

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.

Contribution à l'étude de la compressibilité des sols à l'aide du pénétromètre à cône

Contribution to the Study of Soil Compressibility by Means of a Cone Penetrometer

M. BACHELIER, *Société Sol-Essais, Colombes-Seine, France*

L. PAREZ, *Société Sol-Essais, Colombes-Seine, France*

SOMMAIRE

A la suite de Buisman (1940), les auteurs ont cherché à relier, dans les sols limoneux et argileux, la pression limite q_f sous la pointe d'un pénétromètre statique au module œdométrique E' . La relation $E' = 2,3(q_f/\alpha)$ est vérifiée avec une bonne approximation. Les valeurs de α sont données, pour les différents types de sols expérimentés, en surface et en profondeur, de sorte qu'il est possible d'obtenir rapidement un ordre de grandeur des tassements à prévoir, à partir des courbes de pénétromètres statiques et de la connaissance de la nature des couches intéressées.

SUMMARY

Following Buisman's work (1940), the authors attempted to relate, in silty and clayey soils, the ultimate pressure q_f under the cone of a static penetrometer to the oedometer modulus E' . The relation $E' = 2.3(q_f/\alpha)$ checks with satisfactory accuracy. The values of α are given for the different types of soil tested, on the surface and at depth, in such a way that an order of magnitude of settlement can be quickly forecast from static penetrometer curves, knowing the soil properties of the layers involved.

LA PENTE DU DIAGRAMME d'essai œdométrique en coordonnées semi-logarithmiques ($e, \log_{10} \sigma$) a été dénommée par Terzaghi (1943) indice de compression:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log_{10} \frac{\sigma + \Delta\sigma}{\sigma}} \quad (1)$$

cette pente est sensiblement constante dans de nombreux cas expérimentaux. Le module œdométrique a pour valeur:

$$E' = (\Delta\sigma/\Delta e)(1 + e). \quad (2)$$

Si l'accroissement de contrainte $\Delta\sigma$ est faible par rapport à σ ,

$$\log_{10} \frac{\sigma + \Delta\sigma}{\sigma} = \frac{1}{2,3} \ln \frac{\sigma + \Delta\sigma}{\sigma} \simeq \frac{1}{2,3} \cdot \frac{\Delta\sigma}{\sigma}, \quad (3)$$

la relation 1 peut s'écrire:

$$C_c = 2,3 \cdot \sigma (\Delta e / \Delta\sigma). \quad (4)$$

En combinant (4) et (2) il vient:

$$E' = 2,3\sigma[(1 + e)/C_c]. \quad (5)$$

Si nous admettons, avec Buisman (1940), Buisson (1954) et Marivoet (1953) que le rapport $C_c/1 + e = C$ qui caractérise la compressibilité du matériau est fonction de la contrainte σ au niveau considéré et inversement proportionnel à la pression limite q_f sous le cône d'un pénétromètre statique à ce niveau, on peut écrire:

$$C = \alpha(\sigma/q_f) \quad (6)$$

Les équations 5 et 6 donnent la relation

$$E' = 2,3(q_f/\alpha). \quad (7)$$

Les auteurs se sont proposé de chercher les valeurs de α qui permettent de satisfaire à la relation 7 dans des sols

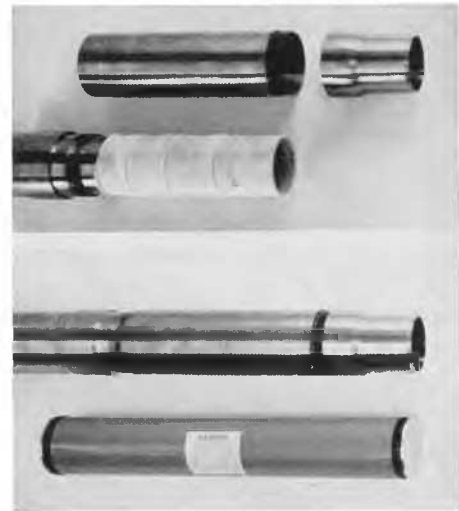


FIG. 1. Carottier Parez.

variés (sables, limons, argiles, marnes, vases et tourbes) et dans le cas des fondations superficielles ou profondes.

