

# 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.*

# Recherches Expérimentales sur la Courbe Intrinsèque de Rupture des Sols Pulvérulents

## Experimental Investigations on the Intrinsic Rupture Curve of Cohesionless Soils

par M. R. PELTIER, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, Directeur de Recherches et d'Essais au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

### Sommaire

Ces recherches avaient pour objet de déceler l'influence de la contrainte intermédiaire principale sur l'angle de frottement interne des sols pulvérulents. Deux sortes d'essais ont été ainsi effectués. D'une part, des essais triaxiaux de compression et de striction, d'autre part des essais à l'aide d'un appareil spécialement construit: une boîte de cisaillement triaxiale, c'est-à-dire une boîte de cisaillement conçue pour que l'on puisse y faire varier à volonté la contrainte principale intermédiaire. On a observé une influence nette, mais cependant assez faible de celle-ci sur la valeur de  $\phi$ . Mais des contradictions apparaissent entre les premiers essais et les seconds qui nécessitent de plus amples recherches.

D'autre part, on a pu montrer que dans les essais triaxiaux classiques, il se produisait dans le sol, peu avant sa rupture, des modifications structurales intenses, entraînant une anisotropie induite, pouvant peut être expliquer les anomalies observées.

### But des Recherches

Ces recherches avaient pour but d'élucider certaines anomalies observées expérimentalement, notamment par M. Habib, en ce qui concerne la courbe intrinsèque de rupture des sols pulvérulents. On sait que tout état de contrainte en un point d'un milieu continu peut être représenté par trois cercles de Mohr  $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$ , disposés comme indiqué sur la Fig. 1. D'autre

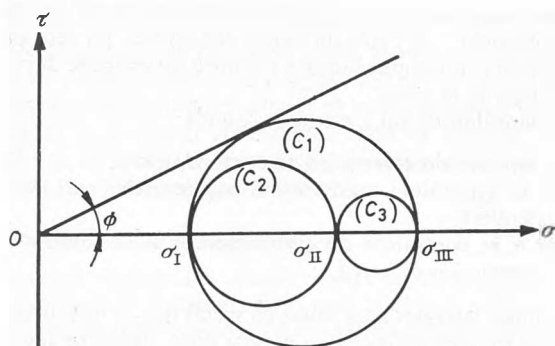


Fig. 1 Cercles de Mohr et courbe intrinsèque  
Typical Mohr circles and intrinsic curve

part, la courbe intrinsèque de rupture est, par définition, l'enveloppe des cercles  $C_1$  correspondant à tous les états de rupture possibles du matériau. Cette définition implique, notamment, que la contrainte principale intermédiaire:  $\sigma_{II}$  n'ait pas d'influence sur la position de la courbe intrinsèque de rupture, c'est-à-dire sur l'angle de frottement interne:  $\phi$ . (On a:  $\sigma_I < \sigma_{II} < \sigma_{III}$ ).

Nos recherches ont principalement consisté à faire varier  $\sigma_{II}$  pour tenter de vérifier expérimentalement cette théorie.

(Il est indiqué ici que, faute de places, la présente communication ne constitue qu'un résumé très sommaire des résultats obtenus, qui seront d'ailleurs publiés plus complètement dans

### Summary

The purpose of these tests was to reveal the influence of the intermediate principal stress on the internal friction of cohesionless soils. Two types of tests have been carried out. First, many compression and striction triaxial tests, also a number of tests using a special apparatus: a triaxial shear box. (A shear box in which the intermediate principal stress can be altered.)

We observe a small but definite influence of this stress on the angle of internal friction. However, on certain points the results of these tests are contradictory and it appears that more research is still necessary.

On the other hand we have shown that in the standard triaxial test shortly before failure, important changes in the internal structure of the soil occur. The soil then becomes anisotropic which can perhaps explain the observed anomalies.

une revue spécialisée, en même temps qu'une ébauche de théorie explicative.)

