

INFLUENCE DES PROTOCOLES D'ESSAIS PRESSIOMETRIQUES DANS LES LIMONS

INFLUENCE OF TESTING PROTOCOLS ON THE RESULTS OF PRESSUREMETER TESTS IN SILTY SOILS

Tomasz LEWCZUK¹, Lucile SAUSSAYE¹, Julien HABERT²

¹Cerema, Le Grand-Quevilly, Blois, France

²Terrasol, Paris, France

RÉSUMÉ – Cet article présente une étude de l'influence de différents modes de forage, de différents types de sonde et de l'application de différentes amplitudes de paliers de pression sur les résultats des essais pressiométriques. Il analyse les résultats d'une campagne de 48 essais réalisée sur un stock homogène de limons et permet de proposer des recommandations pour de futures campagnes d'essais.

ABSTRACT–This paper presents a study of the influence of different methods of drilling, different types of probe and the application of different pressure ranges increment on the results of the pressuremeter tests. It analyses the results of a campaign of 48 tests carried out on a homogeneous silty soil fill and makes it possible to propose recommendations for future investigations.

1. Introduction

La large gamme de machines et d'outils de forage et d'essais pressiométriques a incité depuis longtemps à réaliser des études sur la façon dont le mode de forage et le type de sonde affecte les caractéristiques pressiométriques obtenues pour les principaux types de sols. Cela a permis l'élaboration de recommandations, tout d'abord incorporées dans les procédures d'essai LPC (1971), puis dans la norme française NF P94-110-1 (AFNOR, 2000) et enfin dans la norme internationale EN ISO 22476-4 (CEN, 2012).

Cependant, les bonnes pratiques ne sont pas toujours suivies (en recourant trop souvent à des matériels permettant la réalisation plus rapide et réduisant les risques d'éclatement de la sonde, comme le tube fendu, par exemple), conduisant à mésestimer les valeurs du module E_M , de la pression de fluage nette p_f^* et de la pression limite nette p_{LM}^* représentatives du sol. Or, l'utilité des méthodes semi-empiriques basées sur les essais pressiométriques, permettant le calcul de la portance et du tassement des fondations superficielles et des fondations profondes, nécessitent de fiabiliser ces données d'entrée.

Le présent article détaille les résultats et l'analyse d'une campagne d'essais pressiométriques comparatifs réalisés dans des matériaux limoneux selon le protocole Ménard. Une campagne complète de 48 essais pressiométriques a ainsi été réalisée sur un stock homogène de limons. Elle permet d'évaluer l'influence de 2 modes de forage, de 2 types de sondes et de 2 modes d'application des paliers de pression lors de l'essai pressiométrique.

2. Site d'essai

Le site d'essai est un stock de limon de 6 m de hauteur au droit du projet de la RN27, vers Dieppe, côté Tourville-sur-Arques. Ce stock a été édifié sans compactage au cours du mois d'avril 2019. La campagne d'essais pressiométriques sur le stock s'est déroulée du 24 juillet au 12 août 2019, avec une sondeuse géotechnique Comacchio GEO 601 et un

dispositif automatique d'application de la pression et de mesure du volume lors de l'essai pressiométrique PREVO (Jean Lutz).

Afin de consolider la campagne de sondages pressiométriques, le site a fait l'objet de reconnaissances complémentaires comprenant (Figure 1) :

- 3 sondages à la tarière de diamètre 150 mm descendus à 3,80 m de profondeur avec prélèvement d'échantillons de sol remaniés pour identification en laboratoire selon la norme NF P11-300 ;
- 3 sondages au pénétromètre dynamique lourd avec pointe perdue de 60 mm de diamètre afin d'évaluer la compacité des limons du stock.

Ces reconnaissances montrent que le limon présente les caractéristiques suivantes :

- $15,7 \leq w \leq 18,3\%$;
- $12 \leq D_{max} \leq 36$ mm (présence de quelques petits silex) ;
- $79 \leq 0/80 \mu\text{m} \leq 96\%$;
- $1,7 \leq VBS \leq 2,4$ g/100 g de sol sec ;
- classe A1 selon la norme NF P11-300, limon peu plastique ;
- compacité plus faible entre 1,50 et 2,50 m de profondeur.

