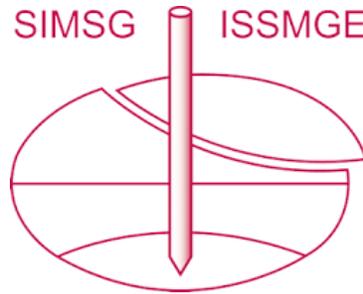


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



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.

Classification des propriétés des argiles saturées en fonction de l'indice des vides

Classification of Mechanical Properties of Saturated Clays as a Function of Void Ratio

A. CAQUOT, *Membre de l'Académie des Sciences de Paris, Paris, France*

J. KÉRISEL, *Professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France*

SOMMAIRE

La communication est consacrée à l'examen d'un grand nombre d'essais donnant les caractéristiques de résistance des argiles. Dans un tableau figurent 50 évaluations provenant de laboratoires éminents, et présentées par 23 spécialistes de mécanique des sols. Sur ces 50 essais, 43 donnent des valeurs de $\lambda = e_f \tan \phi'$ contenues dans l'intervalle 0.16-0.60. Trois seulement dépassent l'unité, et il s'agit de 3 matières exceptionnelles: la bentonite, l'illite calcium pur et l'argile organique de Brighton. La teneur en eau w_p , l'activité $I_p/d_{2\mu}$ permettent de prévoir l'ordre de grandeur de $\lambda = e_f \tan \phi'$ dans les argiles habituelles. La référence $e_f \tan \phi'$ est prise pour le sol consolidé sous 1 bar. Le produit $e_f \tan \phi'_{\text{prol}}$ se situe dans des limites plus restreintes 0.20 à 0.35 (cf. fig. 4) dans les argiles contre 0.45 à 0.55 pour les sables.

SUMMARY

This paper analyses 50 test results, submitted by 23 specialists in soil mechanics, concerning the shear-strength parameters of clays. Of these 50 tests, 43 give values of $\lambda = e_f \tan \phi'$ between 0.16 and 0.60, whereas only 3 are greater than unity and these relate to the exceptional materials bentonite, pure calcium illite, and Brighton organic clay. The water content w_p , and the activity $I_p/d_{2\mu}$ make it possible to forecast the magnitude of $\lambda = e_f \tan \phi'$ in ordinary clays. The expression $e_f \tan \phi'$ refers to consolidation under a pressure of 1 bar. The product $e_f \tan \phi'_{\text{prol}}$ lies within narrower limits for clays, 0.20 to 0.35 (Fig. 4) compared with 0.45 to 0.55 for sands.

L'OBJET DU PRÉSENT ESSAI de classification est de relier systématiquement les caractéristiques mécaniques des argiles, c' et ϕ' saturées, à leur indice des vides, e , et à leur caractéristique de plasticité w_p . La détermination correcte de c' et ϕ' en laboratoire est relativement longue. Il est donc intéressant d'y substituer des essais de routine donnant e et w_p , conduisant par l'intermédiaire du tableau ci-après à une approximation de c' et ϕ' .

REMARQUES PRÉLIMINAIRES CONCERNANT ϕ' ET c'

Frottement effectif

Nous nous référons pour déterminer c' et ϕ' aux essais non-drainés exécutés à volume constant. Dans ces essais, la consolidation est effectuée préalablement sous un tenseur sphérique, la pression étant la même en toute direction. Quand elle est terminée, le volume final est conservé pendant les essais et ceux-ci déterminent sur le plan de rupture les valeurs de ϕ' et c' par la construction de la courbe intrinsèque. Dans les essais pratiqués avec des méthodes de consolidation différentes, les valeurs de ϕ' et c' peuvent être légèrement différentes, l'arrangement préalable des grains étant quelque peu modifié.

Essais avec glissements prolongés. Pour accuser le contraste, nous opposons à ces essais, les essais drainés avec déplacements prolongés tels que ceux réalisés à la boîte dont Skempton (1964) a montré qu'ils donnaient pour les argiles fissurées surconsolidées des valeurs $c' = 0$ et ϕ' nettement inférieur au ϕ' classique avec orientation préférentielle des feuillet d'argile. Nous désignons ces ϕ' par ϕ'_{prol} .

