

ESSAIS PRESSIOMÉTRIQUES ET DIMENSIONNEMENT CYCLIQUE DES PIEUX : PREMIERS RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

PRESSUREMETER TESTS AND CYCLIC PILE DESIGN: FIRST RESULTS AND PERSPECTIVES

Alexandre LOPES^{1,2}, Alain PUECH¹, Jean-Claude DUPLA³, Jean CANOU²

¹ Fugro France, Nanterre, France

² Laboratoire Navier Géotechnique, École des Ponts ParisTech

RÉSUMÉ – Parmi les considérables développements concernant le matériel et la pratique de l'essai pressiométrique réalisés dans le cadre du Projet National ARSCOP, il a été montré que l'accès *in situ* au module de cisaillement G à faibles taux de déformations est désormais possible. Cette communication porte sur l'obtention de paramètres représentatifs pour la conception de fondations profondes soumises à un chargement axial cyclique.

ABSTRACT – Considerable developments concerning the pressuremeter testing equipment and practice have been carried out within the framework of the French Project ARSCOP. It has been shown that *in situ* access to the shear modulus G at low strain rates is now possible. This communication is related to the determination of representative parameters for the design of deep foundations subjected to cyclic axial loading.

1 Introduction

La plupart des ouvrages de génie civil sont soumises à des actions qui varient dans le temps, génériquement qualifiés de charges cycliques. Pour une partie importante de ces structures, comme les ponts et bâtiments, le rapport entre les actions variables et permanentes est relativement faible et n'a pas d'implication directe dans sa conception. Cependant, dans le cas des structures légères et très optimisées bâties dans des environnements difficiles, telles que les éoliennes et les plateformes offshore, la composante cyclique du chargement est significative. La reprise de ces efforts par la fondation peut entraîner une modification des propriétés d'interaction sol-structure. Par conséquent, une réduction de la capacité portante et des changements de raideur peuvent avoir lieu et doivent être pris en compte pour la conception de ces structures.

Le dimensionnement des fondations profondes sous chargement cyclique, axial ou latéral, nécessite deux ensembles de paramètres : (1) le premier est identique à celui utilisé pour la conception des pieux sous charges monotones. Des méthodes bien établies existent et sont incluses dans les normes européennes. En France, la pratique de dimensionnement des pieux est principalement basée sur la caractérisation des terrains à partir des essais pressiométriques de type Ménard ; (2) le deuxième type de paramètres est spécifique au chargement cyclique répétitif. Il s'agit principalement de la caractérisation du module de cisaillement à faibles taux de déformation et des paramètres de dégradation en fonction de la sollicitation répétée. Actuellement, la détermination de ces paramètres est largement développée uniquement par des essais de laboratoire, comme décrit dans les recommandations SOLCYP. Bien que des essais cycliques au pressiomètre aient été mentionnés dans la littérature comme une approche potentiellement adéquate, il y a peu de développements sur ce sujet et aucune recommandation technique n'est disponible pour les praticiens.

Le Projet National ARSCOP (*nouvelles Approches de Reconnaissance des Sols et de Conception des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre*) a été moteur de considérables développements concernant le matériel et la pratique de l'essai

pressiométrique. L'amélioration de la qualité du matériel d'essai et le développement de protocoles adaptés ont permis de montrer que l'accès *in situ* au module de cisaillement G intrinsèque des sols, à faibles taux de déformations, est désormais possible. La réalisation de protocoles de chargement cycliques au pressiomètre a également permis d'observer le développement d'accumulation de déformations plastiques dans les sols de façon similaire à ce qui est observé dans des essais élémentaires. Le comportement de la cavité mesuré au pressiomètre s'est montré également corrélé au comportement global observé dans des essais de chargement cyclique de pieu.

Cette communication porte plus particulièrement sur l'application d'essais pressiométriques innovants pour l'obtention de paramètres représentatifs pour la conception de fondations profondes soumises à une charge axiale cyclique. Des essais pressiométriques comportant plusieurs séries de cycles ont été réalisés sur des sites de référence où des essais de chargement cyclique de pieux à échelle réelle ont été antérieurement conduits dans le cadre du projet SOLCYP. Les résultats des premiers essais sont présentés et comparés à la réponse des pieux. Les effets du temps et du pré-cisaillement sont discutés. Un protocole d'essai adapté à la conception des pieux sous charges cycliques est suggéré, ainsi que les perspectives de recherche sur ce thème.

