intéressante de cette déclaration est le potentiel du test de chargement de cône pour être un outil de conception de fondations. Comme lors d'un essai de chargement de pieu, lors d'un essai de chargement de cône, la pression de cône appliquée est enregistrée en fonction du déplacement à chaque étape de chargement. De la même manière, la courbe de la loi de mobilisation par frottement de manchon peut être tracée comme montré sur les figures 2 et 3.

Sur ces figures, la force mesurée est appelée Pp et le frottement axial sur le manchon fs.

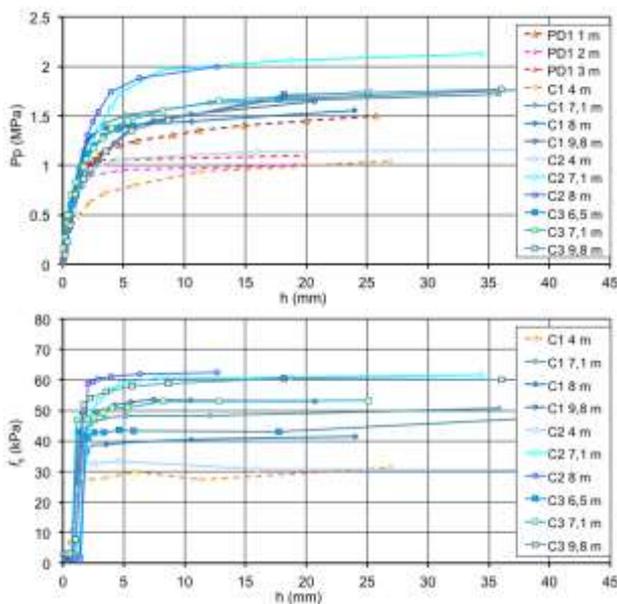


Figure 2. Courbes de chargement de pointe et de frottement axial pour des argiles (Merville).

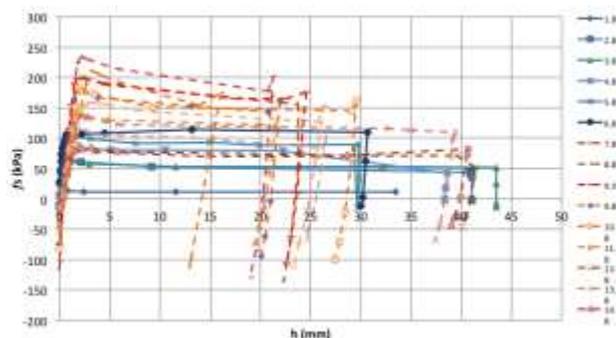
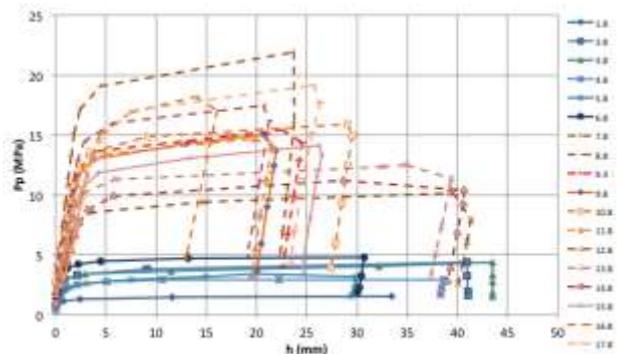


Figure 3. Courbes de chargement de pointe et de frottement axial pour des sables (Limelette).

De la même manière, la valeur de la force mesurée agissant sur le manchon de frottement divisée par la section du manchon peut être identifiée comme la résistance unitaire de frottement axial sur le fût d'un pieu mesuré lors d'un essai de chargement avec un extensomètre amovible.

