

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(ϕ). 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.

Dans la pratique la résolution d'un problème de Mécanique des Sols consiste souvent 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,

La seconde vérification est l'objet du chapitre précédent, le premier est l'objet du présent chapitre.

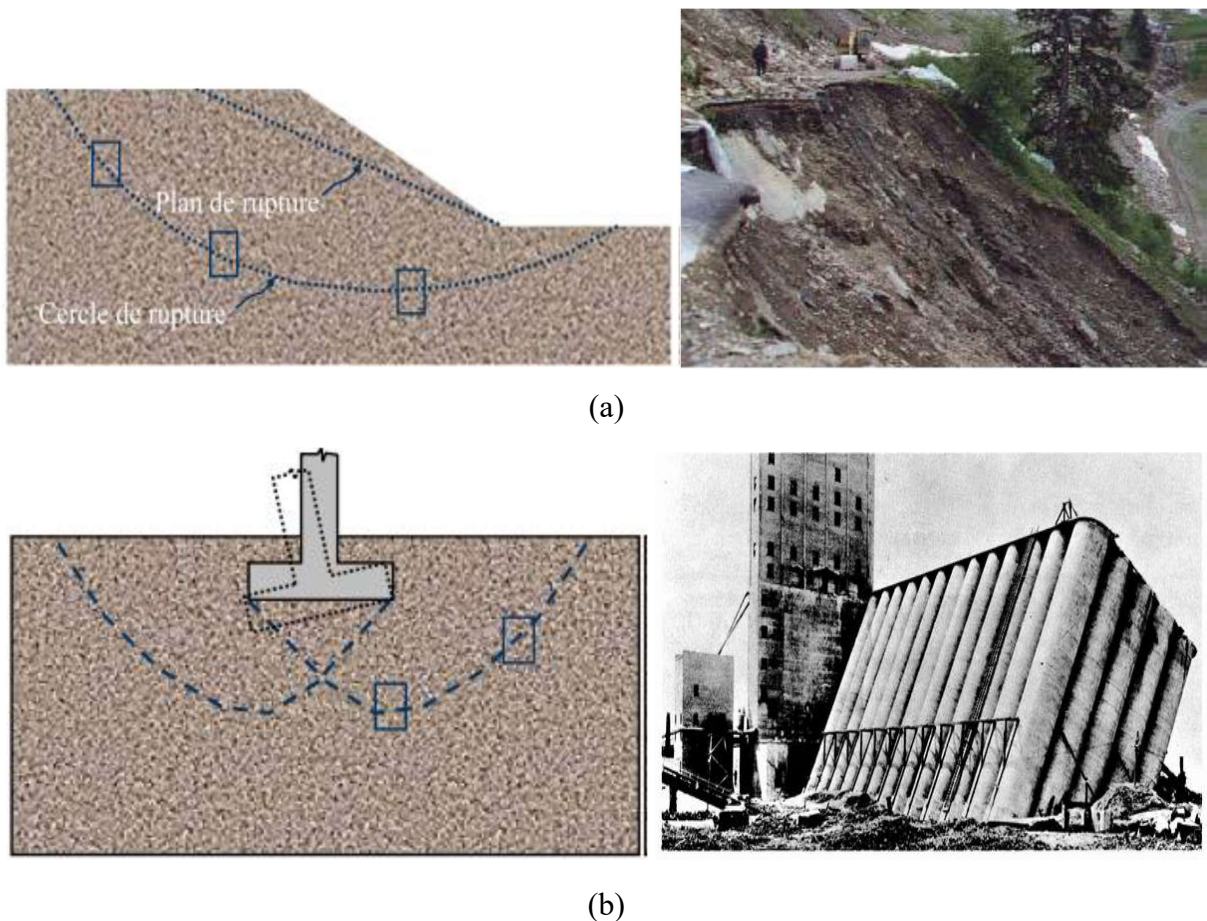


Fig. 1.1 Rupture par cisaillement. (a) rupture d'une pente, (b) rupture d'une fondation.

