

Etude de l'expansion de cavité cylindrique dans la vase de Tunis

Study of the expansion of cylindrical cavity in Tunis soft soil

Marwa BEN KHALIFA¹, Zeineb BEN SALEM², Wissem FRIKHA³

¹Univ. de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, LR14ES03-Ingénierie Géotechnique, BP 37 Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisia

²Univ. de Carthage, Institut Supérieur des Technologies de l'Environnement de l'Urbanisme et de Bâtiment, 2 Rue de l'Artisanat Charguia 2 - 2035 Tunis, Tunisia.

³Univ. de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, LR14ES03-Ingénierie Géotechnique, BP 37 Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisia,

Setec International 42-52 Quai de la Rapée Central Seine Building 75583 Paris Cedex 12. France

Corresponding author: maroua.benkhalifa@gmail.com

ABSTRACT

L'essai pressiométrique est un essai in situ largement utilisé pour caractériser les propriétés mécaniques des sols. Il repose sur l'expansion radiale contrôlée d'une sonde insérée dans un forage préalablement réalisé, permettant ainsi de mesurer la relation contrainte-déformation du sol. Ce travail présente une étude expérimentale au laboratoire de la réponse de la vase de Tunis à l'expansion d'une cavité cylindrique. Un dispositif expérimental a été conçu et élaboré pour exercer une pression contrôlée radialement sur un échantillon reconstitué du sol. Les résultats de variation de volume injecté dans la sonde d'expansion en fonction de la pression appliquée sont analysés et comparés à des résultats des essais pressiométriques insitu de la vase de Tunis. On s'est intéressé également à l'analyse du phénomène de consolidation qui est générée suite à l'application de l'expansion de cavité grâce à un système d'acquisition permettant d'enregistrer le tassement du sol en fonction du temps. Ces résultats expérimentaux sont interprétés et comparés à des résultats numériques de la résolution de l'équation de consolidation résultant de l'expansion de cavité par différences finies (FDM).

RESUME

The pressuremeter test is a widely used in situ method to characterize the mechanical properties of soils. It is based on the controlled radial expansion of a probe inserted into a pre-drilled borehole, allowing for the measurement of the stress-strain relationship of the soil. This paper presents an experimental study evaluating the cylindrical cavity expansion in Tunis soft soil. The results of volume variation injected into the expansion cell with the applied pressure were compared to the in situ pressuremeter test results conducted in Tunis soft soil. Analysis of the consolidation phenomenon that occurs after the cylindrical cavity expansion was undertaken. The consolidation equation resulting from the expansion was solved numerically using the Finite Difference Method (FDM) and compared to the experimental results obtained.

Keywords: Expansion de cavité cylindrique; essai pressiométrique; vase de Tunis, consolidation.

1. Introduction

Les essais in situ occupent une place importante dans la reconnaissance et la détermination des propriétés mécaniques des sols. Parmi eux, on cite l'essai pressiométrique qui a été inventé et développé par Ménard en 1957 (Ménard 1957). Il est largement utilisé dans de nombreux pays pour le dimensionnement des ouvrages géotechniques (Baguelin et al. 1978; Baker 2005; Briaud 1992;

Ménard 1965). Cet essai permet d'obtenir la résistance limite (P_l), la pression de fluage (P_f) et le module de déformation (E_M) du sol en profondeur. Le principe de l'essai repose sur l'introduction d'une sonde cylindrique équipée d'une membrane flexible expansible radialement dans un forage préalable. Une expansion progressive par paliers de chargement (pressions) est ensuite effectuée tout en mesurant la variation du volume injecté.

La détermination des caractéristiques mécaniques du sol à partir des essais pressiométriques repose sur l'utilisation de la théorie d'expansion de cavité cylindrique (Bouassida and Frikha 2007; Houlsby and Carter 1993; Palmer 1972). En effet, différents types de dispositifs ont été élaborés afin d'analyser en laboratoire la réponse d'un sol à l'expansion d'une cavité (Wang 2010).

