

| | |
|---------------------|--|
| Zeitschrift: | Bulletin technique de la Suisse romande |
| Band: | 70 (1944) |
| Heft: | 25 |
| Artikel: | Sols et fondation: remarques sur la résistance au cisaillement des sols et son importance dans quelques cas particuliers |
| Autor: | Daxelhofer, J.-P. |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-53271 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 27.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN TECHNIQUE

DE LA SUISSE ROMANDE

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 13.50 francs

Etranger : 16 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 11 francs

Etranger : 13.50 francs

Prix du numéro :

75 centimes.

Pour les abonnements
s'adresser à la librairie
F. Rougè & C^e, à Lausanne.

Paraissant tous les 15 jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève ; Vice-président : G. EPITAUX, architecte, à Lausanne ; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres : *Fribourg* : MM. L. HERTLING, architecte ; P. JOYE, professeur ; *Vaud* : MM. F. CHENAUX, ingénieur ; E. ELSKES, ingénieur ; E. JOST, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. MARTIN, architecte ; E. ODIER, architecte ; *Neuchâtel* : MM. J. BÉGUIN, architecte ; R. GUYE, ingénieur ; A. MÉAN, ingénieur ; *Valais* : M. J. DUBUIS, ingénieur ; A. DE KALBERMATTEN, architecte.

RÉDACTION : D. BONNARD, ingénieur, Case postale Chauderon 475, LAUSANNE.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE

A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte.

SOMMAIRE : Sols et fondations : *Remarques sur la résistance au cisaillement des sols et son importance dans quelques cas particuliers*, par J.-P. DAXELHOFER, ingénieur. — *Sur la généralisation d'une analogie entre cinq phénomènes de Mécanique* (suite et fin), par HENRY FAVRE, professeur à l'Ecole polytechnique fédérale, Zurich. — *Villes et routes*, par EDM. VIRIEUX, architecte. — *Société suisse des ingénieurs et des architectes : Groupe professionnel des architectes pour les relations internationales*. — *Service de placement*.

SOLS ET FONDATIONS¹

Remarques sur la résistance au cisaillement des sols et son importance dans quelques cas particuliers

par J.-P. DAXELHOFER, ingénieur.

Les idées comme les objets ont une inertie.

LE CHATELIER.

Les trois propriétés principales d'un sol de fondation sont la perméabilité, la compressibilité et la résistance au cisaillement. Les autres propriétés ou caractéristiques en dépendent. La plus importante des trois est peut-être la résistance au cisaillement. C'est aussi la plus difficile à déterminer expérimentalement. Elle intervient dans la plupart des problèmes de stabilité des fondations. On l'exprime généralement sous la forme commode donnée par Coulomb.

$$(1) \tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad \text{dans laquelle}$$

 τ est la résistance au cisaillement c la cohésion σ la sollicitation normale au plan considéré $\operatorname{tg} \varphi$ le coefficient de frottement et φ l'angle de frottement.

c et $\operatorname{tg} \varphi$ sont des coefficients expérimentaux. Cette relation représente un état d'équilibre limite¹.

Par analogie avec les résultats expérimentaux obtenus sur les corps solides, l'hypothèse de rupture la plus généralement adoptée pour les sols est celle de la droite intrinsèque de Caquot ou la condition de plasticité de Mohr qui ne sont qu'une représentation graphique de la loi de Coulomb. Pour l'argile, d'autres hypothèses de rupture peuvent être adoptées. En effet, dès que les terrains ont des propriétés plastiques et que les déformations *avant rupture* sont importantes, il y a intérêt à utiliser les théories de la plasticité ou des écoulements plastiques (Hencky-Bingham).

Les études récentes ont montré que les coefficients de Coulomb ne représentent pas, pour un sol donné, des caractéristiques bien définies.

Ainsi, la loi exprimant la résistance au cisaillement d'un matériau pulvérulent ne contient qu'un seul coefficient expérimental : $\operatorname{tg} \varphi$, puisque le coefficient c est nul par définition ; ($\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi$) et ce coefficient dépend du degré de compacité du sol, des sollicitations et de la forme des grains. Pour un même sable, l'angle φ peut varier entre 32 et 45°.

Pour les terrains argileux, le coefficient de frottement $\operatorname{tg} \varphi$ n'est pas une constante non plus. Il varie non seulement en fonction de la compacité, de la valeur relative des sollicitations principales, mais encore en fonction

¹ Tous les phénomènes à frottement sont mieux représentés par de inégalités de la forme

$$-\operatorname{tg} \varphi \leq \frac{\tau}{\sigma} \leq +\operatorname{tg} \varphi.$$

Publicité :
TARIF DES ANNONCES

Le millimètre
(larg. 47 mm.) 20 cts.
Tarif spécial pour fractions
de pages.
En plus 20 % de majoration de guerre.
Rabais pour annonces
répétées.



ANNONCES-SUISSES S.A.
5, Rue Centrale,
LAUSANNE
& Succursales.

tion d'autres facteurs : rapidité d'application des efforts de cisaillement, sollicitations subies antérieurement, possibilité de drainage de l'eau intersticielle. Il en est de même du facteur exprimant la cohésion. Ce n'est pas une constante caractéristique du matériau. Il dépend avant tout de la compacité (ou ce qui revient au même : des charges imposées avant l'application de l'effort de cisaillement ainsi que du temps d'application de ces sollicitations). Ce coefficient reflète en quelque sorte l'histoire mécanique des efforts auxquels le terrain a été soumis.

