

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.

Etude de l'orientation du plan de rupture et de l'angle de frottement interne de certaines argiles

A Study of the Orientation of the Plane of Rupture and of the Angle of Internal Friction in Certain Clays

par P. HABIB, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, docteur ès-sciences, chef de la Section Recherches au Service des Sols des Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics, 12, rue Brancion, Paris XV^e, France

Sommaire

L'auteur étudie les argiles dont le plan de rupture fait un angle de 45° avec la plus grande contrainte principale. On les rencontre souvent dans la nature. Pour pouvoir atteindre le frottement intergranulaire, différentes méthodes ont été utilisées pour éliminer l'eau interstitielle, en conservant cependant une certaine structure ou un liquide entre les particules d'argile. La présence du film d'eau étant mise en évidence, on déduit $\varphi = 0$ de la relation $\varrho = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$, ce qui permet de placer le cercle de *Mohr* des contraintes totales par rapport à la courbe intrinsèque. Enfin sur ces matériaux, ainsi que sur d'autres obtenus par retrait dans certaines conditions, une relation entre la compacité et la résistance en compression simple fait apparaître le rôle des liaisons de grain à grain dans la cohésion. En particulier, l'eau interstitielle ne semble pas créer de liaisons supplémentaires et elle serait peut-être même susceptible au contraire d'en détruire.

Introduction

Si ϱ est l'orientation du plan de rupture par rapport à la plus grande des contraintes principales, la relation $\varrho = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ permet de déduire $\varphi = 0$ lorsque $\varrho = 45^\circ$. On est alors en présence d'un sol purement cohérent.

On rencontre très souvent dans la nature des argiles dont le plan de rupture fait un angle de 45° avec la verticale dans un essai de compression simple. Les essais de *Tschebotarioff* et *Bayliss* (1948) ou ceux de *Haefeli* (1951) montrent de telles ruptures.

Il nous a paru intéressant d'étudier la cohésion et le frottement dans le cas de telles argiles.

Nous avons eu l'occasion de constater ce phénomène sur des argiles bien définies comme l'argile plastique de la région pari-

Summary

The author made investigations on clays whose plane of rupture is at an angle of 45 degrees with the largest principal stress. Such clays are often found in a natural state. In order to be able to measure intergranular friction, different methods were used to eliminate pore water while, at the same time, conserving a certain structure or a liquid between the clay particles. The presence of the water film being made clear $\varphi = 0$ is deduced from the relation $\varrho = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$, which enables us to draw *Mohr's* circle of total stresses in relation to the intrinsic curve.

Finally, in these materials, as well as in others obtained through shrinkage under certain conditions, a relation between compactness and strength in direct compression shows the part played in cohesion by the adherence of grain to grain. In particular, pore water does not seem to create supplementary adherence but, on the contrary, may even contribute to its destruction.

sienne (voisine de l'Halloysite), l'argile rouge de Ste-Croix-du-Verdon (mélange d'illite et de kaolinite) (Fig. 1), le kaolin pur, etc. Ces argiles présentent une grande affinité pour l'eau.

La mesure de ϱ est souvent difficile, d'une part à cause de l'imprécision de la surface de rupture rarement parfaitement plane, et d'autre part à cause des déformations de l'éprouvette avant la rupture. Ceci est particulièrement vrai pour les vases.

Pour mesurer l'angle ϱ il est nécessaire de conserver un repère de direction. La méthode que nous avons employée a consisté à tracer des quadrillages orthogonaux sur différentes éprouvettes, en modifiant leur orientation de façon que les lignes de glissement soient bissectrices de ces directions: dans ces conditions les lignes ainsi tracées ne sont pas des amorces de rupture susceptibles de perturber l'orientation du glisse-

