

Nouvel appareil de cisaillement rotatif sur éprouvette de sol confiné sous étreinte

Autor(en): **Ott, Jean-Conrad**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **99 (1981)**

Heft 22

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74504>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Nouvel appareil de cisaillement rotatif sur éprouvette de sol confiné sous étreinte

Par Jean-Conrad Ott, Genève

Rappelant les avantages et inconvénients de divers appareillages destinés à déterminer la résistance au cisaillement des sols meubles, l'auteur décrit un nouveau scissomètre rotatif de sa conception qui permet d'essayer une éprouvette soumise à une étreinte triaxiale, au moyen de plusieurs palettes enfoncées simultanément dans l'éprouvette. Les coefficients caractéristiques φ et c relatifs à la résistance maximum et à la résistance résiduelle après grand glissement peuvent être obtenus au moyen d'une seule carotte.

Des résultats obtenus sur divers sols sont mentionnés ainsi qu'une comparaison avec l'essai classique «Casagrande». Les essais ont fait apparaître: peu de différence avec consolidation par étreinte biaxiale ou triaxiale, restauration de la résistance au cisaillement après un temps de repos sous étreinte à la pression de consolidation.

Die Vor- und Nachteile verschiedener Bodenschengeräte erwähnd, wird vom Verfasser ein neu entwickeltes Rotationschergerät beschrieben. Mit ihm kann ein unter triaxialem Druck liegender Bodenkern mit mehreren eingesteckten Flügeln abgeschert werden. Die Bodenkennwerte φ und c für die grösste und für die Restscherfestigkeit nach einem grossen Gleitweg werden mit einem einzigen Bohrkern bestimmt.

Es werden die Ergebnisse für verschiedene Böden und ein Vergleich mit dem «Casagrande-Versuch» angegeben. Die Versuche haben folgendes gezeigt: Wenig Unterschied mit biaxialem oder triaxialem Konsolidationsdruck; Wiederaufbau der Scherfestigkeit nach einer Ruhezeit unter Konsolidationsdruck.

Introduction

Les avantages et les inconvénients d'ordre théorique ou pratique, des méthodes et des appareils pour déterminer le comportement d'un sol au cisaillement, soit les caractéristiques, φ , c , de cisaillement ont été évoqués à plusieurs reprises. [1, 2, 4]

a) *L'essai triaxial* fournit toutes ces caractéristiques. Il a l'inconvénient de ne pas permettre la détermination des contraintes résiduelles après grandes déformations. Son prix étant assez élevé, on peut hésiter à répéter l'essai plusieurs fois pour obtenir des moyennes, les ca-

rottes nécessaires sont souvent trop rares. [3]

b) *L'essai casagrande* classique à boîte rectangulaire moins coûteux, permet par l'artifice des cisaillements aller retour de déterminer la valeur des contraintes résiduelles. Toutefois, la grandeur de la surface de rupture varie en cours d'essai, on ne peut imposer de grandes déformations dans un seul sens qui conduisent à des valeurs plus basses. Le diamètre des carottes nécessaires est important. [5]

c) *L'essai de cisaillement rotatif de Hvorslev* sur éprouvette torique, perfectionné par *Bishop*, convient très bien à la détermination des

contraintes maxima et des contraintes résiduelles, pour des glissements aussi grands que l'on voudra. La taille des éprouvettes sur sol intact est délicate, parfois impossible. Elle requiert un appareillage spécial.

La fin de consolidation peut être mesurée, mais la pression interstitielle ne peut l'être. L'appareillage est assez complexe.

Pour les trois méthodes d'essai susmentionnées, la détermination de chaque point du cercle de Mohr nécessite un échantillon distinct. Il arrive qu'il soit difficile d'éliminer des variations sur l'ensemble des éprouvettes nécessaires à l'établissement d'une seule courbe intrinsèque.

Avec des limons à teneur en eau élevée, la préparation d'éprouvettes toriques sur échantillons intacts est particulièrement difficile ou même impossible.

d) *L'essai au scissomètre rotatif à palette* (Vane test) pratiqué sur éprouvette ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$) livre des valeurs peu dispersées dans l'essai non consolidé non drainé pour des sols du type C1. Il permet d'obtenir rapidement et à peu de frais un grand nombre d'essais sur des échantillons de petite dimension.

Pratiqué sur des carottes retirées des sondages, il ne reproduit pas les conditions de contraintes qui règnent à diverses profondeurs. En effet, l'état consolidé à diverses pressions ne peut pas être réalisé. De plus dès que la cohésion est élevée, les échantillons se fissurent radialement sous l'effet de la poussée au vide.

Pour combler les lacunes de l'essai au scissomètre tout en conservant ses avantages et ceux de *l'essai Hvorslev*, il nous a paru intéressant de créer un nouvel appareil *type Kenney* [4] dans lequel l'essai puisse être pratiqué sur un échantillon confiné, permettant de faire apparaître une contrainte normale biaxiale uniforme sur la surface de cisaillement cylindrique formée par l'arrête des palettes à laquelle vient se superposer la contrainte tangente au même cylindre provoquée par la torsion.

Déscription de l'appareil d'essai

C'est un cylindre qui pour des raisons de standardisation a les dimensions d'un cylindre Proctor Standard, qui peut ainsi servir au besoin à la fabrication d'échantillons remaniés dans des conditions bien définies de compactage (fig. 1-3).

