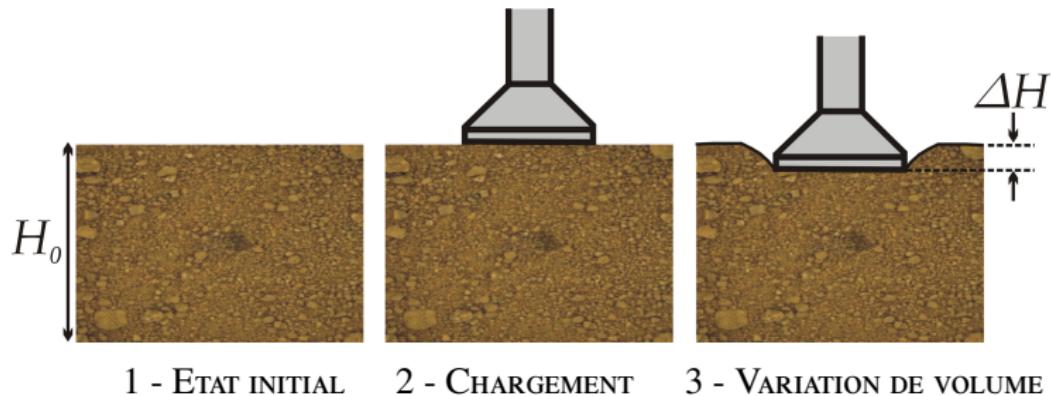


MODULE M3101 - BASES DE LA GÉOTECHNIQUE

Cours 2 - Tassements et consolidation des sols

Loi de consolidation primaire de Terzaghi et Essai œdométrique

Qu'est-ce que le tassement d'un sol ?



1 - ETAT INITIAL

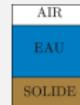
2 - CHARGEMENT

3 - VARIATION DE VOLUME

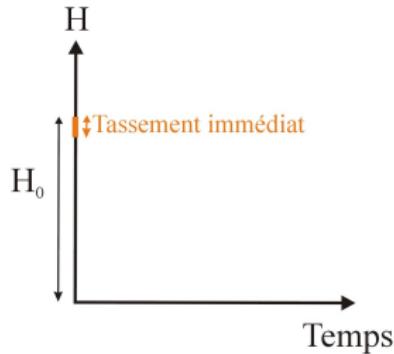
Le tassement est le déplacement *vertical* du sol, ΔH ,
consécutif à l'application d'une surcharge.

Double problématique :

- Connaître l'**amplitude** des tassements, $\Rightarrow \Delta H$
- Evaluer le **temps** de tassement $\Rightarrow \Delta H = f(t)$



Causes et évolution du tassement



Le tassement peut résulter de :

- une déformation des grains solides (élasticité),
- une compression de l'air ou de l'eau interstitielle,
➡ Eau supposée incompressible

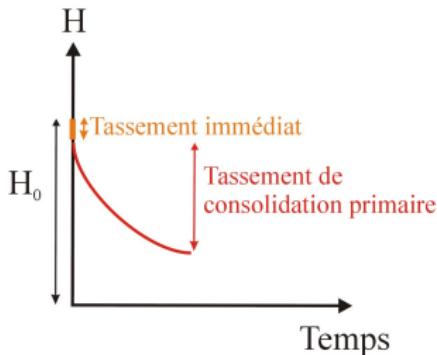
➡ **TASSEMENT IMMÉDIAT**

Elasticité des grains :

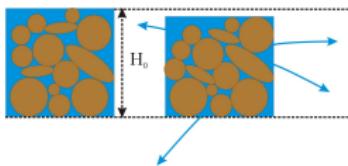




Causes et évolution du tassement



Drainage :



Le tassement peut résulter de :

- une déformation des grains solides (élasticité),
- une compression de l'air ou de l'eau interstitielle,

➡ Eau supposée incompressible

➡ TASSEMENT IMMÉDIAT

- une évacuation de l'air contenu dans les vides

➡ Instantané

➡ Problèmes avec les sols saturés

- une évacuation de l'eau interstitielle (drainage)

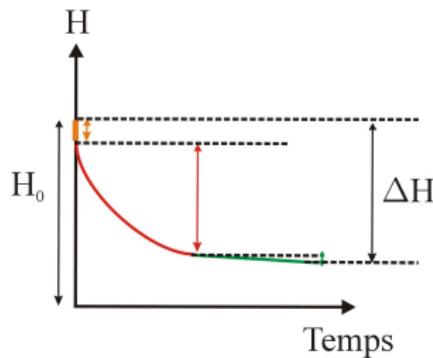
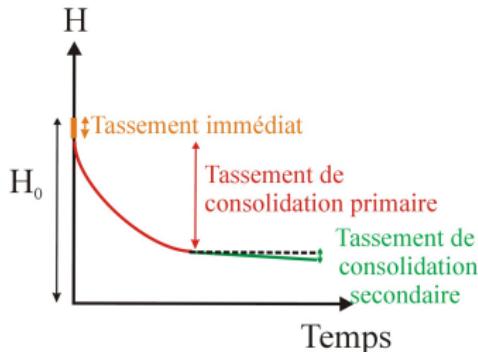
➡ Influence du temps d'évacuation

➡ Perméabilité

➡ TASSEMENT DE CONSOLIDATION PRIMAIRE



Causes et évolution du tassement



Le tassement peut résulter de :

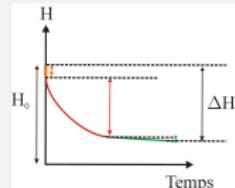
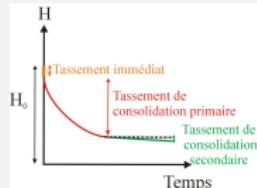
- une déformation des grains solides (élasticité),
- une compression de l'air ou de l'eau interstitielle,
➡ **Eau supposée incompressible**

➡ TASSEMENT IMMÉDIAT

- une évacuation de l'air contenu dans les vides
➡ **Problèmes avec les sols saturés**
- une **évacuation de l'eau (drainage)** interstitielle
➡ **Influence du temps d'évacuation (perméabilité)**

➡ TASSEMENT DE CONSOLIDATION PRIMAIRE

- une compression par fluage des grains
➡ **TASSEMENT DE CONSOLIDATION SECONDAIRE**



Causes et évolution du tassement

TASSEMENT IMMÉDIAT

Généralement de faible amplitude

Déformation à volume constant

+

TASSEMENT DE CONSOLIDATION PRIMAIRE

Souvent le plus important (= la plus grande amplitude)

Non réversible et dépendant du temps

+

TASSEMENT DE CONSOLIDATION SECONDAIRE

Généralement de faible amplitude

Important pour les sols organiques

Tassement de consolidation primaire

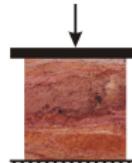
- ➡ Tassement consécutif aux **mouvements de l'eau** (sols saturés)
- ➡ La vitesse d'écoulement de l'eau dépend de **la perméabilité du sol**