### Essais Triaxiaux de Compression et de Striction

Les appareils actuels, dits triaxiaux, ne sont en fait que des appareils biaxiaux, puisque l'on n'y est maître que de deux contraintes principales: la pression,  $P$  sur la tête de l'éprouvette,

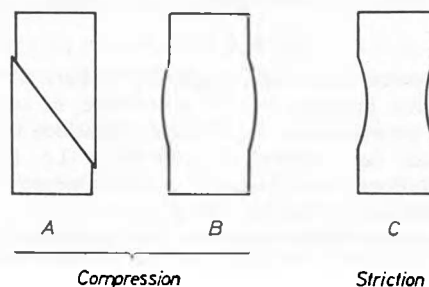


Fig. 2 Formes caractéristiques de rupture dans l'essai triaxial de compression et de striction

Typical forms of shear in compression and striction in the triaxial test

et la pression latérale,  $p$  exercée à l'aide du liquide sur les parois latérales de l'éprouvette cylindrique.

Mais il y a deux façons de procéder pour atteindre la rupture de l'éprouvette: la *compression* et la *striction*. Généralement, dans les appareils modernes, on réalise la compression en maintenant la pression  $p$  constante, et en augmentant  $P$  jusqu'à rupture; et on réalise la striction en maintenant  $p$  constante et en diminuant  $P$  jusqu'à rupture.

Les éprouvettes rompues par compression ont indifféremment, soit la forme 'avec plan de glissement' (A, sur la Fig. 2) soit la forme 'en barillet' (B). Les éprouvettes rompues par striction n'ont que la forme caractéristique (C).

Au point de vue de la théorie de la courbe intrinsèque de M. Caquot, la différence entre les deux méthodes tient à la position de la contrainte intermédiaire:  $\sigma_{II}$ .

Dans l'essai de compression, on a :

$$\sigma_I = \sigma_{II} = p \text{ et } \sigma_{III} = P \quad (P > p)$$

et dans l'essai de striction :

$$\sigma_I = P \text{ et } \sigma_{II} = \sigma_{III} = p \quad (P < p)$$

J'ai rassemblé sur le diagramme ci-joint (Fig. 3) les résultats obtenus par M. Habib, par M. Brice et par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C.). Ce dernier, pour

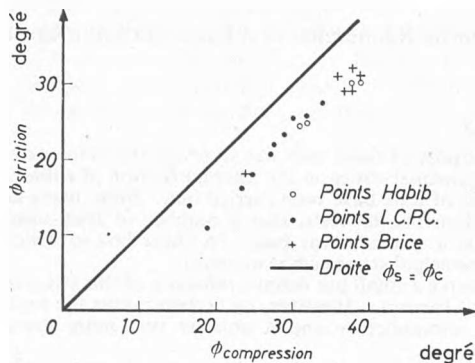


Fig. 3 Comparaison des résultats des essais triaxiaux de compression et de striction

Comparison of results of compression and striction in the triaxial tests

étendre au maximum le champ des résultats, a utilisé non seulement des sables naturels convenablement triés, mais aussi des matériaux artificiels tels que des billes de verre très fines, ayant un faible angle de frottement interne.

### Discussion des Résultats

On observe que l'angle de frottement interne mesuré par striction ( $\phi_s$ ) est toujours sensiblement inférieur au même angle mesuré par compression ( $\phi_c$ ). *Grosso modo*, dans le domaine exploré, on observe la loi statistique approximative suivante :

$$\phi_s = \phi_c = 7^\circ$$

Ces différences, bien supérieures aux erreurs d'expérience, ne peuvent être imputées ni à l'appareillage, ni au processus d'essai ; car les essais ont été effectués dans des laboratoires différents par des opérateurs différents. (Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées possède notamment trois appareils triaxiaux très perfectionnés.)

Ces essais ont été effectués avec le plus grand soin, et recommencés plusieurs fois. On a toujours retrouvé à moins de un degré près les résultats initiaux.

On pourrait penser que ces anomalies étaient dues au dispositif opératoire. C'est ainsi que la pression des gaines en caoutchouc sur l'éprouvette tend à réduire  $\phi_s$  observé et à accroître  $\phi_c$ . Il en est de même pour la courbure de l'éprouvette produite par la striction, qui provoque une composante verticale de  $p$ . Mais le calcul montre que ces facteurs ne peuvent avoir qu'une faible influence sur les résultats, une influence bien inférieure aux écarts observés ; de plus ils devraient, en fait, intervenir en déplaçant les cercles de Mohr de rupture observés, de façon qu'une fausse cohésion apparaisse. Or il n'en est rien, sinon à une très faible échelle, qui ne modifie pratiquement pas les résultats.

