

ETUDE ET RELATION ENTRE LES MODULES PRESSIOMETRIQUE ET ELASTIQUE DU SOL

STUDY AND RELATION BETWEEN THE PRESSUREMETER AND ELASTIC MODULI OF SOIL

Ali FAWAZ¹, Elias FARAH², Fadi HAGECHEHADE³

1,3 Université Libanaise, Institut Universitaire de Technologie (Saida) & Ecole Doctorale des Sciences et Technologies, Centre de Modélisation, PRASE, Beyrouth, Liban

2 Ecole Doctorale des Sciences et Technologies, Centre de Modélisation, PRASE, Beyrouth, Liban

RÉSUMÉ — L'essai pressiométrique est l'un des essais in-situ les plus utilisés dans le monde, il connaît, depuis sa mise au point en 1957, un essor considérable. Cet essai de reconnaissance du sol en place est simple à exécuter et il est associé à une méthode de calcul des fondations superficielles ou profondes. Parmi les informations qui peuvent être déduites directement de cet essai, on note en particulier la pression limite et le module pressiométrique. Par contre, la détermination du module d'élasticité du sol à partir du module pressiométrique reste toujours un objet de discussion et de travaux de recherche. Dans cette étude, on présente une méthodologie permettant de déterminer ce module en utilisant le logiciel de calcul par éléments finis PLAXIS en conditions réelles de l'essai. A cet égard, des séries d'essais pressiométriques ont été réalisées in situ dans trois sites du sol au Liban et à différentes profondeurs. Les sites ont été choisis de façon à recouvrir plusieurs types de sol au Liban, où dix forages ont été exécutés. De plus, des échantillons du sol ont été prélevés à partir de ces forages et soumis à des essais de laboratoire. La simulation numérique des essais pressiométriques conduit à reproduire numériquement la courbe pressiométrique expérimentale en trouvant une combinaison des paramètres mécaniques convenables du sol, d'où la détermination du module d'élasticité du sol. Les deux modules pressiométriques et élastiques sont ainsi comparés pour les différents types du sol. Les résultats obtenus sont forts encourageants et permettent ainsi de caractériser les sols pour une modélisation plus fine pour le calcul d'ouvrages.

ABSTRACT — the pressuremeter test is one of the most worldwide in-situ tests which is commonly used since its development in 1957. This test is simple to perform and it is associated to a calculation method for the shallow or deep foundations. Among the information directly deduced from this test, we note in particular the limit pressure and the pressuremeter modulus. However, the determination of the elastic modulus of soil from the pressuremeter modulus remains a subject of discussions and researches. In this study, we present a methodology to determine this modulus using finite elements software PLAXIS in real conditions of the test. For this purpose,

pressuremeter tests were executed in three sites in Lebanon at different depths. The sites were selected to cover several types of soils in Lebanon, where ten boreholes were drilled. In addition, soil samples collected are subjected to laboratory tests. The simulation of pressuremeter tests leads to reproduce numerically the experimental pressuremeter curve by finding a suitable combination of soil's mechanical parameters and consequently, we extracted the elastic modulus. Both pressuremeter and elastic moduli are compared to different types of soil. The results obtained are very encouraging and allow us to characterize the soil necessary for structures design.

1. Introduction

L'essai pressiométrique est l'un des essais in-situ les plus utilisés dans le monde depuis son développement par Louis Menard en 1957. Il est utilisé pour évaluer la capacité portante des fondations et les tassements prévus (Baguelin et al., 1978). La courbe pression-volume obtenue à partir de cet essai est utilisée pour calculer le module pressiométrique E_M . Cependant, ce module se distingue du module élastique E qui est l'un des paramètres principaux du sol. La valeur du module pressiométrique et la déduction du module d'élasticité à partir de l'essai pressiométrique restent des objets de discussion et de recherches (Gambin et al., 1996). Le module pressiométrique a été relié de façon empirique au module élastique du sol selon la formule suivante: $E_M/E = \alpha$, (Menard, 1965), où α est défini par Menard comme étant le coefficient rhéologique ayant une valeur comprise entre 0 et 1. Combarieu et Canépa (2001) ont mentionné que c'est un peu complexe de calculer un module à partir de la réponse des cycles déchargements – rechargement dans un essai pressiométrique réel. Goh et al. (2012) ont proposé une corrélation entre le module pressiométrique et la valeur N (nombre des coups) de SPT.