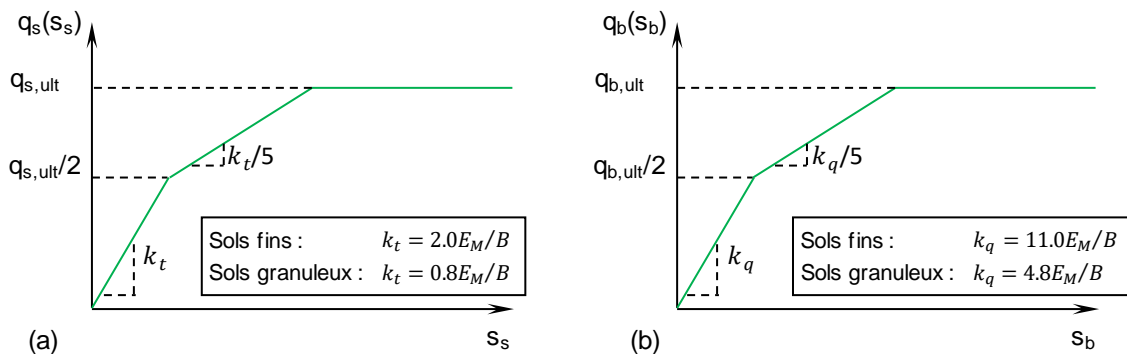
2 Caractérisation des sols vis-à-vis du chargement cyclique

Dans cette communication, l'accent sera mis sur la détermination de la raideur des sols vis-à-vis du dimensionnement cyclique. Des éléments concernant la dégradation de la capacité portante en fonction du chargement répété sont également donnés.

2.1 La raideur en interaction sol-structure

Le comportement en termes de force-déplacement du problème d'interaction sol-structure d'un pieu peut être modélisé par la méthode de transfert de charge, usuellement appelé méthode « t-z ». Dans cette méthode, l'ensemble constitué par l'interface sol-pieu et le massif de sol sont remplacés par des ressorts non-linéaires, découplés, connectés au pieu, modélisé lui-même comme un élément structural unidimensionnel.

Dans la pratique française, on fait souvent appel aux courbes de mobilisation proposées par Frank et Zhao (1982) (Figure 1) dans lesquelles la raideur est corrélée au module pressiométrique Ménard des sols. Cette méthode est largement acceptée par les ingénieurs et répandue pour permettre d'obtenir des résultats satisfaisants pour la modélisation du comportement des pieux sous chargements axiaux monotones.



Autres types de courbes de mobilisation existent, certaines parmi elles dérivés par solution analytique du problème d'interaction d'un pieu avec le milieu linéaire élastique semi-infini. La méthode proposée par Randolph et Wroth (1978) établit la raideur des courbes de mobilisation est fonction uniquement des propriétés élastiques élémentaires du massif (le module de cisaillement G , le coefficient de Poisson ν , et un paramètre

d'ajustement η permettant de prendre en compte la profondeur de la pointe du pieu, généralement considéré égal 0,5) et des propriétés géométriques du pieu (son diamètre B , et longueur L). La Figure 2 présente les courbes de mobilisation proposées par Randolph et Wroth (1978).

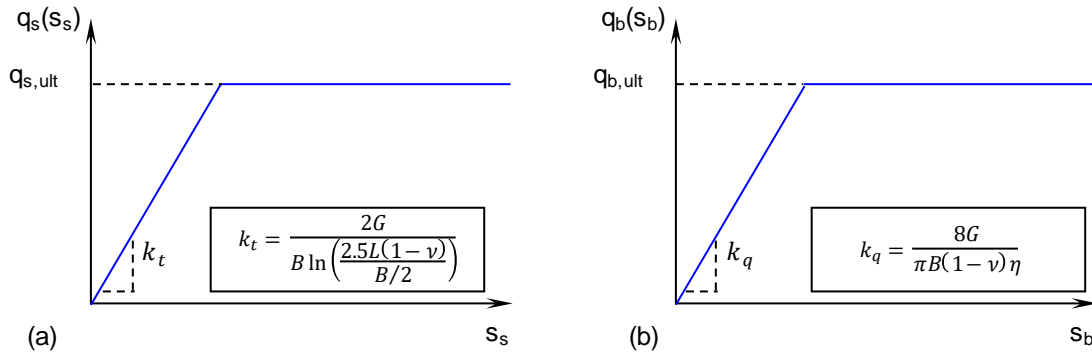


Figure 2 – (a) Courbes de mobilisation du frottement axial et (b) de la résistance de pointe (Randolph et Wroth (1982)), fonction du module de cisaillement élastique du sol et des propriétés géométriques du pieu