1.1 Définition de la rupture du 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 1.2.

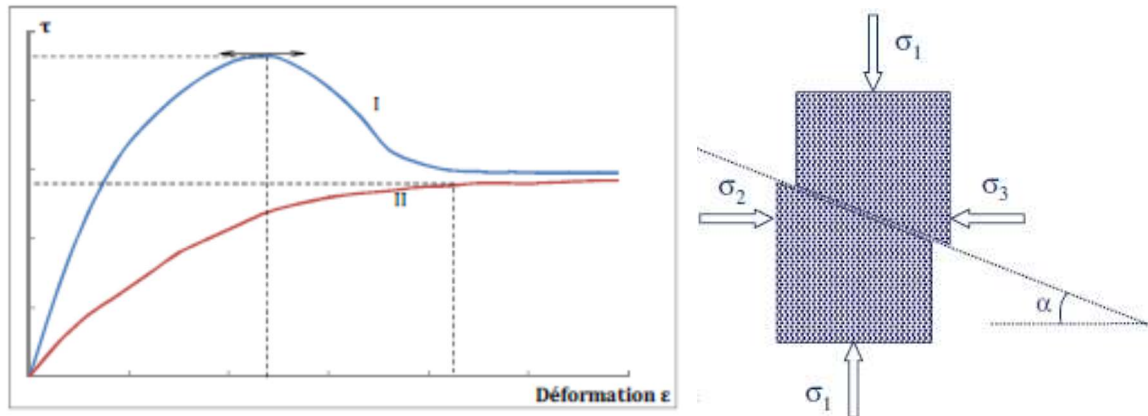


Fig. 1.2 Courbe contrainte-Déformation dans un essai de cisaillement.

Sol I : sable dense, argile surconsolidée

Sol II : Sable lâche, argile remaniée

1.2 Critère de rupture de Mohr-Coulomb

Mohr a émis l'hypothèse que la contrainte de cisaillement à la rupture sur le plan de rupture est fonction unique de la contrainte normale sur ce plan.

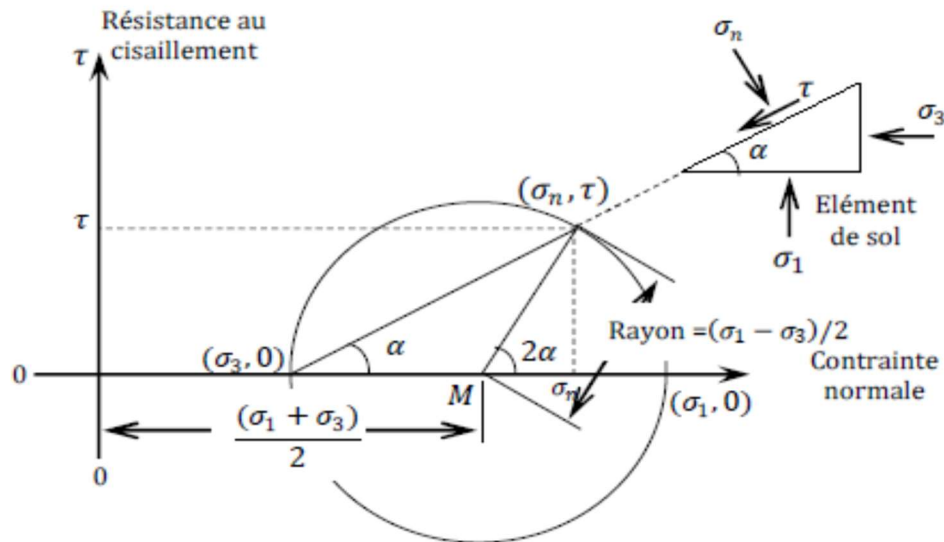


Fig 1.3 Représentation de Mohr, Contraintes sur un élément de sol.

Pour étudier l'état de contraintes en un point, on utilise généralement une représentation graphique du vecteur contrainte $\vec{f}$.