Les comparaisons ont porté sur un nombre important de sondages dans lesquels des échantillons de sols (essayés à l'œdomètre) étaient prélevés à proximité immédiate d'un essai au pénétromètre statique.

Les prélèvements ont été réalisés au moyen du Carottier système Parez (1959) à piston stationnaire avec emballage de l'échantillon par gaine textile à déroulement automatique, la gaine restant fixe par rapport à l'échantillon au cours du prélèvement (fig. 1).

Le pénétromètre utilisé (brevet Parez, 1953) est identique à celui employé par le professeur Kérisel (1962) pour ses essais de l'Iraba; il comporte un vérin hydraulique de pied (fig. 2) qui est liaisonné par un canal avec une batterie de

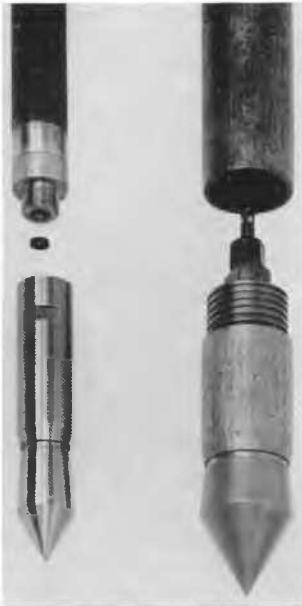


FIG. 2. Pointes de pénétromètre hydraulique ϕ 45 mm et 75 mm.

manomètres (fig. 3) pour la mesure de la résistance de pointe. L'effort total est lu sur la batterie de manomètres du vérin de fonçage. Les circuits de mesure de l'effort de pointe et de l'effort total sont indépendants, et les lectures sont continues, sans arrêt du fonçage et sans mouvement appréciable du cône par rapport au fût du pénétromètre.

METHODE UTILISÉE POUR LA DÉTERMINATION STATISTIQUE DU COEFFICIENT α

Le coefficient α a été calculé pour environ deux cents points d'essai par la relation

$$\alpha = \frac{q_f \cdot C_c}{(1 + e_0) \cdot \sigma_{0-c}} \quad (8)$$

Choix de q_f : c'est la valeur moyenne de la pression limite sous le cône, au niveau de l'échantillon et sur la hauteur de celui-ci.

Valeur de C_c : l'indice de compression C_c est calculé pour une variation de contrainte $\Delta\sigma$ prise à partir de la contrainte σ_{0-c} définie comme suit: pour les sols sous-consolidés et normalement consolidés $\sigma_{0-c} \cong \sigma_0$, σ_0 étant la contrainte due au poids des terres dans le plan moyen de l'échantillon; pour les sols sur-consolidés $\sigma_{0-c} = \sigma_c$, σ_c étant la contrainte de consolidation.

Afin d'obtenir des résultats comparatifs, la variation de contrainte $\Delta\sigma$ a été prise systématiquement égale à 1 bar (soit environ 10 tons/m.ca.).

CLASSEMENT

L'idée directrice était la répartition suivant les formations géologiques, les natures de sols étant en général facilement identifiables par forages au moyen des couches repères et par extrapolation d'après l'allure des courbes de pénétration. Les paramètres secondaires étaient les caractéristiques d'identification: G , densité des grains; γ_u , poids volumique apparent du matériau sec; w , teneur en eau naturelle; S_r , degré de saturation; w_L , limite de liquidité; w_P , limite de plasticité; I_P , indice de plasticité; ainsi que la teneur en calcaire et la composition granulométrique.

Pour une nature de sol donnée, le facteur profondeur intervient directement par σ_0 ou σ_c .

La relation 7 dépend en définitive essentiellement des deux paramètres: pression limite sous le cône et profondeur, ce dernier apparaissant fondamental dans l'exploitation des valeurs de C_c .

On remarquera en effet qu'il n'est pas rare de trouver des valeurs de q_f du même ordre dans les couches superficielles et profondes d'une même argile. Il est cependant bien établi que le module de déformation croît en général avec la profondeur.

Nous donnons au tableau I, un extrait du tableau de base ayant servi à la détermination statistique du coefficient de corrélation α .

