

ESSAIS PRESSIOMETRIQUES CYCLIQUES AVEC MESURE DE LA PRESSION INTERSTITIELLE - LIQUEFACTION DES SOLS

CYCLIC PRESSUREMETER TESTS WITH PORE PRESSURE MEASUREMENTS - APPLICATION TO CSR EVALUATION

P.G. Karagiannopoulos^{1,2}, M. Peronne¹, P. Reiffsteck²

¹ Jean Lutz SA, Jurançon, 64110, France

² Université Gustave Eiffel – IFSTTAR – Dépt. GERS, Marne La Vallée, 77447, France

RÉSUMÉ – Cette communication présente les essais cycliques réalisés sur un limon liquéfiable à l'aide d'une sonde pressiométrique équipée d'un capteur de mesure de la pression interstitielle. Les résultats permettent d'estimer une relation entre l'augmentation résultante du volume et la pression interstitielle. Une relation entre le ratio cyclique de la contrainte appliquée et le nombre des cycles pour arriver à la rupture est proposé.

ABSTRACT – This paper presents a testing program on liquefiable silt using a pressuremeter probe equipped with a pore pressure sensor. A series of cyclic tests shows the relationship between the resulting volume increase and the pore water pressure. An estimation of the relationship between the applied cyclic stress ratio during the tests and the number of cycles to reach failure are presented and discussed in this paper.

1. Introduction

Les premiers essais pressiométriques cycliques ont été réalisés dans les années 1960. Ils comprennent classiquement un ou plusieurs cycles et permettent de déterminer un module de déformation cyclique et son évolution en fonction :

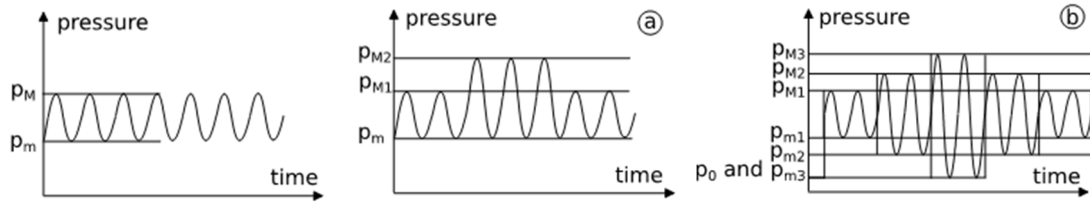
- De la déformation volumique accumulée.
- Du niveau de la contrainte appliquée.

Les valeurs obtenues sur ce module se situent entre celles des essais Menard sans cycle et celles des petites déformations rencontrées lors des essais de laboratoire (colonne résonante) ou des essais de propagation des ondes *in situ* (Cross-Hole).

L'objectif principal de l'essai monocycle est de limiter la perturbation initiale des parois du forage provoquée par le pré-forage. Cependant, un cycle unique s'avère insuffisant pour bien identifier les changements de caractéristiques du sol sous une sollicitation cyclique.

Dans les années 1970, l'Association de Recherche en GEotechnique MARine (ARGEMA) a organisé un programme d'essais pressiométriques cycliques sur différents sites, rassemblant de nombreux consultants et agences de recherche. Ces essais cycliques ont par exemple été utilisés dans la conception de pieux offshores. La présentation de ces expériences est résumée dans différents rapports et articles du symposium du pressiomètre et de ses applications maritimes ayant eu lieu à Paris en 1982. Trois procédures ont alors été définies pour effectuer les tests pressiométriques multicycles telles qu'illustrées aux Fig. 1 et ci-dessous :

- Chargement cyclique entre deux pressions limites p_m et p_M .
- Chargement cyclique variable entre deux pressions p_{m1} et p_{m2} , supérieures ou égales à la pression des terres au repos p_0' et estimées à travers un pourcentage de la pression limite (40 ou 60 % par exemple).
- Chargement cyclique entre deux pressions limites variables, dont la moyenne reste constante, avec pour limite inférieure une valeur supérieure à p_0' .



Figures 1.a, 1.b et 1.c. Procédures de tests pressiométriques cycliques définies dans le programme ARGEMA.

L'objectif de la présente communication est de démontrer le potentiel d'une sonde pressiométrique classique Menard équipée d'un système de mesure de la pression interstitielle, permettant l'évaluation du phénomène de liquéfaction in situ. Le forage est supposé d'une qualité suffisante pour garantir l'absence d'impact sur l'efficacité de la méthode proposée.

