

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

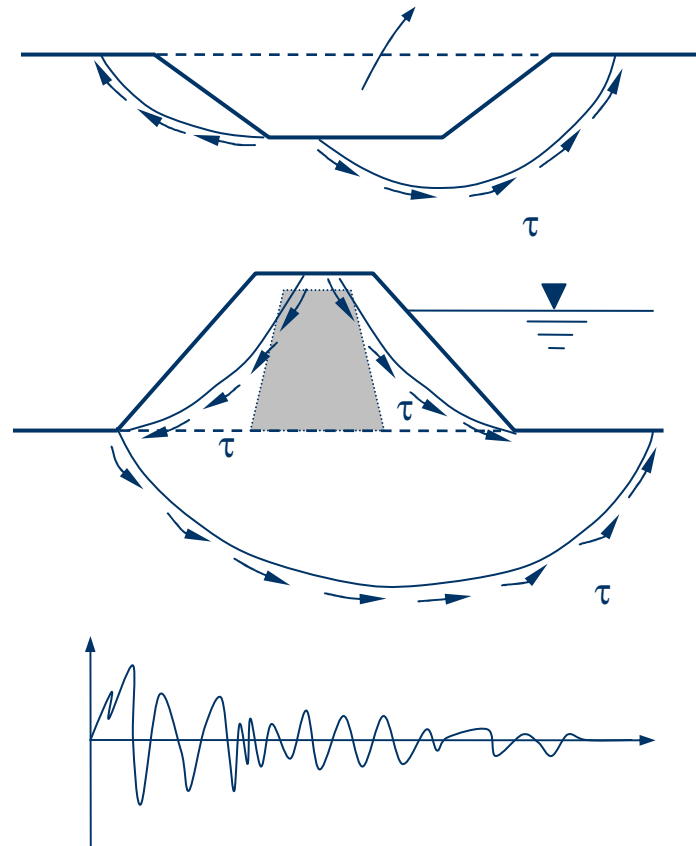
Description

1. Paramètres d'influence
2. Essai de cisaillement direct
3. Essais triaxiaux
4. Conditions de drainage
5. Essai de cisaillement simple

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Introduction

- Sols déposés en nature → On ne connaît pas la résistance.
- Le problème dans les sols consiste à établir cette résistance.
- L'échantillon, les conditions de l'essai et le type de l'essai doivent représenter le plus possible les conditions du problème qu'on veut étudier.
- Essai = simulation → type de sollicitation ou type de chargement (rapide, lent, etc.) .



ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Paramètres d'influence

- Les sols sont créés et déposés par la nature (des fois par l'homme). À l'encontre des autres matériaux comme l'acier et le béton, la résistance n'est pas une spécification garantie par le manufacturier.
- Le problème dans les sols consiste à établir cette résistance. Le matériau est disponible dans un certain état
→ Quel est sa résistance mobilisable dans cette situation.
- Le principal problème en stabilité des pentes : quel est la résistance du sol pour les conditions données (fin de construction, à long terme, vidange rapide, sollicitation dynamique, etc.).
- De quoi va dépendre la résistance d'un sol ? On est habitué de voir une expression très simple :

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

- Est-ce que la résistance dépend uniquement de c' et de $\phi' = \text{cte}$.
- En réalité le problème est beaucoup plus complexe si on regarde l'ouvrage d'une façon générale et universelle.

$$\text{Résistance au cisaillement} = F(c', \phi', C, e, \sigma', H, T, S_r, \varepsilon, \varepsilon, S, \alpha)$$

Condition de drainage
et saturation

anisotropie

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Paramètres d'influence

- La résistance au cisaillement dépend de c' et de ϕ' qui sont fonction de plusieurs paramètres :
 - ✓ C : composition du sol (même particules, deux arrangements).
 - ✓ e : indice des vides
 - ✓ σ' : contrainte effective \rightarrow μ condition de drainage.
 - ✓ H : histoire des contraintes
 - ✓ T : température.
 - ✓ ε : déformation
 - ✓ $\dot{\varepsilon}$: taux de déformation
 - ✓ S : structure du sol.
 - ✓ α : direction des contraintes principales pour matériaux anisotrope.
- Plusieurs de ces paramètres sont indépendants et dont c' et ϕ' est F().

Cependant, il est très important de réaliser qu'il y a autant de variables dans la résistance au cisaillement. Lorsqu'on détermine la résistance au cisaillement $S = c' + \sigma' \tan \phi'$, il faut réaliser que l'on a affaire à un cas particulier, et qu'il peut exister d'autres c' et ϕ' pour le même sol.

Il n'existe donc pas un c' et ϕ' universels pour un sol. Mais c'est toujours un c' et ϕ' qui correspondent à certaines conditions.

ϕ' exprime l'augmentation de la résistance avec σ' dans des conditions données.

