

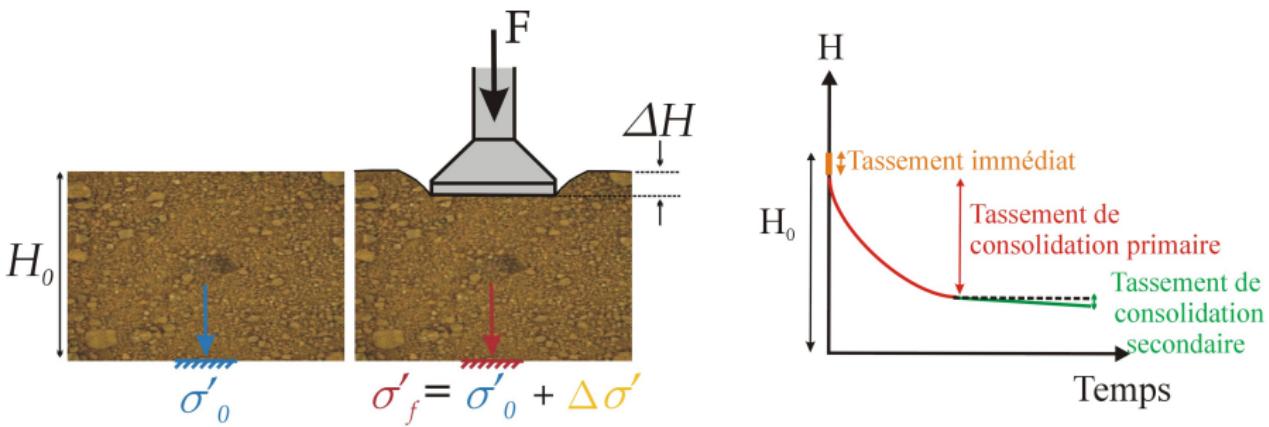
## MODULE M3101 - BASES DE LA GÉOTECHNIQUE

### Cours 4 - Tassements et consolidation des sols

Calcul du tassement de consolidation primaire (tassement final et évolution au cours du temps)

Techniques de réduction des temps de tassement

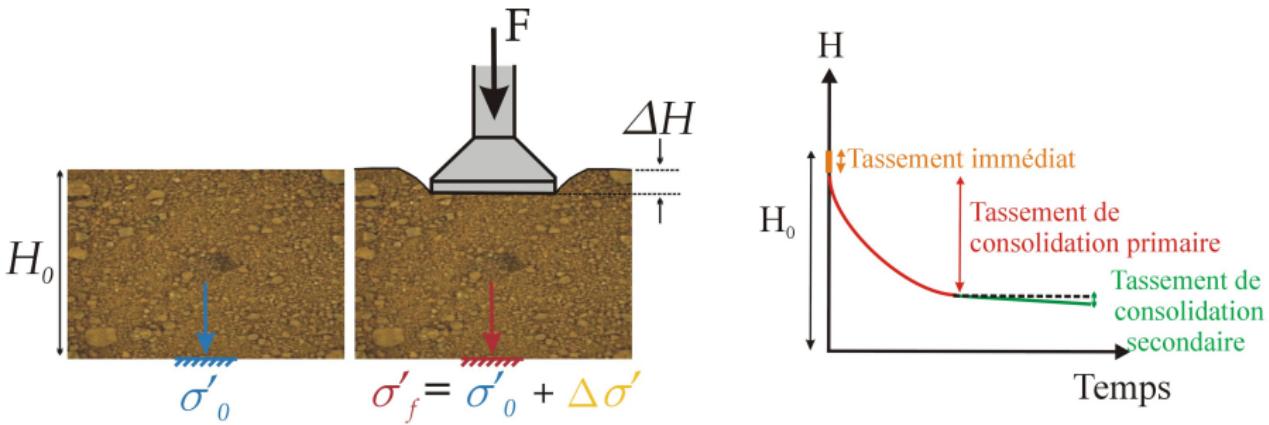
# Calcul du tassement de consolidation primaire



## PROBLÉMATIQUE

Calcul du **tassement de consolidation primaire** à partir des **données œdométriques** : indices de gonflement  $C_s$ , de compression  $C_c$  et contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$

# Calcul du tassement de consolidation primaire



## PROBLÉMATIQUE

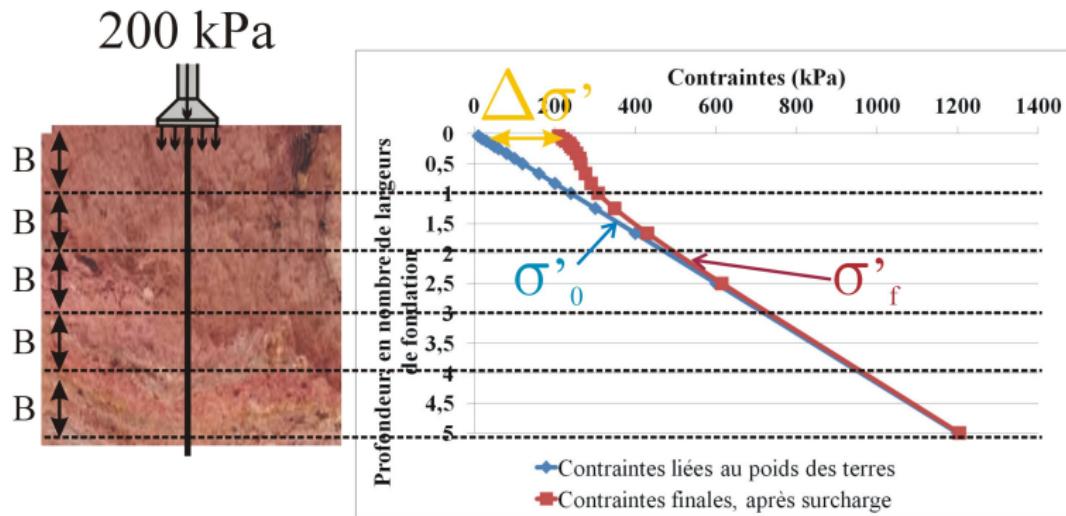
Calcul du **tassement de consolidation primaire** à partir des **données œdométriques** : indices de gonflement  $C_s$ , de compression  $C_c$  et contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$

A quelle(s) profondeur(s) prélève-t-on les échantillons à tester avec l'œdomètre ?? ?

# Calcul du tassement de consolidation primaire

## Cas d'une couche homogène de forte épaisseur

Distributions de contraintes à la verticale du centre d'une fondation carrée de côté  $B$  (ici,  $B=12\text{m}$ ), chargée uniformément à  $200 \text{ kPa}$  (sol homogène avec  $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ )



Quelles valeurs prendre ? ➔ Besoin de subdiviser en couches dans la zone de forte variation des accroissements de contraintes !

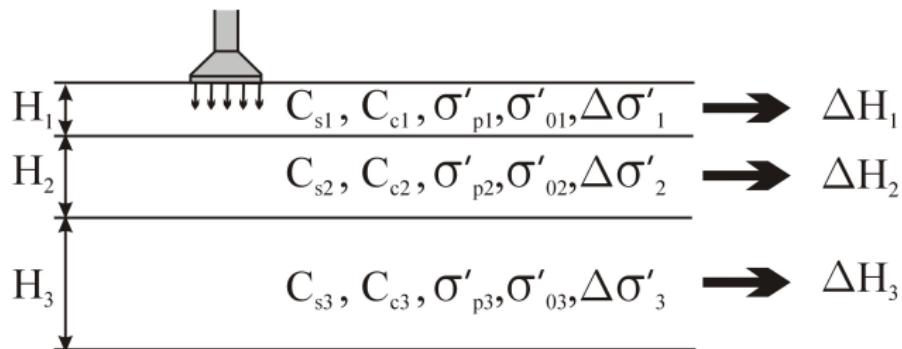
# Calcul du tassement de consolidation primaire

## Méthode des couches

Découpage du sol en couches **fictives** :

- pour des sols homogènes de forte épaisseur,
- pour des sols hétérogènes.

Caractérisation oedométrique (prélèvements + essais) **par couche**.



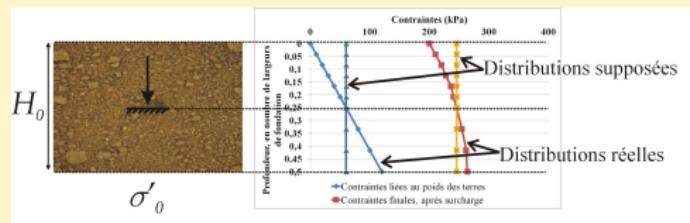
$$\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 = \Delta H$$

# Calcul du tassement de consolidation primaire

## Méthode des couches

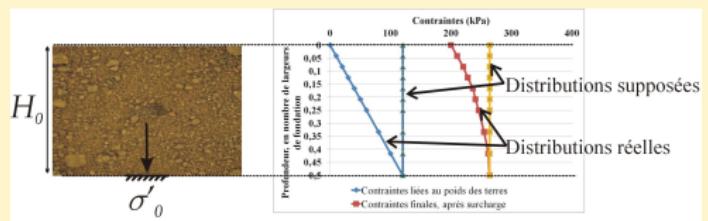
$C_s$ ,  $C_c$ ,  $\sigma'_p$ ,  $\sigma'_0$  et  $\Delta\sigma'$  supposées relativement constantes au sein d'une même couche, et égales à celles de l'échantillon prélevé.