2. Equipement utilisé

L'instrumentation utilisée pour cette recherche est fabriquée par la société Jean Lutz SA. Elle est présentée à la Fig. 2 et comprend un ordinateur portable connecté au Contrôleur Pression Volume (CPV) nommé PREVO comportant différents capteurs (dont un flotteur magnétique) pour la mesure en temps réel des pressions et du volume. Le système permet le pilotage de l'essai et l'enregistrement des valeurs transmises par les capteurs.

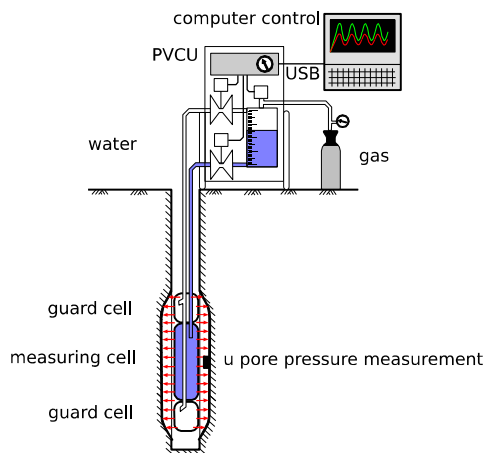


Figure 2. Schéma de principe de l'instrumentation pour la réalisation des essais pressiométriques cycliques.

Le logiciel PilotPrevo développé par Jean Lutz SA accompagne la réalisation automatisée de l'essai cyclique. L'utilisateur peut facilement décider d'un type de chargement (harmonique ou à fréquence multiple) et l'acquisition des données est ensuite faite en temps réel par l'ordinateur (une à plusieurs valeurs à la seconde). La sonde pressiométrique utilisée est une sonde classique Menard tri cellulaire, équipée d'un capteur de mesure de la pression interstitielle fixé sur la partie extérieure de la gaine caoutchouc. L'alimentation et l'acquisition du signal est faite à l'aide de deux fils noyés dans une rainure créée sur la gaine extérieure en caoutchouc.

3. Méthode de l'essai

Une campagne d'essais a été effectuée sur un site de Saint Benoit des Ondes (Bretagne). Un chargement cyclique entre deux pressions limites p_m et p_M a été défini (procédure 1 ci-dessus). Tous les essais ont été réalisés en pilotant la pression avec une fréquence cyclique

basée sur le type de sol de telle façon que les conditions de l'essai restent drainées (cf. Fig. 3). Le nombre de cycles a été maintenu inférieur à 50 et la fréquence variait entre 0,01 et 0,05 Hz.

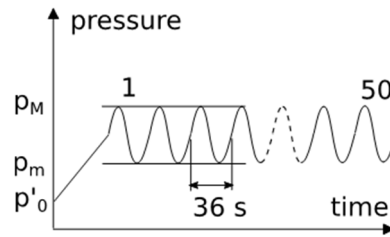


Figure 3. Portion cyclique de l'essai pressiométrique

La pression initiale p_m utilisée pour commencer la partie cyclique de l'essai est toujours supérieure à la pression horizontale p'_0 afin d'éviter le décollement de la sonde. La pression maximale p_M est choisie afin d'obtenir un ratio de contrainte cyclique spécifique tel que défini par Dupla et Canou (Dupla et Canou, 2003). La pression p'_0 est estimée par des essais pressiométriques classiques Menards effectués au préalable sur le même sol via la méthode proposée par Briaud (Briaud, 1992).

4. Analyse des données

En utilisant les résultats des essais cycliques de l'appareil triaxial, où le ratio cyclique CSR est défini comme le ratio de la contrainte de cisaillement maximale sur le double de la pression de consolidation σ'_c , on détermine un ratio similaire CSR pour le pressiomètre cyclique :