Dans le cas général d'un sol multicouche pour lequel la distribution de la résistance f_s en fonction de la profondeur est connue, les deux équations suivantes sont proposées :

$$R_{pu} = [q_0 + k_p \cdot (q_{CLT})] \cdot \pi \cdot B^2 / 4 \quad [2]$$

$$R_{su} = \sum_{i=1}^n k_s \cdot f_{s,i} \cdot \pi \cdot B \cdot l_i \quad [3]$$

Avec : q_0 la contrainte verticale en place, k_p un facteur de portance, k_s un facteur de frottement latéral, B est le diamètre du pieu, $f_{s,i}$ est le frottement limite de la couche i, l_i est l'épaisseur de la couche i, q_{CLT} est la résistance limite de l'essai de chargement de pointe.

La comparaison et la corrélation entre la courbe de mobilisation obtenue à partir de l'essai de chargement de pointe et celle de l'essai de chargement statique de pieu, pour le même site et le même type de sol, donne accès aux facteurs d'influence. Cependant, il y a quelques spécificités qui dépendent de la géométrie de la pointe utilisée dans l'essai CLT (afin de limiter le frottement et ainsi limiter les corrections sur la mesure la pointe est en effet débordante), ainsi que du manchon de frottement (celui-ci est particulièrement lisse comparé certains pieux). En particulier, il peut être nécessaire d'intégrer un facteur de correction qui tient compte des effets d'échelle et de forme pour le terme du frottement latéral (k_s) et de pointe (k_p).

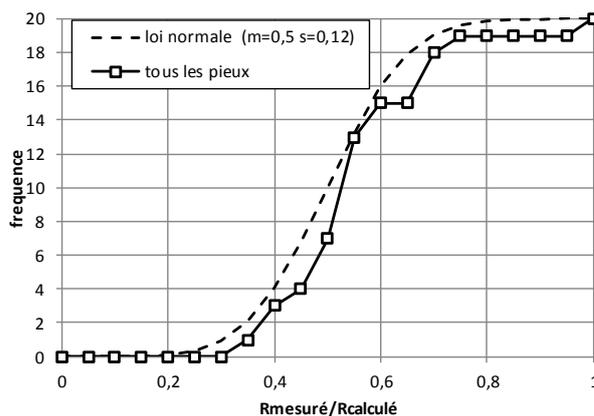


Figure 4. Courbe de répartition des rapports capacité portante mesurée et calculée et exemple de comparaison tassements observé et prédit pour un essai de chargement.

Le rapport de la charge estimée transmise par le fût et la pointe estimée est très proche du rapport observé sur les essais collectés lors de ce travail. De ce fait aucun facteur particulier n'a été appliqué.

Cependant en moyenne la charge totale prédite reste inférieure à la capacité portante totale observée. Un facteur de

modèle égal à 2 a du être appliqué pour corriger les valeurs calculées.

La figure 4 montre une courbe de régression obtenue pour 20 pieux dans différents sols (argile, limon, sable et craie) et de nature différente (vissé, forés, pieux battus). Le facteur d'interaction pieu-sol est donné par la norme NF P94-262 (AFNOR, 2012). Une bonne prédiction est observée avec une valeur moyenne proche de l'unité à 50% de la fréquence. La méthode de conception directe française habituelle basée sur l'essai de pénétration au cône utilise q_c et non f_s pour obtenir le frottement axial.

3 DÉTERMINATION DES COURBES T-Z À PARTIR DES RÉSULTATS CLT

Le but de cette recherche était de développer une méthode qui donnerait une prédiction d'une courbe de chargement complète pour le pieu, basée sur l'analyse des courbes de mobilisation de frottement (courbes t-z) à différents niveaux du test de chargement du cône. L'approche consiste à transformer les courbes de chargement de pointe et de mobilisation de frottement sur le manchon dans un essai CLT point par point en une courbe (t-z) pour la fondation profonde (figure 5). Pour tracer ces courbes, les efforts (q_c et f_s) sont normalisés par leur valeur maximale observée et le déplacement h est normalisé par le diamètre du cône. Ensuite des courbes de type exponentielle similaires à celles utilisées dans la norme NF P94-262 sont calées sur les nuages de points (AFNOR, 2012).