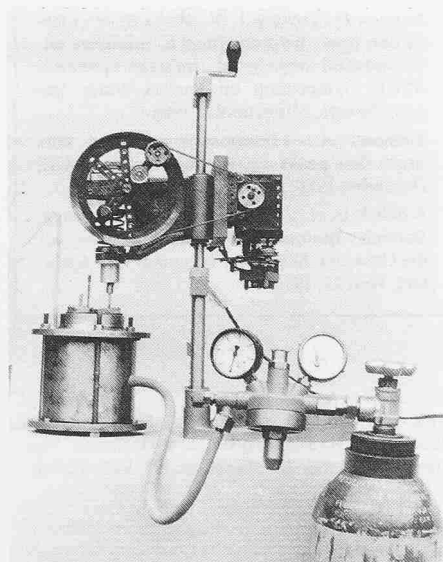


Fig. 1. Ensemble de l'appareillage

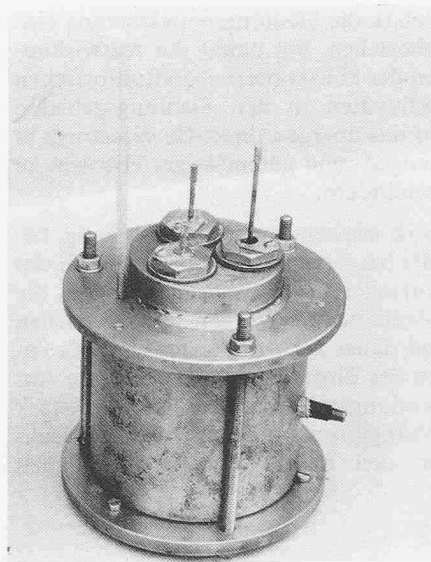


Fig. 2. Cylindre monté avec ses trois palettes

Le cylindre contient une chambre à air torique qui permet d'appliquer une pression p constante ou variable sur le pourtour de l'échantillon (9) qu'il n'est pas indispensable de tailler à des cotes rigoureuses.

La base (2) et le couvercle (3) empêchent la dilatation verticale et produisent une réaction $\sigma \neq 0$ actuellement non mesurable dans notre appareil.

Le couvercle (3) est muni de trois ouvertures sur lesquelles se vissent trois bouchons (7) formant sas pour la palette et contenant un presse-étoupe formé d'une bague fendue en matière spéciale («ertalon»).

Deux jeux de presse-étoupe différents permettront d'utiliser soit la palette

standard «Farance» de $\varnothing = 1/2''$ (12 mm) soit la palette du scissomètre «Géonor» de $\varnothing = 18$ mm.

Un filtre souple en laine ou tissé de verre (5) entoure l'échantillon et communique avec un drain débouchant à l'extérieur dans un verre gradué contenant une goutte d'huile (pas d'évaporation).

La palette 10 peut tourner et coulisser verticalement.

L'échantillon du sol (6) peut être coupé au milieu et muni d'un filtre médian pour accentuer la vitesse de consolidation.

Enfin, afin de réaliser une consolidation sous triple étreinte, une poche circulaire peut être introduite à la place du

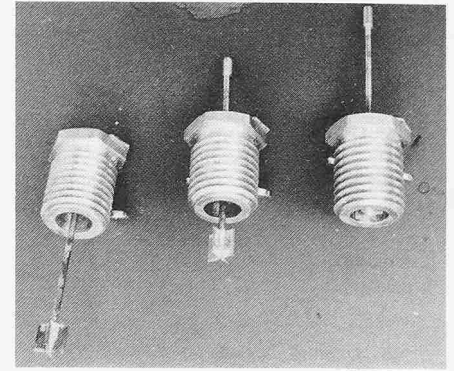


Fig. 5. Bouchons et palettes

filtre médian. La palette pénètre à deux niveaux différents dans chaque demi-échantillon si bien que douze mesures différentes sont possibles dans un même échantillon, (à condition d'avoir deux couvercles percés semblables).

L'entraînement des palettes est obtenu avec un appareil «Farance» du commerce muni d'une boîte à plusieurs vitesses et d'un moteur synchrone (de gramophone) à vitesse constante.

La pression de consolidation p est contrôlée par un régulateur GM à double détente d'air, classique.

Montage

La chambre à air (4) est placée dans le cylindre puis mise sous vide avec la trompe à eau. Elle se plaque sur le cylindre. L'échantillon (6) grossièrement taillé est entouré du filtre (fig. 7) latéral. Il est ficelé au fil nylon. Les six palettes sont enfilées dans les bouchons avec leur presse-étoupe. Les bouchons sont bourrés avec les déchets de l'éprouvette.

L'échantillon qui peut être une carotte, est introduit dans le cylindre, les extrémités sont arrasées au couteau et les rondelles et les filtres, préalablement percés, mis en place.

Les couvercles inférieurs et supérieurs sont bloqués (fig. 4-5).

Les palettes sont enfoncées au niveau choisi.

La pression de consolidation $\sigma_2 = \sigma_3 = p$ ou $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$ est appliquée.

