Soil creep behavior from modified pressuremeter tests

Le comportement de fluage des sols à partir des essais pressiométriques modifiés

Ouertani Bilel [1#], *Ben Salem Zaineb* [2], Frikha Wissem[3], and *Haffoudhi Slaheddine*[1]

[1] *Ginger-Hydrosol Fondations, Z.I. Ksar Saïd 2086, Douar Hicher, Mannouba, Tunisie*
[2]*Université de Carthage, Institut Supérieur des Technologies de l'Environnement, de l'Urbanisme et du Bâtiment 2 Rue de l'Artisanat, Charguia 2 - 2035 Tunisie*
[3] *Setec International, 42-52 Quai de la Rapée, Central Seine Building, 75583 Paris Cedex 12, France*
[#]*Corresponding author: bilel.ouertani@gmail.com*

ABSTRACT

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. According to the NF EN ISO 22476-4 standard, each loading stage is maintained for 60 seconds. This study analyzes the impact of extending this duration to 120 seconds on the results of pressuremeter tests. Standard Pressuremeter Tests (PMT) and Modified (MPMT) Pressuremeter Tests were conducted on different types of soils from four sites in Tunisia, including soft clays, sandy clays, fine sands, and highly compacted soils (stiff clays and dense sands). The results show that deformations persist beyond 60 seconds, leading to significant reductions in limit pressure (P_l*) and creep pressure (P_f*), as well as a decrease in the pressuremeter modulus (E_M). These reductions become more pronounced as the compressibility index (C_c) increases. Additionally, a significant increase in the creep coefficient (ϑ) which in a key indicator of time-dependent deformations in the pseudo-elastic zone, is observed in fine and low-consistency soils, Whereas, for highly compacted sands and stiff clays, the creep coefficient remains stable. This coefficient highlights the interaction between creep and primary consolidation.

RESUME

L'essai pressiométrique est une méthode in situ largement utilisée 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. Conformément à la norme NF EN ISO 22476-4, chaque palier de charge est maintenu pendant 60 secondes. Cette étude analyse l'impact de l'extension de cette durée à 120 secondes sur les résultats des essais pressiométriques. Des essais pressiométriques standards (PMT) et modifiés (MPMT) ont été réalisés sur différents types de sols sur quatre sites en Tunisie, incluant des argiles molles, des argiles sableuses, des sables fins et des sols très compacts (argiles raides et sables très compact). Les résultats montrent que les déformations se poursuivent au-delà de 60 secondes, entraînant une réduction significative de la pression limite (P_l*) et de la pression de fluage (P_f*), ainsi qu'une diminution du module pressiométrique (E_M). Ces réductions sont d'autant plus marquées que l'indice de compressibilité (C_c) augmente. De plus, une augmentation significative du coefficient de fluage (ϑ) qui est un indicateur clé des déformations dépendantes du temps dans la zone pseudo-élastique, est observée dans les sols fins et de faible consistance. En revanche, pour les sables très compacts et les argiles raides, le coefficient de fluage reste stable. Ce coefficient met en évidence l'interaction entre le fluage et la consolidation primaire.

Keywords: Pressuremeter test, extended loading time, limit pressure, pressuremeter modulus, compressibility index, creep coefficient.

1. Introduction

Les essais in situ sont largement utilisés pour la caractérisation des sols en géotechnique. Parmi eux, l'essai pressiométrique est considéré, depuis son invention en 1955, non seulement une investigation mais toute une théorie (Ménard 1955). Elle est utilisée, dans de nombreux pays, pour le dimensionnement de tout type de fondations et soutènements (Baguelin et al. 1978 ; Baker 2005; Briaud 1992; Ménard 1965).

Cet essai permet d'obtenir à la fois la résistance limite (P_l), la pression de fluage(P_f)et le module de déformation (E_M) (statique ou cyclique) du sol en profondeur. Il a également l'avantage d'être exécuter dans tous les types de sol (Ménard 1957).

Le principe de l'essai repose sur l'introduction d'une sonde radialement dilatable dans un forage préalable, suivie de son expansion progressive par paliers de chargement (pressions), tout en mesurant la variation du volume injecté. Les normes, issues d'un travail très élaboré de L. Ménard, exigent une durée d'un palier de chargement de $\Delta t = 60$ secondes quel que soit le type de sol rencontré.

Dans cette étude, nous évaluons l'impact de l'augmentation du temps de paliers de chargement de 60

à 120 secondes sur le comportement de fluage de sol ainsi que sur les principaux paramètres géotechniques (P_l, P_f et E_M) pour différents types de sols. Nous comparons les résultats des essais pressiométriques standards (PMT), réalisés selon la norme NF EN ISO 22476-4, et des essais pressiométriques modifiés (MPMT) avec un temps de chargement prolongé. Ces essais ont été effectués sur différents types de sols (argile molle, argile sableuse, argile plastique, sable fin limoneux, sable argileux compact et argile compacte) sur quatre sites tunisiens (Radès, Mégrine, Sfax et Ksar Saïd). Des essais en laboratoire ont également été réalisés pour caractériser les sols étudiés.

