

## I.1- Introduction

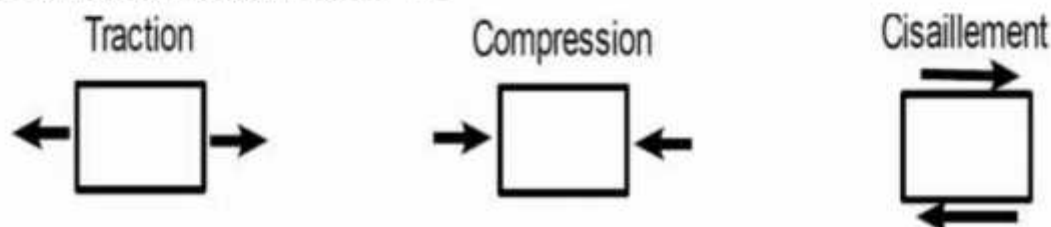
Lorsqu'on procède au dimensionnement d'éléments structuraux en acier, en béton armé ou en bois, il est essentiel de connaître leur résistance aux vis-à-vis les différentes sollicitations pour assurer la stabilité et la sécurité des ouvrages. Il en va de même pour **les sols** utilisés comme matériaux de fondation. Avant de concevoir les fondations d'un ouvrage, il faudra déterminer les propriétés mécaniques des sols pour que les charges qui y seront appliquées ne provoquent ni tassement excessif ni rupture.

En pratique, la résolution d'un problème de géotechnique consiste successivement à :

- ✓ vérifier que la stabilité vis-à-vis de la rupture est assurée avec un coefficient de sécurité satisfaisant ;
- ✓ s'assurer que le dimensionnement de l'ouvrage est compatible avec les tassements admissibles.

## I.2- Notions élémentaires sur la rupture des sols

On peut identifier dans les sols trois principaux types de sollicitations : par traction, compression ou cisaillement (**Figure - 1**).



**Figure (1) :** Principaux types de sollicitation dans les sols

- **Traction** : la résistance à la traction des sols est très faible voire nulle, on ne cherche donc pas en général à l'évaluer et on lui attribue par défaut une valeur nulle ;
- **Compression** : les sols présentent en général une bonne résistance à la compression. Cette résistance à la compression n'est pas en général le critère dimensionnant des ouvrages ;
- **Cisaillement** : la rupture d'un sol par cisaillement est en général provoquée avant que ne se produise sa rupture par contraintes de compression. Ainsi pour dimensionner des ouvrages de génie-civil (fondations...).

L'importance d'étudier la résistance au cisaillement d'un sol

1. Calcul de la capacité portante des fondations;
2. Étude de la stabilité des talus et versants ;
3. Évalue les poussées des terres sur les ouvrages de soutènement.

## I.3- Mécanisme de la résistance

Dans ce chapitre, nous décrirons d'abord les contraintes qui agissent sur un plan de cisaillement et expliquerons les relations qui existent entre elles. Nous étudierons ensuite les contraintes à la rupture, ainsi que **les deux paramètres de la résistance au cisaillement d'un sol, la cohésion ( $C$ ) et l'angle de frottement interne ( $\varphi$ )**. Par la suite, nous présentons les principaux essais effectués en laboratoire pour mesurer les paramètres de la résistance au cisaillement des sols selon différentes conditions de consolidation et de drainage.

## I.4- Mesure au laboratoire des caractéristiques mécaniques

Il existe plusieurs méthodes disponibles pour déterminer les paramètres de résistance au cisaillement ( $c$ -à- $d$ ,  $c, \varphi$  ;  $c', \varphi'$ ) de divers échantillons de sol en laboratoire. Ils sont comme suit :

