

CHAPITRE III : RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

I. GENERALITE ET DEFINITIONS

La résistance d'un sol au cisaillement se réfère à la résistance relative que ce sol oppose au glissement quand il supporte une charge. Les sols qui opposent la plus grande résistance au glissement sont ceux qui se composent de gravier propre contenant moins de 5 pour cent de limon + argile. La résistance des sols au cisaillement décroît à mesure que la proportion de particules fines augmente. Elle est la plus faible dans les sols organiques à grains fins. C'est pourquoi, par exemple, il importe d'enlever d'abord tout le sol organique quand on construit un barrage pour réduire les risques de glissement.

Le comportement mécanique d'un sol est en grande partie contrôlé par sa résistance au cisaillement. L'étude du comportement mécanique d'un sol, ou encore son comportement en contrainte-déformation permet en outre, de déterminer sa charge portante sous des sollicitations induites par une structure ou un ouvrage. L'analyse de la résistance au cisaillement d'un sol est nécessaire pour calculer la stabilité externe des ouvrages ; par exemple, les murs de soutènement, les pentes et/ou talus naturels ou artificiels, etc.

I.1 COMPORTEMENT A COURT TERME ET COMPORTEMENT A LONG TERME

Un sol saturé soumis à des forces, subit une variation de volume. L'eau est incompressible, alors cette variation a lieu s'il y a mouvement de l'eau (apport ou export).

Dans le cas d'un **sol grenus**, on sait que sa perméabilité est élevée, donc l'écoulement de l'eau est très rapide. Le comportement de ce sol, de même que sa résistance, ne sont régis que par celui du squelette solide.

Dans le cas d'un **sol fin** saturé, la perméabilité est très faible, l'écoulement de l'eau est très lent et le changement de volume se traduit par une surpression (export de l'eau) ou une dépression (apport d'eau) dans l'eau interstitielle.

On considère donc deux comportements extrêmes du sol :

✚ **Un comportement à court terme (C.T)** : L'eau n'a pas eu encore le temps de s'évacuer et le sol se déforme à volume constant. Il s'agit alors d'un comportement non drainé (étude en contraintes totales).

- ✚ **Un comportement à long terme (L.T) :** Au bout d'un temps assez long (fin de la consolidation primaire), l'eau libre s'est évacuée. Le comportement du sol est régi uniquement par celui du squelette solide (étude en contraintes effectives).

I.2 COMPORTEMENT ELASTOPLASTIQUE DES SOLS

Dans les chapitres précédents, on a étudié le comportement des sols sous faibles taux de chargement (domaine élastique). Dans ce chapitre, nous traitons les grandes déformations, c'est à dire le comportement des sols à l'état d'écoulement plastique ou à l'état de rupture. La loi de Hooke n'est plus valable, on utilise alors une nouvelle loi appelée :

- 1- **Critère d'écoulement plastique** qui représente la frontière du domaine d'élasticité.
- 2- **Critère de rupture** représenté par la courbe intrinsèque qui est l'enveloppe des cercles de Mohr correspondant à la rupture.

Tout sol présente une résistance au cisaillement qui est due au frottement inter-granulaire (contact entre les grains) et aux forces d'attraction entre les particules dans le cas des sols fins.

- 1: Comportement élastique parfaitement plastique.
 2 : Comportement élasto-plastique écrouissable.
 3 : Comportement élasto-plastique écrouissable.