3. Conditions d'essai

3.1. Outils de forage

Les outils de forage utilisés sont :

- une tarière hélicoïdale continue de 63 mm de diamètre (à sec, sans fluide de forage), notée T (technique de forage CFA selon la norme EN ISO 22476-4, AFNOR, 2015) ;
- un tricône de 63 mm de diamètre relié à des tiges de 60 mm de diamètre (forage destructif à l'eau), noté TR (technique de forage OHD selon la norme EN ISO 22476-4, AFNOR, 2015).

Le premier mode de forage, CFA, est approprié pour les limons au-dessus de la nappe selon la norme EN ISO 22476-4 (AFNOR, 2015). La deuxième technique OHD est aussi appropriée mais avec une circulation de boue dont la pression et le débit ne doivent pas excéder certaines valeurs (cf. Tableau C.2 de la norme). L'utilisation de l'eau pure comme fluide de forage n'est pas clairement proscrite par ce même document. En effet, dans cette norme, comme dans la précédente (NF P94-110-1, AFNOR, 2000), il est seulement prescrit l'utilisation d'une boue de forage (utilisation d'un fluide), sans que sa nature ou sa composition ne soit précisée. Le deuxième mode de forage à l'eau pure sans additif a donc été retenu ici pour quantifier les problématiques associées à une pratique malheureusement constatée sur de nombreux chantiers.

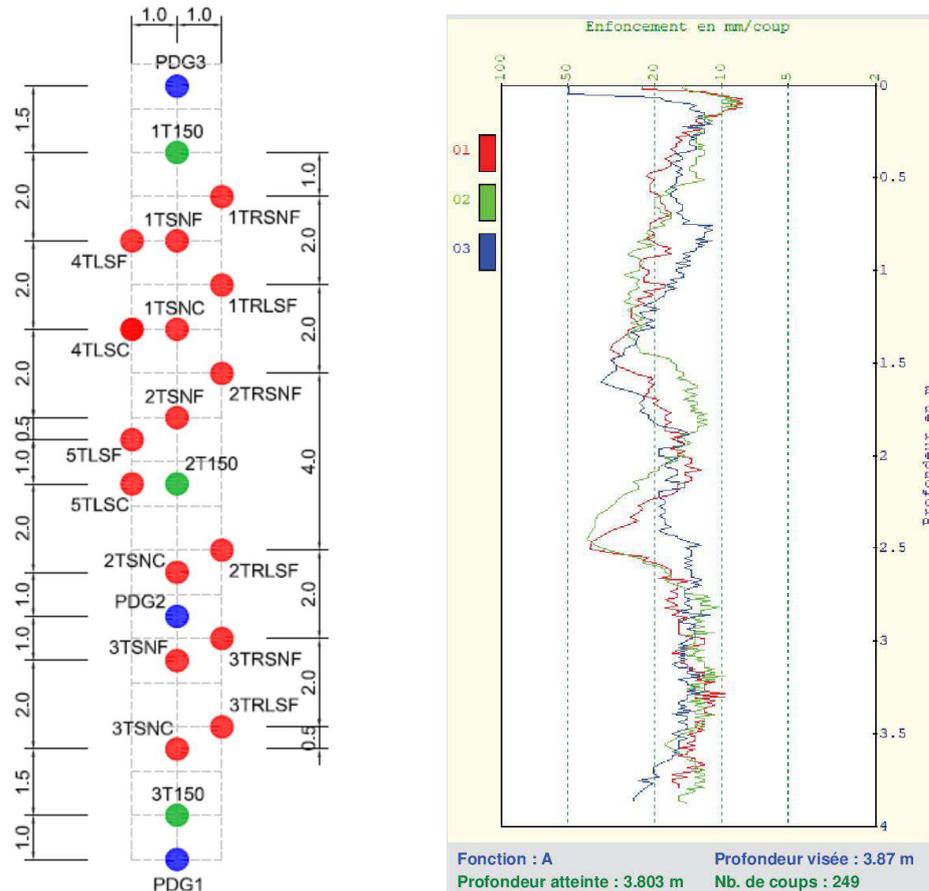


Figure 1. Implantation des sondages et caractéristiques mécaniques du stock de limons.