SOLS GRENU Saturés

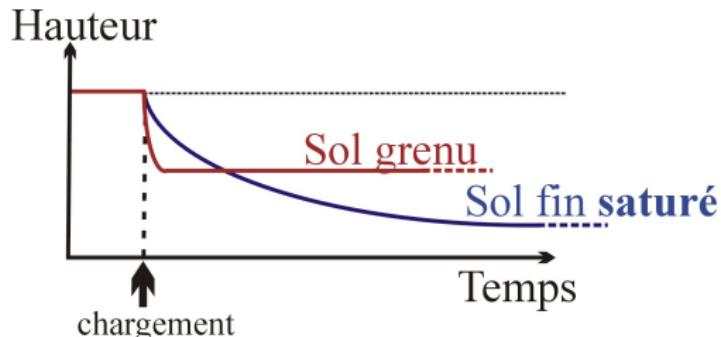


- Fortes perméabilités
- Drainage quasi immédiat
- Tassements quasi instantanés

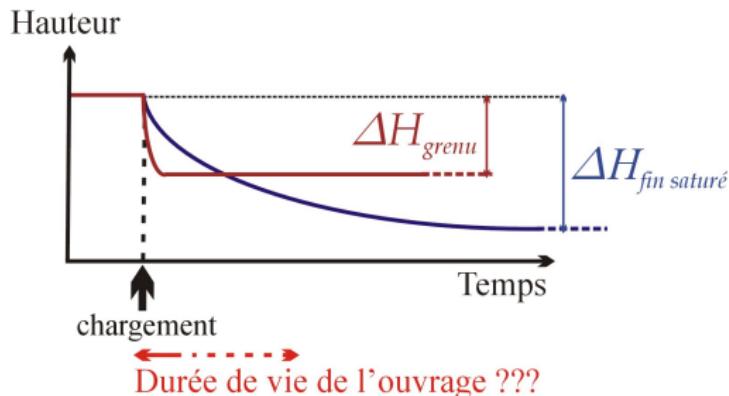
SOLS FINS SATURÉS



- Faibles perméabilités
- Drainage lent, voire très lent
- Tassements différés



Compressibilité et Consolidation

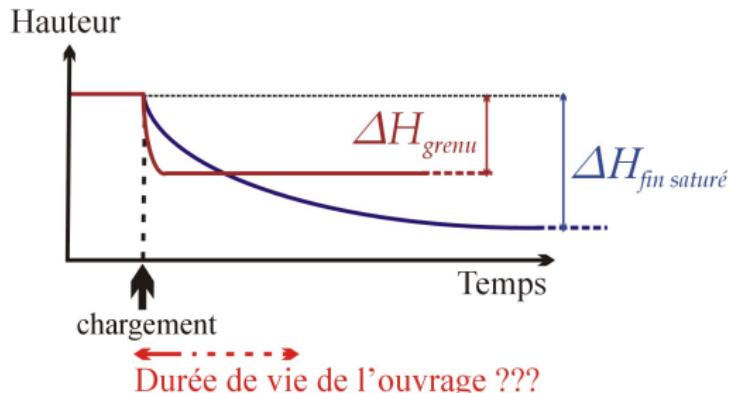


Nécessité de s'intéresser :

- à l'**amplitude des tassements** en fonction de la charge appliquée
 - ➡ Etude de la relation contrainte/déformation du sol

Etude de la **compressibilité** du sol.

Compressibilité et Consolidation

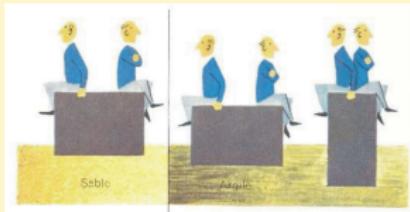


Nécessité de s'intéresser :

- à l'**amplitude des tassements** en fonction de la charge appliquée
 - ➡ Etude de la relation contrainte/déformation du sol
Etude de la compressibilité du sol.
- à l'évolution du tassement **en fonction du temps**
 - ➡ Etude de la vitesse de tassement
Etude de la consolidation d'un sol.

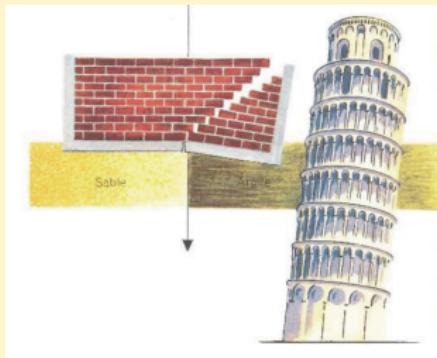
En quoi le tassement peut-il être problématique ?

TASSEMENTS D'ENSEMBLE OU TASSEMENTS UNIFORMES



Souvent acceptables pour l'ouvrage à condition de les **prévoir** correctement.

TASSEMENTS DIFFÉRENTIELS



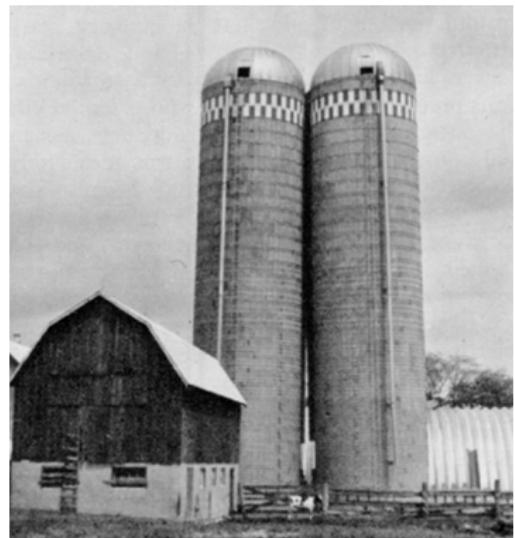
➡ Problèmes de stabilité et Fissurations

Principales causes possibles :

- Hétérogénéité du sol
- Mauvaise répartition des charges
- Défauts des fondations (mauvais dimensionnement ou mauvaise exécution).

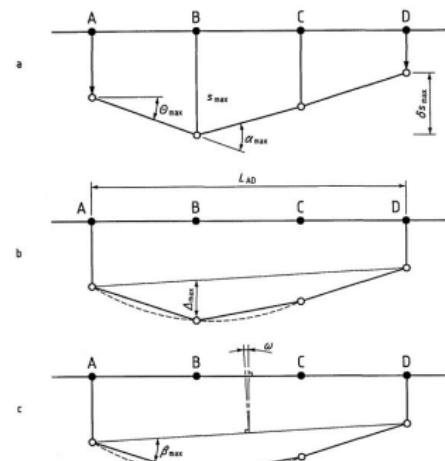
Les illustrations sont issues de *Au pied du mur* de Robert l'Hermite, Société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics.

En quoi le tassement peut-il être problématique ?



En quoi le tassement peut-il être problématique ?

Tassement admissible ou préjudiciable ? ➔ selon la structure de l'ouvrage, sa rigidité



Légende

- a Définitions du tassement s , du tassement différentiel δs , de la rotation θ et de la déformation angulaire α
- b Définitions de la déflexion Δ et de la déflexion relative ΔL
- c Définitions de l'inclinaison ω et de la rotation relative (torsion angulaire) β

Figure H.1 — Définitions du mouvement des fondations

ROTATIONS RELATIVES

- A l'ELS, comprises entre 1/2000^{ème} et 1/300^{ème}
- 1/500^{ème} souvent admissible
- A l'ELU, limite à 1/150^{ème}

TASSEMENTS

Pour les structures courantes à fondations isolées :

- $s_{max} = 50 \text{ mm}$
- $\delta s_{max} = 20 \text{ mm}$



Pour des structures courantes et des chargements uniformes !

Où en est-on ?

COURS 2

Tassements et Consolidation des sols

- La notion de tassement ✓

Où en est-on ?

