

# Résistance au cisaillement des sols

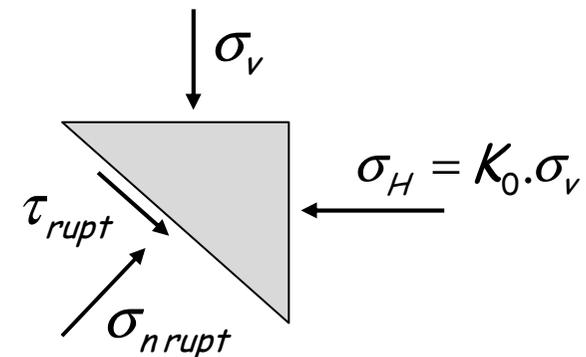
# Ruptures par cisaillement

- Exemples
  - Glissement de terrains
  - Basculement d'ouvrages
- Courbe de rupture : droite de Mohr-Coulomb

$$\tau_{rupt} = \mathcal{C} + \sigma_{nrupt} \cdot \tan \phi$$

$\mathcal{C}$  : cohésion

$\phi$  : angle de frottement interne

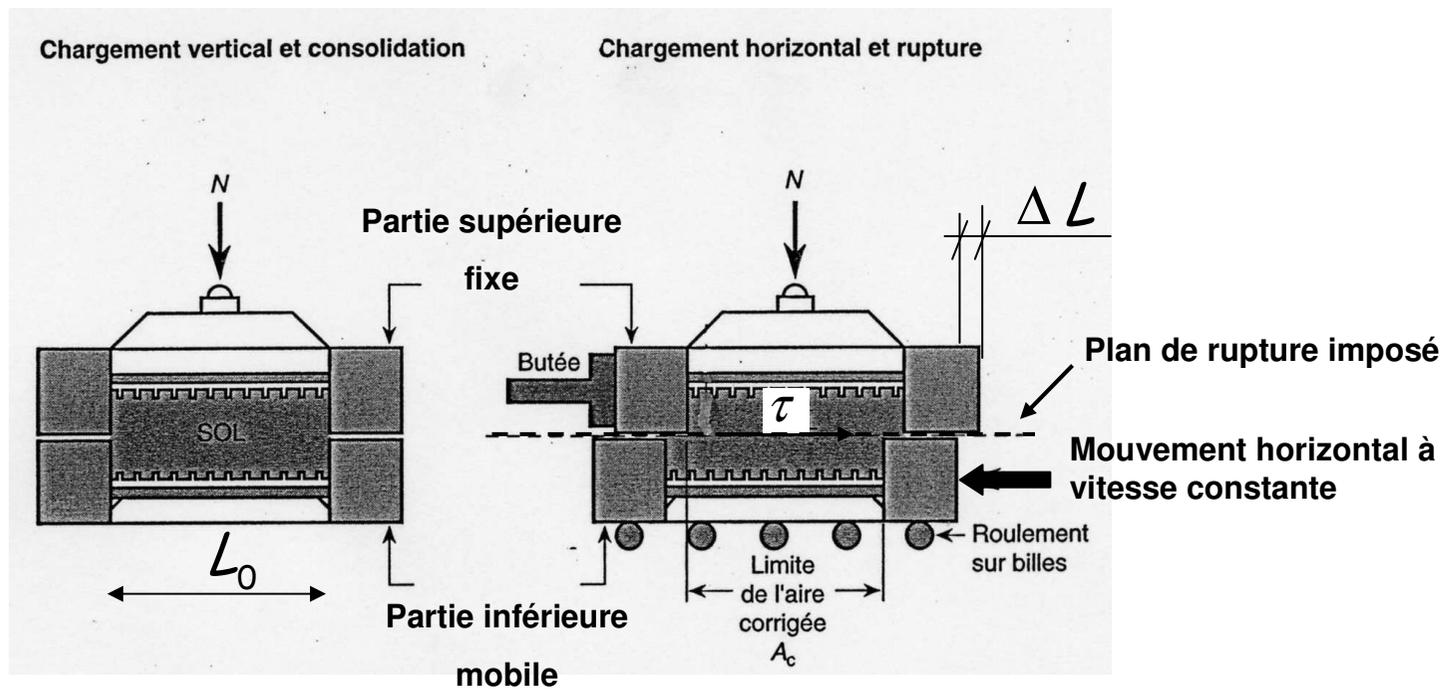


# Caractérisation expérimentale

- Caractérisation du comportement du squelette granulaire seul ?
- L'eau peut-elle s'évacuer ?
  - Non : VER incompressible : comportement non drainé
  - Oui : Vite ?
    - Non : Court Terme : comportement non drainé  
Long Terme : comportement drainé
    - Oui : CT=LT comportement drainé (sols grenus)