CLÉ DE LA CLASSIFICATION

Nous sommes partis du fait assez évident a priori que le frottement est dans un milieu discontinu essentiellement

fonction de l'importance de vides par rapport aux pleins. Pour les sables, dès 1939, Caquot avait fait remarquer que pour une granulométrie déterminée $e \tan \phi'$ est pratiquement constant: $e \tan \phi' = \lambda$. Remarquons que s'est bien e et non n qu'il faut introduire en fonction de $\tan \phi'$ pour avoir une formule correcte aux limites. Si $e = 0$ (roche extrêmement serrée) ϕ' tend vers $\frac{1}{2}\pi$ et $\tan \phi'$ vers l'infini. Si e est infini (corps vide), ϕ' tend vers 0.

Ce paramètre est plus fort pour les grains anguleux que pour les grains arrondis. Il est maximum pour des grains de grosseur uniforme et diminue quand la granulométrie étale son diagramme.

Nous avons montré que pour les sables, λ se situe le plus souvent entre 0.5 à 0.6 (Caquot et Kérisel, 1956). Nous nous référons à l'indice des vides initial.

Depuis, nous avons orienté nos recherches en nous référant à l'indice des vides final e_f dans le plan de rupture et nous avons recherché la valeur de e_f pour tous les sols. Tout d'abord, la fig. 1 qui se rapporte à une argile montre qu'il importe de fixer la valeur de la pression de consolidation préalable. Nous nous sommes référés pour chaque sol au produit $e_f \tan \phi'$ après consolidation sous une pression moyenne de 1 bar. Si la consolidation a été faite sous $\sigma'_m > 1$ bar, nous corrigeons e_f en nous servant de l'indice de compression.

Lorsque l'on prolonge le cisaillement sur une argile surconsolidée, c' finit par disparaître comme nous l'avons dit et ϕ' diminue.

SABLES FINIS

Les expériences de Bjerrum, Kringstad et Kummeneje (1961) ont montré que $e_f \tan \phi' = \lambda$ est peu variable (0.51 à 0.42) sauf aux valeurs exceptionnelles de e_f . De ces

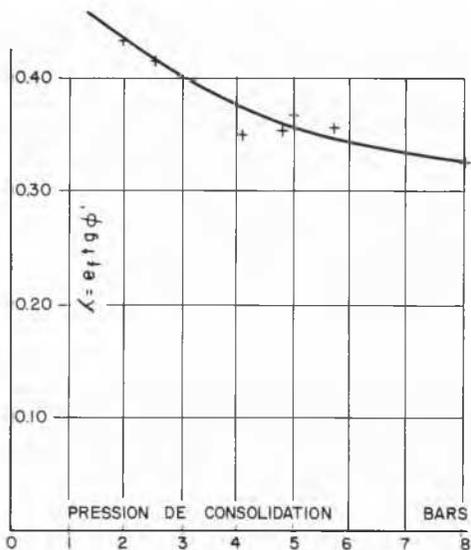


FIG. 1. Variation de $e_f \tan \phi'$ dans une argile saturée en fonction de la pression de consolidation; e_f valeur finale de e dans le plan de rupture.

expériences, nous déduisons le graphique de la fig. 2 donnant $\lambda = e_f \tan \phi'$ en fonction de e_f . Cette courbe nous permet d'envisager 3 zones, la zone centrale régulière ou zone I, la zone de forte pression ou zone II, et la zone à faible pression ou zone III.

Dans la zone II à forte pression, λ est modifié par la rupture progressive des grains, et dans la zone I à faible densité, les contacts des grains n'étant plus suffisants, certains déplacements se font par rotation, d'où la variation du frottement interne.

A propos de la zone II, nous rappelons que la courbe intrinsèque n'est pas une ligne droite. Quand la contrainte σ augmente, la contrainte tangentielle τ ne suit pas proportionnellement, le milieu se resserre avec rupture progressive des grains. C'est ce que montre la fig. 3 e_f et ϕ' diminuent ensemble lentement.