La consolidation s'effectue. Elle est contrôlée au moyen de l'eau évacuée et la courbe tracée. L'échantillon est prêt pour une première série de mesures de cisaillement avec un premier palier p_1 . La vitesse de cisaillement est maintenue constante. La résistance max. (pic) et la résistance résiduelle sont notées.

L'essai se poursuit sans démontage avec les paliers de pression p croissant et en utilisant chaque fois une autre palette déjà en bonne position.

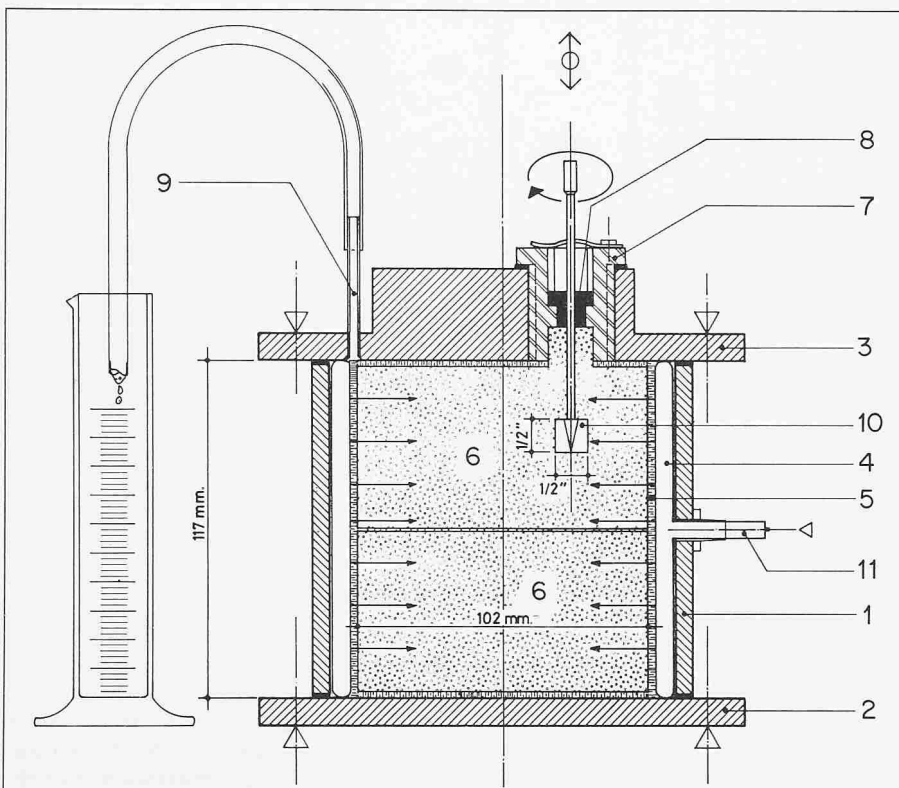


Fig. 3. Coupe schématique avec dispositif pour consolidation sous double étreinte ($\tau_2 = \tau_3, \varepsilon_1 = 0$)
 1) cylindre de confinement, 2) fond démontable, 3) couvercle contenant les orifices de passage, 4) membrane torique en caoutchouc, 5) filtre drain en tissus de verre, 7) bouchon de passage, 8) palier presse étoupe fendu, 9) évacuation de drain