# Essai de cisaillement direct

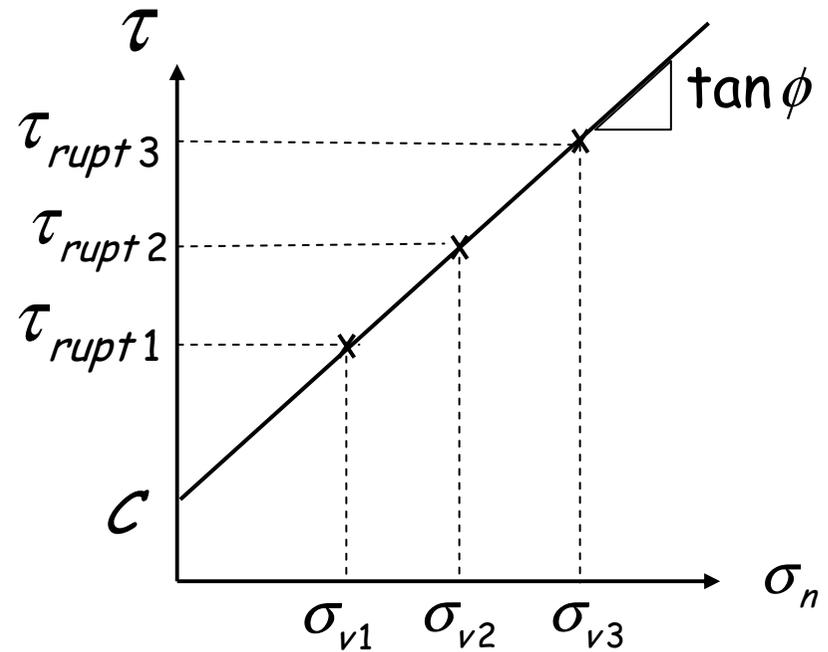
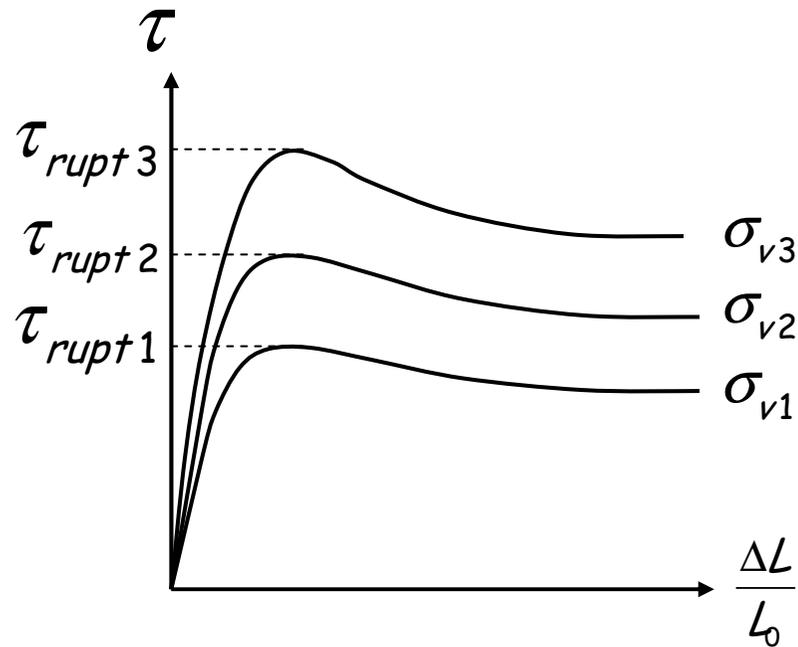
## Boîte de Casagrande



