

Développement et conception d'un pressiomètre de nouvelle génération pour une caractérisation améliorée des sols

Soufyane Aissaoui^{1,2}

¹ Université Abou Bekr Belkaid, Département de génie civil. 22 rue Abi Ayed BP 119 Tlemcen, Algérie.

² Université Gustave Eiffel - IFSTTAR, Sols Roches et Ouvrages géotechniques, 14-20, boulevard Newton, 77447 Marne la Vallée cedex 2, Paris, France. aissaouisoufyane@yahoo.fr

RESUME L'étude du comportement en déformation des sols, à l'origine de nombreuses pathologies d'ouvrages sous chargement statique ou dynamique. La maintenance de ces ouvrages à un niveau de service suffisant est, pour l'économie, la production d'énergie, l'industrie et le tourisme de nombreux pays ou territoire, vitale. Caractériser ce phénomène reste difficile en l'absence d'outils expérimentaux adéquats qui permettraient de définir correctement l'évolution des propriétés mécaniques. Cet article présente une contribution dans ce sens. Il présente un nouvel équipement de pressiométrie qui bénéficie de nombreuses avancées technologiques par rapport aux appareillages existants. Cette proposition a été appliquée à titre exploratoire aux données d'un site réel en France. Les auteurs montrent les résultats préliminaires des essais pressiométriques cycliques réalisés en chambre d'étalonnage en laboratoire. Une interprétation de base des résultats indique que l'appareil développé est capable de fournir des informations contrainte-déformation de haute qualité. La mise en œuvre s'en trouve simplifiée ; la fiabilité en opération et le contrôle qualité des essais sont nettement améliorés.

Mots-clefs Pressiomètre, développement, séisme, essais, in-situ

I. INTRODUCTION

Les paramètres mécaniques des sols peuvent être déterminés en laboratoire, sur des éprouvettes prélevées sur le terrain, ou directement en place, au moyen d'essais d'expansion ou de pénétration. Actuellement, les essais en place sont préférés par les praticiens et sont réalisés systématiquement lors d'une étude géotechnique. Les développements récents du génie civil créent de multiples problèmes d'interaction entre structures et sols, à l'occasion notamment de la construction de grands ouvrages dans les villes et leur sous-sol (Borel et Reiffsteck, 2006). Les interactions entre sols et ouvrages sont essentiellement des problèmes de compatibilité de déformations, que l'on ne peut traiter de façon fiable qu'en connaissant la déformabilité des différents sols à de faibles niveaux de déformations (Aissaoui et al., 2021). Pour passer à la maîtrise directe des déformations des sols et des ouvrages et de leurs interactions, de nombreuses recherches ont été menées sur la mise au point de nouveaux dispositifs de contrôle des sols in

situ, citons les travaux de (Reiffsteck et Borel, 2002 ; Reiffsteck et al., 2005 ; Thorel et al., 2007 ; Johnston et al., 2013 ; Shaban et Cosentino, 2017 ; Aissaoui et al., 2020) etc.

Pour progresser dans l'estimation de la déformabilité des sols, il a semblé judicieux d'approfondir la voie des essais in situ, d'autant plus que ces essais occupent actuellement une place prépondérante dans les études géotechniques courantes. Parmi ceux-ci, l'essai pressiométrique est l'outil d'investigations des sols in situ le plus utilisé dans le monde, pour le calcul et l'optimisation des fondations.