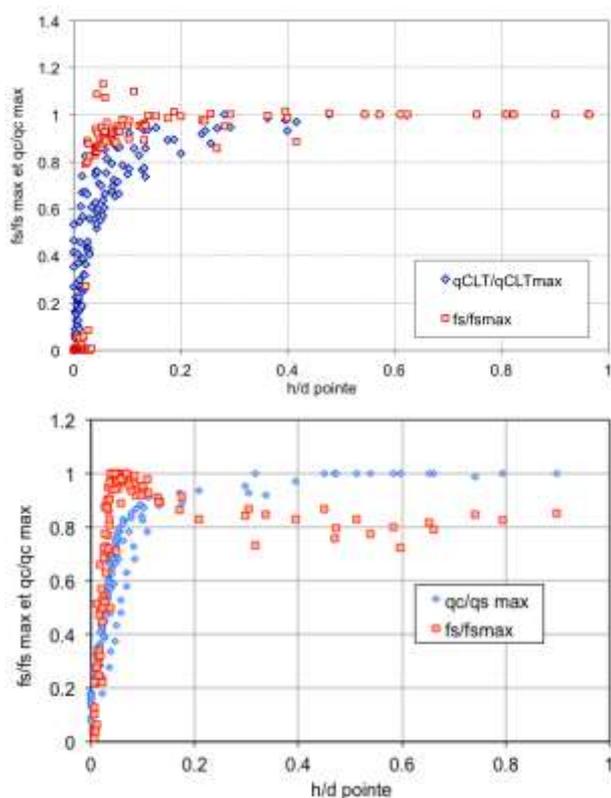


Figure 5. Courbes normalisées pour les résistances de pointe et de frottement axial (a) argile (Merville) et (b) sable (Limelette).

La manière par laquelle cette nouvelle méthode a été construite est très proche de celle proposée par Briaud et également utilisée dans la norme hollandaise NEN6743 (Briaud, 2007, Larsson and Bengtsson, 2008, NEN, 1991).

Le déplacement en tête du pieu w_{pieu} peut être déterminé en fonction de la charge de pieu comme étant la somme de la valeur du déplacement au niveau du fût du pieu et du déplacement dû à la compression des couches de s

ol situées au-dessous du niveau de la pointe du pieu.

Le déplacement le long du fût inclut le déplacement dû à l'élasticité du pieu.

$$w_{\text{pieu}} = w_{\text{axial}} + w_{\text{pointe}} + w_{\text{él}} \quad [4]$$

avec :

- w_{pointe} et w_{axial} déduits à partir des courbes relatives de charge déplacement construites avec des valeurs moyennes de q_c et f_s en fonction du déplacement relatif normalisé h/B (figure 5),
- $w_{\text{él}}$ raccourcissement élastique, fonction de la variation linéaire de l'effort vertical dans le pieu.

Pour étudier le potentiel de la méthode proposée, la détermination de la capacité portante sous une charge axiale est comparée aux résultats d'un essai axial de chargement de pieu.

La figure 6 montre une comparaison des courbes de l'essai CLT obtenue avec un simple tableur ou le logiciel PIVER, en comparaison avec la courbe réelle de l'essai de chargement de pieu. L'exemple donné sur la figure 5 correspond à un pieu de profondeur 12 m et diamètre 0,5 m, foré dans l'argile des Flandres à Merville. L'approche de dimensionnement CLT est bien calée, et donne un résultat très comparable aux méthodes basées sur les résultats d'essais pressiométriques et pénétrométriques sur lesquelles se basent les normes française (AFNOR, 2012) et hollandaise (NEN, 1991).

