

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.

Mesure du cisaillement des craies par des essais de chantier et au laboratoire

Measurement of Shear Strength of Chalk by Field and by Laboratory Tests

G. DEBAILLE, *Ir. Prof. à l'Ecole Spéciale d'Ingénieurs Techniciens, Institut Reine Astrid, Mons, Belgique*

S. GHISTE, *Ir. tech. Prof. à l'Iram, Mons, Belgique*

SOMMAIRE

Cette étude définit quelques-unes des caractéristiques des craies. Ces caractéristiques déterminées au chantier ou au laboratoire sont: la teneur en eau, le poids spécifique, les limites d'Atterberg, le Proctor normal.

Les auteurs, ont ensuite étudié le rapport existant entre la détermination de ϕ' par des essais au pénétromètre statique sur chantier et par des essais à l'aide de l'appareil triaxial au laboratoire. Les résultats obtenus par ces deux méthodes assez différentes révèlent cependant une très grande similitude. D'autre part les auteurs ont recherché l'importance des facteurs pouvant influencer la variation de ϕ' et c' . Ces facteurs étudiés ici sont: le degré de saturation, la teneur en eau, le poids spécifique du sol sec, la porosité, l'indice des vides, les limites d'Atterberg.

SUMMARY

This study defines a few characteristics of chalk. These characteristics determined in the field or in the laboratory are as follows: moisture content, specific gravity, Atterberg limits, and standard Proctor.

The authors then investigated the relationship existing between the determination of ϕ' as obtained by static penetrometer tests made in the field and as obtained by laboratory triaxial tests. A good correlation of the results from these two different methods was achieved. In addition, the authors have weighed the factors that could affect the variation of ϕ' and c' . The factors considered in this study are as follows: degree of saturation, moisture content, dry density, porosity, void ratio, and Atterberg limits.

APERÇUS GÉOLOGIQUES ET ÉCONOMIQUES

LA RÉGION ENVIRONNANT la ville de Mons est actuellement en pleine transformation économique, de nouvelles industries se créent pour palier à l'abandon des exploitations charbonnières. En plus de l'édification de nombreuses usines réparties dans des zonings industriels, il a été nécessaire d'aménager les axes de circulation en réalisant ou améliorant les autoroutes, canaux et ouvrages d'Art.

Les terrains rencontrés sont constitués par les couches de craie du Crétacique (Cénomanién ou Maestrichtien). Ces étages sont déposés dans une large et profonde vallée creusée dans les terrains du Carbonifère. Ce synclinal correspond au bassin hydrographique de la Haine. Cette région s'étend sur une longueur d'environ 60 km pour une largeur de 15 à 20 km. La puissance des assises est comprise entre 150 et 460 m. Si cette contrée était bien connue au point de vue géologique par les exploitations de craie, phosphatières, carbonnages et recherches hydrologiques, il n'en était pas de même au point de vue mécanique des sols. Les nombreux travaux en cours ont permis au laboratoire de géotechnique de l'Iram de se livrer à des recherches sur les craies, calcaires et marnes de cette région, particulièrement dans le domaine de la résistance au cisaillement.

MESURES PAR PÉNÉTROMÈTRE

La mesure des caractéristiques de cisaillement *in situ* a été effectuée à l'aide d'un pénétromètre statique de diamètre de pointe de 42 m/m pouvant recevoir une charge maximum de 15 tonnes. Ainsi que l'a décrit De Beer (1948), les particules de craie ont une résistance à l'écrasement très faible. Bien souvent il n'y a pas de refoulement du sol et la valeur mesurée par la pointe correspond à la résistance à l'écrasement des grains. Pour des fondations directes, cela nous

donnera des valeurs pessimistes avec bien souvent un coefficient de sécurité exagéré.

D'autre part Florentin *et al.* (1961) considèrent à juste titre que la résistance latérale ne nous donne aucune valeur pour la détermination du frottement latéral dans le cas de fondation sur pieux par exemple. Nous avons constaté dans la région étudiée que la valeur du frottement latéral augmente très peu avec la profondeur, la plus souvent elle reste stationnaire et dans quelques cas, elle diminue localement.