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Paramètres d'influence

- La fonction (F) quantitative qui permet d'intervenir les facteurs présentés n'est pas connue. En conséquence, les valeurs de c' et ϕ' sont déterminées pour des conditions spécifiques et en fonction du type de sollicitation:
 - ✓ compression triaxiale
 - ✓ Extension triaxiale
 - ✓ Cisaillement simple
 - ✓ Etc.
 - Programme d'essai :
 - ✓ Condition de drainage
 - ✓ Taux de cisaillement
 - ✓ Plage de pression : par rapport à l'histoire des contraintes
 - ✓ Histoire des contraintes ou compaction
 - ✓ Condition de déformation
- On aura donc plusieurs types de ϕ' et de c' pour un même sol :
- ✓ Contrainte totale
 - ✓ Contrainte effective
 - ✓ Condition drainée
 - ✓ Condition non drainé
 - ✓ Résistance de pic (max.)
 - ✓ Résistance résiduelle
 - ✓ Condition de consolidation ou de compaction

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

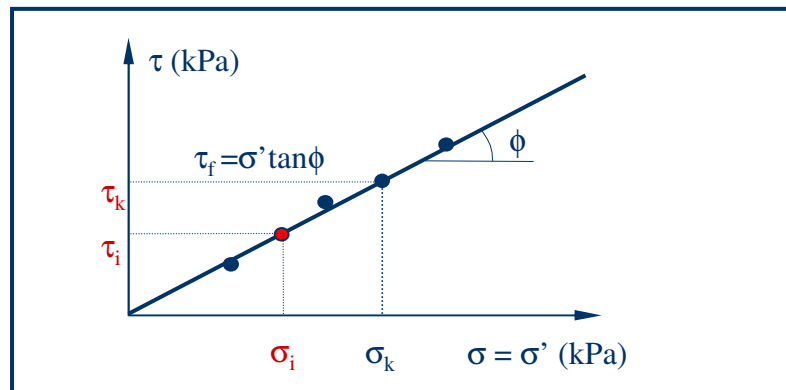
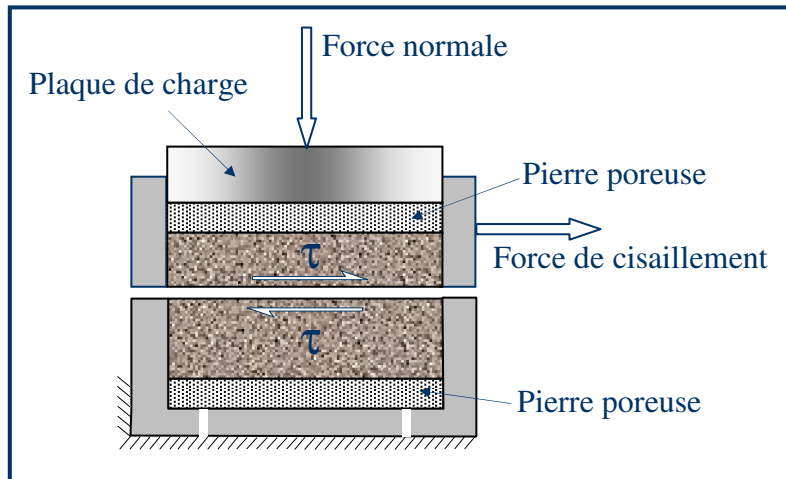
Paramètres d'influence

- La combinaison de c' et ϕ' applicable à un problème pratique va donc dépendre des conditions du problème à résoudre :
 - ✓ Chargement
 - ✓ Déchargement
 - ✓ Stabilité à court terme
 - ✓ Et/ou stabilité à long terme
 - ✓ Stabilité statique
 - ✓ Stabilité dynamique
 - ✓ O.C. ou N.C par rapport à l'histoire des contraintes

- Allons voir l'évaluation de la résistance pour différentes conditions.
- Allons examiner les différents types d'essais comme exemple de sollicitation.

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILEMENT DES SOLS

Essai de cisaillement direct

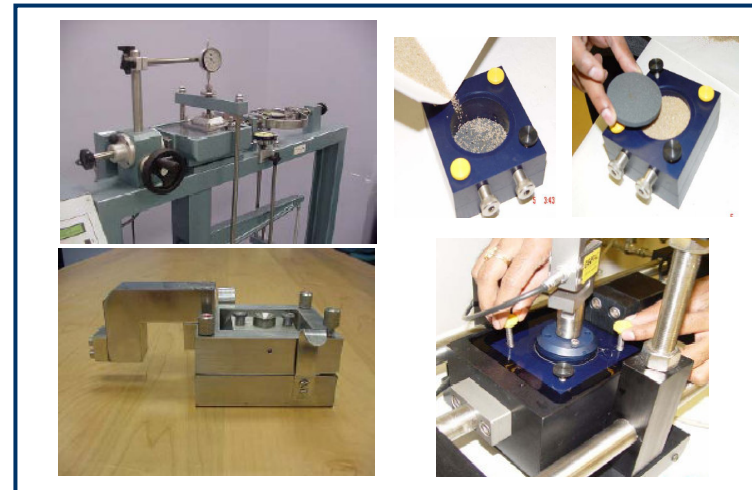


Avantage :

- Essai rapide simple et peu coûteux

Inconvénients :

- Contrôle du drainage (difficile pour les sols fins);
- L'essai n'est utile que dans des cas complètement drainés;
- On force la rupture sur un plan qui n'est pas nécessairement le plus critique;
- On crée une concentration de contraintes sur les bords.