Plusieurs travaux ont contribué au développement de cet essai et à populariser son usage, Jézéquel et Touzé (1970) déposent un brevet intitulé « sonde foreuse pressiométrique », ces auteurs ont tenté d'éliminer le remaniement dû au forage préalable à l'essai pressiométrique Ménard par l'utilisation de l'autoforage. 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'élançement, d'autre part le système de mesure de la déformation (Wroth et Hughes, 1972). D'autres types de pressiomètres à cône ont été développés ultérieurement, Briaud et Shields (1979) à l'université d'Ottawa ont fait la première intention de développer une sonde mono cellulaire mis en place par battage, ou vérinage dans le sol, pour la caractérisation des chaussées, des routes et aéroports (the pavement pressuremeter). Avec l'intérêt croissant pour la conception offshore et le besoin conséquent d'obtenir de bonnes mesures des propriétés in-situ des argiles offshore, Reid et al. (1982) ont développés un pressiomètre placé par refoulement (Push-In pressuremeter). Ensuite en (1986) Withers et al. dans l'Angleterre ont développés le pressiomètre à déplacement total (Full-displacement pressuremeter).

Cependant, 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 burette même instrumentée. Une discussion détaillée sur le développement d'une nouvelle génération d'appareil pressiométrique, destinés à fournir une information plus riche au niveau des petites déformations sera fournie dans cette recherche.

II. DEVELOPPEMENT ET CONCEPTION

A. *Modèle de conception développé*

Le principe de la conception du nouvel appareillage développé est schématisé sur la figure 1(a). C'est un pressiomètre récemment confectionné et fabriqué à l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR - Paris). Contrairement aux pressiomètres classiques, ce nouvel appareillage pressiométrique utilise un système pneumatique plutôt qu'un système hydraulique. En d'autres termes, la pression cellulaire est appliquée au moyen d'une membrane remplie d'air et la déformation radiale du sol est mesurée directement à l'aide d'un palpeur de mesure au lieu de déduire les déplacements à partir des variations de volume d'un fluide (Aissaoui et al., 2021).

Nous avons implanté une platine d'essai à l'intérieur au niveau de la cellule centrale de mesure, et un nouveau système de mesure de la déformation du sol qu'est un palpeur équipé d'un capteur

à effet hall est installé. Le but de ce dernier est de contrôler et suivre l'expansion de la membrane lors de la réalisation d'un essai pressiométrique. La zone a découpé au niveau de la cellule centrale de mesure est montrée sur la figure 1(b). Cette zone est étanche permettant de conserver le circuit de gaz.

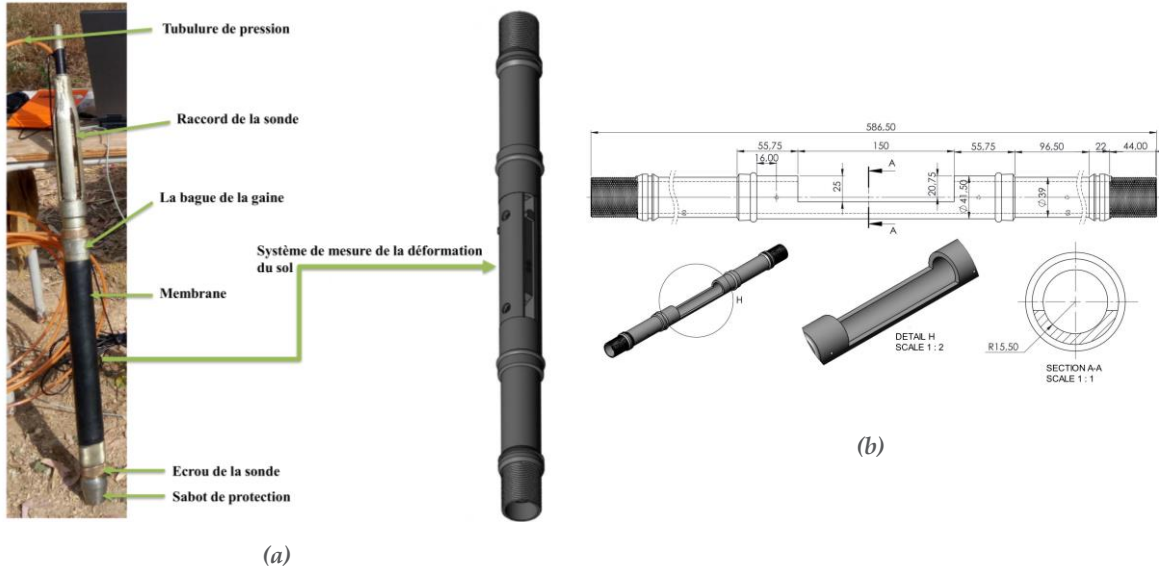


FIGURE 1. (a) Principe de conception de prototype proposé ; (b) Illustration de la zone de mesure (Aissaoui et al., 2021)