REMARQUES SUR LE SENS DE VARIATION DU COEFFICIENT α

On considère le tassement W qui serait obtenu théoriquement sous un pénétromètre pour une valeur de q_f/ρ , ρ étant le coefficient réducteur limitant le domaine des contraintes où le sol peut être représenté par un module de déformation E' . Les formules de Boussinesq ou de Mindlin conduisent à une relation de la forme

$$\alpha = K \cdot W \cdot \rho / B,$$

B étant le diamètre du pénétromètre.



FIG. 3. Tableau de lecture, effort de pointe, effort total.

TABLEAU I. COEFFICIENT DE CORRÉLATION α

Site	Nature	Formation géologique	Pro-fondeur (m)	Identification										Pression limite sous le cône q_f bars (10 tons/m.ca)	α		
				G	γ_d (t/m.cu.)	$w(\%)$	$S_r(\%)$	$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	I_P	CO ² Ca (%)	Composition granulométrique					
												Sable	Silt			Argile	
Alfortville	Limons marneux jaunâtre	Alluvions modernes	4,30 4,80	2,67	1,49	27,5	93	38	28	10	36	8	70	22	9	0,68	
Soisy sous Montmorency	Marne-gris-vert avec nodules calcaires	Marnes à pholadomies	5,60 6,00	2,72	1,35	38	100	71	30	41	59				30	0,40	
	Limons argileux un peu sableux	Sables verts infra-gypseux	10,50 10,80	2,71	1,53	25	89,4				14	20	57	23	42	0,96	
Noisy le Roi	Sable fin jaune-gris	Sables de Fontainebleau en éboulis	4,00 4,50	2,62	1,51	28	99	25	25	0		85	10	5	90	1,75	
	Marne limoneuse gris-bleuté	Marnes à huîtres du Stampien (remaniées)	4,50 5,20	2,66	1,35	38	100	60	32	28	68	7	52	41	10	0,63	
			10,00 10,40	2,78	1,40	35	97,5	71	28	13	64	1	39	60	10	0,61	
	Limons marneux jaunâtre	Alluvions modernes	1,50 2,00	2,72	1,82	19	100	28	20	8		42	45	13	6	0,59	
			3,00 3,50	2,72	1,63	22	89					30	35	35	6	0,54	
	Argile marneuse, jaune-vert			4,00 4,50	2,71	1,82	17	96	52	17	35		11	40	49	8	0,52
Louveciennes	Marne gris-vert	Marnes vertes	7,40 8,00	2,73	1,59	24,5	94,3	56	25	31	81	4	39	57	16	0,75	
	Limons marneux, jaunâtre	Marnes à huîtres du Stampien	2,25 2,90	2,68	1,67	20,2	90	19	18	1	36	10	63	27	5	0,48	
			6,00 6,40	2,69	1,33	36,6	94,5	107	40	67	22		44	56	6	0,51	
	Argile gris-vert limoneuse	Calcaire d'Orgemont sous forme de lits argileux gris-vert															
	Limons argileux jaune-vert	Eboulis de limons	1,00 1,60	2,70	1,74	20,1	90,5	20	13	17	4	20	49	31	5	0,80	
Limons argileux vert	Marnes à huîtres du Stampien	4,00 4,30	2,64	1,71	20,3	100	33	18	15	4	10	59	31	10	0,41		
Calais	Argile	Argile des Flandres (Ypresien)	27,00	2,71	1,57	27	100	74	36	38	13				20	0,33	

On peut alors faire les remarques suivantes. A profondeur égale et pour des sols de différentes natures, le produit $\rho.W$ varie peu. Dans le cas de sols homogènes et lorsque la profondeur augmente, l'argile se raidit, par suite, C_c diminue et σ_{0-c} augmente. L'indice des vides e_0 diminuant lentement, α doit diminuer normalement avec la profondeur.

ÉTUDE PARTICULIÈRE DES MARNES VERTES

Nous avons pu disposer des résultats obtenus sur un chantier expérimental situé à Romainville, dans la zone des marnes vertes du Sannoisien. La formation des glaises vertes et des marnes à cyrènes contenait des intercalations de calcaires oolithiques sous forme de petits nodules. La structure était à feuillets argileux fossilifères caractéristiques du faciès lagunaire déposé en eau peu profonde, avec dessiccation et sursalure (Soyer, 1953). Ceci explique les valeurs des

pressions de consolidation observées, soit de 1,4 à 1,9 bar.