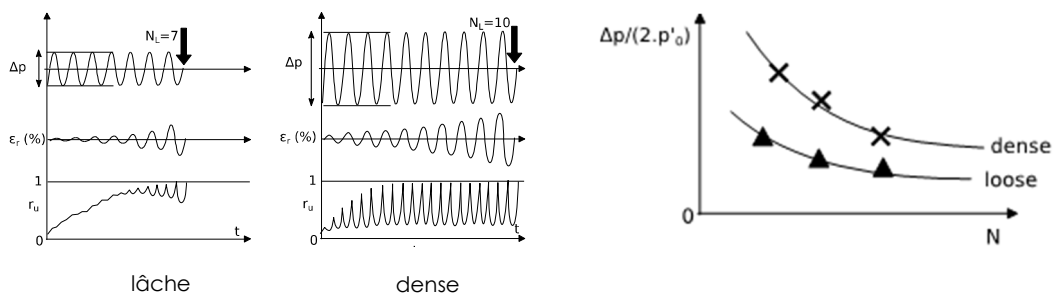
$$CSR = \frac{\delta q}{2 \cdot \sigma'_c} = \frac{\delta p}{2 \cdot p'_0} = \frac{p_M - p_m}{4 \cdot p'_0} \quad (1)$$

Par rapport à l'essai triaxial, le critère de rupture est généralement défini :

- Soit pour une valeur de pression interstitielle égale à la pression de consolidation.
- Soit pour une déformation axiale de double amplitude supérieure à 5 %, atteinte en 20 cycles.

Les essais sont effectués selon différentes amplitudes de pression Δp et l'évolution des courbes du ratio CSR est tracée en fonction du nombre des cycles N d'atteinte de la rupture. On peut apprécier les résultats dans les Fig. 4 avec N_L nombre des cycles pour la liquéfaction (pression effective zéro), ε_r déformation radiale et r_u ratio entre la pression interstitielle et la pression de consolidation. Ces courbes peuvent être utilisées pour la prédiction du comportement des structures sous chargement sismique et cyclique.

Contrairement aux essais de laboratoire (essai triaxial ou essai de cisaillement simple etc.), il n'est pas possible avec les essais *in situ* de modifier la densité du sol. Les essais sont donc effectués avec la densité existante des sols en place. Elle est déterminée soit au laboratoire par des échantillons non remaniés soit à l'aide d'abaques semi-empiriques.



Figures 4.a, 4.b et 4.c. Comportement cyclique d'un essai triaxial non drainé, courbes CSR – nombre de cycles.

Pour obtenir la déformation radiale ε_r , il faut transformer le changement de volume, mesuré pendant l'expansion pressiométrique, en déformation volumique ε_v . Celle-ci est ensuite convertie en déformation radiale avec l'hypothèse d'une forme parfaitement cylindrique de la sonde et en utilisant l'équation suivante :

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\pi \cdot \frac{r^2}{4} - \pi \cdot \frac{r_0^2}{4}}{\pi \cdot \frac{r_0^2}{4}} = \frac{r^2 - r_0^2}{r_0^2} \xrightarrow{r=r_0+\Delta r \text{ et } \Delta r^2 \rightarrow 0} \varepsilon_v = (1 + \varepsilon_r)^2 - 1 \quad (2)$$

où $\varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r_0}$, V = volume mesuré de la cavité pendant l'essai et V_0 = volume de la cavité initiale.

La rupture pendant l'essai pressiométrique multicycle est déterminée d'une façon similaire à celle de l'essai triaxial. L'enveloppe du volume vers le nombre de cycles est déterminée et une loi de puissance est calée sur les données. Une valeur semi-empirique de variation du volume égal à $\varepsilon_v = 50\%$ ou $\varepsilon_r = 21\%$ est définie. Si ce niveau de déformation n'est pas atteint pendant l'essai pressiométrique, le nombre de cycles pour la rupture est extrapolé en utilisant le calage de l'enveloppe effectué avec la loi puissance.

5. Campagnes d'essais in situ (site de Saint Benoît des Ondes)

Les résultats d'une série d'essais cycliques pressiométriques effectués sur la digue de la Duchesse Anne à Saint Benoît des Ondes, près du Mont-Saint-Michel, sont présentés dans cette section (cf. Fig. 5).

