

MISE EN PLACE D'UN PROTOCOLE DE MESURE DES PETITES DEFORMATIONS : NOUVELLE SONDE PRESSIOMETRIQUE.

IMPLEMENTATION OF A PROTOCOL FOR MEASURING SMALL DEFORMATIONS: NEW PRESSUREMETER PROBE

Soufyane AISSAOUI¹, Philippe REIFFSTECK², Abdeldjalil ZADJAOU¹

¹ Université Abou Bekr Belkaïd, Laboratoire Risk Assessment and Management, Tlemcen, Algérie

² IFSTTAR Paris, 14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes Champs sur Marne, F-77447 Marne la Vallée Cedex 2, France

RÉSUMÉ – Cette communication présente dans un premier temps, la conception, l'étalonnage et la validation d'une nouvelle sonde pressiométrique dotée d'un capteur à effet Hall. Les résultats obtenus lors de test dans une cuve au laboratoire de ce nouvel appareillage seront présentés dans un second temps. Cette démarche aboutira à une courbe de dégradation du module de déformation utile dans la pratique de la géotechnique.

ABSTRACT – This communication first presents the design, calibration and validation of a new pressuremeter probe equipped with a Hall effect sensor. The results obtained during a test in a tank at the laboratory of this new apparatus will be presented in a second time. This approach will lead to a degradation curve of the deformation module useful in the practice of geotechnics.

1. Introduction

Les essais en place ont reçu beaucoup d'attention grâce, d'une part, aux développements importants dans le champ de la mesure, des capteurs, de l'acquisition, du traitement et du stockage de données et d'autre part, à l'évolution des approches théoriques de plus en plus rigoureuses (Schnaid, 2006). Parmi ces essais, on s'intéressera ici au pressiomètre, appareil aujourd'hui couramment utilisé pour la plupart des projets géotechniques dans certains pays, en particulier pour les projets de fondation.

L'essai consiste à dilater une sonde cylindrique dans le terrain, ce qui permet de déterminer une relation pression-déformation à partir de laquelle on déduit les caractéristiques mécaniques du sol nécessaires au calcul des ouvrages (Amar et Jézéquel, 1998). L'essai a été inventé par Kögler vers les années trente (Kögler, 1933), mais ne prendra son essor actuel que sous l'impulsion de Louis Ménard (1955), qui en fait un outil complet avec différentes méthodes de calcul des ouvrages. L'essai pressiométrique est normalisé depuis la fin des années 1960 (LCPC, 1971), dont le mode opératoire actuel est spécifié par la norme française NF EN ISO 22476-4 (AFNOR, 2005), et la norme américaine D 4719 (ASTM, 2000).

L'utilisation au quotidien du pressiomètre par les praticiens a fait naître des idées d'amélioration, Jézéquel et Touzé (1970) déposent un brevet intitulé « sonde foreuse pressiométrique ». Ces auteurs ont tenté, par l'utilisation de l'autoforage, d'éliminer le remaniement dû au forage préalable à l'essai pressiométrique Ménard. Cette technique permet la pénétration de la sonde dans le terrain par désagrégation à l'avancement du sol qui entre à l'intérieur dans la trousse coupante (Baguelin et Jézéquel, 1973). Cette idée émerge également au Royaume-Uni à la même période, à Cambridge. Elle aboutira au

Camkometer avec quelques spécificités concernant d'une part l'élanement, d'autre part le système de mesure de la déformation (Wroth et Hughes, 1972).

D'autres types de pressiomètres fonnés (Full-displacement pressuremeter) ont été développés par Withers et al., 1986. Ils se différencient par leur méthode de mise en place. L'essai consiste à foncer une sonde pressiométrique fixée à un train de tiges terminé par une pointe conique, cet essai cumule donc les informations provenant d'un essai de pénétration statique et d'un essai pressiométrique (Houlsby et Withers, 1988).

Ces derniers développements ont plusieurs défauts : ils sont coûteux et ne peuvent être mis en œuvre dans tous les sols. Une voie d'amélioration alternative est donc de travailler sur la mesure de la déformation à la paroi de la sonde de manière plus précise que par une mesure de volume par burette même instrumentée.

Cette communication comporte le développement d'un nouvel appareillage pressiométrique (une sonde), destinés à fournir une information plus riche au niveau des petites déformations. Cette nouvelle sonde a la particularité d'être équipée d'un palpeur de mesure dans la partie médiane de son corps afin de déterminer des modules initiaux de cisaillement. La méthodologie, l'étalonnage ainsi que la validation des premiers résultats sont présentés.