Le diamètre au niveau de la cellule centrale est de 41.5 mm donc nous avons découpé jusqu'à une profondeur $h=25$ mm comme il est indiqué dans la figure 1(b), cette distance nous a permis d'installer d'une manière très pratique le nouveau système de mesure (Figure 2(a)).

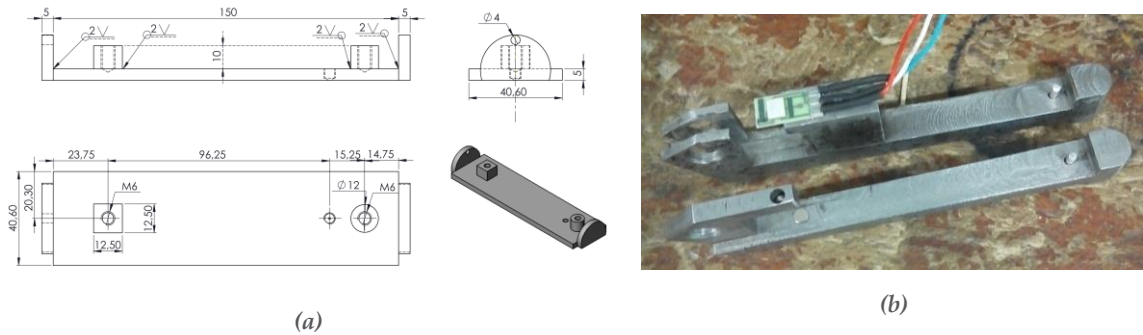


FIGURE 2. (a) Les caractéristiques géométriques de la plaque d'essai ; (b) Palpeur de mesure de la déformation du sol (Aissaoui et al., 2021)

B. Système de mesure de la déformation

Le dispositif utilisé pour mesurer et contrôler de la déformation du sol lors d'un essai pressiométrique est un palpeur de mesure (figure 2(b)). Ce dernier est fabriqué en acier inoxydable. Il est composé de deux bras et un siège pour capteur à effet Hall. A la position initiale

(pas d'expansion de la membrane), la distance entre les extrémités extérieures des deux bras (haut et bas) du palpeur de mesure est la même que celle du diamètre intérieur de la sonde (soit 41,5 mm). Les bras peuvent s'éloigner radialement à partir de 41,5 mm à un maximum de 71,5 mm.

III. VALIDATION ET RESULTATS OBTENUS

Le programme de validation des capacités de mesure de cet équipement s'est déroulé en chambre d'étalonnage en laboratoire. La première étape a consisté à réaliser des essais dans des conditions entièrement contrôlées. Des dispositifs d'étalonnage spécifiques ont été développés pour aider à évaluer l'adéquation de l'appareillage pour évaluer les déformations et les variations de la pression dans la cavité. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de sol sableux de la Seine (France), dans un massif artificiel assimilé à un massif in situ (moule métallique).

A. Protocole de mesure et préparation des échantillons

Le principe de l'essai consiste à mesurer la déformation du sol lors de l'application de cycles de pression. L'idée étant de pouvoir mesurer la déformation radiale du sol en fonction des cycles en utilisant un palpeur équipé d'un capteur à effet Hall au lieu de déduire les déplacements à partir des variations de volume d'un fluide (figure 3).