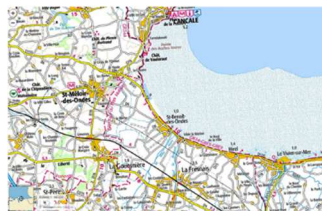
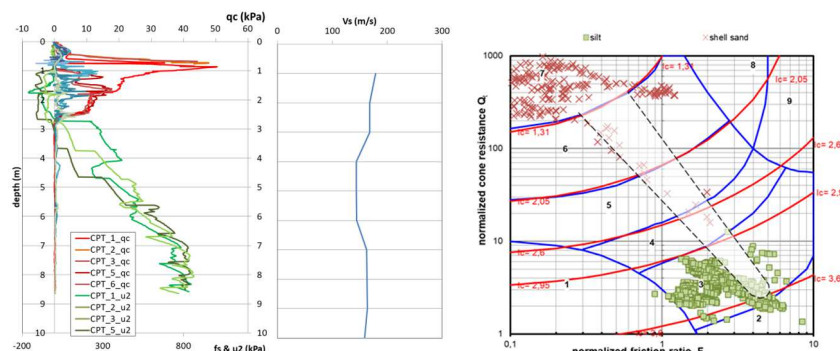


Figure 5. Localisation de Saint-Benoit-des-Ondes

La digue de la Duchesse Anne sépare un terrain marécageux de la mer voisine. La couche de sédiments quaternaires est comprise entre 15 et 20 m au-dessous de la digue et elle est constituée d'un mélange de sédiments limoneux-argileux et de sables fins. Ces matériaux sont totalement saturés du fait de leur emplacement à portée de la marée. Les sables marins sont bien gradués.

Les Fig. 6.a et 6.b présentent les profils issus des essais de pénétration statique (CPT) et des essais Cross-Hole obtenus sur le terrain au-dessous de la digue. Le niveau piézométrique a été mesuré à 2 m lors de ces essais. Les résultats des profils piézocônes sont tracés sur le diagramme de comportement rhéologique des sols de Robertson (Robertson, 2009). On peut ainsi s'apercevoir que la couche supérieure est constituée d'un sable grossier (croix rouges) recouvrant une couche silteuse et cohésive (carrés verts).



Figures 6.a et 6.b. Profil CPT et Vs du site de Saint Benoît des Ondes et diagramme type du comportement des sols selon les valeurs issues du test CPT.

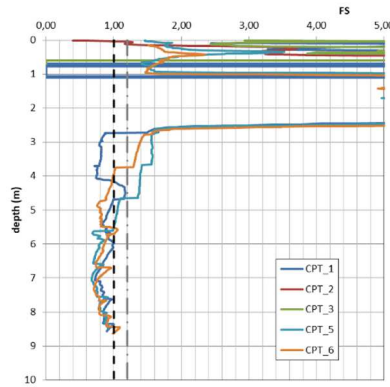


Figure 7. Coefficient de sécurité pour le phénomène de liquéfaction en fonction de la profondeur calculée du profil CPT.

A l'aide des résultats de l'essai CPT (cf. Fig. 7), on peut voir que le seuil de liquéfaction proposé par Youd et Idriss (Youd et Idriss, 2001) apparaît au-dessous de 3 m de profondeur (couche de limon argileux).

Sur le site de la digue de la Duchesse Anne, trois campagnes séparées d'essais pressiométriques cycliques ont eu lieu en 2016, 2018 et 2019. L'analyse du premier ensemble de données obtenus par la campagne 2016 a montré la nécessité d'améliorer le système de pilotage de la pression afin d'obtenir le même niveau de fiabilité des essais de laboratoire. Des changements ont été effectués pour la campagne 2018, en intégrant la mesure de pression interstitielle. Les Fig. 8.a et 8.b illustrent les résultats en utilisant la sonde nue et le tube fendu.

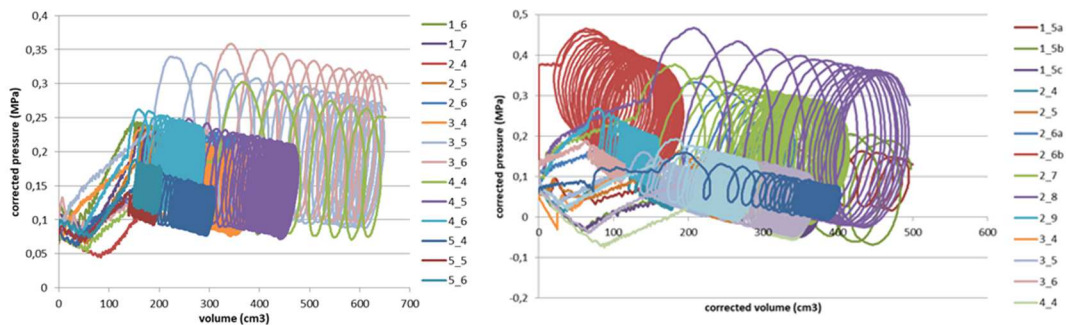


Figure 8.a et 8.b. Evolution de la pression cyclique corrigée pour une membrane souple en caoutchouc (8.a, gauche) et pour un tube fendu (8.b, droite), campagnes 2016 et 2018.