$$\sigma_v = \frac{N}{A_c}$$

# Essai de cisaillement direct

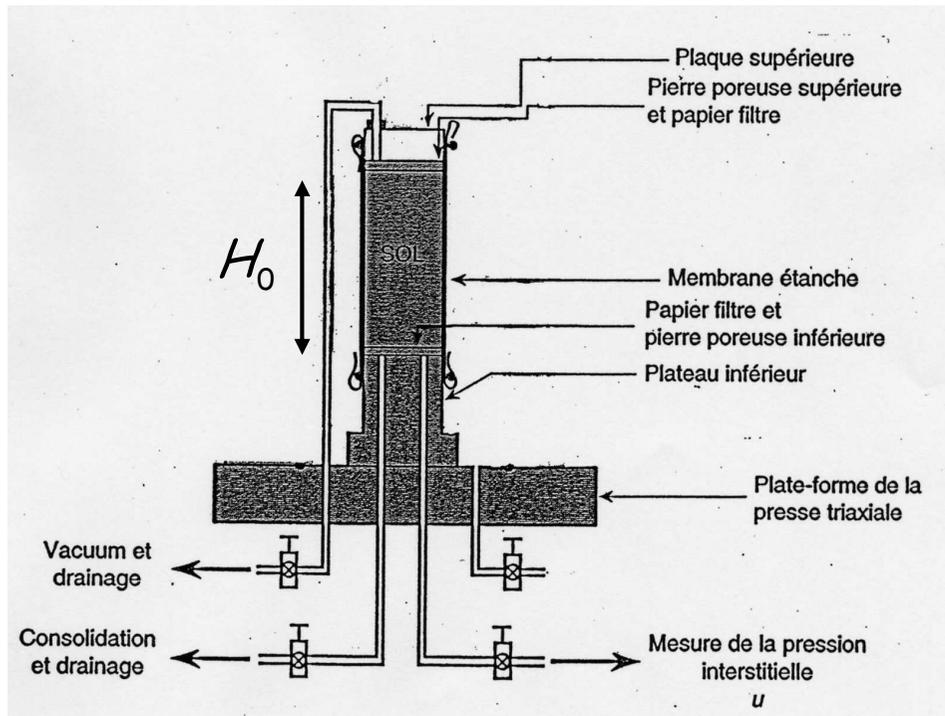
## Dépouillement



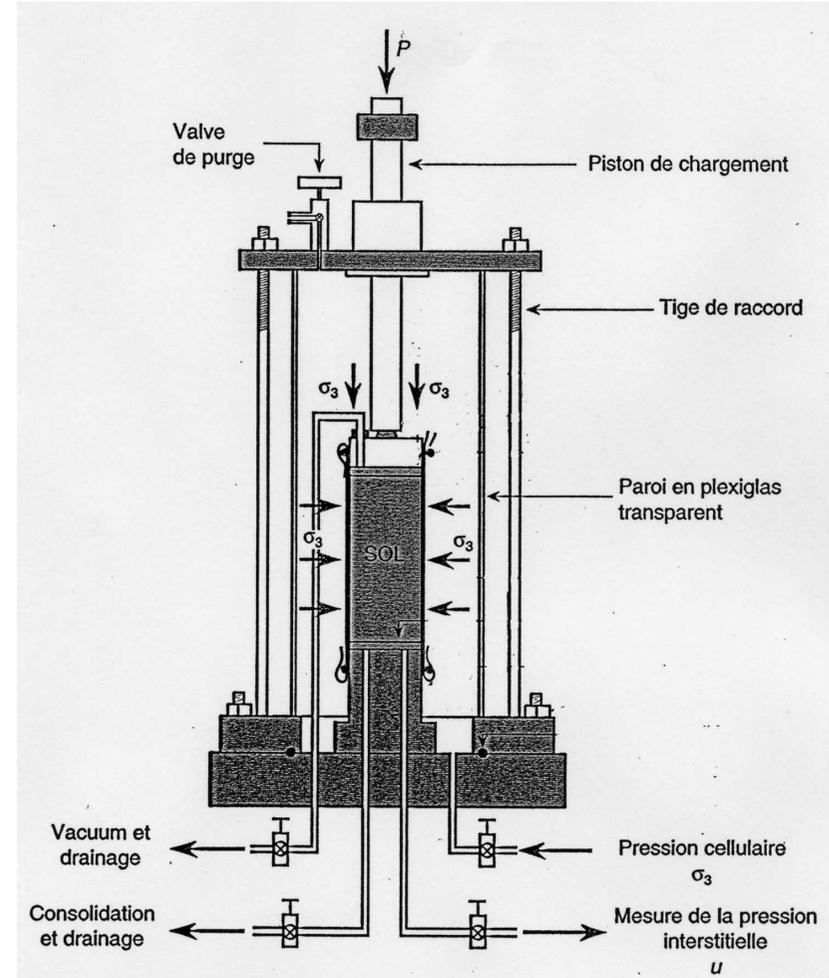
→ Nécessité de 3 essais sur des échantillons identiques avec 3 pressions verticales différentes

# Essai de cisaillement au triaxial

## Principe



Création de l'échantillon



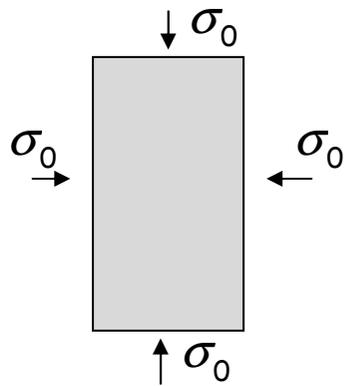
Essai triaxial

# Essai de cisaillement au triaxial

## Déroulement de l'essai

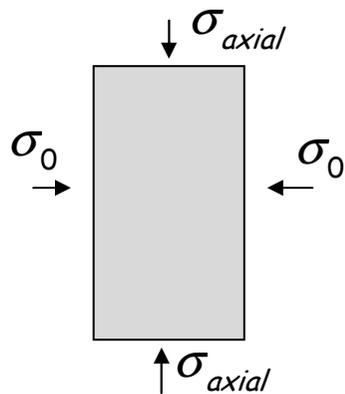
- Champ de contraintes

Etape 1 : application d'une contrainte isotrope



$$\begin{pmatrix} \sigma_{axial} \\ \sigma_{radial} \\ \sigma_{radial} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_0 \\ \sigma_0 \\ \sigma_0 \end{pmatrix}$$

Etape 2 : augmentation de l'effort P



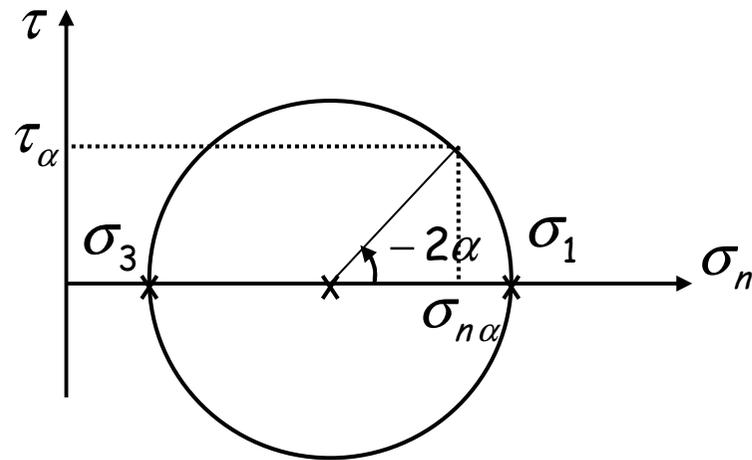
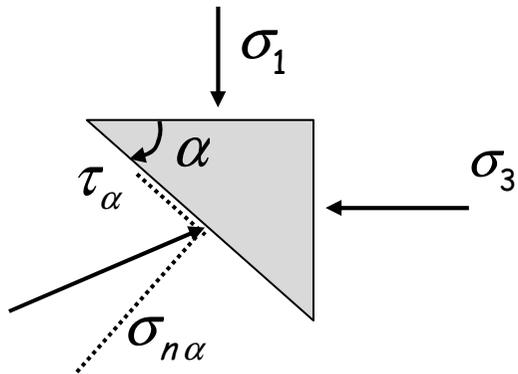
$$\begin{pmatrix} \sigma_{axial} \\ \sigma_{radial} \\ \sigma_{radial} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{axial} \\ \sigma_0 \\ \sigma_0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{axial} = \sigma_0 + \frac{P}{S}$$