2. Essais pressiométriques réalisés

2.1. Essai pressiometrique standard PMT

L'essai pressiométrique permet d'obtenir une relation entre la contrainte appliquée et la déformation de sol. La figure 1 illustre le système d'essai pressiométrique (PMT).

Dans cette étude, le pressiomètre Ménard a été utilisé. Il est composé de deux éléments principaux : une sonde et un contrôleur pression-volume (CPV), reliés par une tubulure semi-rigide.

Le CPV, comprend des mécanismes permettant de réguler la pression et de surveiller les variations de volume.

La sonde pressiométrique est constituée de trois cellules indépendantes : une cellule centrale (contenant de l'eau) et deux cellules de garde (remplies de gaz), qui limitent la déformation verticale et garantissent une expansion uniquement radiale, faisant de l'essai pressiométrique un essai en déformation plane. La sonde est de type BX, d'un diamètre externe de 60 mm.

La bouteille d'azote fournit la pression pour les cellules de garde, et la cellule centrale qui contient de l'eau.

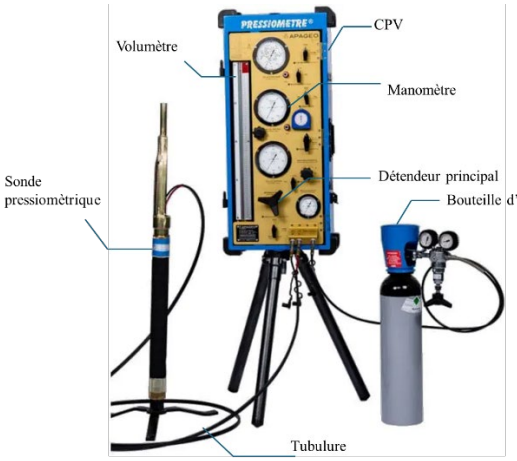
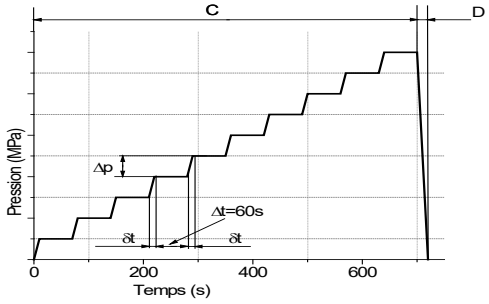


Figure 1. Pressiométrique Ménard.

Conformément à la norme NF EN ISO 22476-4, la procédure de l'essai pressiométrique consiste à appliquer par palier, une pression rigoureusement uniforme sur la paroi de forage, par l'intermédiaire de la sonde et à mesurer l'augmentation du volume de la cellule centrale qui s'accompagne du déplacement de la paroi du forage, et ce, pour chaque palier de chargement. La durée d'un palier de chargement est de Δt=60 secondes. Le programme de chargement et de déchargement est illustré sur la figure 2.



P : Pression

t : Temps

Δt Temps d'un palier de pression uniforme égale à 60s

δt Temps de passage d'un palier au suivant

C Chargement du sol

D Déchargement du sol

Figure 2. Programme de chargement par palier de l'essai pressiométrique Ménard standard PMT.

À partir des résultats de l'essai pressiométrique standard (PMT), la variation du volume de liquide injecté dans la sonde est enregistrée à 15, 30 et 60 secondes. À la fin de chaque palier, la variation à 60 secondes est tracée en fonction de la pression radiale appliquée (Fig. 3).

Au début de l'essai d'expansion, la déformation radiale de la sonde augmente rapidement jusqu'à ce que la sonde entre en contact avec la paroi du forage. Ensuite, la pente se stabilise, c'est la zone représentant la phase pseudo élastique du sol. Au-delà de la pression de fluage et au fur et à mesure que la pression augmente, la déformation accroit plus rapidement, c'est la phase de plastification du sol. L'essai est considéré achevé si l'une des conditions suivantes est accomplie : (i) le volume du liquide injecté est égal au volume initial de la sonde, (ii) une pression de 5 MPa est atteinte ou (iii) trois paliers de pression sont appliqués au-delà de la pression de fluage (norme NF EN ISO 22476-4) :

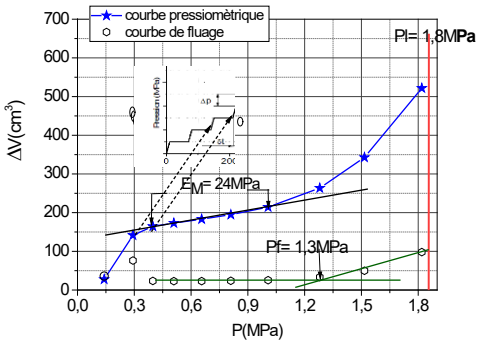


Figure 3. Courbes d'essai et de fluage pressiométrique standard PMT.

Étant donné que la courbe pressiométrique obtenue est un résultat brut, basé sur les mesures effectuées au niveau du CPV, il est nécessaire d'appliquer certaines corrections afin de représenter le comportement réel du sol. Les corrections tiennent en compte de la résistance propre de la sonde P_e et la perte de charge (volume V_r)

due à la dilatation additionnelle de l'appareillage de l'essai (sonde, tubulure, CPV) (AFNOR NF EN ISO 22476-4 2015).