À présent, il est connu que la raideur du sol représentative du comportement des pieux sous charges axiales cycliques est celle correspondante au domaine des faibles déformations (Puech et Garnier, 2017). Selon les recommandations SOLCYP, le module de cisaillement du sol contrôlant le comportement des pieux lors de ce type de chargement est compris entre G_{max} et $G_{max}/2$, où G_{max} est le module de cisaillement maximal du sol, usuellement mesuré par essais de propagation d'ondes ou des essais de laboratoire type colonne résonante, *bender elements* ou triaxial cyclique avec mesure locale des déformations. Randolph (2013) souligne également l'avantage et l'intérêt d'utiliser des courbes de mobilisation établissant un lien entre sa raideur et le module de cisaillement maximal du sol (propriété dite intrinsèque) pour la modélisation des pieux sous charges axiales cycliques.

2.1.1 Caractérisation avec le pressiomètre

Plus récemment, il a été montré et validé par essais en laboratoire et *in situ*, que l'essai pressiométrique peut être utilisé pour caractériser la raideur intrinsèque des sols à un niveau de déformation compris entre 10^{-4} et 10^{-2} , ainsi que sa variation avec le taux de distorsion et l'influence de l'état de contraintes (Lopes et al., 2018, 2019, 2020, Lopes, 2020). Ceci n'est possible qu'avec l'utilisation d'une sonde pressiométrique de précision améliorée, combiné avec la réalisation d'un protocole de calibrage plus avancé que celui usuellement proposé par les normes courantes, ainsi qu'un programme de chargement qui permette de cerner le comportement du matériau en élasticité non linéaire. La sonde Monochambre Francis Cour®, présentée lors des JNGG 2018 (Cour et Lopes (2018)), a été utilisée.

Le protocole de chargement proposé (Figure 3) consiste à :

- Chargement à taux de cisaillement constant jusqu'à une pression $p_{cav,1}$ à la fin ou après la fin du domaine dit « pseudo-élastique ». Dans les essais qui seront présentés par la suite, le taux de dilatation radiale imposé était d'environ $6 \cdot 10^{-3}$ mm/s ;
- Effectuer une étape de maintien de pression pendant un temps suffisamment long $\Delta t_{u,1}$ pour que le fluage se réduise à une valeur considérablement faible ;
- Déchargement à taux de cisaillement ou taux de variation de pression constant jusqu'à ce qu'une amplitude de pression de $\Delta p_{cav,1} \sim 0,4 \cdot p_{cav,1}$ soit atteinte ;
- Réalisation d'une étape de maintien de pression $\Delta t_{r,1}$ de durée suffisante pour réduire considérablement les phénomènes dépendant du temps après déchargement ;

- Rechargement à taux de cisaillement ou taux de variation de pression constant jusqu'à une pression $p_{cav,2}$.
- Répéter cette procédure pour toutes les boucles de déchargement-rechargement. À l'issue de la dernière boucle, conclure le chargement à taux de cisaillement constant jusqu'à atteindre la pression limite conventionnelle du sol.