A partir du moment où la pénétration rencontre les couches sous la nappe aquifère on constate que la résistance au frottement latéral augmente très sensiblement et régulièrement. Par contre, les résistances à la pointe présentent un graphique en dents de scie très prononcées et cela dans toute la traversée de la couche de craie (fig. 1).

Voici les valeurs extrêmes de résistance à la pointe de 35 m/m de diamètre. Maestrichtien: couches supérieures, 60 à 120 kg/cm.ca.; couches inférieures, 40 à 200 kg/cm.ca.; couches inférieures sous eau, 160 à 300 kg/cm.ca. Pour la pointe de 42 m/m de diamètre on relève: Campanien: 10 à 60 kg/cm.ca.—20 kg/cm.ca. en moyenne.

Les valeurs des angles de frottement effectif ϕ' ont été calculées par les méthodes de De Beer (1948). Les valeurs trouvées pour le Maestrichtien sont pratiquement comprises entre 30° et 34° et pour le Campanien elles sont de 30°.

ESSAIS AU LABORATOIRE

Les échantillons étudiés proviennent de forages réalisés par battage, ce qui ne permet naturellement pas d'obtenir des échantillons intacts.

Voici cependant quelques valeurs relevées: w : 19 à 34 pour cent en valeurs extrêmes—24 à 25 pour cent en moyenne; γ_d : 1.55 à 1.68 en moyenne; γ_s : 2.22 à 2.65 en valeurs extrêmes —2.37 à 2.60 en moyenne.

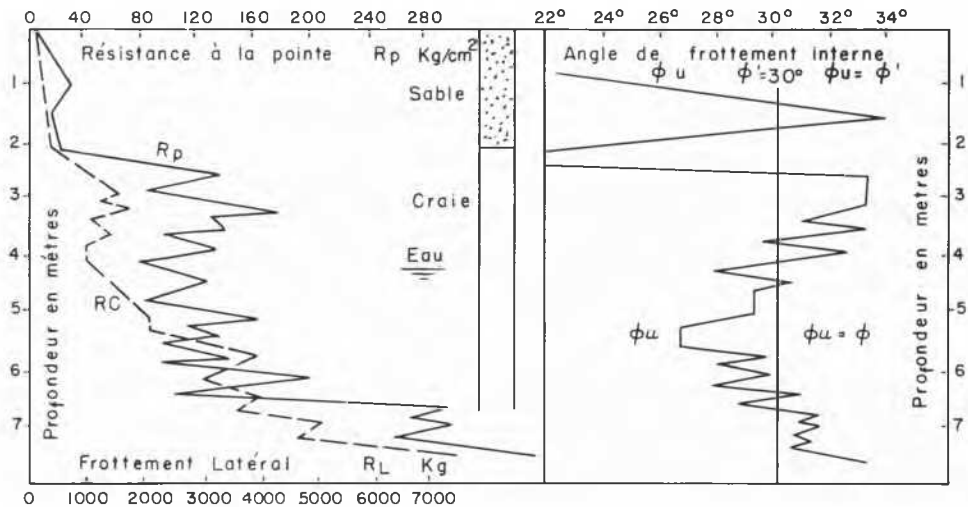


FIG. 1. Essai de pénétration et calcul de ϕ_u et ϕ' . R_p = résistance à la pointe en kg/cm.ca.; R_L = résistance au frottement latéral en kg.

Des essais réalisés sur des craies broyées ont permis de déterminer les limites d'Atterberg par deux méthodes: la méthode classique à l'aide de l'appareil de Casagrande et la méthode décrite par Scherrer (1961). Les limites de liquidité sont pratiquement comprises entre 26 et 29,5, les limites de plasticité entre 19,5 et 21. Les indices de plasticité varient de 5 à 10. Après avoir étudié une trentaine d'échantillons nous avons reporté les résultats sur le diagramme établi par Scherrer (fig. 2). Bien que d'origine et de constitution différentes les craies peuvent être représentées par des droites comprises dans zone très étroite.