Un forage a été réalisé au centre de la zone d'essais dans laquelle étaient implantés 14 pénétromètres. Les pénétromètres utilisaient d'ailleurs des pointes de diamètres différents allant de 45 à 110 mm. Les résultats, très homogènes, sont reportés par leur valeur moyenne sur la courbe q_f (fig. 4).

Les valeurs du coefficient α et du module E' sont indiquées par les courbes représentatives avec indication des chiffres obtenus au niveau des échantillons intacts. Le passage aux marnes supra-gypseuses, de nature très différente, a été indiqué en tireté.

CONCLUSIONS

L'étude a conduit à la répartition suivante dans l'ordre de la sédimentation.

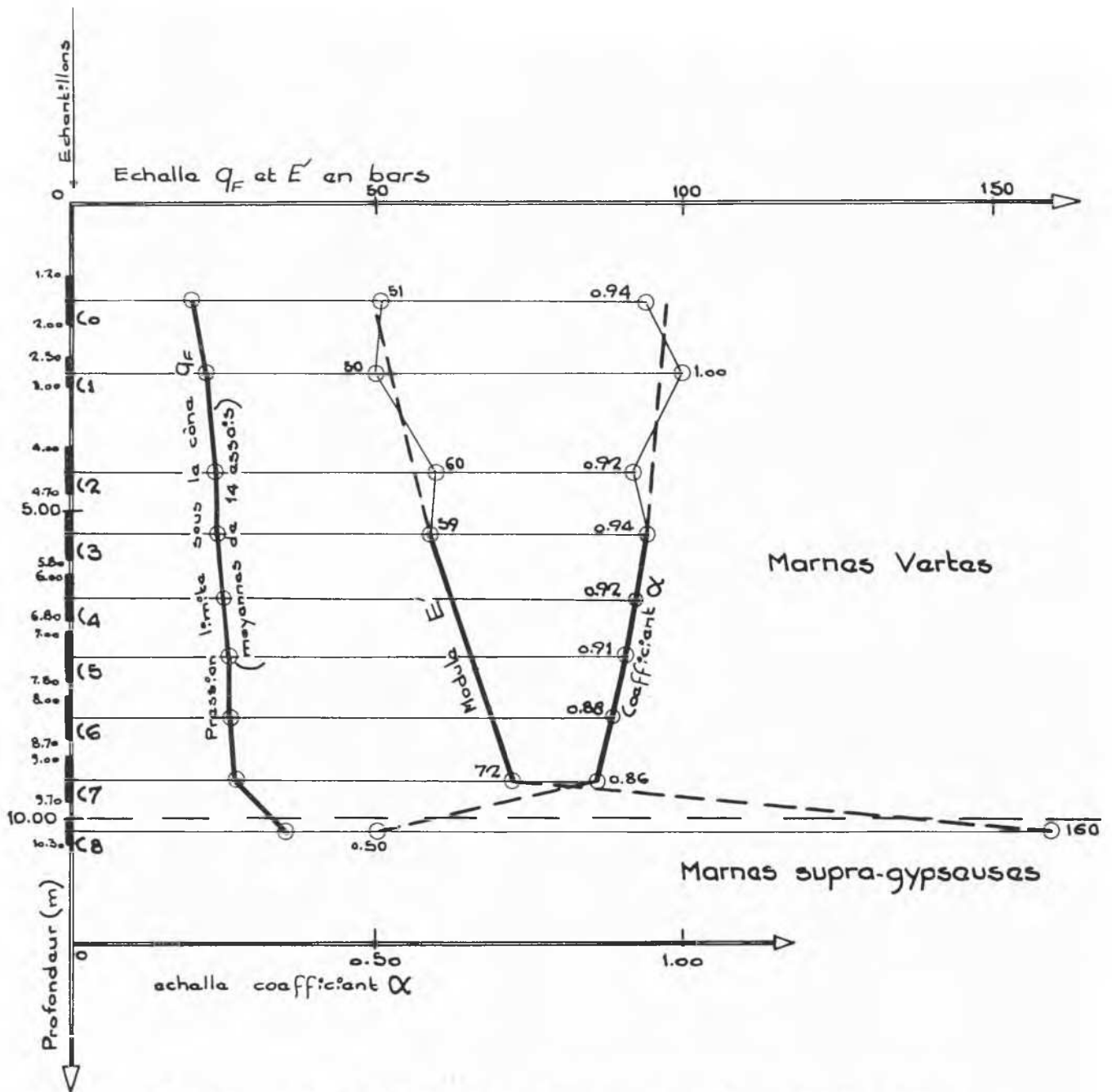


FIG. 4. Variations de q_F , E' et α en fonction de la profondeur dans les marnes vertes du Sannoisien.