Une autre recherche a consisté à obtenir la rupture par compression de deux façons différentes :

Soit, selon la méthode classique, en maintenant  $p$  constante et en augmentant  $P$  (méthode dite à charge croissante) ;

Soit en maintenant  $P$  constante et en réduisant progressivement  $p$  (méthode dite à charge décroissante).

De même pour la striction.

Mais l'expérience a montré que les résultats étaient les mêmes, soit que l'on procède par charge croissante, soit que l'on procède par charge décroissante.

Ainsi, avec du sable de Leucate tamisé entre 1.6 et 2 mm, on a trouvé, pour valeurs de l'angle de frottement interne :

- striction : charge croissante 28°
- striction : charge décroissante 28° 30'
- compression : charge croissante 37°
- compression : charge décroissante 36° 30'

### Boîte de Cisaillement 'Triaxiale'

J'ai alors imaginé et fait construire une nouvelle boîte de cisaillement dite 'triaxiale', dans laquelle on peut faire varier à volonté la contrainte intermédiaire, indépendamment des autres contraintes (Fig. 4). Le principe de cet appareil est le suivant :

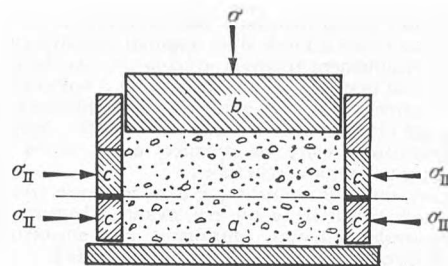


Fig. 4 Schéma de la boîte de cisaillement triaxiale  
Scheme of a triaxial shear box

- (a) Echantillon de sol à essayer (soil sample)
- (b) Piston mobile de charge verticale (moving piston for vertical loading)
- (c) Jous latérales mobiles pour exercer la contrainte principale intermédiaire (laterally moving bodies for applying the intermediate principal stress)

c'est une boîte de cisaillement, analogue aux boîtes de cisaillement usuelles, mais avec cette différence qu'au lieu d'être fixes, les jous latérales sont mobiles dans le sens horizontal et normal au cisaillement. A l'aide de leviers appropriés, on peut exercer une pression constante choisie à l'avance sur chacune des quatre demi-jous de la boîte.

L'échantillon de sol y est alors soumis :

- à la contrainte verticale de compression  $\sigma$  ;
- à la contrainte transversale  $\sigma_{II}$  (exercée sur les jous latérales) ;
- et à la contrainte de cisaillement  $\tau$  à la rupture ( $\tau$  est normale à  $\sigma$  et à  $\sigma_{II}$ ).

Les jous latérales sont faites en métal dur et bien lisse ; elles sont d'autre part graissées. On peut donc admettre que  $\sigma_{II}$  est une contrainte principale ; c'est la contrainte principale intermédiaire, puisque perpendiculaire au cisaillement.

D'après la théorie de la courbe intrinsèque,  $\sigma_{II}$  ne devrait pas influencer sur la valeur de  $\tau$  à la rupture ; c'est-à-dire que l'on devrait observer :

$$\tau/\sigma = \text{constante} = \tan \phi$$

Or, en fait, on a observé une loi de la forme

$$\tau/\sigma = A + B \cdot \sigma_{II}/\sigma$$

où  $A$  et  $B$  sont des constantes caractéristiques du matériau et de sa compacité.

On a par exemple mesuré :

- pour le sable de Leucate, tamisé entre 1.6 et 2 mm :

$$A = 0.54 ; B = 0.093 ;$$

— pour le sable de Seine, tamisé entre 0.5 et 1 mm;

$$A = 0.60; \quad B = 0.095;$$

— pour le sable de Leucate, tamisé entre 0.5 et 1 mm;

$$A = 0.60; \quad B = 0.120.$$

Or,  $\sigma_{II}$  ne peut varier qu'entre les deux contraintes principales extrêmes:

soit

$$\sigma_{II} = \sigma / (1 + \sin \phi)$$

(correspondant à la rupture par compression)

et  $\sigma'_{II} = \sigma / (1 - \sin \phi)$

(correspondant à la rupture par striction).