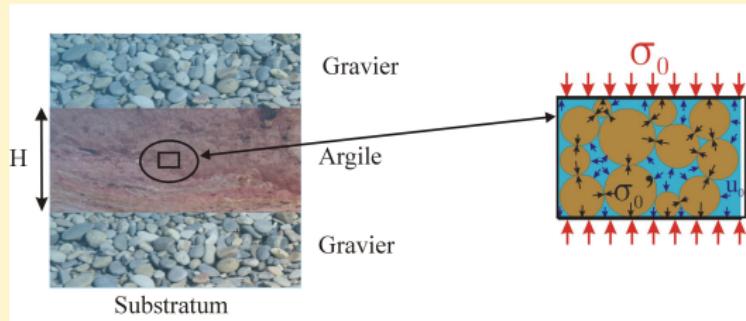
COURS 2

Tassements et Consolidation des sols

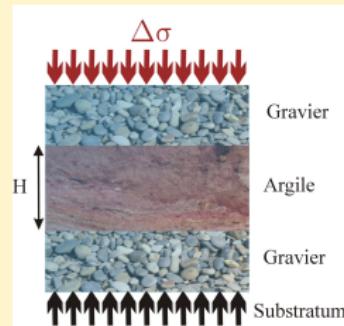
- **La notion de tassement** ✓
- **Les mécanismes de la consolidation des sols**
 - L'analogie de Terzaghi

Les fondamentaux de la consolidation primaire

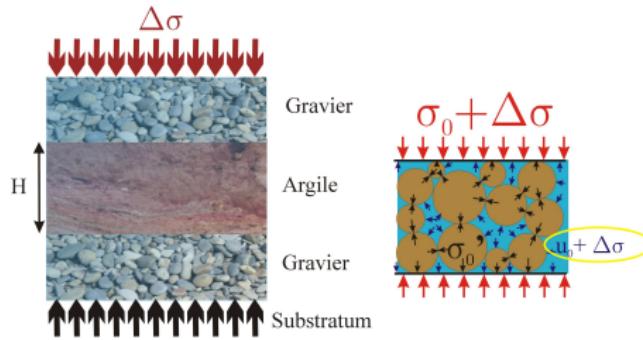
Etat initial



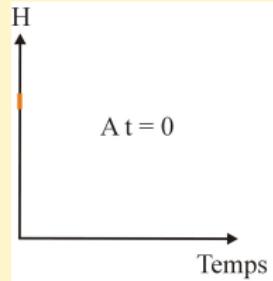
Ajout d'une surcharge $\Delta\sigma$



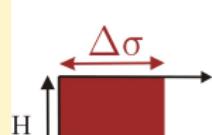
Les fondamentaux de la consolidation primaire (1/3)



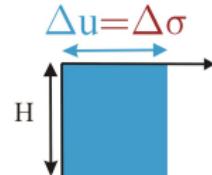
Evolution de la hauteur d'argile



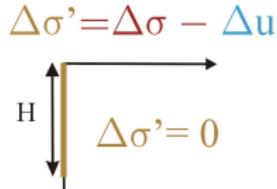
Répartition des contraintes à $t=0$



Accroissement de
contraintes
totales

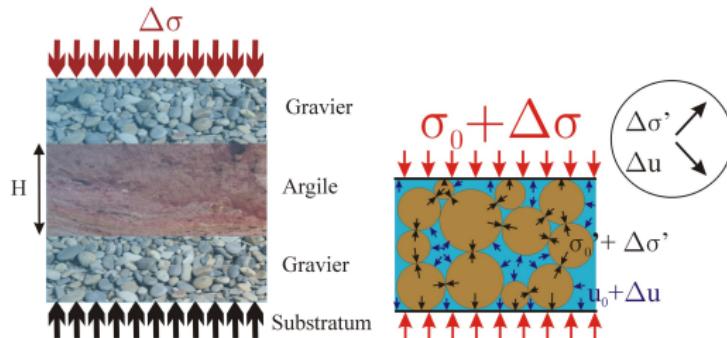


Surpressions
interstitielles

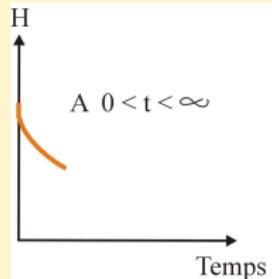


Accroissement de
contraintes
effectives

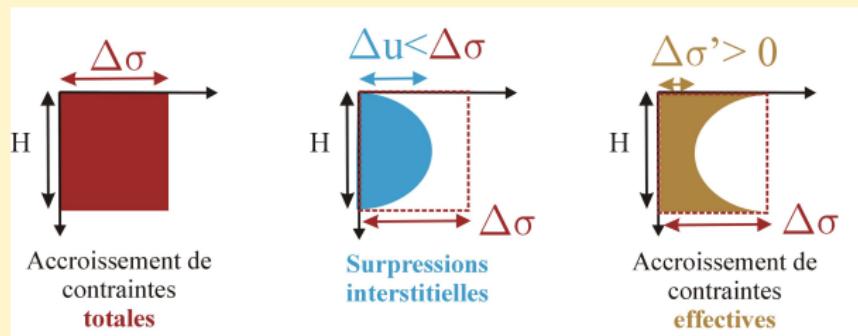
Les fondamentaux de la consolidation primaire (2/3)



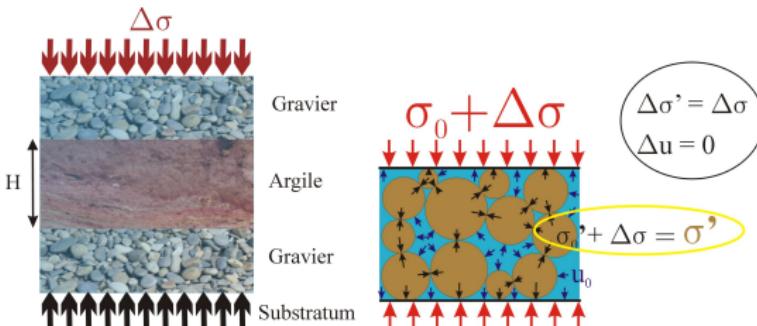
Evolution de la hauteur d'argile



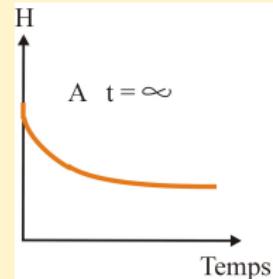
Répartition des contraintes à $0 < t < \infty$ (drainage par deux faces)



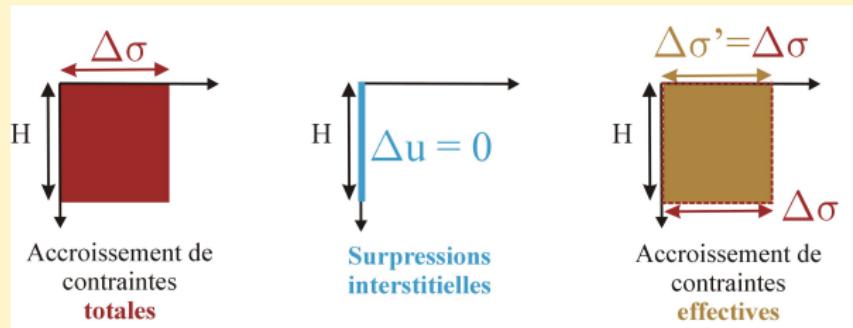
Les fondamentaux de la consolidation primaire (3/3)



