

ESSAIS PRESSIOMETRIQUES MENARD – REFLEXION SUR LES MATERIELS ET PROTOCOLES.

MENARD PRESSUREMETER TESTS- DISCUSSIONS ON MATERIALS AND PROTOCOLS

Catherine JACQUARD¹, Michel RISPAL¹

¹ FONDASOL, Avignon, France

RÉSUMÉ – Sur la base des résultats d'une campagne d'essais réalisée par Fondasol dans le cadre du programme de recherche ARSCOP dans des formations sableuses, l'article passe en revue l'ensemble des paramètres susceptibles d'influencer les valeurs des pressions limites et des modules pressiométriques Ménard obtenues. A partir du constat réalisé, des adaptations de certains protocoles ou de calculs sont discutées.

ABSTRACT – On the basis of cross-tests carried out by Fondasol in sandy soils within the framework of the ARSCOP research program, the article reviews all the parameters likely to influence the values of Ménard limit pressures and pressuremeter modulus obtained. Based on the observations made, adaptations to certain protocols or calculations are discussed.

1. Introduction

Le programme de recherche et développement collaboratif ARSCOP (Nouvelles Approches de Reconnaissance des Sols et de Conception des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre) entame sa dernière année de travaux en 2020. L'axe 1 concerne le développement de système de mesures et protocoles ; un groupe de travail s'est attaché à établir un état de l'art de la pratique quotidienne, notamment en regard des exigences de la norme NF EN ISO 22476-4 (AFNOR, mai 2015), à travers plusieurs campagnes d'essais croisés menées en 2019.

L'article présente les résultats de la campagne d'investigations menée par Fondasol dans des formations sableuses, puis analyse les résultats obtenus. Enfin, des réflexions sont menées sur les méthodes d'interprétation de l'essai.

2. Campagne d'investigations

Dans le cadre du programme ARSCOP, Fondasol a mené une campagne de 7 sondages pressiométriques dans des sables dunaires moyennement denses à denses à Messanges (40), sur le carreau de la carrière Durruty (Jacquard, 2020). Les formations sont des sables dunaires mis en place au niveau de la côte landaise entre -12000 et -2000BP. Le fuseau granulométrique de ce sable est compris entre 0.25 et 0.5 mm. La nappe phréatique est présente entre 2 et 3 m de profondeur.

Le sondage SP1 constitue le sondage de référence respectant stricto sensu les prescriptions de la norme en termes de mode de réalisation de forage et de choix de la sonde. Les sondages suivants ont été réalisés avec un outil désagrégateur en l'occurrence un tricône (OHD) sous boue bentonitique en ne modifiant qu'un paramètre de matériel (type de sonde ou gaine de protection) afin d'en quantifier l'impact sur les résultats obtenus. Les essais sont réalisés après chaque passe de forage de 1m selon la procédure B.

Tableau 1. Outils et types de sonde utilisés dans les sondages

Nom	Mode de forage	Type de sonde et équipement
SP1	Tricône 63.5mm (2"1/2) -OHD-, sous boue bentonitique	SN60 : sonde nue 60mm, gaine caoutchouc de 3mm d'épaisseur
SP2	Tricône 63.5mm (2"1/2) -OHD-, sous boue bentonitique	TR60: sonde nue 60mm, gaine souple toilée renforcée d'épaisseur 4mm
SP3	Tricône 66mm (2"5/8) -OHD-, sous boue bentonitique	Tube fendu 63mm, sonde 44 cellule longue, gaine toilée renforcée TF63-SL 49/63
SP4	Tricône 66mm (2"5/8) -OHD-, sous boue bentonitique	Tube fendu 63mm, sonde 44 cellule courte, gaine toilée renforcée TF63-SC 49/63
SP5	Tricône 66mm (2"5/8) -OHD-, sous système de mise en place TUBA®	Tube fendu 63mm, sonde 44 cellule courte, gaine toilée renforcée TF63-SC 49/63
SP6	Tricône 63.5mm (2"1/2) -OHD-, sous boue bentonitique	Tube fendu 60mm, sonde 44 cellule courte, gaine toilée renforcée TF60-SC 46/60
SP7	Tricône 63.5mm (2"1/2) -OHD-, sous boue bentonitique	SN60 : sonde nue 60mm, gaine caoutchouc de 3mm d'épaisseur – Lutz
SP8	Roto STAF®	Tube fendu 63mm, sonde 44 cellule longue, gaine toilée renforcée TF63-SL 49/63- Apageo

La relative compacité des sables n'a pas permis de réaliser des essais au tube fendu directement battu qui étaient initialement prévus pour certains sondages.

