

Le cisaillement

Introduction

On peut identifier dans les sols trois principaux types de sollicitations : par **traction**, **compression** ou **cisaillement**.

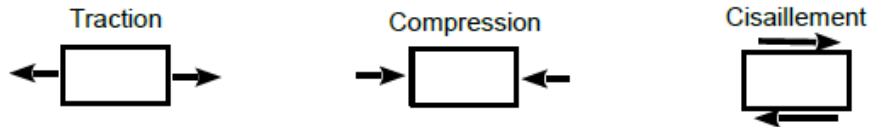


Figure 1. Différents types de sollicitations

Etant donné que la cause principale de sollicitation dans les sols est la gravité terrestre, créant des efforts verticaux dirigés vers le bas, on comprend intuitivement que les **contraintes de traction sont en générales absentes**. De plus, on sait que la **résistance à la traction** des sols est très faible voire **nulle**.

Par ailleurs, la résistance d'un sol à la compression est supérieure à sa résistance aux cisaillement. Ainsi pour **dimensionner** des ouvrages de génie-civil (fondations...), il suffit en général de connaître la **résistance au cisaillement du sol**, car s'il y a **rupture** ce sera suivant ce type de sollicitation.

Mobilisation de la résistance au cisaillement

Considérons deux corps solides en contact le long d'une surface d'aire S , tels que la surface de contact est soumise à une force normale Q constante et à une force tangentielle T croissante. En deçà d'un effort limite T_l , le contact entre les deux corps est stable et aucun déplacement relatif ne se manifeste. On parle alors d'un équilibre stable ou *équilibre surabondant*.

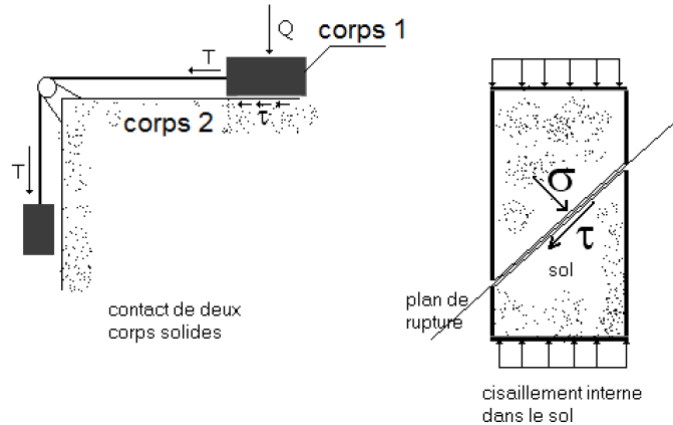


Figure 2. Exemple analogue illustrant le cisaillement par frottement de deux corps

En atteignant la valeur T_l , les contraintes tangentielles $\tau_l = T_l/S$ **mobilisées** à la surface de contact atteignent la valeur maximale τ_l assurant la stabilité de contact des deux corps, appelée ***résistance au cisaillement*** du corps 1 par rapport au corps 2. On parle d'état d'*équilibre limite* de contact (ou seuil de rupture). La rupture se manifeste par un glissement ou déplacement relatif infini.

La résistance au cisaillement dépend de l'état de surface de contact, et augmente proportionnellement à la contrainte normale $\sigma = Q/S$. On peut l'écrire comme suit :

$$\tau_l = f \cdot \sigma \quad (\text{ou } \tau_l = \sigma \operatorname{tg} \varphi)$$

- f est appelé *coefficient de frottement* de la surface de contact.
- φ est l'*angle de frottement* du corps 1 par rapport au corps 2.