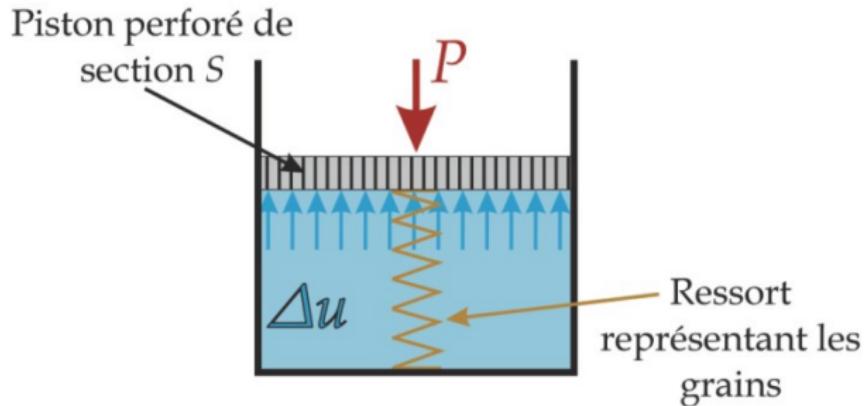
Evolution de la hauteur d'argile



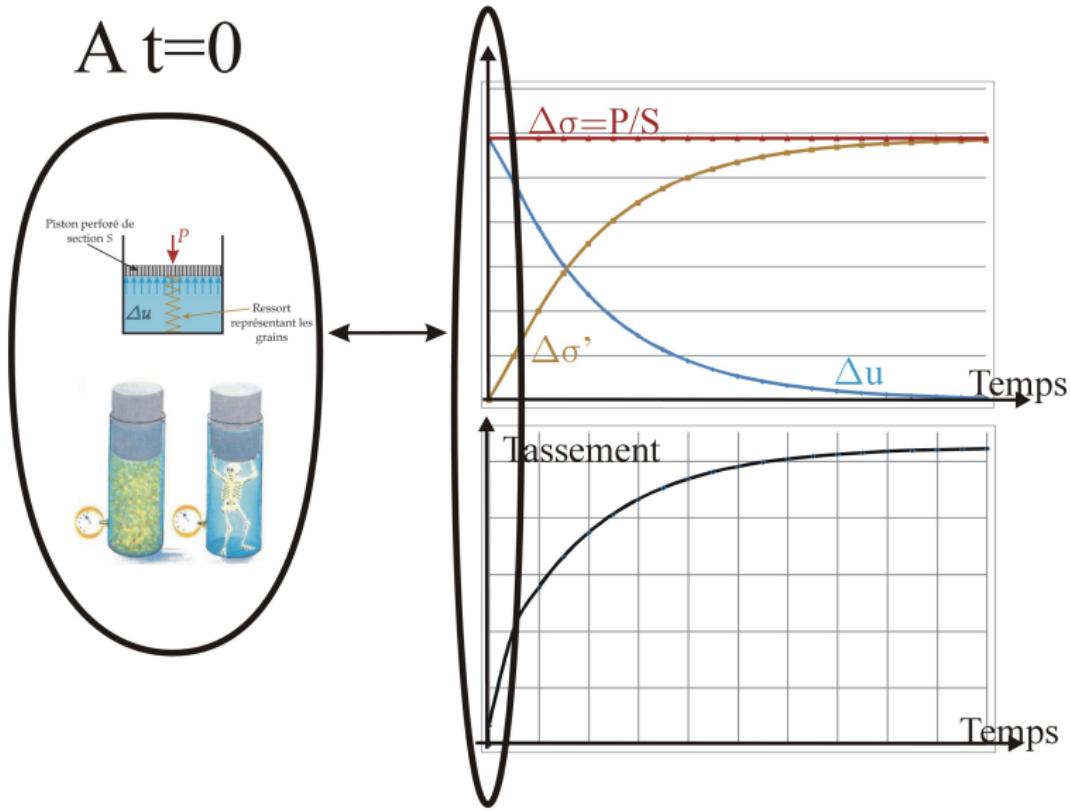
Répartition des contraintes à $t = \infty$



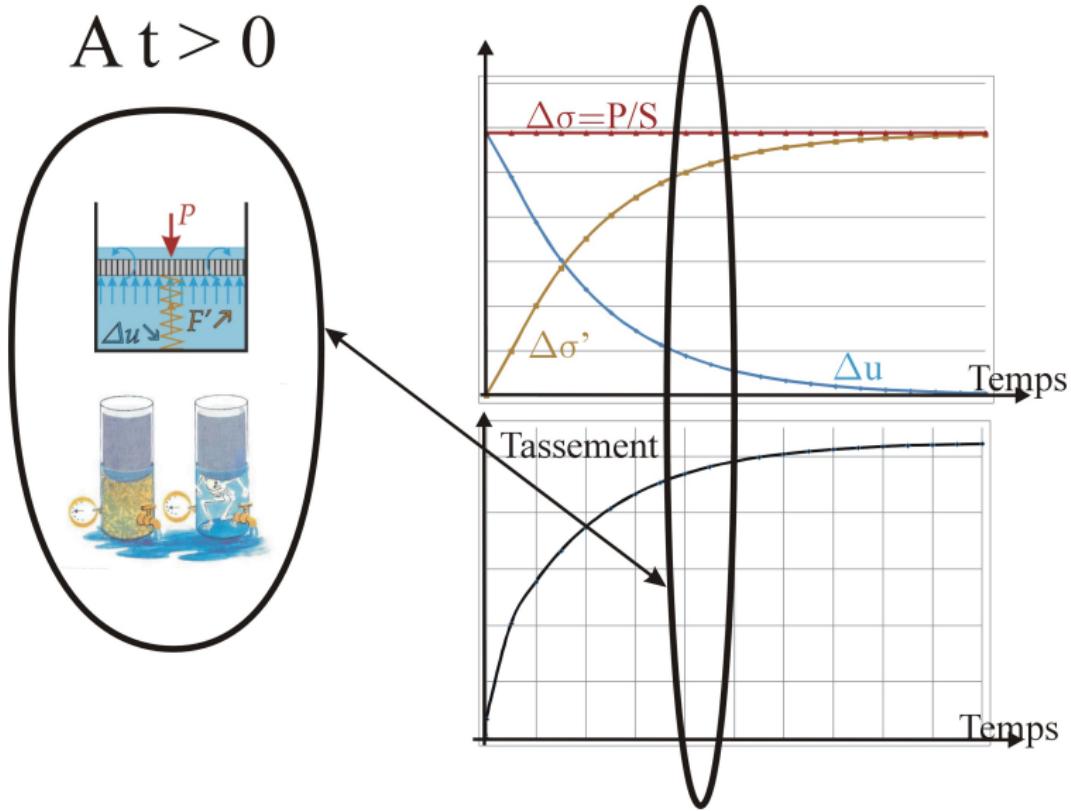
Analogie de Terzaghi et consolidation primaire