3. Analyse des résultats

Les essais ont été interprétés selon la norme NF EN ISO 22 476-4, en retenant comme pression limite p_{LM} la plus faible des valeurs obtenues par les méthodes d'extrapolation inverse et double-hyperbole ; pour le module pressiométrique E_M on a retenu la formule de la gaine souple (§ D.5.2.2) pour les essais de SP1, SP2 et SP7, et la formule du tube fendu (§ D.5.2.3) pour les essais de SP3, SP4, SP5, SP6 et SP8 (cf. Fig.1).

Les moyennes et écart-types ont été calculés pour la couche de sable moyennement dense entre 3 et 7/8m de profondeur (cf. tableau 1) ; pour les sables denses entre 7/8 et 10m, nous avons reporté les moyennes dans le tableau 2, mais le nombre d'essais par sondage étant faible (3 pour le SP7, et 2 pour tous les autres sondages), il n'a pas été réalisée d'analyse qualitative.

Le calcul du module a également été réalisé pour les essais au tube fendu avec la formule de la sonde nue, qui est une pratique autorisée par la norme. On constate que les valeurs obtenues pour les sondes longues sont majorées de 1.17 et celles pour les sondes courtes de 1.27 (calcul effectué pour un diamètre intérieur de tube de calibre de 6.8 cm, et un diamètre extérieur de la partie de la sonde avec tube fendu de 4.4 cm).

