

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

# INTRODUCTION

## PRÉSENTATION:

Professeur : Mourad Karray, ing, Ph.D

Local : C2-2047

Tél : 821-8000 (62120)

Courriel : [mourad.karray@usherbrooke.ca](mailto:mourad.karray@usherbrooke.ca)

Fonctions : Professeur, ingénieur

Expérience : Géotechnique

Reconnaissance des sols par des méthodes non-intrusives

Dynamique des sols, interaction sol-structure

Stabilité des pentes (statique et dynamique)

# INTRODUCTION

## CONTENU DU COURS :

- Planification des travaux d'exploration et choix des essais pour la détermination des caractéristiques des sols et du rocher.
- Évaluation de la capacité portante du sol pour les fondations superficielles et profondes.
- Calcul des fondations et des ancrages dans le rocher.
- Conception géotechnique des ouvrages de soutènement.
- Analyse de la stabilité des pentes.

## DOCUMENTATIONS :

- Notes de cours GCI-315 sur le site web de la faculté
- Manuel Canadien d'ingénierie des fondations, nouvelle édition (anglais seulement)
- CNB & son supplément
- Introduction à la géotechnique (Holtz et Kovacs)

# INTRODUCTION

## DESCRIPTION

- Cours de conception avec peu de notions fondamentales
- Fait appel à :
  - ✓ Notion de mécanique des sols I
  - ✓ Statique et résistance des matériaux (R.D.M)
  - ✓ Codes de construction (*intégrateur*)

## OBJECTIFS

- Acquérir les connaissances essentielles pour la conception d'ouvrages en mécanique des sols et l'étude de la stabilité des pentes
- Maîtriser les méthodes reconnues pour le calcul des fondations superficielles, profondes et des murs de soutènement .

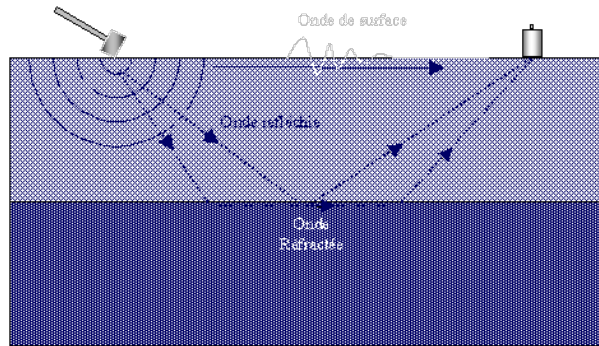
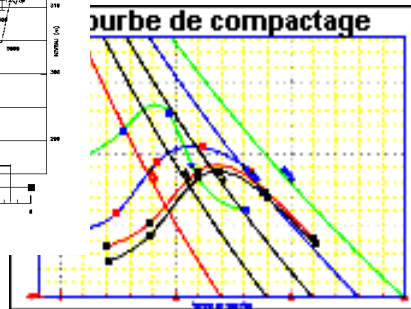
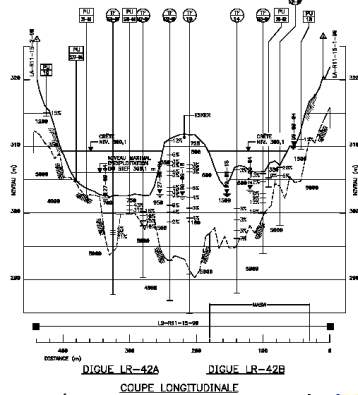
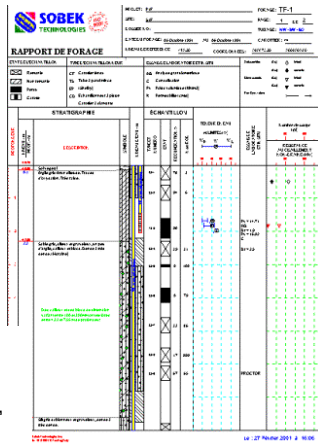
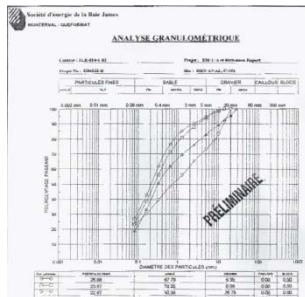
## DIFFICULTÉS

- ❖ Sols mis en place par des agents naturels (souvent non homogène)
- ❖ Limité par le nombre de sondages
- ❖ Fondations + excavations → principale source de réclamation dans la pratique

# INTRODUCTION

## MÉTHODES DE RECONNAISSANCE

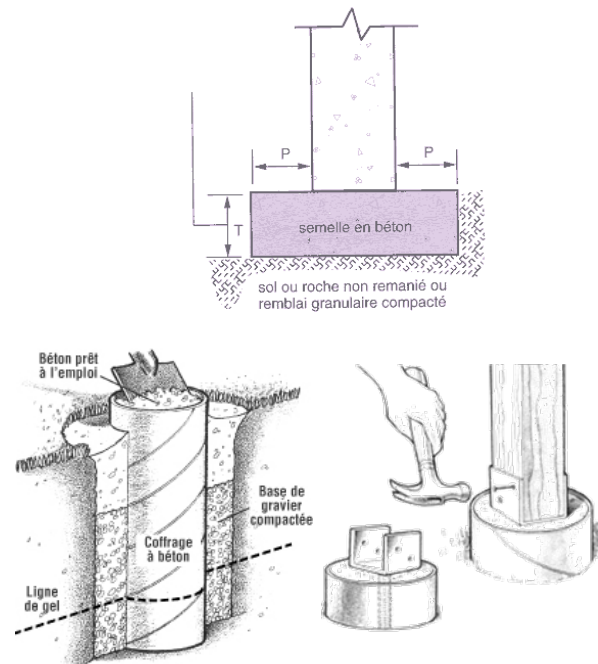
- ✓ Méthodes pour les sols pulvérulents
- ✓ Méthodes pour les sols cohérents
- ✓ Méthodes pour le roc
- ✓ Nouvelles technologies



# INTRODUCTION

## FONDATIONS SUPERFICILLES

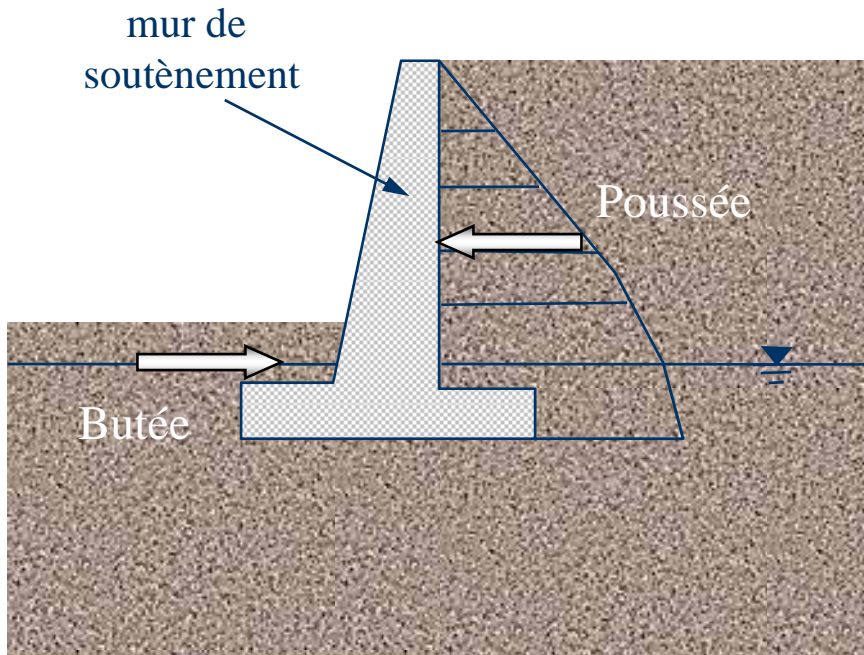
- ✓ Différents types de semelles (rectangulaire, filante, trapézoïdale et autres)
- ✓ Calcul de la capacité portante (rupture et mécanisme de rupture)
- ✓ Calcul de la capacité admissible (calcul des tassements, ce qui est accepté)
- ✓ Fondation sur roc (calcul de la capacité portante, etc.)
- ✓ Les précautions à prendre (drainage, fondation avoisinante, le gel et autres)



# INTRODUCTION

## MURS DE SOUTÈNEMENT

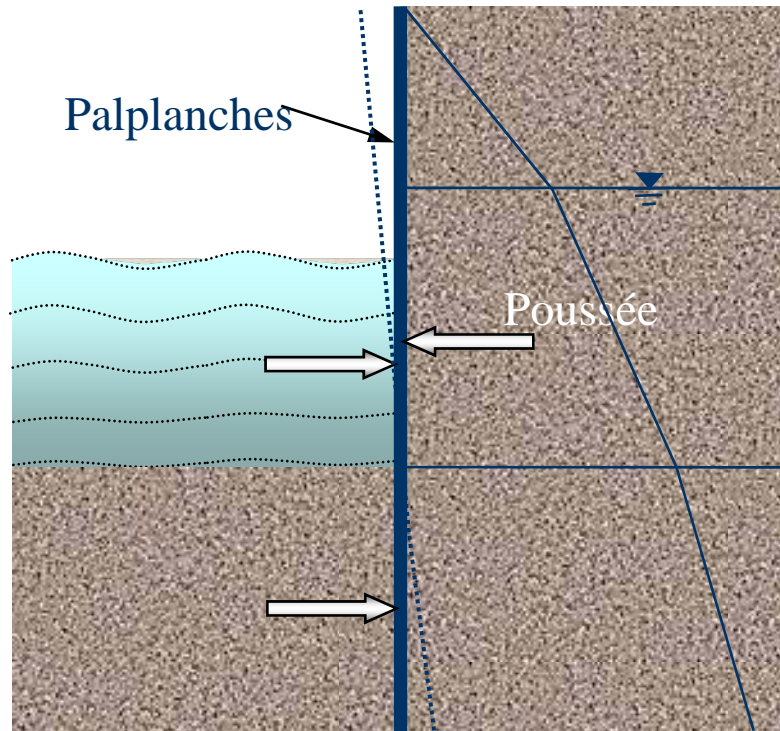
- ✓ Calcul de la pression des terres (granulaire et cohérent);
- ✓ Conception des murs de soutènement;
- ✓ Types de murs de soutènement
- ✓ Calcul des murs de soutènement avec tirants;
- ✓ Calcul des ancrages;
- ✓ Précautions à prendre.



# INTRODUCTION

## PALPLANCHES

- ✓ Utilité des palplanches;
- ✓ Types de palplanches;
- ✓ Pression des terres (rigide, flexible);
- ✓ Calcul des rideaux de palplanches.