# Essai de cisaillement au triaxial

## Dépouillement

- Plan de rupture ?
- Mesure de  $\sigma_n$  et  $\tau$  à la rupture sur ce plan ?
  - dépouillement en utilisant les cercles de Mohr
- Rappel

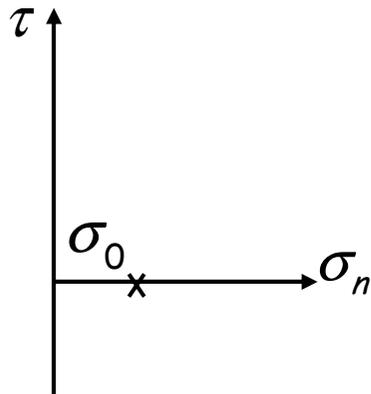


# Essai de cisaillement au triaxial

## Dépouillement

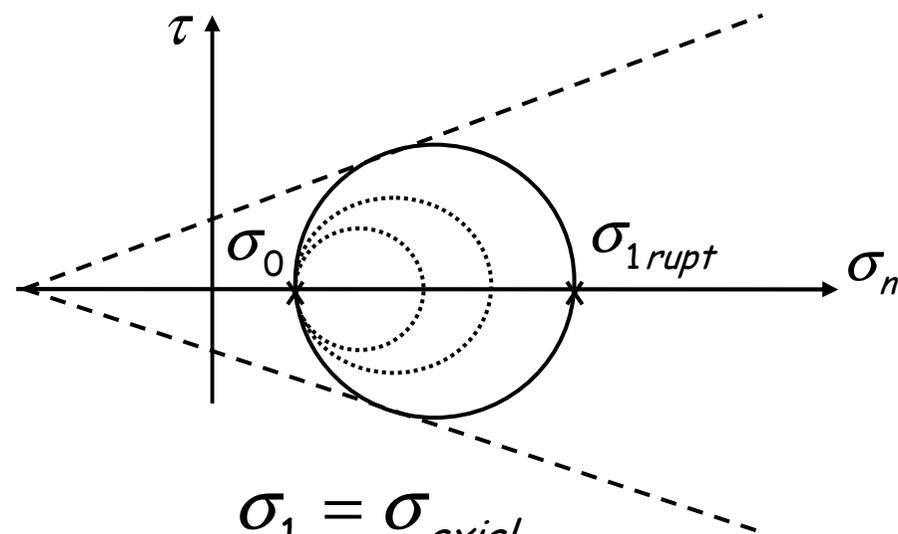
- Champ de contraintes

Etape 1



$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0$$

Etape 2 → rupture

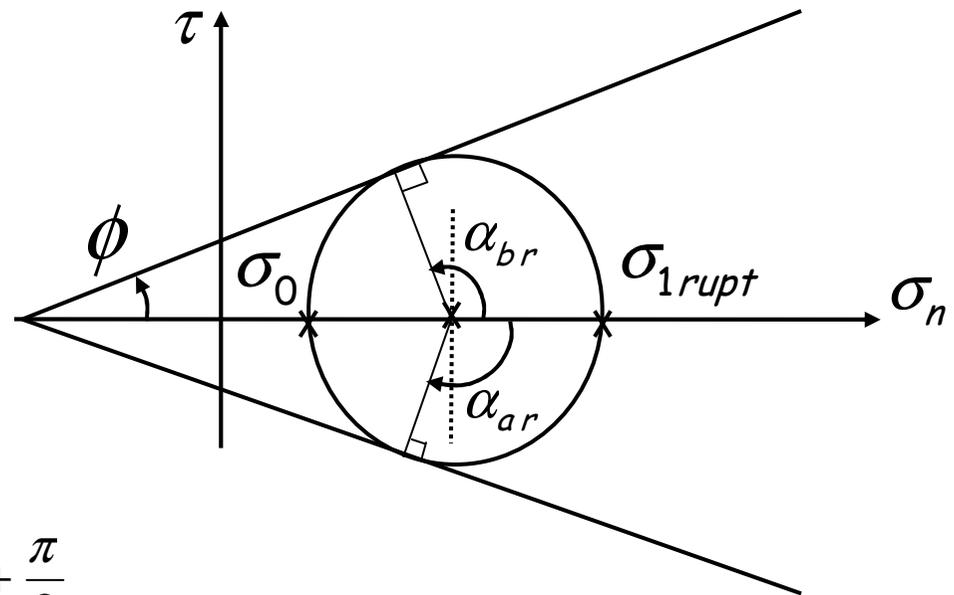
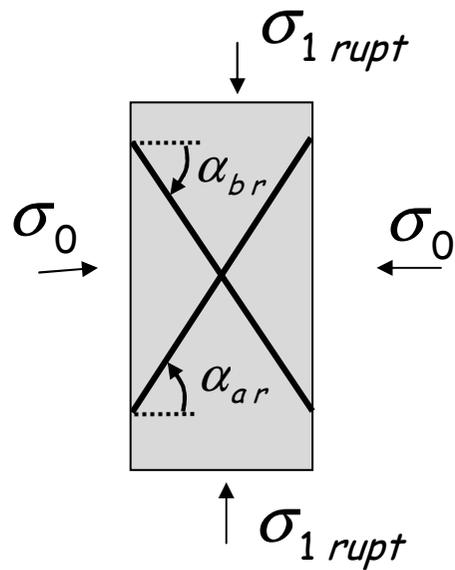


$$\sigma_1 = \sigma_{axial}$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0$$