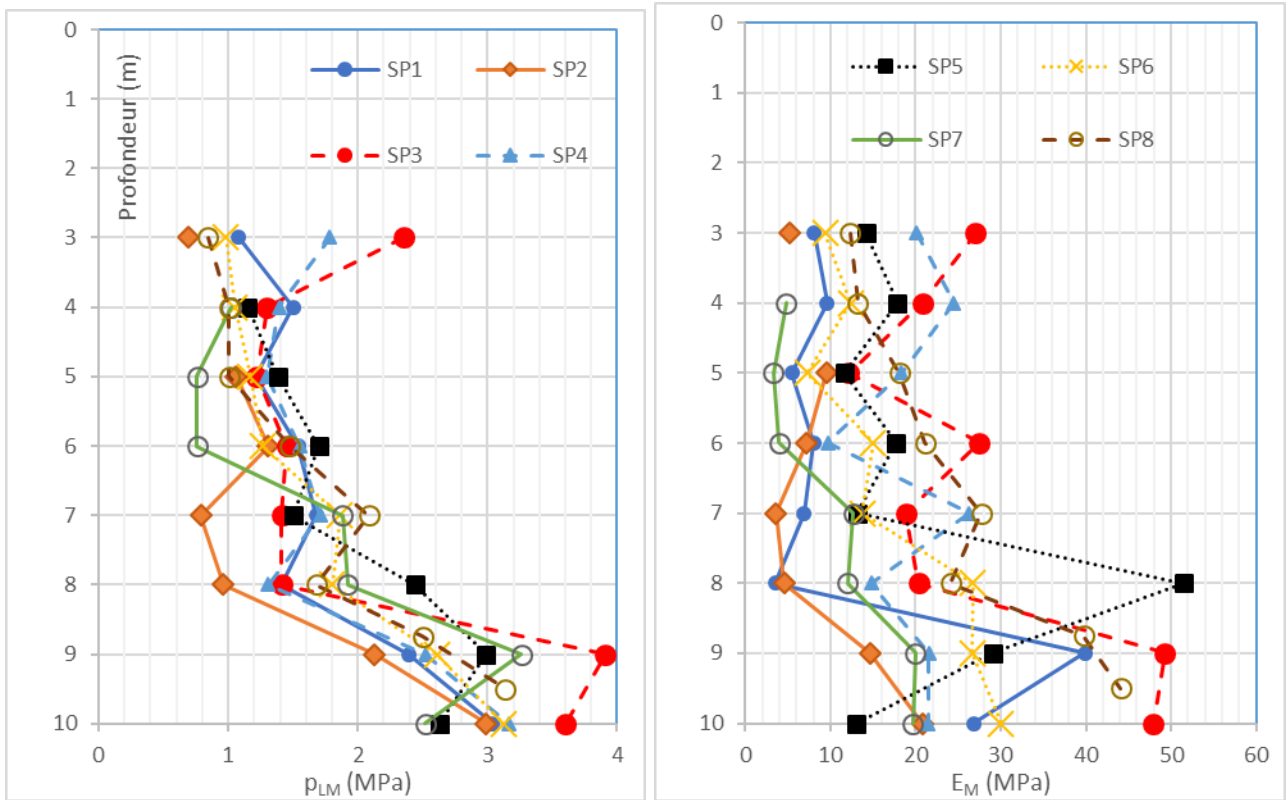


Figure 1. Pressions limites (p_{LM}) et modules pressiométriques (E_M) mesurés à Messanges.

Tableau 2. Valeurs moyennes μ et écart-types σ (sables de 3 à 7/8m)

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8
μp_{LM}	1.35	0.88	1.71	1.62	1.53	1.42	1.27	1.35
σ	0.27	0.27	0.43	0.23	0.62	0.39	0.59	0.48
$\mu - \sigma$	1.07	0.61	1.28	1.39	0.92	1.03	0.68	0.87
$\mu + \sigma$	1.62	1.15	2.15	1.85	2.15	1.8	1.85	1.83
μ/σ	20%	31%	25%	14%	41%	27%	46%	36%
μE_M	7.0	6.0	21.1	18.9	14.9	14.1	7.4	19.4
σ	2.2	2.4	5.7	6.1	2.8	6.8	4.6	6.1
$\mu - \sigma$	4.8	3.7	15.4	12.8	12.1	7.3	2.8	13.3
$\mu + \sigma$	9.1	8.40	26.8	25.1	17.7	20.9	12	25.5
μ/σ	31%	40%	27%	32%	19%	48%	62%	31%
$\mu E_M/p_{LM}$	6.3	7	12.3	10.6	10.9	9.7	5.9	14.7

Tableau 2. Valeurs moyennes (sables de 7/8m à 10m)

SP1			SP2			SP3			SP4		
E_M	p_{LM}	E_M/p_{LM}	E_M	p_{LM}	E_M/p_{LM}	E_M	p_{LM}	E_M/p_{LM}	E_M	p_{LM}	E_M/p_{LM}
33.3	3.42	9.8	17.7	2.55	7.0	48.6	4.07	11.9	21.5	3.00	7.2
SP5			SP6			SP7			SP8		
E_M	p_{LM}	E_M/p_{LM}	E_M	p_{LM}	E_M/p_{LM}	E_M	p_{LM}	E_M/p_{LM}	E_M	p_{LM}	E_M/p_{LM}
31.2	2.90	10.7	28.4	2.99	9.5	19.9	2.89	6.9	41.9	2.82	14.9

Pour les sables moyennement denses de 3 à 7/8m, la moyenne des valeurs tous sondages confondus (45 essais) est pour la pression limite de $\mu p_{LM} = 1.39$ MPa (écart-type 0.25 MPa), et pour le module pressiométrique $\mu E_M = 13.6$ (écart-type 6.09 MPa). Les 3 forages dans lesquels les essais ont été réalisés à la sonde nue, donnent des valeurs pressiométriques en moyenne plus faibles que ceux réalisés au tube fendu, différences plus ténues sur les pressions limites, mais importantes sur les modules pressiométriques.

Ainsi en comparant à la p_{LM} moyenne de SP1, les valeurs en sonde nue (SP2, SP7) sont de 0.65 à 0.94 fois cette moyenne, alors que les essais au tube fendu donnent des valeurs de 1 à 1.27 fois cette moyenne. Ces variations peuvent néanmoins s'expliquer par les variations normales de caractéristiques mécaniques liées à l'hétérogénéité du sable (18% de coefficient de variation sur les moyennes de chaque forage).