3.2. Type de sonde

Les sondes utilisées sont :

- une sonde nue 60 mm à gaine souple, notée SN, présentant une pression limite propre p_{el} (résistance propre de la sonde pour $V = 700 \text{ cm}^3$) égale à 0,16 MPa ;
- une sonde 40 mm, avec une cellule centrale de 210 mm de long dans un tube fendu, noté LS (Lanterné Souple), présentant une pression limite propre p_{el} égale à 0,30 MPa.

L'annexe A de la norme EN ISO 22476-4 (AFNOR, 2015) fixe la valeur maximale de la pression limite propre de la sonde en fonction de la pression limite mesurée. Elle indique que lorsque la pression limite pressiométrique Ménard du terrain $p_{LM} \leq 0,9 \text{ MPa}$, alors la pression limite propre de la sonde (étalonnage) $p_{el} \leq p_L/4 + 0,025 \text{ MPa}$. Ainsi, si la sonde nue est recommandée par la norme pour de faibles p_{LM} , ce qui est attendu pour un stock de limon non compacté, la sonde lanternée ne l'est pas. Toutefois, l'utilisation de la sonde lanternée est également une pratique constatée sur le terrain.

3.3. Application des paliers de pression

Deux programmes de chargement sont appliqués :

- chargement fixé par l'opérateur, selon son expérience, noté F, soit un choix libre sur l'application des paliers de pression ;
- chargement par pas constant de 0,2 bar, noté C.

Le choix du programme de chargement influence nécessairement la durée globale d'essai et le nombre de paliers appliqués.

La notation définie ici implique qu'un essai réalisé à la tarière, avec la sonde nue et un pas de pression fixé par l'opérateur est noté TSNF.

3.4. Nombre de sondages et d'essais

Afin d'avoir au moins 2 essais pressiométriques pour chaque configuration, 16 sondages descendus à 3,5 m de profondeur environ ont été réalisés (Figure 2) :

- 10 forages à la tarière hélicoïdale 63 mm ;
- 6 forages au tricône 63 mm à l'eau pure ;
- 3 essais par forage descendus à 1, 2 et 3 m de profondeur.

Dans un premier temps, pour les forages réalisés à la tarière hélicoïdale à sec, les 2 programmes de chargement ont été mis en œuvre avec les 2 types de sonde, aux 3 profondeurs d'essais, soit :

- TSN : 18 essais (2 programmes de chargement x 3 profondeurs d'essais x 3 forages) ;
- TLS : 12 essais (2 programmes de chargement x 3 profondeurs d'essais x 2 forages).

Dans un second temps, pour les forages au tricône, seule la configuration de chargement fixée par l'opérateur est conservée, soit :

- TRSNF : 9 essais (3 profondeurs d'essais x 3 forages) ;
- TRLSF : 9 essais (3 profondeurs d'essais x 3 forages).

4. Résultats

4.1. Observation des mesures brutes, sans correction

4.1.1. Essais réalisés dans les forages à la tarière à sec (technique appropriée)

Les mesures brutes, sans correction, montrent que les essais réalisés avec un pas constant de 0,2 bar donnent des courbes similaires à celles des essais réalisés avec le pas fixé par l'opérateur. La Figure 2 donne l'exemple des essais réalisés à la sonde nue dans les forages à la tarière à 2 m de profondeur. Avec un chargement par pas constant de 0,2 bar, le nombre de paliers de pression appliqués est plus élevé, de même que la durée des essais. La déformation pseudo-élastique du limon est donc plus longue.