C'est pourquoi, sur la base des études systématiques de Hvorslev [1]¹, Terzaghi proposait, en 1936 déjà, d'exprimer la résistance au cisaillement des sols argileux par la relation suivante :

$$(2) \quad \tau = x p_e + (\sigma - s) \operatorname{tgp} \quad \text{dans laquelle}$$

τ est la résistance unitaire au cisaillement
 x un coefficient expérimental sans dimension appelé facteur de cohésion
 p_e la pression équivalente de consolidation qui se détermine sur la base d'un essai oedométrique
 σ la sollicitation unitaire normale au plan de cisaillement
 s la tension dans l'eau intersticielle
 tgp un coefficient expérimental caractéristique du sol considéré et indépendant des conditions d'expérimentation.

L'exemple suivant permet de se rendre compte des variations que peuvent subir les coefficients de la loi de Coulomb [2] :

Il s'agit d'une argile limoneuse de la région de Vienne soigneusement homogénéisée et prise à la limite de liquidité.

L'équation de Coulomb appliquée aux résultats d'essais sur un échantillon consolidé au préalable sous une charge de 5 kg/cm² puis déchargé à zéro par paliers successifs, donne le résultat suivant, si l'essai de cisaillement est effectué rapidement sans possibilité de drainage, c'est-à-dire avec une teneur en eau sensiblement constante et équivalente à $\epsilon = \epsilon_0 = 0,77$

$$\tau = 0,58 + \sigma \operatorname{tg} 0^\circ 50' \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Avec le même matériau et le même appareil de cisaillement, si on attend la consolidation sous diverses charges et que l'effort de cisaillement soit appliqué rapidement (essai rapide), la résistance au cisaillement est donnée par la relation

$$\tau = 0,58 + \sigma \operatorname{tg} 13^\circ 30' \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Si, dans les mêmes conditions que précédemment, l'effort de cisaillement est appliqué lentement jusqu'à rupture (essai lent — pression intersticielle à peu près nulle au moment du glissement) les résultats d'essais sont exprimés par

$$\tau = 0,18 + \sigma \operatorname{tg} 24^\circ 0' \quad \text{kg/cm}^2$$

L'équation (2) donne pour ces divers cas

$$\tau = 0,10 p_e + (\sigma - s) \operatorname{tg} 17^\circ 30'$$

L'angle de frottement interne de cette argile tel qu'on le comprend généralement est donc 17° 30'.

Il résulte de cet exemple qu'il faut faire très attention lorsqu'on applique des coefficients expérimentaux et être plus prudent encore si l'on se base sur des coefficients donnés par des aides-mémoire.

Appareils pour déterminer la résistance au cisaillement des sols.

Les appareils pour déterminer ces coefficients en laboratoire ont donc une importance primordiale et il importe

de connaître les conditions d'expérimentation et les principaux types d'appareils de cisaillement.

Les conditions d'expérimentation doivent être choisies de manière à se rapprocher le plus possible des conditions naturelles et dépendent donc du problème à résoudre.

Il n'y a pas encore d'appareil de cisaillement idéal, c'est-à-dire susceptible de remplir toutes les conditions requises pour une étude complète et systématique de la résistance au cisaillement d'un sol. Un tel appareil devrait permettre de déterminer les caractéristiques suivantes [3] :

a) La résistance maximum au cisaillement, c'est-à-dire celle qui correspond à la rupture¹. C'est celle qui est à la base des calculs du coefficient de sécurité à la rupture d'un ouvrage ou d'une fondation.

b) La résistance limite au cisaillement avant tout écoulement plastique et la vitesse de cet écoulement lent avant rupture. Beaucoup de sols cohérents sont sujets à de fortes déformations avant rupture, ce qui peut avoir une influence sur les tassements ou les déformations et donc sur le coefficient de sécurité d'une structure.

c) La diminution temporaire ou permanente de résistance au cisaillement après rupture. Cette caractéristique est essentielle pour la stabilité d'ouvrages en terre ou de fondations lorsque certaines zones locales sont ou peuvent être à l'état « plastique », c'est-à-dire lorsqu'en certains points des ruptures locales sont possibles ou ne peuvent être évitées. Cette diminution de résistance peut être supérieure à 50 %.

d) La relation entre l'effort de cisaillement, les déformations et les variations de volume. La connaissance de ces phénomènes est nécessaire pour déterminer la porosité ou indice de vide critique ; elle est très utile pour l'interprétation des résultats précédents.

La porosité ou compacité critique est celle pour laquelle les déformations de cisaillement se font à volume constant. Si la compacité est supérieure à celle critique, le sol a tendance à gonfler sous l'influence d'un effort de cisaillement, surtout lorsqu'on approche de la rupture. Si elle est inférieure à la valeur critique, le sol se tasse. Cette caractéristique importante pour les constructions en terre et sur laquelle A. Casagrande a le premier attiré l'attention [4] n'est pas non plus une constante pour un sol donné même pulvérulent. Elle dépend des sollicitations (fig. 7).