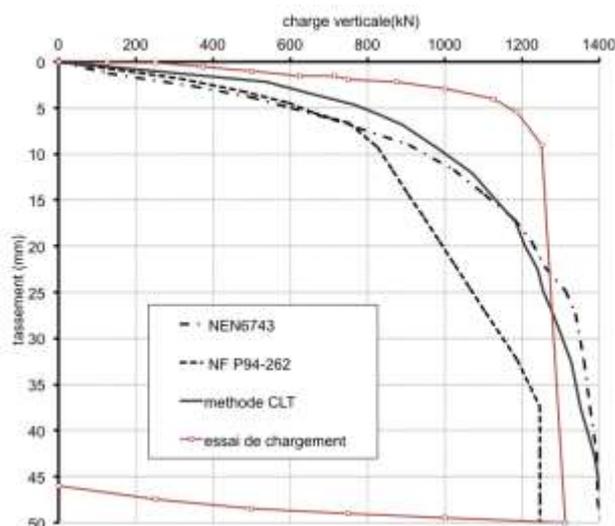


Figure 6. Exemple de comparaison tassements observé et prédit pour un essai de chargement.

4 CONCLUSION

Cette publication a essayé de décrire une nouvelle méthode de conception directe de pieux basée sur l'essai de chargement de pointe (CLT) tirant profit de la qualité intrinsèque de cet essai : reproductibilité, précision et accès à la force mais également à la rigidité. Davantage de recherches sont nécessaires afin de rassembler des études de cas sur différents sites : limon, sables, etc. pour définir les facteurs rhéologiques adaptés.

4 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Fondasol, Lankelma Geotechniek Zuid, IFSTTAR, Université Clermont-Ferrand pour le soutien qu'ils ont fourni pendant cette étude.

5 REFERENCES

- AFNOR (2012) Justification des ouvrages géotechniques, Normes d'application nationale de l'Eurocode 7, Fondations profondes, NF P94-262, 204 pages
- Ali H., Reiffsteck P., Bacconnet C., Gourves R., Baguelin F., Van De Graaf H. (2008) Facteurs d'influence de l'essai de chargement de pointe, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG' 08, Nantes, pp 467-474
- Arbaoui H., Gourvès R., Bressolette Ph., Bodé L. (2006), Mesure de la déformabilité des sols in situ à l'aide d'un essai de chargement statique d'une pointe pénétrométrique, Can. Geotech. J. 43(4) 355-369
- Briaud J.-L., (2007), Spread Footings in Sand: Load Settlement Curve Approach, J. of Geotech. and Geoenv. Engrg, ASCE, 133(8) 805-920.
- CEN/ISO (2005) Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 1: Electrical cone and piezocone penetration tests, EN/ISO 22476-1, 41 p
- Faugeras J.C., Fortuna G., Gourvès R. (1983). Mesure de la compressibilité des sols à l'aide du pénétromètre statique. Symposium International, In situ testing, Vol. 2, Paris, pp. 269-274.
- Haefeli R., Fehlmann H.B. (1957) Measurement of soil compressibility in situ by means of the model pile test, Proc. 4th Int. Conf. SMFE, London, (1) 225-230
- Ladanyi B. (1976) Use of the static penetration tests in frozen soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 13, No. 2, pp. 95 - 110.
- Larsson, R., Bengtsson, P.-E. (2008) Field determination of stress-strain relations of clay till, 4th Int. Symp. on Def. Char. of Geomaterials (IS-Atlanta 2008), pp. 875-882
- NEN (1991). Calculation method for bearing capacity of pile foundation, compression pile, Dutch Standard NEN 6743, 31 p.
- Reiffsteck Ph., (2009) ISP5 Pile Prediction Revisited, ASCE Geotechnical Special Publication N° 185, Contemporary topics in in situ testing, analysis and reliability of foundations, IFCEE Orlando, pp. 50-57
- Reiffsteck Ph., Bacconnet C., Gourvès R., van de Graaf H.C., Thorel L. (2009) Measurements of soil compressibility by means of cone penetrometer, Soils and Foundations, 49(3) 397-408.
- Sanglerat G. (1974) The state of the Art in France, ESOPT, Stockholm, pp.47-58.