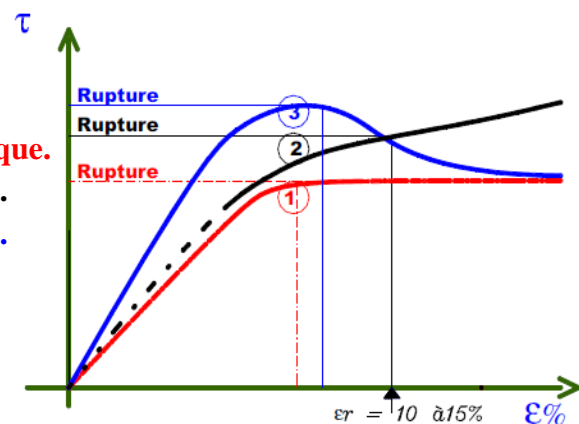


Fig 1 : courbes contraintes déformations

La connaissance de la résistance au cisaillement d'un sol (ou de sa courbe intrinsèque modélisée généralement par le critère de rupture de Coulomb) sert pour la résolution d'un grand nombre de problèmes de Génie Civil :

- Capacité portante des fondations superficielles et profondes.
- Stabilité des ouvrages de soutènement.
- Stabilité des talus, pentes et barrages, etc..

II. COURBE INTRINSEQUE, CRITERE DE MOHR COULOMB

Parmi de nombreuses théories sur la rupture qui en été proposées, seule celle formulé par Mohr à été utilisé dans le cas des sols. La théorie est basée sur le postulat suivant:

Il ya rupture dans un matériau lorsque la contrainte de cisaillement sur le plan suivant le quel la rupture est supposé se produire ne dépend que de la contrainte normale agissant sur ce plan.

L'expression algébrique qui est une fonction linéaire de σ_r sur le plan de rupture est :

$$\tau_r = \sigma_r \tan \phi + C$$

C : a les dimensions d'une contrainte et caractérise la cohésion.

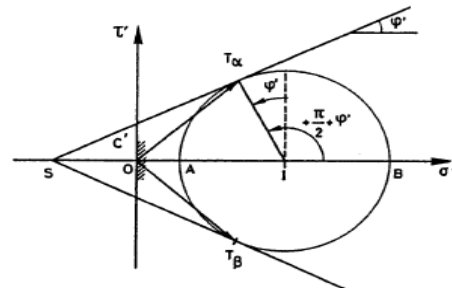
ϕ : est un angle appelé angle de frottement interne.

En accord avec Terzaghi, la résistance de cisaillement d'un sol est due essentiellement aux particules solide de celui-ci alors il l'exprime comme suit : $\tau = \sigma' \tan \phi' + C'$

C' , ϕ' sont les paramètres de résistance de cisaillement en terme de contrainte effective.

L'équation précédente peut être présentée graphiquement comme suit :

Fig 2 : Condition des Contraintes à la rupture



Lorsque la cohésion est nul ($C = 0$, $C' = 0$), le matériau est dit pulvérulent alors les droites du coulomb passe par l'origine donc : $\tau = \sigma' \tan \phi'$

Lorsque la cohésion n'est pas nul ($C \neq 0$, $C' \neq 0$) le matériau dit cohérent alors les coordonnées de point de rupture sont données par :

$$\tau_r = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin 2\theta$$

$$\sigma'_r = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \cos 2\theta$$

Avec θ : angle théorique formé par le plan principal majeur et le plan de rupture. Il est égale à $(45^\circ + \phi/2)$

A partir de la fig (6-2) en peut tirer :

$$\sin \varphi' = \frac{\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{\left[C' \times \operatorname{ctg} \varphi' + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \right]}$$

$$\sigma'_1 = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) \sigma'_3 + 2C' \times \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right)$$

$$\sigma'_3 = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) \sigma'_1 - 2C' \times \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right)$$

III. DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DE RESISTANCE «C» ET «Φ»

Plusieurs types d'essais sont utilisés pour déterminer les caractéristiques de plasticité ; on distingue :

- les essais de mesure in situ (scissomètre, pénétromètre...).
- les essais de laboratoire (compression simple, essai de cisaillement rectiligne ou boîte de Casagrande, essai de compression triaxial). On ne s'intéressera dans ce chapitre qu'aux essais de laboratoire.