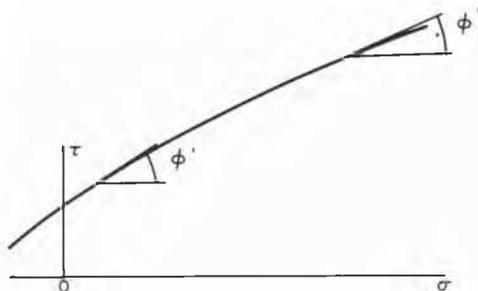


FIG. 3. La courbe intrinsèque n'est pas une ligne droite: ϕ' décroît quand les pressions augmentent; e_f aussi.

ARGILES

Nous avons inscrit dans le tableau I les résultats concernant e_f ; ϕ' et le produit $e_f \tan \phi'$ pour un certain nombre d'argiles en nous référant aux publications internationales. Partout où nous avons pu les rassembler, nous donnons w_L , I_p et d_{2u} .

Nous voyons, dans les nombreux cas du tableau, que le coefficient λ varie pour les argiles normales dans des limites assez étroites, le plus souvent, la plasticité et l'activité jouant un rôle important.

Les argiles de faible activité ont une forte proportion d'éléments fins non plastiques, et si leur frottement ϕ' est relativement élevé, il s'abaisse plus rapidement dans un glissement prolongé. ϕ' prolongé est donc particulièrement faible, dans ces argiles de faible activité et $\phi'_{\text{prol.}}$ peut être moins de la moitié de ϕ' ; ainsi pour les argiles scandinaves ϕ'_{cu} est de l'ordre de 25° à 35° alors le ϕ' prolongé qui correspond réellement aux glissements de terrain n'est que 10° et moins. Pour $\phi' = 35^\circ$ par exemple, $e_f = 1.13$, d'où un produit $e_f \tan \phi'$ de 0.65. Ce produit devient pour $\phi' = 10^\circ$ égal à 0.20.

Pour les argiles à moyenne activité (argiles tertiaires telles qu'argile de Londres, argile plastique de Paris), ϕ' prolongé ne diffère que de quelques degrés de ϕ' . Pour elles aussi, en introduisant $\phi'_{\text{prol.}}$ dans le produit $e_f \tan \phi'$ on trouve une valeur λ comprise entre 0.20 et 0.35.

Pour les argiles à faible activité (argile de Mexico) et à forte plasticité, si l'on se réfère à la valeur de 47° pour ϕ' trouvée par Lo pour $e_f = 6.2$ on aurait un produit de 6.95! Nous ignorons la valeur de $\phi'_{\text{prol.}}$ de cette argile mais nous imaginons avec difficulté une argile de ce genre dans un glissement de terrain, faire ressortir un angle $\phi'_{\text{prol.}}$ de 47°.

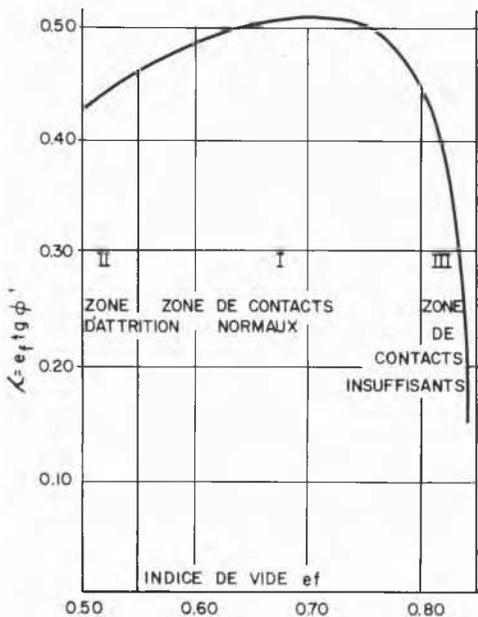


FIG. 2. Variation de $e_f \tan \phi'$ dans un sable.