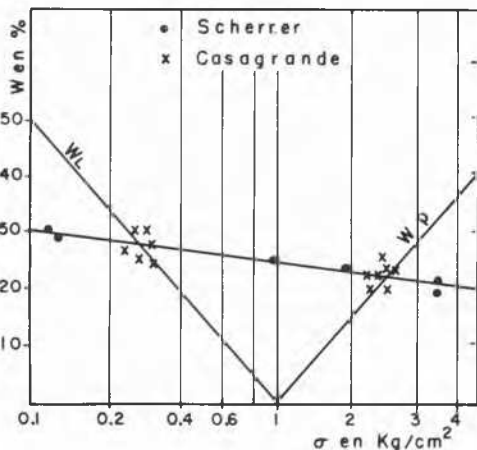


FIG. 2. Recherche des limites de liquidité et de plasticité par la méthode du cône (Scherrer). ● emplacement des points Scherrer; × emplacement des points Casagrande.

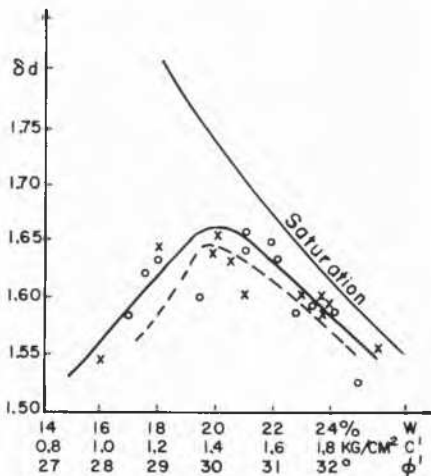


FIG. 3. Diagrammes Proctor. Traits pleins, Proctor normal; traits interrompus, Proctor miniature. ○ = valeurs de c' en fonction de γ_d ; × = valeurs de ϕ' en fonction de γ_d .

Toutefois, les lignes figurant les limites de liquidité et les limites de plasticité n'ont pas été tracées comme l'indique Scherrer. En effet, étant donné que le maximum d'eau contenu dans nos échantillons était compris entre 40 et 50 pour cent, nos lignes de figuration ont été tracées de 1 en abscisse à 50 pour cent en ordonnée.

Les essais Proctor sur ces mêmes craies remaniées ont été effectués suivant deux techniques différentes. La première

correspondant à de gros échantillons était la méthode classique du Proctor Normal. La seconde s'adresse à des échantillons de forage se présentant sous un faible volume. Pour en tirer le maximum nous avons cru intéressant de les étudier à l'aide de moules de dimensions réduites. Nous avons utilisé un moule de volume initial de 100 cu cm, soit 35 mm de diamètre et 98.5 mm de hauteur. La compaction est réalisée en trois couches chargées d'un poids de 2,515 kg et vibrées à 3000 cpm pendant une minute. La fig. 3 indique un exemple des résultats obtenus et montre la grande similitude existant entre ces deux méthodes.

CARACTÉRISTIQUES DE RÉSISTANCE AU CISAILEMENT

Comparaison pénétromètre—triaxial

L'appareil triaxial utilisé permet de réaliser des essais rapides sur une même éprouvette en milieu fermé saturée ou non. La mesure de la pression hydrostatique interne entraîne la détermination des valeurs de ϕ' et c' .

Le premier but de cette étude est la recherche de la similitude des résultats obtenus par les essais au pénétromètre ou à l'appareil triaxial. En utilisant les méthodes de calcul

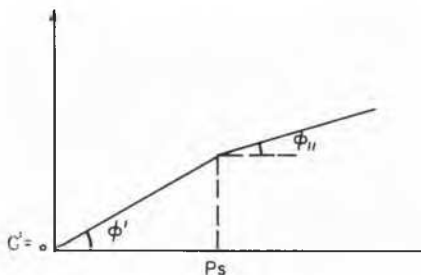


FIG. 4. Hypothèses de calcul pour la détermination des caractéristiques de cisaillement.

préconisées par De Beer (1948) on est amené pour les calculs d'avant—projet par les essais au pénétromètre à formuler les hypothèses de base définies par le graphique de la fig. 4 et qui sont:

(1) p_s , ou l'abscisse du point singulier de la courbe intrinsèque est égal à la contrainte verticale correspondant au poids des couches surmontant le niveau considéré.