Les appareils de cisaillement doivent en outre être de construction simple, d'un maniement facile ; la préparation de l'échantillon et le remplissage de l'appareil doivent pouvoir se faire avec un minimum de perturbation dans la structure naturelle du sol à examiner et ne pas nécessiter une trop grande quantité de matière afin que les caractéristiques ne varient pas trop et que d'autres essais puissent être exécutés sur les échantillons disponibles. Ce dernier facteur a une influence économique ; les dimensions des échantillons et par suite le diamètre des sondages d'étude et donc tout l'outillage pour le prélèvement sur place des échantillons en dépendent.

L'étude de la résistance au cisaillement des sols étant très complexe, de nombreux appareils ont été construits dans les différents laboratoires spécialisés. Ils se ramènent à 4 types principaux.

¹ Pour les chiffres entre [] voir notice bibliographique à la fin de l'article.

¹ Rupture proprement dite ou écoulement plastique.

1. Les appareils à translation.
 2. " " à rotation
 3. " " à torsion sur
 4. Les appareils triaxiaux (détermination de la résistance au cisaillement par un calcul).
- 1 (mesure directe de la résistance au cisaillement).
- cylindres pleins ou creux

Nous allons examiner les avantages et les inconvénients de ces types d'appareils, et fixer ainsi leur champ d'application. Notons qu'ils peuvent tous être de deux modèles : soit à déformation imposée avec mesure des efforts au dynamomètre, soit à effort imposé et mesures des déformations.

1. *Cisaillement par translation.* (Appareil de Krey — Casagrande — Terzaghi, à boîtes de section carrée ou rectangulaire, ou Housel — Hæfeli — à section circulaire.) C'est l'appareil le plus connu. Il se trouve dans tous les laboratoires géotechniques.

Les avantages sont : simplicité de construction, de remplissage et de maniement.

Il permet d'exécuter un essai « lent » ou « rapide ». Le drainage est bon et permet d'exécuter un essai « lent » dans un temps relativement court,

Ses inconvénients sont nombreux :

- a) La section est variable dès le début de l'essai.
 b) L'état de contrainte est bien plus compliqué qu'en apparence. La rupture est progressive (fig. 1). Pour les sols avec une résistance au cisaillement après rupture très inférieure à la résistance maximum, ce défaut est assez grave.
 c) On ne peut déterminer la résistance après rupture.
 d) Les changements de volume et les déformations ne sont pas exactement connus.
 e) Il n'est pas possible d'étudier la déformation plastique avant rupture.
 f) Le rapport entre le périmètre et la surface de cisaillement varie avec les dimensions de l'appareil. L'effet de paroi est donc plus important pour les petits appareils.
 g) Surtout pour les petites charges, un des cadres a tendance à basculer légèrement par rapport à l'autre.

C'est un bon appareil pour les essais normaux mais il ne convient pas pour des recherches.

2. *Cisaillement par rotation.*

C'est encore un appareil à cisaillement direct.

Le schéma est le suivant (fig. 2) :

Avantages : Meilleure répartition des efforts de cisaillement, état de contrainte plus clair, possibilité d'étude de la résistance au cisaillement après rupture.

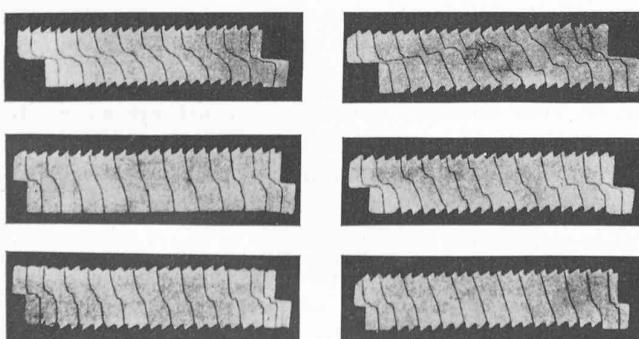


Fig. 1. — Echantillons de sols stratifiés cisaillés dans un appareil à translation, La rupture commence aux bords.

Inconvénients : Construction très compliquée afin d'assurer la consolidation de l'échantillon annulaire dans le sens radial.

Préparation de l'échantillon difficile, convient mal pour des sols intacts. Il est pratiquement abandonné.

3. *Appareil à torsion.*

Les essais peuvent se faire sur cylindres pleins ou creux.

Nous n'examinerons que ce dernier cas. Le premier appareil de ce genre fut construit par Tiedemann en 1933. En 1934, divers appareils furent construits indépendamment par Hvorslev à Vienne, par Hæfeli à Zurich et par Cooling et Smith à Londres. L'appareil à tore de Lehuerou-Kerisel est une variante du même type.

La pression normale est transmise sur l'échantillon en forme d'anneau à section rectangulaire au moyen d'un piston creux. L'effort de cisaillement est obtenu par torsion autour de l'axe vertical du cylindre.

Les avantages sont les suivants :

La section de cisaillement est constante pendant tout l'essai même après de très grands déplacements.

Si la déformation est imposée, il convient bien pour l'étude de la diminution de τ après rupture ainsi que de l'écoulement plastique rapide après rupture. Si les efforts sont imposés, on peut étudier la résistance maximum et l'écoulement plastique lent avant rupture.

Il présente l'inconvénient d'un remplissage assez délicat. Les déformations et surtout les variations de volume sont difficiles à mesurer.