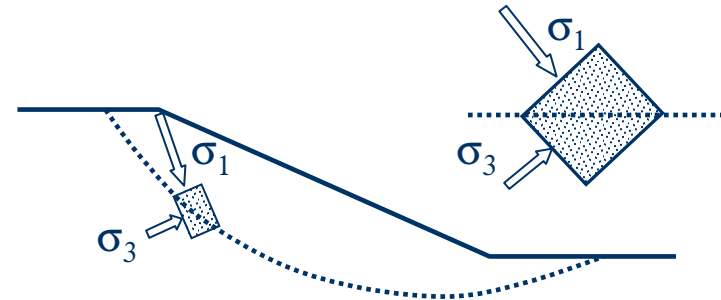


ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILEMENT DES SOLS

Essai de cisaillement direct

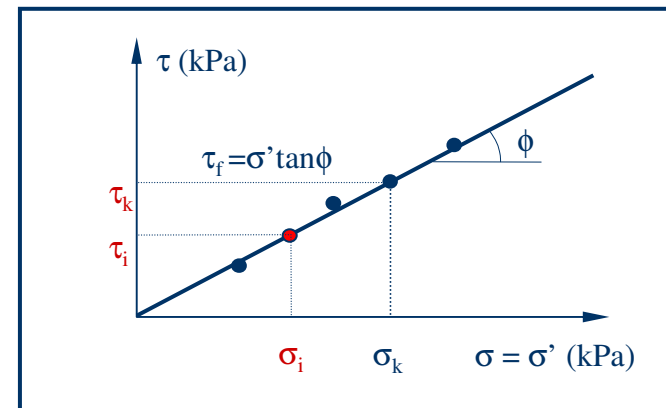
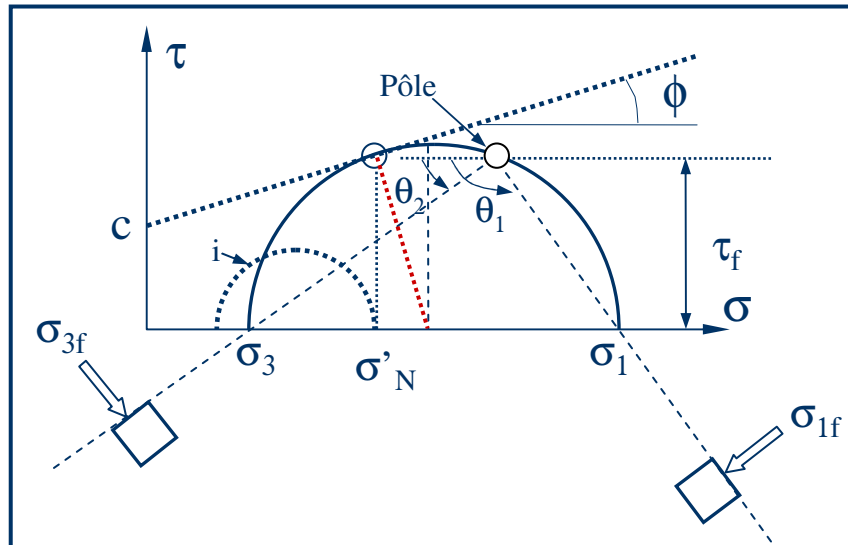
Dans la boîte de cisaillement, σ et τ ne sont connues que sur un seul plan. Il n'est donc pas possible en général de tracer un cercle de Mohr (on ne connaît pas σ_1 et σ_3 à cause de la rotation des contraintes).

Toutefois, à la rupture, il est possible de tracer le cercle de Mohr. La perpendiculaire à l'enveloppe passant par τ, σ_N donne le centre du cercle - $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$.



Critère de rupture Mohr-Coulomb

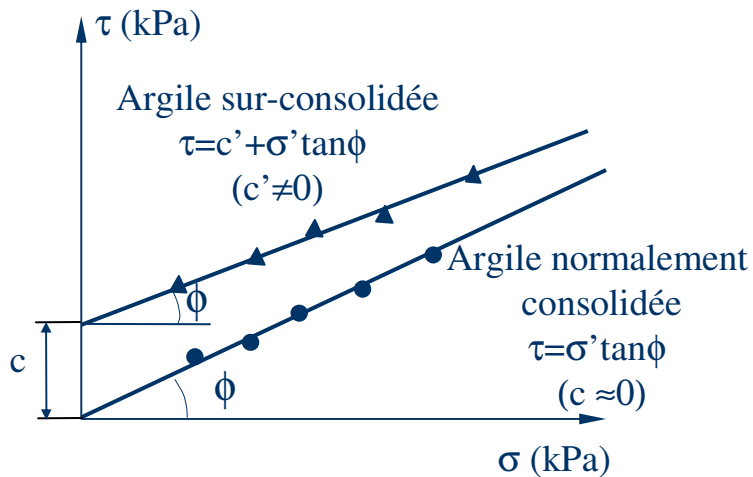
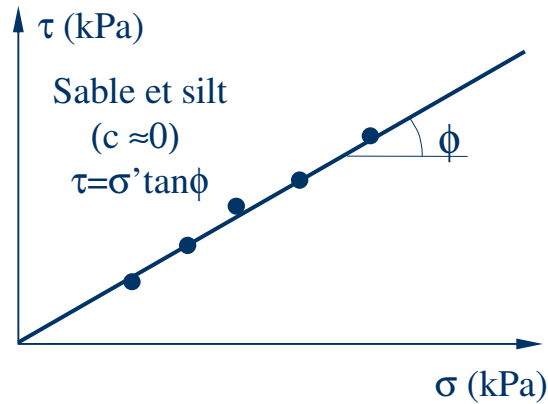
$$\tau_f = c' + \sigma'_N \tan \phi$$



ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Essai de cisaillement direct

Enveloppes typiques de rupture



valeurs typiques de ϕ

Type de sol	ϕ (deg)
Sable : grains arrondis	
Lâche	27-30
Moyennement dense	30-35
dense	35-38
Sable : grains angulaires	
Lâche	30-35
Moyennement dense	35-40
dense	40-45
Gravier avec du sable	34-48
Silt	26-35

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILEMENT DES SOLS

Essais triaxiaux

Essai triaxial en compression

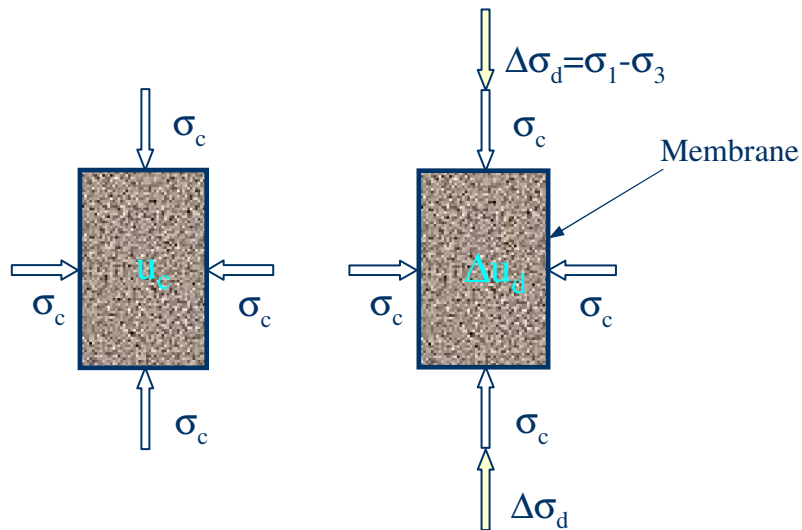
L'essai triaxial en compression permet de contrôler les contraintes principales.

Principe :

Un échantillon cylindrique est soumis à une pression hydrostatique de confinement σ_c (contrainte dans la cellule*). Une contrainte déviatorique est appliquée verticalement par un piston*.

* *Les deux moyens d'appliquer une contrainte totale.*

Puisque aucune contrainte extérieure de cisaillement n'est appliquée, les contraintes horizontale et verticale sont des contraintes principales.



ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILEMENT DES SOLS

Essais triaxiaux

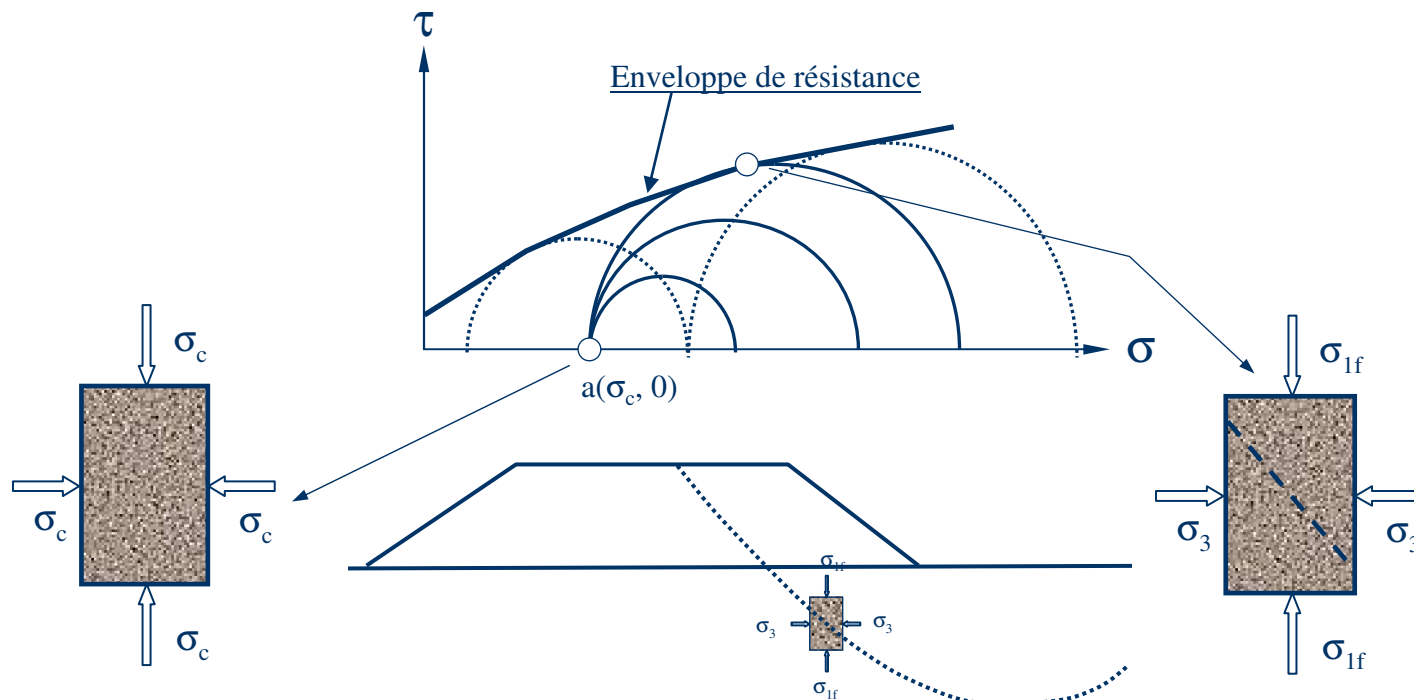
Essai triaxial en compression

Le déviateur est appliqué de façon à provoquer une déformation en compression axiale

Au début de l'essai, les contraintes dans l'échantillon sont représentées par un point.