Le développement des méthodes numériques a permis de chercher d'autres façons pour extraire le module élastique à partir des essais pressiométriques (Biarez et al., 1998).

Dans cet article, on présente les résultats d'une série des essais pressiométriques in-situ à différentes profondeurs. Les échantillons de sol sont prélevés et testés au laboratoire. Les essais pressiométriques sont ensuite simulés numériquement en utilisant le logiciel Plaxis pour déterminer le module élastique et de le comparer à celui pressiométrique. Les résultats numériques sont comparés aux résultats expérimentaux et analytiques. Ils sont enfin regroupés selon le type du sol afin de proposer un rapport entre le module pressiométrique et celui élastique pour les différents types de sols testés.

2. Méthodologie

Des essais pressiométriques sont réalisés dans 10 forages in-situ, les essais pressiométriques expérimentaux sont simulés numériquement en utilisant le logiciel Plaxis, La géométrie du modèle, les conditions aux limites sont choisies de façon à

refléter les conditions réels in-situ, l'étude numérique comprend le choix des premières valeurs saisies de paramètres du sol selon son type et de modifier progressivement ces caractéristiques mécaniques afin de reproduire à partir de cette analyse numérique une courbe pressiométrique la plus proche possible de celle obtenue expérimentalement. Cette procédure permet de déterminer les paramètres du sol : le module élastique E , la cohésion C et l'angle de frottement interne ϕ .

3. Essais expérimentaux

Nous présentons dans la suite les résultats des essais expérimentaux de 10 forages exécutés dans 3 sites différents. Des échantillons de sol sont également prélevés à partir de ces forages et testés au laboratoire pour déterminer la classification des couches de sol selon USCS (Unified Soil Classification System) comme décrit dans le tableau 1. Sept séries d'essais pressiométriques ont été réalisés dans un site montagneux près de Daher Elbaidar, le deuxième site est situé à Bekaa, et le troisième site est à Beyrouth au Liban. La figure 1 montre l'évolution des courbes pressiométriques avec la profondeur dans les trois sites pour certains sondages.