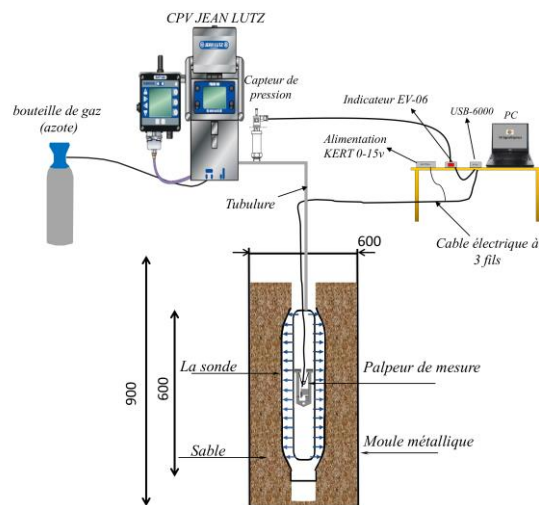


FIGURE 3. Architectures physique de l'appareillage développé

Des essais pénétrométriques avec PANDA 3® Labo (Pénétrömètre autonome numérique dynamique assisté par ordinateur) sont réalisés avant chaque essai avec le pressiomètre développé. L'objectif est la confection des éprouvettes de sol qui garantissent une homogénéité dans le sens de densité relative (confection des éprouvettes à densité relative constante), cette dernière est nécessaire pour contrôler en toute rigueur la pertinence, la faisabilité et la répétitivité de l'appareil développé (Figure 4(a)).

B. Résultats et discussions

Les pénétrogrammes de la figure 4(b) montrent à première vue que le sol mis en œuvre au laboratoire est relativement bien confectionné ce qui indique une bonne homogénéité du sable

puisque les valeurs de la résistance de pointe sont pratiquement les mêmes. Ces résultats montrent que le facteur homogénéité est assuré pour l'ensemble des tests pressiométriques effectués. Ces résultats permettent d'assurer que les conditions initiales identiques sont assurées pour l'ensemble des tests pressiométriques effectués pour contrôler en toute rigueur la répétabilité et la reproductibilité des mesures et donc la qualité de la mesure obtenue avec le pressiomètre développé.

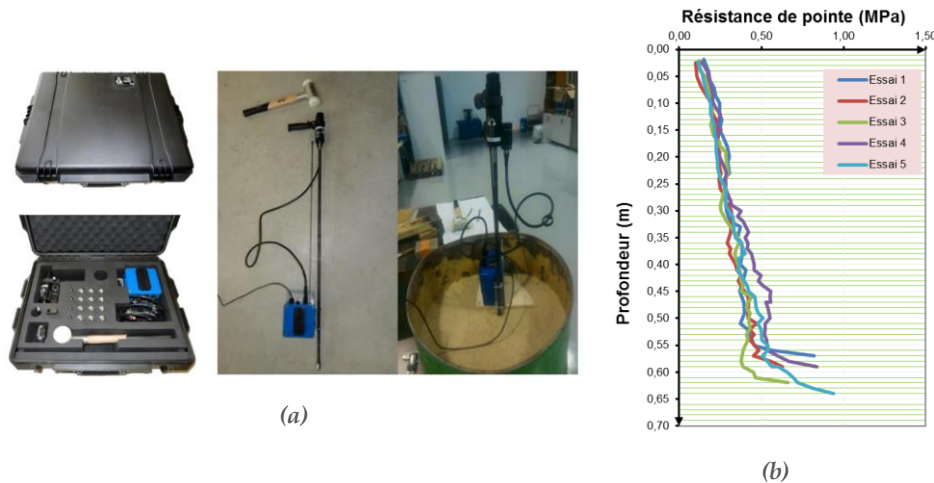


FIGURE 4. (a) PANDA 3® Labo : vue d'ensemble ; (b) Pénétrogramme obtenu par le PANDA 3

Dans un premier temps des essais pressiométriques ont été réalisés sur la cuve de sable en conformité avec la norme Européenne NF EN ISO 22476-4. Les essais ont été réalisés avec des incréments de pression identiques d'environ 10 kPa ; il est à noter que chaque pression doit être maintenue pendant une période de 60 s conformément à la norme. Pour chaque essai, la pression appliquée (p_r) et le déplacement de la membrane (ΔR) pendant l'expansion ont été enregistrés en temps réel. Les résultats des essais monotones sont présents dans la figure 5(a). Une première constatation est que les résultats obtenus montrent une bonne cohérence avec la théorie dans le cas d'un chargement monotone. Aucun problème de répétabilité et reproductibilité de l'appareil développé ne se pose dans l'ensemble de planning expérimental.