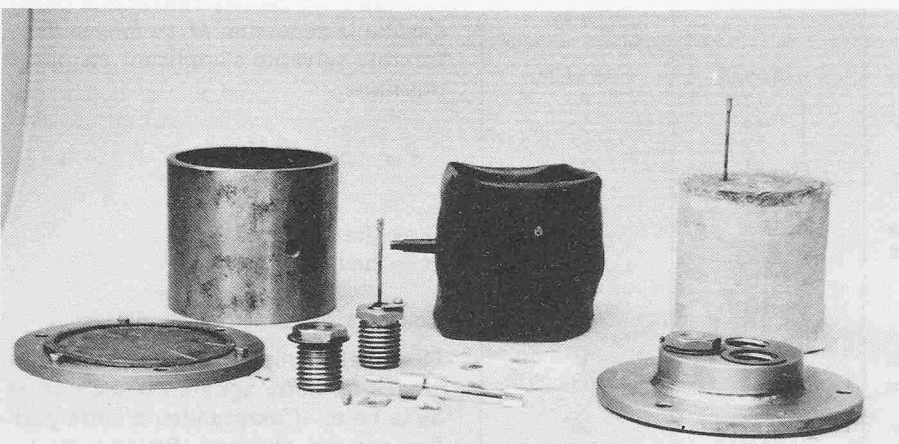


Fig. 4. L'appareil démonté, à droite l'éprouvette

Tableau 1. Caractéristiques de quelques sols analysés

| Origine | W _i % | W _f % | I _p % | Max. | | Résiduel | | Pénétrromètre avant essai q _i kg/cm ² | Profondeur t mètres | Type de sol |
|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------|--|
| | | | | φ degrés | c kg/cm ² | φ _r degrés | c _r kg/cm ² | | | |
| A 315—Moniday Lausanne | 17,4 | — | — | 27° | 0,64 | 19° | 0,21 | 1,0 | 3,7 | Sable + limon argileux, moraine - compacté Proctor, non saturé, remanié. |
| B Grand-Lancy Genève | 30 | — | — | 15° | 0,15 | 10° | 0,07 | 0,45 | 8,2 | Limon argileux gris varvé |
| Versoix | 20 à 21 | — | — | 23° | 0,66 | 13° | 0,16 | 2,5 | 1,7 | Limon argileux gris varvé |
| 300—St-Imier | 41 | — | 37 | 13° | 0,8 | — | — | — | — | Limon holocène homogène |
| 330—Genève Pradier | 21,5 | — | 11 | 20° | 0,5 | 8° | 0,2 | 1,0 | 6,5 | Limon argileux interglaciaire |
| 277—Sorvillier | — | — | — | 20° | 1,15 | 16° | 0,3 | — | 1,8 | Limon sableux micacé, alpin |
| 210—Genève Rieu | 22,4 | — | — | 16 à 23° | 0,65 | 11° | 0,0 | 0,3 | 5,8 | Limon argileux gris varvé interglaciaire ou wurmien |
| 234—Genève BAT | 33 | — | — | 16 à 21° | 0,2 0,3 | 8° 10° | 0,1 | 0,5 | 5.- | Limon argileux gris, varvé interglaciaire ou wurmien |
| 185—Genève Gardy | 20,6 | — | — | 18° | 0,75 | 9° | 0,2 | 1,2 | 6,2 | Idem |
| 169—Bussigny | — | — | 9 | 20° | — | 10° | — | 0,1 | 2,0 | Argile limoneuse varvée, hétérogène, glaciaire. |
| | — | — | 24 | 15° | 0,18 | 2° | 0,06 | — | — | Argile limoneuse. |
| | — | — | — | 17° | 0,01 | 5° | 0,05 | — | — | — |
| D | 0,38 | 0,27 | 25 | 17° | 0,19 | 10° | 0,12 | 0,25 | — | Argile limoneuse céramique (σ ₁ = σ ₂ = σ ₃) homogénéisée - remaniée. |
| E | 0,38 | 0,27 | 25 | 16° | 0,12 | 8,5° | 0,09 | — | — | Idem en motte, consolidée sous étreinte double (σ ₁ = σ ₂ , ε ₁ = 0) |

Observations: Vitesse de rotation env. 30° par minute = 4 mm de glissement/minute
Consolidé, drainé pendant consolidation. Δu > 0 pendant cisaillement

Conditions d'essai

L'échantillon peut se contracter ou se dilater durant le cisaillement. L'essai s'effectue à volume variable et à pression constante. Les conditions aux limites peuvent être choisies entre trois cas (fig. 10).

Si le drain est ouvert pendant l'application de la pression latérale jusqu'à ce

qu'il ne sorte plus d'eau, l'essai est dit «consolidé».

Selon la vitesse de rotation qui peut être modifiée, la surpression pendant l'application du déviateur est totalement ou seulement partiellement dissipée, ce qui correspond assez bien aux conditions d'un glissement de terrain provoqué par une surcharge de remblai.

Si le drain est fermé avant l'essai et si la vitesse de cisaillement est rapide,

l'échantillon est non consolidé non drainé (U.U.).

Premiers résultats

Sols naturels

Les valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion (processus C.U.) obtenues sur divers sols naturels du type CL - CH - MH figurent au tableau 1, ainsi que sur le diagramme fig. 6. Elles caractérisent la résistance maximum et la résistance résiduelle au cisaillement obtenues après un glissement d'environ 4 cm, à partir duquel la résistance reste constante. [7]

Les valeurs τ ont été calculées à partir du couple de torsion M_t au moyen de la formule suivante s'appliquant en phase plastique:

$$\tau = \frac{6 M_t}{\pi D^2 (D + 3 H)}$$

D = diamètre palette

H = hauteur palette

Comparaison de deux types d'essai

Des essais comparatifs ont été faits au moyen de notre appareil d'une part et de la boîte «Casagrande» d'autre part. Les valeurs obtenues figurent au tableau 2; elles sont comparables.

Tableau 2. Comparaison des valeurs φ, c, pour deux types d'essais

Limon Argileux varvé. Lancy-Genève

w_i = 30% γ = 1,95 γ_d = 1,49 q_s = 0,45 kg/cm²

| | | Boîte de Casagrande 20 cm ² | Scissomètre sous étreinte cas b fig. 10 |
|---|--------------------|--|--|
| Profondeur prélèvement | m | 8,20 à 8,40 | 8,0 à 8,20 |
| Paliers de pression de consolidation | kg/cm ² | 0,275 0,8 1,2 1,5 | 0,3 1,- 1,6 |
| Vitesse de déformation: linéaire | mm/min | 0,833 | (3,32) |
| angulaire | degrés/min | (6°,4) | 30° |
| Mode de consolidation | | CD | CD |
| Mode cisaillement | | rapide (U) | rapide (U) |
| Caractéristiques: | | | |
| (CU) { φ | degrés | 17° | 15° |
| c | kg/cm ² | 0,05 | 0,15 |
| (CU) { φ _r | degrés | — | 10° |
| c _r | kg/cm ² | — | 0,07 |

Tableau 3. Récapitulation essais de cisaillement rotatif avec consolidation sous triple étreinte