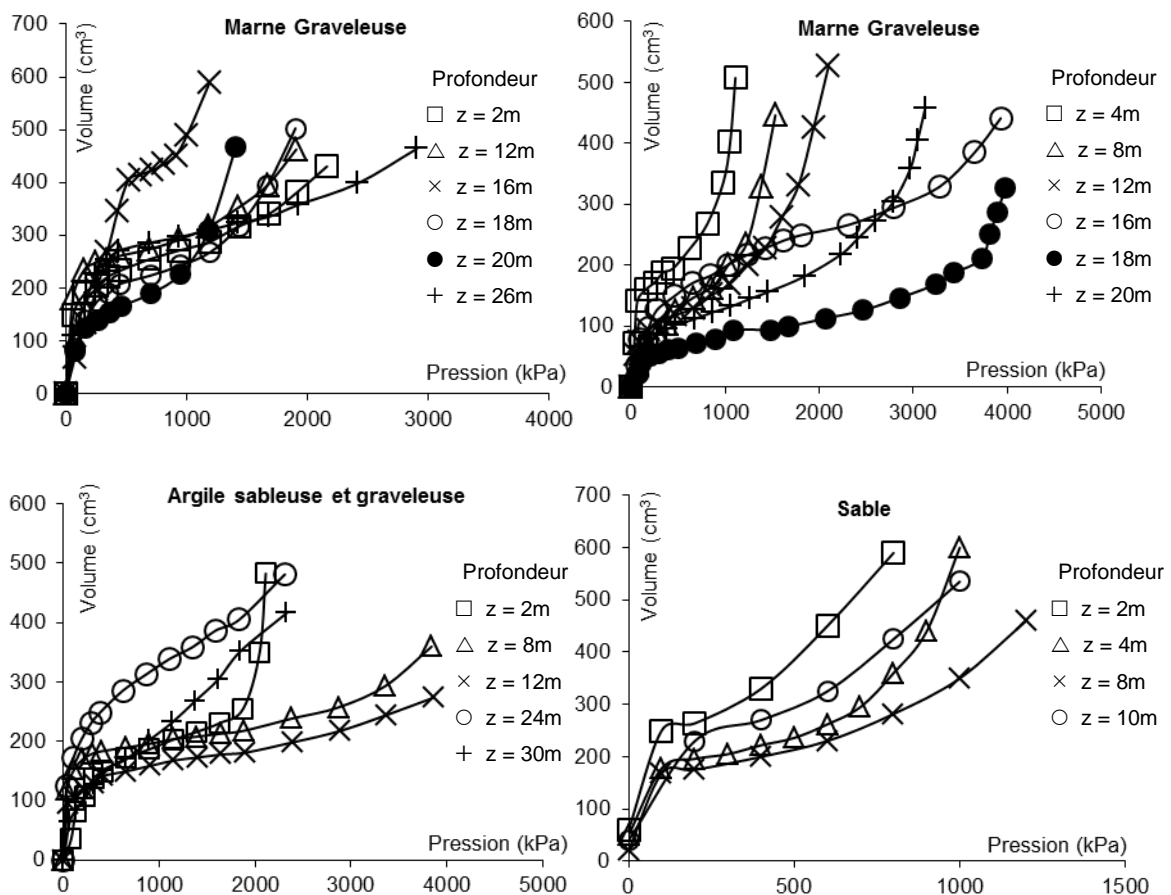


Figure 1. Evolution des courbes expérimentales avec la profondeur

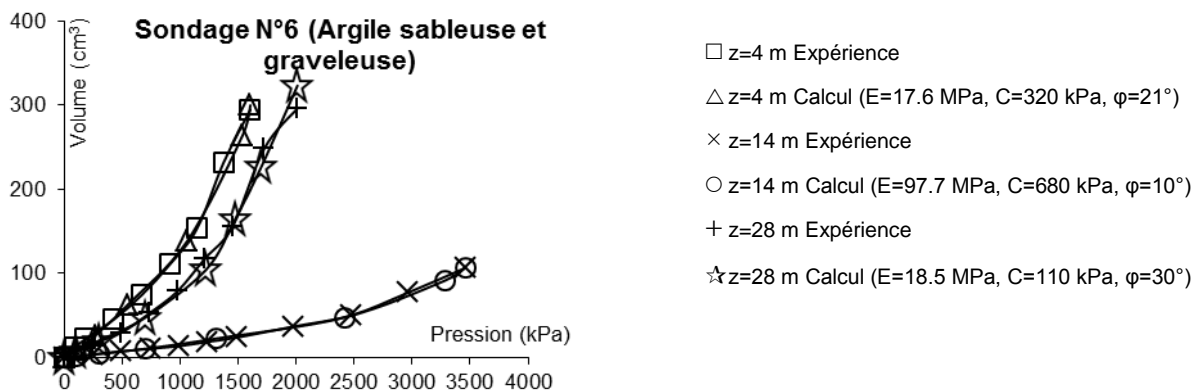