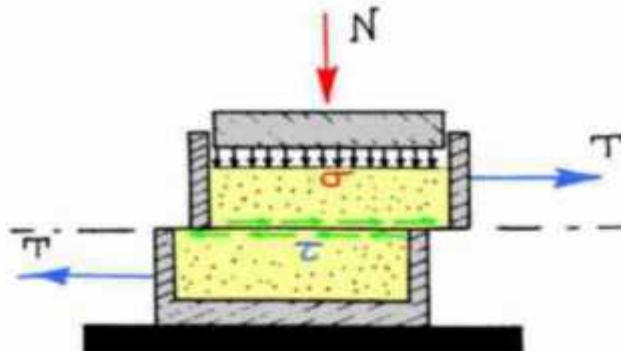
- Essai de cisaillement direct
- Essai triaxial
- Essai de cisaillement simple direct
- Essai triaxial de déformation plane
- Essai de cisaillement de l'anneau de torsion

L'essai de cisaillement direct et l'essai triaxial sont les deux techniques couramment utilisées pour déterminer les paramètres de résistance au cisaillement. Ces deux tests seront décrits en détail dans les sections qui suivent.

### I.4.1- Appareil de cisaillement direct - boîte de Casagrande

L'essai de cisaillement direct est une méthode assez ancienne pour mesurer la résistance au cisaillement des sols. La forme la plus récente de la boîte de cisaillement directe a été élaborée par Arthur Casagrande en 1932.

L'essai consiste à soumettre le sol à un cisaillement suivant un plan imposé. L'éprouvette de sol est placée à l'intérieur de demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston permet d'exercer sur le sol une force verticale  $N$  constante pendant toute la durée de l'essai (**Figure - 2**).



**Figure (2) : Schéma de principe de l'essai de cisaillement direct**

Une demi-boîte est entraînée horizontalement à vitesse constante pendant que l'autre est maintenue bloquée. A tout instant, on mesure la force de cisaillement  $T$ . Un capteur de déplacement permet de déterminer le déplacement relatif  $\Delta l$  des deux demi-boîtes.

On exerce sur le plan de séparation AB des deux demi-boîtes une contrainte dont les composantes normale et tangentielle ont pour valeur moyenne :

$\sigma = N / s$  : La contrainte normale appliquée à l'échantillon

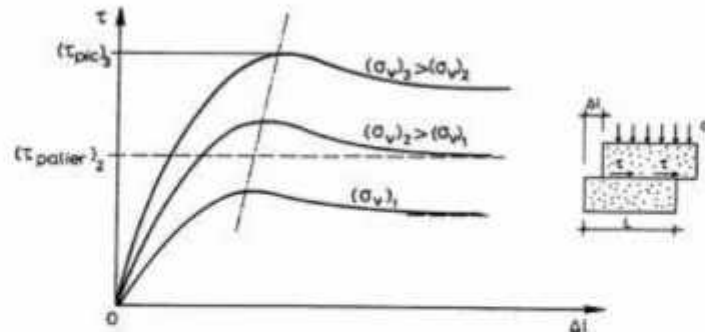
$\tau = T / s$  : La résistance au cisaillement mesurée à la rupture.

Où  $s$  est la section corrigée de l'éprouvette (cette section variant en fonction du déplacement relatif  $\Delta l$ ).

L'essai consiste faire croître  $T$  jusqu'à la rupture,  $N$  étant maintenu constant. **Résultats de l'essai**



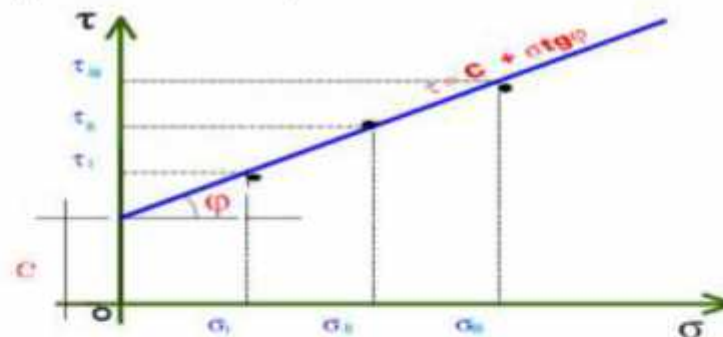
Le plan de Mohr, (**Figure - 3**), est une représentation plane de l'état de contrainte dans des axes liés à la facette. L'axe des abscisses ( $\sigma$ ) représente la contrainte normale exercée sur la facette, alors que l'axe des ordonnées ( $\tau$ ) représente la contrainte de cisaillement. Chacun des états de rupture d'un sol, caractérisé par un couple  $\tau_r$  et  $\sigma_r$ , peut être représenté par un point sur le plan de Mohr.