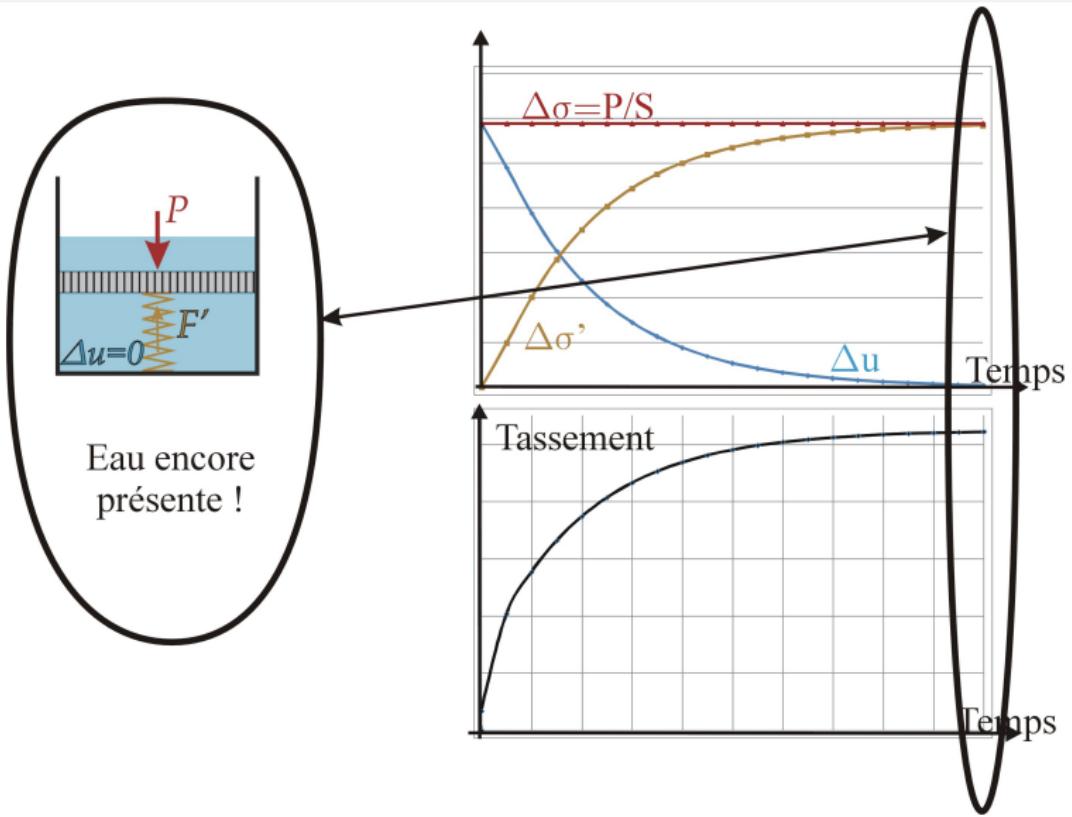
Analogie de Terzaghi et consolidation primaire (à t=0)



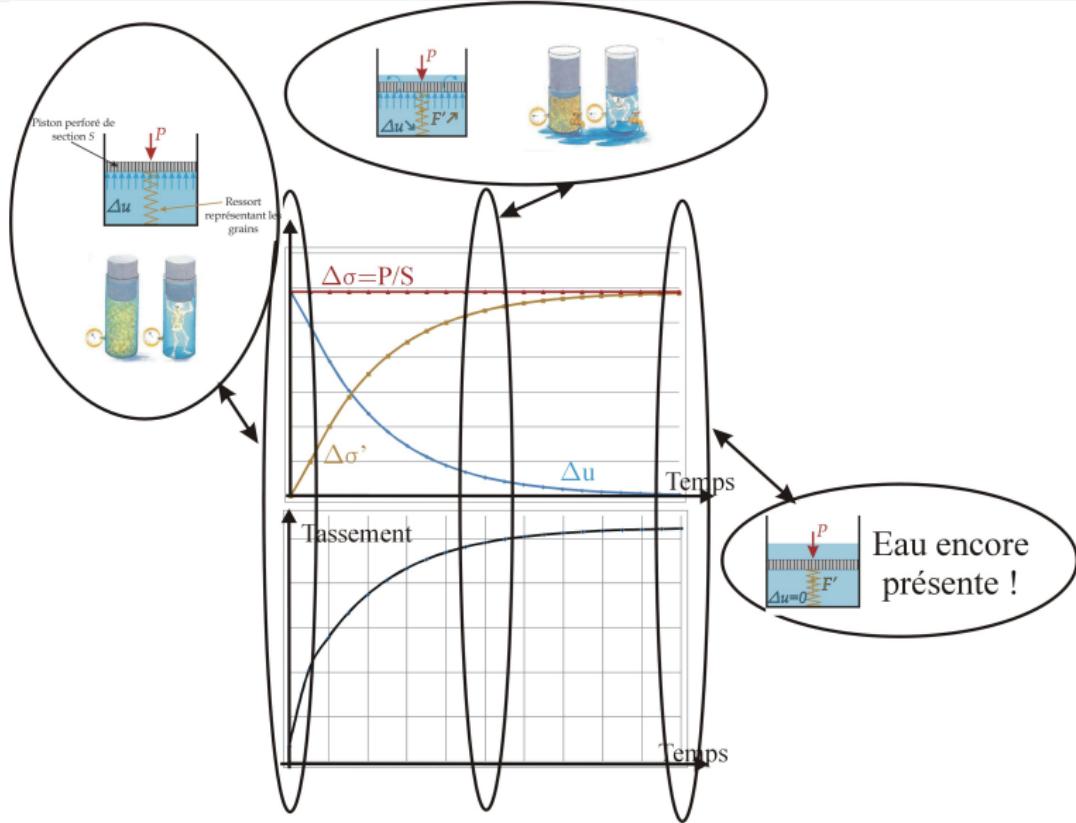
Analogie de Terzaghi et consolidation primaire ($\text{à } 0 < t < \infty$)



Analogie de Terzaghi et consolidation primaire ($\rightarrow t=\infty$)



Analogie de Terzaghi - récapitulatif



Où en est-on ?

COURS 2

Tassements et Consolidation des sols

- La notion de tassement ✓

Où en est-on ?

COURS 2

Tassements et Consolidation des sols

- La notion de tassement ✓
- Les mécanismes de consolidation des sols ✓

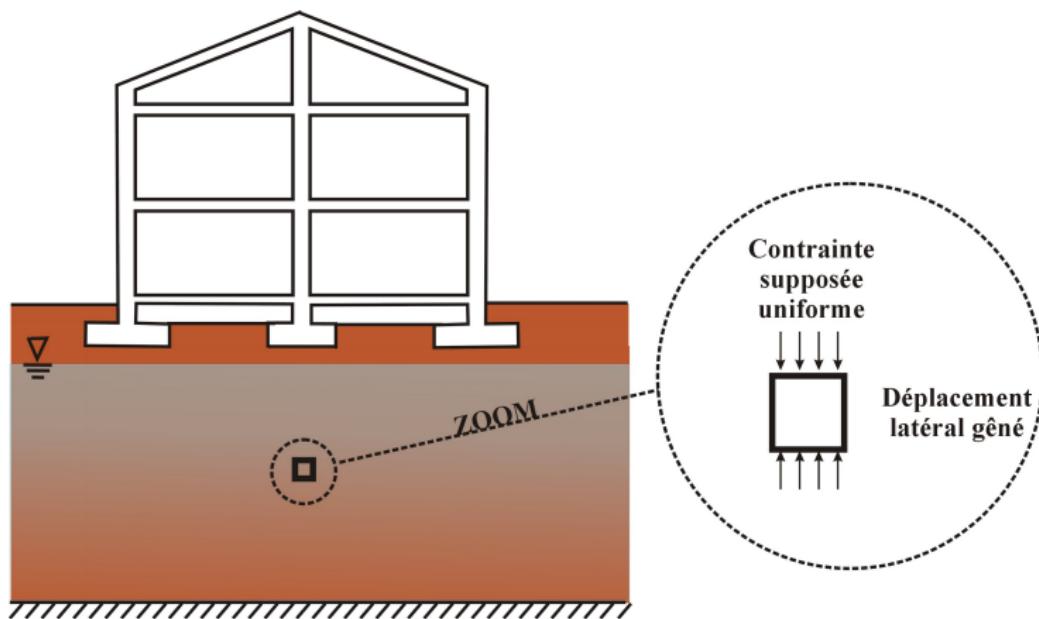
Où en est-on ?