On en déduit qu'avec les sables ci-dessus, l'angle  $\phi$  peut varier entre les limites:  $\phi_c$  (compression), et  $\phi_s$  (striction) données dans le Tableau 1 ci-après:

Tableau 1

	$\phi_c$	$\phi_s$
Sable de Leucate: 1.6-2 mm	31°	38°
Sable de Seine: 0.5-1 mm	33° 30'	41° 20'
Sable de Leucate: 0.5-1 mm	34° 5'	45° 25'

On notera que les différences entre ces deux valeurs extrêmes sont du même ordre que celles observées dans les essais de striction et compression précités; mais chose curieuse, elles se produisent en sens inverse.

On voit que cette variation de  $\phi$  est nettement supérieure aux erreurs d'expérience. On ne peut pas davantage l'expliquer par une variation de la compacité des sables qui était pratiquement la même et est restée constante dans ces divers essais.

Je pense, comme je l'indique plus loin, que ces variations sont dues à une anisotropie du matériau; même si l'échantillon n'a pas une anisotropie de constitution, c'est-à-dire une anisotropie initiale, il s'en crée une au cours de l'essai de cisaillement, à la suite des grands glissements du sol.

Pour démontrer que ces anomalies n'étaient pas dues à une anisotropie de constitution, nous avons transformé légèrement la boîte de façon à pouvoir la remplir, soit par le haut, suivant le processus usuel, soit latéralement en enlevant provisoirement une joue, et en basculant provisoirement de 90° la boîte. On a observé que les résultats étaient pratiquement identiques, quel que soit le mode de remplissage adopté.

### Variations de Volume des Eprouvettes

Pour tenter d'éclairer la question sous un autre angle, nous avons d'autre part procédé à des essais triaxiaux, en mesurant d'une façon très précise les variations de volume de l'éprouvette. Cette mesure était effectuée à l'aide d'eau passant dans l'éprouvette à travers les plaques poreuses des têtes. Plus exactement, on remplissait d'eau, aussi complètement que possible l'intérieur de l'éprouvette, des plaques poreuses des deux têtes, et des canalisations y aboutissant. Puis le robinet de la canalisation conduisant à la tête inférieure était hermétiquement fermé; celui de la tête supérieure était ouvert, et sa canalisation communiquait avec l'air libre par l'intermédiaire d'un long tube de verre fin, calibré et gradué. Le niveau de l'eau dans le tube permettait de mesurer les variations de volume de l'éprouvette avec une grande précision (supérieure au dixième de centimètre cube, pour un volume d'éprouvette de 2120 c.c., et pour des variations maxima de volume comprises entre 10 et 25 c.c.).

On notera que l'on mesure bien ainsi les variations de volume de l'éprouvette, car d'une part les variations de volume des grains solides du sol sous la charge sont négligeables, d'autre

part, même s'il reste quelques bulles d'air dans le sol, cela n'entraîne pas d'erreur, puisque l'on opère à pression interne de l'eau constante.

Un grand nombre de résultats ont été ainsi obtenus; ceux qui concernent l'essai de compression à charge latérale constante ont tous l'allure de celui indiqué sur le diagramme de la Fig. 5, donné à titre d'exemple. Sur ce diagramme, on a tracé la courbe des variations de volume de l'éprouvette en fonction des pressions verticales (exprimées en kg/cm<sup>2</sup>) exercées sur les têtes des éprouvettes. Il s'agissait d'un sable de Seine (0.5-1 mm), essayé à la pression latérale de 2 kg/cm<sup>2</sup>.

Cette courbe, donnant les variations de volume, semble tout d'abord partir horizontalement à l'origine\*, puis prend rapidement une allure descendante à peu près linéaire. Ensuite, elle se redresse vers le haut, passe par un minimum, et paraît croître vers une augmentation de volume infinie (asymptote verticale) pour la charge de rupture.

Le fait que le volume de l'éprouvette se mette à augmenter quand la charge verticale croît au-delà d'une certaine valeur critique, est très instructif. Il montre qu'au-delà de cette limite, il y a une modification intense de la structure interne du sol, et des mouvements relatifs des grains plus importants que