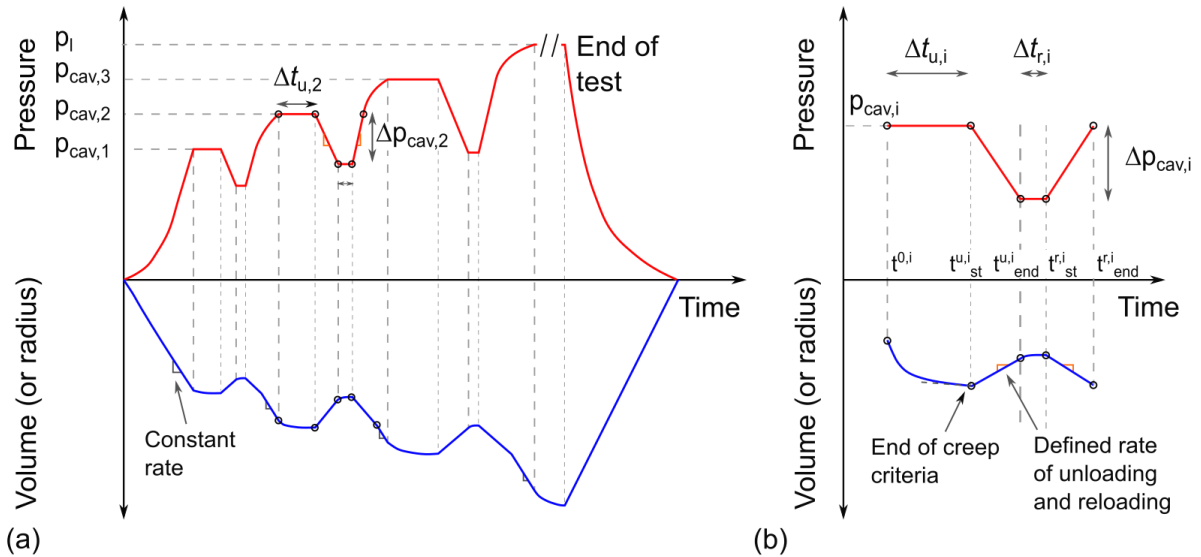


Figure 3 – Présentation du protocole de chargement nécessaire à l'obtention du module de cisaillement à faibles taux de déformation à partir de l'essai pressiométrique

2.2 La dégradation de la capacité portante

Selon les recommandations SOLCYP, les paramètres relatifs à la dégradation de la capacité portante du pieu peuvent être obtenus par des essais de laboratoire de cisaillement cyclique non-drainé (*DSS*), ou des essais à raideur normale constante (*CNS*).

2.2.1 Caractérisation avec le pressiomètre

Lopes (2020) a réalisé un programme exploratoire d'essais pressiométriques cycliques ayant pour objectif cerner le potentiel de l'utilisation de cet essai pour l'évaluation de l'évolution des propriétés des sols en fonction du nombre de cycles et l'appliquer au dimensionnement des pieux. Les résultats obtenus sont corrélés au comportement global du pieu, mais, à présent, les recherches n'ont pas abouti à un protocole précisément défini pour la détermination des paramètres de calcul de la dégradation de capacité portante.

3 Résultats

Dans cette communication, nous allons présenter des résultats d'essais pressiométriques réalisés ayant pour objectif la détermination du module cisaillement à faibles déformations ainsi que les premiers résultats obtenus suivant des protocoles de chargement cyclique répétés réalisés sur le site de Merville.

La stratigraphie du site est composée par une couche d'argile surconsolidée des Flandres d'approximativement 42 mètres d'épaisseur, couverte par une couche de limon de 2 mètres d'épaisseur. Le niveau de la nappe varie entre 1,5 et 1,9 mètres de profondeur, mais sa détermination précise est difficile dû à la microfissuration de l'argile des Flandres. Borel et Reiffsteck (2006) présentent en détail la caractérisation géomécanique de l'argile trouvée sur ce site, incluant des essais *in situ*, de géophysique et de laboratoire.

3.1 Résultats d'essais pressiométriques innovants réalisés à Merville

Une campagne d'essais pressiométriques utilisant la sonde Monochambre FC a été réalisée sur le site de Merville dans l'objectif de valider sa capacité de mesure, en

comparant les résultats obtenus avec cette nouvelle sonde et ceux obtenus par d'autres essais consacrés réalisés sur le même site.

Trois essais ont été réalisés selon la procédure décrite dans la Figure 3, à 9, 11 et 12 mètres de profondeur. L'exemple de la courbe d'expansion obtenue dans le dernier essai est présenté dans la Figure 4.