À partir des courbes obtenues, plusieurs paramètres pressiométriques sont déterminés. La pression limite conventionnelle P_l correspond à la pression atteinte avant rupture du sol, tandis que la pression de fluage P_f marque la limite du seuil élastique. La pression limite nette P_l^* est définie par :

$$P_l^* = P_l - \sigma_h \quad (1)$$

où σ_h représente la contrainte totale horizontale présente dans le sol avant l'introduction de la sonde au même niveau. De même, la pression de fluage nette Pf^* est donnée par :

$$P_f^* = P_f - \sigma_h \quad (2)$$

Le module pressiométrique E_M, qui caractérise la pente de la phase pseudo-élastique du sol, est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$E_M = 2(1+\upsilon)\left[V_s + \left(\frac{V_1+V_2}{2}\right)\right]\frac{(P_2-P_1)}{(V_2-V_1)} \quad (3)$$

où $(P_1, V_1), (P_2, V_2)$ sont les coordonnées de deux points situés dans la zone pseudo-élastique de l'essai, et υ représente le coefficient de Poisson du sol.

2.2. Essai pressiometrique modifié MPMT

L'essai pressiométrique modifié (MPMT) utilise le même équipement que l'essai pressiométrique standard (PMT), mais se distingue par une augmentation de la durée des paliers de charge à 120 secondes. De plus, les variations de volume sont enregistrées à 75, 90 et 120 secondes pour chaque palier.

L'intervalle de 120 secondes a été retenu en raison de contraintes techniques. En conservant le même taux de chargement que pour l'essai à 60 secondes, la sonde (700 cm³) ne peut pas supporter une durée plus longue en raison de la déformation continue du sol sous l'effet du fluage, atteignant ainsi son volume maximal avec un nombre réduit de paliers .

La Figure 4 illustre un exemple des courbes pressiométriques et de fluage obtenues, où les pressions appliquées et les volumes injectés sont mesurés à différents intervalles de temps (15s, 30s, 60s, 75s, 90s et 120s). La détermination de la pression de fluage pour l'essai MPMT est effectuée d'une manière similaire à celle adoptée pour l'essai PMT, la principale différence résidant dans l'augmentation du temps de charge dans le MPMT.

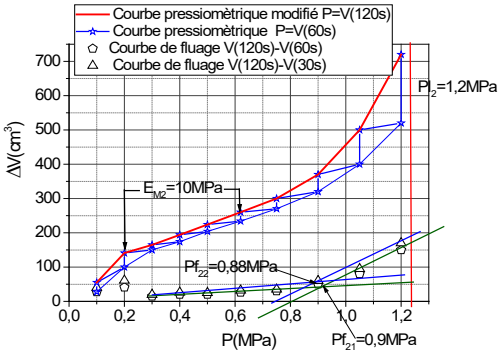


Figure 4. Essai pressiométrique modifié MPMT.

Les résultats obtenus à partir des essais pressiométriques standards et modifiés sont les suivants :

P_{l1} et P_{l1}^* : Pression limite et pression limite nette mesurées après un palier de charge de 60 secondes.

P_{l2} et P_{l2}^*: Pression limite et pression limite nette mesurées après un palier de charge de 120 secondes.

P_{f1}et P_{f1}^*: Pression de fluage et pression de fluage nette obtenues à partir de la différence de volume entre les mesures à 60 secondes et 30 secondes.

P_{f21}et P_{f21}^* : Pression de fluage et pression de fluage nette obtenues à partir de la différence de volume entre les mesures à 120 secondes et 60 secondes.

P_{f22}et P_{f22}^*: Pression de fluage et pression de fluage nette obtenues à partir de la différence de volume entre les mesures à 120 secondes et 30 secondes.

E_{M1}: Module pressiométrique obtenu pour un palier de charge de Δt = 60 secondes.

E_{M2}: Module pressiométrique obtenu pour un palier de charge de Δt = 120 secondes.

2.3. Sols étudiés

Des essais pressiométriques standards (PMT) et modifiés (MPMT) ont été effectués sur quatre sites tunisiens (Mégrine, Radès, Ksar Saïd et Sfax) dans le cadre de campagnes de reconnaissance géotechnique. Les caractéristiques géotechniques des sols testés sont synthétisées en détails dans l'article de Ben Salem et al. (2025). Ces essais ont été menés conformément aux normes AFNOR NF P94-056 (1996), AFNOR XP P94-051 (1993) et AFNOR NF EN ISO 17892-5 (2017).

À Mégrine, six essais PMT et six essais MPMT, ont été réalisés. La nappe phréatique était située à 2 m de profondeur. Les sols rencontrés étaient principalement des argiles plastiques grises, des argiles silteuses brunâtres, des argiles sableuses jaunâtres et des argiles plastiques brun-gris.

À Radès, dix essais PMT et dix essais MPMT. La nappe phréatique était à 1,3 m sous le sol. Quatre types de sols ont été identifiés : sable fin limoneux gris-jaune, argile vaseuse très molle, argile silteuse grise et argile plastique grise.