On peut formuler un critère de stabilité de contact des deux corps comme suit:

- si $\tau < \tau_l = \sigma \operatorname{tg} \varphi$ l'équilibre est stable (surabondant),
- si $\tau = \tau_l$ l'équilibre est limite. Il s'agit du seuil de rupture des deux corps par déplacement relatif,

On peut généraliser cet exemple au matériau sol, Ce dernier manifeste aussi une résistance au cisaillement, quantifiée d'ailleurs par la contrainte tangentielle limite τ_l , et résultant de deux composantes fondamentales :

- *Résistance par frottement* entre les grains du sol. Il s'agit en fait, par analogie à l'exemple ci-dessus, d'un frottement sol/sol ou interne, et l'angle φ est dit *angle de frottement interne*.
- *Résistance par adhérence* ou *par cohésion* des particules du sol. Des forces de cimentation naturelle peuvent exister dans les sols fins et contribuer à coller les grains les uns contre les autres. Ce sont des forces de *cohésion*.

On peut penser simplement à superposer ces deux composantes et sommer les deux résistances dans le cas général, ce qui permet d'écrire que:

$$\tau_l = C + \sigma \tan \varphi$$

Les termes $\sigma \tan \varphi$ et C représentent respectivement les résistances par frottement interne et par cohésion.

N.B. Facteur de sécurité lors d'un glissement

F.S = Résistance disponible $(C + \sigma \tan \varphi)$ / Résistance mobilisée

Critère de rupture du sol

On appelle critère de rupture du sol une condition que doivent vérifier les contraintes pour que le matériau résiste aux sollicitations. Plusieurs chercheurs ont proposé des définitions au critère de rupture, notamment Tresca, Von Mises, Mohr-Coulomb et Drucker-Prager.

Pour les sols **secs** ou **saturés**, le critère de rupture le plus utilisé dans les projets est celui de Mohr-Coulomb. Il définit une relation linéaire entre les composantes τ et σ de la contrainte s'exerçant sur la facette de rupture au sein du matériau:

$$\tau_i = \pm (C + \sigma_i \tan \varphi)$$

C est appelé *cohésion* et représente la résistance par adhérence des grains. Un matériau pulvérulent, tel que les sables propres et secs et les graviers, n'a pas de cohésion ($C=0$).

φ est appelé *angle de frottement interne* et correspond à l'obliquité maximale du vecteur de contrainte agissant sur un matériau **pulvérulent**. Cet angle caractérise la résistance par frottement entre grains. L'expérience des essais de laboratoire, comme il sera vu ultérieurement, montre que l'angle de frottement des **argiles** saturées en comportement non drainé est pratiquement nul ($\varphi_u=0$). Le comportement non drainé sera vu au paragraphe suivant.

Géométriquement parlant, selon la figure 2, la critère de Mohr-Coulomb s'exprime dans le plan (σ , τ) sous forme de deux droites, l'une correspondant aux valeurs négatives de la résistance au cisaillement τ , et l'autre aux valeurs positives.

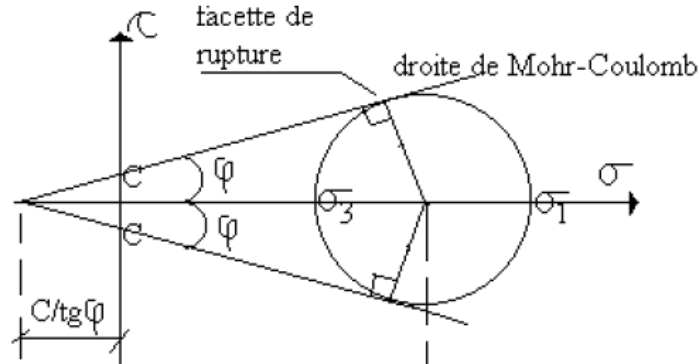


Figure 3. Cercle de Mohr à la rupture

On remarque que ces deux droites ont chacune un point commun avec le cercle de Mohr. Le terme $C/\text{tg}\varphi$ du fait qu'il correspond à une contrainte normale négative (traction) et une contrainte de cisaillement nulle, est appelé *résistance maximale à la traction*.