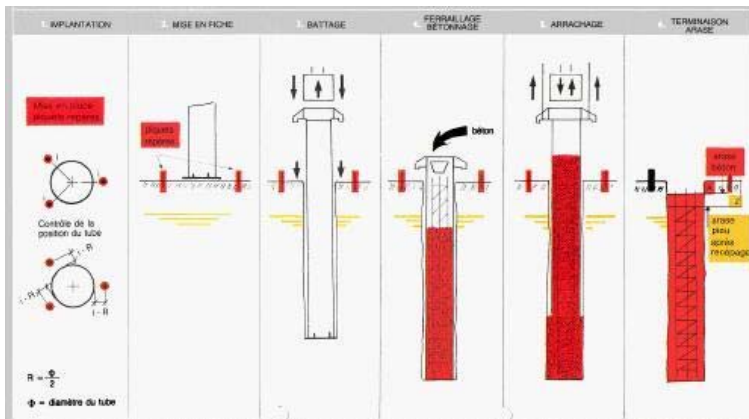
# INTRODUCTION

## FONDATIONS PROFONDES

- ✓ Capacité des pieux dans les sols granulaires (1 pieu et un groupe de pieux);
- ✓ Tassement des pieux dans le sols granulaires;
- ✓ Capacité des pieux dans les sols cohérents (1 pieu et un groupe de pieux);
- ✓ Tassement des pieux dans le sols cohérents;
- ✓ Friction négative des argiles;
- ✓ Formules de battage, les essais de chargements et les précautions à prendre



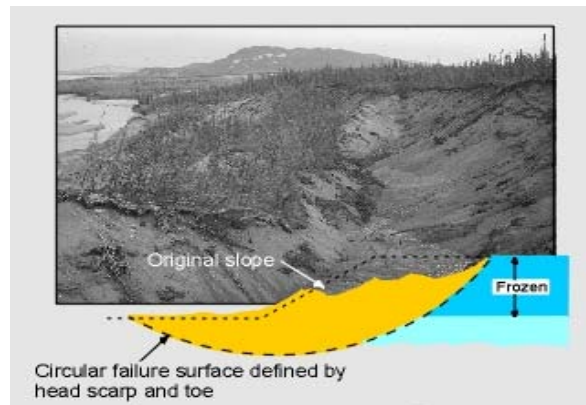
**Les pieux de fondation pour chauffer les bâtiments**



# INTRODUCTION

## STABILITÉ DES PENTES

- ✓ Causes d'instabilité des pentes;
- ✓ Stabilité dans les sols pulvérulents;
- ✓ Stabilité dans les sols cohérents;
- ✓ Diverses méthodes d'analyse;
- ✓ Stabilité des excavations verticales dans l'argile;
- ✓ Aspect dynamique dans la stabilité des pentes



# TEST SUR LES NOTIONS PRÉALABLES

1- Nommez les deux limites de consistance (d'Atteberg) que l'on utilise le plus pour caractériser un sol argileux.

Limite de liquidité  $W_L - L.L.$

Limite plastique  $W_p - L.P.$

Indice de plasticité =  $W_L - W_p$

2- Est-il possible d'obtenir un degré de compactage supérieur à 100% du Proctor modifié?

Oui

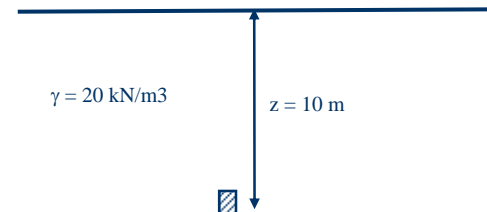
3- À partir du schéma ci-dessous, calculer la contrainte totale  $\sigma$ , la pression de l'eau  $u$  et la contrainte effective  $\sigma'$  au point A.

$$\sigma = 20 \text{ (kN/m}^3\text{)} \times 10 \text{ (m)} = 200 \text{ kPa}$$

$$u = 10 \text{ (kN/m}^3\text{)} \times 10 \text{ (m)} = 100 \text{ kPa}$$

$$\sigma' = \sigma - u = 200 - 100 = 100 \text{ kPa ou}$$

$$\sigma' = \gamma' \times z = (20 - 10) \text{ (kN/m}^3\text{)} \times 10 \text{ (m)} = 100 \text{ kPa}$$



4- Qu'est-ce qu'on entend par une argile sur-consolidée?

Un dépôt d'argile qui a connu dans son histoire un niveau de chargement supérieur à celui qui prévaut aujourd'hui ( $\sigma'_{vo} < \sigma'_p$ )

5- Quel essai préconiseriez-vous si vous aviez à mesurer la résistance d'un dépôt d'argile sur lequel on désire construire un remblai?

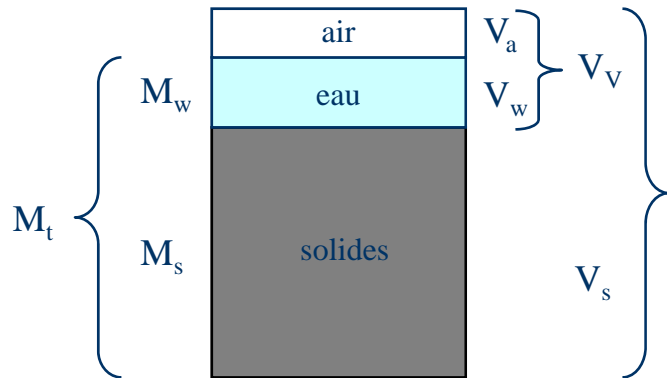
Essai non drainé – Cu

Au scissomètre sur le chantier

Non consolidé non drainé au laboratoire

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RELATIONS PHYSIQUES DE BASE



### Définitions :

$w\%$ : teneur en eau	$= M_w/M_s \times 100$
$\rho_d$ : Masse volumique sèche	$= M_s/V_t$
$\rho_h$ : Masse volumique humide	$= M_t/V_t$
$S_r\%$ : degré de saturation	$= V_w/V_v \times 100$
$e$ : indice des vides	$= V_v/V_s$
$\rho_s$ : masse volumique des solides	$= M_s/V_s$
$D_r$ ou $G_s$ : Densité relative des solides	$= M_s/(V_s \cdot \rho_w)$

### Relations :

$$\rho_h = \rho_d (1+w)$$

$$S_r = w/(\rho_w/\rho_d - 1/D_r)$$

$$w_{sr} = \rho_w/\rho_d - 1/D_r \text{ (teneur en eau de saturation)}$$

$$e = w_{sr} D_r = \rho_s/\rho_d - 1$$

$$e S_r = w D_r$$

En utilisant la définition de chacun des termes et en utilisant un diagramme de phase, démontrez les relations suivantes :

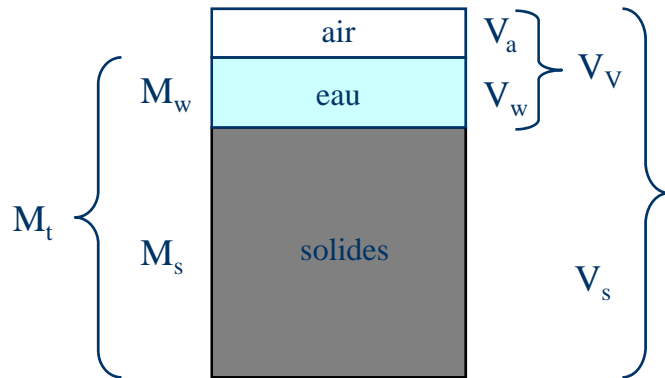
$$\rho_h = \rho_d (1 + w)$$

$$w_{sr} = \frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{D_r}$$

$$S_r = \frac{w}{w_{sr}}$$

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RELATIONS PHYSIQUES DE BASE



$$\rho_h = \rho_d(1 + w)$$

$$\rho_h = \frac{M_t}{V_t} = \frac{M_s + M_w}{V_t} = \frac{M_s}{V_t} + \frac{M_w}{V_t}$$

$$\rho_h = \frac{M_s}{V_t} + \frac{M_s}{M_s} \frac{M_w}{V_t} = \frac{M_s}{V_t} \left[ 1 + \frac{M_w}{M_s} \right]$$

$$\rho_h = \frac{M_s}{V_t} \left[ 1 + \frac{M_w}{M_s} \right] = \rho_d(1 + w)$$

$$S_r = \frac{w}{w_{sr}}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_T - V_s} = \frac{M_w / \rho_w}{M_s \left( \frac{V_T - V_s}{M_s} \right)}$$

$$S_r = \frac{M_w}{\rho_w M_s \left( \frac{V_T}{M_s} \right) - \rho_w M_s \left( \frac{V_s}{M_s} \right)} = \frac{M_w}{\rho_w M_s \left( \frac{1}{\rho_d} \right) - \rho_w M_s \left( \frac{1}{\rho_s} \right)}$$

$$S_r = \frac{M_w / M_s}{\rho_w \left( \frac{1}{\rho_d} \right) - \rho_w \left( \frac{1}{\rho_s} \right)} = \frac{w}{\left( \frac{\rho_w}{\rho_d} \right) - \left( \frac{1}{D_r} \right)} = \frac{w}{w_{sr}}$$

$$w_{sr} = \frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{D_r}$$

$$w_{sr} = \frac{M_w}{M_s} \Big|_{S_r=1} = \frac{M_w / V_w}{M_s / V_w} \quad S_r = 1 \Rightarrow V_w = V_T - V_s$$

$$w_{sr} = \frac{\rho_w}{M_s / (V_T - V_s)} = \frac{\rho_w}{1 / (V_T / M_s - V_s / M_s)} = \rho_w (V_T / M_s - V_s / M_s)$$

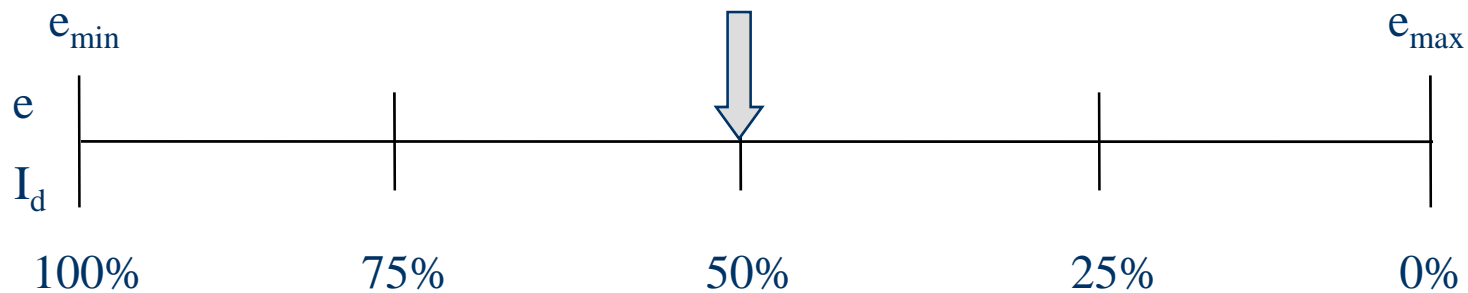
$$w_{sr} = \rho_w (1 / \rho_d - 1 / \rho_s) = \frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{D_r}$$