$a(\sigma_c, 0)$, aucun cisaillement $\tau=0 \rightarrow$ condition isotropique.

Ensuite avec l'application de la contrainte $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$, les contraintes sont représentées par un cercle $C(\sigma_c, \tau_c) \rightarrow$ rayon $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \rightarrow$ condition anisotropique - $k_0 = \sigma_3/\sigma_1$ - L'enveloppe de résistance peut être tracée à partir de plusieurs cercles de rupture



Exemple dans le livre H&K 10.8

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILEMENT DES SOLS

Essais triaxiaux

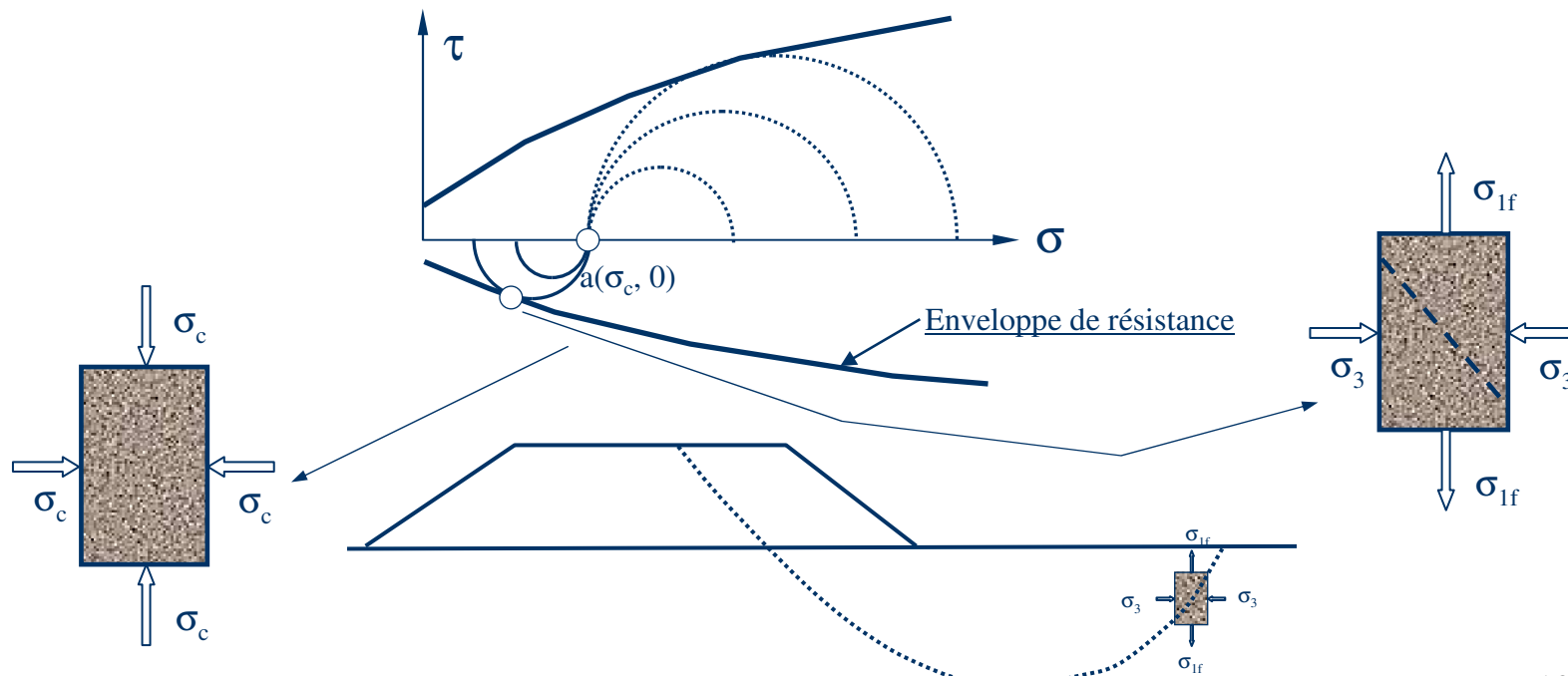
Essai triaxial en extension

Le déviateur est appliqué de façon à provoquer une déformation en extension axiale.

Au début de l'essai, les contraintes dans l'échantillon sont représentées par un point.

$a(\sigma_c, 0)$, aucun cisaillement $\tau=0 \rightarrow$ condition isotropique.