**Figure (3) :** Courbes contrainte-déplacement

La **figure (4)** montre les points atteints à la rupture pour trois contraintes normales ( $\sigma$  différentes). On remarque que les points sont à peu près alignés suivant une droite. Cette droite représente l'ensemble des états de rupture. Elle sépare le plan de Mohr en deux domaines :

- Le domaine sous cette droite représente l'ensemble des états de contrainte que peut « supporter » le sol ;
- Le domaine au-dessus de la droite représente l'ensemble des états de contrainte qui ne peuvent pas être atteints avec le sol considéré (il y a rupture avant de pouvoir les atteindre).



**Figure (4) :** Représentation des états de rupture caractérisés à la boîte de Casagrande dans le plan de Mohr

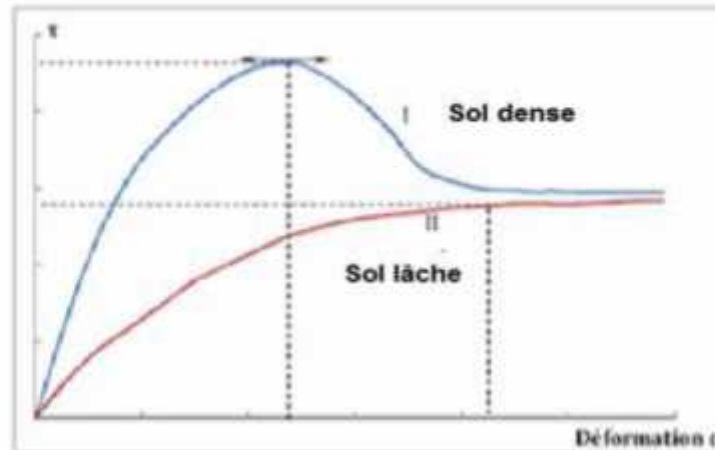
On appelle la droite représentant l'ensemble des états de rupture le Critère de Mohr-Coulomb. Ce critère est défini par l'équation :  $\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$

- ❖  $\varphi$  ; est appelé **l'angle de frottement**, il représente la pente de la droite et s'exprime en degré. L'angle de frottement traduit le lien entre la contrainte normale appliquée et la résistance au cisaillement ;
- ❖  $c$  : est appelée **la cohésion** et a la dimension d'une contrainte. Elle correspond à la résistance au cisaillement pour une contrainte normale nulle.

La cohésion traduit un « effet de colle » que l'on observe dans des argiles ou des sables partiellement saturés, elle est nulle pour un sable sec ou saturé et les argiles normalement consolidées.

Ainsi, si l'on connaît les valeurs des paramètres de résistance mécanique  $c$  et  $\varphi$  d'un sol donné, on peut facilement savoir si un état de contrainte défini par  $\sigma_r$  et  $\tau_r$  provoquera la rupture, ou non, de ce sol.

En pratique, la rupture d'une éprouvette de sol s'apprécie d'après les déformations du sol : on trace en cours d'essai la courbe représentant la variation de la déformation du sol en fonction de la sollicitation qui l'a produite. Ces courbes dépendent de la nature et l'état du sol, (**Figure - 5**).



**Figure (5) :** Courbe contrainte-déformation dans un essai de cisaillement

La boîte de cisaillement direct est simple et rapide à mettre en œuvre, cependant elle ne permet pas un contrôle correct des conditions de drainage du sol, ainsi qu'une maîtrise précise de l'état de contrainte (il y a une concentration de contraintes aux extrémités de la boîte).