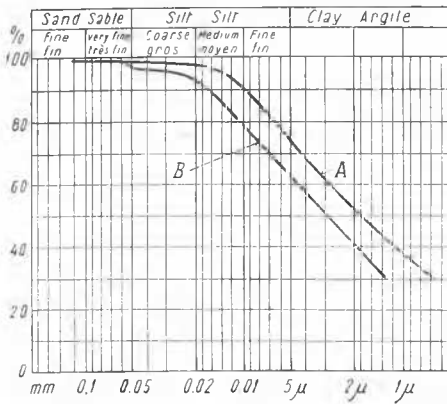


Fig. 1 Analyses granulométriques:
 A = Argile de Provins
 B = Argiles rouge de Ste-Croix du Verdon
 Grain Size Analysis:
 A = Provins Clays
 B = Red Clay of Ste-Croix du Verdon

ment; ces lignes permettent ainsi la mesure de l'angle ρ . La Fig. 2 indique le résultat obtenu avec cette méthode dans le cas de l'argile de Provins; on y mesure nettement $\rho = 45^\circ$.

Nous avons étudié particulièrement l'argile de Provins. Son indice de plasticité est voisin de 90. Pour des essais de cisaillement rapide sur matériaux consolidés, la pente de la courbe intrinsèque est de 16° à 17° au-delà de la pression de préconsolidation et de 7 à 10° en deçà de cette pression.



Fig. 2 Plans de rupture d'une éprouvette d'argile plastique
 Rupture Planes of a Plastic Clay Test Sample

Etude mécanique des actions de contact entre particules d'argile sèche

Les actions de contact étant dues au frottement grain sur grain, nous avons étudié de la poudre d'argile de Provins sèche, au moyen d'essais de cisaillement direct et triaxiaux; la poudre était obtenue à partir d'argile sèche concassée, broyée, puis passée à l'étuve à 105° ; le diamètre maximum des grains était de $1/10$ de mm. Comme pour l'argile naturelle, nous avons effectué des essais en cisillant l'échantillon sous sa charge de consolidation ou sous des charges différentes. La pression de consolidation n'ayant pas le même sens pour une poudre sèche et pour une argile naturelle, nous avons pris comme point de



Fig. 3 Plans de rupture d'éprouvettes de poudre sèche d'argile plastique
 Rupture Planes of Test Samples of Dry Plastic Clay Powder

comparaison, la compacité de l'argile et, plus précisément, la densité sèche: en effet, la densité sèche d'une argile consolidée sous 4 kg/cm^2 , par exemple, est de 1,47; pour obtenir la même compacité avec une poudre sèche, il faut exercer une pression statique d'environ 25 kg/cm^2 .

Le cisaillement linéaire sous la charge de serrage donne un angle de frottement interne de 28° . L'essai triaxial donne un angle de 32° ; l'orientation du plan de rupture est alors de 30° sur la verticale, ce qui correspond à $\varphi = 30^\circ$ (Fig. 3). La différence entre les deux angles provient sans doute des conditions de serrage, unidirectionnel dans un cas, uniforme dans l'autre.

Sous des charges inférieures à la pression de serrage, on observe une certaine dispersion due à la fragilité du matériau; le cisaillement direct donne une valeur de φ comprise entre 20 et 22° , les essais triaxiaux donnent un φ voisin de 25° . La cohésion est variable et dépend de la pression de serrage statique initiale: l'analogie mécanique entre ces matériaux et l'argile naturelle consolidée avant l'essai est très étroite, la pression de serrage statique des poudres jouant le rôle de la pression de consolidation des argiles. La variation de l'orientation du plan de rupture provient du film liquide qui entoure les grains, modifiant ainsi les actions de contact entre les particules.

Des essais analogues sur des matériaux voisins, c'est-à-dire composés d'argile de Provins déshydratée, mais possédant cependant une certaine structure, ont donné des résultats qualitatifs semblables; nous avons utilisé, par exemple, de l'argile naturelle déshydratée par passage à l'étuve ou par sublimation de l'eau interstitielle préalablement congelée.