$\vec{f}$ dans un système d'axes (σ, τ) . Les points représentant les contraintes principales ($\tau = 0$) sont donc sur l'axe $O\sigma$. On démontre que lorsque le plan de la facette tourne autour d'une direction principale, l'extrémité du vecteur contrainte décrit dans le plan (σ, τ) un cercle, appelé cercle de **Mohr** (figure I.3).

On peut écrire σ_n et τ

$$\tau = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \sin 2\alpha$$

$$\text{et } \sigma_n = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \cos 2\alpha$$

Indépendamment de **Mohr**, **Coulomb** a mis au point un appareil pour mesurer la résistance au cisaillement des sols. Il a constaté que ce dernier est fonction de deux paramètres dépendant ou pas des contraintes, ce sont l'angle de frottement interne φ (comparable à la résistance au glissement des solides) et la cohésion intrinsèque C , d'où l'équation de **Mohr-Coulomb** :

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad 1.1$$

I.3. Influence des Conditions de consolidation et de drainage sur C et φ

La résistance au cisaillement d'un sol dépend de nombreux facteurs, tels que la nature et l'état du sol, mais aussi l'intensité des efforts exercés et la manière dont ces efforts sont appliqués,

conditions qui commandent la répartition des contraintes totales appliquées entre les phases liquide (pression interstitielle) et solide (contrainte effective) du sol, selon les relations connues:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma' + u \\ \tau = \tau' \end{cases}$$

On distingue deux grands types de comportement du sol :

- le comportement drainé ;
- le comportement non drainé.

Selon l'état de consolidation et de drainage, deux comportements extrêmes de sol sont envisagés, comportement à long terme et comportement à court terme, et on distingue trois essais :

✓ Essai de cisaillement consolidé drainé (CD)

L'essai consolidé drainé (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, l'orifice de drainage ouvert, jusqu'à ce que la pression interstitielle se soit annulée ($u = 0$).

Puis laissant la contrainte normale constante durant tout l'essai, on augmente très lentement la contrainte tangentielle σ_1 .

La courbe intrinsèque obtenue (figure I.4) à partir des résultats de plusieurs essais est toujours approximativement une droite dont les caractéristiques sont les suivantes,

φ' : Appelé angle de frottement effectif est l'angle que fait la droite intrinsèque avec l'axe des contraintes normales.

C' : Appelée cohésion drainée, est la valeur de l'ordonnée à l'origine de la droite intrinsèque.

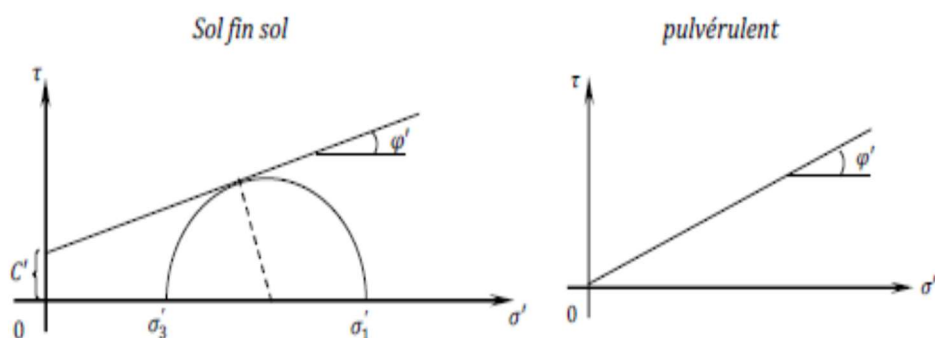


Fig. 1.4 Résultats d'essai de cisaillement consolidé drainé CD.

L'équation de Mohr Coulomb devient :

$$\tau = \sigma' \tan \varphi' + c' \quad 1.2$$

Orientation du plan de rupture : $\alpha = \pi/4 + \varphi'/2$

Le critère de rupture est :

En terme de contraintes sur le plan de rupture : $\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$

En termes de contraintes principales :

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 K_p + 2 c' \sqrt{K_p}$$

$$K_p = \tan^2 (\pi/4 + \varphi'/2)$$

✓ Essai de cisaillement non consolidé non drainé (UU)

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

L'échantillon de sol «intact», c'est-à-dire non remanié, est soumis à l'état de contrainte isotrope σ_0 , l'orifice de drainage est fermé.