2. But de l'étude

Les ouvrages géotechniques, souvent dimensionnés par l'utilisation de méthodes analytiques réglementaires et seront de plus en plus étudiés par des méthodes de calcul en déformations, basées sur la Méthode des Éléments Finis permettent de modéliser tout type d'ouvrages. Pour passer au calcul d'un ouvrage, il est nécessaire d'obtenir le bon module de déformation correspondant au comportement de l'ouvrage en service (Nguyen Pham, 2008). Il est également très important de connaître l'évolution du module en petites déformations lorsque les ouvrages sont soumis à des séismes, ou présentent une grande importance (hôpitaux, centrales nucléaires, ouvrages en site urbain,...). La figure 1 présente l'évolution de module de cisaillement en fonction de la gamme de déformation intéressé par la mesure, on note que le module est relativement constant pour les faibles niveaux de déformations, jusqu'à une valeur où il décroît rapidement à sa valeur minimale.

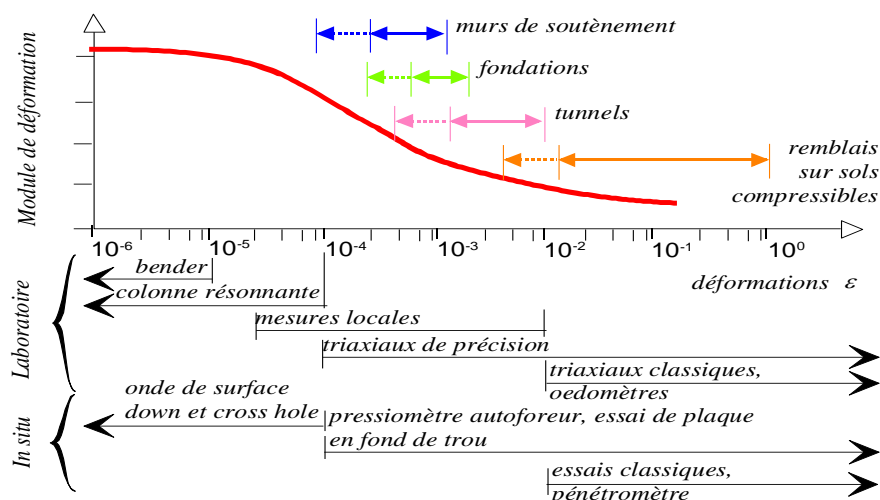


Figure 1. Evolution du module de cisaillement avec la déformation. (Reiffsteck, 2002)

Chaque famille d'appareils a ainsi une plage de travail limitée. Avec le matériel d'essai pressiométrique Ménard, il est possible de calculer des modules dans des zones de déformation de l'ordre de 10⁻² à 10⁻¹. Ainsi donc, un essai d'expansion classique, dans les