Par la suite, des essais multi-cycles sont effectués avec le même appareillage sur la cuve de sable, afin de tester le matériel préconisé et d'analyser la réponse du sol sous de telles sollicitations par la méthode préconisée. La pression dans la cavité varie suivant un signal sinusoïdal comme le suggère Aissaoui et al. (2018). La variable qui change lors des essais est la pression de demi-amplitude ΔP_{cyc} , elle est choisie selon le rapport de sollicitation cyclique. Le chargement cyclique peut être alterné, ou non alterné, si la grandeur asservie ne change pas de signe au cours de la sollicitation. Les différents cas de chargement testés sont représentés dans la figure 5(b).

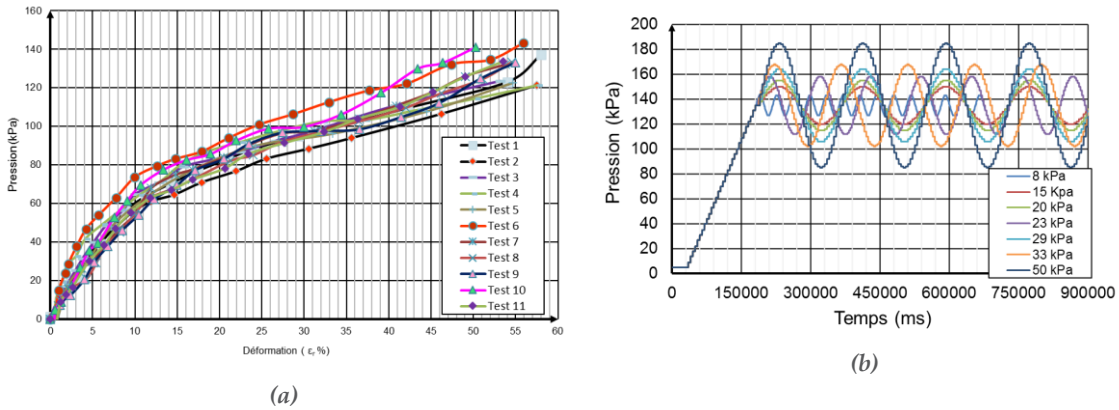


FIGURE 5. (a) Résultats des essais monotones selon la norme NF EN ISO 22476-4 ; (b) Consigne de chargement cyclique pour multiple valeurs de ΔP_{cyc}

On peut remarquer que lorsqu’il s’agit des petits cycles de chargement, comme par exemple dans le cas d’une demi-amplitude égale à 8 kPa, il est difficile d’identifier les boucles dans l’évolution de la pression en fonction de la déformation radiale. Cette dernière ne représente presque pas des cycles comme le montre la figure 6. Par contre quand il s’agit des cycles relativement élevés, comme dans le cas d’une demi-amplitude égale à 50 kPa, on enregistre clairement les boucles dans les deux présentations graphiques (figure 7).