Lors de ces deux premières campagnes, le chargement cyclique a été imposé entre deux limites de pression fixes, appliquées au niveau de la surface du forage par le CPV PREVO. On s'aperçoit cependant sur les graphiques que ces niveaux de pression (maxi et mini) sont considérablement diminués au niveau de la sonde. Pour éviter ce phénomène, le logiciel de pilotage a été amélioré afin de prendre en compte les pertes de charges en temps réel (résistance propre de la gaine et de la membrane).

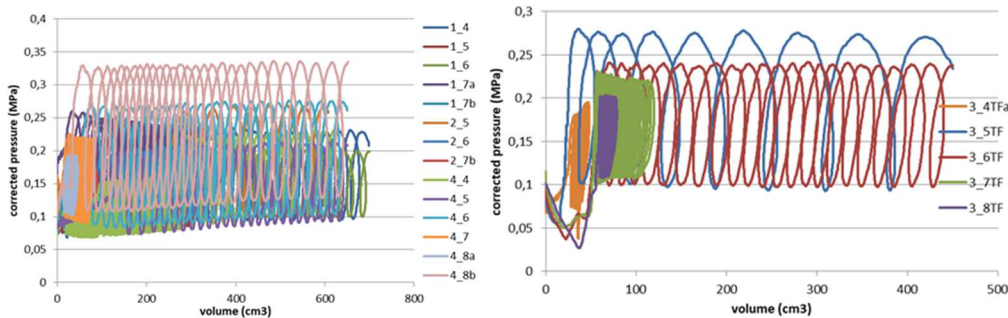


Figure 9.a et 9.b. Pression corrigée en fonction du volume injecté pendant un essai cyclique pressiométrique avec une gaine toilée (9.a, gauche) et un tube fendu (9.b droite), campagne 2019.

Les courbes pressiométriques obtenues (en gaine toilée et tube fendu) avec la modification du logiciel apparaissent dans les Fig. 9. On peut voir que la pression moyenne reste presque parfaitement stable pendant les cycles même si une faible augmentation ou diminution de la pression moyenne peut être ponctuellement observée. Ces petits écarts sont dus à un décalage du zéro entre l'inertie préalable de la sonde à l'air libre et les essais cycliques.

Les enveloppes issues des essais multicycles effectués pendant la campagne de 2019 sont illustrées dans les Fig. 10 où la déformation volumique de la sonde est tracée en fonction du temps.

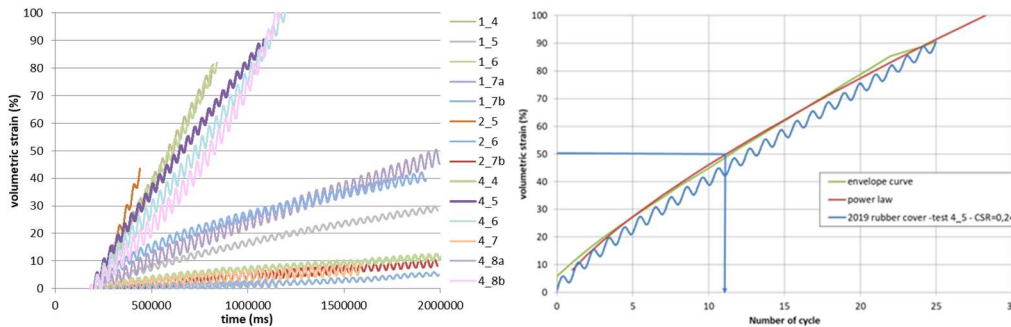


Figure 10.a et 10.b. Déformation volumique en fonction du temps (10.a, gauche) et définition du point de rupture conventionnel (10.b, droite).

On peut également visualiser ici la courbe d'accumulation pour un essai pressiométrique cyclique effectué à une profondeur de 5m en utilisant une gaine caoutchouc toilée. La courbe enveloppe, tracée à partir de la déformation maximale de chaque cycle, représente la déformation irréversible et permanente (plastique). Afin de calculer le nombre de cycles pour une déformation volumique de 50 %, une loi de puissance est alors calée sur la courbe d'accumulation.