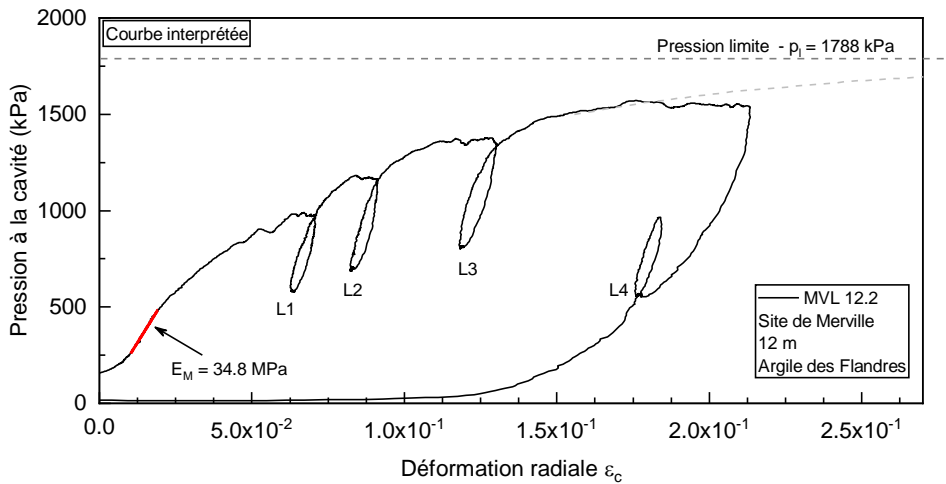


Figure 4 – Résultat de l'essai pressiométrique à 12 m de profondeur pour la mesure de G à faibles déformations

Dans cette communication on ne présentera pas les détails de l'interprétation des boucles de décharge-recharge. Pour plus d'informations, on pourra se référer à Lopes et al. (2018, 2020). Les courbes de dégradation du module de cisaillement en fonction du niveau de distorsion du sol peuvent être déterminées à partir de chaque boucle, ainsi qu'une estimation du module de cisaillement maximal.

L'exemple d'interprétation de l'essai en question est présenté dans la Figure 5. Dans cette figure, on trouvera trois courbes de dégradation, déterminées par l'interprétation des boucles L1 à L3. Ces courbes sont coloriées en vert, indiquant le domaine de mesure, et en rouge, indiquant un domaine d'estimation par calcul. Sur le même graphique on voit représentés les courbes de dégradation intrinsèque de l'argile des Flandres, dans lesquelles le G_{max} a été déterminé à partir d'essais *cross-hole* (C-H) et *down-hole* (D-H). La plage de valeurs de module pressiométrique Ménard mesuré sur le site avec la sonde Monochambre FC est également présenté sur la figure. Il est compatible avec les mesures réalisées avec des sondes standards

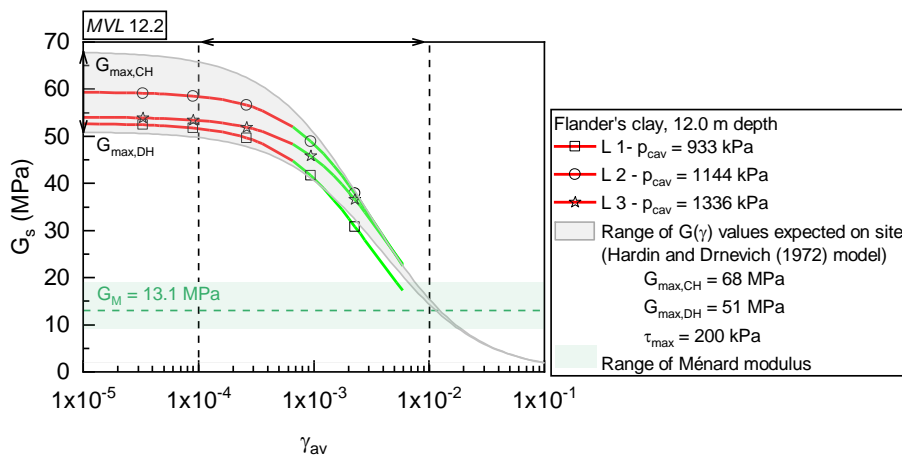


Figure 5 – Détermination des courbes de dégradation du module de cisaillement de l'argile des Flandres à partir de l'essai pressiométrique

On remarquera que les valeurs de module de cisaillement déterminées avec la nouvelle méthode pressiométrique dans la plage de mesure en question est cohérente avec la plage des valeurs élémentaires du module de l'argile des Flandres obtenue par d'autres essais. Un accord également satisfaisant a été obtenu par des essais à 9 et 11 mètres de profondeur, dont les valeurs de G_{max} ont été reportés sur la Figure 6, présentée par la suite.

3.2 Application au calcul d'un pieu

Dans le cadre du projet National SOLCYP, des essais de chargement axial cyclique ont été réalisés sur des pieux de plusieurs types installés sur le site de Merville. Les résultats ont été présentés par Benzaria (2013). Dans cette communication on fera référence aux résultats obtenus lors du chargement du pieu foré à la tarière creuse (pieu F2).