Dans le présent papier, une étude expérimentale a été menée au laboratoire pour laquelle un dispositif expérimental a été conçu permettant la mise en pression dans une éprouvette de sol mou à travers une cavité cylindrique. Cette cavité doit être capable d'exercer sur le sol un déplacement horizontal contrôlé.

Cette étude de l'expansion de cavité a été réalisée sur la vase de Tunis prélevée du lac II à une profondeur de 5m. La sollicitation d'expansion de cavité est appliquée suite à une phase de préchargement par palier sur l'échantillon reconstitué. Les résultats de variation de volume injecté dans la sonde d'expansion en fonction de la pression appliquée sont analysés et comparés à des résultats des essais pressiométriques insitu de la vase de Tunis. Dans le présent travail, on s'est intéressé également à l'analyse du phénomène de consolidation qui est générée suite à l'application de l'expansion de cavité grâce à un système d'acquisition permettant d'enregistrer le tassement du sol en fonction du temps. Ces résultats expérimentaux sont interprétés et comparés à des résultats numériques de la résolution de l'équation de consolidation résultant de l'expansion de cavité par différences finies (FDM) (Ben khalifa et al. 2022).

2. Prototype expérimental

2.1. Caractérisation et préparation de l'échantillon du sol

Le sol utilisé pour cette étude expérimentale est la vase de Tunis extraite du lac II à une profondeur de 5 m.

L'échantillon extrait a une couleur verte grisâtre avec une odeur caractéristique et contient des coquilles. L'identification de ce sol a été effectuée au laboratoire. Les résultats des essais effectués sur l'échantillon du sol sont présentés dans le tableau 1.

Tab 1. Propriétés du sol étudié en laboratoire

	γ (kN/m ³)	Analyse granulométrique			Limites d'Atterberg (%)		Teneur en carbonate de Calcium (%)	Teneur en matière organique (%)
Sol étudié au laboratoire	18	%>5 mm	%<2m	%<8m	ω_l (%)	I_p (%)	45	3.8
		0	92	89	34	17		

La reconstitution de la vase est une phase primordiale en vue d'obtenir un échantillon homogène

après élimination des débris de coquillages (Bouassida 1996). En effet, la reconstitution consiste tout d'abord à tamiser le sol sous l'eau au tamis 100 μ m. La seconde étape est celle de séchage à l'air libre ou à l'étuve sous une température de 60° jusqu'à une teneur en eau ω qui est généralement comprise entre 1.2 à 1.5 fois la limite de liquidité ω_l du sol. Dans notre cas, la teneur en eau de la vase reconstituée est égale à 51 % et qui correspond à $\omega=1,5$ fois la limite de liquidité ω_l .

2.2. Appareillage

Dans cette étude expérimentale, on a utilisé :

- Une cellule cylindrique en plexiglas équipée d'une sonde avec membrane, permettant l'expansion. L'ensemble est placé sur bâti de chargement.
- Un capteur de déplacement LDS (Linear Displacement Sensor), de modèle STTLX0010 ayant une étendue de mesure de 10mm a été placé sur le piston de la cellule pour mesurer le déplacement vertical du sol. Il a été branché à un système d'acquisition de données pour suivre et enregistrer le tassement du sol en fonction du temps.

2.2.1. Cavité cylindrique

Les figures 1 et 2 montrent la sonde cylindrique qui a été conçue spécifiquement pour l'essai par expansion de cavité. La sonde est composée d'une tige perforée revêtue d'une membrane cylindrique en néoprène de longueur 15cm et de diamètre 1cm. La tige a été perforée d'une manière uniforme afin de permettre à l'eau injectée d'exercer une pression d'expansion sur la membrane. La sonde est fixée avec un filetage au niveau de l'embase inférieure qui est reliée par un tubage permettant l'injection de l'eau désaérée dans la membrane cylindrique et aussi le suivi de l'évolution de la pression dans la membrane par le biais d'un contrôleur pression-volume GDS. Une pompe à vide a été utilisée pour assurer la désaération de l'eau (figure 3).