La Fig.11 illustre le nombre des cycles nécessaires pour atteindre une déformation volumique de 50 % (correspondant à notre critère de rupture du sol) en fonction du ratio de pression appliquée CSR pour l'ensemble des essais des trois campagnes effectuées. On peut constater que l'accumulation de la déformation se fait plus rapidement quand l'amplitude du ratio de la contrainte cyclique augmente. Cette observation est en accord avec le comportement observé par Dupla et Canou lors des essais cycliques dans la chambre d'étalonnage (Dupla et Canou, 2003).

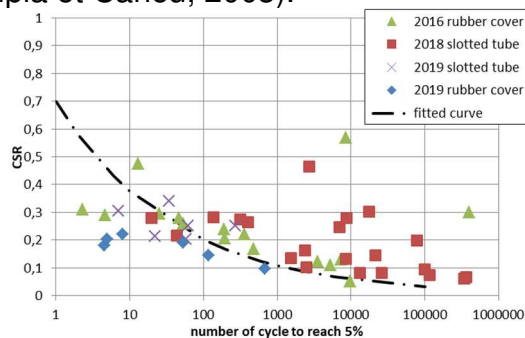


Figure 11. Points CSR-N issus des différentes campagnes à Saint Benoit des Ondes.

On peut ici observer que les points obtenus pendant les trois campagnes sont relativement proches. Une plus grande dispersion des points de rupture est constatée pour un nombre de cycles élevé, justifiée par l'augmentation de l'influence de la perte de charges.

La pression moyenne appliquée est diminuée pendant les cycles étant donné que la correction de la courbe pressiométrique brute est plus importante avec l'accumulation volumique. Ce phénomène a comme conséquence la diminution du CSR avec le nombre des cycles même si l'écart entre ces valeurs limites augmente légèrement. Par conséquent, vu que l'on prend en compte le ratio cyclique CSR initial appliqué (sans correction) pour

tracer le point CSR - Nombre des cycles correspondant à chaque essai cyclique, le point réel se trouve plus bas (CSR moyen plus petit) et plus près de la courbe calée de la Fig.11. Cependant, cette dispersion des données est moins élevée pour la campagne 2019 où la modification du logiciel de pilotage de la pression a été mise en application.

6. Evolution de la pression interstitielle

Lors de la dernière campagne d'essais de 2019, en complément de l'application de la correction du CSR en temps réel, une mesure de la pression interstitielle des sols testés pendant l'essai cyclique a été effectuée à mi-hauteur de la sonde (illustrée sur la Fig. 12).

Ce nouveau mini-capteur simple et robuste peut être fixé directement dans une rainure de la gaine toilée (60 mm) de la sonde pressiométrique Menard ou dans une lamelle métallique du tube fendu (sonde 44 mm).

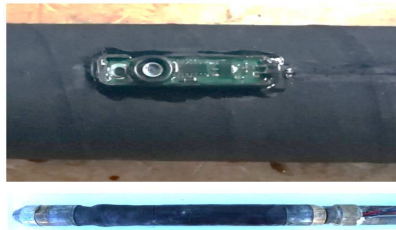


Figure 12. Capteur de pression interstitielle fixé sur la gaine.

La Fig. 13 montre l'évolution de la pression interstitielle mesurée directement sur la sonde lors des essais cycliques effectués. La qualité du signal est une bonne indication du fonctionnement correct du capteur pendant l'essai multicycles. On peut alors s'apercevoir que la valeur de la surpression interstitielle croît avec l'augmentation du ratio de la contrainte cyclique appliqué.

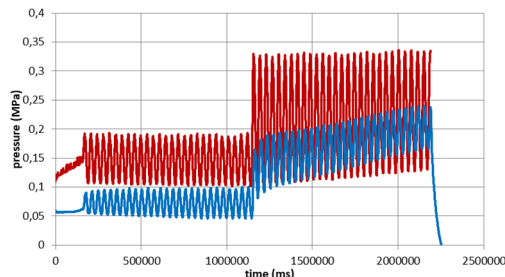


Figure 13. Exemple de mesure de la pression interstitielle lors de la campagne d'essais.