(2) $c' = 0$. Les valeurs extrêmes relevées au triaxial pour les craies du Campanien sont 0.87 et 1.90 kg/cm.ca. avec une valeur moyenne de 1.47 kg/cm.ca. Pour le Maestrichtien ces mêmes valeurs sont respectivement 0.85 et 1.60 kg/cm.ca. et une moyenne de 1.27 kg/cm.ca. La cohésion effective peut donc passer du simple au double et cela suivant les conditions locales comme nous le verrons plus loin. Toutefois, cette cohésion est trop faible pour être prise en considération dans les calculs de stabilité. On est donc du côté de la sécurité en la considérant comme nulle.

(3) $\phi' = 30^\circ$. Si $\phi_u \leq 30^\circ$ et $\phi' = \phi_u$ si $\phi_u > 30^\circ$. Nous avons déterminé pour une cinquantaine d'échantillons les valeurs de ϕ' au chantier et au laboratoire. Nous avons pratiquement relevé des valeurs comprises entre 30 et 34° au pénétromètre et au triaxial des valeurs comprises entre 27 et 35°, la moyenne se situant entre 29 et 33°. Cette hypothèse est donc entièrement satisfaite. (Fig. 5 et la fig. 1, partie de droite.)

En conclusion, pour déterminer les caractéristiques de cisaillement des craies, l'ingénieur calculateur pourra se

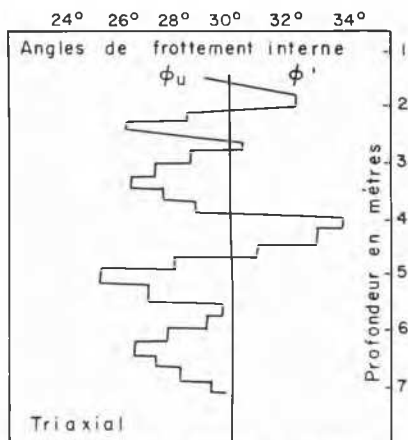


FIG. 5. Diagramme des ϕ_u et ϕ' relevés au triaxial.

basier aussi bien sur les résultats du pénétromètre que sur ceux de l'appareil triaxial.

Facteurs influençant les caractéristiques de cisaillement mesurées à l'appareil triaxial

Le degré de saturation S_r a une importance relativement faible sur la variation de l'angle ϕ' . La fig. 6 montre les limites de variation de l'angle ϕ' pour les craies maestrichtiennes soit environ 5° pour un passage de S_r de 20 à 100

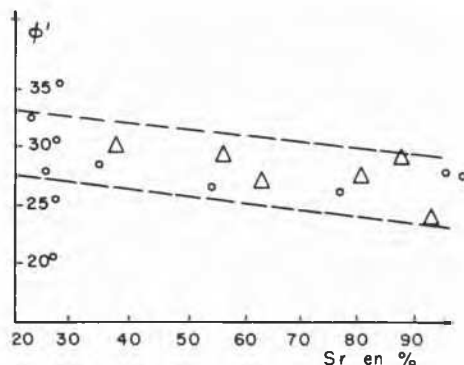


FIG. 6. Variations de ϕ' en fonction du degré de saturation.

pour cent. Par contre la fig. 7 montre pour des craies campaniennes la variation de c' . On constate l'importance de ce facteur puisque la cohésion vraie passe de 1.9 à 1.1 kg/cm.ca. pour une variation de S_r de 60 pour cent et 95 pour cent. Soit une variation de cohésion du simple au double pour une zone de saturation relativement faible.