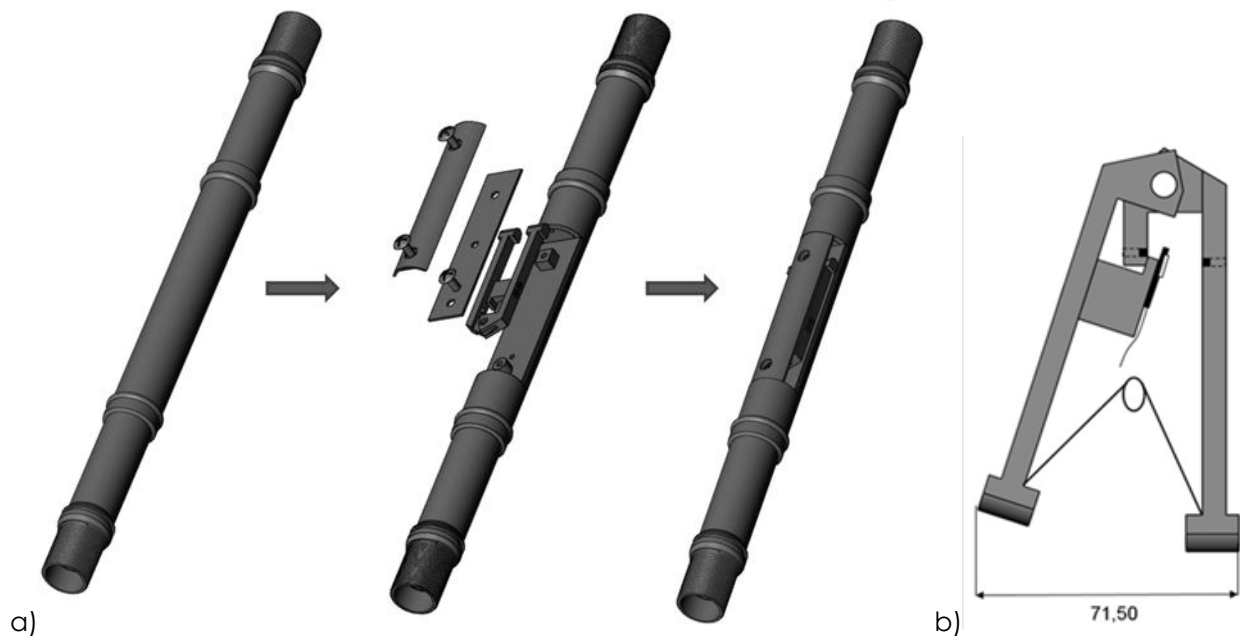
conditions de forages préconisées par la norme et avec le protocole de chargement proposé, ne donne pas de résultats utilisables directement dans une étude de la déformabilité des ouvrages, notamment lorsque la connaissance des modules en petite déformation est nécessaire (Combarieu et Canépa, 2001).

Il ressort de ces constats, un besoin de connaître le comportement des sols en petites déformations, lors d'un chargement exceptionnel ou des sollicitations sismiques. Le but principal des développements que nous avons réalisés, est de répondre à cette attente.

3. Appareillage : développement et conception

Le principe de la modification mécanique du prototype est schématisé sur la figure 2. On utilise une sonde Ménard standard de diamètre 60 mm qui se présente sous la forme de trois cellules cylindriques de section circulaire et de même axe.

Nous avons implanté une platine (système de mesure) à l'intérieur de la cellule centrale de mesure, après avoir découpé une partie de la sonde standard par la suite un nouveau système de mesure a été introduit. Il s'agit d'un palpeur de mesure équipé d'un capteur à effet Hall.



4. Étalonnage du système de mesure

L'étalonnage de la partie électronique de l'appareillage, comprend l'ensemble des opérations qui permettent d'explicitier, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre les valeurs du mesurande et celles de la grandeur électrique de sortie. Un étalonnage est réalisé pour les différents capteurs dont nous aurons besoin afin de fournir un moyen de conversion de la sortie analogique en unités de pression et d'expansion radiale lors d'un essai pressiométrique et de s'assurer du fonctionnement correct du matériel, il comprend :

- un capteur à effet Hall (capteur de déplacement) ;
- un capteur de pression.

4.1. Etalonnage du capteur de déplacement

Les mesures de déplacement de notre sonde utilisent des technologies récentes avec des capteurs à effet Hall pour le déplacement de la membrane. L'intérêt principal de ce type de capteur est de permettre des mesures de position ou de déplacement latéral à travers une paroi non ferromagnétique séparant la sonde de l'objet support de l'aimant. L'étalonnage réalisé dans un premier temps par l'utilisation de deux capteurs de référence différents SS94A1F et SS94A2 pour mettre en évidence l'effet du type de capteur sur les résultats trouvés. La différence entre les deux capteurs est dans la plage d'intensité de champs magnétique mesurable. La figure 3 représente cette influence justifiant cette méthodologie.