### PRÉLÈVEMENT EN MILIEU DE COUCHE



Approche à privilégier

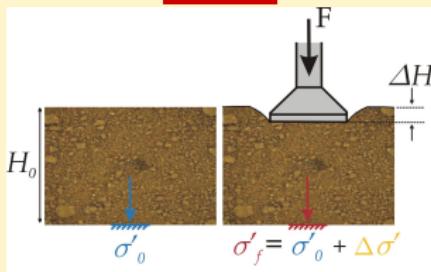
### PRÉLÈVEMENT EN BAS DE COUCHE



# Calcul du tassement de consolidation primaire pour une couche **fictive**, supposée **homogène**

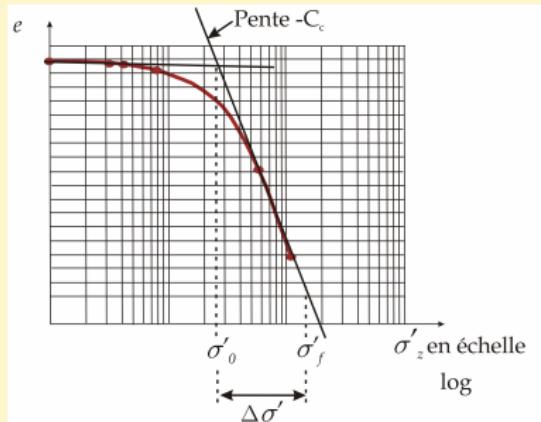
**CAS DES SOLS NORMALEMENT CONSOLIDÉS :  $\sigma'_0 \approx \sigma'_p$**

$\Delta H ?$



$$\Delta H = \frac{H_0}{1 + e_0} \Delta e \quad \text{avec} \quad \Delta e = |C_c \Delta \log \sigma'|$$

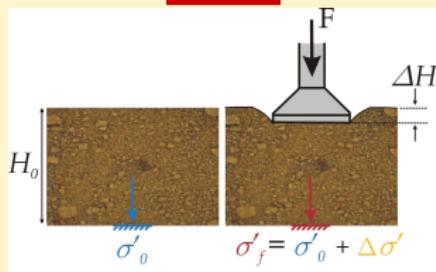
$$\Delta H = H_0 \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}$$



# Calcul du tassement de consolidation primaire pour une couche **fictive**, supposée **homogène**

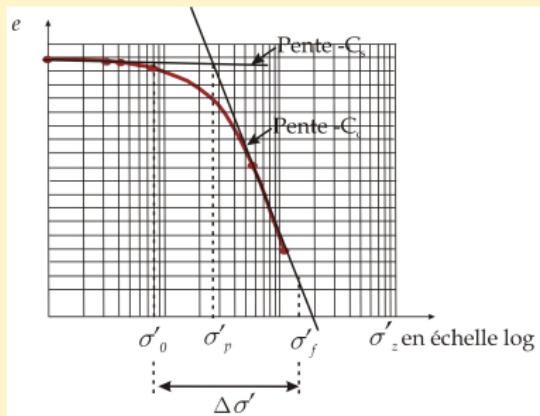
**CAS DES SOLS SURCONSOLIDÉS :  $\sigma'_0 \leq \sigma'_p$**

$\Delta H ?$



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

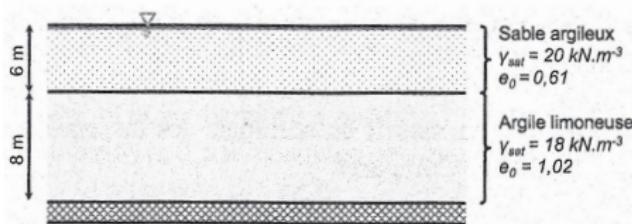
$$\Delta H = H_0 \frac{C_s}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} + H_0 \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_p}$$



# Exemple de calcul de tassement

## CALCUL DE TASSEMENT

Soit un massif de sol composé de deux couches compressibles et entièrement saturées. Deux échantillons de sol, très peu remaniés, ont été prélevés au centre de chaque couche puis ont été soumis à un essai de compressibilité à l'appareil œdométrique.



		Sable argileux	Argile limoneuse
$C_s$	-	0.002	0.017
$C_c$	-	0.16	0.32
$\sigma'_p$	kPa	89	175

- 1 Les couches sont-elles normalement consolidées ?

Un remblai, de poids volumique  $\gamma_R = 20 \text{ kN/m}^3$  et de hauteur  $H_R = 3.5 \text{ m}$ , est ensuite déposé sur une grande étendue en surface du massif.

- 2 Evaluer le tassement du massif après consolidation

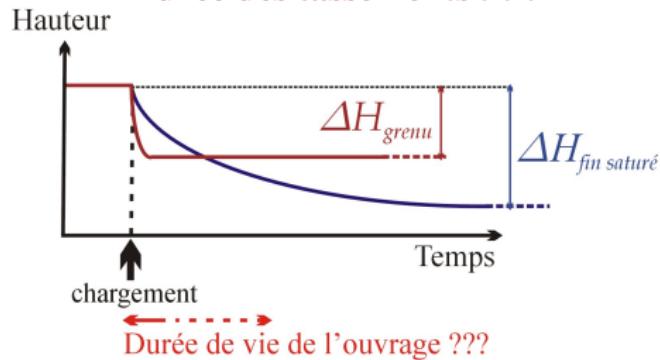
# Où en est-on ?

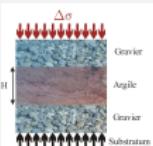
- **Calcul du tassement de consolidation primaire ✓**
  - Méthode des couches ✓
  - Prise en compte de l'état de consolidation du sol **in situ, avant chargement ✓**

# Où en est-on ?

- **Calcul du tassement de consolidation primaire ✓**
  - Méthode des couches ✓
  - Prise en compte de l'état de consolidation du sol in situ, **avant chargement** ✓
- **La théorie de la consolidation**

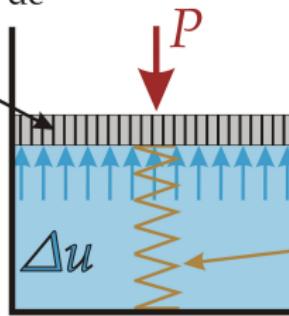
Durée des tassements ???



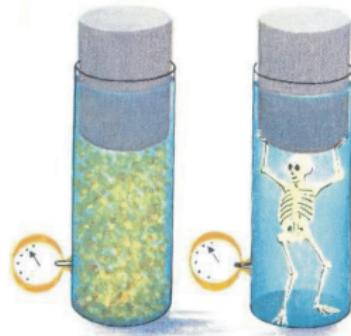


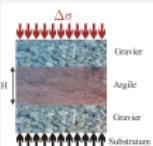
## Rappel sur la théorie de la consolidation (1/2)