Théorème des états correspondants

Dans certains problèmes de mécanique des sols, tels que la **capacité portante** des fondations et la **stabilité des murs de soutènement**, il est plus facile d'étudier la résistance d'un sol pulvérulent ($C=0$).

Le théorème *des états correspondants*, énoncé en premier par Albert Caquot et Jean Kérisel en 1948, montre qu'il est possible de remplacer l'étude d'un sol cohérent ($\varphi \neq 0$, $C \neq 0$) par celle d'un sol pulvérulent équivalent ayant le même angle de frottement φ et soumis en plus du chargement du sol cohérent à une pression isotrope $C/\text{tg}\varphi$ sur chaque facette.

En effet, en considérant une facette en rupture, la contrainte de cisaillement ultime est donnée par :

$$\tau_u = C + \sigma \text{tg} \varphi = (\sigma + C/\text{tg}\varphi) \text{tg}\varphi$$

Cette écriture aboutit à la même résistance de cisaillement d'une facette dans un sol pulvérulent ($C=0$) soumise à une contrainte normale égale à σ (due au chargement du sol cohérent), auquel s'ajoute une pression normale égale à $C/\text{tg}\varphi$.

Types de comportement du sol

Contrairement à certains matériaux de construction, le sol ne peut être décrit par un comportement unique quelle que soit sa nature et les conditions de chargement.

En fait, le matériau sol se comporte généralement en fonction des conditions de drainage de l'eau (possibilité d'expulsion de l'eau interstitielle au cours du chargement), de la perméabilité du sol, ainsi que de la vitesse de chargement.

* **Un comportement est dit *non drainé*** si l'eau ne peut se drainer des vides interstitiels du squelette granulaire quel que soit le temps (cas d'une couche de sable perméable saturée par une nappe captive entre deux couches imperméables), ou lorsque la vitesse d'application du chargement est tellement grande que l'eau ne peut s'infiltrer instantanément (en début de chargement ou lors d'une augmentation brusque du chargement). Ce comportement correspond à une surpression non nulle ($\Delta u \neq 0$) et l'état d'équilibre limite est atteint lorsque :

$$\tau = C_u + \sigma_t g \varphi_u$$

C_u et φ_u sont appelées caractéristiques mécaniques non drainées ou apparentes.

N.B. Pour une argile saturée, l'expérience des essais de laboratoire montre que $\varphi_u \approx 0$.

Le comportement d'un sol fin saturé en cours de consolidation varie dans le temps. On distingue ainsi:

- *le comportement à court terme* qui se manifeste au début du chargement.

A cet instant, l'eau supporte toute augmentation des contraintes totales. La déformation se fait à volume **constant** et le comportement, faisant intervenir les grains et l'eau, est décrit par les contraintes **totales**. L'état d'équilibre limite est atteint lorsque :

$$\tau = C_u + \sigma_t g \varphi_u$$

- *le comportement à long terme* qui se manifeste après consolidation primaire.

L'eau est en régime hydrostatique et les grains supportent la surcharge. La déformation se fait avec **variation** du volume et le comportement du sol, faisant intervenir les grains, est décrit par les contraintes **effectives**. L'état d'équilibre limite est atteint lorsque :

$$\tau = C' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi'$$

C' et φ' sont appelées caractéristiques mécaniques effectives ou drainées.

N.B. Pour un sable propre et sec, la cohésion C est nulle.

Un comportement est dit *drainé* si le sol expulse l'eau interstitielle au fur et à mesure de l'augmentation du chargement et les grains supportent toute augmentation des contraintes totales. Ainsi, à tout instant

$$\Delta\sigma'_v = \Delta\sigma_v \text{ et } \Delta u = 0.$$

Mesure des caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques C et φ peuvent être mesurées directement à partir des essais de laboratoire sur des échantillons **intacts** afin de **refléter** la résistance réelle du terrain. A cause du problème de prélèvement des échantillons de sol pulvérulent (sable, gravier, etc) à partir des sondages carottés, il est difficile d'obtenir au laboratoire une mesure **réaliste** des caractéristiques mécaniques de ce type de sols. On peut par contre mener des essais à différentes densités afin d'encadrer les valeurs de l'angle de frottement.