Il s'agit d'un pieu en béton (module d'Young considéré $E_b = 20$ GPa), diamètre $B = 420$ mm, longueur $L = 13$ m. Le profil de frottement axial unitaire limite a été obtenu par instrumentation locale du fût de ce pieu lors d'un essai de chargement monotone. Il est présenté dans la Figure 6c. Avec ces caractéristiques, deux modèles de calcul « t-z » ont été réalisés : (1) un utilisant les courbes de mobilisation de Frank et Zhao (1982), basée sur le profil de module pressiométrique présenté dans la Figure 6b ; et (2) l'autre utilisant les courbes de mobilisation de Randolph et Wroth (1978) basé sur le profil de G_{max} présenté sur la Figure 6b. On remarquera que le profil de valeurs de G_{max} adopté pour le calcul est cohérent avec les valeurs déterminées avec le pressiomètre entre 9 et 12 mètres de profondeur, qui correspond aux résultats obtenus par essais down-hole. Dans l'impossibilité de caractériser tout le profil de sol avec des essais pressiométriques (ce qui n'était pas l'objectif initial de la campagne), ici, le profil de G_{max} obtenu par essais down-hole, disponibles dans toute la couche, a été considéré pour le calcul du pieu.

Les résultats sont présentés dans la Figure 7. On remarquera le bon accord entre les deux modèles de calcul ainsi que la cohérence avec les mesures effectuées lors de l'essai de chargement du pieu. Sur cette même figure, on peut voir, représenté par la ligne en tirets rouge, la raideur cyclique du pieu. Celle-ci correspond à la réponse en raideur du pieu lors d'un chargement cyclique. Dans le cas du pieu installé dans les argiles fortement surconsolidées, la raideur cyclique a été très proche de la raideur mesurée lors de l'essai monotone. Ce résultat permet de confirmer que la mesure du module de cisaillement élémentaire du sol à partir de l'essai pressiométrique peut être applicable au dimensionnement cyclique des pieux.

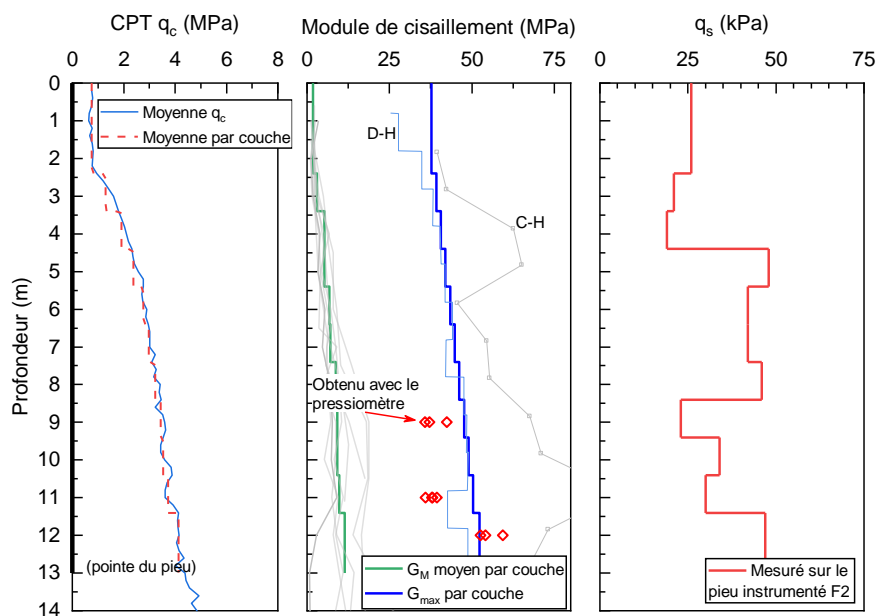


Figure 6 – Modèle de sol adopté pour le calcul du pieu F2. (a) profil CPT ; (b) profil des modules Ménard et des G_{max} (c) profil de frottement axial limite mesuré sur le pieu instrumenté