# Essai de cisaillement au triaxial

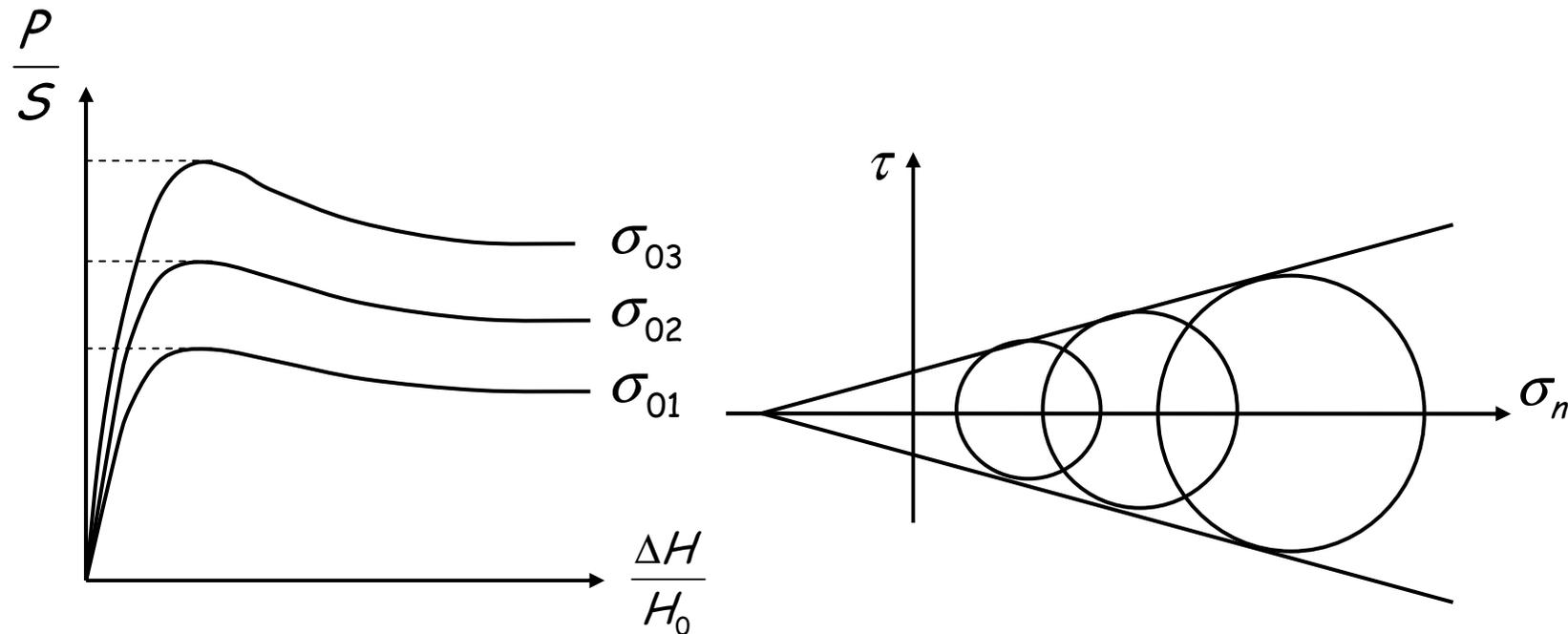
## Faciès de rupture



$$\begin{cases} \alpha_{br} = \phi + \frac{\pi}{2} \\ \alpha_{ar} = -(\phi + \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

# Essai de cisaillement au triaxial

## Dépouillement



→ Nécessité de 3 essais sur des échantillons identiques avec 3 pressions de confinement  $\sigma_0$  différentes

# Comportement des matériaux pulvérulents

- Essais
  - Sur sol sec ou sur sol saturé mais drainage ouvert

- Courbe intrinsèque de rupture :