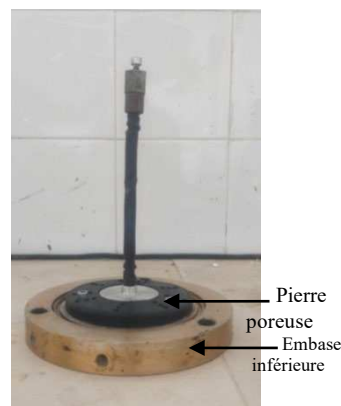


Figure 1. Sonde cylindrique pour essai d'expansion

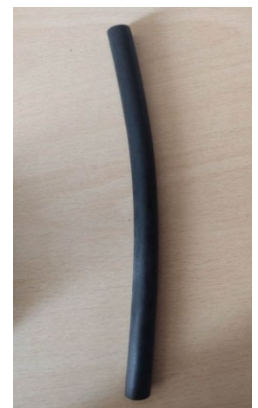


Figure 2. Membrane en néoprène



Figure 4. Désaération de l'eau à l'aide de la pompe

2.2.2. Contrôleur pression volume GDS

Le contrôleur de pression volume a été utilisé dans la partie expérimentale pour la réalisation de l'expansion de cavité à volume/pression contrôlé (volume/pression cible). En outre le GDS, comme le montre la figure 4 permet à l'aide d'un déclencheur hydraulique de régler et mesurer la pression et le volume d'un liquide. Il est constitué d'un piston commandé par un moteur et une boîte de vitesse qui se déplace rectilignement dans un cylindre étanche rempli d'eau désaérée, ce déplacement permet le remplissage et/ou la vidange du cylindre en eau. Le GDS utilisé est de capacité 1MPa.

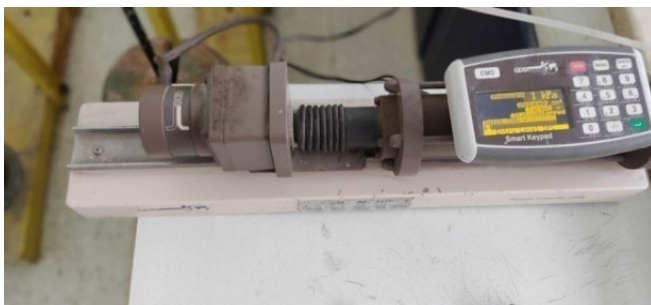


Figure 3. Contrôleur de pression volume (GDS)

2.3. Procédure expérimentale

Comme le montre la figure 5, l'essai a été réalisé sur le sol reconstitué soumis à un préchargement avec une expansion de cavité cylindrique. En effet, la procédure de l'application des paliers de chargement a été réalisée sous les chargements de 5 kPa, 10 kPa, 20 kPa, 40 kPa et après stabilisation des tassements sous la charge 40 kPa, une expansion de cavité est appliquée dans le sol. Ensuite, on poursuit l'application des deux derniers paliers de chargement 80 kPa et 120 kPa.



Figure 5. Cellule de préchargement et d'expansion

2.3.1. Procédure expérimentale

Dans la cellule d'essai, le sol reconstitué a été mis par couches successives jusqu'à ce que le sol atteigne la hauteur finale de la cellule (29 cm). Ensuite, un préchargement de 15 kg a été appliqué directement sur la cellule afin de la préconsolider jusqu'à ce qu'un tassement de 4.5 cm soit atteint. On applique par la suite le premier palier de chargement.

Pour la cellule avec expansion, la membrane cylindrique, qui existe préalablement dans le sol, de volume initial V_0 au niveau du palier 40 kPa est soumise à une pression interne provenant de l'injection de l'eau désaérée par le biais de GDS. La membrane change progressivement de volume jusqu'à atteindre un volume final égale à 2 fois V_0 , ceci a été assuré en fixant le contrôleur pression volume, initialement à un volume cible $V_f = 2 \cdot V_0$. La variation du volume de la membrane en fonction de la pression de l'eau injectée a été mesurée. Après la phase d'expansion de la cavité cylindrique, on applique les deux paliers de chargement de 80 kPa et 120 kPa jusqu'à ce que le tassement soit stable.

2.4. Résultats et interprétations

2.4.1. Évolution du tassement au cours du temps

Les figures 6 et 7 présentent les résultats obtenus à partir de l'essai de tassement dans les deux phases de préchargement et d'expansion, respectivement.