Dépôts non consolidés (limons organiques portuaires)

Les valeurs sont obtenues pour des couches peu profondes:
 $\alpha = 0,4$ à $0,7$

Dépôts mal consolidés (limons et sables fins vaseux fluviatiles)

Tourbes $\alpha = 2,8$ à $3,3$
 Limons vaseux sous forme sableuse $\alpha = 1,8$ à $2,5$
 Limons vaseux sous forme argileuse $\alpha = 0,4$ à $0,6$
 Sables fins vaseux $\alpha = 1,4$

Alluvions modernes (limons)

A tendance sableuse $\alpha = 1$ à $1,5$
 A tendance argileuse $\alpha = 0,6$ à $1,0$

Sables de Fontainebleau (Stampien)

Sableux $\alpha = 2,5$ à $2,8$
 Limoneux $\alpha = 1,2$ à $1,8$
 Argileux $\alpha = 0,6$ à $0,8$

Marnes à huîtres (Stampien)

$\alpha = 0,4$ à $0,6$

Marnes et calcaires de Brie et calcaires d'Orgemont (sous forme argileuse)

$\alpha = 0,5$ à $0,8$

Marnes vertes (Sannoisien)

$\alpha = 0,8$ à $1,0$

Marnes supra-gypseuses (Sannoisien)

$\alpha = 0,4$ à $0,5$

Marnes et calcaires de Champigny (sous forme argileuse)

$\alpha = 0,5$ à $0,6$

Marnes à pholadomies (Bartonien)

$\alpha = 0,4$ à $0,5$

<i>Sables verts infra-gypseux</i> (Bartonien)	$\alpha = 0,9 \text{ à } 1,0$
<i>Argiles des Flandres</i> (Yprésien) zone profonde (30 m)	$\alpha = 0,33$
<i>Argile plastique</i> (Sparnacien) (zone de 6 à 15 m)	$\alpha = 0,5 \text{ à } 0,7$

Les résultats présentés, à l'exception de l'argile plastique et de l'argile des Flandres, concernent la tranche des dix mètres normalement utilisée pour les fondations courantes.

Pour une couche donnée, les valeurs de α à prendre en compte, décroissent avec la profondeur.

Les résultats obtenus sont donnés en vue de permettre une estimation des tassements à partir des essais de pénétration statique lorsque la nature des sols de fondation est bien déterminée.

Les principales couches compressibles du bassin parisien ont été reconnues. L'étude statistique sera poursuivie parallèlement avec celle des paramètres tels que: pression de consolidation, anisotropie, état des contraintes au niveau de l'échantillon et pression des pores *in situ*.

Il est donc possible d'étendre à un grand nombre de formations géologiques la première étude de Buisman (1940), qui avait donné $\alpha = 1,5$ pour des sables, suivie par Marivoet (1953) qui a trouvé $\alpha \neq 0,75$ pour des sables limoneux avec

passages argileux, et De Beer et Martens (1957) qui ont examiné le problème de l'hétérogénéité dans les couches sableuses.

REFERENCES

- BUISMAN, A. S. K. (1940). *Grondmechanica*. Delft.
- BUISSON, M. (1954). Conférence Chambre de Commerce Tunis (mars, 1954).
- DE BEER, E. E., et A. MARTENS (1957). Method of computation of an upper limit for the influence of the heterogeneity of sand layers on the settlements of bridges. *Proc. Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 275-82.
- KÉRISEL, J. (1962). *Annales de l'Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics* (Paris), No. 179.
- MARIVOET, L. (1953). Observations des tassements de ponts à fondation directe. *Proc. Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 418-30.
- PAREZ, L. (1959). L'échantillonnage des sols de fondation. *Annales de l'Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics* (Paris), vol. 12, No. 133, pp. 39-43.
- SOYER, R. (1953). *Géologie de Paris*.
- TERZAGHI, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York, Wiley, 510 pp.