Puis, toujours avec les orifices de drainage fermés, on augmente jusqu'à la rupture la contrainte tangentielle τ_1 . Les différents cercles de Mohr à la rupture, en contraintes totales, sont simplement translatés parallèlement à l'axe des contraintes normales, figure I.5.

L'enveloppe de ces cercles est une droite parallèle à l'axe des contraintes σ dont l'ordonnée à l'origine est appelée cohésion non drainée et notée c_u , l'équation devient :

$$\tau = c_u \quad 1.3$$

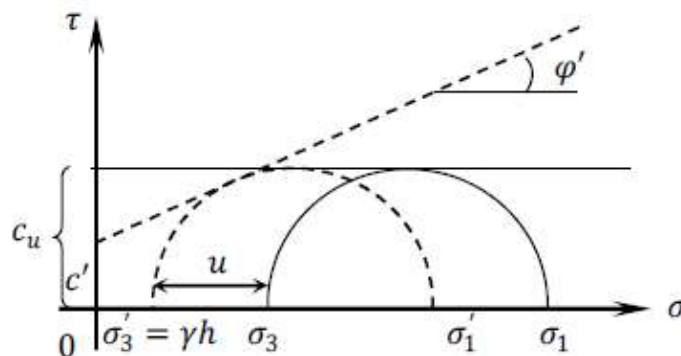


Fig. 1.5 Résultats d'essai de cisaillement non consolidé non drainé UU.

L'orientation du plan de rupture : $\alpha = \pi/4$

$$C_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

NB : Cet essai ne permet pas la détermination des paramètres effectifs même en mesurant la pression interstitielle.

Le critère de rupture est :

- En terme de contraintes appliquées sur le plan de rupture :

$$\tau = C_u \quad \sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

- En terme de contraintes principales : $C_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$

✓ Essai de cisaillement consolidé non drainé (CU)

Chaque éprouvette de sol est consolidée avant l'expérience, sous la même contrainte normale σ que celle qu'elle subira pendant l'essai. La contrainte de cisaillement est suffisamment rapide pour que le drainage n'ait pas le temps de s'effectuer, donc pour que la pression interstitielle u de l'eau ne puisse pas se dissiper en cours d'essai ($\Delta u \neq 0$).

L'essai consolidé non drainé CU, figure. I.6,

Dans le premier cas, l'essai peut être réalisé à l'appareil triaxial ou à la boîte de cisaillement.

Dans le deuxième cas, l'essai est obligatoirement réalisé à l'appareil triaxial.

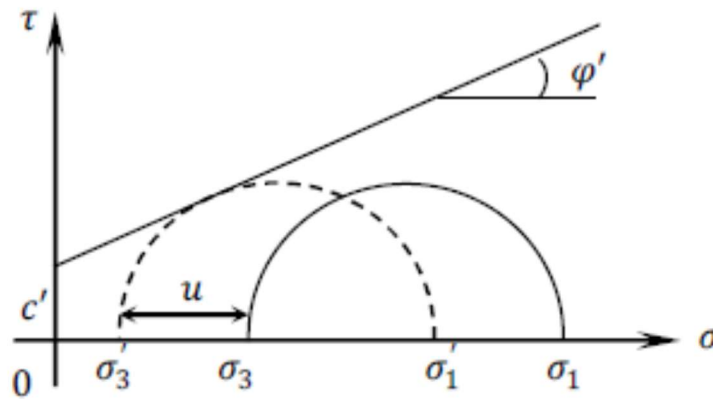


Fig. 1.6 Résultats d'essai de cisaillement consolidé non drainé CU.