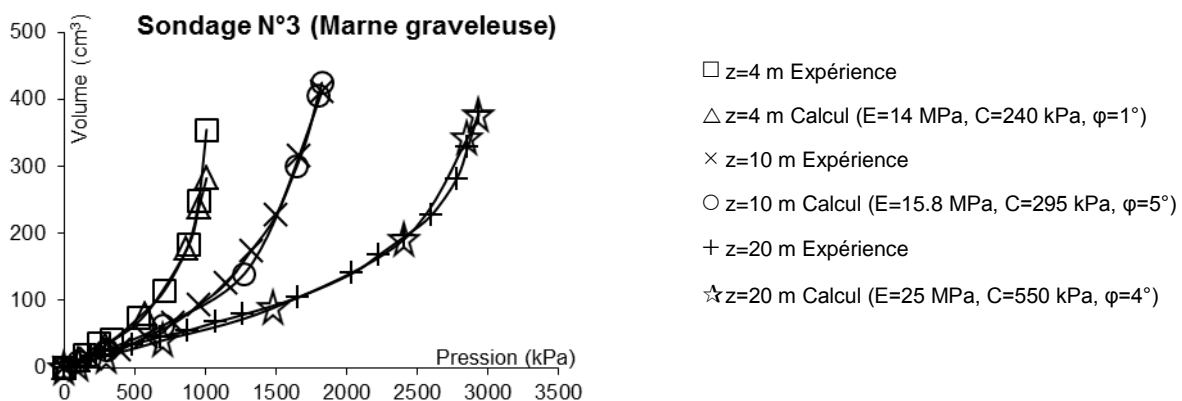
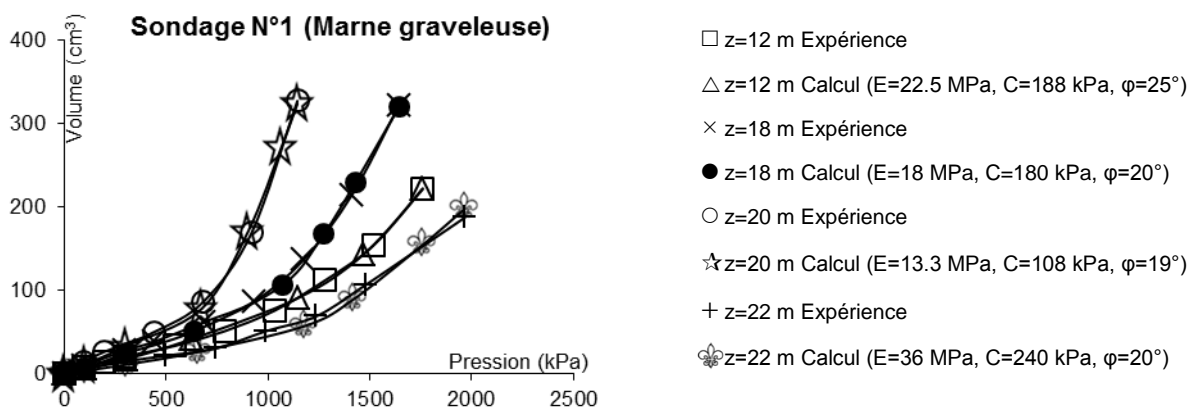
Tableau 1. Distribution des couches de sol avec la profondeur et classification selon USCS