Piston perforé de section  $S$



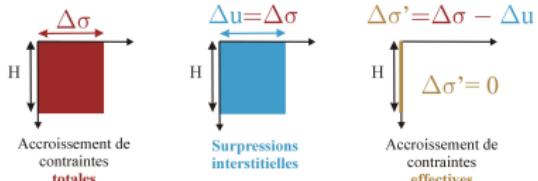
Ressort  
représentant les  
grains



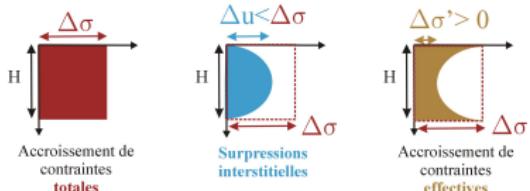


## Rappel sur la théorie de la consolidation (2/2)

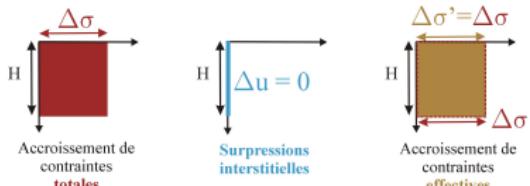
### Répartition des contraintes à $t=0$



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

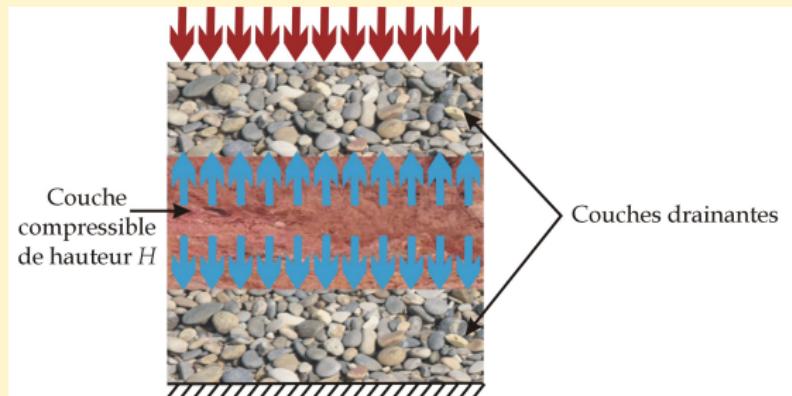


### Répartition des contraintes à $t = \infty$



# Théorie de la consolidation unidimensionnelle (1/10)

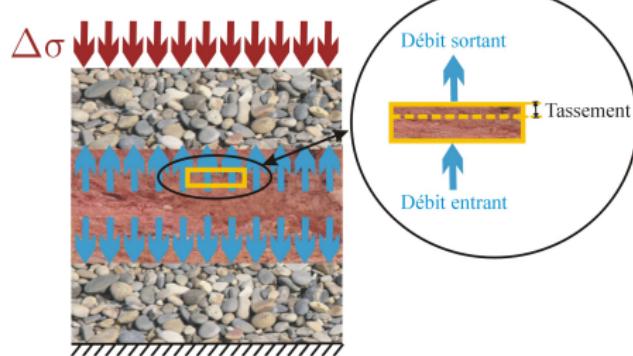
## CADRE DE LA THÉORIE DE TERZAGHI : CONFIGURATION 1D



- Un chargement uniforme,
- Une couche compressible de hauteur  $H$  (sol homogène et saturé)
- De part et d'autre de la couche compressible,
  - soit deux matériaux drainants (schéma ci-dessus),
  - soit un matériau drainant et un matériau imperméable.

# Théorie de la consolidation unidimensionnelle (2/10)

## DÉMARCHE DE TERZAGHI



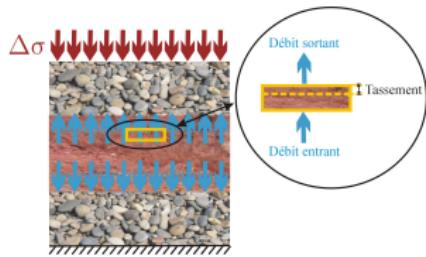
- ➡ Bilan de matière : Ecriture de l'équation de **conservation de la masse d'eau**  
 Variation du volume des vides par unité de temps = Débit net sortant d'eau

$$\left( \frac{\partial V_v}{\partial t} = \text{Débit sortant} - \text{Débit entrant} \right)$$

# Théorie de la consolidation unidimensionnelle (3/10)

## PROCESSUS ET PARAMÈTRES INFLUENTS

### UN ÉCOULEMENT



- A l'origine de l'écoulement (expulsion d'eau) : gradient hydraulique lié aux surpressions  $\Delta u$ 
  - ➡ influence du **poids volumique de l'eau**,  $\gamma_w$  ( $\text{kN/m}^3$ )
  - ➡ vitesse de l'écoulement régie notamment par le **coefficient de perméabilité**,  $k$  ( $\text{m/s}$ )
  - ➡ durée de l'écoulement fonction du chemin que l'eau doit parcourir pour sortir de la couche (notion de **chemin de drainage**,  $H_d$  ( $\text{m}$ ))

# Théorie de la consolidation unidimensionnelle (4/10)

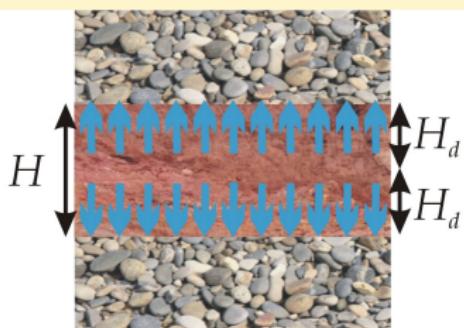
## PROCESSUS ET PARAMÈTRES INFLUENTS

### UN ÉCOULEMENT

➡ **chemin de drainage,  $H_d$  (m)**

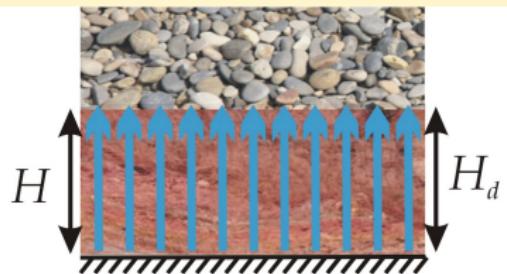
Distance maximale que doit parcourir l'eau pour atteindre un matériau drainant.

### DRAINAGE PAR LES DEUX FACES



$$H_d = \frac{H}{2}$$

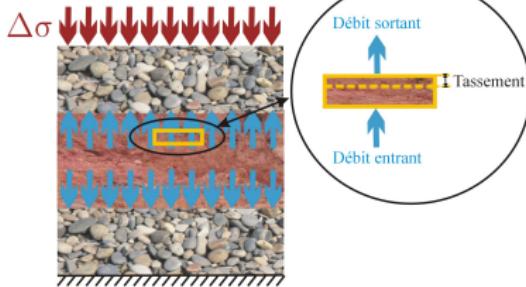
### DRAINAGE PAR UNE SEULE FACE



$$H_d = H$$

# Théorie de la consolidation unidimensionnelle (5/10)

## PROCESSUS ET PARAMÈTRES INFLUENTS



### UN ÉCOULEMENT

- gradient hydraulique lié aux surpressions  $\Delta u$ 
  - poids volumique de l'eau**,  $\gamma_w$  ( $\text{kN/m}^3$ )
  - coefficient de perméabilité**,  $k_v$  ( $\text{m/s}$ )
  - chemin de drainage**,  $H_d$  ( $\text{m}$ )

### UNE DISSIPATION DES SURPRESSIONS INTERSTITIELLES

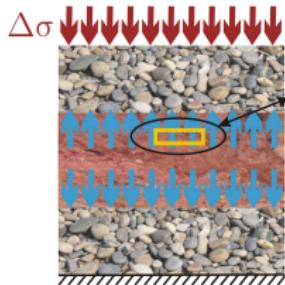
Diminution des surpressions = augmentation de contraintes effectives  
(puisque  $\Delta\sigma=\text{constante}$ )

### UNE COMPRESSION DU SQUELETTE SOLIDE SOUS $\Delta\sigma'$

► Réponse du squelette régie par le **module œdométrique** sur l'intervalle de contraintes  $[\sigma'_0; \sigma'_0 + \Delta\sigma']$ ,  $E_{oed}$  ( $\text{kPa}$ )

# Théorie de la consolidation unidimensionnelle (6/10)

## PROCESSUS ET PARAMÈTRES INFLUENTS



### UN ÉCOULEMENT

- gradient hydraulique lié aux surpressions
  - **poids volumique de l'eau**,  $\gamma_w$  (kN/m<sup>3</sup>)
  - **coefficient de perméabilité**,  $k_v$  (m/s)
  - **chemin de drainage**,  $H_d$  (m)

### UNE COMPRESSION DU SQUELETTE SOLIDE SOUS $\Delta\sigma'$

➢ **module œdométrique** sur l'intervalle de contraintes  $[\sigma'_0; \sigma'_0 + \Delta\sigma']$ ,  $E_{oed}$  (kPa)

$$\frac{\partial(\Delta u)}{\partial t} = \underbrace{\frac{k_v E_{oed}}{\gamma_w}}_{C_v} \frac{\partial^2(\Delta u)}{\partial z^2}$$

$C_v$  : coefficient de consolidation (m<sup>2</sup>/s)

# Théorie de la consolidation unidimensionnelle (7/10)

$$\frac{\partial(\Delta u)}{\partial t} = \left[ \frac{k_v E_{oed}}{\gamma_w} \right] \frac{\partial^2(\Delta u)}{\partial z^2} = C_v \frac{\partial^2(\Delta u)}{\partial z^2}$$

- ➡ Equation de Terzaghi non utilisée sous cette forme dans le cadre de ce cours
- ➡ Recours à des **paramètres adimensionnels**