Le passage des interfaces eau-air ou eau solide-air provoque des phénomènes de retrait accompagnés vraisemblablement de fissuration occasionnant une forte dispersion des résultats qui restent uniquement qualitatifs.

Action de contact entre particules en présence d'une phase liquide

Pour obtenir un matériau avec liquide interstitiel, nous avons pensé à utiliser un liquide ne donnant pas, comme l'eau, des combinaisons physico-chimiques avec les minéraux argileux; le liquide choisi fut le benzène. Les essais ont été effectués à l'appareil de Casagrande, car il est difficile de prélever des échantillons par carottage dans ces matériaux qui sont assez fragiles, ce qui rend délicats les essais triaxiaux systématiques.

La poudre d'argile déshydratée était consolidée en présence de benzène dans la boîte de cisaillement, c'est-à-dire suivant le même mode opératoire que pour la préparation de l'argile homogène artificielle en laboratoire (Florentin, L'Héritau, Bradna, 1948). Le cisaillement linéaire sous la charge de consolidation donne $\varphi = 36^\circ$ lorsque le liquide interstitiel est du benzène au lieu de 16° avec de l'eau. Sous des pressions différentes de la charge de consolidation, mais sans laisser au matériau le temps de se stabiliser, on obtient avec le benzène un angle de frottement apparent voisin de $\varphi_a = 20^\circ$ et une certaine cohésion apparente c_a au lieu de $\varphi_a = 0$ et c_a' pour l'argile naturelle. Remarquons que pour un même mode de préparation des échantillons, soit avec de l'eau, soit avec du benzène, les densités sèches sont voisines, pour une même pression de consolidation. Nous avons mesuré la perméabilité des échantillons consolidés en présence de benzène: pour des indices des vides voisins elle est environ 1000 fois plus forte que pour l'argile consolidée en présence d'eau. Ceci est dû à ce que le benzène n'est pas fixé par la particule d'argile comme le serait l'eau. Ces essais montrent que même en présence d'une phase liquide, le coefficient de frottement entre les grains reste pratiquement le même et que si l'angle de frottement apparent n'est pas nul, cela est dû à la forte perméabilité du matériau qui ne permet pas de conserver les pressions interstitielles pendant le cisaillement. C'est donc l'eau liée aux particules d'argile qui impose la direction du plan de rupture dont nous avons parlé au début de cet exposé.

Nous avons précisé ce point en substituant du benzène à l'eau interstitielle d'une argile préconsolidée en présence d'eau. Le benzène se combine avec l'eau; l'existence d'un azéotrope dont le point d'ébullition est situé vers 60° permet d'extraire l'eau interstitielle en distillant avec précaution les éprouvettes; la quantité d'eau extraite, ainsi que les mesures de densité humide permettent de contrôler l'opération: dans nos essais il restait environ 2% d'eau interstitielle. Les essais mécaniques à l'appareil triaxial ont donné des résultats analogues aux précédents, mais nous avons pu observer l'orientation du plan de rupture. L'angle obtenu était nettement inférieur à 45° sans atteindre 30° . En fait la surface de rupture n'était pas aussi nette que pour l'argile ordinaire; la présence d'un résidu aqueux permet de penser que le plan de cisaillement est composé de petites surfaces d'orientations différentes, dont la direction moyenne est comprise entre 30 et 45° .

Les essais que nous venons de décrire rapidement (Habib, 1952) montrent que l'orientation à 45° du plan de rupture est due à la présence de l'eau liée à la particule d'argile. En effet:

a) Les ruptures apparaissent avec des argiles à très grande affinité pour l'eau.

b) Dans la mesure où il est possible d'atteindre l'angle de frottement interne des particules d'argile par le frottement de poussières d'argile, celui-ci est très élevé, de l'ordre de 30° et le plan de rupture s'oriente en fonction de cet angle. Ce résultat est indépendant de l'existence d'une structure préalable ou