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RELATIONS PHYSIQUES DE BASE

$$I_D (\%) = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100$$

$$I_D (\%) = \left( \frac{\rho_d - \rho_{d \min}}{\rho_{d \max} - \rho_{d \min}} \right) \frac{\rho_{d \max}}{\rho_d} \times 100$$



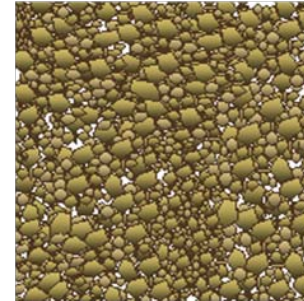
# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## NOTIONS DE MASSES ET POIDS VOLUMIQUES

	Masse (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kN/m <sup>3</sup> )
Total	$\rho$	$\gamma$
Sec	$\rho_d$	$\gamma_d$
Des grains solides	$\rho_s$	$\gamma_s$
Déjaugé	$\rho'$	$\gamma'$
Saturé	$\rho_{sat}$	$\gamma_{sat}$

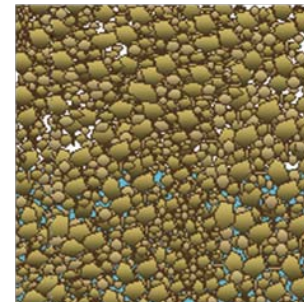
- On mesure rarement la masse volumique sur le terrain pour fin de conception. On se limite habituellement au poids total près de la saturation.
- On parle rarement de poids sec ou humide.
- Au laboratoire c'est différent.

Sec  
 $w=0\%$



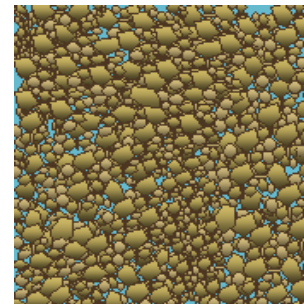
$$\rho = \rho_d = 2000 \text{ kg/m}^3$$

humide  
 $w=5\%$



$$\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$$

Saturé  
 $w=13\%$



$$\rho = \rho_{sat} = 2260 \text{ kg/m}^3$$

Nature du sol	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w_{sat}$
Argile	1500 à 1800	> 25
Sable	2000	13
Pierre C. 0-20	2300	6,5
Till	2300 à 2400	5,5
Asphalte	2250	---

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## CONTRAINTES TOTALES ET EFFECTIVES

Ce qui nous intéresse dans le sol c'est souvent la contrainte qui s'exerce effectivement entre les grains de sol :

La contrainte effective  $\sigma'$

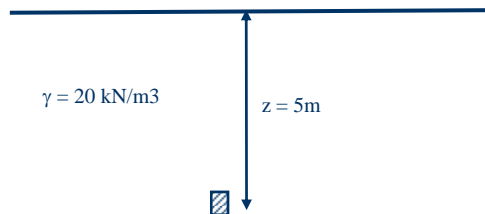
$$\sigma' = \sigma - u$$

$\sigma$  : contrainte totale =  $\gamma \times z$

$u$  : pression interstitielle =  $\gamma_w \times z$  (condition hydrostatique)

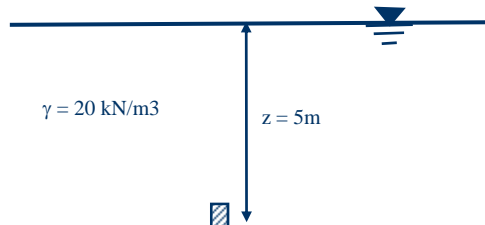
$u$  peut varier selon la nature de l'écoulement

### Exemple 1



Comme il n'y a pas de nappe d'eau  
 $\sigma' = \sigma - (u=0) = \sigma = 20 \times 5 = 100 \text{ kPa}$

### Exemple 2



Condition hydrostatique  
 $\sigma' = \sigma - (u) = \sigma = 20 \times 5 - 5 \times 10 = 50 \text{ kPa}$

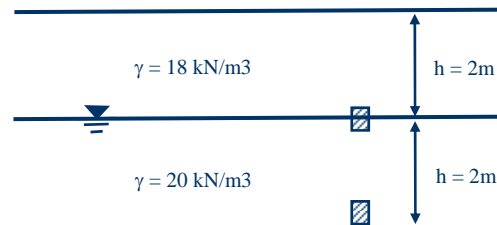


## CONTRAINTES TOTALES ET EFFECTIVES APPLICATIONS

### Problème 1

En considérant les conditions montrées à la figure suivante :

- Calculer la contrainte effective dans le sol à 2 m de profondeur
- Calculer la contrainte totale à 2 m de profondeur
- Calculer la contrainte effective dans le sol à 4 m de profondeur
- Calculer la contrainte totale à 4 m de profondeur



Réponse :

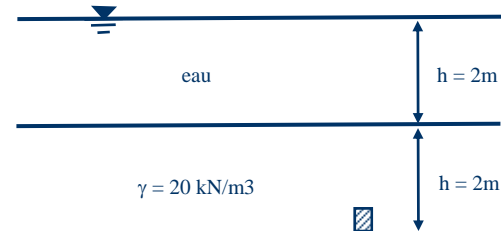
- $\sigma' = 36\text{ kPa}$
- $\sigma = 36\text{ kPa}$
- $\sigma' = 56\text{ kPa}$
- $\sigma = 76\text{ kPa}$

## CONTRAINTES TOTALES ET EFFECTIVES APPLICATIONS

### Problème 2

En considérant les conditions montrées à la figure suivante :

- a) Calculer la contrainte effective dans le sol à 4 m de profondeur



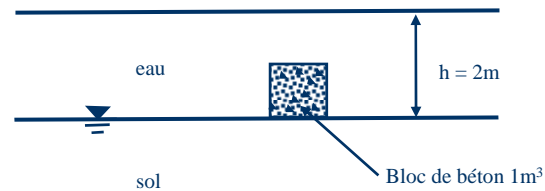
Réponse :

a)  $\sigma' = 20\text{ kPa}$

### Problème 3

En considérant les conditions montrées à la figure suivante :

- a) Quelle est la pression exercée par le bloc sur le sol?  
( $\gamma_{\text{béton}} = 24\text{ kN/m}^3$ )



Réponse :

a)  $\sigma' = 14\text{ kPa}$

## CONTRAINTES TOTALES ET EFFECTIVES APPLICATIONS

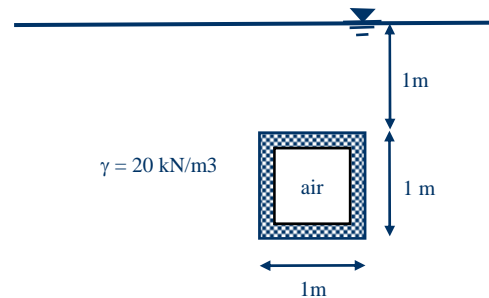
### Problème 4

Une conduite en béton de 1 m x 1 m a un poids de 15 kN/m lin et elle repose à 2 m de profondeur dans un dépôt de sol avec la nappe d'eau en surface :

- Quelle est la contrainte effective qui s'exerce dans le sol juste au-dessus du tuyau?
- Déterminer le diagramme de pression au-dessus de la conduite;
- Quelle est la contrainte effective qui s'exerce dans le sol sous la conduite?
- Déterminer le diagramme de pression sous la conduite.

Réponse :

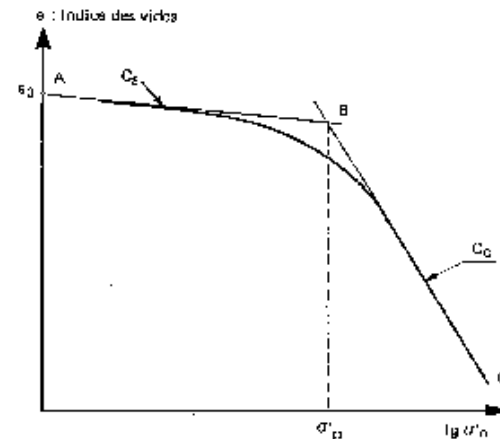
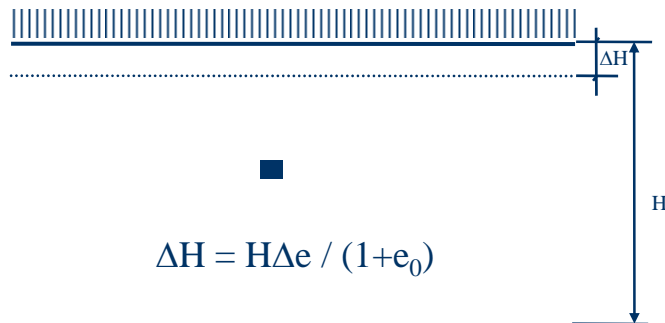
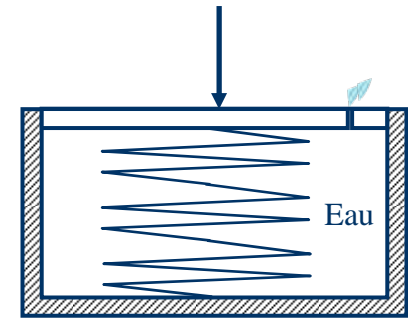
- $\sigma' = 10 \text{ kPa}$
- $\sigma = 20 \text{ kPa}$
- $\sigma' = 15 \text{ kPa}$
- $\sigma = 35 \text{ kPa}$



# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## TASSEMENTS DE CONSOLIDATION