À Sfax, un essai PMT et un essai MPMT. La nappe phréatique se situait à 3,5 m de profondeur. Le sol dominant était un sable fin silto-argileux compact.

À Ksar Saïd, un essai PMT et un essai MPMT ont été exécutés dans une couche d'argile silteuse, située hors nappe.

3. Résultats et discussion

Les résultats des essais réalisés (courbes, etc.), ainsi que les essais en laboratoire, sont détaillés dans l'article de Ben Salem et al. (2025). Dans le présent papier, nous nous sommes particulièrement intéressés au comportement au fluage des sols examinés en se basant sur les résultats des essais pressiométriques standards et modifiés.

3.1. Types de comportement, et paramètres pressiométriques

Les Figures 5 à 10 présentent les courbes pressiométriques issues des essais standards (PMT) et modifiés (MPMT) réalisés sur les quatre sites. Ces essais

ont été menés à différentes profondeurs et sur divers types de sols. Il est à noter que, pour chaque site, les essais PMT et MPMT ont été réalisés dans un même horizon. De plus, la majorité des essais MPMT ont été effectués dans un nouveau forage, dans des conditions identiques, à une distance moyenne de 2,0 m du forage PMT.

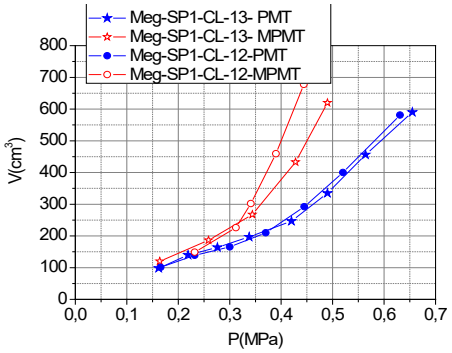


Figure 5. Courbes pressiométriques corrigées des essais PMT et MPMT réalisés dans l'argile molle à 12 m et 13 m de profondeur (Mégrine).

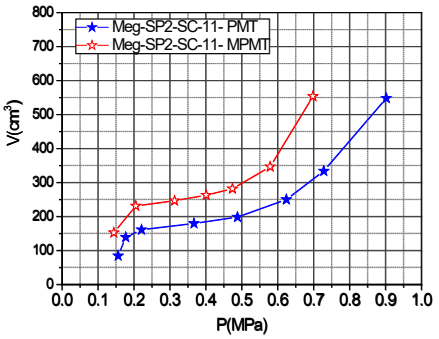


Figure 6. Courbes pressiométriques corrigées des essais PMT et MPMT réalisés dans l'argile sableuse à 11 m de profondeur (Mégrine).

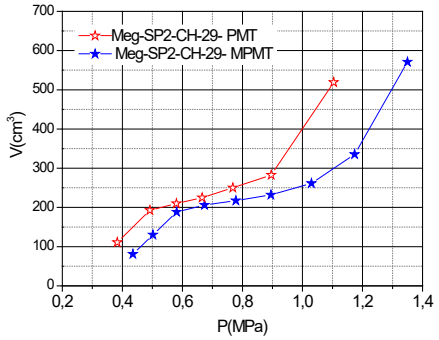


Figure 7. Courbes pressiométriques corrigées des essais PMT et MPMT réalisés dans l'argile plastique à 29 m de profondeur (Mégrine).

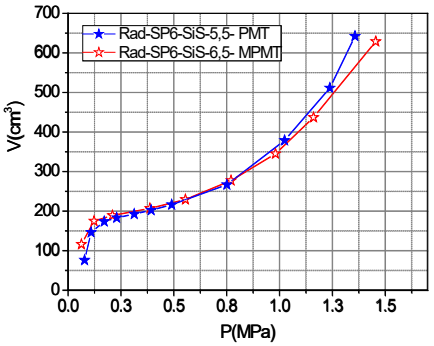


Figure 8. Courbes pressiométriques corrigées des essais PMT et MPMT réalisés dans le sable fin silteux à 5,5 m de profondeur (Radès).

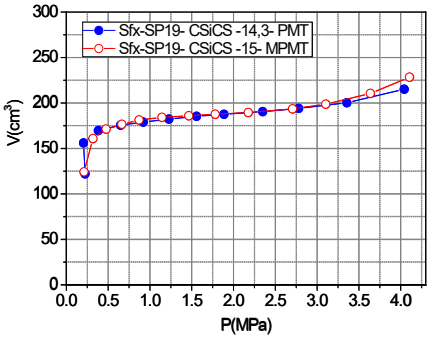


Figure 9. Courbes pressiométriques corrigées des essais PMT et MPMT réalisés dans sable fin silto-argileux compact à 14,3 m de profondeur (Sfax).

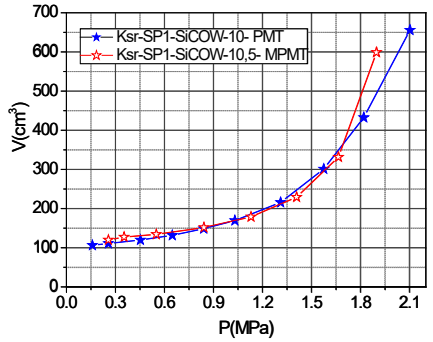


Figure 10. Courbes pressiométriques corrigées des essais PMT et MPMT réalisés dans l'argile silteuse hors nappe à 10 m de profondeur (Ksar Saïd).