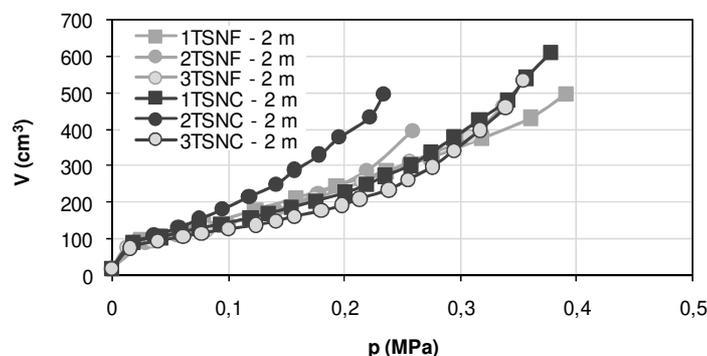


Figure 2. Courbes des essais pressiométriques réalisés à la sonde nue dans les forages à la tarière à 2 m de profondeur avec pas d'augmentation de pression fixé par l'opérateur et pas constant de 0,2 bar.

4.1.2. Essais réalisés dans les forages au tricône à l'eau pure sans additif (technique non appropriée sans boue)

Ces essais s'avèrent difficiles à interpréter :

- l'utilisation de l'eau pure dans le limon induit soit un gonflement du sol soit un effondrement des parois du forage, détecté sur les courbes des essais pressiométriques par l'absence de mise en contact de la sonde avec la paroi du forage, excepté pour 3 essais sur 18 ;
- il est également supposé que le tube fendu se remplit de particules fines au fur et à mesure des essais après un forage au tricône à l'eau, augmentant le volume global de la sonde (volume extérieur) ce qui pourrait conduire au collage instantané de la sonde au forage avant même de procéder à l'essai pressiométrique.

Les essais réalisés avec la sonde nue dans les forages au tricône avec injection d'eau pure sans additif montrent des performances mécaniques globalement plus faibles (-38 à -49% pour les essais réalisés à 2 m de profondeur) que lorsqu'ils sont réalisés dans les forages à la tarière à sec (Figure 3). Le même constat est effectué pour les essais réalisés avec la sonde lanternée souple. L'importance de la technique de forage est visible sur les mesures brutes, sans correction, ce qui se confirme après correction.

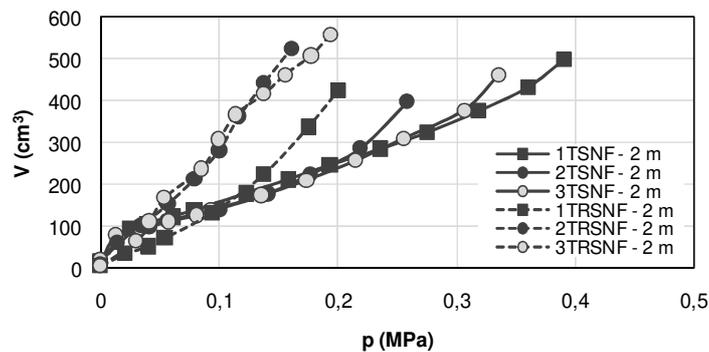


Figure 3. Courbes des essais pressiométriques réalisés à la sonde nue dans les forages à la tarière et au tricône à 2 m de profondeur avec pas d'augmentation de pression fixé par l'opérateur.

4.2. Comparaison des caractéristiques pressiométriques

4.2.1. Essais réalisés dans les forages à la tarière (technique appropriée)

Suite à l'interprétation des essais pressiométriques (Figure 4), il est constaté une grande disparité des valeurs des caractéristiques pressiométriques lorsque le forage est réalisé à la tarière à sec, notamment pour le module E_M (coefficient de variation, rapport entre l'écart-type et la moyenne des valeurs, de 98%) et les rapports E_M/p_{lm}^* (coefficient de variation de 86%).

Les valeurs de E_M sont plus élevées en présence du tube fendu (sondages 4TLSF et 5TLSF) (de 0,7 à 4,8 MPa avec sonde nue et de 5,2 à 23,6 MPa avec tube fendu soit +520% en comparant les valeurs moyennes de E_M). Les rapports E_M/p_{lm}^* , élevés (valeur moyenne de 34 avec tube fendu), indiquent la présence de sols a priori surconsolidés, ce qui ne correspond pas au cas présent.