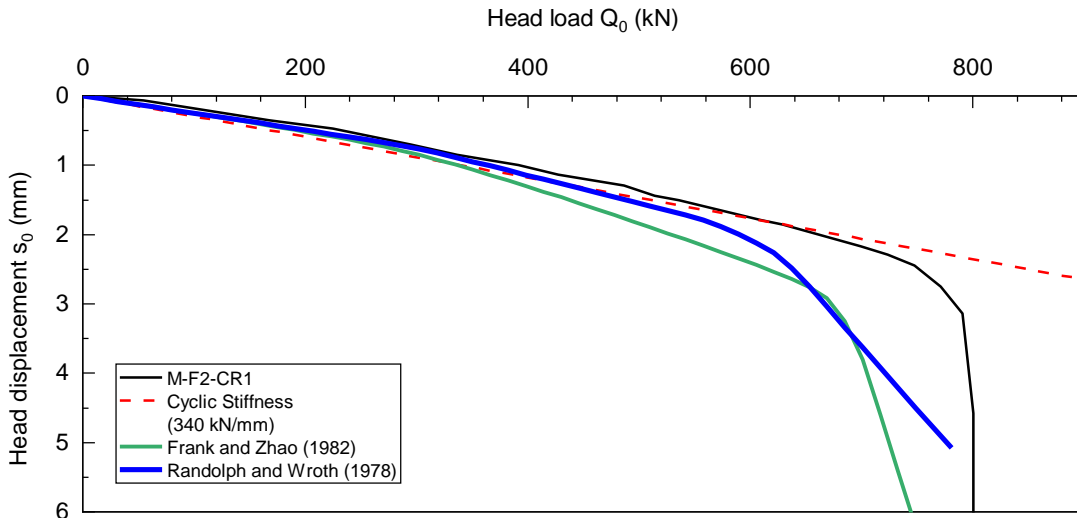


Figure 7 – Courbes charge-enfoncement obtenues par calcul du pieu F2 avec les modèles de Frank et Zhao (1982) et Randolph et Wroth (1982) comparés aux mesures sur le pieu

3.3 Observations concernant la dégradation de la capacité portante

Benzaria (2013) a observé une dégradation de l'ordre de 80% à 90% de la capacité portante des pieux forés installés dans les argiles des Flandres soumis à un chargement cyclique répété, par rapport à leur capacité portante dans le cas monotone. Ce comportement d'instabilité globale du pieu trouve un analogue au niveau local, qui a été mesuré par un essai pressiométrique cyclique.

La Figure 8 présente le résultat d'un essai réalisé à 11 mètres de profondeur sur le même site. Dans cet essai, le sol a été d'abord pré-cisaillé à 95% de la pression limite. Ensuite, il a été déchargé et des séries cycliques ont été réalisées avec un niveau de pression moyenne croissante. On remarquera sur la figure que lorsqu'un seul de 80% de la pression limite est dépassé, les séries cycliques engendrent une forte accumulation de déformations plastiques. Cette accumulation n'était pas observé sur les séries dans lesquelles la pression maximale ne dépassait pas 70% de la pression limite (série S1).