**L'appareil triaxial décrit ci-après permet d'éviter ces inconvénients**

#### 1.4.2- Critère de rupture de Mohr-Coulomb

##### ➤ Droite de Coulomb

Supposons un sol soumis à des systèmes de charges différentes. Pour chaque système, on peut tracer à la rupture un cercle de Mohr lui correspondant. L'enveloppe des cercles de Mohr à la rupture est appelée courbe intrinsèque. Coulomb (1776) a montré que la courbe intrinsèque des sols (**Figure - 6**) était une droite d'équation :

$$\tau_r = \sigma_r \cdot \tan(\varphi) + c$$

Avec :  $c$  - Cohésion

$\varphi$  - Angle de frottement interne

$\sigma_r$  - Contrainte normale sur le plan de rupture.

$\tau_r$  - Contrainte de cisaillement.

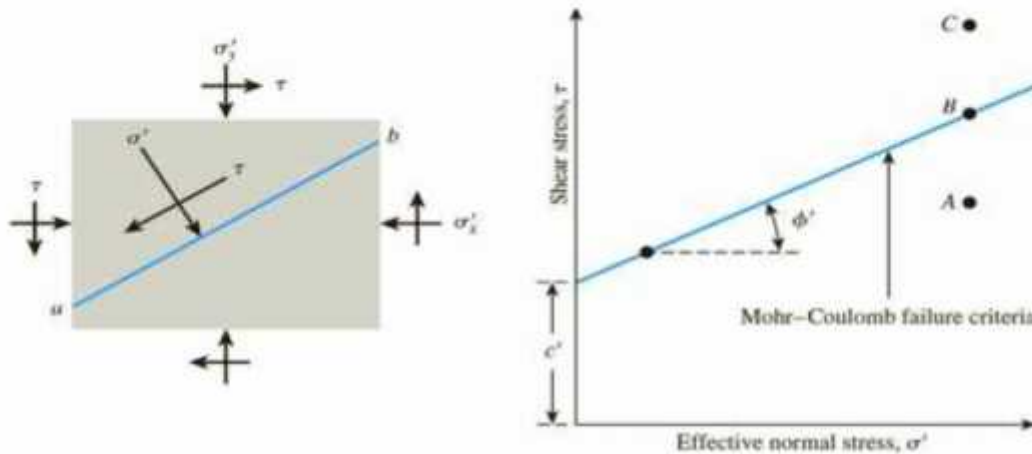
On rappelle également qu'il faut faire la distinction entre contraintes effectives et contraintes totales. Dans un sol saturé, la contrainte normale totale dans un point est la somme de la contrainte effective ( $\sigma'$ ) et de la pression interstitielle ( $u$ ), ou

$$\sigma = \sigma' + u$$

La contrainte effective  $\sigma'$  est portée par les grains solides du sol. Le critère de rupture de Mohr – Coulomb, exprimé en termes de contrainte effective, sera de la forme :

$$\tau_f = \sigma' \tan \varphi' + c'$$

Où  $c'$ : cohésion et  $\varphi'$ : angle de frottement, basés sur la contrainte effective.



La valeur de  $c'$  pour le sable et le limon inorganique est de **zéro**. Pour les argiles normalement consolidées,  $c'$  peut être approximé à **zéro**. Les argiles sur consolidées ont des valeurs de  $c'$  qui sont supérieures à **zéro**. L'angle de frottement  $\varphi'$ , est parfois appelé angle de frottement drainé.

#### ➤ Cercle de Mohr

Lorsque les contraintes  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  sont fixées, les valeurs des contraintes normale  $\sigma$  et tangentielle  $\tau$  varie en fonction de l'orientation  $\alpha$  de la facette considérée. Dans le plan de Mohr, les différentes valeurs que peuvent prendre  $\sigma$  et  $\tau$ , en fonction de  $\alpha$ , décrivent un cercle que l'on appelle **cercle de Mohr**, tel que montré sur la figure (8). La dimension du cercle de Mohr et sa position sur l'axe des abscisses dépend uniquement des contraintes principales majeure et mineure,  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$ .