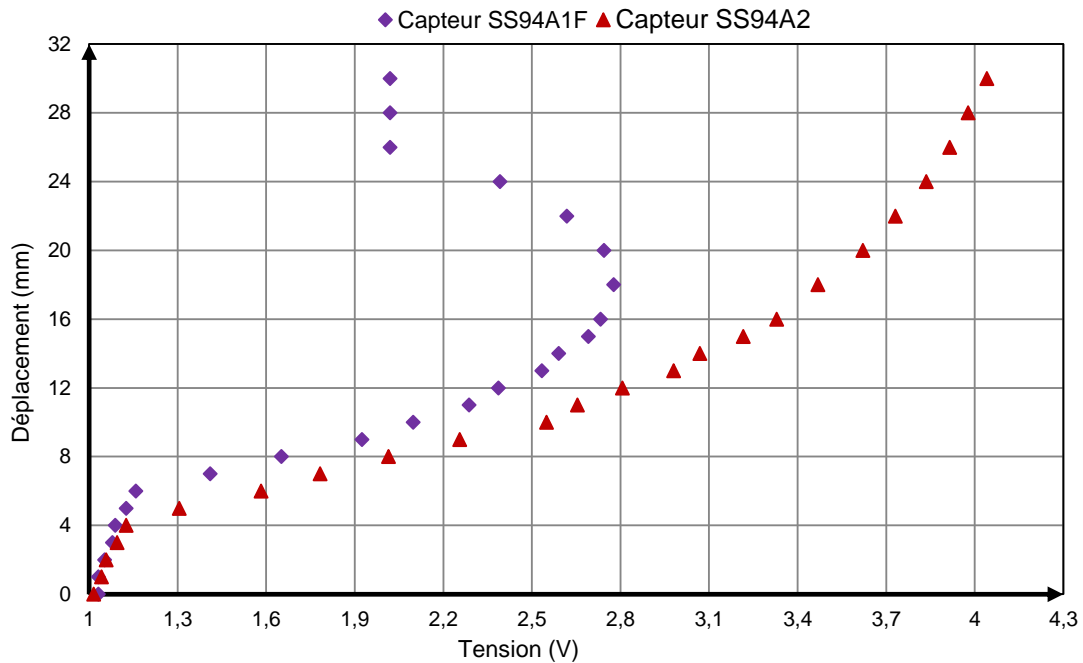


Figure 3. Comparaison entre capteur SS94A1F et SS94A2.

Bien que les deux capteurs n'aient pas exactement la même tension imposée les remarques suivantes ont été relevées :

- 1) Le capteur SS94A1F ne fonctionne plus correctement à partir de déplacement supérieur à 18 mm, faute de non détection de champs magnétique. Ce qui explique le non possibilité de mesure au-delà de cette valeur de déplacement du palpeur ;
- 2) Le capteur SS94A2 donne des variations des déplacements jusqu'à 30 mm en cohérence avec la détection de champs magnétique.

Par voie de conséquence, et dans le but d'atteindre une course maximale de mesure nous avons opté pour le deuxième modèle de capteur de référence SS94A2.

4.2 Etalonnage du capteur de pression

La recherche d'une bonne précision dans les mesures a porté essentiellement sur la mesure de la pression appliquée à la sonde, pour cela un capteur électrique de marque KELLER, a remplacé les manomètres à lames utilisés habituellement, et qui a pour fonction d'acquérir la pression et de transmettre cette information à un enregistreur. (Figure 4).

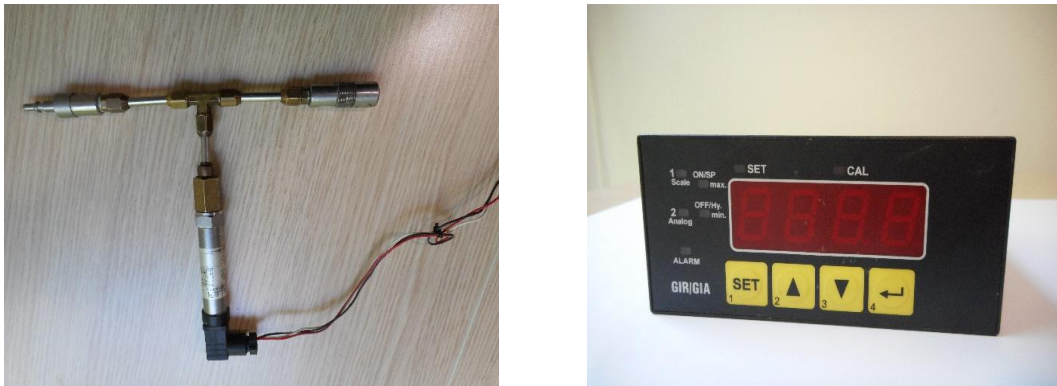


Figure 4. Capteur de pression KELLER utilisé et régulateur numérique EV-06

La procédure d'étalonnage du capteur de pression est la même que celle utilisée pour le capteur à effet Hall. On applique des valeurs de pression maintenues constantes pendant 30s et on mesure la tension correspondante à chaque valeur de pression, avec l'indicateur EV-06 et le logiciel d'acquisition des données, l'étalonnage préliminaire du capteur de pression a été effectué à l'aide d'un capteur de référence.