Au cours de l'essai de tassement, la cellule est drainée en parallèle en bas et en haut à l'aide des pierres poreuses et elle est maintenue saturée durant l'essai. Les mesures expérimentales de l'évolution du tassement ont été enregistrées au cours du temps pour chaque palier de chargement allant de 5 kPa jusqu'à 120 kPa.

On remarque que, pour la phase de préchargement, le tassement augmente d'une façon modérée pour les premiers paliers de 5 kPa et 10 kPa et devient plus significative pour les paliers de chargement 20 et 40 kPa atteignant une valeur de 14.93 mm.

Lors de la phase d'expansion, on observe un tassement négatif (du à l'expansion de la sonde dans le sol), ensuite dès qu'on applique le chargement

correspondant au palier 80kPa et 120kPa le tassement continue de croître progressivement.

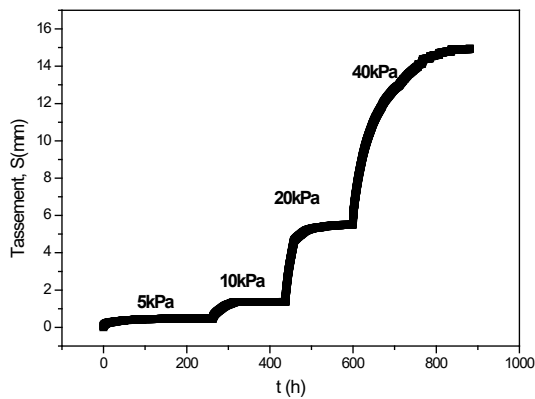


Figure 6. Evolution du tassement S en fonction du temps dans la phase de préchargement

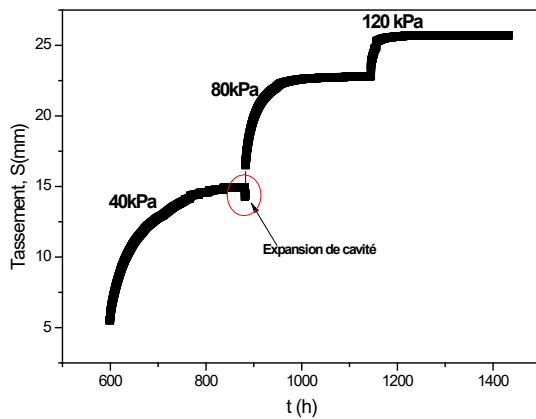


Figure 7. Evolution du tassement S en fonction du temps dans la phase de l'expansion

L'analyse de la courbe de tassement a permis de déterminer le module œdométrique $E_{\text{œd}}$ pour chaque palier de chargement, dont la valeur calculée s'élève à 3.15MPa, 2.13MPa, 1.05MPa, 0.78MPa, 1.02 MPa et 1.35MPa pour les paliers de chargement 5kPa, 10kPa, 20kPa, 40kPa, 80kPa et 120kPa, respectivement.

2.4.2. Courbe de variation pression volume

La représentation graphique de la variation du volume de l'eau injectée (en mm³) dans la sonde en fonction de la pression de l'eau (en kPa) a été définie dans la figure 8. On peut remarquer que la courbe obtenue a la même allure qu'une courbe résultante de l'essai pressiométrique, en effet cette courbe présente trois phases à savoir ; une phase dite phase de mise en contact avec le sol, suivie d'une phases pseudo-élastique et enfin une phase de grande déformation.