Sondages	Profondeur	Identification (USCS)	Couches
N°1	0 to 10 m		Mélange d'argile et graviers en calcaire
	10 to 21 m	CL	Marne graveleuse
	21 to 25 m	GC	
	25 to 33.5 m	CL	
	33.5 to 53 m	SC, SM or GM	
N°2	0 to 10 m		Mélange d'argile et graviers en calcaire
	10 to 16 m	CL	Sable
	16 to 17 m	ML	Marne graveleuse
	17 to 50 m	CL	Sable graveleux
	50 to 54 m	SW-SM and SC	
N°3	0 to 6 m		Marne graveleuse
	6 to 8 m	CL	
	8 to 17 m	GC	
	17 to 21 m	CL	
N°4	0 to 9 m		Marne graveleuse
	9 to 33.5 m	CL	Sable
	33.5 m to 37.5 m	SC-SM	Argile
	37.5 m to 43 m	CL	
N°5	0 to 9 m	CL	Argile graveleuse
	9 m to 24.5 m		Marne et marne graveleuse
N°6	0 to 6 m	CL	Argile sableuse et graveleuse
	6 to 8 m		Argile
	8 to 26 m		Marne graveleuse
	26 to 28m	ML	Sable
	28 to 28.5 m	SC	
N°7	0 to 15 m	SC	Sables et graviers argileux
	15 to 24 m	CL	
	24 to 38 m	GW-GC	
N°8	0 to 8 m		Argile
	8 to 14.7 m	CL	
	14.7 to 18.5 m	SC	
	18.5 to 26 m	CL	
N°9	0 to 5.5 m		Argile
	5.5 to 13 m	CL-ML	
	13 to 25 m	CL	
N°10	2 to 17 m	SM	Sable