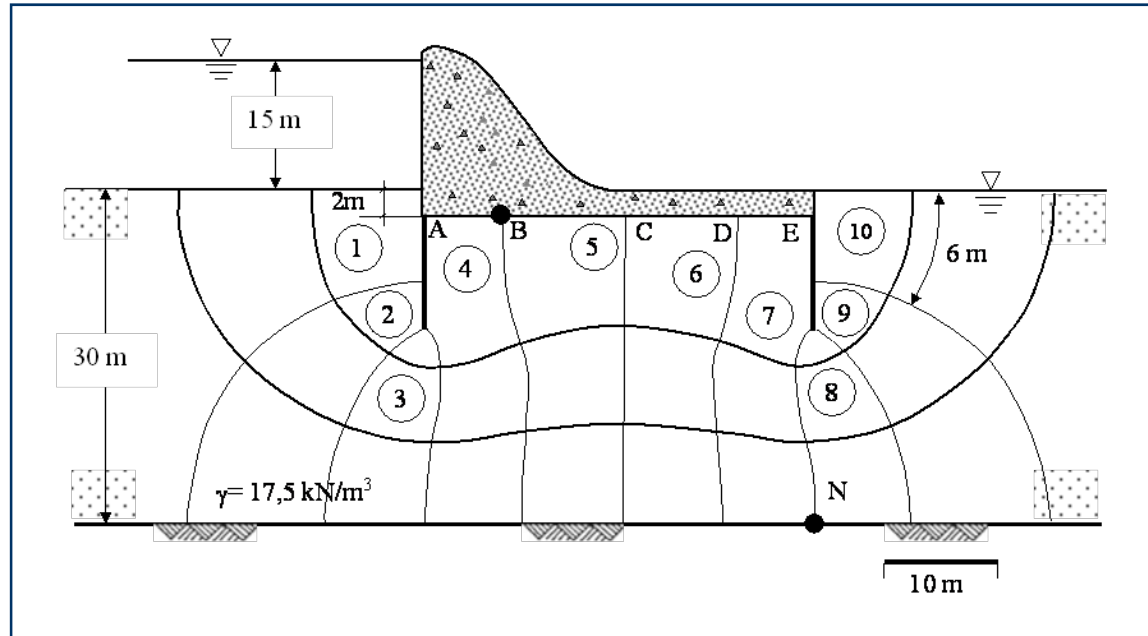
- La consolidation est le phénomène par lequel, sous l'effet d'une charge appliquée, l'eau est expulsée du sol.
- Dans les argiles, l'expulsion de l'eau se produit très lentement (peut prendre de dizaines d'années).
- Dans les sols pulvérulents l'expulsion se produit très vite.
- L'argile possède une mémoire (il se souvient ...)
- Contrainte de pré-consolidation  $\sigma'_p$  - Paramètre très important dans l'étude des argiles
- Courbe de pré-consolidation ou oedométrique (plusieurs informations importantes)



Courbe oedométrique. Détermination des indices de gonflement  $C_e$  et de compression  $C_c$ , et de la pression de préconsolidation  $\sigma'_p$ .

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## ÉCOULEMENT DANS LES SOLS



- 1- Évaluer la pression d'eau au point B et au point N, en m et en kPa
- 2- Évaluer le gradient de sortie et le facteur de sécurité à la sortie de l'écoulement

1- Nombre de chutes au point B = 4

→ perte de charge =  $4 \cdot 15 / 10 = 6 \text{ m}$  →  $H_B = 15 - 6 + 2 = 11 \text{ m}$

→  $P_B = 11 \cdot 9,81 = 107,9 \text{ kPa}$

Au point N la perte de charge est :  $7 \cdot 15 / 10 = 10,5 \text{ m}$

→  $H_N = 15 - 10,5 + 30 = 34,5 \text{ m}$

→  $P_N = 34,5 \cdot 9,81 = 338,5 \text{ kPa}$

2- Gradient de sortie de l'écoulement

→  $i_s = \Delta H / \Delta L = (15 / 10) / 6 = 0,25$

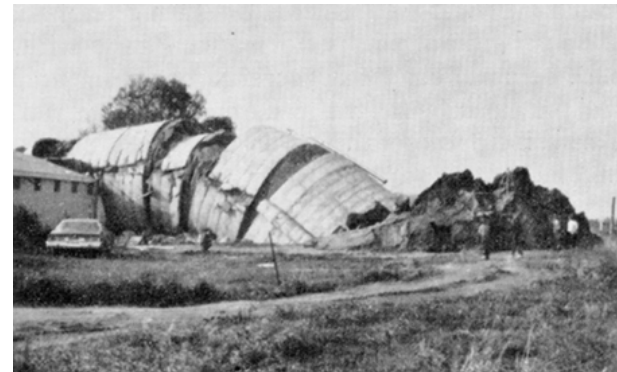
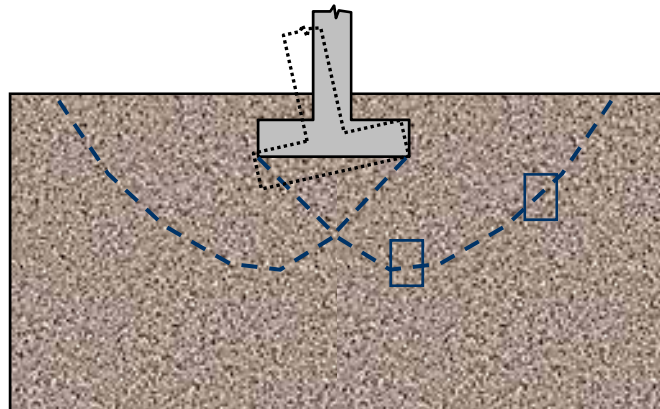
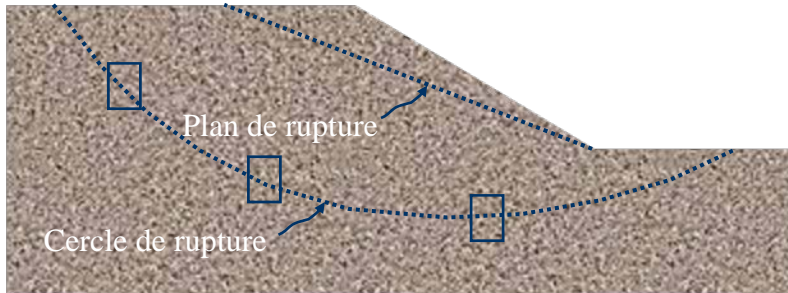
→  $F.S. = i_c / i_s$   $i_c$  est le gradient de sortie qui peut produire

la boullance =  $\gamma' / \gamma_w = 7,5 / 10 = 0,75$

→  $F.S. = 0,75 / 0,25 = 3$

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS



# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### DÉFINITION

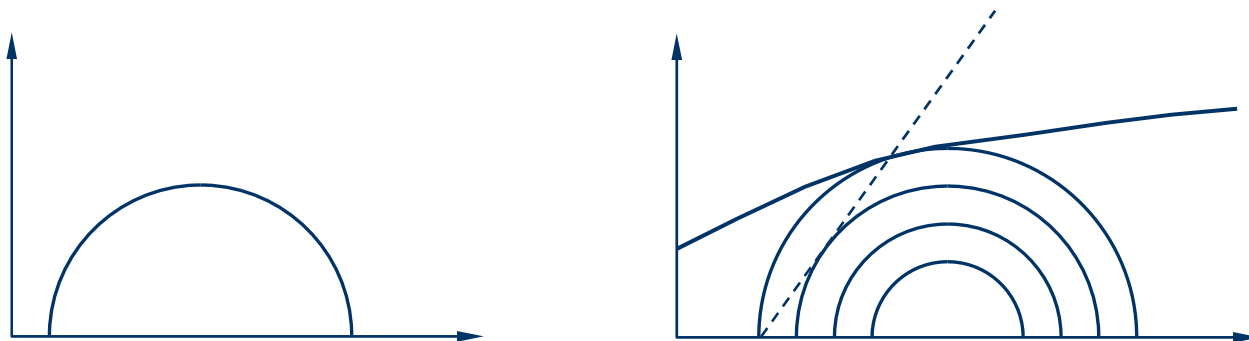
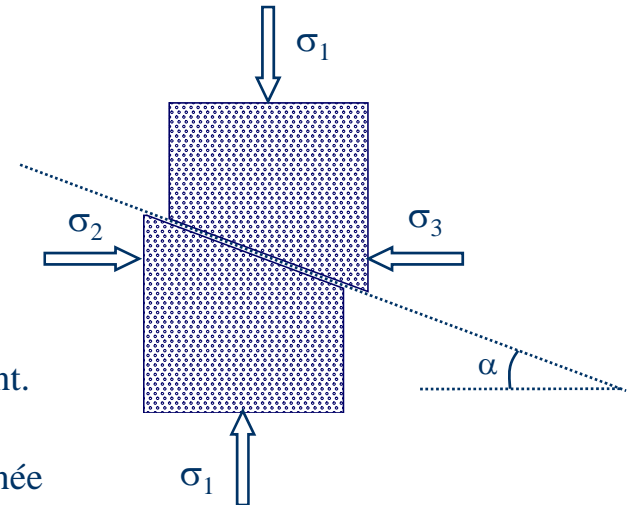
La résistance au cisaillement d'un sol est la résistance interne par unité de surface qu'un sol peut offrir pour résister à une rupture ou à un cisaillement le long d'un plan.

### CRITÈRE DE RUPTURE

Où se produit la rupture ?

Il faut distinguer entre la contrainte de cisaillement maximale appliquée qui peut produire la rupture et la résistance au cisaillement.

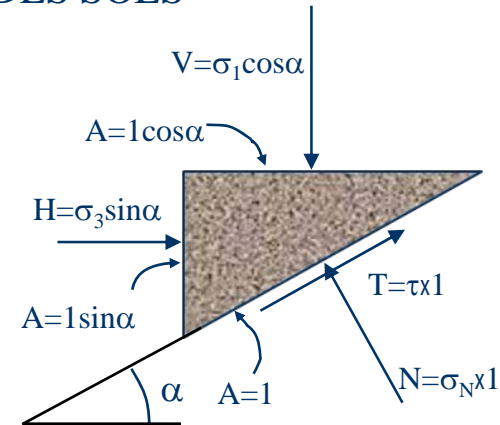
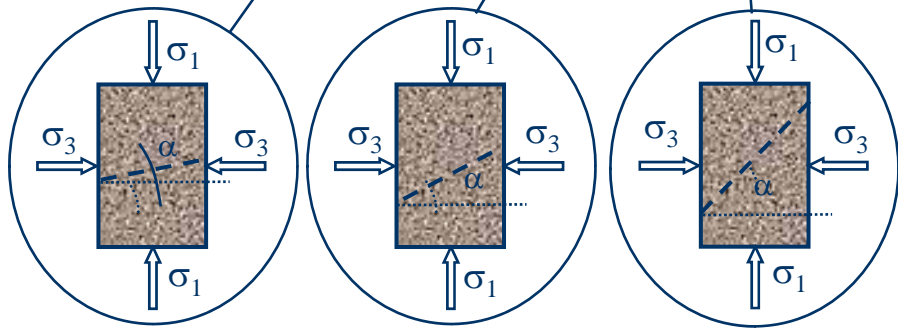
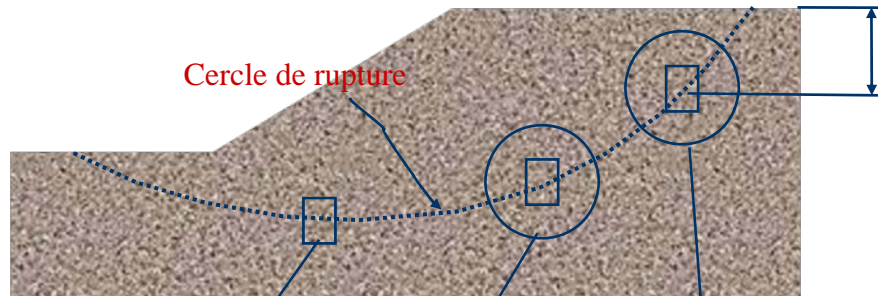
La contrainte appliquée qui peut causer la rupture doit être déterminée et elle est située sur un plan critique donné → **Cercle de Mohr**



# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

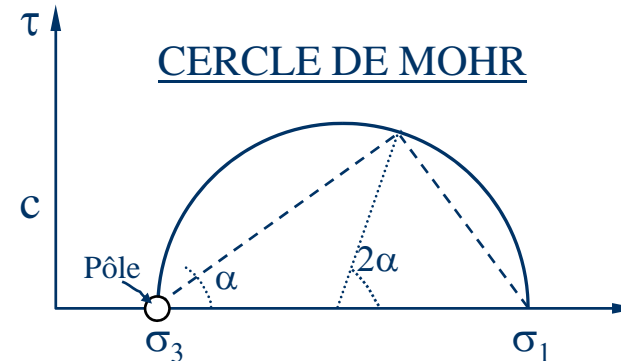
## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

- Quelle est la contrainte mobilisée sur le cercle de rupture à différents points ?
- Où se trouve la contrainte de cisaillement maximale ?



$$\begin{aligned} V - N \cos \alpha - T \sin \alpha &= 0 & T &= -H \cos \alpha + V \sin \alpha \\ H + T \cos \alpha - N \sin \alpha &= 0 & N &= H \sin \alpha + V \cos \alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_N &= \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha; \quad \tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \alpha \sin \alpha \\ \tau &= (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha / 2 \\ \sigma_N &= (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha / 2 \end{aligned}$$



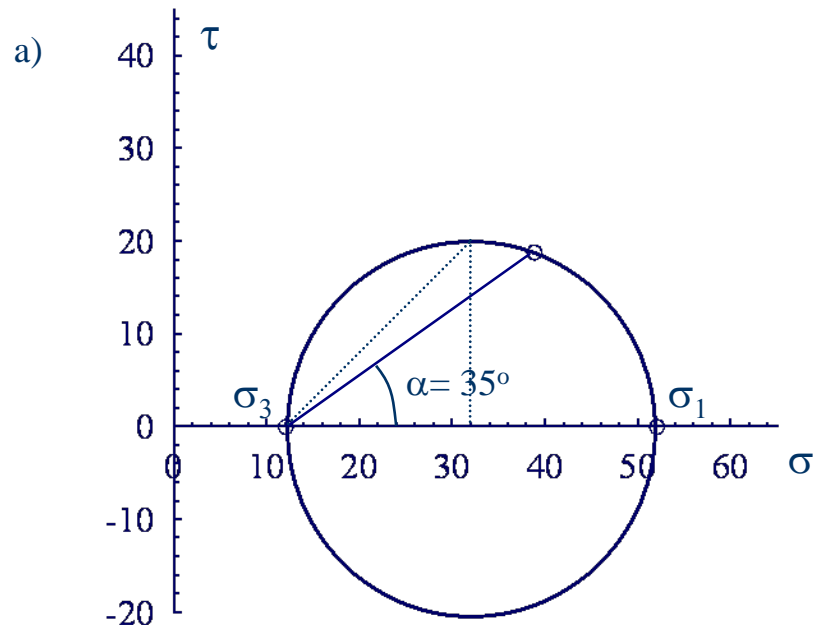
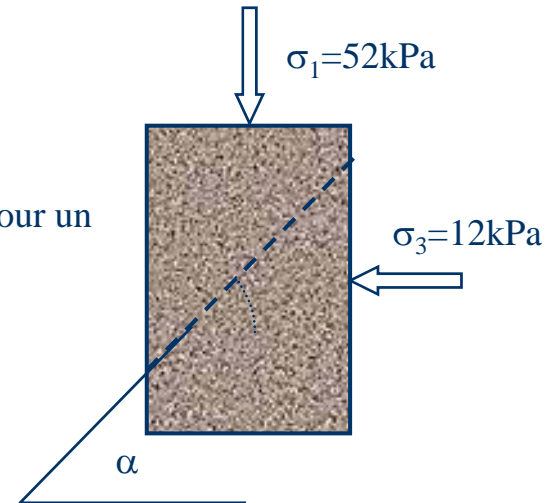


# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### EXEMPLE No 1

- Tracer le cercle de Mohr de l'élément montré à la figure suivante;
- Déterminer la contrainte normale et la contrainte de cisaillement pour un angle  $\alpha = 35^\circ$ ;
- Déterminer la contrainte de cisaillement maximale  $\tau_{\max}$ .



$$\begin{aligned} \text{b) } \tau &= \sin 2\alpha (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 = \sin 70^\circ (52 - 12) / 2 \\ &= 18,8 \text{ kPa} \\ \sigma &= (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 + \cos 2\alpha (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \\ &= (52 + 12) / 2 + \cos 70^\circ (52 - 12) / 2 \\ &= 38,8 \text{ kPa} \end{aligned}$$

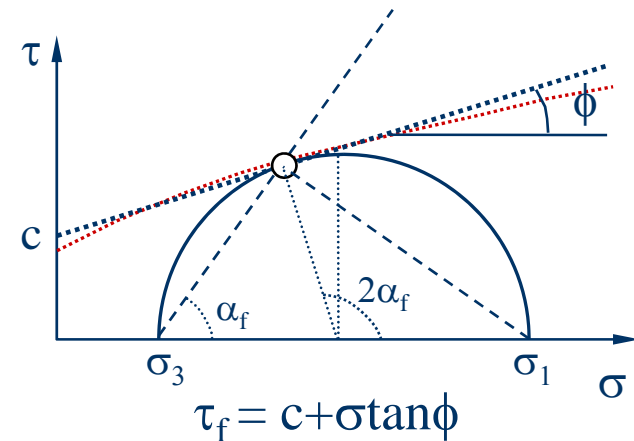
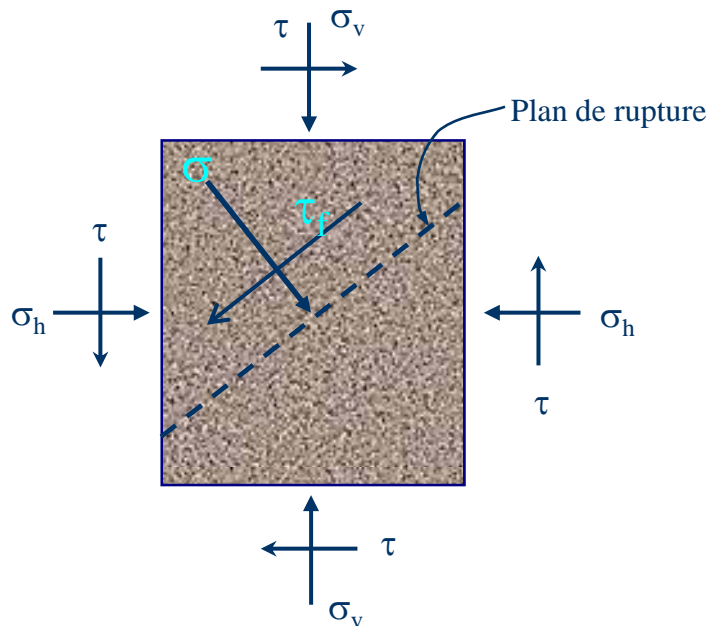
$$\text{c) } \tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 = (52 - 12) / 2 = 20 \text{ kPa}$$

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### CRITÈRE DE RUPTURE

La rupture d'un matériau se produit à cause d'une combinaison critique entre la contrainte normale et la contrainte de cisaillement.



Critère de rupture Mohr-Coulomb

$$\alpha_f = 45^\circ + \phi/2$$

À la rupture :

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2c \tan(45^\circ + \phi/2)$$

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### RÉSISTANCE MOBILISÉE – RÉSISTANCE DISPONIBLE & FACTEUR DE SÉCURITÉ

#### RÉSISTANCE MOBILISÉE

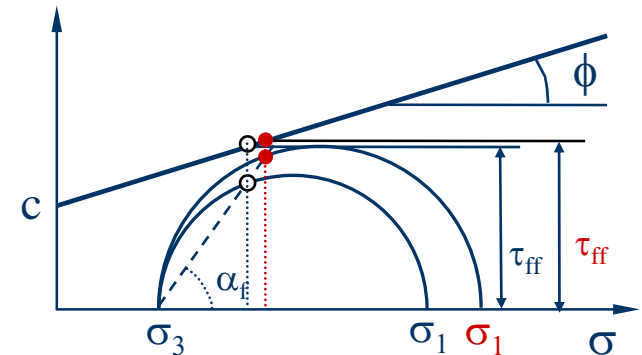
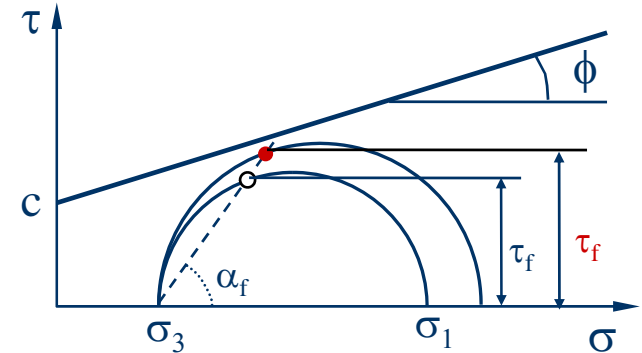
La résistance mobilisée est la contrainte de cisaillement qui prévaut à un angle  $\alpha_f = 45^\circ + \phi/2$  pour un état de contrainte donnée (figure a) .

#### RÉSISTANCE DISPONIBLE

La résistance disponible est la contrainte de cisaillement critique déterminée à partir du critère de rupture  $\tau = c + \sigma \tan \phi$  pour la contrainte  $\sigma$  en question (figure b) .