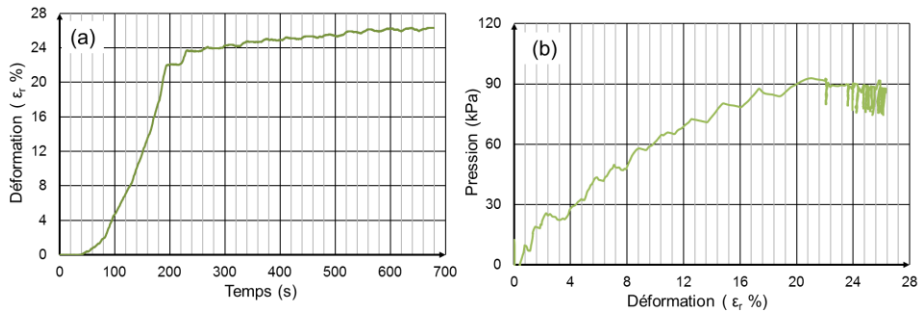


FIGURE 6. (a) Courbe de la variation de déformation au cours du temps ; (b) Courbe pression-déformation pour la demi-amplitude 8 kPa

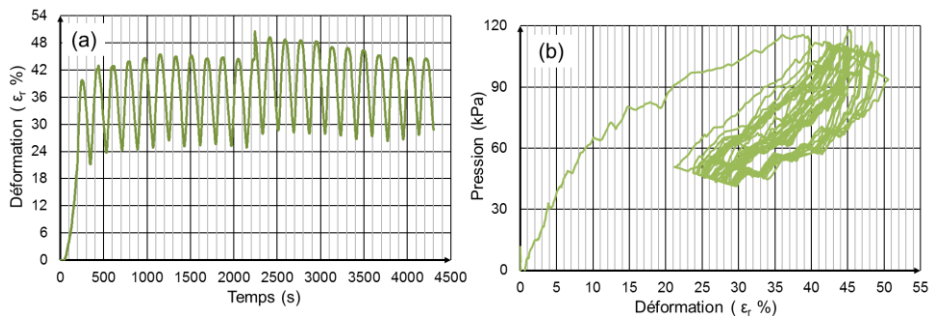


FIGURE 7. (a) Courbe de la variation de déformation au cours du temps ; (b) Courbe pression-déformation pour la demi-amplitude 50 kPa

Les résultats des pressions brutes et corrigées en fonction de la déformation sont représentés sur les figures 8. Nous pouvons dire à la vue des essais réalisés que les résultats trouvés ont montré le bon fonctionnement de l'appareillage développé et permettre de réaliser des essais multi cycliques dans des conditions maîtrisées. Cependant, certaines difficultés subsistent toujours entre autre le bruit des signaux enregistrés, cette difficulté est en relation directe avec le système d'acquisition. Il ressort pour l'ensemble des essais effectués une partie monotone qui s'étale de zéro jusqu'à la pression de fluage non corrigée théoriquement, suivie d'une phase cyclique qui se manifeste autant que le nombre des cycles autour de la demi amplitude choisie.

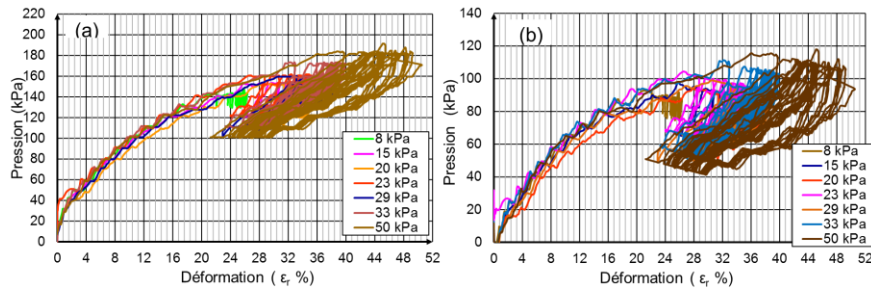


FIGURE 8. Résultats des essais multi-cycles. (a) Courbe brutes ; (b) Courbe corrigées

IV. CONCLUSIONS

Cet article présente des détails sur la conception, la fabrication et l'exploitation d'un nouvel appareil pressiométrique qui contribue à une meilleure connaissance des sols notamment dans le domaine des petites déformations et la caractérisation de la réponse du sol sous chargement cyclique. Des essais multi-cycles ont été réalisés dans de bonnes conditions en cohérence avec les pratiques de l'ingénieur dans ce domaine. Ceci montre la pertinence et la performance de l'appareil développé, cette confirmation est pleinement justifiée par les essais d'expansions cycliques allure, tendance et intervalle de mesure.