La théorie permet de tenir compte de la variation de τ en fonction du rayon. C'est un appareil très indiqué pour des recherches et indispensables pour l'étude de la résistance au cisaillement après rupture.

4. *Appareil triaxial* (fig. 3).

Il dérive des appareils utilisés pour déterminer la résistance des roches ou des bétons sous l'influence d'une triple étreinte (von Karman 1912).

Les avantages de cet appareil sont les suivants :

L'état de contrainte auquel l'échantillon cylindrique est soumis est clair et bien déterminé. On n'applique sur les faces du cylindre que des efforts normaux, on peut faire varier une des sollicitations indépendamment de l'autre ; c'est donc un essai très souple et qui permet de réaliser des conditions d'essai très voisines des conditions naturelles. Les déformations et les efforts sont régulièrement distribués avant la rupture.

On peut mesurer exactement les changements de volume pendant toute la durée de l'essai. Les variations de dimensions sem-

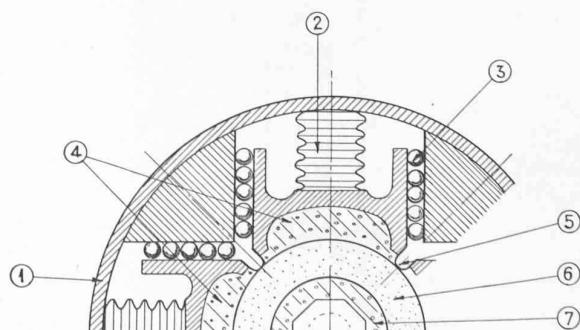


Fig. 2. — Schéma de l'appareil de cisaillement par rotation (par opposition à l'appareil de cisaillement par torsion),

1. Anneau extérieur fixe. — 2. Vérins hydrauliques. — 3. Pierres poreuses qui compriment l'échantillon. — 4. Echantillon de terrains. — 5. Jeu permettant la consolidation du sol et membranes en caoutchouc. — 6. Pierres poreuses constituant l'anneau intérieur mobile.

blent ne pas avoir une influence sensible sur la résistance au cisaillement, ni sur les variations de volume.

Les inconvénients sont : l'impossibilité de déterminer la résistance après rupture ; la résistance au cisaillement n'est pas mesurée directement mais résulte d'un calcul ; les échantillons sont relativement longs et donc d'un drainage difficile. La consolidation est lente et doit se faire, si possible, dans un autre appareil. Les tentatives faites jusqu'alors pour hâter la consolidation en créant un drain axial ou une surface drainante entre l'échantillon et la membrane de caoutchouc présentent des inconvénients et ne sont pas à conseiller. C'est, actuellement, l'appareil le plus indiqué pour déterminer : la résistance maximum au cisaillement, les variations de volume avant rupture et pour faire des recherches sur l'écoulement plastique avant la rupture.

Pour comparer les résultats obtenus avec cet appareil et ceux obtenus par cisaillement direct sur échantillons intacts, il ne faut pas perdre de vue que l'orientation des plans de rupture par rapport à la stratification n'est pas la même dans le triaxial. Pour avoir des résultats comparables, l'axe du cylindre devrait faire un angle d'environ $45^\circ - \frac{\rho}{2}$ par rapport à la normale aux plans de stratification.

* * *

A part ces types d'appareils classiques, il y a d'autres moyens indirects pour mesurer la résistance au cisaillement des sols, par exemple la mesure des angles entre les surfaces de glissement à rupture, l'essai d'écrasement de Jürgenson, etc.

L'étude de la résistance à traction des sols argileux apporte une contribution très utile à la connaissance de la résistance au cisaillement des sols. Elle permet de

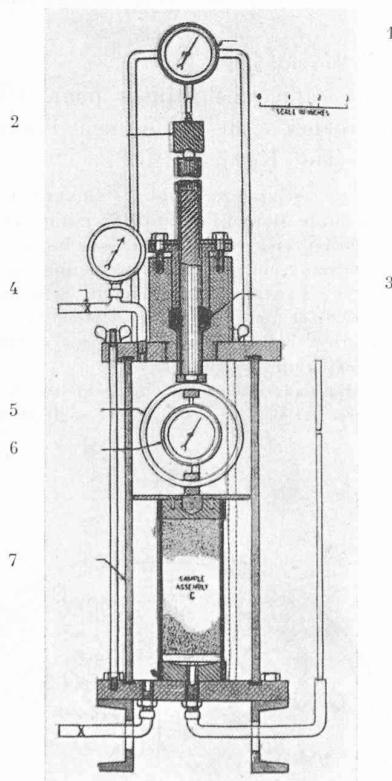
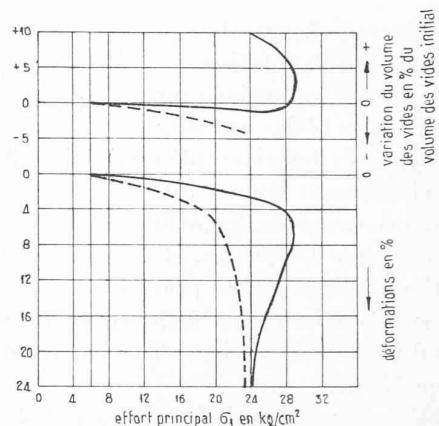


Fig. 3. — Schéma d'un appareil triaxial.