#### FACTEUR DE SÉCURITÉ

F.S = Résistance disponible / Résistance mobilisée



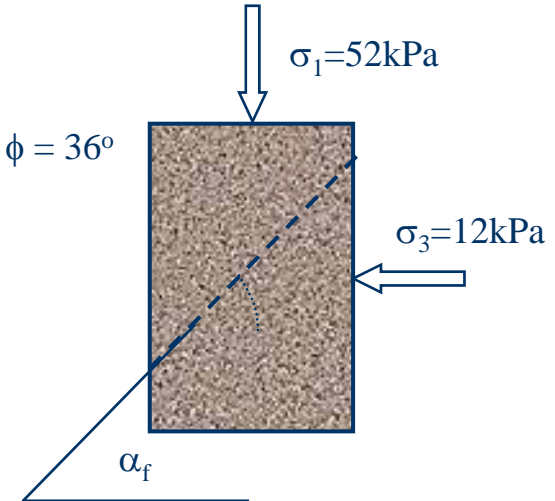
# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### EXEMPLE No 2

Pour l'élément montré à la figure suivante et sachant que  $c = 10$  kPa et  $\phi = 36^\circ$

- Déterminer la contrainte de cisaillement mobilisée;
- Déterminer la contrainte de cisaillement disponible;
- Quel est le facteur de sécurité ?
- Pour quelle valeur de  $\sigma_1$  F.S. = 1 ?



$$a) \quad \alpha_f = 45 + \phi/2 = 45 + 36 = 63^\circ$$

$$\tau_f = \sin 2\alpha_f (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \sin 126^\circ (52 - 12)/2 \\ = 16,2 \text{ kPa}$$

$$b) \quad \sigma_N = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 + \cos 2\alpha_f (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \\ = (52 + 12)/2 + \cos 126^\circ (52 - 12)/2 \\ = 20,24 \text{ kPa}$$

$$\tau_{ff} = c + \sigma_N \tan \phi = 10 + 20,24 \tan(36^\circ) = 24,7 \text{ kPa}$$

$$c) \quad \text{F.S.} = 24,7 / 16,2 = 1,52$$

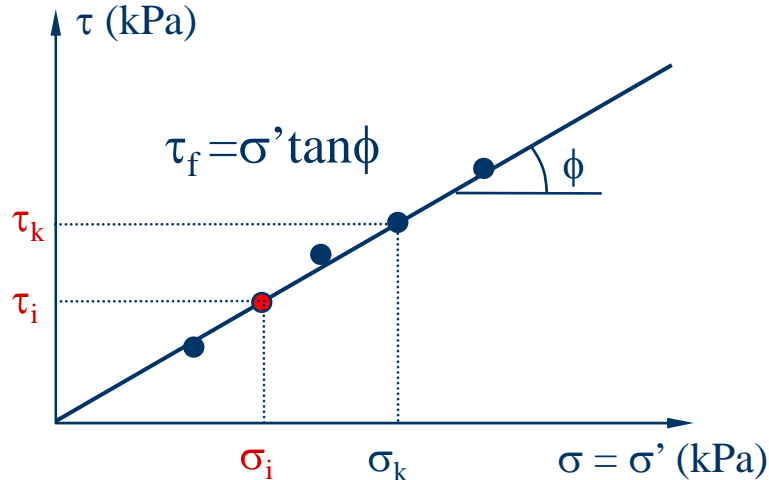
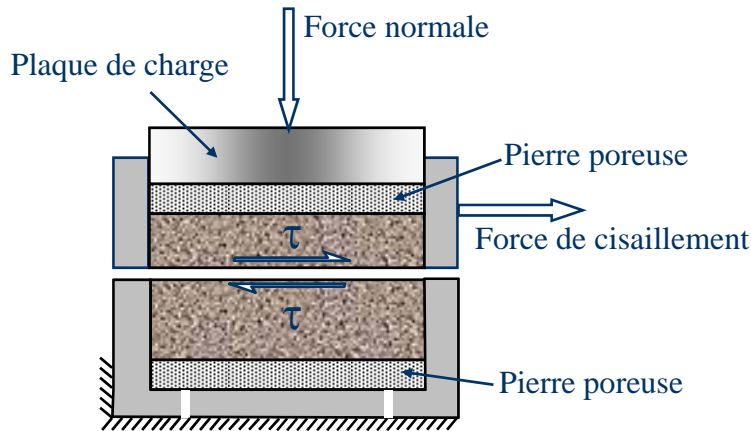
$$d) \quad \text{F.S.} = 1 \rightarrow \tau_f = \tau_{ff} \rightarrow \sin 2\alpha_f (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = c + (\sigma_1 + \sigma_3)/2 + \cos 2\alpha_f (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \tan \phi$$

$$\rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2c \tan(45^\circ + \phi/2) = 12 \tan^2(63^\circ) + 20 \tan(63^\circ) = 85,5 \text{ kPa}$$

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### CISAILLEMENT DIRECT

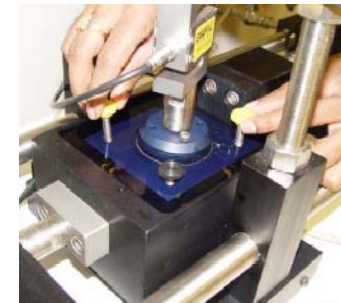
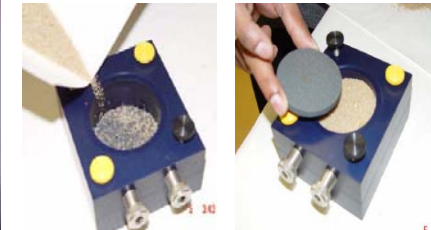


### Avantages :

- 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.



# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### EXEMPLE No 3

Un essai de cisaillement direct est effectué sur un échantillon de sable sec avec une contrainte normale de  $140 \text{ kN/m}^2$ . La rupture est produite à une contrainte de cisaillement de  $94,5 \text{ kN/m}^2$ . Les dimensions de l'échantillon sont de  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  (épaisseur). Déterminer l'angle de friction,  $\phi$  ( $c=0$ ). Pour une contrainte normale de  $84 \text{ kN/m}^2$ , quelle est la force de cisaillement requise pour cisailer l'échantillon.

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

$$c = 0$$

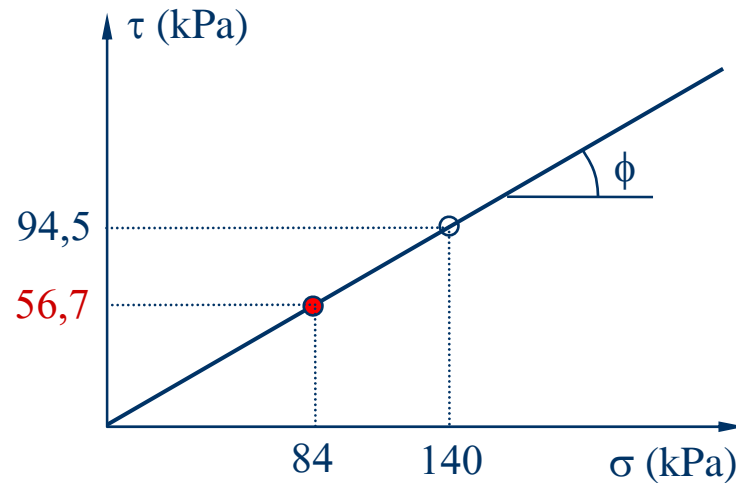
$$\tan \phi = \tau_f / \sigma' = 94,5 / 140 = 0,675$$

$$\phi = \tan^{-1}(0,675) = 34^\circ$$

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi$$

$$\tau_f = 84 \times \tan(34^\circ) = 56,7 \text{ kPa}$$

$$F_c = \tau_f \times S = 56,7 \times (0,0025) \times 10^3 = 141,75 \text{ N}$$

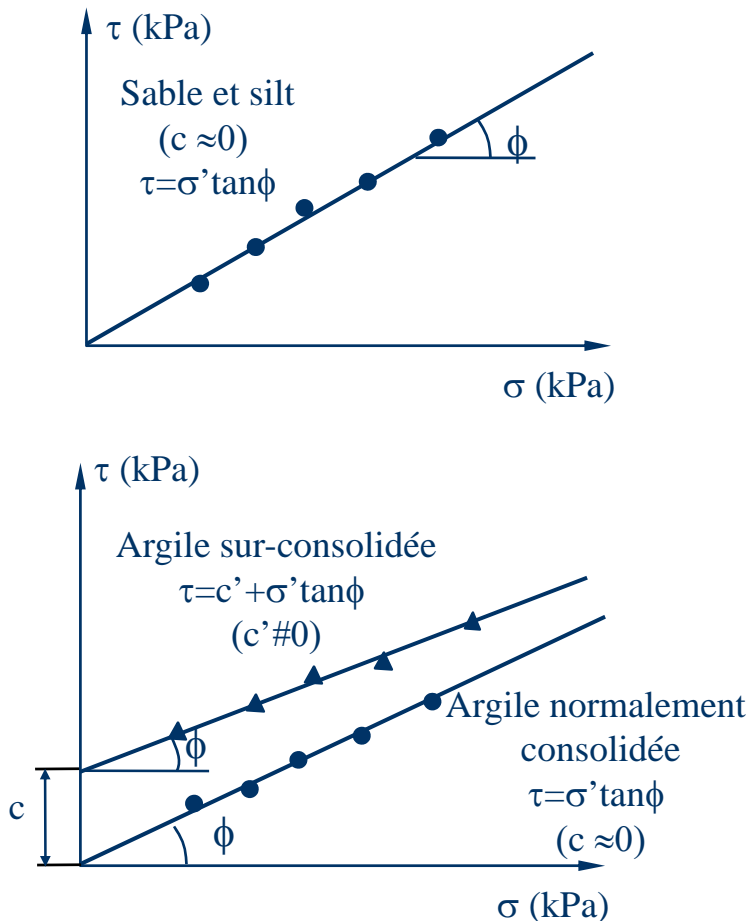


# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Enveloppes typiques de rupture

valeurs typiques de  $\phi$



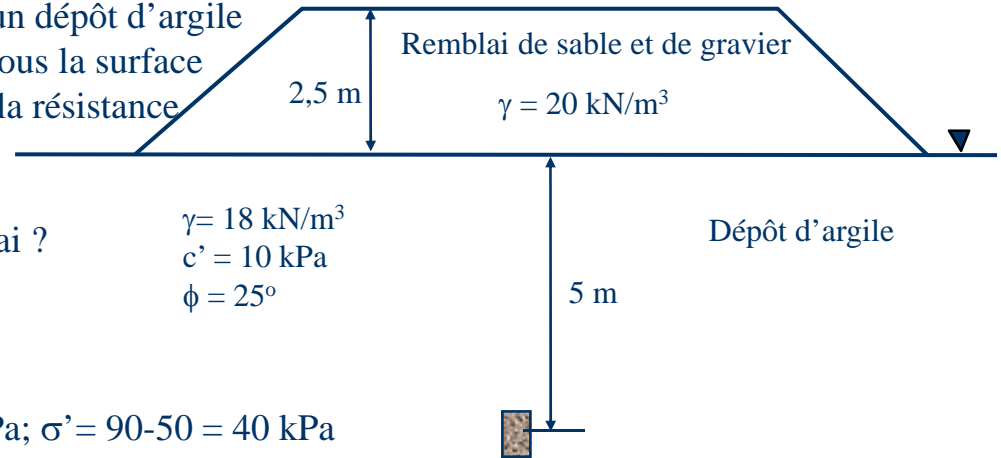
Type de sol	$\phi$ (deg)
Sable : grains arrondis	
Lâche	27-30
Moyennement dense	30-35
dense	35-38
Sable : grains angulaires	
Lâche	30-35
Moyennement dense	35-40
dense	40-45
Gravier avec du sable	34-48
Silt	26-35