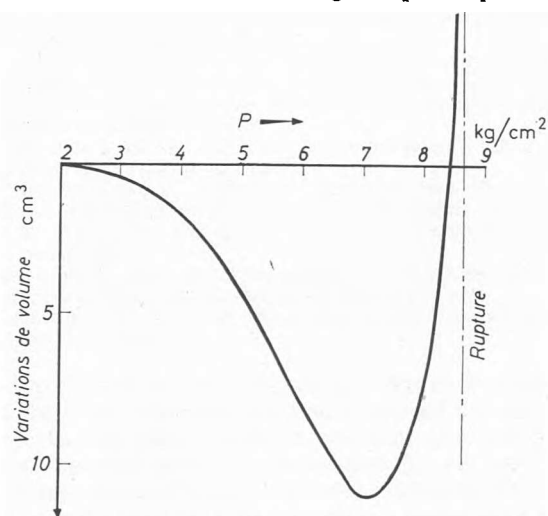


Fig. 5 Courbe des variations de volume dans l'essai triaxial classique  
Curve of volume changes in standard triaxial test

le laisserait prévoir la lecture de la seule courbe des déformations verticales.

Dans les essais triaxiaux effectués selon les autres processus (compression à charge latérale décroissante, et striction), on n'observe pas ce phénomène du minimum de volume, mais une variation régulière de celui-ci, beaucoup plus forte d'ailleurs dans la compression que dans la striction.

### Conclusions

Les conclusions ci-après ne sont données que pour fixer les idées, car, en l'état actuel de nos connaissances, elles doivent être considérées seulement comme provisoires.

(a) — L'expérience montre que dans les essais triaxiaux sur sols pulvérulents, l'angle de frottement interne mesuré par compression est systématiquement supérieur à celui mesuré par striction. La différence est de l'ordre de 7°.

\* Peut être ce départ horizontal n'est-il qu'une apparence, due à un processus opératoire défectueux. Car, pour bien faire, il y aurait lieu de partir d'une éprouvette soumise sur toutes ses faces à la pression qui sera au cours de l'essai la pression latérale. Or sur l'appareil triaxial que nous avons utilisé, il était très difficile de régler simultanément l'augmentation de la pression latérale et celle de la charge verticale, pour que cette condition soit bien remplie.

(b) — Des essais effectués sur ces sols à l'aide d'une boîte de cisaillement vraiment triaxiale (c'est-à-dire un appareil où l'on est maître de la contrainte principale intermédiaire  $\sigma_{II}$ ), ont montré que la contrainte intermédiaire  $\sigma_{II}$  avait une influence sensible sur l'angle de frottement interne mesuré. Cette influence est du même ordre de grandeur que celle observée dans les essais précédents (compression et striction), mais se manifeste en sens inverse.

(c) — La mesure des variations de volume des éprouvettes soumises à l'essai triaxial de compression classique, montre qu'il se produit dans le sol essayé, peu avant sa rupture, des modifications structurales intenses. Celles-ci sont telles qu'une augmentation considérable de volume se produit, au-delà d'un certain seuil d'augmentation de la charge.

Il en résulte la création d'une anisotropie structurale, qui pourrait expliquer les anomalies signalées ci-dessus, quant à la théorie de la courbe intrinsèque. Il s'agit d'ailleurs là uniquement d'une anisotropie provoquée par l'essai, et non pas d'une anisotropie initiale de constitution; les essais ont en effet montré que cette dernière était négligeable avec les matériaux essayés.

Cette anisotropie induite peut expliquer que le matériau ne

satisfait plus entièrement à la théorie de la courbe intrinsèque qui n'est valable que pour les milieux isotropes. Elle n'explique toutefois pas l'inversion du sens de l'action de la contrainte intermédiaire, observée entre les essais triaxiaux de compression — striction, et les essais à la boîte de cisaillement triaxiale.

(d) — En ce qui concerne les applications pratiques, on notera que la contrainte intermédiaire a une influence nette sur l'angle de frottement interne observé, mais malgré tout assez faible ( $\pm 5^\circ$  au maximum lorsque cette contrainte intermédiaire varie entre ses deux valeurs extrêmes possibles). Comme dans les ouvrages courants, cette contrainte intermédiaire varie beaucoup moins, l'influence de ces variations peut être parfaitement négligée.

Il serait toutefois souhaitable de revoir nos processus d'essais, et de les perfectionner de façon que les laboratoires fournissent aux ingénieurs, pour chaque ouvrage, la valeur la mieux adaptée de l'angle de frottement interne. D'autre part, dans certains ouvrages travaillant dans les trois dimensions de l'espace, on aura intérêt à connaître la loi d'influence de la contrainte intermédiaire sur l'angle de frottement interne.

De toutes façons, il apparaît que de nombreuses recherches sont encore à faire dans cette voie.