Tassement  $\Delta H$  (mm ou m ou ...)  
 ↓

**Degré de consolidation  $U$  (ou  $U_v$ )**  
**(sans unité)**

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty}$$

$$[U] = \frac{[m]}{[m]} = [\text{sans unité}] \checkmark$$

Temps  $t$  (s ou min ou an ou ...)  
 ↓

**Facteur Temps  $T_v$  (sans unité)**

$$T_v = \frac{C_v}{H_d^2} t$$

$$[T_v] = \frac{[m^2][s]^{-1}}{[m^2]} [s] = [\text{sans unité}] \checkmark$$

# Théorie de la consolidation unidimensionnelle (8/10)

## DEGRÉ DE CONSOLIDATION $U$

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty}$$

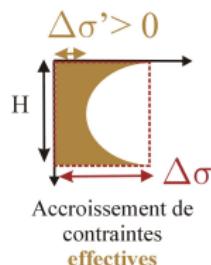
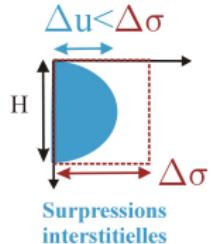
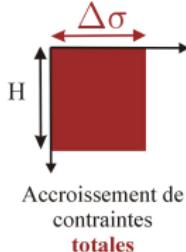
$\Delta H_t$  : tassement de consolidation primaire à l'instant  $t$

$\Delta H_\infty$  : tassement de consolidation primaire final (maximal)

$$0 \leq U \leq 100\%$$

avec  $\left\{ \begin{array}{l} U = 0\% \text{ au début du processus de consolidation,} \\ U = 100\% \text{ à la fin du processus de consolidation.} \end{array} \right.$

## Distribution des contraintes à $0 < t < \infty$



$$U = \frac{\text{Aire ocre}}{\text{Aire rouge}}$$

$U$  : pourcentage de dissipation des surpressions

# Théorie de la consolidation unidimensionnelle (9/10)

**Degré de consolidation  $U$  (sans unité)**

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty}$$

**Facteur Temps  $T_v$  (sans unité)**

$$T_v = \frac{C_v}{H_d^2} t$$

Intérêt de définir ces paramètres adimensionnels ?

Degré de consolidation  $U$

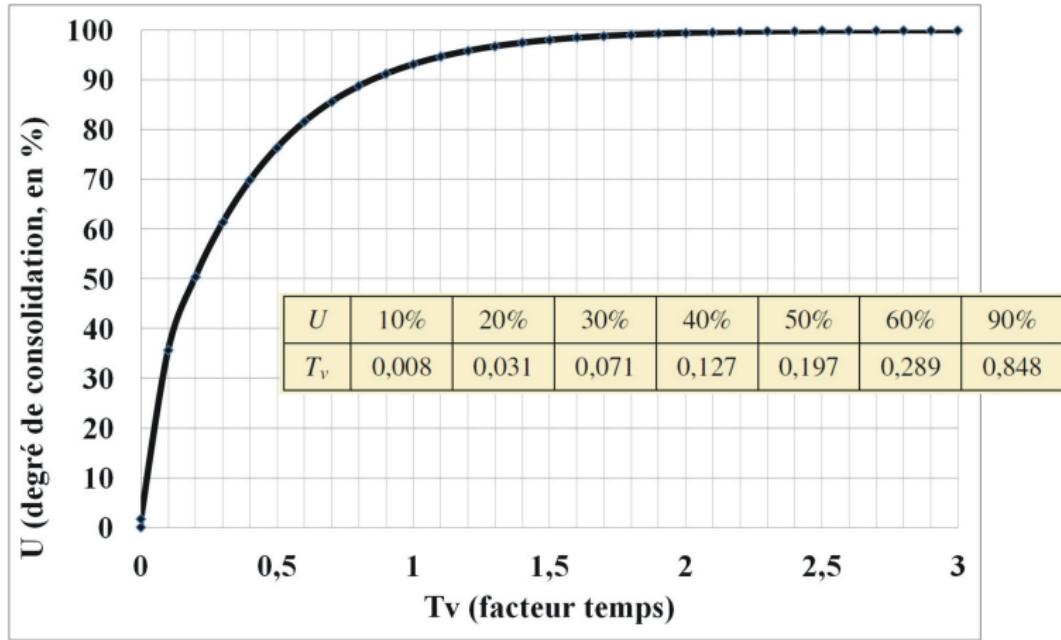


Facteur Temps  $T_v$

ABAQUE

$$U = f(T_v) \quad : \quad U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \exp\left(-\frac{(2m-1)^2 \pi^2 T_v}{4}\right)$$

# Théorie de la consolidation unidimensionnelle (10/10)



$$U=100\% \text{ pour } T_v = \infty$$

➡ Analyse avec  $U=95\%$  (soit  $T_v=1,129$ ) ou  $U=99\%$  (soit  $T_v=1,782$ )

# Utilisation de l'abaque $U = f(T_v)$

En pratique, on cherche le temps  $t$  pour atteindre un certain pourcentage de consolidation ( $U=50\%$  ou  $U=95\%$  par exemple).

Donc  $U$  est une donnée du problème :  **$U$  connu**.

Utilisation de l'abaque  $U = f(T_v) \rightarrow T_v$  connu

Par exemple, pour  $U=50\%$ ,  $T_v=0,197$

$$\text{Or } T_v = \frac{C_v}{H_d^2} t, \text{ d'où } t = \frac{T_v H_d^2}{C_v}$$

Sous réserve de connaître  $H_d$  et  $C_v$ ,  **$t$  connu**

# Exemple de calcul

## CALCUL D'UN DEGRÉ DE CONSOLIDATION

On s'intéresse à une couche de sol compressible, de 20 mètres d'épaisseur, drainée des deux côtés, dont le coefficient de consolidation verticale vaut  $C_v=2.10^{-8}\text{m}^2/\text{s}$ .

- 1 Calculer le degré de consolidation de ce sol au bout de 3 mois.

# Où en est-on ?

- **Calcul du tassement de consolidation primaire ✓**
  - Méthode des couches ✓
  - Prise en compte de l'état de consolidation du sol in situ, **avant chargement ✓**

# Où en est-on ?

- **Calcul du tassement de consolidation primaire ✓**
  - Méthode des couches ✓
  - Prise en compte de l'état de consolidation du sol in situ, **avant chargement** ✓
  
- **La théorie de la consolidation**
  - Equation de Terzaghi - consolidation unidimensionnelle
  - Définition de paramètres adimensionnels

**Degré de consolidation  $U$  (sans unité)**

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty}$$

**Facteur Temps  $T_v$  (sans unité)**

$$T_v = \frac{C_v}{H_d^2} t$$

# Où en est-on ?

- **Calcul du tassement de consolidation primaire ✓**
  - Méthode des couches ✓
  - Prise en compte de l'état de consolidation du sol in situ, **avant chargement** ✓
  
- **La théorie de la consolidation**
  - Equation de Terzaghi - consolidation unidimensionnelle
  - Définition de paramètres adimensionnels

Degré de consolidation  $U$  (sans unité)

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty}$$

Facteur Temps  $T_v$  (sans unité)

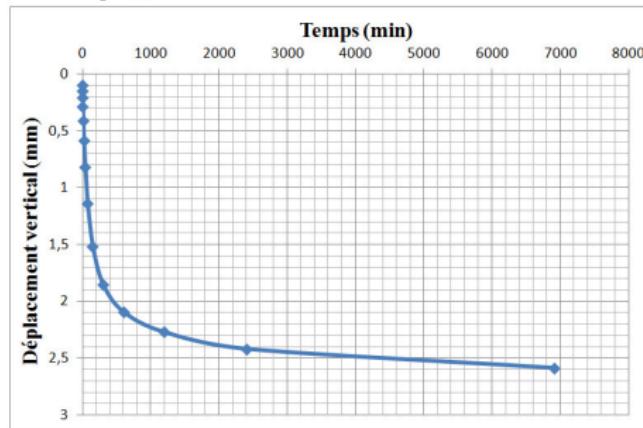
$$T_v = \frac{C_v}{H_d^2} t$$

Valeur de  $C_v$  sur  $[\sigma'_0; \sigma'_f]$ ?

# Détermination du coefficient de consolidation $C_v$

- A l'aide de l'essai œdométrique
- Détermination d'un  $C_v$  pour chaque palier de chargement

Sur chaque palier de chargement (contrainte imposée constante), travail à partir de la courbe  $\Delta H = f(t)$  :



# Détermination de $C_v$ sur un palier de chargement d'un essai œdométrique

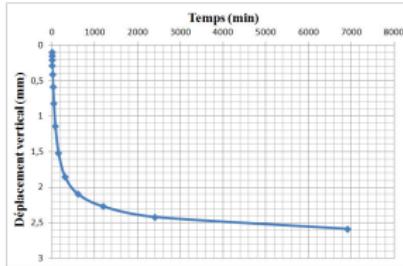
Deux méthodes de détermination

## MÉTHODE DE CASAGRANDE

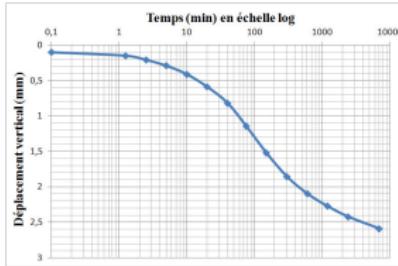
A partir de la courbe de  $\Delta H$  en fonction de  $\log(t)$ .