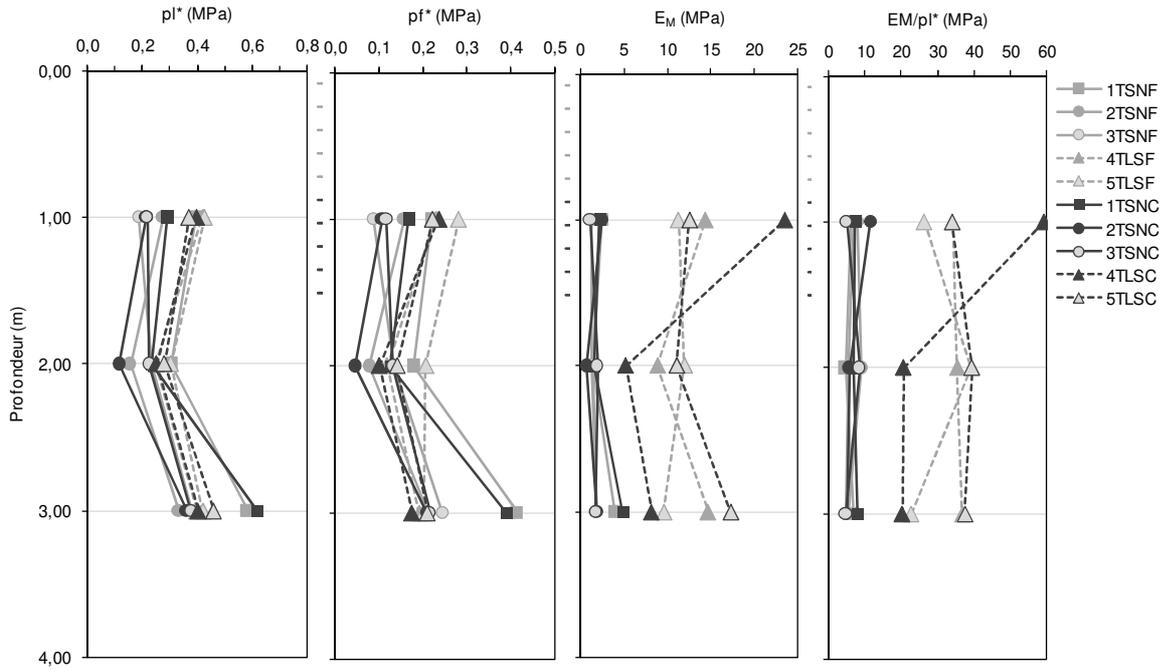


Figure 4. Caractéristiques pressiométriques mesurées dans les forages à la tarière à sec.

4.2.2. Essais réalisés dans les forages au tricône à l'eau pure sans additif (technique non appropriée sans boue)

Suite à l'interprétation des essais pressiométriques (Figure 5), il est également constaté une grande disparité des valeurs des caractéristiques pressiométriques lorsque le forage est réalisé au tricône à l'eau pure sans additif (coefficients de variation sur pl_M^* de 59%, sur pf^* de 62%, sur E_M de 110% et sur E_M/pl_M^* de 77%).

Les valeurs de E_M sont faibles (de 0,1 à 8,0 MPa). Le limon se sature en eau lors du forage, l'utilisation de tiges de diamètre de 60 mm empêchant l'eau et les cuttings saturés en eau de remonter à la surface ; il perd alors sa résistance/consistance.