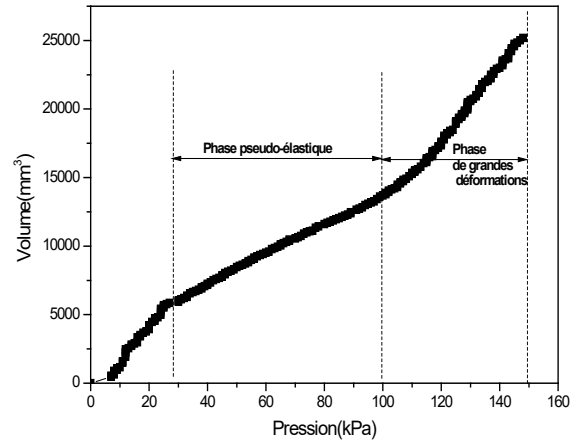


Figure 8. Evolution du volume d'eau injectée en fonction de la pression d'eau

À partir de la figure 8, le module pressiométrique calculé dans la plage pseudo-élastique est $E_{\text{M labo}} = 0.523\text{MPa}$, tandis que la pression limite et la pression de fluage sont respectivement, $P_l = 0.15\text{MPa}$ et $P_f = 0.099\text{MPa}$. Pour cet échantillon de sol, le rapport $E_{\text{M labo}}/P_f = 3.5$, ce qui correspond à des propriétés d'un sol vaseux.

En comparant le module pressiométrique du sol testé avec le module calculé à partir de l'essai de tassement pour le palier 40kPa, un rapport de : $E_{\text{M labo}}/E_{\text{œd}} = 0.67$ a été obtenu. Ce rapport correspond au coefficient rhéologique α , définie dans la littérature comme la relation entre ces deux modules. Pour les sols vaseux, ce coefficient varie entre 0.3 et 0.7 (Baud and Gambin 2013).

2.5. Exploitation des résultats obtenus

2.5.1. Comparaison avec des essais in situ

La courbe d'évolution de volume en fonction de la pression (donnée par la figure 8) a été comparée dans la figure 9, aux résultats de l'essai au pressiomètre Ménard réalisés in situ dans la zone de Megrine. La comparaison a été faite pour deux sondages (SP1 et SP2) et à une profondeur de 3m et 5m. Ces profondeurs correspondent selon le sondage carotté réalisé in situ, à une couche d'argile vaseuse.

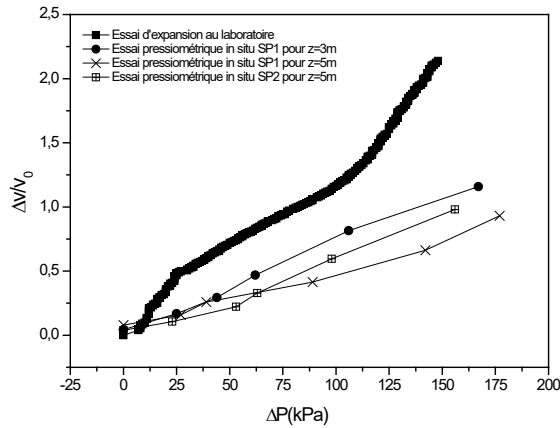


Figure 9. Evolution du volume injectée $\Delta V/V_0$ en fonction de la pression ΔP pour les mesures au laboratoire et insitu

L'analyse des courbes pression-volume issues des essais pressiométriques révèle les valeurs suivantes pour le module pressiométrique in situ ($E_{M \text{ in situ}}$) :

- SP1 à $z=3\text{m}$: 0.605MPa.
- SP1 à $z=5\text{m}$: 0.879MPa.
- SP2 à $z=5\text{m}$: 0.863MPa.

Les rapports $E_{M \text{ in situ}}/P_1$ calculés pour les trois essais sont : 3.62 (SP1 à $z=3\text{m}$), 4.9 (SP1 à $z=5\text{m}$) et 5.53 (SP2 à $z=5\text{m}$), avec une valeur moyenne de 4.68.

2.5.2. Etat de contrainte du sol

À partir des résultats de l'essai d'expansion de cavité réalisé en laboratoire et des essais Pressiométriques Ménard menés insitu, le rapport d'état des contraintes est défini comme le ratio entre la pression limite mesurée (en laboratoire ou sur le terrain) et la contrainte effective du sol (P_1/σ'_v).

Ce rapport présente des valeurs assez similaires pour les deux types d'essais, à savoir l'essai d'expansion réalisé au laboratoire et celui in situ :

- Laboratoire : $P_1/\sigma'_v = 3.75$.
- In situ : $P_1/\sigma'_v = 4.18$ (SP1 $z=3\text{m}$), 4.42 (SP1 $z=5\text{m}$) et 3.9 (SP2 $z=5\text{m}$).