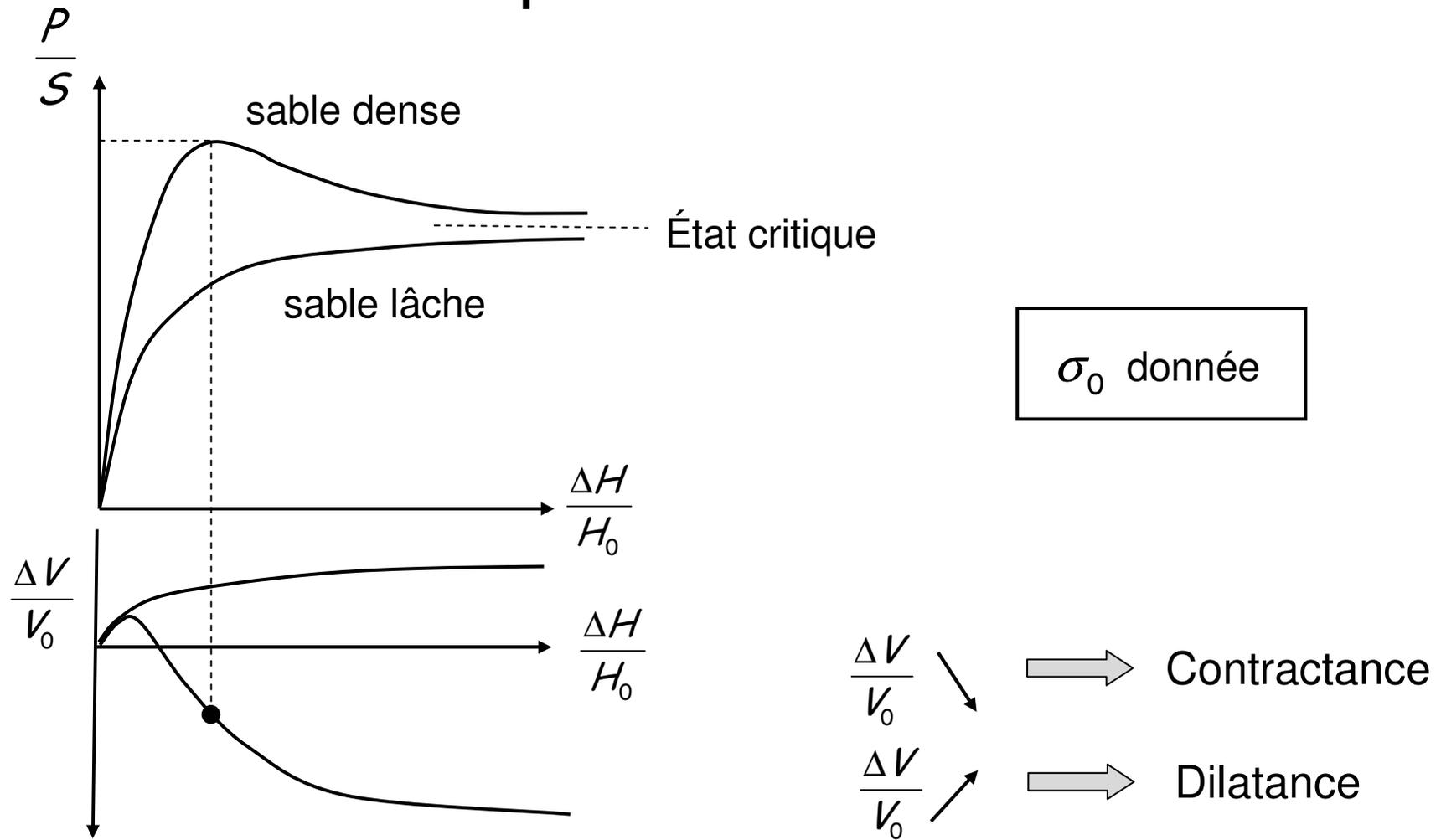
$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \phi$$

TYPE DE SOL	ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE EFFECTIF $\phi'$			
	État lâche		État compact	
	Particules arrondies	Particules angulaires	Particules arrondies	Particules angulaires
Gravier	35°	40°	45°	50°
Gravier et sable	36°	42°	40°	48°
Sable à granulométrie étalée	34°	39°	40°	45°
Sable fin à moyen à granulométrie serrée	30°	35°	37°	43°
Sable silteux	25° à 35°		30° à 36°	
Silt	28° à 32°		30° à 35°	