Essai de cisaillement direct

L'essai consiste à soumettre le sol à un cisaillement direct, rectiligne, suivant **un plan imposé**.

L'échantillon de sols, est placé entre 2 demi-boîtes mobiles l'une par rapport à l'autre : on applique à l'échantillon un effort de compression normale N à l'aide piston (contrainte verticale σ donnée) et un effort horizontal de traction T en déplaçant les 2 demi-boîtes l'une par rapport à l'autre (contrainte de cisaillement croissante τ jusqu'à la rupture de l'échantillon par cisaillement) (fig 4).

Un capteur de déplacements permet de déterminer le déplacement relatif des deux demi-boîtes.

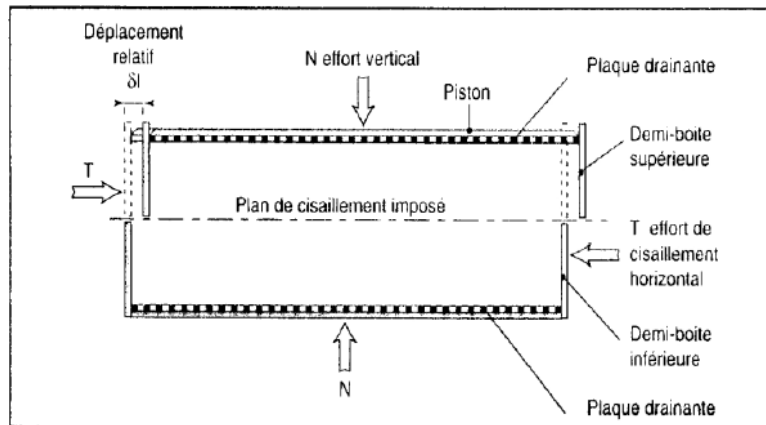


Figure 4. Schéma de principe de l'essai de cisaillement à la boîte

Si l'essai est réalisé sur plusieurs éprouvettes d'un même sol avec des contraintes normales différentes, par exemple $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ etc., la courbe contrainte-déplacement est représentée (figure 5).

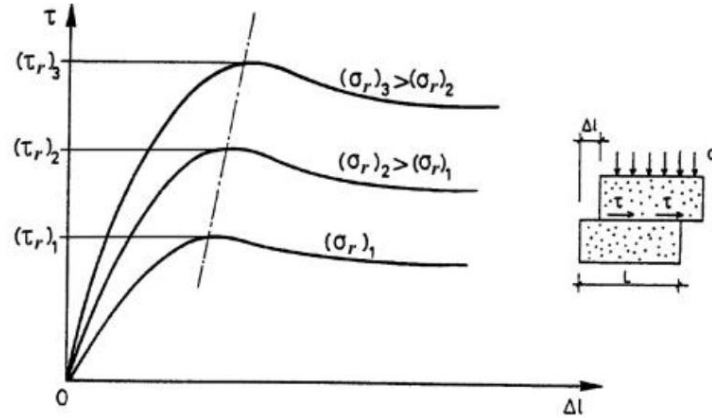


Figure 5. Contraintes-déplacement

En regroupant les points (σ, τ) d'au moins trois essais, on peut tracer la droite décrivant le critère de rupture et déduire les caractéristiques mécaniques: l'angle de frottement φ et la cohésion C sont respectivement la **pente** de la droite expérimentale et son **ordonnée à l'origine** des contraintes.