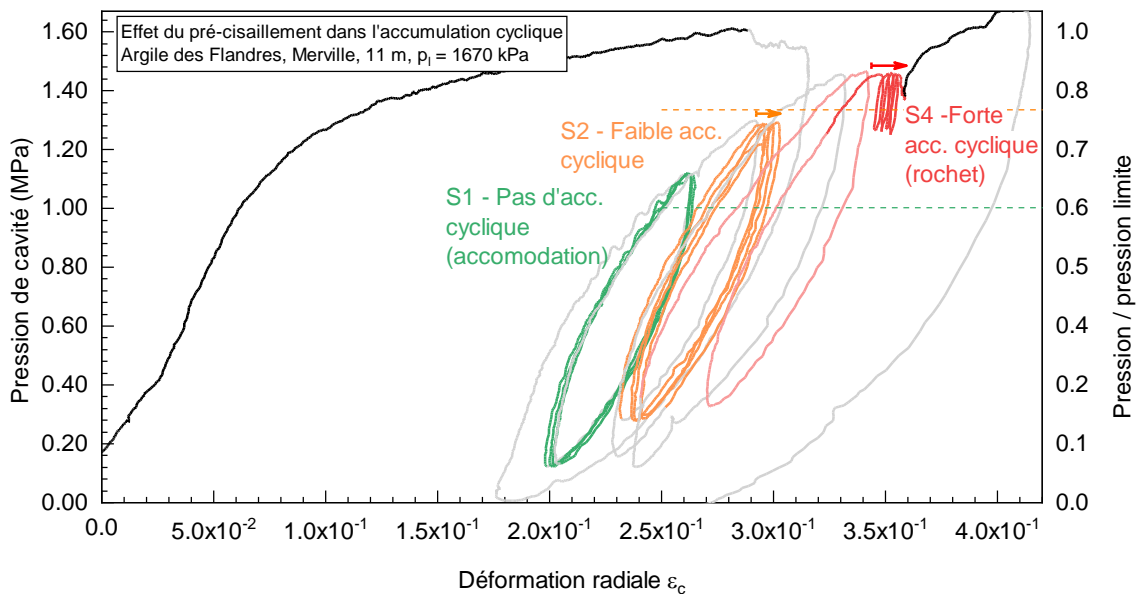


Figure 8 – Essai pressiométrique avec séries cycliques réalisés après avoir pré-cisaillé la cavité. Résultat analogue au comportement global des pieux sous charge cyclique

D'autres essais pressiométriques cycliques ont été réalisés sur le même site, mettant en évidence l'effet du temps et de la vitesse de chargement sur le comportement de la cavité (Lopes, 2020). Ces essais ne sont pas présentés dans cette communication.

4 Conclusions

Les essais pressiométriques de nouvelle génération permettent d'accéder aux propriétés élastiques des sols à faibles niveaux de déformation. Ceci requiert l'utilisation d'une sonde de précision améliorée, le suivi d'un protocole de calibrage plus rigoureux, un programme de chargement adéquat et des méthodes d'interprétation adaptées.

Il a été montré que le module de cisaillement intrinsèque du sol obtenu par ces nouvelles procédures peut être utilisé pour alimenter des courbes de mobilisation de type « t-z ».

L'application au calcul d'un pieu installé sur le site de Merville a permis de confirmer que la réponse globale en termes de charge-enfoncement obtenue par un modèle « t-z » basé sur le module élémentaire du sol peut être considérée représentative de celle obtenue lors d'un chargement cyclique.

Il a été également montré que les valeurs du module pressiométrique Ménard obtenu par l'essai réalisé selon la nouvelle procédure est équivalent à celui obtenu par des essais standards. Dans ce contexte, la nouvelle procédure présente l'avantage de permettre d'obtenir un jeu de paramètres supplémentaires, pouvant être considérée comme complémentaire aux procédures standards.

Les essais pressiométriques cycliques à séries répétées réalisés dans le cadre de cet étude, de caractère exploratoire, ont montré de fortes corrélations entre le comportement local mesuré au pressiomètre et le comportement global en tête de pieu sous chargement cyclique. Ce résultat devra aider à guider les recherches futures pour la définition d'un protocole précis d'essai et d'interprétation de la dégradation cyclique.

5 Références bibliographiques

- Benzaria, O. 2013. Contribution à l'étude du comportement des pieux isolés sous chargements cycliques axiaux. Ph.D. thesis. Université Paris Est.
- Borel, S., and Reiffsteck, P. 2006. Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Cour, F., and Lopes, A. 2018. Sonde monocellulaire innovante pour la réalisation d'essais d'expansion de cavité cylindrique (Innovative Monocell probe for performing cylindrical cavity expansion tests - in French). *In* Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Champs-sur-Marne.
- Frank, R., and Zhao, S.R. 1982. Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans sols fins. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **119**(2712): 17–24.
- Lopes, A. 2020. Determination of soil shear modulus at low strain level using an innovative pressuremeter probe. Application to cyclic pile design. Université Paris Est. Ph.D. thesis.
- Lopes, A., Dupla, J.C., Canou, J., and Droniuc, N. 2019. Laboratory validation of an innovative mono-cell pressuremeter probe : test procedures and first results. *In* 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Reykjavik. pp. 1–8. doi:10.32075/17ECSMGE-2019-0638.
- Lopes, A., Puech, A., Cour, F., Dupla, J.C., and Canou, J. 2020. Assessment of shear stiffness at small strain rate using an innovative monocell pressuremeter probe. *In* 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Budapest.
- Lopes, A., Puech, A., Droniuc, N., Geisler, J., and Cour, F. 2018. Mesures de G à faibles déformations à partir d'une sonde pressiométrique monocellulaire. *In* Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Champs-sur-Marne.
- Puech, A., and Garnier, J. 2017. Design of piles under cyclic loading: SOLCYP recommendations. John Wiley & Sons.
- Randolph, M. 2013. McClelland lecture. Analytical contributions to offshore geotechnical engineering. *In* Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. pp. 85–105.
- Randolph, M.F., and Wroth, C.P. 1978. Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **GT12**: 1465–1488.