La teneur en eau w des échantillons peut également varier. La fig. 8 indique que pour des limites assez étroites de variation de w l'angle ϕ' peut prendre des valeurs assez diverses. Il semble donc que la variation de ϕ' n'est pas liée par une loi simple à la teneur en eau. La cohésion c' se marque de nouveau suivant une droite bien déterminée et

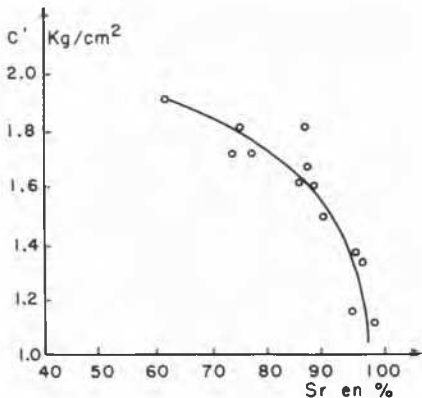


FIG. 7. Variations de c' en fonction du degré de saturation.

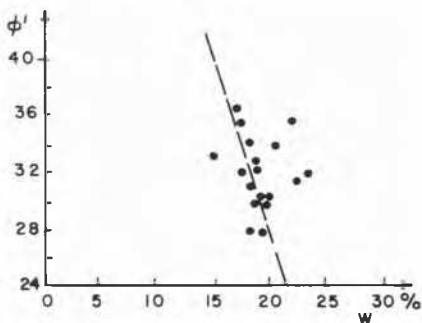


FIG. 8. Variations de ϕ' en fonction de la teneur en eau.

comme dans le cas précédent les variations de c' sont importantes même pour une variation de pourcentage d'eau d'environ 10 pour cent. C'est ce qui ressort de la fig. 9.

La fig. 3 indique les variations de ϕ' et c' en fonction de γ_d . Les caractéristiques de cisaillement se manifestent par un graphique d'allure très similaire au diagramme Proctor. Nous venons en effet de voir que ϕ' et c' sont des fonctions linéaires de la teneur en eau (les figs. 8 et 9).

D'autre part, la fig. 10 montre le rapport existant entre l'angle ϕ' et la porosité n . Contrairement à la majorité des sols dont le ϕ' diminue avec l'augmentation de n , nous avons trouvé une nette augmentation de ϕ' lorsque la porosité augmente bien que nous soyons placés dans des cas où les teneurs en eau étaient très variables, c'est à dire de part et d'autre du maximum Proctor.

La loi de Caquot et Kérisel $e \tan \phi' = A = \text{constante}$ qui est représentée par une hyperbole équilatère est également valable pour les craies étudiées. Bien que nos échantillons proviennent de couches très diverses et par conséquent aient une origine géologique et des propriétés différentes la valeur moyenne trouvée pour A est comprise entre 0.390 et 0.395 pour des valeurs de γ_d comprises entre 1.50 et 1.70 t/m.cu. Cette valeur de A est sensiblement plus faible que dans le

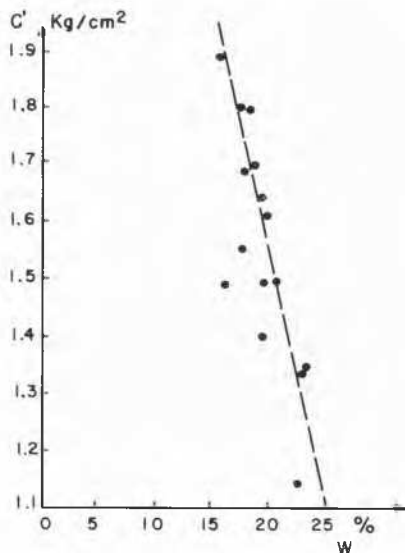


FIG. 9. Variations de c' en fonction de la teneur en eau.

cas des sables où elle est voisine de 0.5 à 0.6, mais nous avons ici un sol de nature et propriétés nettement différentes.

En dernier lieu, les figs. 11 et 12 renseignent les valeurs moyennes de c' pour les différentes sortes de craies classées en fonction de leurs limite de liquidité, et les valeurs moyennes de ϕ' en fonction de l'indice de plasticité des échantillons.