1. Micromètre à cadran.
2. Levier pour augmentation des charges.
3. Presse-étope.
4. Robinet de décharge.
5. Anneau dynamométrique calibré.
6. Comparateur.
7. Cylindre transparent.



| | | |
|---|--|-----------------------|
| Conditions initiales : | $\sigma_1 = \sigma_3 = 0,95 \text{ kg/cm}^2$ | |
| | peu tassé | dense |
| ϵ_0 | 0,770 | 0,573 |
| Début de l'essai. | | |
| $\sigma_1 = \sigma_3 = 6,32 \text{ kg/cm}^2$ | | |
| ϵ_t | 0,737 | 0,565 |
| à rupture | | |
| σ_1 | 23,45 | 28,7 kg/cm^2 |
| Variation de volume | -16,7 cm^3 | +8,7 cm^3 |
| Volume des vides initial | 321 cm^3 | 298 cm^3 |
| Déformation à rupture en % de la haut. initiale de l'éch. : | | |
| ϕ' | 20,1 % | 7,9 % |
| | 34° 50' | 39° 50' |

Fig. 4. — Résultats d'un essai triaxial sur un sable.
(Trait plein = sable dense ; pointillé = sable peu tassé).

préciser l'allure de la courbe intrinsèque dans le voisinage de l'origine, c'est-à-dire dans un domaine où les essais directs sont très difficiles ou inexacts. L'appareil mis au point par M. Haefeli à Zurich [5] ainsi que l'appareil réalisé par l'auteur de ces lignes (essais sur cylindres dont les bases sont collées aux plateaux de la machine par congélation) et les résultats obtenus à ce jour en font un complément indispensable pour l'étude complète de la résistance au cisaillement des sols argileux.

Résultats d'essais.

Exampons maintenant quelques résultats d'essais typiques :

I. Cas d'un matériau pulvérulent soumis à l'essai triaxial (fig. 4).

La résistance maximum au cisaillement d'un sol dense est plus grande que celle du même sol peu tassé. Les déformations avant rupture sont plus faibles et la rupture se fait nettement comme pour un corps solide. Il y a gonflement. Pour le sol peu tassé, la rupture n'est pas nette ; il s'agit plutôt d'un écoulement plastique (fig. 5). Pour atteindre une certaine résistance au cisaillement, la déformation est beaucoup moins importante pour un sol dense que pour un sol peu compact.

Pour des sols à grains fins, ces observations ont une grande importance pratique. Selon le degré de compacité réalisé, un effort de cisaillement peut provoquer un tassement assez important ou une tendance au gonflement. Si, dans le premier cas, le sol considéré est saturé d'eau, une partie de la sollicitation verticale se transmet, par suite du tassement, à l'eau intersticielle, la sollicitation verticale sur les grains diminue et la résistance au

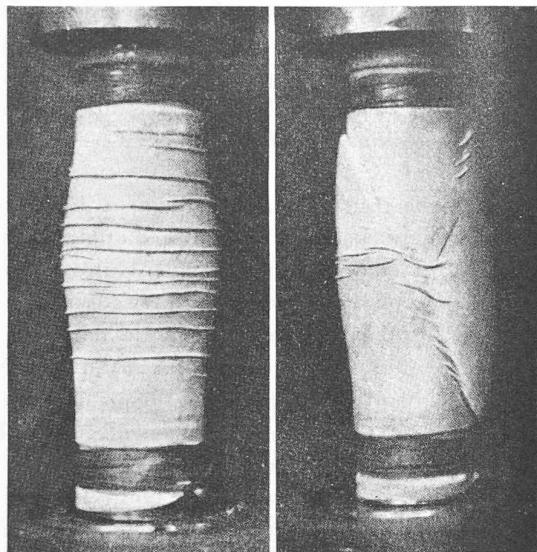


Fig. 5. — Rupture d'échantillons sableux dans l'essai triaxial.
à gauche : sable peu tassé (écoulement plastique),
à droite : sable dense (vraie rupture par cisaillement).

cisaillement — fonction de la sollicitation normale — diminue donc aussi, ce qui peut provoquer des glissements ou de véritables écoulements. Dans le cas contraire, l'eau intersticielle est mise en tension, il se produit par réaction une étreinte sur la matière solide et donc une augmentation de résistance au cisaillement.

Soit un remblai sableux à grains fins, soutenu par un mur. Supposons que l'eau intersticielle reste dans la masse par capillarité et que ce remblai soit saturé (par exemple après une forte chute de pluie). Le drainage au pied du mur ne peut évacuer que l'eau en excès (fig. 6).

Si le remblai a été mis en place avec une faible compacité, des vibrations peuvent engendrer des efforts de cisaillement produisant un tassement. Dans ce cas, et si la perméabilité du remblai est faible, il y a pendant un certain temps une sorte de liquéfaction du massif à l'arrière du mur, ce qui a pour conséquence d'augmenter la poussée dans une très notable mesure et le soutènement qui peut être renversé. Si le remblai a une compacité voisine ou supérieure à la densité critique, un tel phénomène est exclu. [10]

L'indice de vide critique n'est pas très facile à déterminer. Il faut exécuter une série d'essais à l'appareil triaxial avec diverses compacités initiales et diverses sollicitations latérales et mesurer les variations de volume. Les résultats sont alors résumés sous la forme représentée figure 7, d'où il ressort nettement que l'indice de vide critique ϵ_{crit} varie avec les sollicitations latérales et qu'il y a une relation sensiblement linéaire entre ϵ initial et le pourcentage de changement de volume pour une pression latérale donnée. Le changement de volume à rupture exprimé en pour-cent semble indépendant des dimensions de l'échantillon.