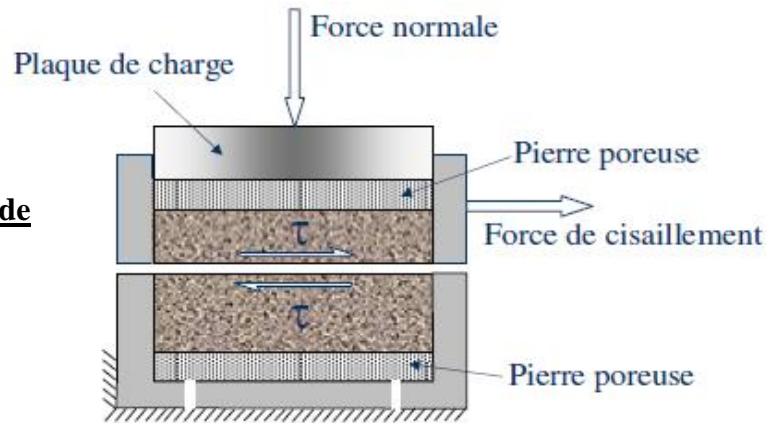
III.1 LA BOITE DE CISAILLEMENT (BOITE DE CASAGRANDE)

L'essai consiste à soumettre le sol à un cisaillement direct, rectiligne, suivant un plan imposé. L'éprouvette de sol (section circulaire ou carrée, épaisseur = 4 cm) est placée à l'intérieur deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. un piston permet d'exercer sur le sol un effort normal N constant pendant toute la durée de l'essai (fig.3).

Une demi-boîte est entraînée horizontalement à une vitesse constante. La force de cisaillement Test mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique. Un capteur de déplacements permet de déterminer le déplacement relatif des deux demi-boîtes, un second capteur vertical, permet de mesurer la variation de hauteur de l'échantillon (tassement ou gonflement). On exerce sur le plan de séparation des deux demi-boîtes une contrainte dont les composantes

normale et tangentielle ont pour valeur moyenne: $\sigma = \frac{N}{S}$ et $\tau = \frac{T}{S}$

Soit : **S** : section horizontale de la boîte de cisaillement.

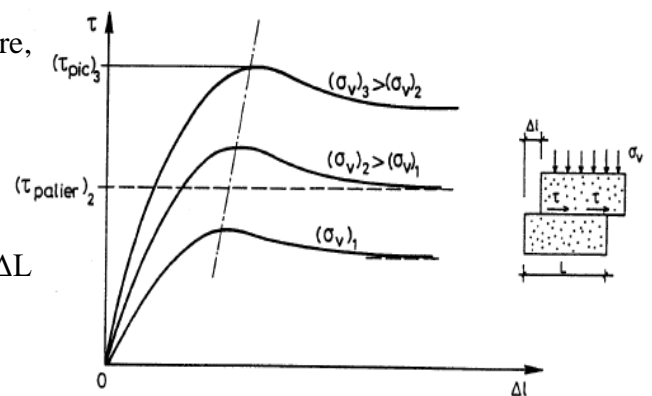
Fig 3 : Boîte de Casagrande

L'essai consiste à faire croître T jusqu'à la rupture, N étant maintenu constant Au cours de l'essai.

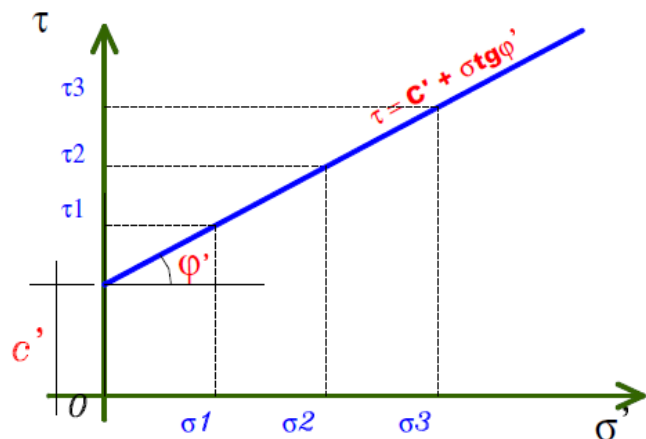
L : longueur (ou diamètre) de l'échantillon

ΔL : déplacement relatif Horizontal.