En comparant au module moyen de SP1 (sondage de référence), les valeurs en sonde nue (SP2, SP7) sont de 0.86 à 1.06 fois cette moyenne, alors que les essais au tube fendu donnent des modules supérieurs de 2 à 3 fois cette moyenne. Ces variations ne peuvent pas s'expliquer seulement par les variations normales de caractéristiques mécaniques liées à l'hétérogénéité du sable : on observe ainsi que le rapport E_M/p_{LM} est toujours faible pour les essais à la sonde nue (5.9 à 7.0 en moyenne), alors qu'il est moyen pour les tubes fendus à cellule courte (SP4, SP5, SP6) à élevé pour les tubes fendus à cellule longue (SP3, SP8).

On rappellera que selon Ménard (Ménard, 1958), des rapports E_M/p_{LM} entre 5 et 8 sont habituels dans les sols tels que sables et graviers ou sables limoneux sous nappe. Par ailleurs, Cassan (Cassan, 1988) explique que les rapports E_M/p_{LM} peuvent présenter une dispersion assez importante, y compris dans des sables d'apparence très homogène. Ainsi son exemple sur les sables de vallée de Saône, où une population de 117 essais permettait de caractériser deux familles, la première avec $E_M/p_{LM} = 7$, la seconde avec $E_M/p_{LM} = 13$, la dispersion traduisant l'influence du serrage du matériau.

Compte tenu du faible nombre d'essais, il convient d'être prudent quant à l'interprétation de telles différences, notamment entre cellules longues et courtes ; cependant l'écart entre sonde nue et tube fendu pose problème, d'autant que les essais ont tous été réalisés en préforage.

Par ailleurs, on peut considérer que le type de gaine : caoutchouc de 3mm d'épaisseur (SP1), ou toilée renforcée (SP2) n'influe pas significativement les résultats, les plus faibles valeurs de pression limite en SP2 étant vraisemblablement liées à une plus faible compacité du sol.

4. Propositions de corrections

4.1. Correction de géométrie

Jacques Monnet propose pour l'interprétation des essais pressiométriques (Monnet et al, 2016), de tenir compte de la forme réelle de la gaine de protection constitutive de la sonde pendant l'essai d'expansion. Alors que le modèle de calcul pressiométrique suppose un cylindre qui se dilate de façon uniforme sur toute la longueur de la cellule de mesure, Monnet considère que la déformation de la sonde peut être simulée par une poutre posée sur appuis élastiques : en appuis simples pour la sonde nue, et encadrée aux extrémités pour le tube fendu. Dans le cadre des travaux d'ARSCOP, il reprend l'interprétation des essais réalisés à Messanges (Monnet, 2020), en tenant compte de cette correction (cf. tableau 3 et figure 2.)

La moyenne des valeurs tous sondages confondus est pour la pression limite de $\mu p_{LM} = 0.81$ MPa (écart-type 0.17MPa), et pour le module pressiométrique $\mu E_M = 8.87$ (écart-type 3.64MPa). Les différences entre sonde nue et tube fendu restent significatives pour le module pressiométrique mais sont moins dispersées selon le type de sonde ; en revanche, la pression limite, plus faible pour tout type de sonde, est encore moins dispersée.

Les ratios entre paramètres ainsi calculés (cf. tableau 4) conduisent à diviser par environ 2.2 les pressions limites calculés pour les tubes fendus, alors que les valeurs sont très légèrement minorées pour les sondes nues. Le module pressiométrique est diminué de façon beaucoup plus variable : d'un facteur 1.23 et 1.66 pour les sondes nues, et de

1.53 à 2.36 pour les tubes fendus, sans qu'il apparaisse de règle entre cellule longue et cellule courte. Il en résulte que le rapport E_M/p_{LM} est fortement diminué pour les sondes nues (1.3 et 1.65), et fortement augmenté pour les tubes fendus.

Ce type de correction doit faire l'objet d'analyse complémentaire car elle diminue de façon importante les valeurs pressiométriques, ce qui aurait évidemment un impact sur les modes de calcul des ouvrages géotechniques liés au pressiomètre Ménard.