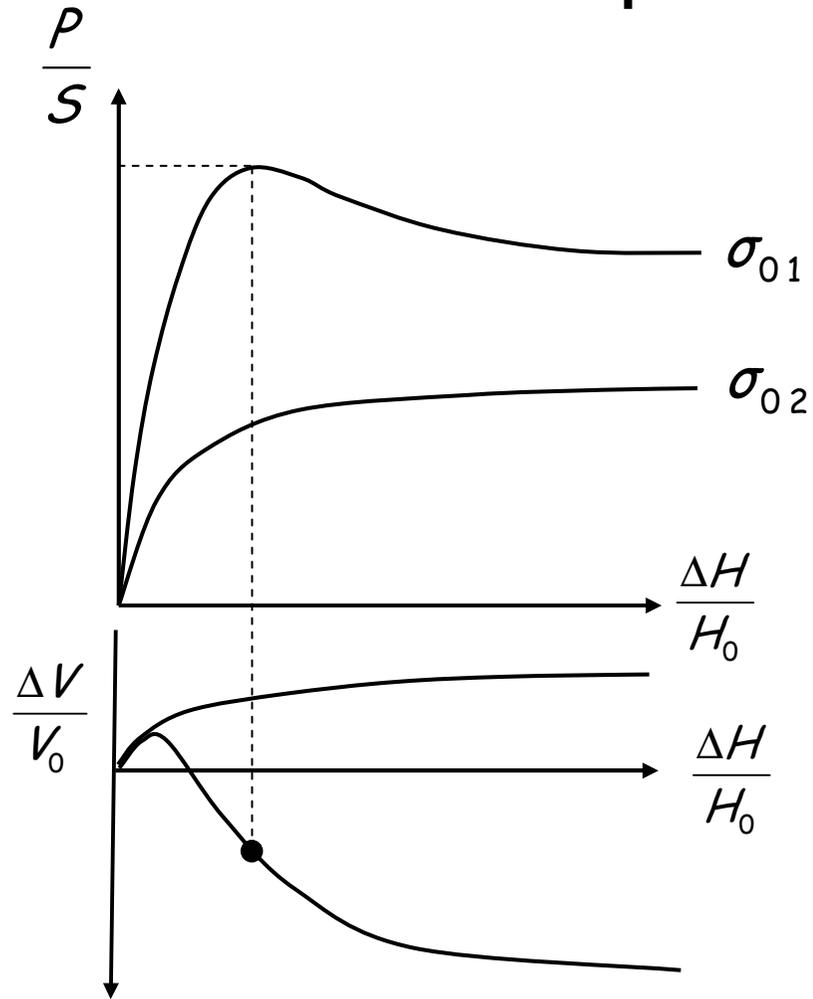
→  $C = 0 \text{ kPa}$

→  $\phi_{\text{moyen}} \approx 36^\circ$

# Comportement des matériaux pulvérulents



# Comportement des matériaux pulvérulents



$$\underline{\sigma_{02} \geq \sigma_{01}}$$

$e_0$  donné

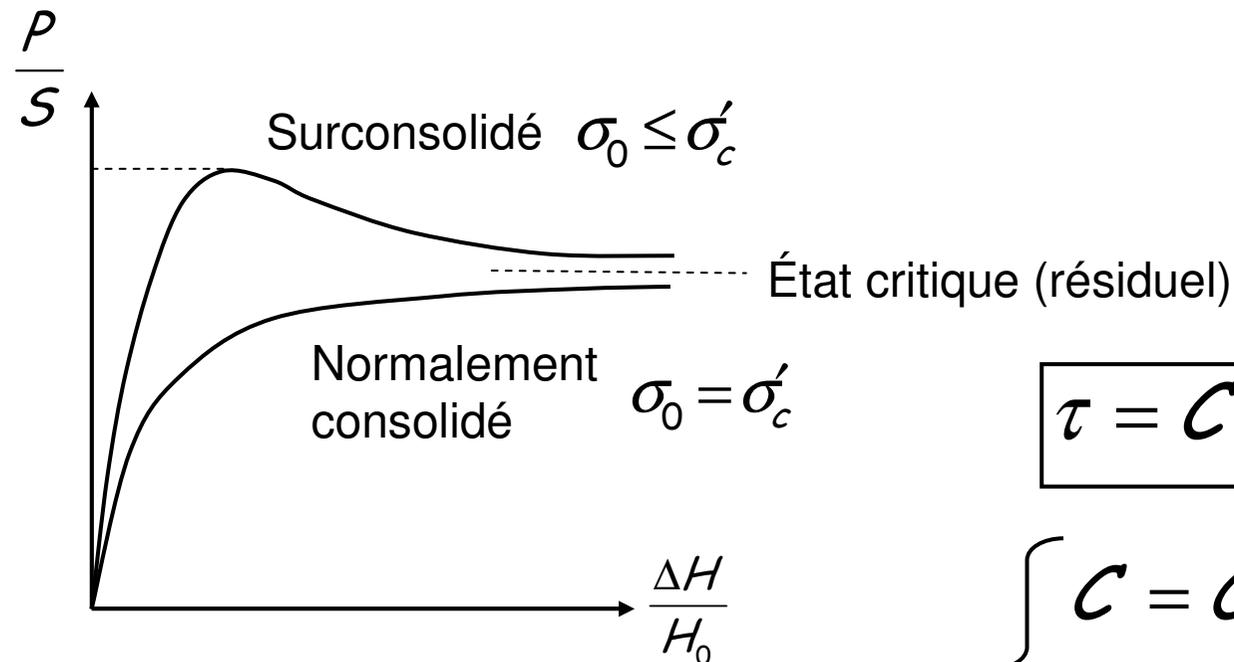
# Comportement des sols fins

- Essais (ex essai au triaxial)
  - Influence de la vitesse de sollicitation → comportement visqueux
  - Attention : intervention de  $u$  → à mesurer
  - Passage aux contraintes effectives → squelette solide

Etape 1	Etape 2	$u$	Caractéristiques directes
<u>Drainage ouvert</u> → Consolidé	Drainage ouvert → Drainé	Pas d'influence	Intrinsèques $c'$ $\phi'$
Drainage ouvert → Consolidé	Drainage fermé → Non drainé	À mesurer	Non intrinsèques $c_{cu}$ $\phi_{cu}$
Drainage fermé → Non consolidé	Drainage fermé → Non drainé	À mesurer	Intrinsèques $c_u$ $\phi_{uu}$

# Comportement des sols fins

- Essai consolidé drainé (CD)



$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c = c' \approx 0 \quad (\text{qq kPa}) \\ \phi = \phi' \end{array} \right.$$

# Comportement des sols fins

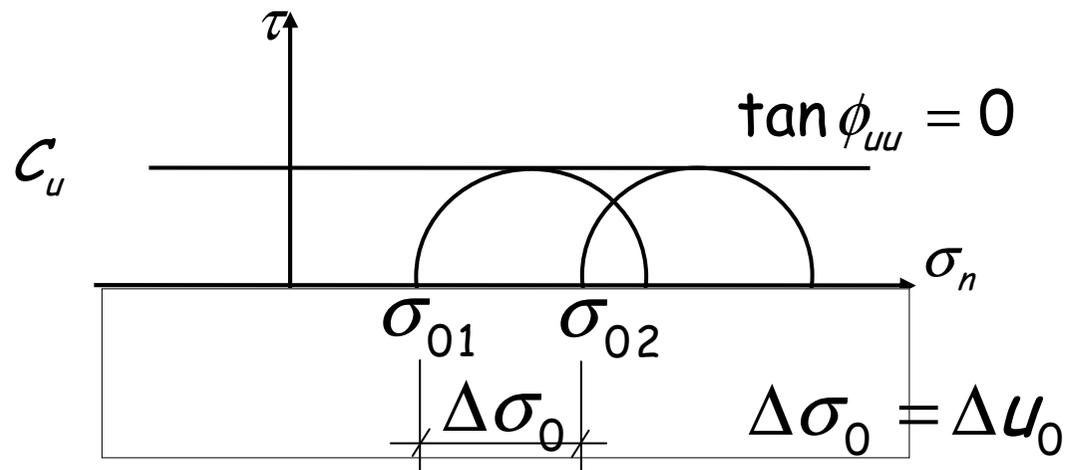
- Essai non consolidé non drainé (UU)