2.6. Approche numérique de la consolidation suite à l'expansion

2.6.1. Expansion de cavité cylindrique

Pour une expansion radiale, la cavité avec un rayon initial r_0 peut être soumise à une pression interne σ_0 . Jusqu'à atteindre un rayon final r_f .

Suite à cette expansion de cavité un excès de surpression interstielle sera généré autour de la cavité.

L'excès de surpressions interstitielles générées dans le sol est dénoté Δu et est égale à : (Baguelin et al. 1978; Carter et al. 1979) :

$$\Delta u = 2C_u \ln \frac{R_p}{r} \quad (1)$$

Pour le cas d'une cavité cylindrique de rayon initial 5mm et une variation de volume $\frac{\Delta v}{v_0} = 2$, la variation de l'excès de surpression en fonction du temps est donné par la figure suivante :

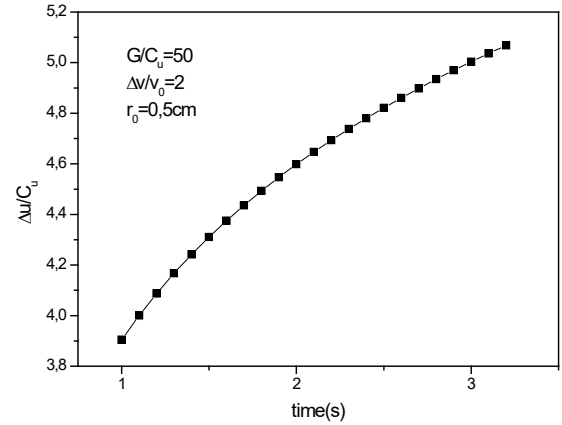


Figure 10. variation de $\Delta u/C_u$ en fonction du temps

2.6.2. Consolidation suite à l'expansion

Pour l'analyse de la consolidation radiale autour de la cavité, on suppose que l'écoulement soit radial et axisymétrique, la compressibilité volumétrique du sol est constante. Ainsi, l'équation directrice de la génération et de la dissipation de la surpression interstielle est écrite comme suit (Barron 1948) :

$$\frac{\partial \Delta u(r, t)}{\partial t} = C_r \left(\frac{\partial^2 \Delta u(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta u(r, t)}{\partial r} \right) \quad (2)$$

En considérant les paramètres adimensionnels suivants ; $\Delta U = \Delta u / \Delta u_{\max}$, $R = r / r_f$ et $T = C_r t / r_f^2$, l'équation de la dissipation de l'excès de surpression interstielle donnée par Eq.2, devient :

$$\frac{\partial \Delta U(R, T)}{\partial T} = \left(\frac{\partial^2 \Delta U(R, T)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Delta U(R, T)}{\partial R} \right) \quad (3)$$

L'eq. 3 a été résolue par la méthode des différences finies en utilisant le logiciel « Matlab version 7.9.0. (R2009b) (Ben khalifa et al. 2022).

La variation de la génération et de la dissipation de l'excès de surpression interstielle en fonction du temps est présentée par la figure 11 après calibrage.

Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre le degré de consolidation $U(\%)$ issue des mesures au laboratoire et de la résolution par FDM.

La dissipation totale des surpressions interstitielles est achevée au bout de 260 heures.

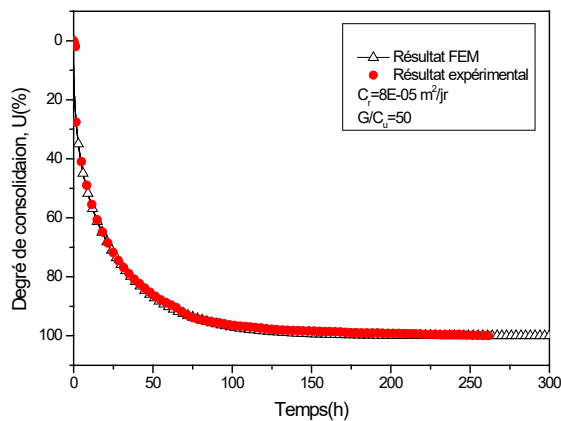


Figure 11. Comparaison des résultats expérimentaux et FDM de la variation de degré de consolidation

3. Conclusions

Une étude expérimentale a été menée afin d'analyser l'expansion d'une cavité cylindrique dans la vase de Tunis. Pour cela, un dispositif expérimental a été spécialement conçu et fabriqué, permettant d'exercer une pression radiale contrôlée sur un échantillon reconstitué de ce sol.