(Série $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 > 0$; triple étreinte)

| Date | Essai No | Palette No | Position | τ_{max} kg/cm ² | τ_r kg/cm ² | Consolidé à $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ kg/cm ² |
|--|----------|------------|------------|---------------------------------|-----------------------------|---|
| <i>Première série</i> | | | | | | |
| 1.02.80 | 0 | 0* | | 0,186 | | 0 |
| 1.02.80 | 1 | 1* | I dessus | 0,186 | 0,12 | 1 (UU) |
| 5.02.80 | 2 | 1 | I dessus | 0,43 | 0,27 | 1 (CU) |
| 5.02.80 | 3 | 4 | II dessous | 0,58 | 0,32 | |
| 6.02.80 | 4 | 2 | I dessus | 0,72 | 0,46 | 2 (CU) |
| 6.02.80 | 5 | 5 | II dessous | 0,83 | 0,46 | |
| 8.02.80 | 6 | 3 | I dessus | 1,05 | 0,64 | 3 (CU) |
| 8.02.80 | 7 | 6 | II dessous | 1,18 | 0,65 | |
| Reprise après quelques min. le 8.02.80 | | | | | | |
| <i>Deuxième série</i> | | | | | | |
| 8.02.80 | 8 | 1 | I dessus | 1,22 | 0,72 | 3 (CU) |
| 8.02.80 | 9 | 2 | II dessous | 1,07 | 0,72 | |
| 8.02.80 | 10 | 4 | I dessus | 1,10 | 0,71 | 3 (CU) |
| 8.02.80 | 11 | 5 | II dessous | 1,16 | 0,71 | |
| 11.02.80 | 12 | 3 | I dessus | 0,94 | 0,74 | 3 (CU) |
| 11.02.80 | 13 | 6 | II dessous | 1,03 | 0,73 | |

Voir les diagrammes $\tau = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ (fig. 7)

* La consolidation n'ayant pas le temps de s'effectuer, la valeur de l'essai No 1 est trouvée identique à celle de l'essai 0.

Tableau 4. Comparaison des caractéristiques obtenues, après consolidation sous double, respectivement sous triple étreinte (voir diagrammes fig. 8)

| Double étreinte | | $\sigma_2 = \sigma_3, \sigma_1 \neq 0$ $\epsilon_2 = \epsilon_3 \neq 0, \epsilon_1 = 0$ | | Cas b, fig. 10 | |
|-----------------|------|--|----------|----------------|-------|
| ϕ_{max} | Cmax | r_2 | ϕ_r | c_r | r_2 |
| 16° | 0,12 | 0,996 | 8,5° | 0,09 | 0,995 |
| Triple étreinte | | $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ | | Cas c, fig. 10 | |
| 17° | 0,19 | 0,981 | 9,0° | 0,12 | 0,997 |

Le coefficient de corrélation r_2 est calculé au moyen de l'ensemble des points de mesures matérialisées par la droite de régression d'angle ϕ

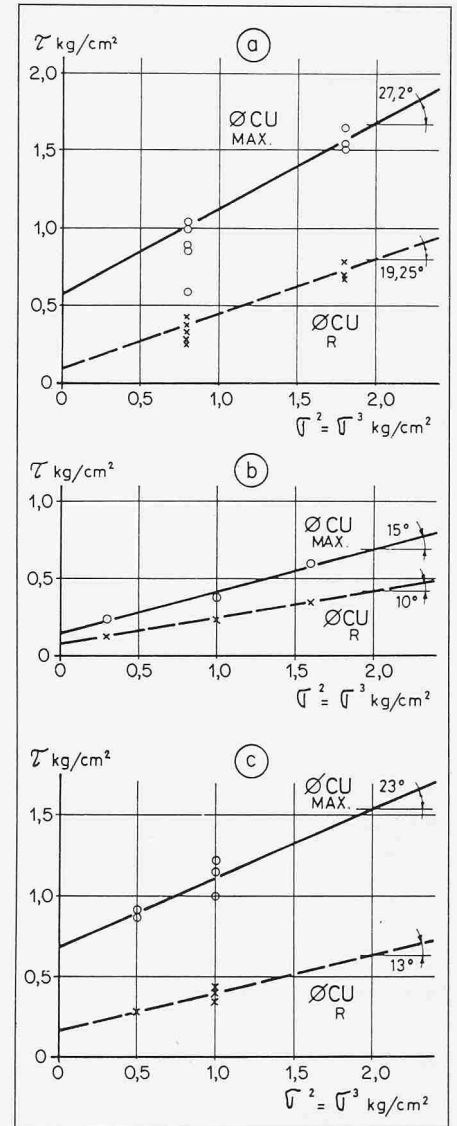


Fig. 6. Diagrammes de quelques sols. Résistance au cisaillement τ_{max} ----- $\tau_{résiduel}$
 a) Sable et limon argileux. - Moraine recompaquée Proctor
 b) Limon argileux gris varvé - Genève - Grand-Lancy
 c) Limon argileux gris varvé - Versoix