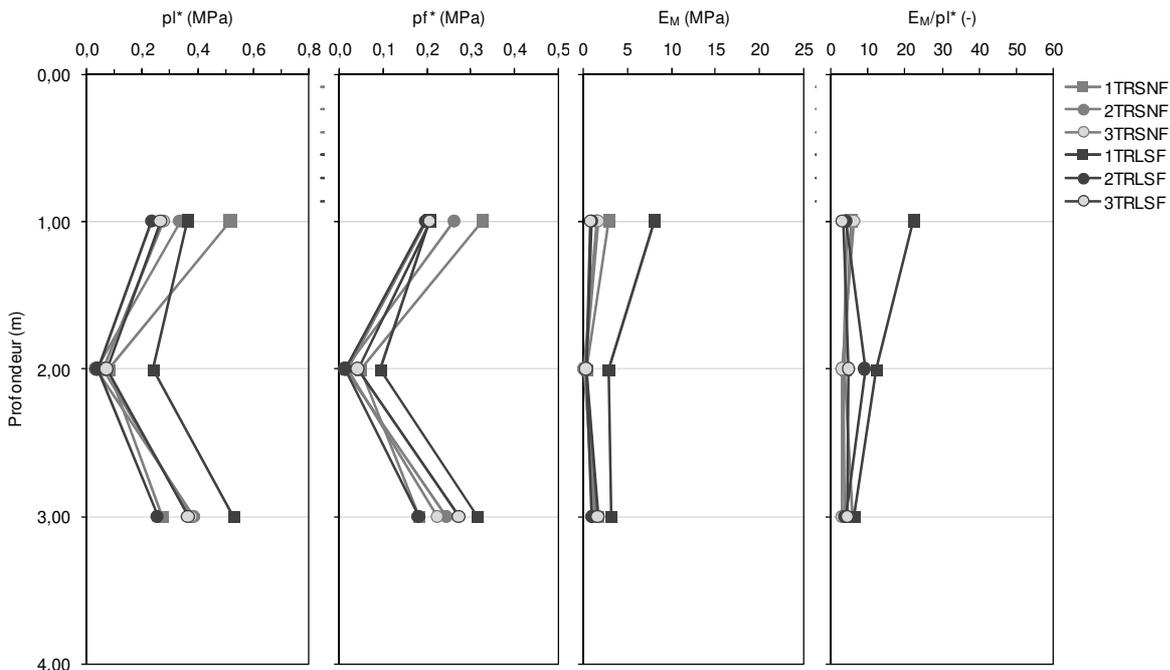


Figure 5. Caractéristiques pressiométriques mesurées dans les forages au tricône à l'eau pure.

4.2.3. Autres observations

Sur la Figure 4, il n'apparaît pas de différence notable pour les caractéristiques pressiométriques p_f^* , p_{lM}^* et E_M mesurées entre les essais réalisés avec pas d'augmentation de la pression fixé par l'opérateur et ceux réalisés avec un pas d'augmentation constant de la pression de 0,2 bar.

Quelle que soit la technique de forage, les essais à 2 m de profondeur sont globalement ceux qui présentent les paramètres pressiométriques les plus faibles, ce qui est à mettre en relation avec la plus faible compacité mesurée entre 1,50 et 2,50 m de profondeur au pénétromètre dynamique.

5. Discussions

5.1. Problématiques de mise en œuvre des essais

5.1.1. Résistance propre des sondes

La plus faible valeur de pression limite corrigée p_{lM} avec la sonde nue, quel que soit le mode de forage, est égale à 0,05 MPa (essai dans le forage 2TRSNF à 2 m de profondeur). En supposant que dans l'inéquation $p_{el} \leq p_l/4 + 0,025$ MPa (cf. 3.2.), $p_l = p_{lM}$ minimale mesurée avec la sonde :

$$0,05/4 + 0,025 = 0,04 \text{ MPa soit } 0,16 > 0,04 \text{ MPa}$$

Il semble donc que la sonde nue utilisée est trop raide pour le stock de limons étudié. Toutefois, une analyse de l'ensemble des valeurs de pression limite corrigée p_{lM} obtenues avec la sonde nue montre que certaines d'entre elles sont supérieures à $(0,16 - 0,025) \times 4 = 0,54$ MPa, uniquement dans les forages réalisés à la tarière à sec.

Avec la sonde lanternée souple, la plus faible valeur de p_{lM} est égale à 0,06 MPa (essai dans le forage 2TRLSF à 2 m de profondeur) :

$$0,06/4 + 0,025 = 0,04 \text{ MPa, soit } 0,30 > 0,04 \text{ MPa.}$$

De plus, aucune valeur de p_{lM} obtenue avec cette sonde n'excède $(0,30 - 0,025) \times 4 = 1,10$ MPa. Ainsi, de manière générale, pour tous les essais réalisés avec la sonde avec le tube fendu, en appliquant l'inéquation $p_{el} \leq p_l/4 + 0,025$ MPa, il s'avère que la sonde utilisée est trop raide pour le stock de limons étudié.