On mesure l'effort horizontal T en fonction de ΔL (fig.4)

**Fig 4 : Courbe contrainte/déformation**

Si cet essai est réalisé sur plusieurs éprouvettes d'un même sol avec des contraintes normales différentes, par exemple $\sigma_{i(i=1,2,3,...)}$, la courbe intrinsèque du sol peut être déterminée en portant sur le diagramme de Coulomb (τ ; σ) les points correspondants aux contraintes $\tau_{i(i=1,2,3,...)}$ mesurées (fig.5).

Fig 5 : Détermination de C et φ 

III.2 L'APPAREIL TRIAXIAL

L'appareil triaxial est aujourd'hui l'élément fondamental dans tous laboratoires de MDS.

L'éprouvette de sol a la forme d'un cylindre droit. Elle est placée dans une cellule appelée cellule triaxiale.

L'éprouvette est contenue dans une gaine élastique étanche et parfaitement déformable. Son extrémité inférieure ou ses deux extrémités, selon le montage, sont au contact d'une pierre poreuse. La cellule est remplie d'eau. Le dispositif d'essai permet de mettre cette eau en pression, ce qui conduit à appliquer une contrainte isotrope σ_3 à l'éprouvette (on a ici $\sigma_3 = \sigma_2$). D'autre part l'éprouvette peut être comprimée verticalement à l'aide d'un piston. Soit P la charge ainsi appliquée. La déformation verticale ΔL de l'éprouvette est mesurée à l'aide d'un comparateur.

Un robinet **R** permet, s'il est ouvert, le drainage de l'éprouvette par l'intermédiaire des pierres poreuses, l'essai est alors dit **drainé**. S'il est fermé, le sol ne peut pas se drainer, l'essai est dit **non drainé**.

Si **R** est fermé et le sol saturé, on peut mesurer la pression interstitielle de l'eau du sol à l'aide d'un capteur de pression.

Si **R** est ouvert, une burette permet de mesurer la quantité d'eau expulsée ou absorbée par l'échantillon.

Pour les essais avec mesure de la pression interstitielle, il faut que le dispositif soit saturé.

L'essai proprement dit consiste, pour une pression σ_3 constante, à faire croître P . Par raison de symétrie, les contraintes principales σ_1 et σ_3 sont respectivement verticales et horizontales.

Comme σ_3 s'applique également sur la face supérieure de l'éprouvette, on a : $\sigma_1 = \frac{P}{S} + \sigma_3$:

avec S : section de l'éprouvette.

Au moment de la rupture, on connaît donc le déviateur maximal des contraintes ($\sigma_1 - \sigma_3$) correspondant au cercle de Mohr tangent à la courbe intrinsèque. Si l'essai est répété pour différentes valeurs de σ_3 , on a plusieurs cercles de Mohr et il est alors possible de tracer la courbe intrinsèque (fig.6).