D'après les figures 5 à 10, on peut constater que dans l'ensembles des cas étudiés, les courbes des essais pressiométriques standards (PMT) et modifiés (MPMT) présentent des tendances similaires, structurées en trois phases : phase de mise contact, phase pseudo-élastique et phase plastique. La déformation volumique s'accélère particulièrement dans la phase plastique (Fig.5, Fig.6 Fig.7, Fig.8 et Fig.10).

La comparaison des courbes obtenues permet de classer les résultats en trois types :

Type I : Pour certains types de sol, principalement les sables compactes, et argiles raides situés hors nappe, notamment, le sable fin silteux à 5,5 m à Radès (Fig. 8), le sable silto-argileux compacte à Sfax (Fig. 9) et l'argile silteuse hors nappe à Ksar Saïd (Fig. 10), il a été noté que les courbes PMT et MPMT sont quasiment identiques,

indiquant aucun impact significatif du temps de chargement sur les résultats de l'essai.

Type II : En revanche, pour les argiles molles, il a été observé que les déformations se poursuivent au-delà du temps de chargement conventionnel de 60 secondes. Pour une pression donnée P, la déformation volumique en MPMT est nettement supérieure à celle du PMT ($V_{MPMT} > V_{PMT}$), et les pressions limites mesurées en MPMT sont significativement inférieures à celles du PMT (Fig. 5).

Type III : Pour les sols argileux, notamment l'argile silteuse, l'argile sableuse et l'argile plastique et pour une pression donnée P, la déformation volumique en MPMT est légèrement supérieure à celle du PMT ($V_{MPMT} > V_{PMT}$), et la pression limite en MPMT est inférieure à celle du PMT (Fig. 6).

Les résultats montrent que, pour la plupart des sols testés, la pression limite diminue avec l'augmentation du temps de palier de chargement de 2 à 30%. Ce phénomène est particulièrement marqué pour les argiles molles et les argiles sableuses, Le ratio $\frac{Pl_2^*}{Pl_1^*}$ varie entre 0.54 et 0.98 (avec une moyenne de 0.80). Cette réduction est attribuée au nombre limité de points testés (Paliers de charge) ainsi qu'à la notion de pression limite conventionnelle, définie par le doublement du volume de la cavité expansée (NF EN ISO 22476-4), rapidement atteint en raison de l'extension du temps de chargement, notamment dans la phase de plastification du sol.

La pression de fluage P_{f22}^*, correspondant à la limite du seuil pseudo-élastique du sol, diminue avec l'augmentation du temps de chargement, particulièrement pour les argiles molles et sableuses. Par exemple, pour l'argile molle de Radès, le rapport $\frac{P_{f22}^*}{P_{f1}^*}$ varie entre 0,52 et 0,91, avec une moyenne de 0,80 (Tableau 1).

Le module pressiométrique modifié E_{M2} diminue pour tous type de sol. Cette réduction est plus marquée pour les sols fins de faible consistance : environ 50 % pour les argiles molles, 43 % pour les argiles à madrépores et 31 % pour les argiles plastiques. Pour les sols contenants des fractions granulaires, compacts ou situés hors nappes, cette réduction ne dépasse pas les 20%. Elle est de 16% pour les argiles sableuses, 20% pour les sables fins silteux, de 3% pour les sables fins argileux compacts et de 5% pour les argiles compactes hors nappe.

3.2. Comportement au fluage

Les Figures 11 à 15 illustrent l'évolution du volume injecté sous forme de volume normalisé $\frac{V_i - V_0}{V_0}$ en fonction du temps de chargement (Δt_i = 15, 30, 60, 75, 90, 120 secondes) pour différents types de sols (argile molle, argile sableuse, sable fin silteux, argile plastique et sable argileux silteux compact).

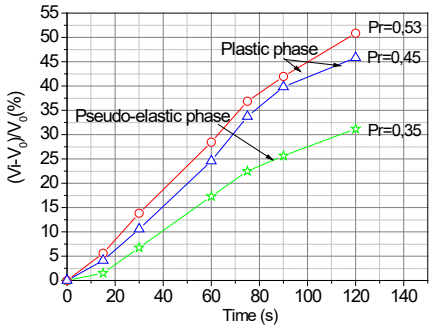


Figure 11. Variation du volume normalisé en fonction du temps pour différents paliers de chargement dans l'argile molle (Meg-SP1-CL-13 MPMT).

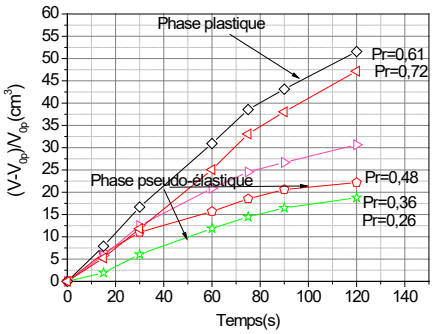


Figure 12. Variation du volume normalisé en fonction du temps pour différents paliers de chargement dans l'argile sableuse (Meg-SP1-SiSC-14- MPMT).