Comme approche initiale, un ratio in situ similaire au ratio triaxial r_u peut être déduit par ces essais pressiométriques multicycles. En considérant u la valeur de la pression interstitielle et p la pression moyenne accumulée, on peut exprimer ce ratio avec la formule suivante :

$$r_u = \frac{u}{p} \quad (3)$$

Quand la valeur r_u atteint une valeur proche de 1, la résistance du sol chute drastiquement et le sol s'effondre (résistance au cisaillement négligeable, cf. Fig. 14).

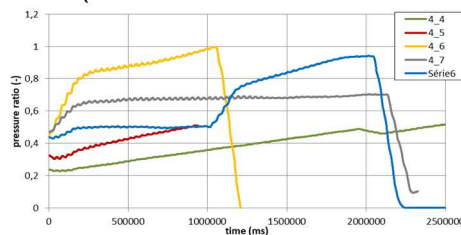


Figure 14. Evolution du ratio in situ r_u pendant le cycle.

L'étude de ces résultats est en cours et d'autres campagnes d'essais sont prévus. Des comparaisons avec d'autres essais *in situ* et en laboratoire sont par ailleurs envisagées.

7. Conclusions

Au travers de cette communication, une nouvelle procédure d'évaluation *in situ* du potentiel de liquéfaction des sols est présentée. L'interprétation des premiers résultats d'essais multicycles peut être faite en comparaison avec les essais triaxiaux de laboratoire afin de s'assurer de leur validité dans le cadre de notre recherche. L'objectif ultime est d'obtenir une courbe CSR – nombre de cycles pour la liquéfaction des sols sans être contraints d'effectuer des tests en laboratoire sur des échantillons remaniés et reconstitués qui ne représentent pas les conditions du sol *in situ*.

Une fois que la pression appliquée par la sonde au sol est maintenue constante, l'ajout de la mesure de la pression interstitielle du terrain pendant l'essai pressiométrique offre un nouvel aperçu de l'influence de la teneur en fines au développement de la pression interstitielle dans les sols testés.

8. Remerciements

Les auteurs remercient le projet national ARSCOP et le projet ISOLATE de l'ANRT, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable pour le financement de cette étude ainsi que MM. R. Benot, G. Desanneaux pour l'assistance à la réalisation des essais *in situ*.

9. Références bibliographiques

- Ménard L. Influence of the intensity and increment history of the stresses on the settlement of a soil of foundation, 5th ICSMFE Paris, 1961 (1)42:249-253
- Ménard L. Phase de déchargement des essais pressiométriques, Etude théorique et applications, Circulaire 1960, 3 pages
- Borel S., Reiffsteck Ph., Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. LCPC Paris, 2006, pp. 132.
- Combarieu O., Canépa Y., The unload-reload pressuremeter test, BLPC, 2001, 233 : 37-65
- AFNOR, Reconnaissance et essais, Essai pressiométrique Ménard – partie 2, Essai avec cycle, NF P94-110-2, 1999, pp. 43.
- Dupla, J.C., Canou J. Cyclic pressuremeter loading and liquefaction properties of sands, Soils and Foundations 2003, Vol. 43(2), 17-31
- Jézéquel J.F., Le Méhauté A., Cyclic tests with self-boring pressuremeter, symposium on the pressuremeter and its marine applications, 1982, pp. 221-233
- Puech A., Brucy F., Ma E., Calcul de la capacité axiale des pieux de fondations marines à partir du pressiomètre autoforeur, Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, Paris, Éditions Technip, 1982, pp. 373-388.
- Le Méhauté A., Jézéquel J.F., Essais cycliques au pressiomètre autoforeur, Rapports des LPC, FAER 1-05-09-22, 1980, 29 pages
- Masuda, K., Nagatoh, R., Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Use of cyclic pressuremeter with multiple cells for evaluation of liquefaction resistance of soils ISP5, 2005
- Briaud J.L., The Pressuremeter A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands. 1992
- Ishihara, K. Liquefaction and flow failure during ,Géotechnique 1993, 43, No. 4: 349-415.
- Robertson, P. K. Interpretation of cone penetration test: A uni-field approach Canadian Geotechnical Journal, 46 (1), 2009, pp. 1337-1355
- Youd, T.L., and I.M. Idriss. "Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.", J. Geotech. Geoenviron. Eng. 127(10), 2001: 817-833