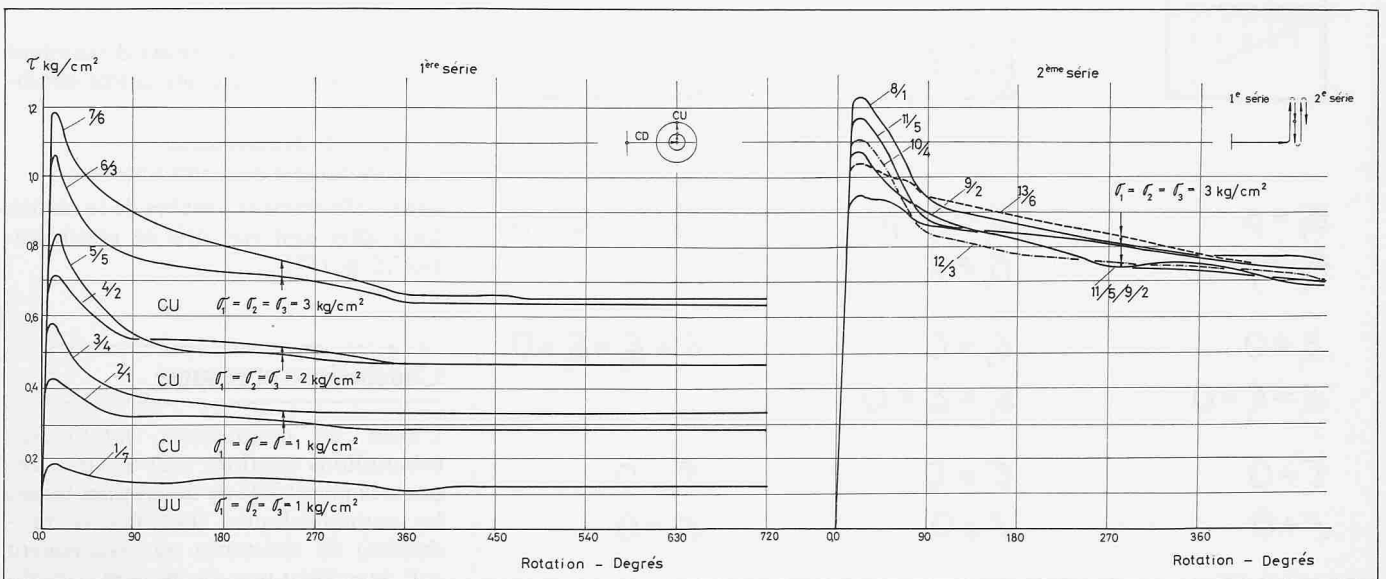


Fig. 7. Diagramme $\tau = f(\theta)$ Test avec étreinte triaxiale sur argile céramique homogénéisée. Sur les courbes figure le numéro d'essai et de chaque palette

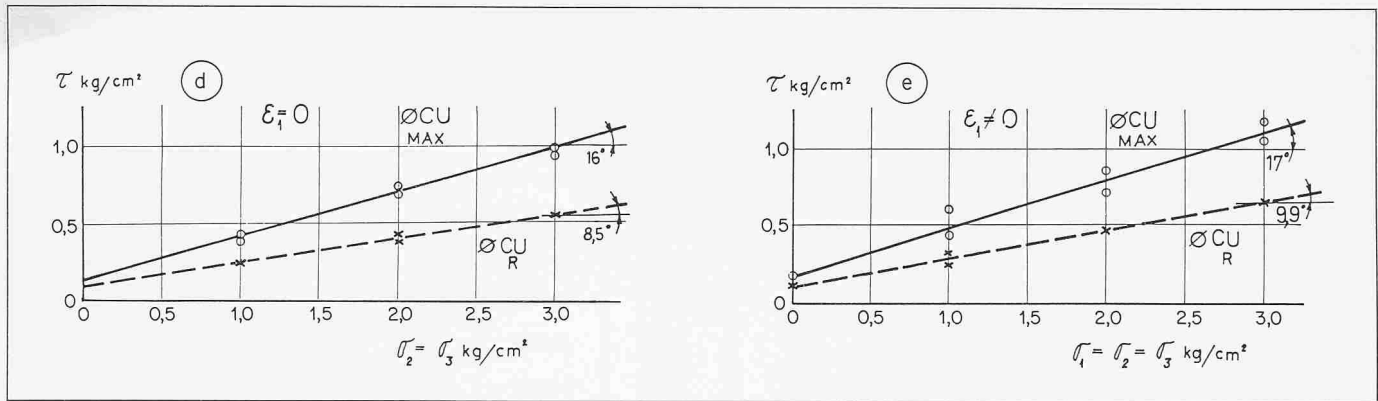


Fig. 8. Diagramme $\tau = \phi(\sigma)$ Argile céramique suisse. Comparaison des résistances avec étreinte triaxiale et bi-axiale