COURS 2

Tassements et Consolidation des sols

- **La notion de tassement** ✓
- **Les mécanismes de consolidation des sols** ✓
- **Etude des tassements en laboratoire : Essai œdométrique**
 - Etude expérimentale de la compressibilité des sols

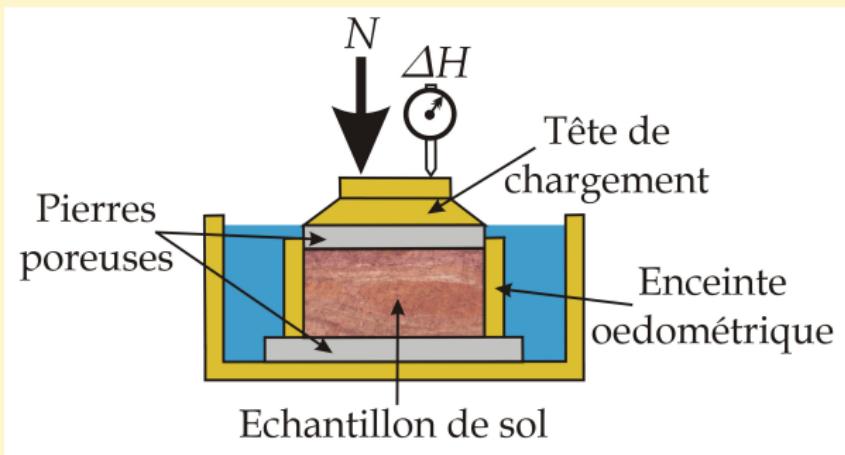
Etude expérimentale de la compressibilité des sols (1/16)



→ Hypothèse de **déformations latérales nulles** = simplification du dispositif expérimental

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (2/16)

PRINCIPE DE L'ŒDOMÈTRE



- Enceinte cylindrique **rígide** (échantillon fretté, déformation transversale nulle)
- Echantillon saturé - Dispositifs drainants inférieur et supérieur
- Dispositif de chargement : application d'un effort axial vertical N
- Système de mesure du déplacement axial ΔH

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (3/16)

Essai œdométrique (XP P 94-090-1, décembre 1997)



Etude expérimentale de la compressibilité des sols (4/16)

PRINCIPE DE L'ESSAI GÉDOMÉTRIQUE (XP P 94-090-1, DÉCEMBRE 1997)

- ➊ Sollicitation par paliers de chargement et de déchargement (σ_z maintenue constante sur chaque palier et doublée entre deux paliers successifs).
 - ➡ Chaque palier est maintenu **au moins 24 heures**.
 - ➡ Déformation relative ($\Delta H/H_i < 5.10^{-4}$) pour une durée de 8 heures.

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (4/16)

PRINCIPE DE L'ESSAI OEDOMÉTRIQUE (XP P 94-090-1, DÉCEMBRE 1997)

- ① Sollicitation par paliers de chargement et de déchargement (σ_z maintenue constante sur chaque palier et doublée entre deux paliers successifs).
 - ➡ Chaque palier est maintenu **au moins 24 heures**.
 - ➡ Déformation relative ($\Delta H/H_i < 5.10^{-4}$) pour une durée de 8 heures.
- ② Au cours de chaque palier de chargement,

CONSOLIDATION

➡ Mesure du tassement ΔH en fonction du temps,

COMPRESSIBILITÉ

➡ Mesure du tassement ΔH et calcul de l'indice des vides, e , de l'éprouvette de sol **à la fin de chaque palier**.

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (4/16)

PRINCIPE DE L'ESSAI ODOMÉTRIQUE (XP P 94-090-1, DÉCEMBRE 1997)

- ① Sollicitation par paliers de chargement et de déchargement (σ_z maintenue constante sur chaque palier et doublée entre deux paliers successifs).
 - ➡ Chaque palier est maintenu **au moins 24 heures**.
 - ➡ Déformation relative ($\Delta H/H_i < 5.10^{-4}$) pour une durée de 8 heures.
- ② Au cours de chaque palier de chargement,

CONSOLIDATION

- ➡ Mesure du tassement ΔH en fonction du temps,

- ③ Expression des résultats

COMPRESSIBILITÉ

- ➡ Mesure du tassement ΔH et calcul de l'indice des vides, e , de l'éprouvette de sol à la fin de chaque palier.

COURBE DE CONSOLIDATION

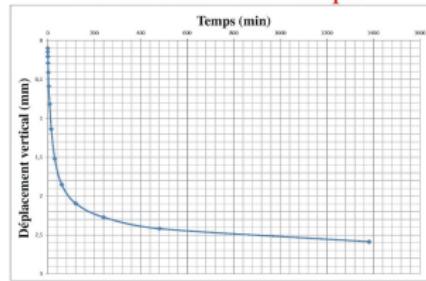
$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H} = f(\log(\text{temps})) \quad \text{ou} \quad \varepsilon_z = f(\sqrt{(\text{temps})})$$

COURBE DE COMPRESSIBILITÉ

$$e = f(\sigma_z \text{ en échelle log})$$

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (5/16)

Déplacement vertical
en fonction du temps



$\sigma \rightarrow$

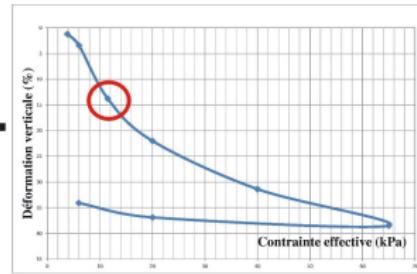
Exploitation

$\rightarrow \Delta H$



$\sigma \uparrow_{(x 2)} \leftarrow$

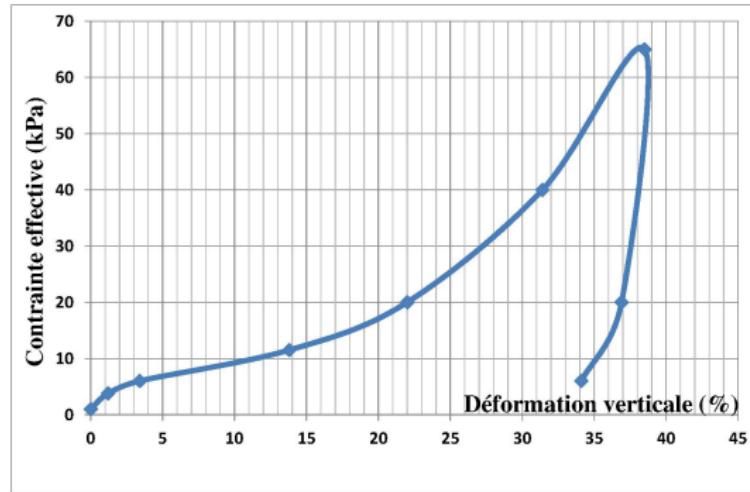
$\leftarrow \Delta H / H_0$



1 point de la courbe $\varepsilon_z = f(\sigma)$

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (6/16)

Tracé de σ en fonction de ε_z lors d'un cycle charge/décharge



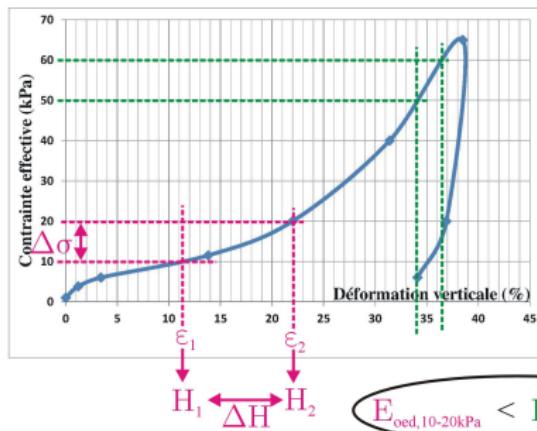
- ➡ Comportement non linéaire
- ➡ Comportement non réversible (pas de superposition charge/décharge)