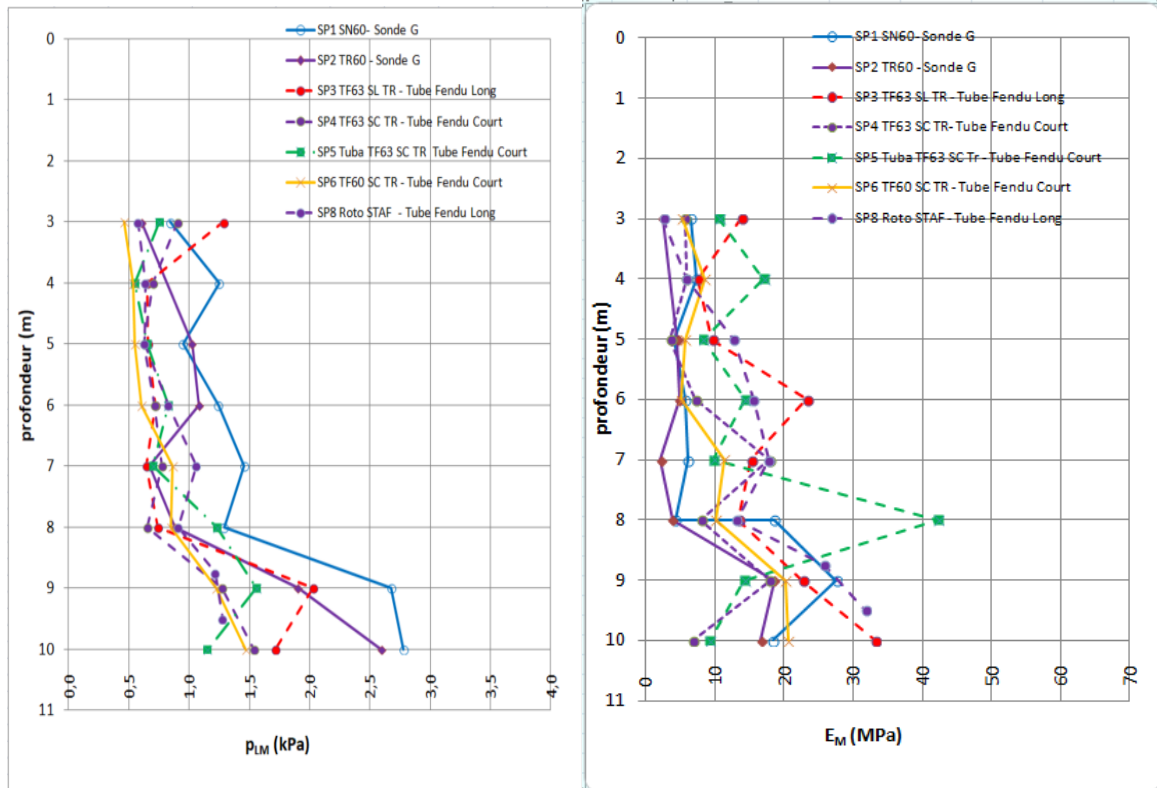


Figure 2. Pressions limites (p_{LM}) et modules pressiométriques (E_M) corrigés par J. Monnet.

Tableau 3. P_{LM} et E_M corrigées de la géométrie de la sonde

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP8
μp_{LM}	1.17	0.85	0.78	0.73	0.7	0.64	0.77
σ	0.23	0.21	0.25	0.1	0.1	0.17	0.19
$\mu - \sigma$	0.94	0.64	0.53	0.63	0.6	0.47	0.58
$\mu + \sigma$	1.4	1.06	1.03	0.83	0.8	0.81	0.96
μ/σ	20%	25%	32%	14%	14%	27%	25%
μE_M	5.7	3.6	13.78	8	12	7.71	11.3
σ	1.24	1.26	5.49	5.07	3.58	2.65	5.83
$\mu - \sigma$	4.45	2.35	8.29	2.93	8.42	5.06	5.47
$\mu + \sigma$	6.93	4.87	19.27	13.07	15.58	10.36	17.13
μ/σ	22%	35%	40%	63%	30%	34%	52%
$\mu E_M/p_{LM}$	4.9	4.2	17.7	11.0	17.1	12.0	14.7

Tableau 4. Rapports de P_{LM} et E_M entre valeurs selon NF EN ISO 22476-4 et valeurs corrigées de la géométrie de la sonde