TABLEAU I

sol	w_p	I_p	d_{2u}	I_p/d_{2u}	e_t	ϕ'	$\lambda = e_t \tan \phi'$	c' (kg/sq.cm.)
<i>Congrès de Rotterdam (1948), Wolf et Holtz, t.3, page 268</i>								
Lean clay 7m-59			49	.47 à .54		28°	.27	.77
Lean clay 7m-60			32	.62 à .65		28	.34	.21
Lean clay 7m-65			24	.42 à .435		26	.21	2,0
Lean clay 7m-68			45	.63 à .69		25	.31	.40
Lean clay 7m-72			40	.46 à .49		24	.21	1,8
Sandy clay 7m-69				.42 à .47		25	.21	.91
Loam 7m-71				.45 à .48		31	.28	.30
Clay loam 7m-73			25	.51 à .535		24	.24	.27
Clayey sand 7m-81			12	.45 à .465		37	.34	.28
<i>Congrès de Zurich (1953), Gibson, t.1, page 128</i>								
Horten clay	16	16	38	.42	.54 à .59	31,5	.345	
Wiener tagel	22	25	23	1,09	.61 à .745	26	.33	
Boston clay	25	23	54	.43	.77 à .805	29	.48	
Massena clay	25	20	57	.35	.97 à 1,40	30	.685	
Kaolinite	38	25	78	.32	1,20 à 1,30	21,5	.49	
Illite clay	28	45	50	.90	1,06 à 1,42	22	.50	
Shellhaven clay	36	87	61	1,42	1,37 à 1,65	22	.61	
Klein belt ton	35	91	77	1,18	1,52 à 1,73	21	.585	
Sodium bentonite	40	530	87	6,10	5,34 à 6,70	12	1,28	
<i>Congrès de Londres (1957), Skempton, t.2, page 378</i>								
London clay	27	49	50	.98	.75	20°	.273	.11
<i>Kirkpatrick, t.1, page 176</i>								
Loch Aline fine sand					.54	.39	.44	
<i>Schultze, t.1, page 195</i>								
Grauwacke					.44	.43	.41	.46
Schisteux					.44	.52	.58	.20
Schisteux					.74	.42	.66	.095
<i>Congrès de Paris (1961), Holtz et Willard, t.1, page 143</i>								
Sandy clay	21	28			.55	24	.245	.60
+20% gravel					.43	26	.21	.50
+35% gravel					.38	25	.18	.58
+50% gravel					.26	32	.16	.30
+65% gravel					.28	34	.18	.35
<i>Kenney et Watson, t.1, page 191</i>								
Ottawa estuarine	26	26			20	1,13	.35	.79
Allanburg glacial	13	15			3	.61	.35	.43
<i>Maslov, t.1, page 246</i>								
Terre glaise legere					.583	24,2	.263	0
Marne argileuse					.621	21,7	.248	.9
<i>Géotechnique, Henkel, 1956; Crawford, 1963; Hutchinson, 1961; Skempton, 1963; Kjaernsly et Simons, 1962</i>								
Weald clay	18	25	40	.60	.62	23°	.26	
Weald clay	18	25	40	.60	.59	19,8	.21	
London clay	26	52	50	1,04	.56	18	.18	
Norwegian clay	18	17	40	.43	.945	32	.59	.04
Norwegian clay	21	8	41	.25	.97	25	.45	
Leda clay	23	8	63	.12	1,07	16,5	.32	.7
Weald clay (Dorking)	22	24	38	.63	.54	26	.26	0
Dorking								
<i>Géotechnique, Richardson, 1963; Olson, 1962</i>								
Clay lower	24	38	45	.85	.725	26	.35	
Illite calcium	37	48	100	.48	3,4 à 4,2	23	1,44 à 7,78	
Oliantsfontein	19,9			.61	.67	27,9	.35	
<i>Fagnoul, thèse</i>								
Argile de Brighton		40	11	3,65	1,95	35,8	1,4	
Argile de Falmouth		16,2	17,5	.92	.71	30,6	.46	
<i>Géotechnique, décembre, 1963, K. Y. Lo</i>								
Daking clay	22	24	38	.63	.68	26	.33	
Mexico clay naturel		28,8		4,0	.62	47	.67	
Mexico clay remanié		28,6		3,0	.60	57	.92	
<i>Brinch Hansen (C^{ion} pers)</i>								
Boulder clay					.27	35	.19	
<i>Vidmar (Congrès Wiesbaden, 1963)</i>								
Argile tertiaire	15				.69	20	.25	
<i>De Beer, 1963 (C^{ion} pers)</i>								
Argile Boom					.80	21	.31	
<i>A. Horn, 1963</i>								
Silt					.60	36	.43	0,0