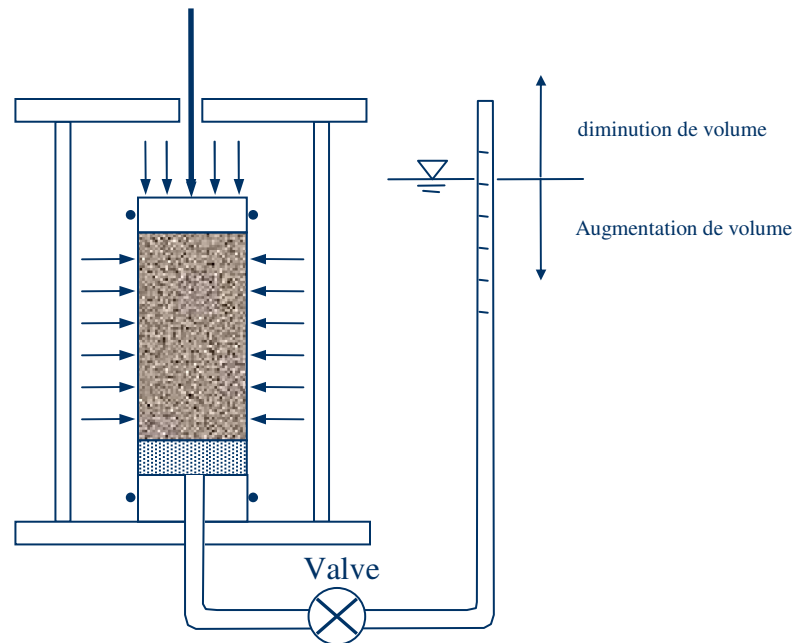
Ensuite avec l'application de la contrainte $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ – deux possibilités ?, les contraintes sont représentées par un cercle $C(\sigma_c, \tau_c) \rightarrow$ rayon $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \rightarrow$ condition anisotrope - $k_0 = \sigma_3/\sigma_1$ - L'enveloppe de résistance peut être tracée à partir de plusieurs cercles de rupture.



ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Condition de drainage

Dans les essais courants de boîte de cisaillement, le drainage n'est pas contrôlé (drainé). On va parler de conditions de drainages dans le triaxiale seulement.



Il est difficile sinon impossible de reproduire exactement en laboratoire les conditions de drainage qui prévalent sur le chantier pour un problème donné.

On a établi trois conditions limites bien définies comme essais standards pour les essais de routine en laboratoire.

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Condition de drainage

ESSAIS DE CISAILLEMENT - TRIAXIALE

- Essai consolidé-drainé ou drainé (CD)
- Essai consolidé-non drainé (CU)
- Essai non-consolidé – non drainé (UU)



ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILEMENT DES SOLS

Condition de drainage

Deux phases pour le drainage

Consolidation de l'échantillon :

Phase à laquelle l'échantillon est soumis à une pression de confinement, la valve de drainage étant ouverte.

- isotropique – pression cellulaire seulement
- Anisotropique – consolidation jusqu'à σ'_{v0}

Notion : Essai consolidé
Essai non-consolidé.

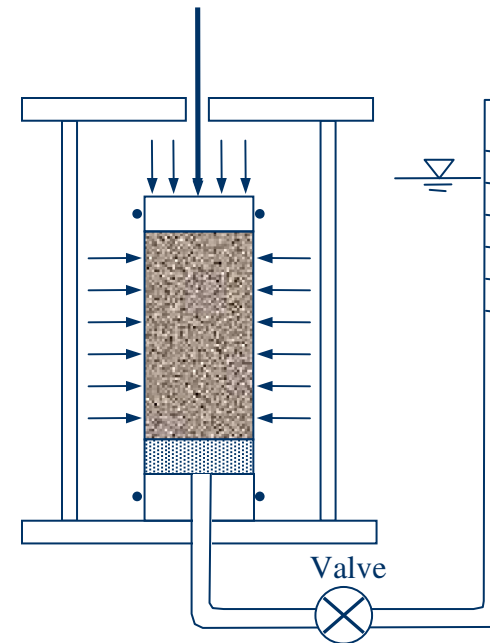
Cisaillement de l'échantillon.

Phase à laquelle j'applique ou j'augmente un déviateur à l'échantillon → induit un cisaillement pour amener jusqu'à la rupture

Notion : Cisaillement drainé
Cisaillement non-drainé

N.B. : consolidation anisotropique – Les conditions de drainage peuvent varier dans les deux phases.