La figure 8 donne les résultats d'essais triaxiaux à rupture en fonction de l'indice de vide initial, c'est-à-dire en fonction de la compacité du matériau pulvérulent et en fonction des sollicitations latérales. On voit que pour des sols peu denses, l'angle de frottement varie peu ; il est pratiquement indépendant des sollicitations

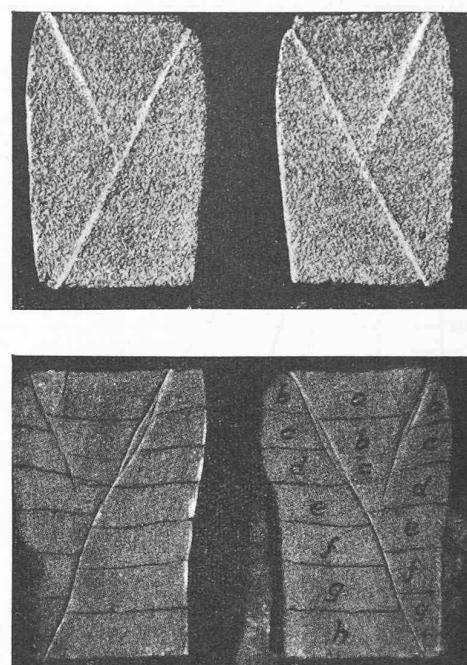


Fig. 5 bis. — Types de rupture par cisaillement d'échantillons de sables denses.
en haut : sable grossier légèrement argileux.
en bas : sable fin limoneux.

latérales. Ce n'est plus le cas pour des matériaux très denses. La dispersion des résultats est importante et l'angle de frottement peut varier entre 38 et 45°.

Il en résulte que dans la représentation de Mohr, la courbe intrinsèque d'un sable dense n'est plus une droite mais une courbe à allure parabolique par rapport à l'axe des sollicitations principales, puisque l'angle de frottement interne diminue au fur et à mesure qu'augmentent les sollicitations latérales.

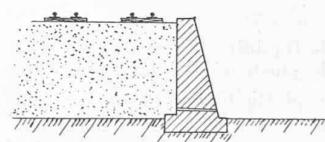


Fig. 6. — Terre-plein avec mur de soutènement.

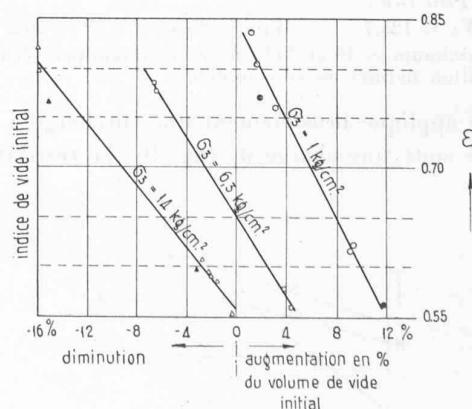


Fig. 7. — Détermination de l'indice de vide critique.

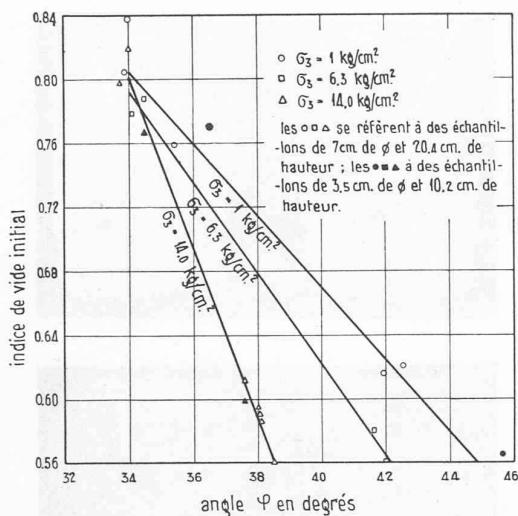


Fig. 8. — Résultats d'essais triaxiaux sur un sable

Il n'est pas étonnant d'autre part que l'on ait trouvé des valeurs pratiquement constantes de l'angle de frottement d'un sable sec lorsqu'on mesurait cet angle par l'inclinaison d'un talus à l'état d'équilibre limite. On avait toujours à faire dans ce cas à des sables très peu tassés pour lesquels l'angle est indépendant des sollicitations normales.

Il convient toutefois de signaler que certains sables, même à l'état très dense, ont un angle de frottement qui varie peu en fonction des sollicitations normales. (Au moins pour les sollicitations utilisées en géotechnique).

Pour les sables, les essais ont démontré que l'angle φ est plus faible lorsque les grains sont arrondis, que s'ils sont à angles vifs (ce qui est intuitif).