4. Analyse numérique

En appliquant la méthodologie de l'analyse numérique décrite ci-dessus, l'essai pressiométrique a été simulé pour les dix forages à des profondeurs différentes. Comme comportement du sol, le modèle de Mohr-Coulomb non associé avec un

coefficient de Poisson $\nu = 0,33$ a été utilisé. Trois paramètres sont inconnus: le module d'élasticité E , la cohésion C et l'angle de frottement φ . Partant d'une première combinaison de ces trois paramètres convenables avec le type du sol à la profondeur de l'essai, le module pressiométrique E_M peut être utilisé comme une première valeur saisie, nous changeons les valeurs de ces paramètres pour reproduire numériquement la courbe pressiométrique expérimentale tout en faisant attention à ce que les deux pentes des courbes expérimentales et numériques dans la phase élastique soient similaires. La figure 2 montre quelques exemples de comparaison entre la courbe pressiométrique calculée et celle expérimentale à certaines profondeurs des sondages N°1, N°3, N°6 et n°10 respectivement, en notant que le point (P_0, V_0) est pris comme origine des axes.



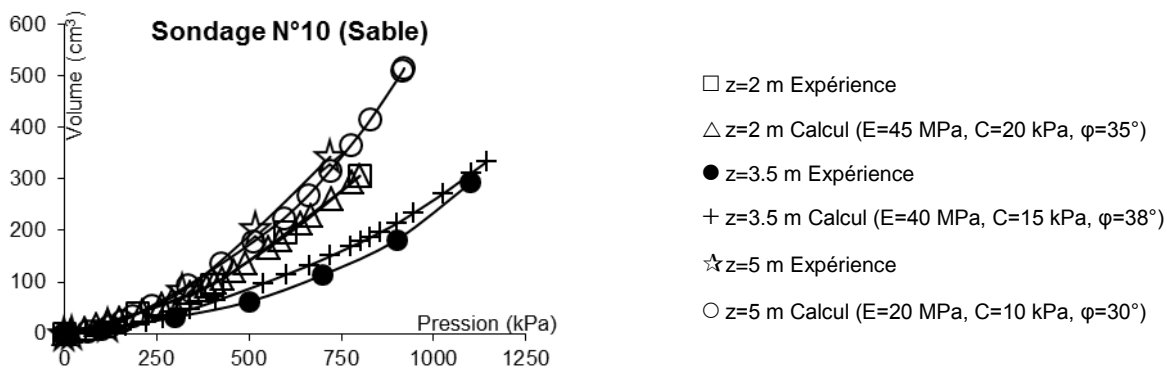


Figure 2. Courbes pressiométriques expérimentales et numériques à différentes profondeurs

Les courbes expérimentales sont reproduites numériquement, les valeurs obtenues des trois paramètres mécaniques E , C et ϕ seront comparées aux résultats analytiques et du laboratoire. En se basant sur la formule de Pasturel, Combarieu (1995) a évolué une relation théorique reliant la pression limite P_l aux paramètres E , ν , C et ϕ du sol. Pour un sol frottant et cohérent (C et ϕ différents de 0), la relation

est:

$$P_l + c \cot \phi = (P_0 + c \cot \phi) (1 + \sin \phi) \left[\frac{E}{2(1+\nu)(P_0 + c \cot \phi) \sin \phi} \right]^{\frac{\sin \phi}{1 + \sin \phi}}$$

Selon cette formule et en utilisant les valeurs de la pression au repos P_0 et la pression limite P_l déterminées à partir de l'essai in-situ et du module d'élasticité obtenu par l'analyse numérique, nous calculons la cohésion et l'angle de frottement pour les comparer aux résultats numériques.

5. Résultats

Tous les résultats sont regroupés selon les types des sols rencontrés dans les 3 sites testés. On distingue 6 types: argiles, argiles sableuses et graveleuses, sables et graviers argileux, marnes, marnes graveleuses et sables. Les tableaux 2, 3, 4, 5 et 6 montrent les résultats expérimentaux, numériques et analytiques groupées selon le type des matériaux constituant les couches de sol. On montre aussi le rapport du module pressiométrique sur la pression limite et sur le module d'élasticité.