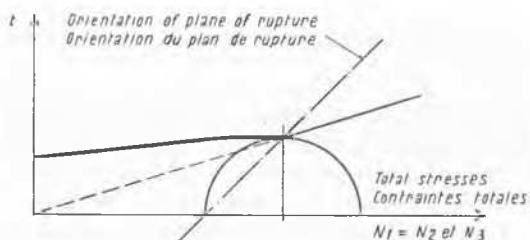


Fig. 4 Position of Mohr's Total Stress Circle
Position of Mohr's Total Stress Circle

de la présence d'un liquide interstitiel ne mouillant pas la particule d'argile.

c) La mesure du coefficient de perméabilité montre l'importance de l'eau fixée par l'argile: il est normal de penser que l'eau isole les particules et que le frottement grains à grains est lubrifié par l'eau.

Il est naturel alors d'admettre que pour ces argiles φ est nul d'après la relation $\varrho = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$. Le matériau serait alors purement cohérent et il faut admettre que le cercle de Mohr des contraintes totales est tangent à la courbe intrinsèque d'après le schéma de la Fig. 4.

Cohésion et compacité

Au cours des essais qui ont été décrits, nous nous sommes trouvés en présence d'un certain nombre de produits dont la

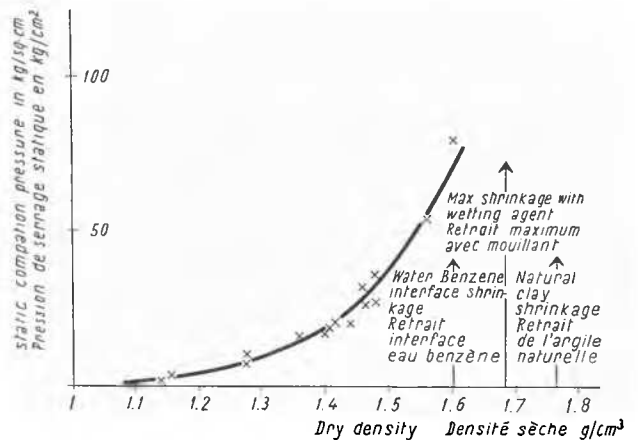


Fig. 5 Relation entre la densité sèche et la pression de serrage
Relation between Dry Density and Compaction Pressure

densité sèche variait dans de grandes proportions. Nous pouvons citer:

- Les poudres cisailées sous des pressions normales faibles.
- Les argiles artificielles consolidées en présence d'eau ou de benzène.
- Les poudres sèches d'argile amenées par serrage statique à des densités voisines des densités atteintes par consolidation; le serrage peut être uniforme ou non.
- Les matériaux secs à forte compacité, après le retrait provoqué par le passage d'un interface (eau-air, eau-benzène, benzène-air); on peut envisager aussi les retraites produits par le passage de l'interface (eau + mouillant) — (air), le rôle du mouillant étant de diminuer les forces superficielles et, par conséquent, de modérer le retrait.

Un certain nombre de constatations peuvent être faites; par exemple, on peut établir une correspondance entre la pression de consolidation et la pression de serrage statique. Nous avons déjà signalé que pour $d_s = 1,47$ la pression de consolidation de l'argile est de 4 kg/cm^2 et le serrage statique uniforme de 25 kg/cm^2 . De même, on observe que les mêmes compacités sont atteintes pour des valeurs voisines de la pression statique quand le serrage est uniforme ou unidirectionnel. Nous pouvons donc tracer la courbe donnant la relation entre compacité et serrage (Fig. 5).