On a pu observer la réponse du comportement du sol lors de l'application d'expansions cycliques, le pressiomètre développé permet d'établir les paramètres quantifiant le comportement d'un sol soumis à un chargement cyclique et un dimensionnement économique des ouvrages. Les travaux en cours montreront par la suite la place que peut prendre cet appareillage pour l'identification et la caractérisation des sols en contexte sismique.

REFERENCES

Aissaoui, S., Zadjou, A., Reiffsteck, P. (2018). Cyclic Tests with a New Pressuremeter Apparatus. In Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering (pp. 663-667). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97112-4_148

Aissaoui, S., Zadjou, A., Reiffsteck, P. (2020). Contribution of modification of a pressuremeter for an effective prediction of soil deformability. Geomechanics and Engineering, 23(4), 381-392. <http://dx.doi.org/10.12989/gae.2020.23.4.381>

Aissaoui, S., Zadjou, A., Reiffsteck, P. (2021). A new protocol for measuring small strains with a pressuremeter probe : Development, design, and initial testing. *Measurement*, 169, 108507. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108507>

Borel, S., Reiffsteck, Ph. (2006). Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. *Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, série géotechnique*, 132 pages.

Briaud, J.L., Shields, D.H. (1979). A Special Pressuremeter and Pressuremeter Test for Pavement Evaluation and Design. *Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol.2, N03*, pp. 143-151. <https://doi.org/10.1520/GTJ10446J>

Jézéquel, J.F., Touzé, J. (1970). Sonde foreuse pressiométrique. Brevet d'invention No. 1.596.747, 5 pages.

Johnston, G., Doherty, J., Lehane, B. (2013). Development of a laboratory-scale pressuremeter. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 13(1), pp. 31–37. <https://doi.org/10.1680/ijpmsg.12.00011>

Reid, W.M., John, H.D., Fyffe, S., Rigden, W.J. (1982). The Push-In Pressuremeter. *Proceedings of the Symposium on the Pressuremeter and Its Marine Applications, Editions Technip, Paris*. pp. 247-261.

Reiffsteck, Ph., Borel, S. (2002). Proposition d'une nouvelle technique d'essai en place : l'appareil triaxial in situ, *Symposium international Identification et détermination des paramètres des sols et des roches pour les calculs géotechniques PARAM 2002, Presses de l'ENPC / LCPC, Paris*, pp. 295-302.

Reiffsteck, Ph., Reverdy, G., Vincelas, G., Sagnard, N. (2005). Pressiomètre autoforeur de nouvelle génération-PAF2000. *Symp. Int. ISP5-PRESSIO2005, 50 ans de pressiomètres, Gambin et al. (eds.), vol. 1, Presses de l'ENPC/LCPC*, pp. 113-126.

Shaban, A.M., Cosentino, P.J. (2017). Development of the Miniaturized Pressuremeter Test to Evaluate Unbound Pavement Layers. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 45, No. 2, pp. 521–533. <https://doi.org/10.1520/JTE20150322>

Thorel, L., Gaudin, C., Rault, G., Garnier, J., Favraud, C. (2007). A cone pressuremeter for soil characterisation in the centrifuge. *International Journal for Physical Modelling in Geotechnics* 7(1), pp. 25–32. <https://doi.org/10.1680/ijpmsg.2007.070103>

Withers, N.J., Schaap, L.H.J., Dalton, C.P. (1986). The development of a full displacement pressuremeter. *International Symposium on Pressuremeter and its Marine Applications, Briaud et Audibert (Eds), ASTM STP 950, Texan*, 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 departement of engineering, University of cambridge, CUED/C, Soils TR13*, 29 pages.