II. Cas d'un matériau cohérent.

Voici quelques résultats d'essais à l'appareil de torsion :

Argile de Londres [6 — 7] :

| | |
|---|------|
| Limite de liquidité W_L moyenne | 76,6 |
| Limite de plasticité W_P moyenne | 26,6 |
| Indice de plasticité P moyen | 50,0 |
| τ minimum = 55 à 62 % de τ maximum | |
| τ maximum pour $\sigma = 4,44 \text{ kg/cm}^2$ = 1,31 kg/cm^2 | |
| τ minimum pour $\sigma = 4,44$ " = 0,81 " | |
| τ maximum pour $\sigma = 5,92$ " = 1,68 " | |
| τ minimum pour $\sigma = 5,92$ " = 0,92 " | |

Argile du Petit Belt :

| | | |
|---|--------------|------------|
| $W_L = 125,7$ | $W_P = 35,5$ | $P = 90,2$ |
| τ minimum = 40 et 30 % de τ maximum pour échantillon naturel ou surconsolidé. | | |

Si l'on applique brusquement une surcharge à un sol consolidé sous une charge σ_1 (fig. 9), la résistance au

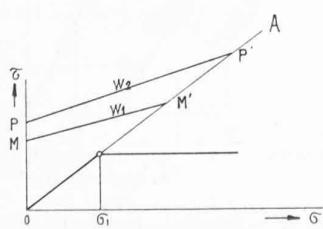


Fig. 9.

cisaillement ne change pas ; elle demeure constante. Par contre, si la surcharge est appliquée lentement, la résistance au cisaillement augmente suivant la droite OA qui est la droite relative à la résistance au cisaillement pour des échantillons *consolidés*, donc avec une teneur en eau variable.

On voit que la résistance au cisaillement dépend dans une très large mesure de la rapidité d'application des surcharges. Ce facteur joue actuellement un rôle important parce que l'on tâche de construire aussi vite que possible. Sur de mauvais terrains, il y a donc un gros avantage à établir au préalable suivant quel rythme les charges doivent être appliquées pour que l'on ne dépasse pas la résistance au cisaillement admissible¹.

Les échantillons argileux soumis à l'essai triaxial se consolident assez lentement ; c'est pourquoi la teneur en eau reste pratiquement constante pendant l'essai ! On trouve alors les courbes MM' ou PP' correspondant à une teneur en eau W_1 ou W_2 . Tandis qu'avec un appareil à torsion ou à translation, il y a variation de teneur en eau même pendant les essais dits « rapides ».

Les résultats d'essai sur un terrain argileux donnent les valeurs suivantes :

| | | |
|--------------------|------------------------|-----------------------------|
| Pour $W^2 = 25 \%$ | $\varphi = 23^\circ$ | $c = 0,380 \text{ kg/cm}^2$ |
| $W = 27,5 \%$ | $\varphi = 14,6^\circ$ | $c = 0,300 \text{ "}$ |
| $W = 30 \%$ | $\varphi = 7,4^\circ$ | $c = 0,225 \text{ "}$ |

Ces valeurs sont utilisables jusqu'à une certaine sollicitation normale au delà de laquelle la résistance au cisaillement demeure constante. Par exemple, pour $W = 30 \%$ cette valeur est de 0,6 kg/cm^2 .

Pour des matériaux plastiques il est difficile de fixer le moment de rupture. La figure 10 montre l'importance des déformations admissibles sur la valeur apparente de c et φ à admettre dans les calculs lorsque de fortes déformations ont lieu avant d'arriver à la rupture.

Si un sol argileux est à la limite de liquidité sa résistance au cisaillement est presque nulle. Les couches qui possèdent une teneur en eau élevée, voisine de la limite de liquidité jouent donc le rôle de couches lubrifiantes³.

¹ Comme exemple typique voir : AARON. A study of hydraulic fill settlement. — Public Roads 1934.

² W = teneur en eau exprimée en % du poids de matière sèche.

³ L'influence d'une couche lubrifiante est examinée dans la deuxième partie de cette étude : « cas des remblais ».

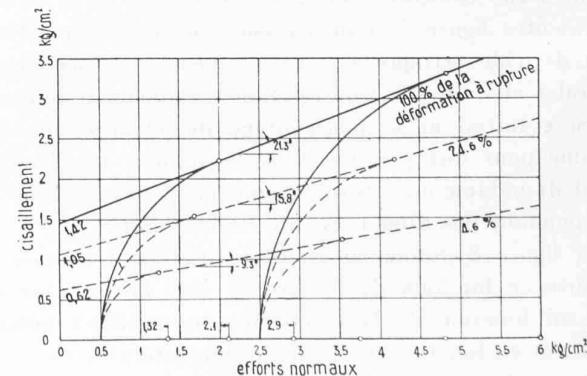


Fig. 10. — Résultats d'essais triaxiaux sur échantillons argileux suivant l'importance des déformations admises.

Les essais de cisaillement sur l'argile sont difficiles parce que les résultats n'ont de valeur que si ils s'appliquent à un matériau bien déterminé. En réalité, si l'on cisaille différents échantillons d'une même argile consolidée sous différentes charges verticales, la teneur en eau et par suite l'indice de vide est variable d'un échantillon à l'autre. Pour obtenir des courbes intrinsèques, il faut disposer d'un matériau bien défini ce qui n'est pas facile avec les argiles qui sont des corps comportant trois phases : solide, eau absorbée, eau libre¹.