## MÉTHODE DE TAYLOR

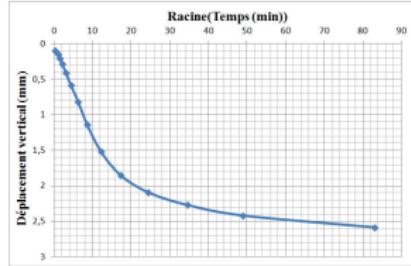
A partir de la courbe de  $\Delta H$  en fonction de  $\sqrt{t}$ .



TEMPS EN ÉCHELLE  
ARITHMÉTIQUE



TEMPS EN ÉCHELLE  
LOGARITHMIQUE

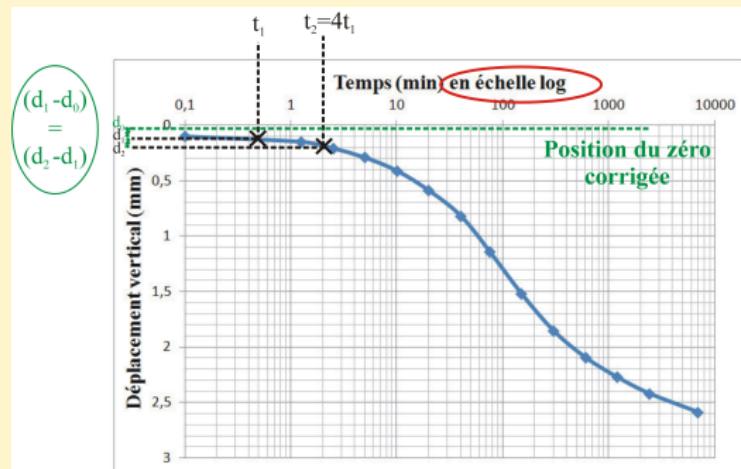


RACINE(TEMPS)

# Détermination de $C_v$ sur un palier de chargement d'un essai œdométrique : Méthode de CASAGRANDE (1/3)

## DÉTERMINATION DU ZÉRO DES TEMPS CORRIGÉ

- ➊ Sélectionner deux points  $(t_1, d_1)$  et  $(t_2, d_2)$  tels que  $t_2=4t_1$  avec  $(t_1, d_1)$  dans la partie convexe initiale de la courbe
- ➋ Déterminer la distance  $d_2 - d_1$
- ➌ Reporter cette distance au-dessus du point  $(t_1, d_1)$  pour obtenir  $d_0$

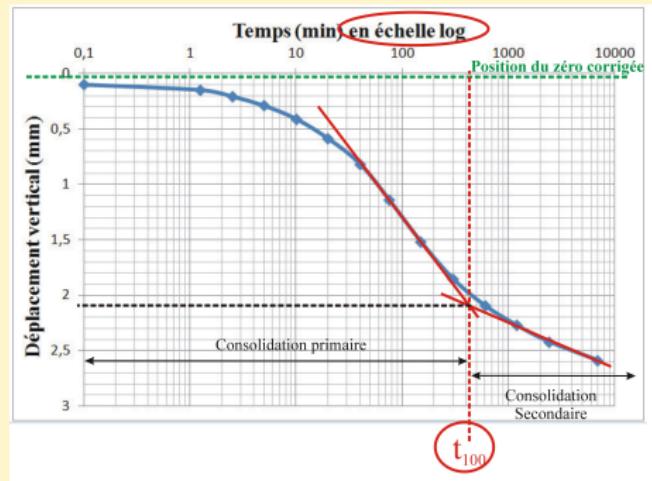


# Détermination de $C_v$ sur un palier de chargement d'un essai œdométrique : Méthode de CASAGRANDE (2/3)

## DÉTERMINATION DU TEMPS DE FIN DE CONSOLIDATION PRIMAIRE

- Tracer les tangentes aux deux parties linéaires de la courbe

➡  $t_{100}$  : Temps théorique de fin de consolidation primaire

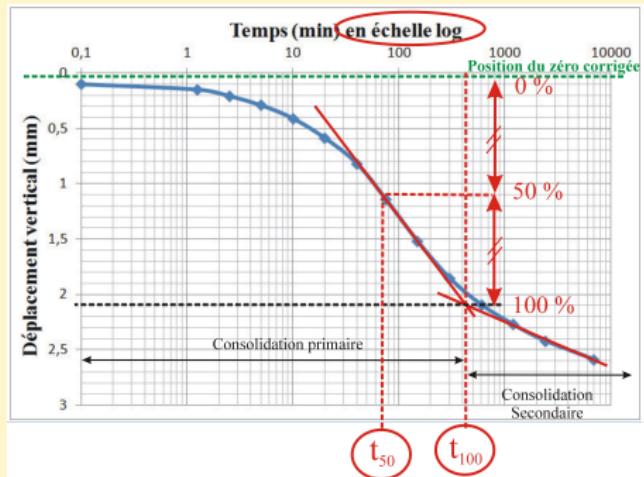


# Détermination de $C_v$ sur un palier de chargement d'un essai œdométrique : Méthode de CASAGRANDE (3/3)

## DÉTERMINATION DU COEFFICIENT DE CONSOLIDATION

- ① A partir du zéro corrigé et du déplacement associé à  $t_{100}$ , déterminer le  $d_{50}$ , correspondant à 50% de la consolidation primaire.
- ② En déduire le  $t_{50}$ .
- ③ Calculer  $C_v$  sachant que pour  $U=50\%$ ,  $T_v=0,197$  :

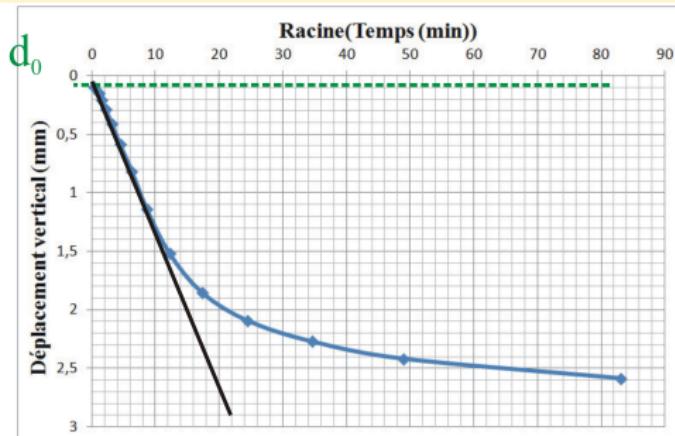
$$C_v = \frac{0,197 H_d^2}{t_{50}}$$



# Détermination de $C_v$ sur un palier de chargement d'un essai œdométrique : Méthode de TAYLOR (1/4)

## DÉTERMINATION DU ZÉRO CORRIGÉ DES TASSEMENTS

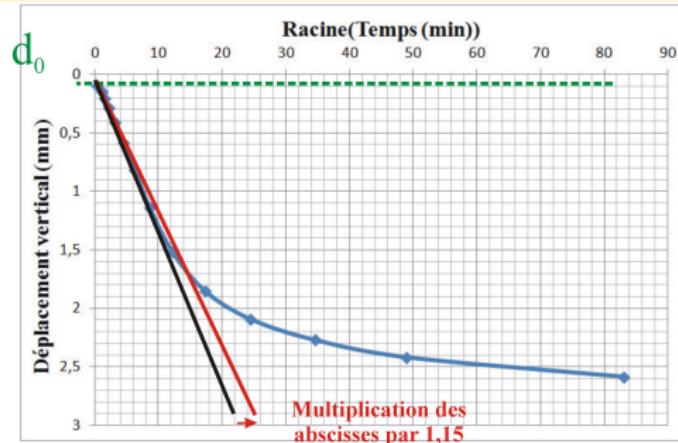
- ① Tracer la droite représentant au mieux la première partie de la courbe.
- ② Prolonger cette droite pour déterminer  $d_0$ , à son intersection avec l'axe vertical.