Tableau 2. Résultats expérimentaux, numériques et analytiques pour les marnes

Marnes									
E_M (MPa)	P_0 (kPa)	P_l (kPa)	Résultats numériques			Résultats analytiques		E_M/P_l	E_M/E
			E (MPa)	C (kPa)	ϕ_0	C (kPa)	ϕ_0		
14	278	2150	16	160	16	291	20	6.51	0.88
40	180	2690	48	138	22	241	21	14.87	0.83
41	864	4290	50.2	450	17	342	15	9.56	0.82
13	104	1522	13.1	85	23	232	24	8.54	0.99

Tableau 3. Résultats expérimentaux, numériques et analytiques pour les argiles

Argiles									
E_M (MPa)	P_0 (kPa)	P_l (kPa)	Résultats numériques			Résultats analytiques		E_M/P_l	E_M/E
			E (MPa)	C (kPa)	φ_0	C (kPa)	φ_0		
9	100	1108	14	240	1	240	1	8.12	0.64
7	76	960	8.5	220	1	242	1	7.29	0.82
11	276	2200	15.8	295	5	391	13	5.00	0.70
52	100	4400	95	680	7	685	9	11.82	0.55
32	299	3980	40	480	4	705	12	8.04	0.80
22	190	3150	25	550	4	710	9	6.98	0.88
27	165	1720	38	195	7	218	9	15.70	0.71
63.5	400	4100	73	650	2	700	4	15.49	0.87
85	400	4400	97.7	680	10	539	10	19.32	0.87
4	67	627	5.3	36	17	164	12	6.38	0.75
16	186	890	18	38	2	84	9	17.98	0.89
12	57	1550	14	180	2	385	7	7.74	0.86
11	81	1550	16	148	9	375	9	7.10	0.69
14	87	1450	17	145	3	342	3	9.66	0.82
11	576	2100	13	180	4	406	4	5.24	0.85

Tableau 4. Résultats expérimentaux, numériques et analytiques pour les sables et graviers argileux

Sables et graviers argileux									
E_M (MPa)	P_0 (kPa)	P_l (kPa)	Résultats numériques			Résultats analytiques		E_M/P_l	E_M/E
			E (MPa)	C (kPa)	φ_0	C (kPa)	φ_0		
1.24	68	400	1.45	120	19	103	16	3.10	0.86
3.89	147	604	4.1	140	20	61	15	6.44	0.95
1.39	61	302	1.5	60	17	47	17	4.60	0.93
3.7	157	700	4.1	175	17	86	16	5.29	0.90
10	100	1533	12.5	183	24	244	23	6.52	0.80
114.5	980	4200	120	176	13	32	17	27.26	0.95
17	400	2410	18.5	110	30	129	30	7.05	0.92
48	434	4000	51	180	25	400	20	12.00	0.94

Tableau 5. Résultats expérimentaux, numériques et analytiques pour les argiles sableuses et graveleuses

Argiles sableuses et graveleuses									
E_M (MPa)	P_0 (kPa)	P_l (kPa)	Résultats numériques			Résultats analytiques		E_M/P_l	E_M/E
			E (MPa)	C (kPa)	φ^o	C (kPa)	φ^o		
4	159	672	5.5	90	2	115	4	5.95	0.73
11	165	2200	12.4	430	10	539	14	5.00	0.89
40	676	4300	63	800	20	604	19	9.30	0.63
14.1	200	1804	17.5	320	21	232	18	7.82	0.81
24	350	2307	28.1	150	25	147	22	10.40	0.85
18	300	2500	20	290	25	278	25	7.20	0.90
14	300	2306	15	300	30	271	28	6.07	0.93

Tableau 6. Résultats expérimentaux, numériques et analytiques pour les sables

Sables									
E_M (MPa)	P_0 (kPa)	P_l (kPa)	Résultats numériques			Résultats analytiques		E_M/P_l	E_M/E
			E (MPa)	C (kPa)	φ^o	C (kPa)	φ^o		
12	200	1200	45	20	35	13	20	10.00	0.27
23	100	1100	40	10	28	14	29	20.91	0.58
26	100	1300	40	15	38	14	18	20.00	0.65
18	100	1200	20	10	30	31	38	15.00	0.90
77	150	Non atteinte	120	36	45	-	-	-	0.64
112	146	Non atteinte	250	20	40	-	-	-	0.45