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### EXEMPLE No 4

Construction d'un remblai de sable et de gravier sur un dépôt d'argile  
Considérez un plan horizontal à 5 m de profondeur sous la surface  
du terrain naturel au centre du remblai et déterminez la résistance  
au cisaillement de l'argile sur ce plan :



- Avant la construction du remblai ?
- Immédiatement après la construction du remblai ?
- Lorsque 50% de consolidation sera atteinte ?
- Lorsque la consolidation sera complétée ?

a)  $\sigma = \gamma h = 5 \times 18 = 90 \text{ kPa}$ ;  $u = \gamma_w h = 5 \times 10 = 50 \text{ kPa}$ ;  $\sigma' = 90 - 50 = 40 \text{ kPa}$   
 $\tau_f = c' + \sigma'_N \tan \phi = 10 + 40 \tan(25) = 28,7 \text{ kPa}$

b)  $\sigma = \gamma h + \Delta P = 5 \times 18 + 2,5 \times 20 = 140 \text{ kPa}$ ;  $u = \gamma_w h + \Delta P = 5 \times 10 + 2,5 \times 20 = 100 \text{ kPa}$ ;  $\sigma' = 140 - 100 = 40 \text{ kPa}$   
 $\tau_f = c' + \sigma'_N \tan \phi = 10 + 40 \tan(25) = 28,7 \text{ kPa}$

c)  $\sigma = \gamma h + \Delta P = 5 \times 18 + 2,5 \times 20 = 140 \text{ kPa}$ ;  $u = \gamma_w h + \Delta P / 2 = 5 \times 10 + 25 = 75 \text{ kPa}$ ;  $\sigma' = 140 - 75 = 65 \text{ kPa}$   
 $\tau_f = c' + \sigma'_N \tan \phi = 10 + 65 \tan(25) = 40,3 \text{ kPa}$

d)  $\sigma = \gamma h + \Delta P = 5 \times 18 + 2,5 \times 20 = 140 \text{ kPa}$ ;  $u = \gamma_w h + 0 = 5 \times 10 + 0 = 50 \text{ kPa}$ ;  $\sigma' = 140 - 50 = 90 \text{ kPa}$   
 $\tau_f = c' + \sigma'_N \tan \phi = 10 + 90 \tan(25) = 52 \text{ kPa}$



# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### ESSAIS DE CISAILLEMENT - TRIAXIALE

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

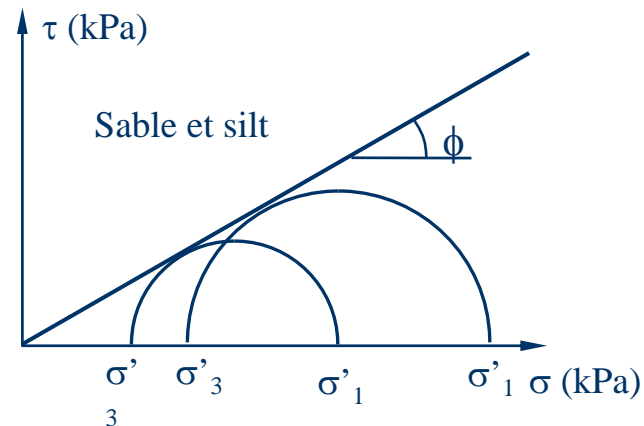
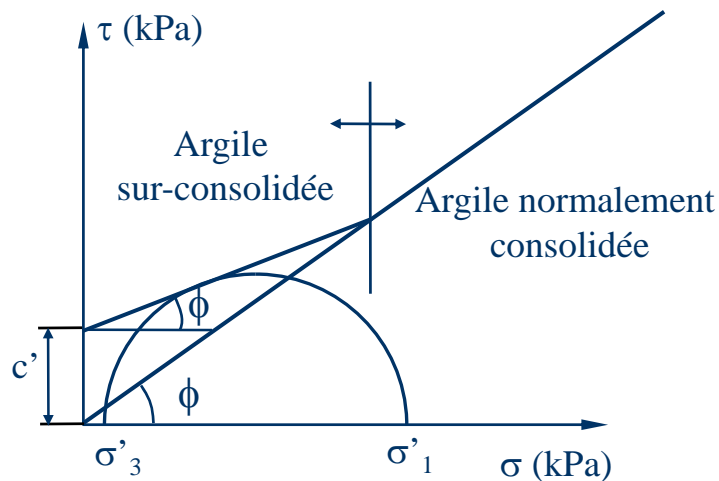
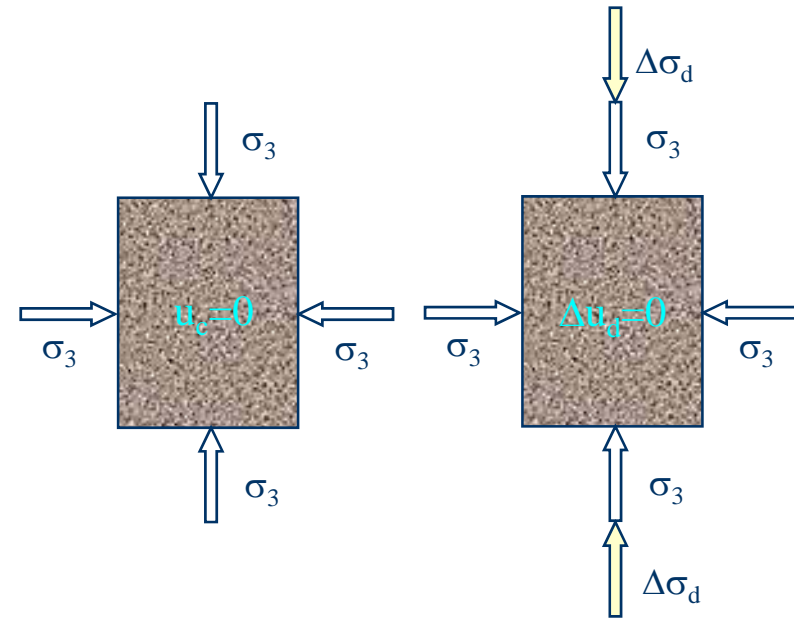


# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### ESSAI CONSOLIDÉ-DRAINÉ (CD)

- $\sigma_3$  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  $\Delta u = 0$

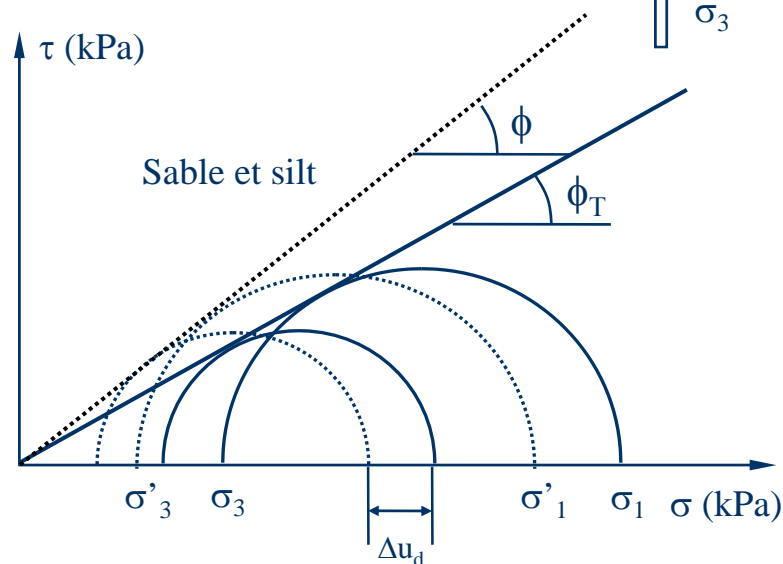
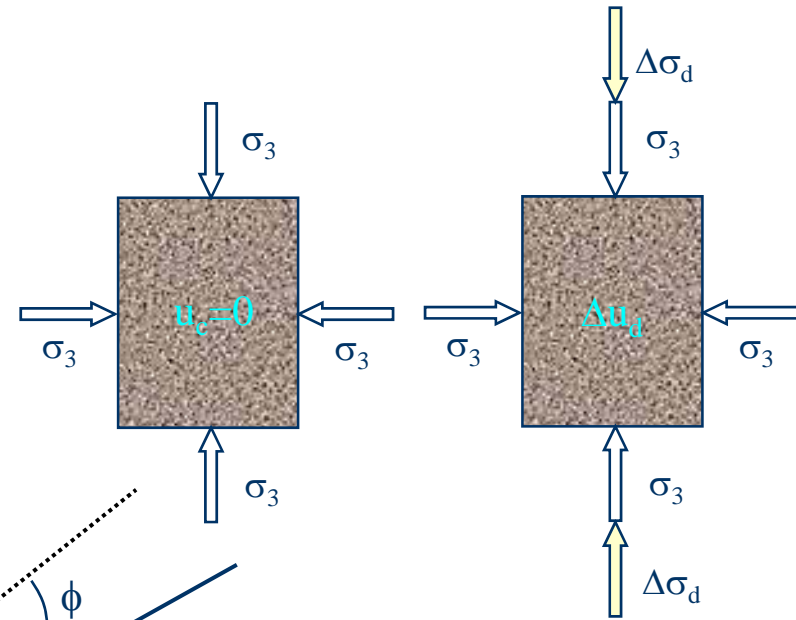


# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### ESSAI CONSOLIDÉ-NON-DRAINÉ (CU)

- $\sigma_3$  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  $\Delta u \neq 0$



# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### EXEMPLE No 5

Un essai de cisaillement consolidé non-drainé est effectué sur un échantillon d'argile normalement consolidé permet d'avoir les résultats suivants :  $\sigma_3=84$  kPa; contrainte du déviateur finale  $(\Delta\sigma_d)_f = 63,7$  kPa et pression finale  $(\Delta u_d)_f = 47,6$  kPa

- Déterminer l'angle de friction total  $\phi_{cu}$  et l'angle de friction drainé  $\phi$ ;
- Déterminer la résistance au cisaillement.