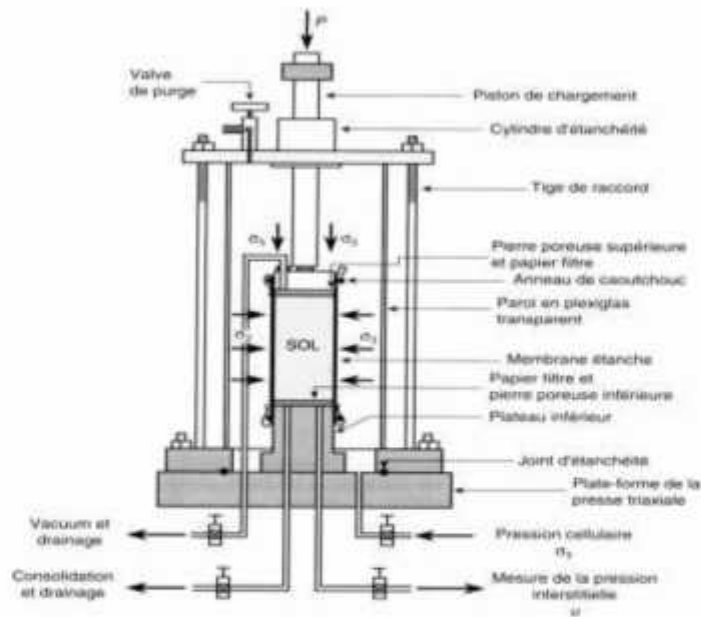
Graphiquement en remarquant que l'orientation  $\alpha$  de la facette, par rapport au plan portant la contrainte  $\sigma_1$ .

### I.4.3- Essai triaxial

#### ➤ Principe de l'essai triaxial

Dans cet essai, l'éprouvette de sol est placée dans une cellule dite triaxiale. L'éprouvette cylindrique d'un élancement  $h/d$  au moins égal à 2, où  $h$  désignant la hauteur et  $d$  le diamètre, (**Figure - 6**). L'éprouvette est entourée d'une membrane étanche en caoutchouc ou latex, le tout placé dans une cellule cylindrique remplie d'eau. Des pierres poreuses placées aux extrémités de l'éprouvette et reliée à un système de drainage permettent à l'eau interstitielle d'entrer ou de sortir de l'éprouvette de sol. Ces pierres poreuses peuvent également être reliées à un appareil de mesure de pression interstitielle. Un piston permet de comprimer l'éprouvette dans la direction verticale avec une force  $P$ .



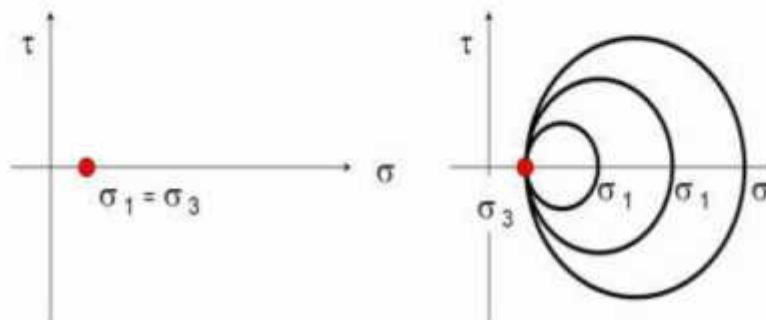


**Figure (6) :** Principe d'essai triaxial (la cellule triaxial)

Le contrôle de la pression d'eau dans la cellule permet d'imposer directement la contrainte horizontale (ou radiale) totale  $\sigma_3$  à l'échantillon, (cette pression étant appliquée grâce à de l'eau, elle agit également dans le sens vertical).

On générale l'essai comporte deux étapes, que l'on peut suivre sur **la figure (7)**, si l'on se réfère au plan de Mohr).