Notion : essai triaxial consolidé « drainé » réfère au cisaillement



ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Condition de drainage

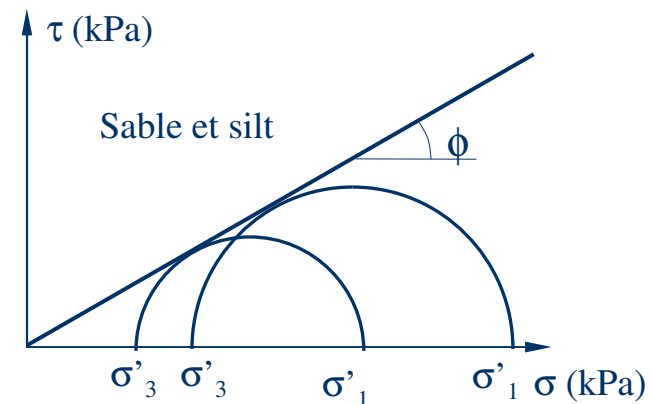
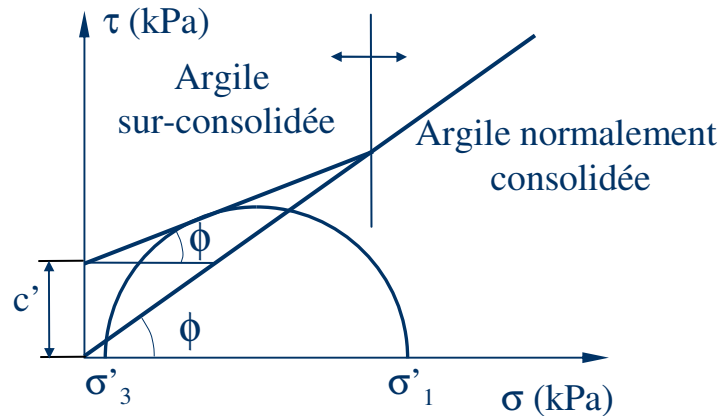
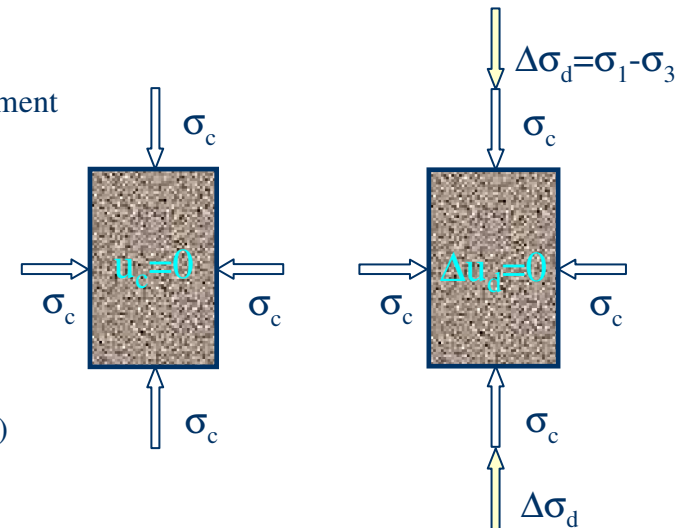
ESSAI CONSOLIDÉ-DRAINÉ

Valve de drainage ouverte pendant la consolidation et pendant le cisaillement

- σ_3 pression de confinement
- $\Delta\sigma_d$ déviateur de pression
- $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d =$ contrainte principale
- L'essai étant drainé \rightarrow la pression de l'eau est dissipée $\Delta u = 0$

SYMBOLE POUR ESSAI TRIAXIAL DRAINÉ :

- CD ou CID – CAD (consolidé (C) isotropique (I) ou anisotropique (A) drainé).



Essai se fait très lentement pour qu'il n'y ait pas de pression interstitielle dans l'échantillon $u=0$ pendant le cisaillement
 \rightarrow Contrainte appliquée $\sigma' \rightarrow$ changement de volume ΔV . ΔV mesure le réarrangement de la structure des grains.

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Condition de drainage

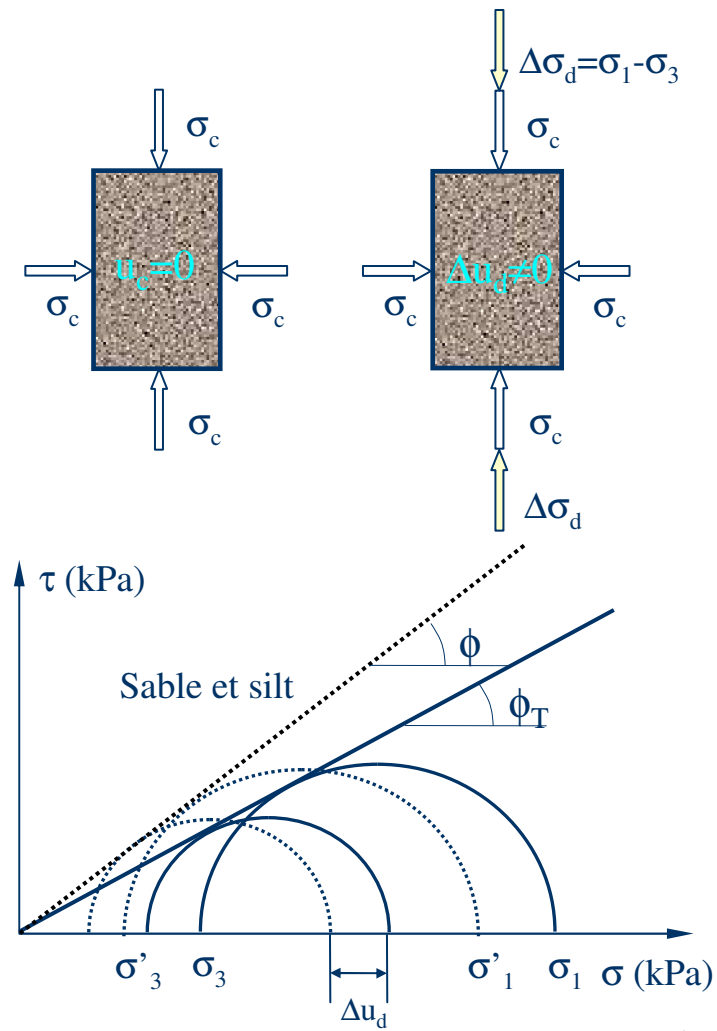
ESSAI CONSOLIDÉ- NON DRAINÉ

- Valve de drainage ouverte pendant la consolidation. La valve de drainage est ensuite fermée et la contrainte déviatorique est appliquée sans permettre le drainage. i.e. sans permettre un changement de teneur en eau (si $S_r=100\%$)
- σ_3 pression de confinement
- $\Delta\sigma_d$ déviateur de pression
- $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d =$ contrainte principale
- L'essai étant non drainé \rightarrow la pression de l'eau n'est pas dissipée $\Delta u \neq 0$