# Détermination de $C_v$ sur un palier de chargement d'un essai œdométrique : Méthode de TAYLOR (2/4)

## DÉTERMINATION DU TASSEMENT À 90% DE CONSOLIDATION (1/3)

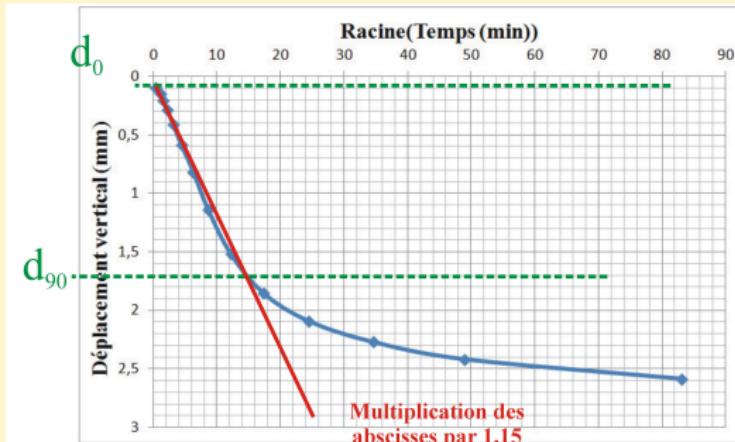
- 1 Tracer la droite passant par  $d_0$  et dont les points ont chacun une abscisse 1,15 fois supérieure à celle de la précédente droite.



# Détermination de $C_v$ sur un palier de chargement d'un essai œdométrique : Méthode de TAYLOR (3/4)

## DÉTERMINATION DU TASSEMENT À 90% DE CONSOLIDATION (2/3)

- 1 Déterminer  $d_{90}$  à l'intersection de cette nouvelle droite et de la courbe expérimentale.

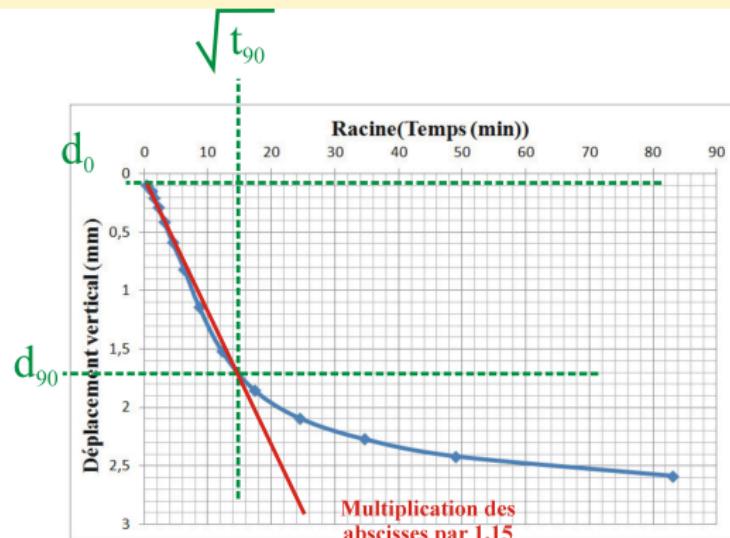


# Détermination de $C_v$ sur un palier de chargement d'un essai œdométrique : Méthode de TAYLOR (4/4)

## DÉTERMINATION DU TEMPS À 90% DE CONSOLIDATION (3/3)

- ➊ Lire la valeur de  $\sqrt{t_{90}}$  sur le graphique.
- ➋ En déduire  $t_{90}$ .
- ➌ Calculer  $C_v$  sachant que pour  $U=90\%$ ,  $T_v=0,848$  :

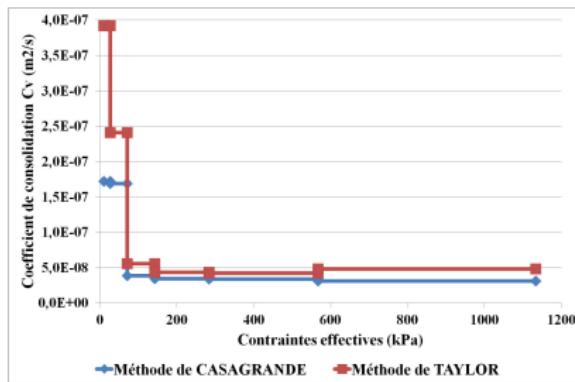
$$C_v = \frac{0,848 H_d^2}{t_{90}}$$



# Coefficient de consolidation

$C_v$  n'est pas constant.

Il dépend de la contrainte et de l'accroissement de contraintes considérés. Il change donc à chaque palier de chargement de l'essai œdométrique.



Données issues de Analyse graphique des courbes de consolidation œdométrique de J.-P. Magnan et de J.-M. Deroy

Méthode de Casagrande

$$C_v = \frac{0,197 H_d^2}{t_{50}}$$

Méthode de Taylor

$$C_v = \frac{0,848 H_d^2}{t_{90}}$$

➡ Utiliser pour les calculs de tassement le  $C_v$  de l'intervalle  $[\sigma'_0 ; \sigma'_f = \sigma'_0 + \Delta\sigma']$

# Où en est-on ?

- **Calcul du tassement de consolidation primaire ✓**
- Estimation de l'amplitude du tassement final

# Où en est-on ?

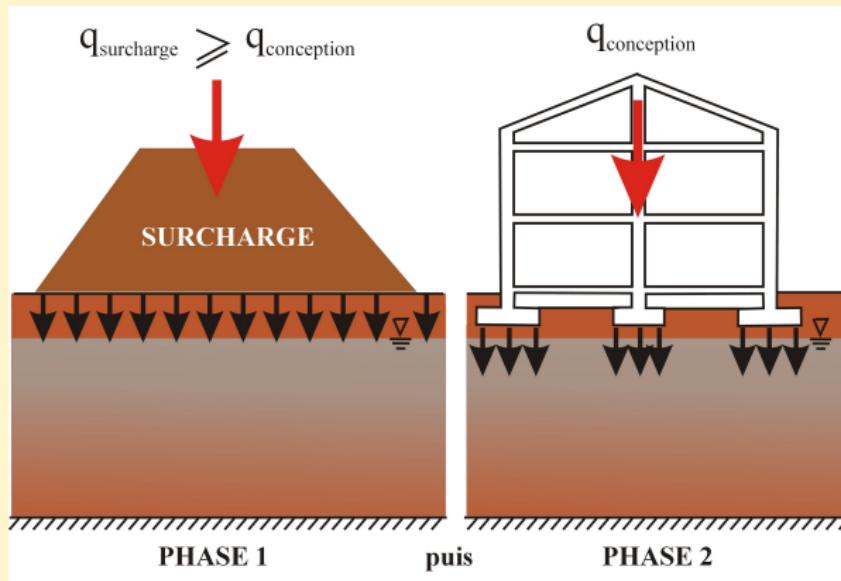
- **Calcul du tassement de consolidation primaire** ✓
  - Estimation de l'amplitude du tassement final
- **La théorie de la consolidation** ✓
  - Connaissance de l'évolution du tassement au cours du temps

# Où en est-on ?

- **Calcul du tassement de consolidation primaire ✓**
  - Estimation de l'amplitude du tassement final
- **La théorie de la consolidation ✓**
  - Connaissance de l'évolution du tassement au cours du temps
- **Et si, après tous ces calculs, il s'avère que le tassement risque de nuire à la pérennité de l'ouvrage ... ?**
  - ➡ Techniques de réduction des temps de tassement :
    - 1 Le préchargement
    - 2 Le préchargement associé à un réseau de drainage
      - Principe du drainage
      - Dimensionnement d'un réseau

# Préchargement (1/6)

## PRINCIPE DU PRÉCHARGEMENT



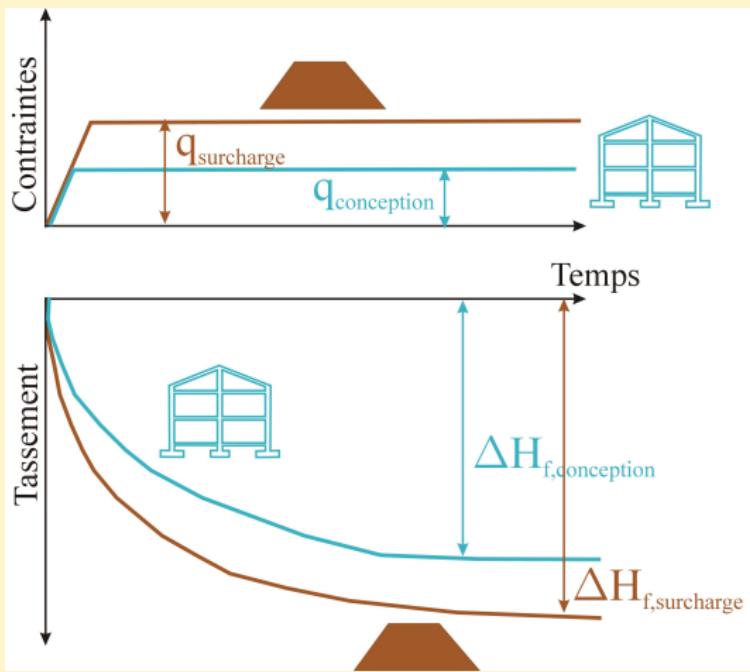
## Préchargement (2/6)

**Si  $q_{\text{surcharge}} = q_{\text{conception}}$**

Il faut charger plus tôt, suffisamment à l'avance pour que la consolidation soit suffisamment avancée à la mise en service de l'ouvrage.