Cette étude expérimentale, appuyée par un dispositif spécifique, a permis d'analyser l'expansion d'une cavité cylindrique dans la vase de Tunis. Les résultats obtenus ont été validés par comparaison avec des essais pressiométriques in situ, confirmant la fiabilité du protocole. L'analyse du phénomène de consolidation a été complétée par une modélisation numérique par différences finies, renforçant ainsi la compréhension et l'application des mécanismes étudiés.

4. Références

- Baguelin, F., J. Jézéquel, and D. Shields. 1978. *The Pressumeter And Foundation Engineering*. Series on rock and soil mechanics, trans-techPublication.
- Baker, C. N. 2005. "The use of the Menard pressuremeter in innovative foundation design from Chicago to Kuala Lumpur." *2nd Menard Lect. Proc. 5th Int. Symp. Press. – ISP5*. Paris, France: Presses de l'ENPC.
- Barron, R. A. 1948. "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells by Drain Wells." *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 113 (1). <https://doi.org/10.1061/taceat.0006098>.
- Baud, J. P., and M. Gambin. 2013. "Détermination du coefficient rhéologique α de Ménard dans le diagramme Pressiorama®." *18th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. Challenges Innov. Geotech. ICSMGE 2013*, 1: 487–490.
- Bouassida, M. 1996. "Etude expérimentale du renforcement de la vase de Tunis par colonnes de sable-Application pour la validation de la résistance en compression théorique d'une cellule composite confinée." *Rev. Française Géotechnique*, N°75, 1996.
- Bouassida, M., and W. Frikha. 2007. "Extreme pressure due to the expansion of a cylindrical or spherical cavity in limitless medium: Applications in soil mechanics." *Acta Geotech.*, 2: 87–96.

Briaud, J.-L. 1992. *The Pressuremeter*. Rotterdam Balkema.

Carter, J. P., M. F. Randolph, and C. P. Wroth. 1979. "Stress and pore pressure changes in clay during and after the expansion of a cylindrical cavity." *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 3 (4): 305–322.

Houlsby, G. T., and J. P. Carter. 1993. "The effects of pressuremeter geometry of the results of tests in clay." *Géotechnique*, 43 (4): 567–576.

Ben khalifa, M., Z. Ben Salem, and W. Frikha. 2022. "A new method of acceleration of consolidation using a cylindrical cavity expansion in presence of vertical drains." *Mar. Georesources Geotechnol.*

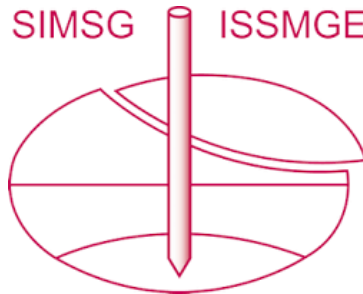
Ménard, L. 1957. "An Apparatus for Measuring the Strength of Soils in Place." University of Illinois, 50 p.

Ménard, L. 1965. "Rules for the calculation of bearing capacity and foundation settlement based on pressuremeter tests." *Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Montr.*

Palmer, A. C. 1972. "Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay: a simple interpretation of the pressuremeter test." *Géotechnique*, 22 (3): 451–457.

Wang, Y. 2010. "Study of effects of fines content on liquefaction properties of sand." *Geotech. Spec. Publ.*, (201): 272–277. [https://doi.org/10.1061/41102\(375\)33](https://doi.org/10.1061/41102(375)33).

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 8th International Symposium on Pressuremeters (ISP2025) and was edited by Wissem Frikha and Alexandre Lopes dos Santos. The conference was held from September 2nd to September 5th 2025 in Esch-sur-Alzette, Luxembourg.