Nous remarquerons, par la même occasion, que les forces statiques équivalentes à celles qui peuvent provoquer les densités sèches après retrait sont extrêmement élevées; des forces de cet ordre devant être exercées sur les particules solides par

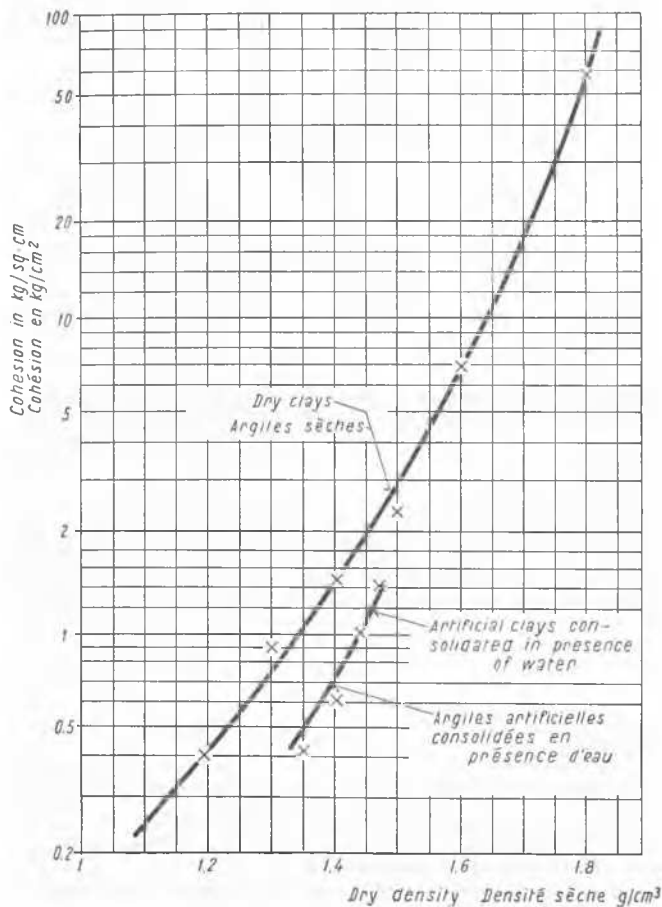


Fig. 6 Relation entre la cohésion au sens de Coulomb et la densité sèche
Relation between Cohesion as Defined by Coulomb and Dry Density

l'eau interstitielle, celle-ci doit être soumise dans l'argile à des tensions très fortes.

Nous pouvons ensuite établir une relation entre la résistance au cisaillement et la compacité. Malgré la difficulté qu'on peut éprouver à comparer des corps dont le frottement interne est nul ou ne l'est pas, il est possible, par exemple, de comparer, à titre d'ordre de grandeur, les résistances en compression simple (Fig. 6).

Nous constatons, en particulier, que la cohésion des poudres comprimées est voisine et même supérieure à celle des argiles consolidées ayant même compacité. Il apparaît alors un aspect inhabituel de la cohérence des corps. Celle-ci semble être due en grande partie aux liaisons moléculaires qui apparaissent entre particules rapprochées par le frittage ou par tout autre moyen; l'eau interstitielle ne paraît pas ajouter à cet édifice des liaisons supplémentaires, comme il est souvent admis, mais peut-être même en détruirait-elle certaines, puisque la cohésion de l'argile naturelle est plus faible. On peut chercher d'autres critères; en particulier si l'on range par dureté croissante les échantillons de poudre compactée, d'argile séchée après retrait, en présence ou non de mouillant, le classement sera fait dans l'ordre des densités croissantes; malheureusement cette méthode ne permet pas de comparer une argile sèche et une argile humide, l'une étant fragile et l'autre plastique.

Références

- Florentin, J., L'Heriteau, G. et Bradna, E. (1948): Etude triaxiale d'échantillons d'argile homogènes et cohérents préparés en laboratoire. Travaux, juin, p. 315.
- Habib, P. (1952): La résistance au cisaillement des sols. Thèse, Paris, p. 67-85.
- Haefeli, R. (1951): Notes sur la résistance au cisaillement des sols argileux. Laboratorio de Engenharia Civil, Lisbonne, p. 13.
- Tschebotarioff, G. P. et Bayliss, J. R. (1948): Determination of the shearing strength of varved clays and of their sensibility to remolding. Proc. Rotterdam, vol. 1, p. 203-207.