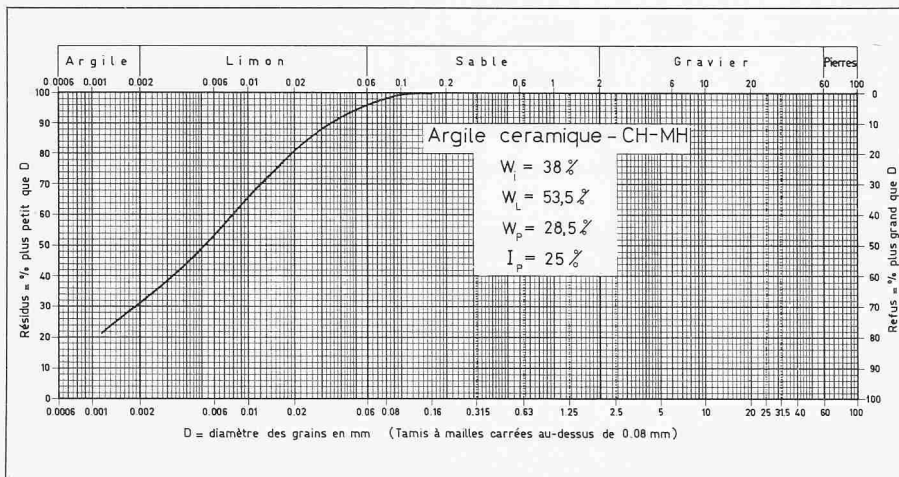


Fig. 9. Argile céramique suisse. Granulométrie par sédimentation

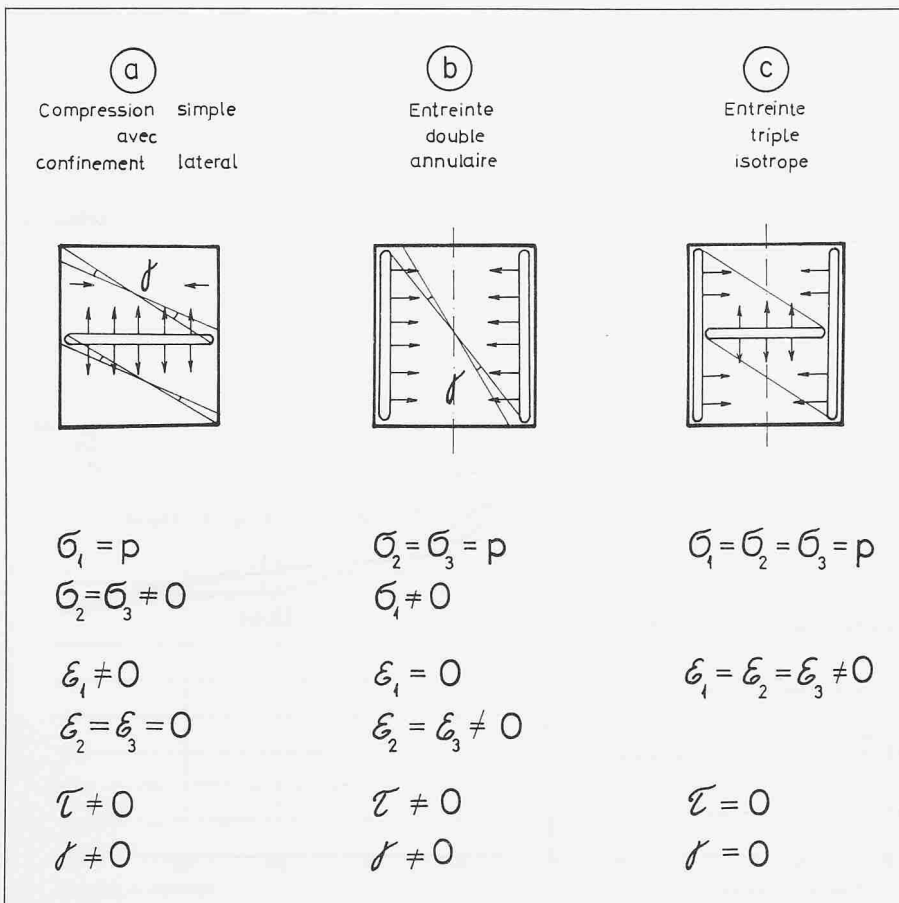


Fig. 10. Conditions aux limites de la cellule d'essai (trois cas)

Comparaisons des caractéristiques obtenues après consolidations sous double, respectivement sous triple étreinte

Des essais complets avec détermination de toutes les caractéristiques géotechniques ont été pratiqués sur argile céramique homogénéisée dans les conditions aux limites a et c. fig. 10 avec consolidation anisotrope sous étreinte double et consolidation isotrope sous étreinte triple exécutée dans l'appareil même.

Il ressort de cet essai comparatif que le mode de consolidation a une influence secondaire et que le facteur déterminant est la pression maxima p indépendamment de sa direction; voir à cet égard le tableau 4.

Enfin il nous semble, bien que les conditions aux limites lors de la consolidation soient différentes, (voir fig. 10) qu'il est justifié pour un calcul de stabilité, d'utiliser les résultats de l'essai sous étreinte double (cas b.) c'est-à-dire d'admettre que la résistance τ au cisaillement dans la nature, est sensiblement la même que celle qui résulte du diagramme d'essai avec une pression d'étreinte $p = \gamma \cdot h$ correspondant à la pression verticale à la profondeur considérée.

Bien entendu, il conviendra d'examiner bien attentivement si les autres conditions:

- vitesse de déplacement,
- histogramme des contraintes etc.

sont suffisamment proches de la réalité. Leur effet doit être pris en considération [5, p. 157].

Conclusions et résumé

L'essai de cisaillement rotatif sur échantillons confinés sous étreinte apporte la possibilité de déterminer toutes les caractéristiques (maxima et résiduelles) de résistance au cisaillement soit dans l'état non drainé non consolidé (U.U.) soit consolidé non drainé

(C.U.), soit consolidé drainé (C.D.) au moyen d'un seul échantillon de sol, caroté, de 10 à 12 cm de diamètre, avec six points de mesure et pour un coût qui est environ la moitié de celui de l'essai triaxial correspondant avec six cercles.