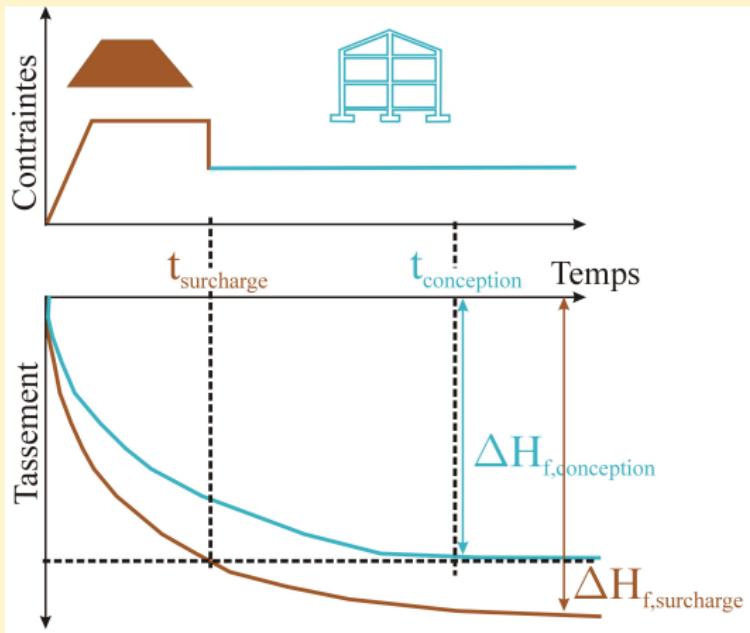
## Préchargement (3/6)

Si  $q_{\text{surcharge}} > q_{\text{conception}}$



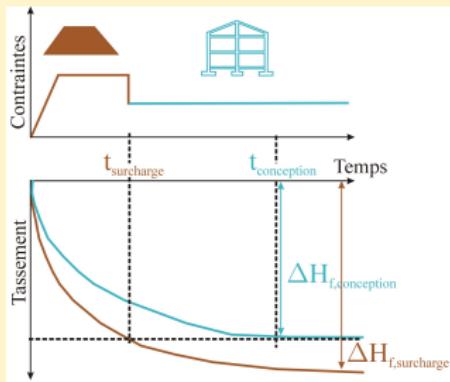
## Préchargement (4/6)

Si  $q_{\text{surcharge}} > q_{\text{conception}}$



# Préchargement (5/6)

**Si  $q_{\text{surcharge}} > q_{\text{conception}}$**



Temps d'application de la surcharge = temps pour lequel

$$U = \frac{\Delta H_{\text{conception}}}{\Delta H_{\text{surchARGE}}}$$

➔ Utilisation des abaques pour trouver  $T_v$  correspondant à ce degré de consolidation

$$t_{\text{surchARGE}} = \frac{T_v H_d^2}{C_v}$$

# Préchargement (6/6)

## LIMITES DE LA TECHNIQUE DE PRÉCHARGEMENT SEULE

- N'améliore pas la capacité de drainage du sol,
- Permet certes de limiter les temps de tassement, mais les durées de chargement peuvent rester assez longues.

➡ Parfois besoin de réellement accélérer le drainage

# Préchargement associé à un réseau drainant

Objectif : réduction des temps de tassement

➡ Possibilité : **augmenter le facteur temps  $T_v$  pour un  $t$  donné**

$$T_v = \frac{C_v}{H_d^2} t = \frac{k_v E_{oed}}{\gamma_w H_d^2} t$$

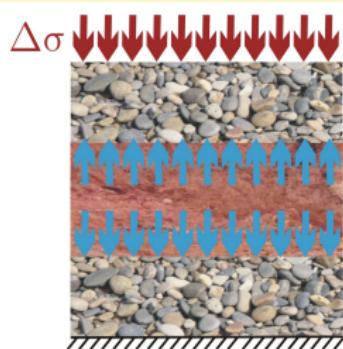
$T_v$  inversement proportionnel au **carré** du chemin de drainage.

**Volonté de réduire le chemin de drainage,  $H_d$ , pour accélérer les tassements**

Méthode possible : mise en place de **drains verticaux**, zones de forte perméabilité servant de canaux de drainage artificiels.

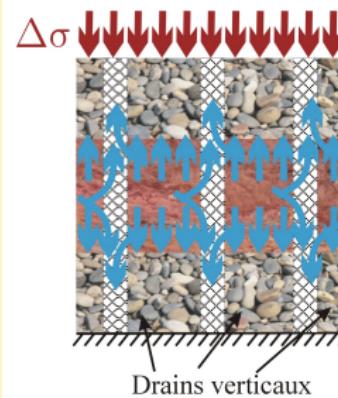
# Une consolidation verticale ET horizontale

## SANS DRAIN VERTICAL



➡ Drainage purement vertical

## AVEC DRAINS VERTICAUX



➡ Drainage vertical **et radial (horizontal)**

➡ Consolidation horizontale d'autant plus efficace que  $k_H > k_V$  (anisotropie des sols).

# Exemples de drains verticaux

## DRAINS DE SABLE

Trous de forage remplis de sable

## DRAINS VERTICAUX PRÉFABRIQUÉS DVP



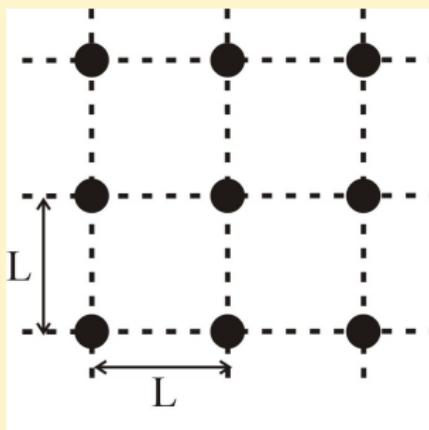
Photo issue du site internet de Zetas.



Photo issue de Basics of foundation design.

# Dispositions spatiales des drains

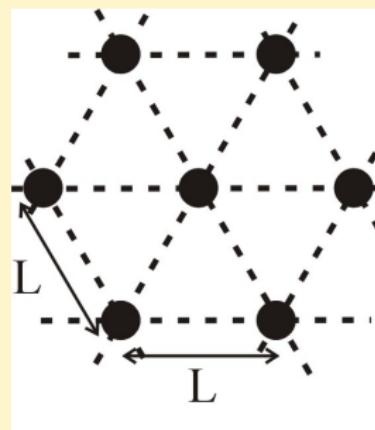
## MAILLAGE CARRÉ



Implantation facile

Optimisation de l'espace perfectible

## MAILLAGE TRIANGULAIRE

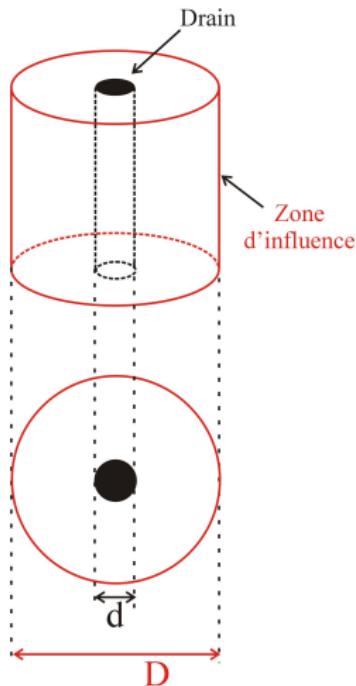


Implantation délicate

Bonne optimisation de l'espace

- ➡ Critère déterminant pour le dimensionnement : **l'espacement des drains,  $L$**
- ➡ Espacement des drains : paramètre plus influent que le diamètre des drains !