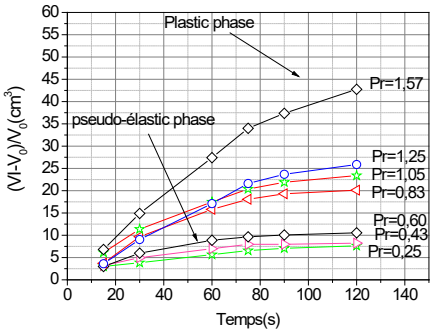


Figure 13. Variation du volume normalisé en fonction du temps pour différents paliers de chargement dans le sable fin silteux (Rad-SP6-SiS-6.5- MPMT).

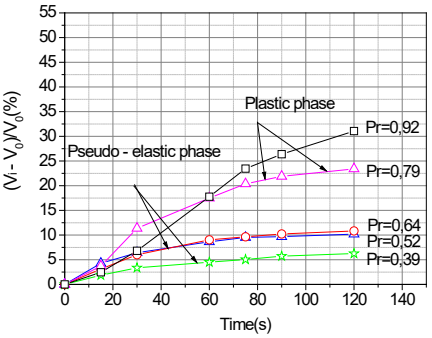


Figure 14. Variation du volume normalisé en fonction du temps pour différents paliers de chargement dans l'argile plastique (Rad-SP8-CH-40.5- MPMT).

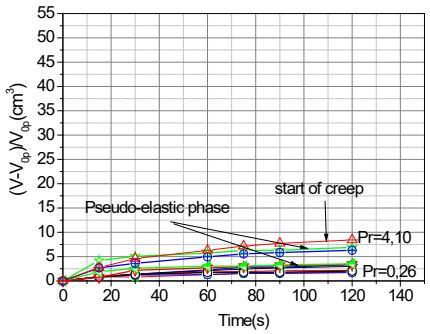


Figure 15. Variation du volume normalisé en fonction du temps pour différents paliers de chargement dans le sable fin silteux compact (Sfx-SP19- CSiCS -15- MPMT).

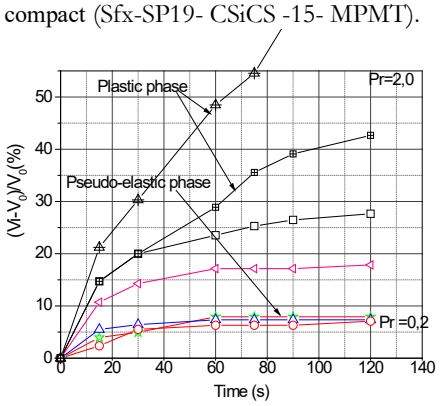


Figure 16. Variation du volume normalisé en fonction du temps pour différents paliers de chargement dans l'argile silteuse hors nappe (Ksr-SP1-SiCOW-10.5- MPMT).

Les résultats indiquent que la variation du volume augmente avec l'accroissement de la charge appliquée. Plus la pression appliquée est élevée, plus l'augmentation du volume est marquée. Par exemple, pour l'argile plastique le ratios $\frac{V_i - V_0}{V_0}$ augmente entre 60 et 120 secondes de 1,42 %, 1,65 %, 6,6 % et 11,3 % pour des paliers de pression de P_r=0.52, 0.64, 0.79 et 0.92 MPa respectivement (Fig. 14).

Durant la phase pseudo-élastique et à chaque palier de chargement, l'équilibre n'est pas immédiatement atteint, et les déformations persistent. Pour mieux apprécier ce phénomène, on peut définir un coefficient de fluage ϑ , basé sur la moyenne arithmétique des n premiers paliers de la phase pseudo-élastique, selon l'expression suivante :

$$\vartheta = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(v_{120i} - v_{60i})/v_{0i} \qquad (4)$$

Table 1. Comparaison des résultats selon le type de sol

*Le nom de l'essai suit la structure suivante : Site-Sondage-Type de sol-Profondeur-Type d'essai.

Dans la zone pseudo-élastique, le coefficient de fluage ϑ varie en fonction du type de sol :

- Argile molle (Pl* entre 0.4 et 0.6 MPa) : entre 9 % et 23 %,
- Argile sableuse (Pl* entre 0.6 et 1.0 MPa) : entre 4 % et 5 %,
- Argile plastique (Pl*>1MPaP) : entre 2 % et 5 %,
- Sable fin silteux (Pl∗>1.4MPa) : ne dépasse pas 2 %,
- Sable silto-argileux compact : inférieur à 1 %.

Les figures 17 et 18 illustrent l'impact du coefficient de fluage ϑ sur les ratios $\frac{E_{M2}}{E_{M1}}$ *et* $\frac{P_{l2}}{P_{l1}}$, Lorsque ce coefficient dépasse 10%, le ratio $\frac{P_{l2}}{P_{l1}}$ chute en dessous de 0.8, révélant une perte de résistance due aux déformations dépendantes du temps.