Les résultats de l'étalonnage sont résumés dans la figure 5 avec l'équation de la droite obtenue par régression linéaire. On observe une variation linéaire de la tension en fonction de la pression appliquée selon l'équation indiquée sur la figure avec un coefficient de régression de 0,9974. Nous avons refait l'essai trois fois, et les résultats obtenus semblent cohérents et satisfaisants dans le cadre d'un test d'étalonnage.

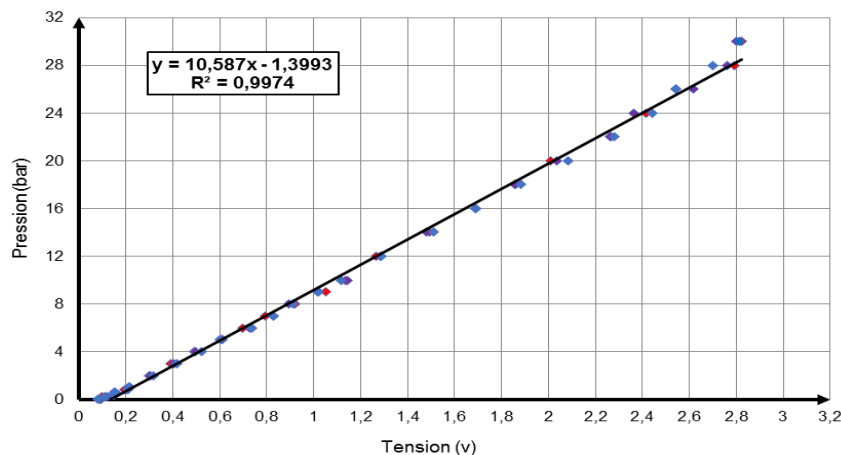


Figure 5. Courbe d'étalonnage du capteur de pression.

Comme on le constate sur la courbe d'étalonnage, l'abscisse à l'origine, c'est-à-dire l'indication donnée pour une pression nulle est égale à 0,08V qui correspond à la pression atmosphérique.

5. Validation et résultats obtenus

Le programme expérimental consiste à faire des essais de validation afin de tester les limites de l'appareillage développé et vérifier son fonctionnement. Pour ce faire nous avons réalisé de multiples essais sur une cuve de sable dans le laboratoire de l'IFSTTAR à Paris en France. Pour des raisons purement expérimentales (simplicité, maîtrise, homogénéité), nous avons opté pour l'utilisation d'un matériau sableux de comportement et de caractéristiques connus dans un fût métallique (diamètre 58,5 cm) de telle manière que le prototype simule les conditions réelles de l'essai (Figure 6).

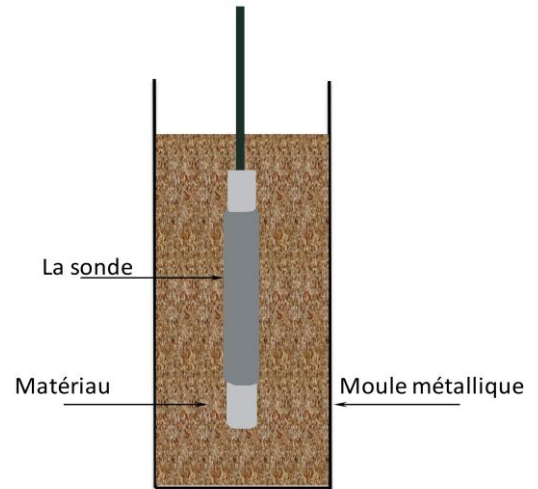


Figure 6. Vue générale du poste de travail.

Différents types d'essais ont été réalisés sur la cuve de sable (sable lâche, sable dense), des essais monotones, des essais cycliques et des essais multi cycles. L'ensemble de ces essais sont réalisés avec un contrôleur pression volume Jean Lutz.

On présente à titre d'exemple quelques résultats d'essais monotones réalisés sur un sable dense (courbes brutes et corrigées), puis l'évaluation du module de cisaillement par la sonde proposée.