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (7/16)

MODULE OEDOMÉTRIQUE

$$E_{oed} = - \frac{\Delta\sigma}{\Delta H} \cdot \frac{H}{H}$$

- **NON CONSTANT**
- Dépend du niveau initial de contrainte considéré
- Dépend de l'intervalle de contrainte considéré



$$E_{oed,10-20kPa} = - \frac{\Delta\sigma}{\Delta H} \cdot \frac{H_1}{H_1}$$

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (8/16)

Ordre de grandeurs du module œdométrique

MODULE ŒDOMÉTRIQUE

	Argile molle	Argile raide	Sable
E_{oed} (MPa) (pour $\sigma_{zz} < 1$ MPa)	Entre 0.1 et 1	Entre 1.5 et 10	Entre 10 et 300

Valeurs issues du cours pratique de Mécanique des Sols, G. Sanglerat, G. Olivari et B. Cambou

POUR MÉMOIRE :

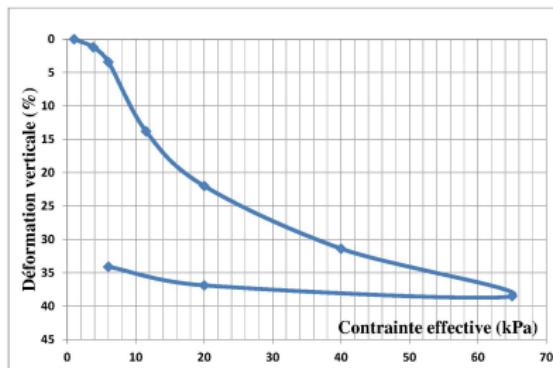
MODULES D'ÉLASTICITÉ DE MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION USUELS

	Bois (/ fibres)	Béton	Acier
E (MPa)	9000 à 16000	30000 à 50000	210000

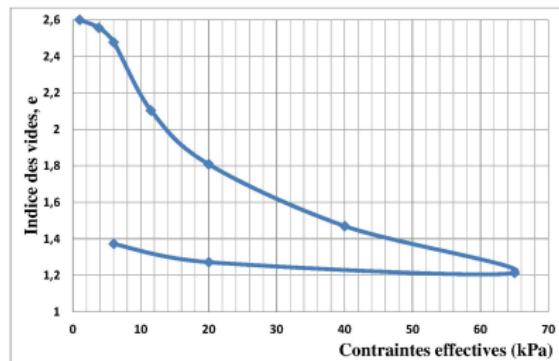
Etude expérimentale de la compressibilité des sols (9/16)

CONTRAINTES EN ABSCISSES DES TRACÉS

DÉFORMATION VERTICALE

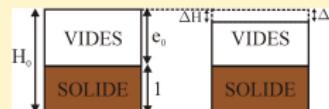


INDICE DES VIDES



Passage du tassement (ΔH) à la variation d'indice des vides (Δe)

Incompressibilité des grains



$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

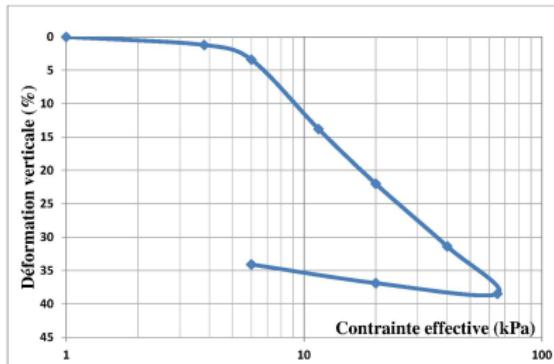
➡ Courbes fortement non linéaires

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (10/16)

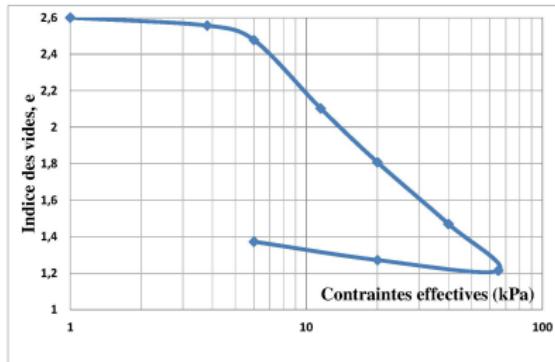
CONTRAINTES EN ÉCHELLE LOGARITHMIQUE !

CONTRAINTES EN ABSCISSES DES TRACÉS ET EN ÉCHELLE LOGARITHMIQUE

DÉFORMATION VERTICALE



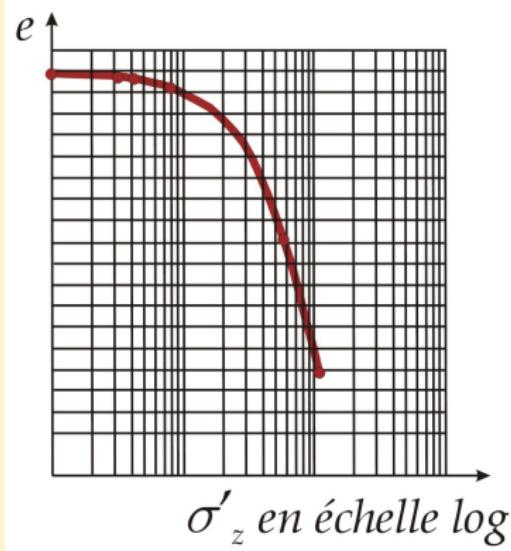
INDICE DES VIDES



➡ Succession de portions quasi linéaires !

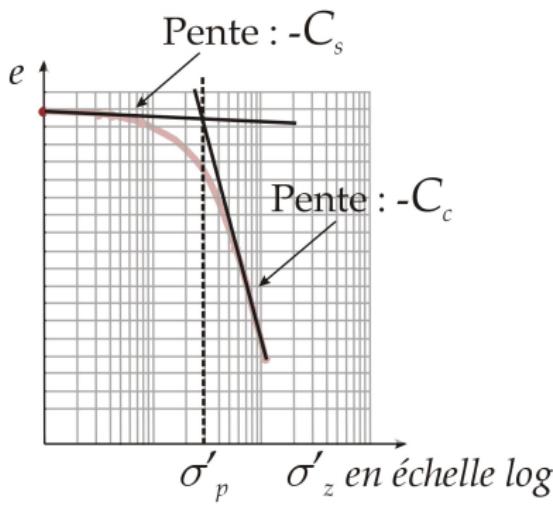
Etude expérimentale de la compressibilité des sols (11/16)

ALLURE DE LA COURBE ODOMÉTRIQUE (EN CHARGE) : $e = f(\sigma_z \text{ EN ÉCHELLE LOG})$



Etude expérimentale de la compressibilité des sols (11/16)

ALLURE DE LA COURBE OEDOMÉTRIQUE (EN CHARGE) : $e = f(\sigma_z \text{ EN ÉCHELLE LOG})$



- Diagramme œdométrique à **deux branches** : l'une de pente $-C_s$, l'autre de pente $-C_c$.