De plus, l'essai livre les valeurs résiduelles après grandes déformations, dont la connaissance est indispensable lors de l'étude de la stabilisation de glissements.

Ce type d'essai est à considérer comme un complément aux méthodes classiques.

La possibilité de déterminer des moyennes sur un même échantillon de sol améliore la sécurité des résultats et diminue le coût des prélèvements et des essais.

Les essais déjà effectués avec le nouveau scissomètre ont fait apparaître un phénomène encore peu étudié quantitativement, celui de la restauration de la résistance dans le plan de glissement, à l'état confiné sous pression, dès que la sollicitation tangentielle cesse.

A cet égard, la deuxième série d'essais (fig. 7) utilisant les mêmes palettes après un cours temps d'arrêt, est significative.

L'appareillage nouvellement créé se prêterait particulièrement bien à l'étude plus complète du phénomène de la restauration de la résistance qui devrait jouer un rôle de premier ordre dans l'étude de glissements naturels.

Les essais sur plusieurs sols ont également confirmé que la résistance résiduelle, après de grandes déformations, est souvent plus basse qu'on ne l'imagine en général: pour des terrains du type CL ou CH elle se situe, selon les sols et les pressions naturelles, entre 25% et 60% du pic (voir fig. 6).

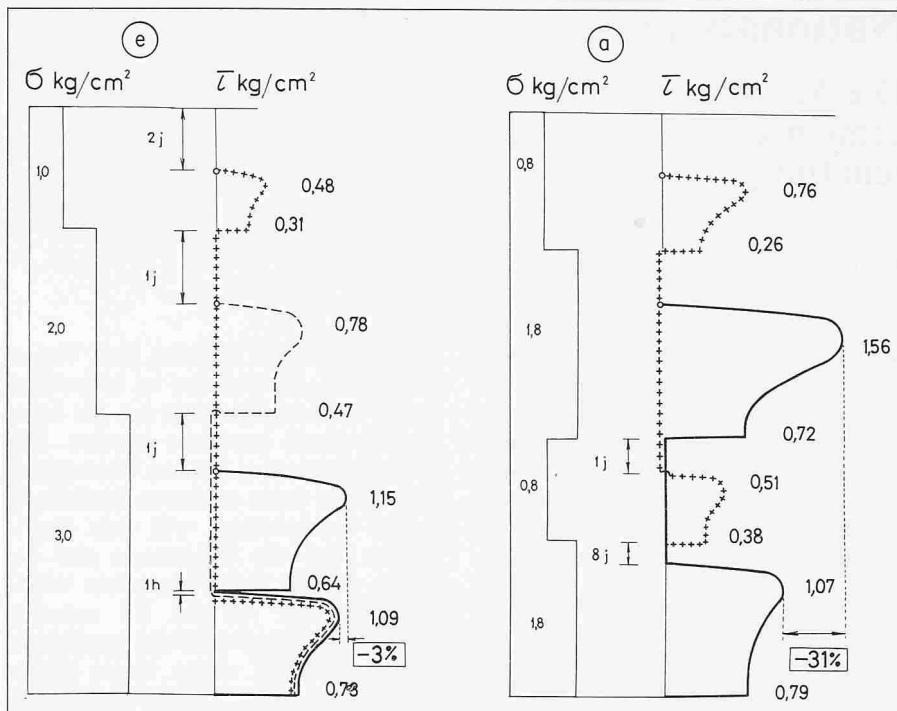


Fig. 11. Histogramme des contraintes d'essai montrant la reprise de résistance après un temps de repos sous étreinte

(E) Sable et limon argileux (A) Argile céramique

On devrait par ailleurs attacher plus d'importance à reconstituer, lors d'essais de laboratoire, l'histoire et l'état de contrainte qui règne au siège d'un glissement à diverses profondeurs, plutôt que de se baser sur des caractéristiques géotechniques, à savoir l'angle de frottement et la cohésion qui, à elle seule, ne caractérise pas le comportement d'un sol sollicité tangentiellement.

Adresse de l'auteur: J.-C. Ott, Ingénieur-conseil, SIA/ASIC/SSMS, Membre du conseil scientifique de l'institut des sols, roches et fondations de l'EPFL, 8, ch. des Deux-Communes, 1226 Thonex-Genève.

Bibliographie

- [1] Hvorslev: «A Ring Shear Apparatus for the Determination of the Shearing Resistance and Plastic Flow of Soils». P.I.C.S.M. 1936
- [2] Hvorslev: M. Ju. - «Über die Festigkeitseigenschaften bindiger Böden». 1937
- [3] Caquot Kerisel: «Traite de mécanique des sols».
- [4] Kenney et Landva: «Vane triaxiale apparatus». P.I.C.S.M. T1, p. 269. Montréal
- [5] Tschebotarioff: «Soil mechanics, foundation and earth structures». 1951. Student édition p. 154 et suivantes
- [6] Lamb: «Soil mechanics». 1969
- [7] Bucher, F.: «Die Restscherfestigkeit natürlicher Böden, ihre Einflussgrößen und Beziehungen als Ergebnis experimenteller Untersuchungen». ETH-Mitteilungen Nr. 103