5.1.2. Sensibilité du contrôleur pression-volume et de l'enregistreur

La consigne du pas d'augmentation de pression constant de 0,2 bar sur le contrôleur pression-volume (CPV) est difficile à respecter en début d'essai, pour de faibles pressions. En effet, une incertitude de $\pm 0,2$ bar entre la consigne donnée par l'opérateur et la valeur enregistrée est parfois observée sur le CPV lors de l'essai puis sur les enregistrements papier et numérique. Cela confirme que multiplier le nombre de points n'est pas forcément bénéfique. Le résultat d'essai est sensible à la vitesse. C'est pourquoi conserver environ 10 points de mesures constitue une bonne disposition.

5.1.3. Influence du fluide de forage

Les forages à la tarière à sec donnent des volumes de la cavité initiale inférieures à 100 cm^3 (soit un forage cylindrique parfait) là où les forages au tricône à l'eau pure, sans additif, imbibent le limon, qui absorbe le fluide de forage et se trouve finalement dans un état saturé. Le limon étant sensible à l'eau, la perte de résistance mécanique est quasi immédiate et elle se manifeste par des valeurs de p_{lM}^* , p_f^* et E_M plus faibles et des

courbes d'essai pressiométrique ne présentant pas de phase initiale de collage de la sonde au forage (15 cas sur 18).

Si, pour les forages au tricône dans les limons hors nappe, l'utilisation de boue est prescrite par la norme EN ISO 22476-4 (AFNOR, 2015), la nature et la composition (dosage) des fluides et boues de forage recommandés ou proscrits nécessiteraient d'être précisés afin d'adopter les bonnes pratiques.

6. Conclusions

Les essais pressiométriques effectués dans les limons d'un stock non compacté, avec les différentes techniques décrites précédemment, appropriées ou proscrites par la norme EN ISO 22476-4 (AFNOR, 2015), montrent une influence du protocole d'essai plus importante sur les modules pressiométriques Ménard E_M que sur la pression de fluage nette p_f^* ou la pression limite nette p_{LM}^* .

La qualité d'un essai pressiométrique dépend en premier lieu de la qualité du forage. Dans les matériaux fins, sensibles à l'eau, l'influence de l'eau de forage est manifeste. Il convient de s'assurer que le matériel pour réaliser le forage et l'essai est adapté et que le forage offre une qualité suffisante pour le bon déroulement de l'essai pressiométrique. Des précisions sur les fluides de forage et les boues recommandés ou proscrits au sein de la norme pourraient être bénéfiques à l'obtention d'un forage de bonne qualité.

Les appareils récents de pilotage automatique des essais pressiométriques, comme le PREVO (Jean Lutz), facilitent l'acquisition des valeurs de pressions et de volumes. Cependant, la précision de l'appareil utilisé dans le cadre de cette étude s'avère limitée pour le pas d'augmentation de pression constant de 0,2 bar, les valeurs enregistrées oscillant de $\pm 0,2$ bar pour des pressions faibles par rapport à la consigne donnée par l'opérateur.

7. Remerciements

Les auteurs remercient le projet national ARSCOP et le ministère de la transition écologique et solidaire pour le financement de ce projet de recherche ainsi que leurs collègues Luc Capron, Florian El Hachimi et Francis Lepage, chargés de sondages et d'essais géotechniques in situ au Cerema.

8. Références bibliographiques

- AFNOR (2000). NF P94-110-1 – Sols : reconnaissance et essais – Essai pressiométrique Ménard – Partie 1 – Essai sans cycle, 43 pages.
- AFNOR (2015). NF EN ISO 22476-4 – Reconnaissances et essais géotechniques – Essais en place – Partie 4 : Essai au pressiomètre Ménard, 55 pages.
- CEN (2012). EN ISO 22476-4 – Geotechnical investigation and testing –Field testing– Part 4: Ménard pressuremeter test, 51 pages.
- LCPC (1971). Essai pressiométrique normal, mode opératoire MSI-IS-2. Eds Dunod, Paris, 50 pages.