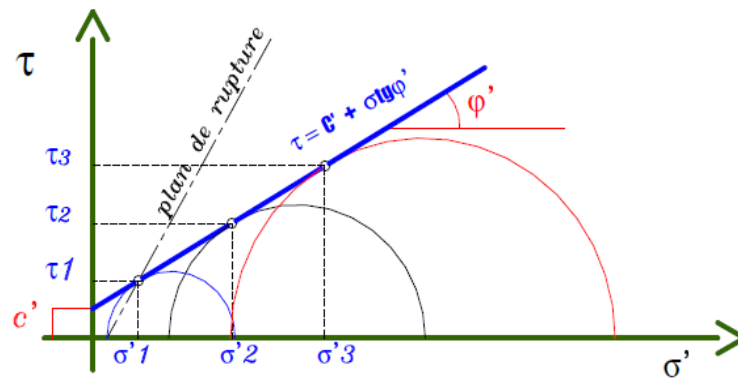


Fig. 6 : Détermination de la droite intrinsèque d'un sol

IV. CONDITION DE L'ESSAI

La connaissance des contraintes effectives passent par la détermination de la pression interstitielle. L'apparition de U ou cour d'un essai dépend des conditions dans lequel l'essai est réalisé c'est-à-dire de la manière dont le drainage de l'échantillon est assuré et du temps pendant lequel la consolidation peut se produire. Alors en peut distinguer 3 types d'essais :

IV.1 ESSAI CONSOLIDE DRAINE (C.D) (Essai très lent : Contraintes effectives).

L'essai CD permet de déterminer les caractéristiques intrinsèques du squelette du sol, il correspond au comportement du sol à long terme.

On commence par consolider l'échantillon de sol sous une contrainte isotrope σ_0 , c'est à dire qu'ayant appliqué cet état de contrainte, on le maintient, orifice de drainage ouvert, jusqu'à ce que la pression interstitielle se soit annulée ($U = 0$).

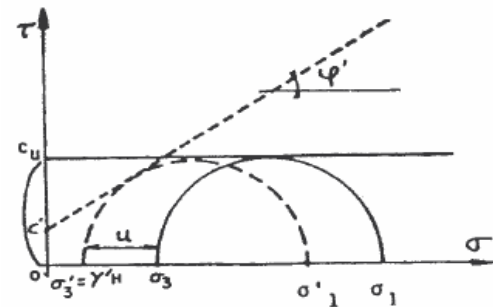
IV.2 ESSAI NON CONSOLIDE NON DRAINE (U.U)

L'essai non consolidé non drainé (UU) correspond au comportement à court terme du sol en place.

Il s'effectue à l'appareil triaxial ou à la boîte de cisaillement si le sol est très imperméable.

Le critère de rupture est :

- ✓ En terme de contraintes appliquées sur le plan de rupture : $\tau = C_u$ et $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$
- ✓ En termes de contraintes principales :
 $C_u = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$



Résultats d'essais UU

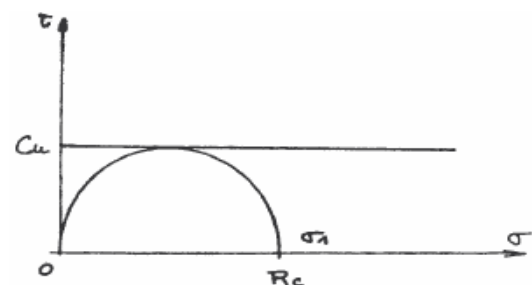
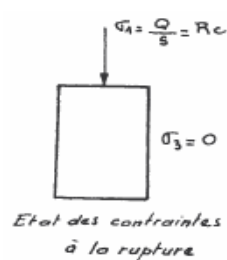
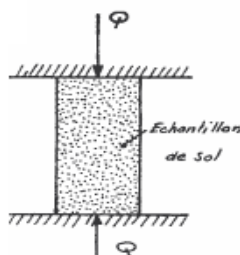
IV.3 ESSAI CONSOLIDE NON DRAINE (C.U)

Il a pour but :

- la détermination des paramètres de résistance effectifs (C' , ϕ') en mesurant la pression interstitielle à la rupture.
- La détermination des paramètres de résistance consolidés non drainés (C_{cu} , ϕ_{cu})
- L'étude de la variation de la cohésion non drainée en fonction de la pression de consolidation.

V. ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

L'essai de compression simple consiste à écraser un échantillon cylindrique de sol intact entre les deux plateaux d'une presse. La compression axiale à la rupture R_c est appelée la résistance à la compression simple. Comme le montre le cercle de Mohr : $R_c = 2C_u$



Essai de compression simple