6. Synthèse des résultats

Les tableaux présentés ci-dessus résument tous les résultats obtenus dans les trois sites différents regroupés selon les types de sols. Menard a proposé un rapport E_M/E compris entre 0 et 1, ce rapport est récupéré par ces résultats et une minimisation de cet intervalle est obtenue comme suit pour certains types de sols:

- Argiles: $0,55 < \alpha < 1$
- Argiles sableuses et graveleuses: $0,6 < \alpha < 1$
- Sables et graviers argileux: $0,8 < \alpha < 1$
- Marnes graveleuses : $0,55 < \alpha < 1$
- Marnes: $0,8 < \alpha < 1$
- Sables: $0,25 < \alpha < 1$

La figure 3 ci-dessous montre que le module pressiométrique augmente avec la pression limite nette $P_l^* = P_l - P_0$. La figure 4 montre l'évolution du rapport du module

pressiométrique sur le module élastique E_M/E en fonction de la pression limite nette P_l^* . Ces courbes confirment la classification dressée ci-dessus.

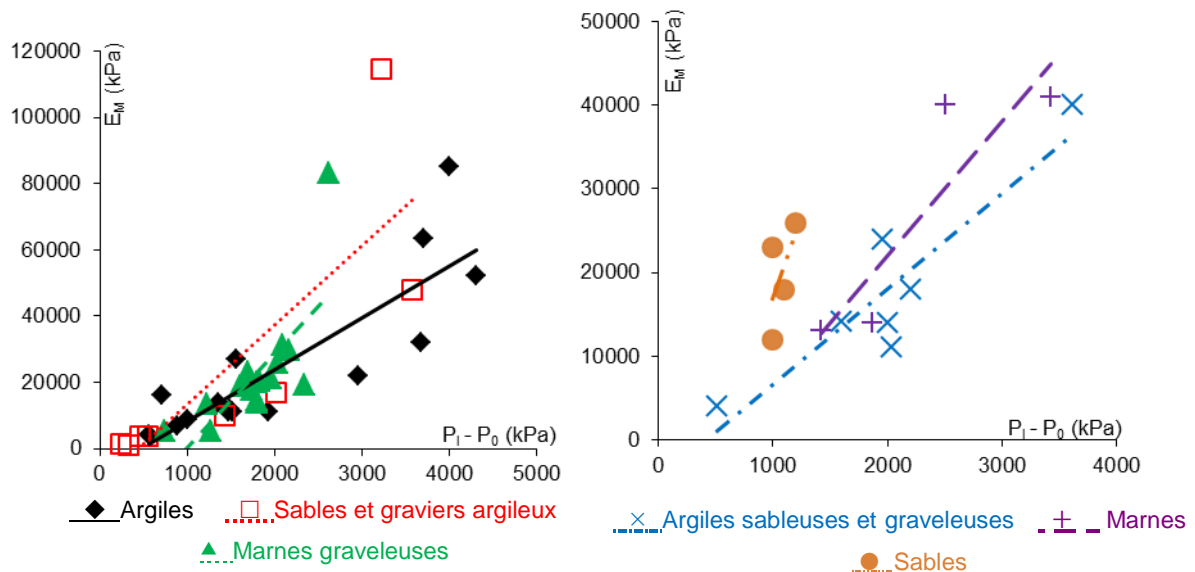


Figure 3. Variation de E_M en fonction de $P_l - P_0$ suivant les types du sol

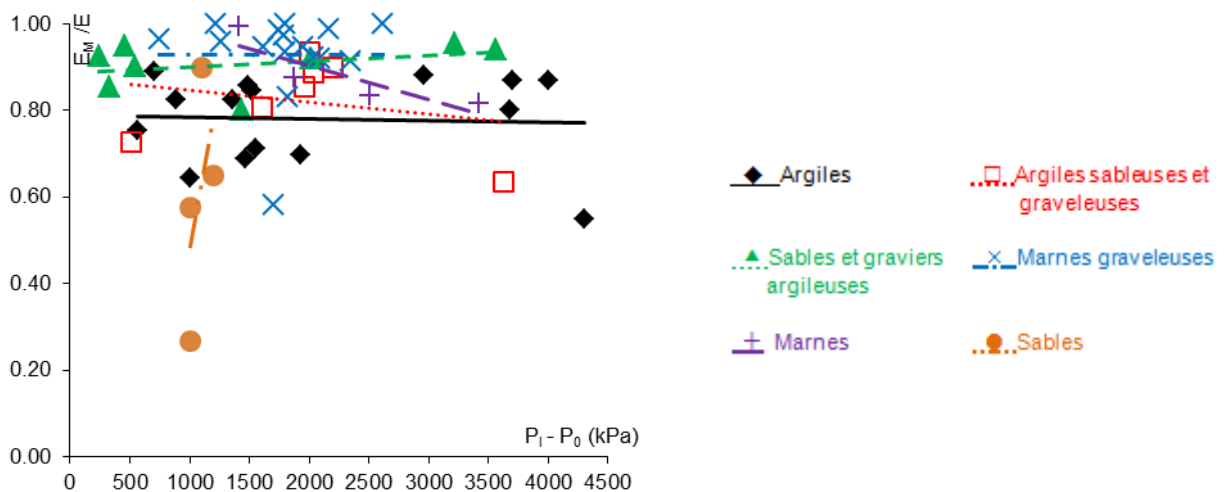


Figure 4. Variation de E_M/E en fonction de $P_l - P_0$ suivant les types du sol

Le module élastique introduit dans les calculs peut être calculé en tenant compte de l'élasticité du sol avec une amplitude de déformation de limite inférieure. Sur les courbes pressiométriques numériques, les modules ont été calculés comme étant mesurés dans des tests réels. Ils correspondent à une grandeur de déformation comprise entre 10^{-2} et 10^{-1} .

Des échantillons de sol testés au laboratoire sont, à quelques profondeurs, soumis à l'essai de la boîte de cisaillement pour déterminer la résistance au cisaillement du sol. Les valeurs de l'angle de frottement calculées numériquement sont très proches voire similaires à celles mesurées au laboratoire. Les valeurs calculées de la

cohésion différent parfois de celles déterminées par l'expérience et cela est dû au remaniement des échantillons de sol testé. Les valeurs des paramètres de sol obtenues numériquement sont retrouvées au laboratoire et analytiquement pour la plupart des cas, cela confirme la validité de la méthode numérique proposée.

7. Conclusion

Le calcul des ouvrages et des fondations nécessite une investigation de l'état du sol sous-jacent. Un des paramètres les plus importants est le module élastique du sol. Dans cet article, plusieurs études géotechniques ont été présentées dans trois sites différents constitués de plusieurs types de sols. Basé sur les résultats des essais in-situ, des simulations numériques ont été développées pour extraire les paramètres du sol et en particulier le module d'élasticité qui est comparé au module pressiométrique. L'intervalle des valeurs du coefficient rhéologique $\alpha = E_M/E$ proposé par Menard a été récupéré et réduit selon les types de sols testés.

Références bibliographiques

- Baguelin F., Jézéquel J.F., Shields D. H. (1978). The pressuremeter and foundation engineering, series on rock and soil mechanics. Trans Tech Publications. Clausthal-Germany.
- Biarez J., Gambin M., Gomes-Correia A., Flavigny E., Branque D. (1998). Using pressuremeter to obtain parameters to elastic-plastic models for sands. Geotechnical Site Characterization, Robertson & Mayne, Balkerna, Rotterdam.
- Combarieu O., Canépa Y. (2001). The unload-reload pressuremeter test. Bulletin de des Laboratoires des Ponts et Chaussées 233, July – August pp. 37-67.
- Gambin M., Flavigny E., Boulon M. (1996). Le module pressiométrique. Historique et modélisation XIe Colloque Franco-Polonais de Mécanique des sols et des roches appliquées. Gdansk. Septembre, pp. 53-60.
- Goh K.H., Jeyatharan K., Wen D. (2012). Understanding the Stiffness of Soils in Singapore from Pressuremeter Testing. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 43 No. 4 December 2012.
- Ménard L. (1957). Mesure in – situ des propriétés physiques des sols. Annales des ponts et chaussées. Vol 14, pp. 357 – 377.