La contrainte de cisaillement à la rupture est donnée par l'équation :

$$\tau = C_{cu} + \sigma \tan \varphi_{cu} = C_{cu} + (\sigma' + u) \tan \varphi_{cu} \quad 1.4$$

L'orientation du plan de rupture : $\alpha = \pi/4 + \varphi'/2$

Le critère de rupture est :

- En terme des contraintes effectives :

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 K_p + c' \sqrt{K_p} \quad K_p = \tan^2 (\pi/4 + \varphi'/2)$$

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

- En terme des contraintes totales :

$$\sigma_1 = \sigma_3 K_p + 2c_{cu} \sqrt{K_p} \quad K_p = \tan^2 (\pi/4 + \varphi_{cu}/2)$$

$$\tau = c_{cu} + \sigma_{cu} \tan \varphi_{cu}$$

1.4 Essai de cisaillement

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

- Les essais 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, essai de cisaillement rectiligne ou boîte de Casagrande, essai de compression triaxial.

1.4.1 Essai de cisaillement direct à la boîte de casagrande

L'échantillon est placé entre deux demi-boîtes, une supérieure qui peut coulisser horizontalement sur une inférieure, figure I.7.

Le sol est placé entre deux pierres poreuses qui permettent le drainage de celui-ci. On peut remplacer les pierres poreuses par des plaques pleines et le sol ne peut plus se drainer, du moins théoriquement. L'appareil comporte un dispositif de chargement qui permet d'appliquer une charge verticale N par l'intermédiaire d'un piston.

L'essai consiste à tirer horizontalement sur la demi-boîte supérieure de façon à cisailier le sol selon le plan π . On mesure l'effort horizontal T en fonction de Δl .

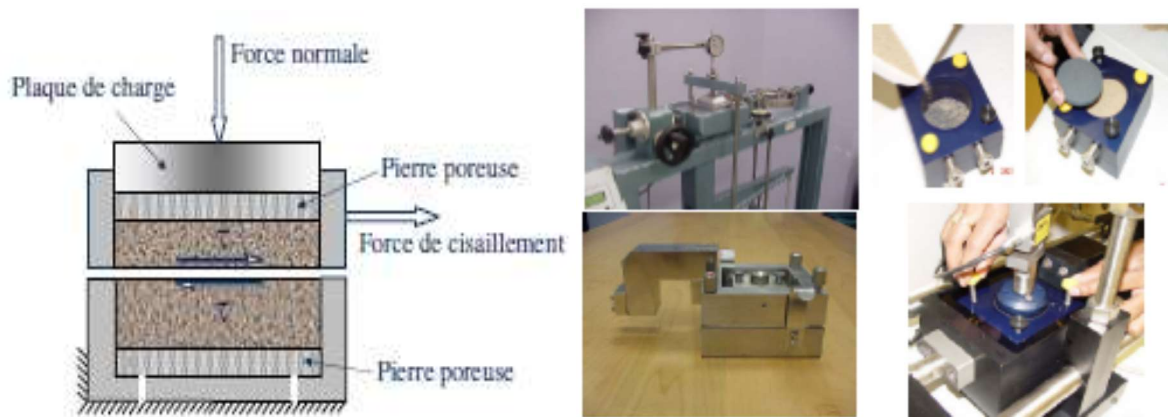


Fig 1.7 Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande.

L'essai se fait à vitesse contrôlée V Soit :

S : La section de l'échantillon selon le plan π ,

$\sigma = N/S$: La contrainte normale appliquée sur l'échantillon,

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

Si on répète l'essai sur plusieurs éprouvettes d'un même sol avec des contraintes normales différentes $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots$ etc. et on trace les courbes de variation des contraintes tangentielles en fonction des déformations horizontales, figure I.8.a.

Sur ce graphe, les trois séries de courbe (1, 2 et 3) sont fonction de la contrainte normale imposée ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). Ensuite, déterminer sur la courbe ($\tau ; \varepsilon_l = \Delta l / l$) le point qui correspond à la rupture, en fonction du critère choisi, soit le pic τ_{pic} , ou bien la résistance résiduelle $\tau_{rés}$. Ceci permet d'obtenir pour chaque couple de valeurs (τ, σ_n) un point dans le plan de Mohr. Pour déterminer une courbe intrinsèque, il est nécessaire de réaliser l'essai avec plusieurs valeurs de N , ce qui donne les points dans le plan de Mohr, figure I.8.b.