Type de sol	Essai*	ϑ (%)	$\frac{P_{l2}}{P_{l1}}$	$\frac{E_{M2}}{E_{M1}}$	Cc	Pl (MPa)
Argile molle	Meg-SP1-CL-13 MPMT	9	0.74	0.65	0.40	< 0.6
	Meg-SP1-CL-12 MPMT	23	0.71	0.54	0.28	< 0.5
	Rad-SP6-CL-17.5 MPMT	22	0.80	0.57	0.37	< 0.4
	Rad-SP6-CL-18.5 MPMT	11	0.75	0.38	0.46	< 0.5
	Rad-SP8-CL-11.5 MPMT	18	0.54	0.25	0.40	< 0.3
Argile silteuse & argile silto-sableuse	Meg-SP2-SiSC-8 MPMT	5	0.78	0.80	0.15	< 0.6
	Meg-SP2-SC-11 MPMT	4	0.79	0.82	0.17	< 0.8
	Rad-SP8-SiCM-30.5 MPMT	5	0.90	0.57	0.43	< 0.8
Argile plastique	Rad-SP8-CH-40.5 MPMT	2	0.98	0.76	0.36	> 1.0
	Meg-SP2-CH-29 PMT	5	0.85	0.77	0.34	> 1.0
	Rad-SP6-CH-36.5 MPMT	4	0.92	0.54	0.43	> 1.0
Sable fin silteux	Rad-SP6-SiS-6.5 MPMT	1,6	1.01	0.98	-	> 1.5
	Rad-SP6-SiS-23.5 MPMT	1,5	0.83	0.82	-	> 1.7
	Rad-SP8-SiS-4.5 MPMT	1,5	0.70	0.78	-	> 1.4
Sable silto-argileux compact	Sfx-SP19-CSiCS-15 MPMT	<1	0.95	0.97	0.1	> 4.0
Argile silteuse hors nappe	Ksr-SP1-SiCOW - 10.5- MPMT	<1	0.91	0.95	0.26	>1.8

Le ratio $\frac{E_{M2}}{E_{M1}}$, diminue également de manière encore plus marquée pour l'argile molle, avec des valeurs variantes entre 0.25 et 0.98.

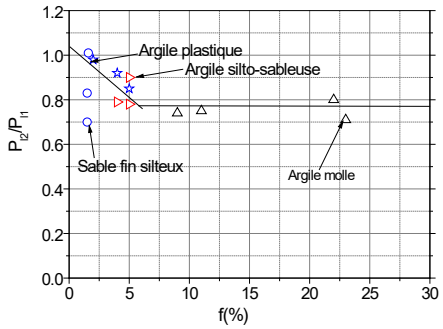


Figure 17. Effet du coefficient de fluage ϑ (%) sur la variation de rapport de pressions limite $\frac{P_{l2}}{P_{l1}}$.

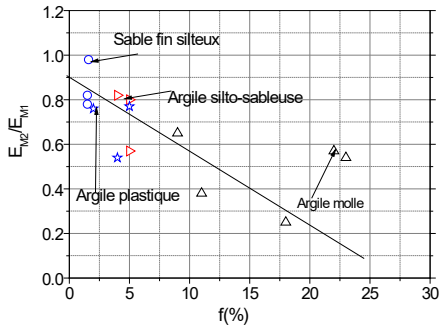


Figure 18. Effet du coefficient de fluage ϑ (%) sur la variation de rapport du module pressiométrique $\frac{E_{M2}}{E_{M1}}$.

Le phénomène de fluage interagit avec la consolidation primaire. Ce coefficient n'est pas nul dans les sables fins silteux et est relativement élevé pour les argiles sableuses, bien que ces sols ne présentent pas une mauvaise consistance, ce qui traduit une consolidation primaire rapide.

Par ailleurs, les Figures 19 et 20 illustrent l'effet de l'indice de compression C_c sur la variation des ratios $\frac{E_{M2}}{E_{M1}}$ et $\frac{P_{l2}}{P_{l1}}$.

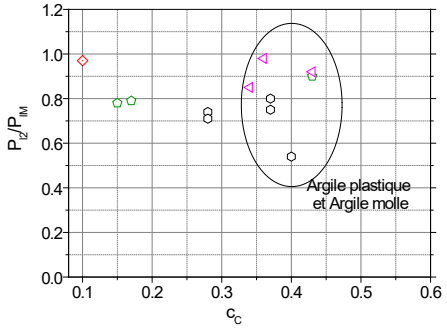


Figure 19. Effet de l'indice de compression Cc sur la variation de de ratio de pression limite $\frac{P_{l2}}{P_{l1}}$.

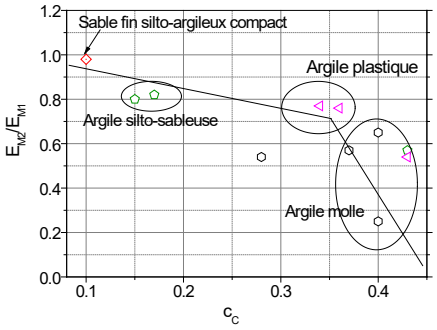


Figure 20. Effet de l'indice de compression Cc sur la variation de de ratio de module pressiométrique $\frac{E_{M2}}{E_{M1}}$.