SYMBOLE POUR ESSAI TRIAXIAL CONSOLIDÉ NON DRAINÉ

⋮

- CU ou CIU – CAU (consolidé (C) isotropique (I) ou anisotropique (A) non drainé).
- Note : La pression interstitielle induite pendant l'application du déviateur peut être mesurée. Au début de l'essai $\sigma_3 = \sigma_c$. Cependant un m est induit pendant le cisaillement et $\sigma'_3 = \sigma_c$
- Introduction de la notion de volume constant si $S_r = 100\%$
- $S_r = 100\%$, $\Delta V = ? \rightarrow \Delta\mu$; $\Delta w = cte$, $\Delta V = cte$.

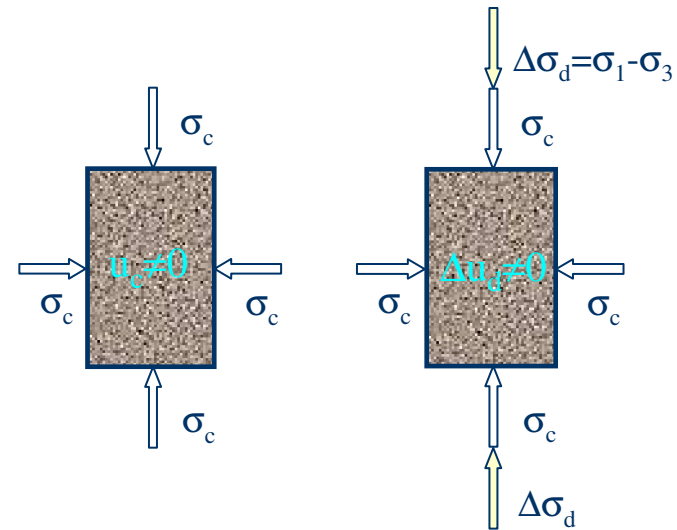


ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Condition de drainage

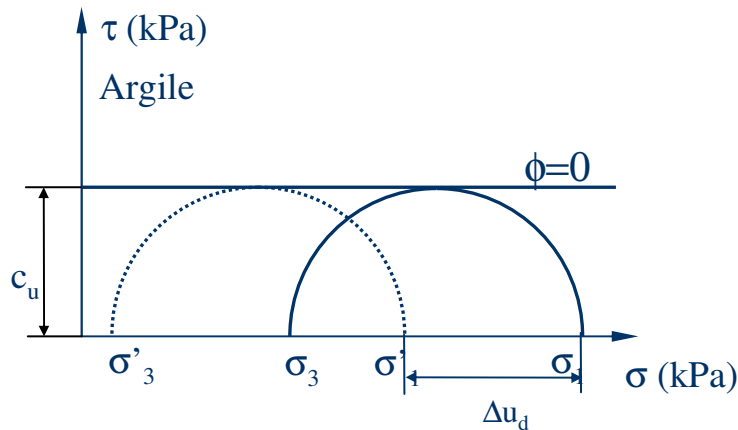
ESSAI CONSOLIDÉ- NON DRAINÉ

- Valve de drainage toujours fermée. échantillon est soumis a une pression hydrostatique de confinement sans drainage et le déviateur est appliqué sans drainage (sans permettre aucun changement de teneur en eau - $S_r=100\%$)
- σ_3 pression de confinement
- $\Delta\sigma_d$ déviateur de pression
- $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d =$ contrainte principale
- L'essai étant non drainé \rightarrow la pression de l'eau n'est pas dissipée pendant la consolidation et le cisaillement
 $u_c \neq 0 \quad \Delta u \neq 0$



SYMBOLE POUR ESSAI TRIAXIAL CONSOLIDÉ NON DRAINÉ :

- UU (non consolidé (U) non drainé (U)). Compression simple U - $\sigma_c = 0$



Consistance	$q_u = 2c_u$ (kPa)
Très molle	0-25
Molle	25-50
Moyenne	50-100
Raide	100-200
Très raide	200-400
dure	>400

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILEMENT DES SOLS

Essai de cisaillement simple (DSS)

- Comparable à l'essai de cisaillement directe. Le cisaillement est appliqué en haut et en bas de l'échantillon.
- Cet essai permet d'éviter le problème de concentration des contraintes rencontré dans l'essai de cisaillement direct.
- Permet d'effectuer des essais drainés et non drainés.
- Permet aussi d'effectuer des chargements dynamiques ou statiques.
- Comme dans l'essai de cisaillement direct, il y'a rotation des contraintes.
- En pratique, on interprète $\tau_h = \tau_{ff}$.