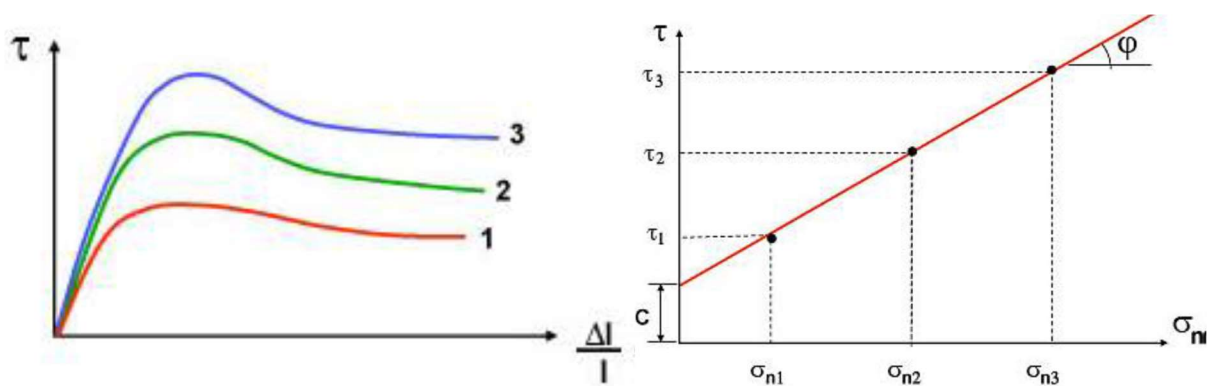


Fig. 1.8 Résultats d'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande, (a) $\tau = f(\Delta l / l)$, (b) Cisaillement direct dans le plan de Mohr.

1.4.2. Essais 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 1.9.

Des plaques drainantes reliées à l'extérieur à des dispositifs permettant soit d'assurer le drainage et de connaître les variations de volume, soit de mesurer la pression interstitielle dans l'éprouvette sont placées à la base et au sommet de l'éprouvette de sol. Les contraintes sont transmises à l'éprouvette de deux manières, d'une part une pression de confinement $\sigma_3 = \sigma_r$ existant dans la cellule triaxiale générée par un dispositif de mise en pression et d'autre part, on applique un effort axial F qui crée un déviateur de contrainte axial ($\sigma_1 - \sigma_3$) ; la contrainte σ_1 est généralement mesurée par un capteur situé au sommet de l'éprouvette. De plus, on mesure la variation de hauteur de l'éprouvette Δh qui donne la déformation axiale ($\Delta h/h = \varepsilon_l$).

Enfin, on peut imposer au sein de l'éprouvette une contrepression (CP) qui a pour but de réaliser une bonne saturation de celle-ci. La mesure de σ_3 , l'application éventuelle de CP, la connaissance de $(\sigma_1 - \sigma_3)$ et la mesure de la pression interstitielle u permettent de déterminer à chaque instant l'état de contraintes totales et l'état de contraintes effectives existant dans l'éprouvette.

Le principe de l'essai consiste en général à appliquer tout d'abord un état de contrainte isotrope avec $(\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_r)$, pondéré éventuellement de la contrepression C_p . A ce stade, deux possibilités sont envisageables :

- Soit on permet le drainage de l'éprouvette et sa consolidation, ce qui entraîne une modification dans l'état de l'éprouvette se traduisant par une variation de l'indice des vides,
- Soit on interdit ce drainage et on mesure la pression interstitielle se développant dans l'éprouvette, dans ce cas, l'état de l'éprouvette ne se modifie pas si l'on suppose qu'elle est initialement saturée.