CONCLUSIONS

L'expérience acquise sur les chantiers comme au laboratoire nous permet d'affirmer que les résultats obtenus par des essais au pénétromètre ou à l'appareil triaxial nous

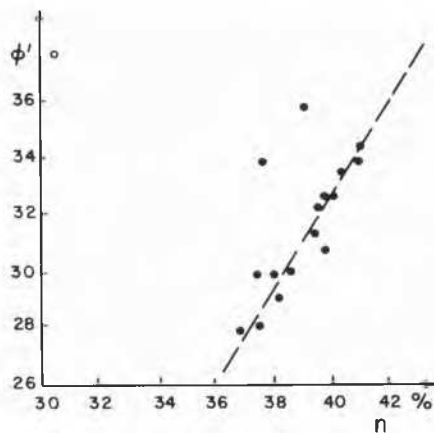


FIG. 10. Variations de ϕ' en fonction de la porosité.

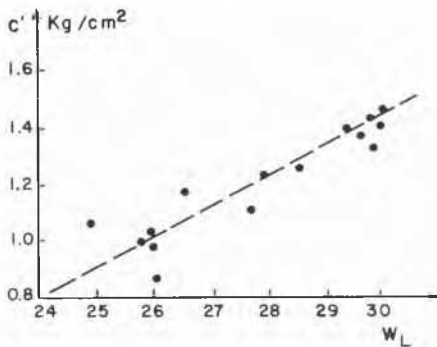


FIG. 11. Variations de c' en fonction de la limite de liquidité.

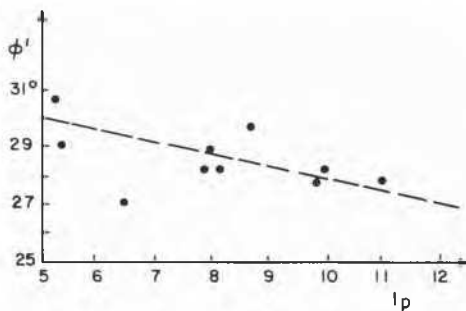


FIG. 12. Variations de ϕ' en fonction de l'indice de plasticité.

donnent des valeurs similaires pour les caractéristiques au cisaillement des craies.

Les valeurs des angles de frottement effectifs sont sensiblement les mêmes, leur valeur étant légèrement supérieure à 30° . La cohésion effective supposée nulle dans les calculs est en réalité plus importante mais elle varie très fortement suivant les conditions locales, il est donc impossible d'en tirer profit lors d'une étude de stabilité.

Malgré la diversité des échantillons étudiés, au point de vue provenance ou histoire géologique, il semble que la valeur de l'angle de frottement effectif varie très peu. Les facteurs influençant le plus sa variation sont la teneur en eau et la porosité des échantillons, et avec moins d'importance le degré de saturation et l'indice de plasticité. Comme pour les autres sols la loi de Caquot et Kérisel $e \tan \phi' = \text{constante}$ se vérifie également.

La cohésion effective voit ses variations fortement influencées par la teneur en eau et le degré de saturation des échantillons. L'ordre de grandeur de ces variations peut même être du simple au double. Les limites d'Atterberg ont une influence plus faible sur la valeur de la cohésion.

RÉFÉRENCES

- CAQUOT, A. et J. KÉRISEL (1956). *Traité de mécanique des sols*. Paris, Gauthier-Villars.
- DE BEER, E. (1948). Données concernant la résistance au cisaillement déduites des essais de pénétration en profondeur. *Géotechnique*, Vol. 1, No. 1.
- FLORENTIN, J., G. L'HÉRITTEAU, M. FARHI, et L. PAREZ (1961). Observations faites sur les craies comme couche de fondations. *Comptes-rendus du 5^{ème} Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux des Fondations*, tome 1, pp. 101-6.
- SCHERRER, H. U. (1961). Determination of liquid limit by the static cone penetration test. *Comptes-rendus du 5^{ème} Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux des Fondations*, tome 1, pp. 319-22.