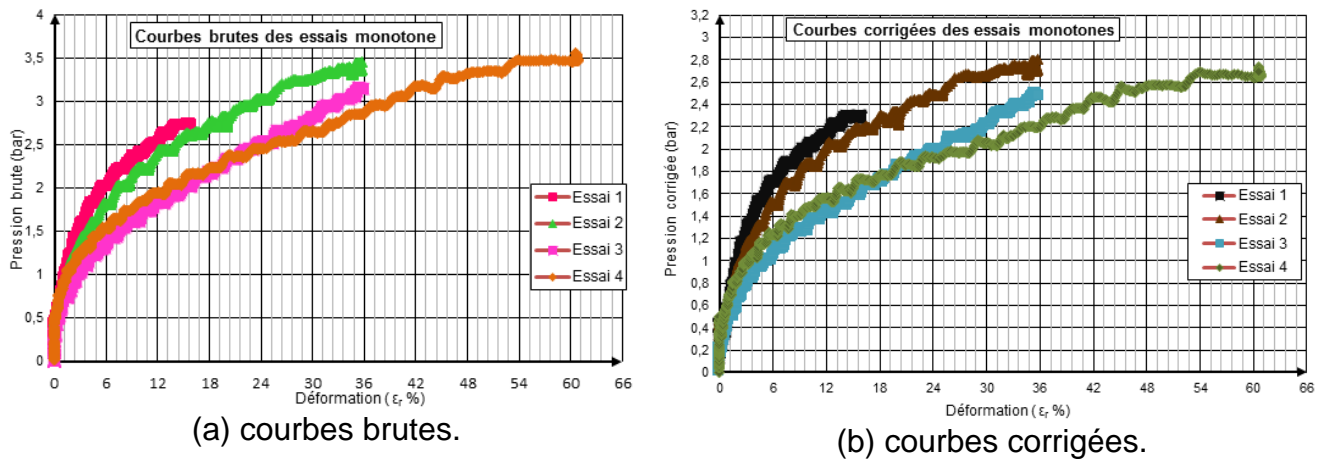


Figure 7. Résultats des essais monotones sur le sable dense.

A partir de ces résultats, on peut déterminer les valeurs de module de cisaillement (G) et sa dégradation en fonction de la déformation. Dans ce type d'essai, on mesure directement le module de cisaillement G du sol. Il s'exprime par l'expression suivante :

$$G = \Delta p / \varepsilon_r \text{ et } \varepsilon_r = \Delta R / R_0 \quad (1)$$

Comme il est schématisé sur la figure 8, on constate que la dégradation du module de cisaillement pour les essais monotone réalisées montre une valeur maximale du module autour de 10^{-4} de déformation, après il décroît jusqu'à sa valeur minimale.

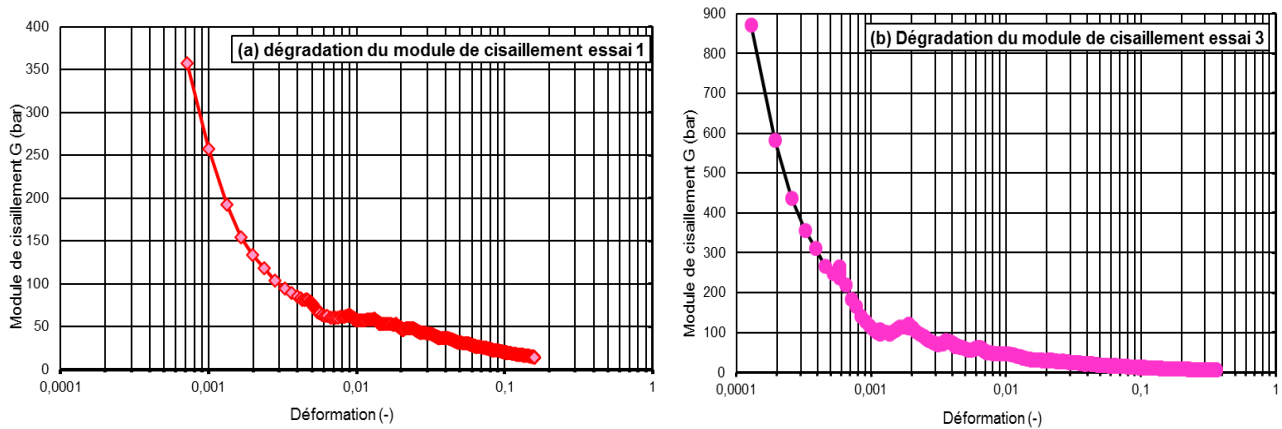


Figure 8. Résultats de dégradation du module de cisaillement.