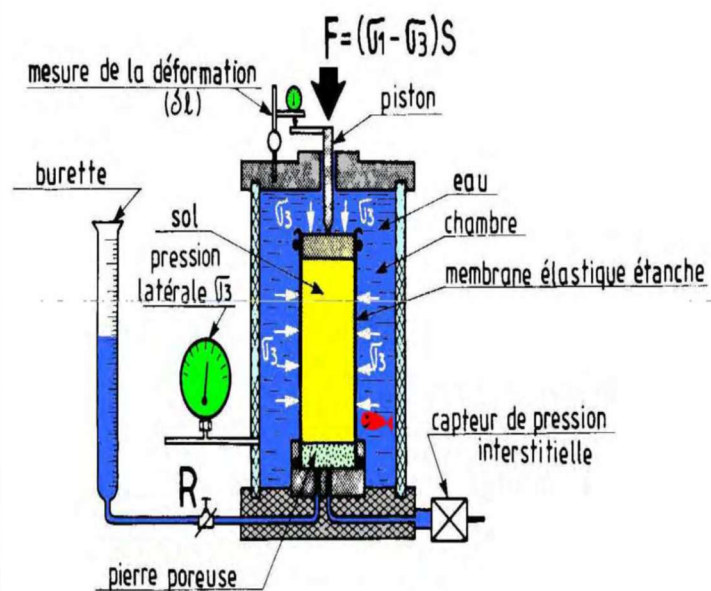


Fig. I. 9 Principe d'essai triaxial (la cellule triaxial).

Dans un second temps on va appliquer l'effort axial pour atteindre la rupture, les deux possibilités de conditions de drainage existent toujours.

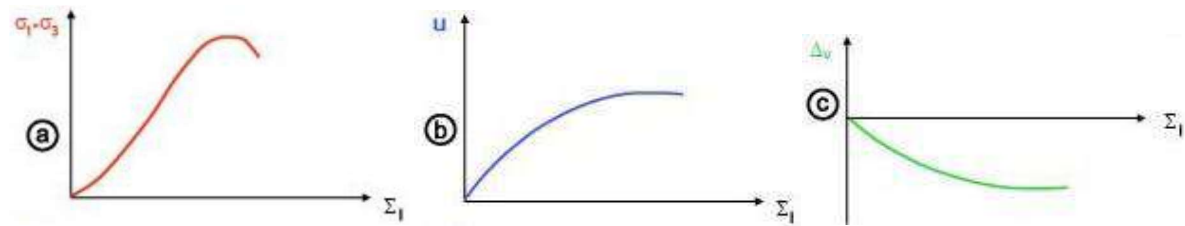


Fig. 1.10 Courbes d'un essai triaxial (a) $(\sigma_1 - \sigma_3) = f(\epsilon_1)$; $u = f(\epsilon_1)$ et la variation de volume $\Delta v = f(\epsilon_1)$.

La figure 1.10 montre les courbes expérimentales de principe. On définit en fonction de ces courbes, l'état de contraintes à la rupture, ce qui donne un cercle dans le plan de Mohr. La réalisation de plusieurs essais à différents σ_r permet de tracer la courbe enveloppe et de déterminer C et ϕ . On peut tracer ces courbes enveloppes soit en contraintes totales, soit en contraintes effectives.

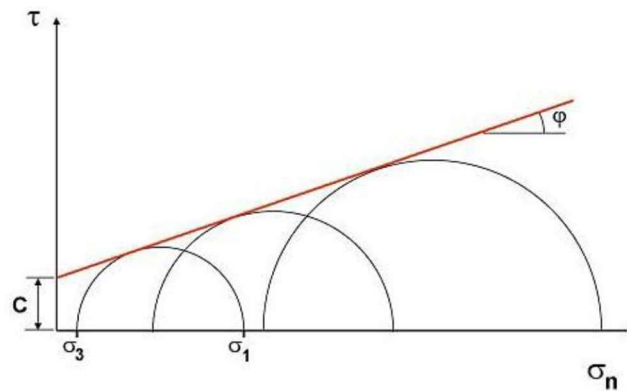


Fig. I. 11 Cercles de Mohr pour un essai triaxial.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les contraintes qui agissent sur un plan de cisaillement et expliqué les relations qui existent entre elles. On a étudié 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 (ϕ). Par la suite, on a présenté 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.