- **La première étape de compression isotrope :** le piston n'est pas utilisé (donc  $q = 0$ ), seule la pression d'eau dans la cellule est augmentée. Il y a donc accroissement des contraintes  $\sigma_1 = \sigma_3$  jusqu'à une valeur donnée (on remarque dans ce cas que quel que soit l'orientation de la facette considérée la contrainte de cisaillement  $\tau$  est toujours nulle) ;
- **La deuxième étape de cisaillement,** durant laquelle on fait croître, avec le piston, la valeur du déviateur  $q$  et donc la valeur de  $\sigma_1$  ( $\sigma_3$  est maintenu constant). Cela va donner naissance à des contraintes de cisaillement  $\tau$  sur des facettes d'orientation quelconque. La valeur de  $q$  est augmentée jusqu'à un maximum correspondant à la rupture en cisaillement du sol.

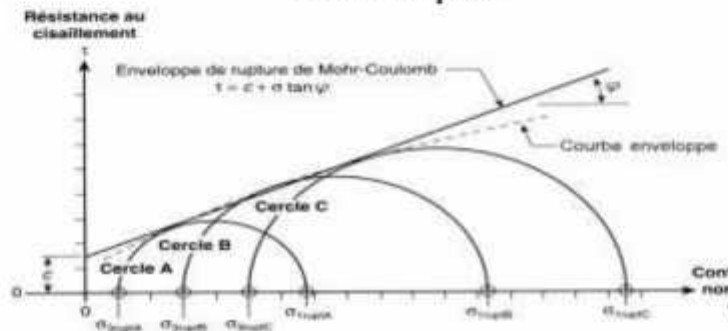


**Figure (7) :** Étapes de l'essai triaxial représenté dans le plan de Mohr

En réalisant des essais triaxiaux pour différentes valeurs de la contrainte de confinement  $\sigma_3$ , on obtient à la rupture, des cercles de Mohr de diamètre d'autant plus grand que la valeur de  $\sigma_3$  est grande. En effet, plus  $\sigma_3$  est importante, plus la contrainte normale sur les plans de cisaillement est importante et plus le sol résistera à des sollicitations plus élevée.

L'enveloppe des cercles de Mohr à la rupture est assez bien approximée par une droite tangente à chacun des cercles de Mohr (**figure - 8**). Cette droite est le critère de rupture de Mohr-Coulomb défini par la relation :

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c$$



**Figure (8) :** Enveloppe des cercles de Mohr à la rupture et critère de Mohr-Coulomb

#### ➤ Essai consolidé-drainé (CD)

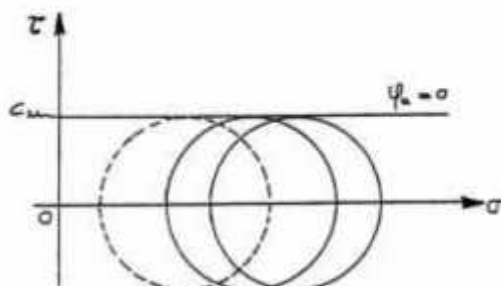
L'essai consolidé drainé permet d'étudier le **comportement à long terme**. La résistance mécanique du sol est caractérisée par l'angle de frottement effectif  $\varphi'$  et la cohésion effective  $c'$ . Le critère de Mohr-Coulomb s'écrit (**Figure - 9**)

$$\tau' = \sigma' \tan \varphi' + c'$$

#### ➤ Essai non consolidé-non drainé (UU)

L'essai non consolidé et non drainé permet d'étudier le comportement à court terme du sol en place. La résistance au cisaillement est indépendante de la valeur de la contrainte de confinement  $\sigma_3$ . Par conséquent, le diamètre des cercles de Mohr reste constant quelle que soit la valeur de  $\sigma_3$ . L'enveloppe des cercles de Mohr est une droite parallèle à l'axe des abscisses dont l'ordonnée à l'origine est appelée cohésion non drainée, notée  $c_u$  ( $\varphi_u$  est en général égal à 0). Le critère de rupture s'écrit en contraintes totales :

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi_u + c_u = c_u$$



**Figure (9) :** Enveloppe des cercles de Mohr obtenus par des essais non consolidés-non drainés