Le problème se complique encore pour les sols routiers parce qu'il est rare que l'on soit en présence de sols saturés ou presque, comme c'est le cas dans les fondations. Ces sols contiennent de l'air en proportion notable. Il ne faut pas perdre de vue que les lois principales établies pour les terrains argileux ne sont valables que pour un matériau saturé d'eau, c'est-à-dire sans air. Divers expérimentateurs spécialisés dans les problèmes routiers ont mis en doute certains résultats acquis de la géotechnique pour cette simple raison qu'ils ne travaillent pas sur les mêmes matériaux et ne parlent pas le même langage.

(A suivre.)

Sur la généralisation d'une analogie entre cinq phénomènes de Mécanique,

par HENRY FAVRE

professeur à l'Ecole polytechnique fédérale, Zurich.

(Suite et fin.)²

§ 6. Quelques cas d'intégration du système d'équations régissant les cinq phénomènes.

Nous voulons maintenant donner quelques indications concernant l'intégration du système qui régit les cinq phénomènes analogues :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \frac{\partial z_1}{\partial t} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial x} (\beta z_2) = 0, \\ \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{\partial z_2}{\partial t} + \alpha \frac{\partial z_1}{\partial x} = 0. \end{array} \right. \quad (I)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 z_2}{\partial x \partial t} + \frac{1}{\beta} \cdot \frac{d\beta}{dx} \cdot \frac{\partial z_2}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial^2 z_2}{\partial x \partial t} + \frac{d(\alpha \omega^2)}{dx} \frac{\partial z_1}{\partial x} + \alpha \omega^2 \frac{\partial^2 z_1}{\partial x^2} = 0. \end{array} \right. \quad (II)$$

Voici comment on peut procéder. Dérivons (I) par rapport à t et (II) par rapport à x , après avoir multiplié cette dernière équation par ω^2 . On obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 z_2}{\partial x \partial t} + \frac{1}{\beta} \cdot \frac{d\beta}{dx} \cdot \frac{\partial z_2}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial^2 z_2}{\partial x \partial t} + \frac{d(\alpha \omega^2)}{dx} \frac{\partial z_1}{\partial x} + \alpha \omega^2 \frac{\partial^2 z_1}{\partial x^2} = 0. \end{array} \right. \quad (I')$$

¹ La proportion entre eau libre et eau absorbée semble varier suivant la valeur des sollicitations imposées.

² Voir *Bulletin technique* des 11 et 25 novembre 1944.

Remplaçons, en vertu de (II), $\frac{\partial z_2}{\partial t}$ par $-\alpha \omega^2 \frac{\partial z_1}{\partial x}$ dans (I') :

$$\alpha \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 z_2}{\partial x \partial t} - \frac{\alpha \omega^2}{\beta} \frac{d\beta}{dx} \frac{\partial z_1}{\partial x} = 0. \quad (I'')$$

puis soustrayons (I'') de (II') :

$$\alpha \omega^2 \frac{\partial^2 z_1}{\partial x^2} + \left(\frac{d(\alpha \omega^2)}{dx} + \frac{\alpha \omega^2}{\beta} \frac{d\beta}{dx} \frac{\partial z_1}{\partial x} \right) - \alpha \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} = 0.$$

Divisons par $\alpha \omega^2$, il vient :

$$\frac{\partial^2 z_1}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha \beta \omega^2} \frac{d}{dx} (\alpha \beta \omega^2) \frac{\partial z_1}{\partial x} - \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} = 0;$$

en posant

$$\alpha \beta \omega^2 = \gamma, \quad (25)$$

on obtient finalement

$$\boxed{\frac{\partial^2 z_1}{\partial x^2} + \frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{dx} \frac{\partial z_1}{\partial x} - \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} = 0.} \quad (III)$$

La signification de γ pour chacun des cinq phénomènes est indiquée à la colonne 10 du tableau 2.

Telle est l'équation à laquelle doit satisfaire z_1 ¹).

Supposons que l'on ait trouvé une solution $z_1(x, t)$ de (III). Pour avoir z_2 , introduisons cette solution dans (II) et intégrons par rapport au temps, ce qui donne :

$$z_2 = \alpha \omega^2 \int \frac{\partial z_1}{\partial x} dt. \quad (IV)$$

Le calcul de z_2 est alors ramené à une quadrature.

La principale difficulté du problème réside dans l'intégration de l'équation (III).

Remarquons que pour les trois premiers phénomènes, z_1 désigne une vitesse v (tableau 2) et peut se mettre sous la forme d'une dérivée partielle par rapport au temps. Par exemple, pour la corde, nous avons $v = \frac{\partial y}{\partial t}$, où y désigne l'écart d'un point P (voir fig. 1 et § 2, 1^o). Si nous mesurons les écarts y en prenant la position de repos comme origine, une intégration de (III) par rapport au temps donne

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{dx} \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (III^*)$$

Telle est l'équation qui régit les écarts de la corde. C'est exactement la même que (III), qui régit les vitesses v .

Si γ et ω sont constants (indépendants de x), la dernière équation écrite se réduit à

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0,$$

qui n'est autre que l'« équation ordinaire des cordes vibrantes ». (III*) ou (III) peut donc être appelée : « équation générale des cordes ». On peut alors dire que toutes les grandeurs z_1 figurant à la quatrième colonne du

¹ En éliminant z_1 entre (I) et (II), on obtiendrait pour z_2 une équation beaucoup moins simple que (III).