Le ratio du module pressiométrique($\frac{E_{M2}}{E_{M1}}$)diminue avec l'augmentation de l'indice de compression (C_c), en particulier pour des valeurs de Cc supérieures à 0.30. Cette réduction est particulièrement marquée dans les argiles molles, où le ratio $\frac{E_{M2}}{E_{M1}}$peut atteindre 0.25.

En revanche, l'indice de compression a une influence moins marquée sur la variation du ratio de la pression limite($\frac{P_{l2}}{P_{l1}}$) .

4. Conclusion

Une étude de l'impact de l'extension du palier de chargement de 60 secondes à une durée de 120 secondes pour les essais pressiométriques a été analysée dans le présent papier. Des essais pressiométriques standards (PMT) et modifiés (MPMT) ont été réalisés sur différents types de sols sur quatre sites en Tunisie.

Une comparaison des résultats entre les essais pressiométriques standards (PMT) et les essais pressiométriques modifiés (MPMT) réalisés dans les mêmes horizons a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Pour tous les types de sols, la déformation volumique suit une tendance croissante avec les paliers de chargement. Notamment, pour les argiles molles.
- Le coefficient de fluage ϑ est un paramètre clé dans l'interprétation des résultats pressiométriques. Une valeur élevée de ce coefficient (ϑ = 18 %) entraîne une réduction significative du module pressiométrique (50 %) notamment dans le cas des argiles molles, en raison du fluage et du réarrangement des particules. En revanche, pour les sols présentant un faible coefficient de fluage (ϑ < 1 %), tels que les sables argileux compacts, cette diminution reste inférieure à 3 %, bien que non nulle, en raison de l'interaction avec la consolidation primaire, qui est rapide.
- Les sols moins consistants, présentant un indice de compression (C_c) élevé, sont particulièrement sensibles à la durée de chargement.

Ce document soulève d'importantes questions concernant l'influence du temps de chargement sur la réponse des sols lors des essais pressiométriques. En effet les essais réalisés avec des temps de palier plus longs

(120s) montrent une diminution de la pression limite et du module pressiométrique, indiquant un comportement de fluage marqué, un temps de palier plus longs permettent une meilleure prise en compte du fluage et de la consolidation.

5. Références

AFNOR. "NF EN ISO 17892-5: Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 5: essai de chargement par palier à l'œdomètre." AFNOR, Paris, France, 2017.

AFNOR. "NF P 94-110-1: Sols, Reconnaissances et essais - Essai pressiométrique Ménard, Partie 1: Essai sans cycle." AFNOR, Paris, France, 2000.

AFNOR. "NF P94-056: Sols - Reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage." AFNOR, Paris, France, 1996.

AFNOR. " NF EN ISO 22476- 4 - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place - Partie 4 : essai pressiométrique dans un forage préalable selon la procédure Ménard - AFNOR, Paris, France, 2021.

AFNOR. "XP P94-051: Sols - Reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau." AFNOR, Paris, France, 1993.

Baguelin, F., Jezequel, J. F., and Shields, D. H. The Pressuremeter and Foundation Engineering. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, 1978.

Benoit, J., and Clough, G. W. "Self-Boring Pressuremeter Tests in Soft Clay." J. Geotech. Eng. 112(1): 60–78, 1986.

Baker, C. N. (). "The Use of the Menard Pressuremeter in Innovative Foundation Design from Chicago to Kuala Lumpur." 2nd Menard Lecture, Proceedings of the 5th International Symposium on the Pressuremeter – ISP5, Presses de l'ENPC, Paris, France, 2005.

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

Frikha, W., and Varaksin, S. "Auto Controlled Ménard Pressuremeter: A Novel Tool for Optimal Use of the Pressuremeter", Soil Testing, Soil Stability and Ground Improvement, 252(1), pp. 252–268, 2018.

Frikha, W. & Bouassida, M. (2013). Cylindrical cavity expansion in elastoplastic medium with a variable potential flow. ASCE's International Journal of Geomechanics 13(1), 9-15 (2013). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000166.

Ménard, L. "Pressiomètre [Pressuremeter]." Brevet No. 1.117.983, 1955.

Ménard, L. "Mesures in situ des propriétés physiques des sols." Annales des Ponts et Chaussées, 3, pp. 357–376, 1957.

Ménard, L. "Influence de l'amplitude et de l'histoire d'un champ de contraintes sur le tassement d'un sol de fondation." International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, France, 1961.

Ménard, L. "Calcul de la force portante des fondations sur la base des résultats des essais pressiométriques." Sols Soils, (5–6), 1963.

Ménard, L. "Rules for the calculation of bearing capacity and foundation settlement based on pressuremeter tests." International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, 1965.

Ouertani, B, Frikha, W., Bel Hadj Ali, I., Ben Salem,Z. Haffoudhi, S.(2025). Effect of Extending Loading Time Application on Pressuremeter Test Results. International Journal of Geomechanics. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-10363.

.