$$a) \sigma_1 = \sigma_3 + (\Delta\sigma_f) = 84 + 63,7 = 147,7$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2c \tan(45^\circ + \phi/2) = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi_{cu}/2)$$

$$45^\circ + \phi_{cu}/2 = \tan^{-1} (\sigma_1/\sigma_3)^{0,5} = \tan^{-1} (147,7/84)^{0,5} = 52,9^\circ$$

$$\phi_{cu} = 16^\circ$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - (\Delta u_d) = 147,7 - 47,6 = 100,1 ; \sigma'_3 = \sigma_3 - (\Delta u_d) = 84 - 47,6 = 36,4$$

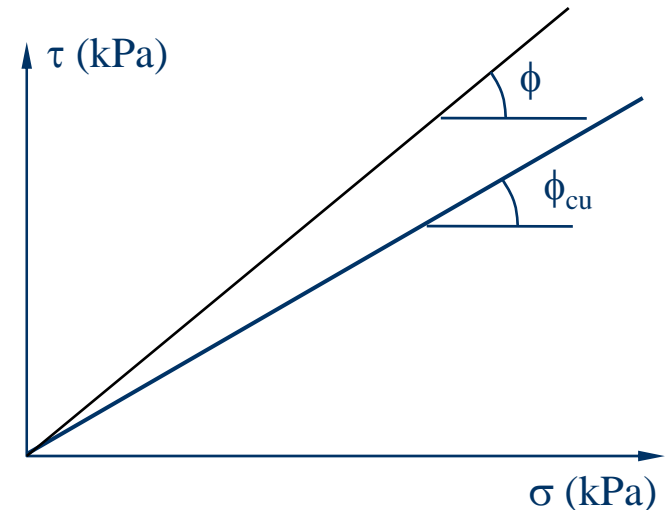
$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2c \tan(45^\circ + \phi/2) = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2)$$

$$45^\circ + \phi/2 = \tan^{-1} (\sigma_1/\sigma_3)^{0,5} = \tan^{-1} (100,1/36,4)^{0,5} = 58,9^\circ$$

$$\phi_{cu} = 27,8^\circ$$

$$\tau_f = \sin 2\alpha_f (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 = \sin 106^\circ (147,7 - 84) / 2 = 30,6 \text{ kPa}$$

$$\tau_f = \sin 2\alpha_f (\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2 = \sin 117,8^\circ (100,1 - 36,4) / 2 = 28,2 \text{ kPa}$$

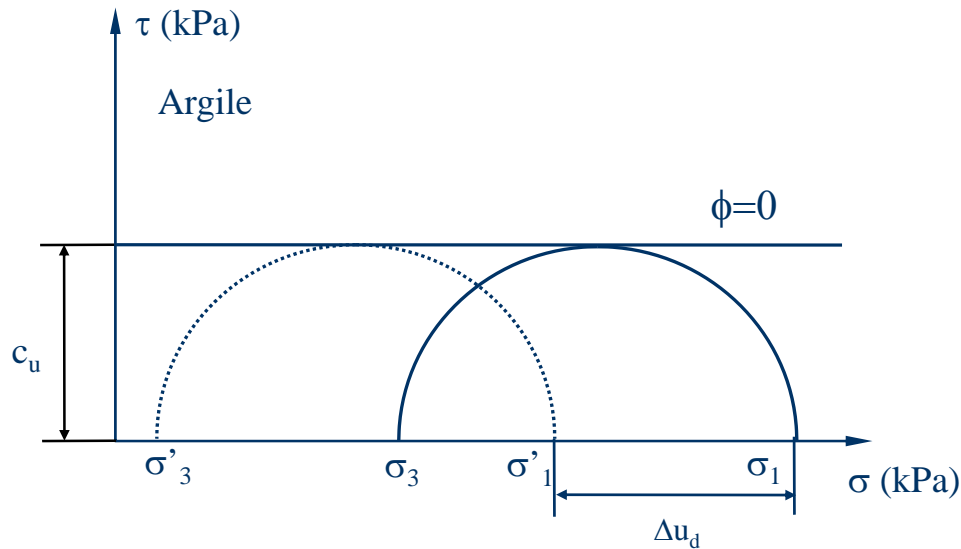
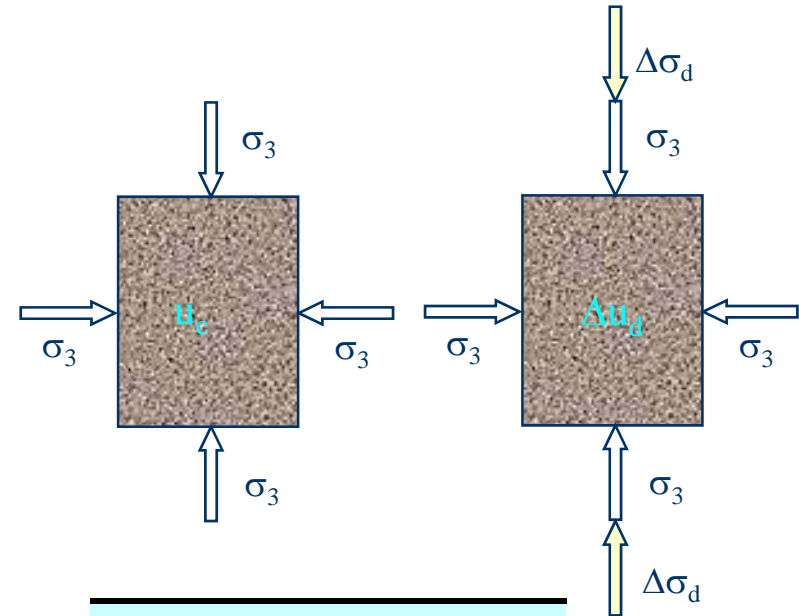


# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

### ESSAI NON-CONSOLIDÉ-NON-DRAINÉ (UU)

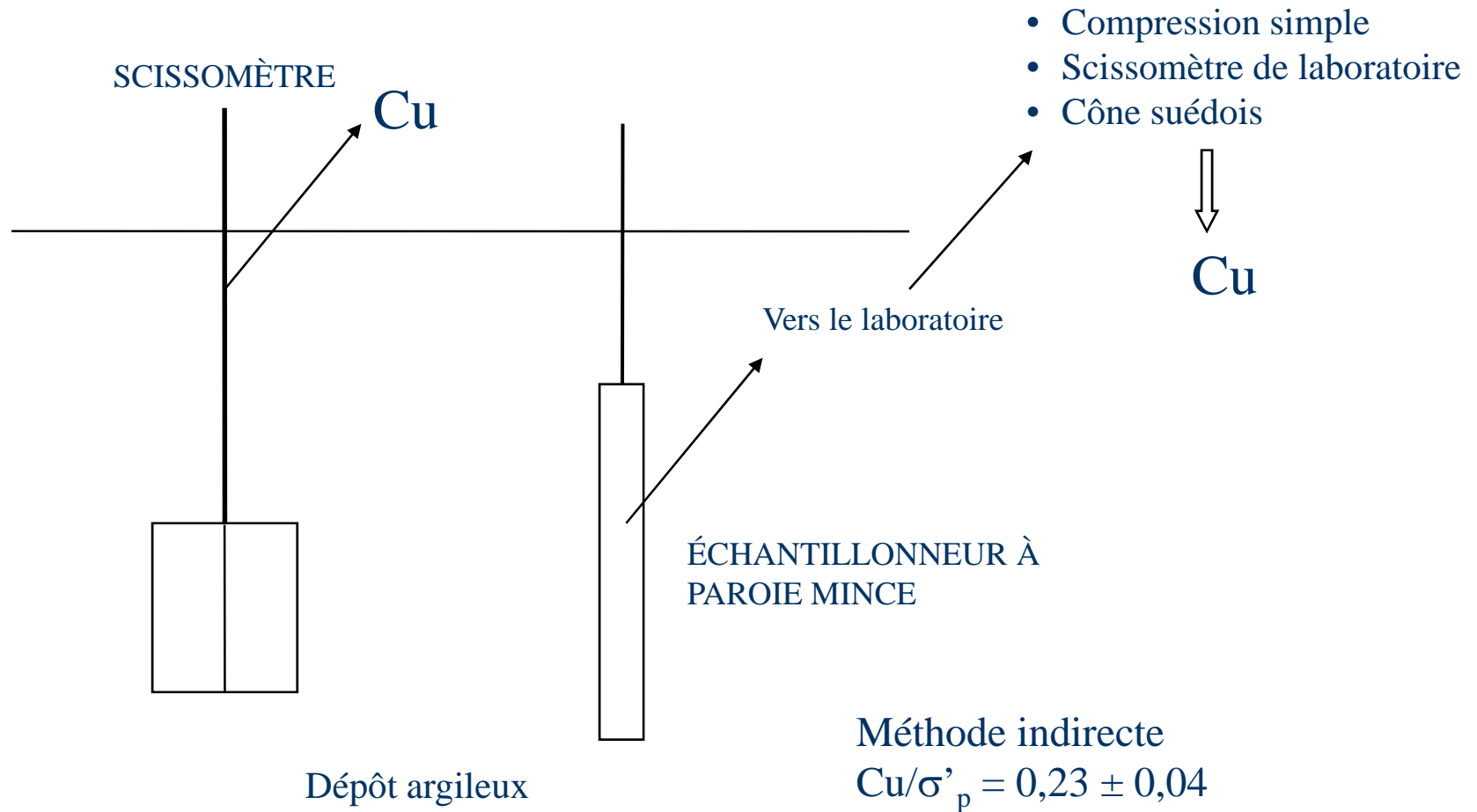
- $\sigma_3$  pression de confinement
- $\Delta\sigma_d$  déviateur de pression
- $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d =$  contrainte principale
- L'essai étant non drainé  $\rightarrow$  la pression de l'eau n'est pas dissipée  $u_c \neq 0$  ;  $\Delta u \neq 0$



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

# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS



# RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

## RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Applications	Paramètre(s) de résistance	Méthode(s) pour les obtenir
Stabilité dans un matériau granulaire (sable-gravier)	$\phi$ ou $\phi'$	Relation N vs $\phi$ Description du sol Boîte de cisaillement directe
Stabilité dans une fondation d'argile avec mise en charge rapide	Cu	Scissomètre de terrain Compression simple, cône.
	$c'$ , $\phi'$ possible mais pas avantageux	
Stabilité dans un massif ou fondation d'argile déjà consolidée	$c'$ , $\phi'$	Essai triaxial CD + boîte de cisaillement
Stabilité dans une fondation de till	$\phi'$ $c'$ , $\phi'$ (difficile à déterminer)	Description du sol Essai de plaque au terrain