RATIOS	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP8
p_{LM}	1.15	1.04	2.19	2.22	2.19	2.22	1.75
E_M	1.23	1.66	1.53	2.36	1.24	1.83	1.72
E_M/p_{LM}	1.30	1.65	0.70	0.97	0.64	0.81	1.00

4.2. Homogénéisation des calculs

Dans le cadre d'ARSCOP, une enquête avait permis à 17 partenaires d'interpréter 4 essais pressiométriques (Jacquard et Al, 2018). Parmi les constats, il est apparu que plusieurs modalités de calcul de la pente a de la « droite » de calibrage conduisaient à une dispersion d'autant plus importante sur la valeur de module calculée, que la déformabilité du terrain était faible (jusqu'à 40% d'écart pour des modules pressiométriques de l'ordre de 100 MPa). Il serait donc souhaitable que la pratique soit homogénéisée pour réduire les écarts liés à l'utilisateur : soit prise en compte des 3 ou 4 derniers points, soit régression linéaire sur tous les points à partir de 1 MPa, par exemple.

Enfin, le mode normalisé de définition des points p_1 et p_2 ne satisfaisant pas nécessairement la personne en charge de l'interprétation de l'essai, la pratique consiste à faire varier manuellement ces points, ce qui bien évidemment conduit à des résultats potentiellement assez différents d'un utilisateur à l'autre ; là encore, il serait utile d'évoluer vers une méthode univoque du mode de calcul du module pressiométrique pour limiter les incertitudes sur les valeurs, liées à l'interprétation elle-même.

5. Conclusions

Les essais croisés réalisés dans les sables moyennement denses à denses de Messanges à partir de préforages à l'outil désagrégateur et sous boue bentonitique permettent de vérifier que le type de sonde et de gaine n'affectent pas de façon significative la pression limite mesurée, les différences étant plutôt liées à l'hétérogénéité de compacité du sol. Cependant, les valeurs du module pressiométrique sont significativement plus élevées avec le tube fendu, que ce soit avec la sonde à cellule longue ou courte, qu'avec la sonde nue ; ceci pose évidemment problème, d'autant que l'utilisation de tube fendu en préforage n'est pas interdite par la norme, et que cette méthode est largement utilisée dans la profession pour essayer de limiter les risques d'éclatement.

Pour limiter l'écart des valeurs de module obtenues entre sonde nue et tube fendu, il est également recommandé d'utiliser pour le tube fendu exclusivement la formule du § D.5.2.3 de la norme NF EN ISO 22 476-4, en corrigeant ainsi certaines pratiques actuelles.

La méthode proposée par Monnet pour corriger les valeurs pressiométriques, réduit certes les écarts entre valeurs obtenues avec les différents types de sonde, mais diminue aussi de façon extrême les pressions limites ainsi obtenues, ce qui aurait des conséquences significatives pour le dimensionnement des ouvrages si elles devaient être prises en compte. Il est donc nécessaire de poursuivre les investigations pour proposer des facteurs de corrections en fonction du matériel qui soient pertinents.

Enfin, une évolution des méthodes d'interprétation est souhaitable pour faire en sorte que l'incertitude sur les valeurs des paramètres pressiométriques soit réduite à la qualité d'exécution du forage et des essais, et à la précision des matériels de mesure.

6. Références bibliographiques

- AFNOR (2015). Essais en place- Essais au pressiomètre Ménard. NF EN ISO 22 476-4.
Cassan M. (1988). Les essais in situ en mécanique des sols¹. Réalisation et interprétation, Eyrolles, pp. 268-270

- Jacquard C. (2019). Compte rendu d'intervention- essais croisés Messanges. Ed. ARSCOP
- Jacquard C., Varksin S. (2018). Rapport d'enquête relative à la pratique de l'essai pressiométrique. Ed. ARSCOP
- Ménard L. (1958). Le pressiomètre Louis Ménard- règles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondation- notice générale D60
- Monnet J., Mahmutovic D., Boutonnier L. (2016). Membrane correction for pressuremeter test. ISSMGE publications.
- Monnet J. (2020). Influence de la géométrie de la sonde- Analyse des essais croisés de Messanges- Logiciel Gaiapress. Ed. ARSCOP