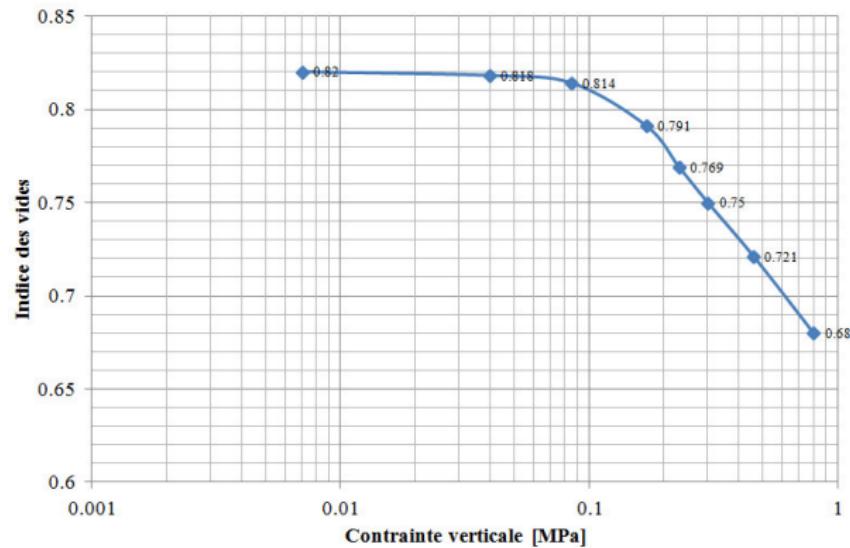
$$0 \leq C_s < C_c$$

- C_s est l'**indice de recompression**
- C_c est l'**indice de compression** :

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_z}$$
- A l'intersection des deux branches de la courbe se trouve la **contrainte de préconsolidation** σ'_p

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (12/16)

Exemple de calcul d'indices



Calculez l'indice de compression.

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (13/16)

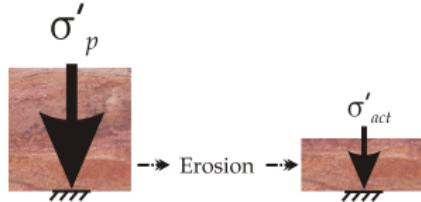
La contrainte de préconsolidation

LES SOLS ONT UNE HISTOIRE

Le processus de consolidation se produit pour une contrainte donnée.

Contrainte de préconsolidation, σ'_p : contrainte effective **maximale** à laquelle le sol a été soumis au cours de son histoire.

Il ne s'agit pas nécessairement de la contrainte effective qu'il supporte actuellement (σ'_{act}).



Le sol garde “en mémoire” l’histoire des chargements antérieurs (comportement plastique).

- ➡ Erosion, glaciation, remblai provisoire, etc.
- ➡ Modifications importantes et **irréversibles** du squelette granulaire pour supporter σ'_p .

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (14/16)

La détermination de l'état de consolidation

SOL NORMALEMENT CONSOLIDÉ

$$\boxed{\text{Si } \sigma'_{act} = \sigma'_p}$$

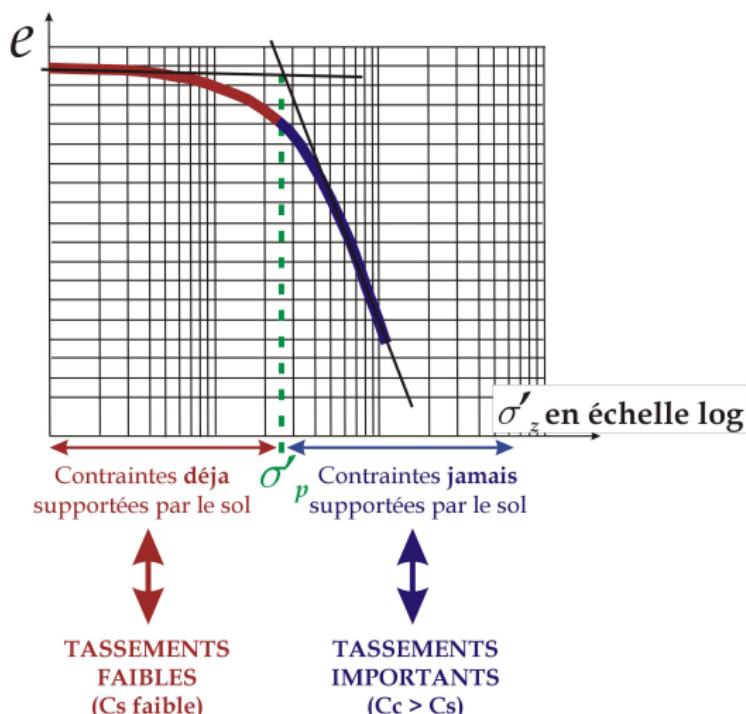
- Sols sujets à développer de grands tassements sous l'effet d'une surcharge

SOL SURCONSOLIDÉ

$$\boxed{\text{Si } \sigma'_{act} < \sigma'_p}$$

- Les tassements seront fortement dépendants de la position de la contrainte effective finale, après surcharge, par rapport à la contrainte de préconsolidation.

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (15/16)

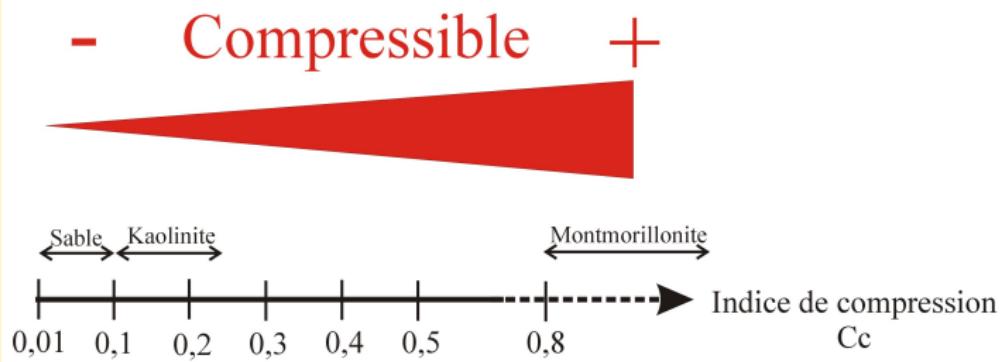


Linéarité par morceaux = Approximation = Ecarts à la réalité

Etude expérimentale de la compressibilité des sols (16/16)

Ordre de grandeurs des paramètres de compressibilité

INDICE DE COMPRESSION



Où en est-on ?

- Principe d'un essai œdométrique ✓

Où en est-on ?

- **Principe d'un essai œdométrique** ✓
- **Comportement des sols** ✓
 - ➡ Importance de l'histoire des sols (chargements et déchargements)
 - ➡ Mécanismes de consolidation des sols saturés

Où en est-on ?

- **Principe d'un essai œdométrique** ✓
- **Comportement des sols** ✓
 - ➡ Importance de l'histoire des sols (chargements et déchargements)
 - ➡ Mécanismes de consolidation des sols saturés
- **Exploitation de l'essai œdométrique**
 - ➡ Paramètres de COMPRESSIBILITE ✓

Où en est-on ?

- **Principe d'un essai œdométrique** ✓

- **Comportement des sols** ✓

- ➡ Importance de l'histoire des sols (chargements et déchargements)
 - ➡ Mécanismes de consolidation des sols saturés

- **Exploitation de l'essai œdométrique**

- ➡ Paramètres de COMPRESSIBILITE ✓

Utilisation de ces paramètres pour le calcul des ΔH ✗

Où en est-on ?

- **Principe d'un essai œdométrique** ✓

- **Comportement des sols** ✓

- ➡ Importance de l'histoire des sols (chargements et déchargements)
- ➡ Mécanismes de consolidation des sols saturés

- **Exploitation de l'essai œdométrique**

- ➡ Paramètres de COMPRESSIBILITE ✓

Utilisation de ces paramètres pour le calcul des ΔH ✗

- ➡ Paramètres de CONSOLIDATION ✗

Utilisation de ces paramètres pour le calcul des temps de tassement ✗

Suite de l'étude des tassements au cours 4