Le ϕ'_{prol} de cette argile doit être certainement très faible et l'anomalie ci-dessus moins grande qu'il ne paraît. Deux autres anomalies subsistent, celles concernant l'illite calcium pur et celle concernant l'argile organique de Brighton qui présente un produit $e_r \tan \phi'$ élevé. Là aussi nous ignorons la valeur de ϕ'_{prol} .

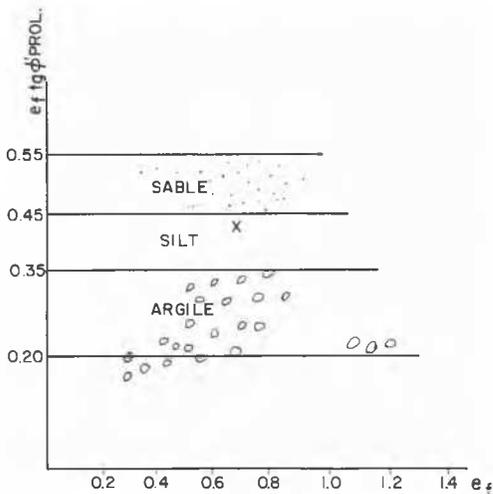


FIG. 4. Valeurs de $e_r \tan \phi'$ pour les sols après consolidation sous 1 bar. ϕ'_{prol} est la valeur de ϕ' après déplacements prolongés à la boîte.

En ce qui concerne la plasticité, il apparaît que $e_r \tan \phi'$ pour une même nature d'argile diminue lentement toujours pour la même consolidation à 1 bar, lorsque la plasticité augmente.

Pour les silt, le produit $e_r \tan \phi'$ paraît se situer vers 0.40. Pour les sables, il se situe plutôt entre 0.45 et 0.55, contre 0.50 et 0.60 que nous avons indiqué précédemment en prenant les valeurs d'indice des vides initiales.

Tous ces résultats sont indiqués sur la fig. 4.

CONCLUSIONS

En résumé, $e_r \tan \phi'_{\text{prol}}$ pour les sols après consolidation à 1 bar, paraît se situer pour les sables, entre 0.45 et 0.55, et pour les argiles entre 0.20 et 0.35 alors que les valeurs $e_r \tan \phi'$ sont plus dispersées.

Puisque la valeur ϕ'_{prol} est confirmée par l'analyse des glissements de terrain, ces constatations sont intéressantes. Il y a donc lieu de rechercher ϕ'_{prol} pour toutes les argiles pour examiner dans quelle mesure les anomalies à la classification (bentonite, illite Ca pur, argiles organiques) disparaissent ou non et inversement de pouvoir prévoir rapidement ϕ'_{prol} en fonction de e_r après consolidation sous 1 bar.

RÉFÉRENCES

- BJERRUM, L., KRINGSTAD, and KUMMENEJE (1961). The shear strength of a fine sand. *Proc. Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, p. 29.
- CAQUOT, A., et J. KÉRISEL (1956). *Traité de mécanique des sols*, p. 230. Paris, Gauthier Villars.
- FAGNOUL (1962). Thèse à l'Université de Liège.
- HORN, A. (1963). Untersuchungen ueber die Scherfestigkeit Gestörter Wassergesättigter Schluffe. Technische Hochschule, Aachen, 1963.
- SKEMPTON, A. W. (1964). The Rankine Lecture (London). *Géotechnique*, Vol. 14, pp. 75-102.