Etape 1

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \sigma'_1 + u = \sigma_0 \\ \sigma_3 = \sigma'_3 + u = \sigma_0 \\ u \nearrow \text{jusqu'à } u_0 \end{array} \right.$$

Etape 2

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 \nearrow \text{jusqu'à rupture} \\ \sigma_3 = \text{cste} \\ u \text{ évolue} \end{array} \right.$$

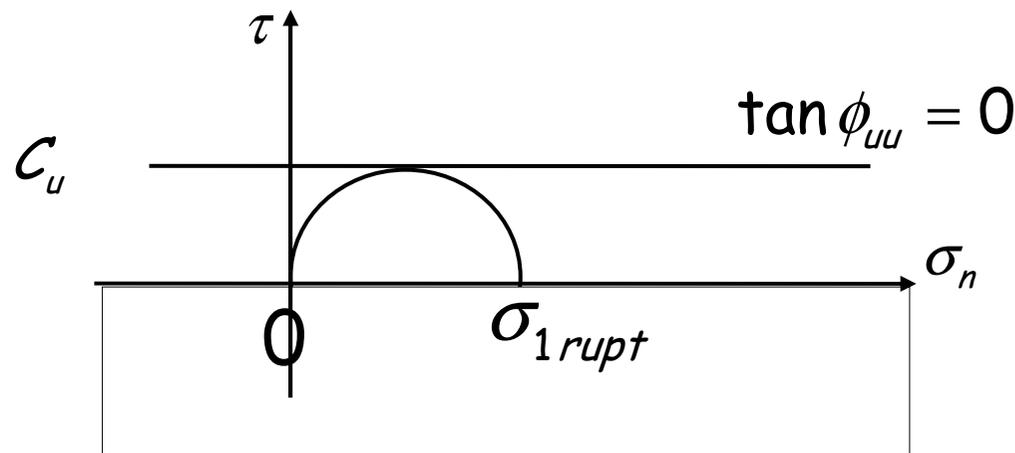


# Comportement des sols fins

- Essai non consolidé non drainé (UU)

$c_u$  fonction de  $\sigma'_c$  (cf essai CU)

$c_u$  peut être trouvé par un essai de compression simple



$$c_u = \frac{\sigma_{1rupt}}{2}$$

# Comportement des sols fins

- Essai consolidé non drainé (CU)

Etape 1

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma'_1 = \sigma_0 \\ \sigma_3 = \sigma'_3 = \sigma_0 \\ u = 0 \end{cases}$$

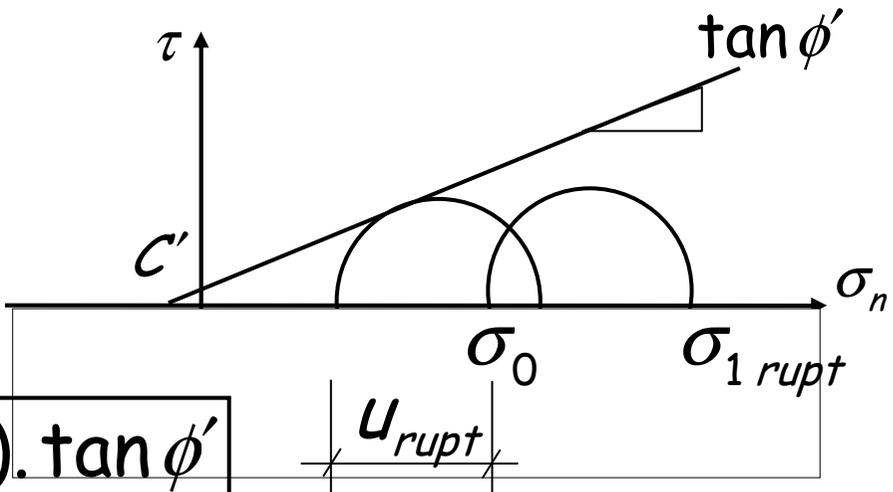
Etape 2

$$\begin{cases} \sigma_1 \nearrow \text{ jusqu'à rupture} \\ \sigma_3 = \text{cste} \\ u \text{ évolue} \end{cases}$$

Rupture

$$\begin{cases} \sigma_{1 \text{ rupt}} = \sigma'_{1 \text{ rupt}} + u_{\text{rupt}} \\ \sigma_{3 \text{ rupt}} = \sigma'_{3 \text{ rupt}} + u_{\text{rupt}} = \sigma_0 \end{cases}$$

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_{\text{rupt}}) \cdot \tan \phi'$$



# Comportement des sols fins

Argile très molle	$C_u < 25 \text{ kPa}$
Argile molle	$25 \text{ kPa} < C_u < 50 \text{ kPa}$
Argile consistante	$50 \text{ kPa} < C_u < 100 \text{ kPa}$
Argile raide	$100 \text{ kPa} < C_u$