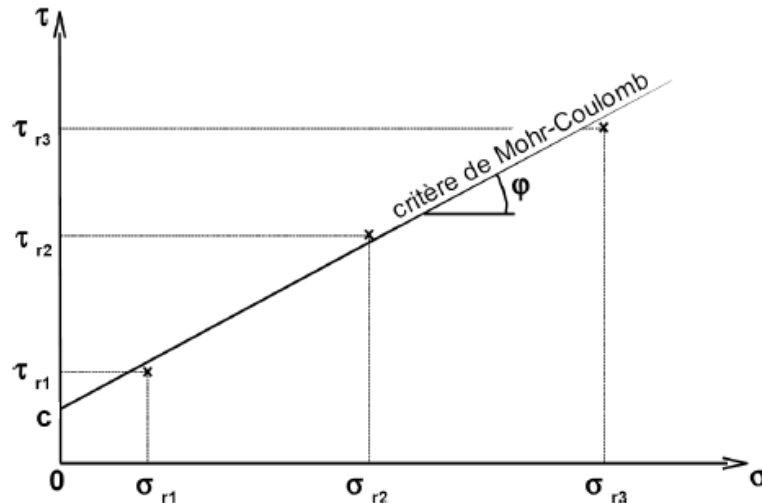


Figure 6. Représentation du critère de Mohr-Coulomb

La figure 7, illustre un exemple d'essai de cisaillement non drainé sur un échantillon marneux de Boudouaou (Boumerdès). La boîte de cisaillement est carrée, de coté 60 mm et la vitesse de cisaillement est de 0.9 mm/minute. Les contraintes normales appliquées sont de 100, 200 et 300 kPa. L'ajustement des trois points expérimentaux selon la méthode des moindres carrés mène à l'équation suivante de la droite de Mohr-Coulomb :

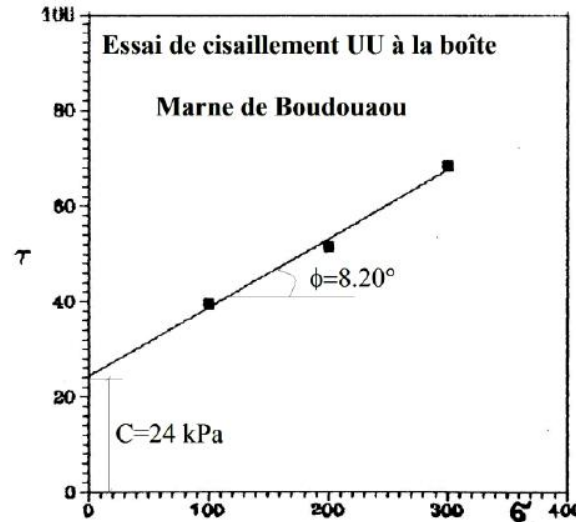


Figure 7. Exemple de courbe de l'essai de cisaillement à la boîte

Tableau 1. Classification des sols fins saturés vis-à-vis de la cohésion

C_u (kPa)	Résistance au cisaillement
< 10	Extrêmement faible
10-20	Très faible
20-40	Faible
40-75	Moyenne
75-150	Elevée
150-300	Très élevée
>300	Extrêmement élevée ⁽¹⁾

(1). Les matériaux dont la résistance au cisaillement est supérieure à 300 kPa peuvent se comporter comme des roches tendres; il convient de les décrire comme des roches tendres.

Application

On a effectué des essais de cisaillement direct sur un sable moyen. A l'aide des résultats qui suivent, déterminer les paramètres de résistance au cisaillement de ce sable. Commenter les résultats trouvés.

essai	Σ	τ
1	67.3	57.1
2	118.6	99.2
3	170.2	150.7
4	231.8	194.7

Table des matières

Introduction.....	1
Mobilisation de la résistance au cisaillement.....	2
Critère de rupture du sol.....	5
Théorème des états correspondants.....	7
Types de comportement du sol.....	8
Mesure des caractéristiques mécaniques.....	10
Appareil de cisaillement direct :.....	11
Application.....	15