Ce résultat très encourageant ne peut être obtenu avec la sonde Ménard classique. Nous enregistrons donc une gamme élargie de mesure compatible avec l'objectif recherché ici. Bien que ces essais soient réalisés au laboratoire, nous avons pu analyser la puissance, la qualité, la performance ainsi que les insuffisances de notre appareillage.

Afin de mettre en exergue la qualité de cette expérimentation de validation ; des essais au laboratoire triaxial cyclique, et colonne résonante seront effectués en même temps. L'intersection, l'exploitation et la comparaison de l'ensemble des tests montre l'apport des modifications effectuées sur l'appareillage. Les études en cours montreront si cette démarche est bonne et précisant son apport dans le cadre d'une bonne évaluation de dégradation de module de déformation.

6. Conclusions

Dans cette communication nous avons pu faire une présentation détaillée sur la conception, la fabrication et l'exploitation d'une nouvelle sonde pressiométrique récemment construite à l'université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, qui contribue à une meilleure connaissance des sols notamment dans le domaine des petites déformations lors d'une sollicitation sismique.

La sonde développée est significativement différente de la sonde classique Ménard notamment par un système de mesure de la déformation radiale de la membrane qui utilise un palpeur équipé d'un capteur à effet Hall au lieu de déduire les déplacements à partir des variations de volume d'un fluide.

D'après les résultats d'essais menés avec la sonde développée, les courbes expérimentales obtenues valident la faisabilité de l'appareil. D'après les courbes de dégradation du module de cisaillement obtenues sur le sable dense, il nous apparaît que la nouvelle sonde pressiométrique permet de caractériser les sols et la détermination de la dégradation du module de cisaillement allant des faibles taux de déformations à des moyens voire des grandes déformations.

Des études complémentaires in-situ vont être réalisées pour montrer la place que peut prendre cet appareillage pour l'identification des sols et la caractérisation de leur comportement en petites déformations en contexte sismique.

7. Références bibliographiques

AFNOR (2000). Essai pressiométrique Ménard – Partie 1 – Essai sans cycle. Norme NF P94-110-1, Reconnaissance et essais, pp. 43.

- Amar S., Jézéquel J.F. (1998). Propriétés mécaniques des sols déterminées en place. Techniques de l'ingénieur, construction 1 (C220), 1-24.
- ASTM (2000). Standard Test Method for Pressuremeter Testing in Soils. Annual book of ASTM standards, D4719-87.
- Baguelin F.J., Jézéquel J.F. (1973). Le pressiomètre autoforeur. Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, supplément N°. 307-308, série sols et fondations N°. 97, pp. 133-160.
- Combarieu O., Canépa Y. (2001). L'essai cyclique au pressiomètre. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°. 233, pp. 37-65. BLPC (France).
- Houlsby G.T., Withers N.J. (1988). Analysis of the cone pressuremeter test in clay. Geotechnique Vol. 38, N°. 4, pp. 575-587.
- Jézéquel J.F., Touzé J. (1970). Sonde foreuse pressiométrique. Brevet d'invention N°.1.596.747, 5 pages.
- Kögler F. (1933). Baugrunprüfung im Borloch. Der Bauingenieur, Berlin Heft N°. 19/20.
- LCPC (1971). Mode opératoire de l'essai pressiométrique normal. Edition Dunod, 52 pages.
- Ménard L. (1955). Pressiomètre. Brevet d'invention N°. 1.117.983, 3 pages.
- Nguyen Pham P.T. (2008). Etude en place et au laboratoire du comportement en petites déformations des sols argileux naturels. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 233 pages
- Reiffsteck Ph. (2002). Nouvelles technologies d'essai en mécanique des sols : état de l'art. Symposium International : identification et détermination des paramètres des sols et des roches pour les calculs géotechniques, PARAM2002, pp. 201-242.
- Schnaid F. (2006). Geo-characterisation and properties of natural soils by in situ tests. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. pp. 3-45. doi:10.3233/978-1-61499-656-9-3.
- Withers N.J., Schaap L.H.J., Dalton C.P. (1986). The development of a full displacement pressuremeter. 2nd International Symposium on Pressuremeter and its Marine Applications. Briaud et Audibert (Eds), ASTM STP 950, Texas, USA, pp. 38-56.
- Wroth C.P., Hughes J.M.O. (1972). An instrument for the in-situ measurement of the properties of soft clays. Report of department of engineering, University of Cambridge, CUED/C, Soils TR13, 29 pages.