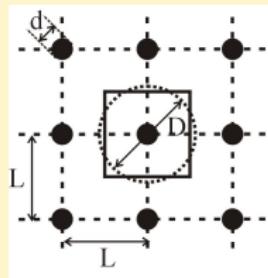
# Notion de zone d'influence d'un drain



$d$  : diamètre du drain

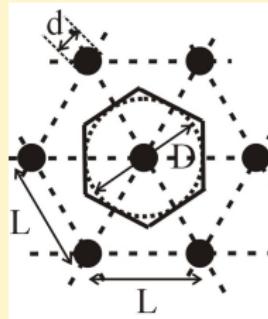
$D$  : diamètre de la zone d'influence

## MAILLAGE CARRÉ



$$D = 1,128L$$

## MAILLAGE TRIANGULAIRE



$$D = 1,05L$$

# Diamètre équivalent des DVP



## DIAMÈTRE ÉQUIVALENT SI DVP NON CYLINDRIQUE

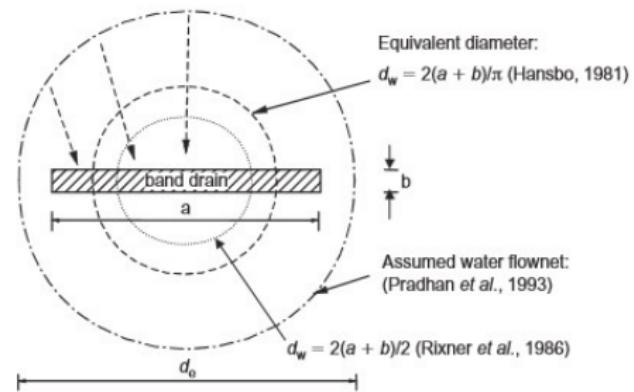


Schéma issu de l'article d'Indraratna *et al.* dans Ground Improvement (2003) 7, N°.3, 127-137

Drains de sable :  $d$  entre 30 et 60 cm

DVP :  $d$  entre 5 et 10 cm

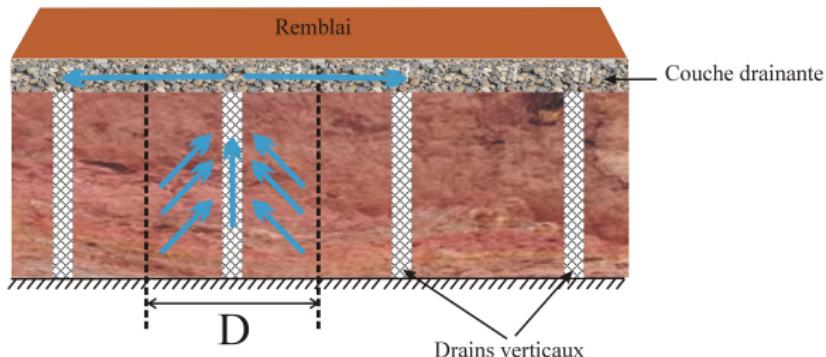
# Où en est-on ?

- Techniques de réduction des temps de tassement :

- ① Le préchargement

- ② Le préchargement associé à un réseau de drainage

- Principe du drainage
  - Dimensionnement d'un réseau



**Objectif** : atteindre un certain degré de consolidation dans un délai donné

**Challenge** : dimensionner le réseau de drains répondant exactement à cet objectif

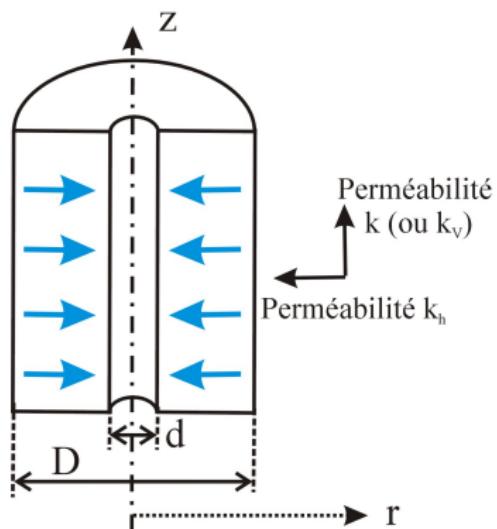
# Où en est-on ?

Pour répondre à cette question, 3 points à aborder :

- ① Théorie de la consolidation radiale
- ② Théorie de la consolidation radiale ET verticale
- ③ Méthodologie du dimensionnement

# Théorie de la consolidation radiale (1/3)

Approche de Barron (1948), extension de la théorie de Terzaghi



Hypothèses :

- ① drainage purement radial vers le drain sous chargement vertical
- ② déformation verticale uniforme

Equation de diffusion de la surpression interstitielle :

$$\frac{\partial(\Delta u)}{\partial t} = \underbrace{\frac{k_h E_{oed}}{\gamma_w}}_{C_h} \left[ \frac{\partial^2(\Delta u)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\Delta u)}{\partial r} \right]$$

$C_h$  : coefficient de consolidation horizontale ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

# Théorie de la consolidation radiale (2/3)

$$\frac{\partial(\Delta u)}{\partial t} = \frac{k_h E_{oed}}{\gamma_w} \left[ \frac{\partial^2(\Delta u)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\Delta u)}{\partial r} \right] = C_h \left[ \frac{\partial^2(\Delta u)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\Delta u)}{\partial r} \right]$$

- ➡ Equation non utilisée sous cette forme dans le cadre de ce cours
- ➡ Recours à des **paramètres adimensionnels**

**Degré de consolidation  $U_h$**

Pourcentage de dissipation des surpressions

 ABAQUE

**Facteur Temps  $T_h$**

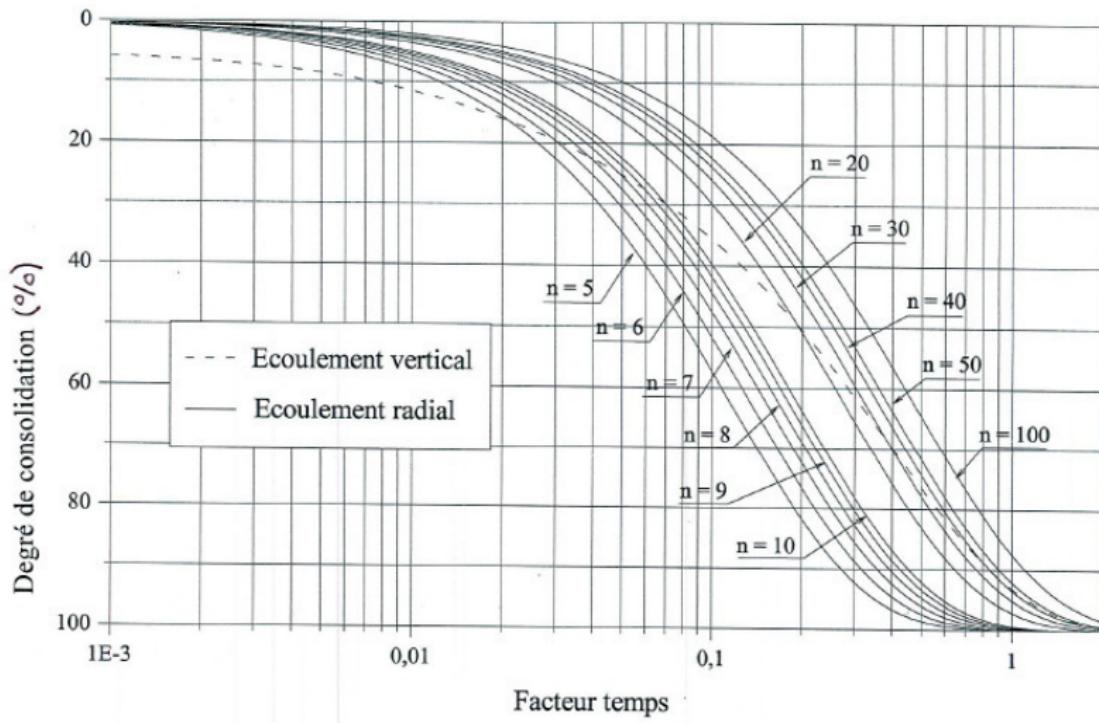
$$T_h = \frac{C_h}{D^2} t$$

$D$  : diamètre de la zone d'influence  
(longueur horizontale de drainage !)

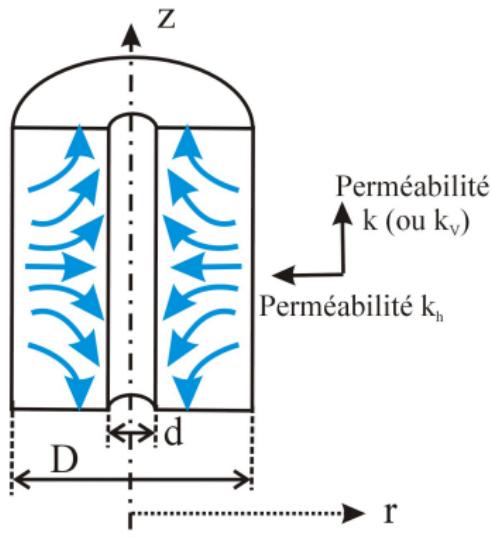
$$U_h = f(T_h, n) \text{ avec } n = \frac{D}{d}$$

# Théorie de la consolidation radiale (3/3)

## Abaque de consolidation radiale (horizontale)



# Théorie de la consolidation radiale ET verticale



## THÉORÈME DE CARILLO (1942)

$$U_{hv} = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v)$$

$U_{hv}$  : degré de consolidation global

$U_h$  : degré de consolidation radiale (horizontale)

$U_v$  : degré de consolidation verticale

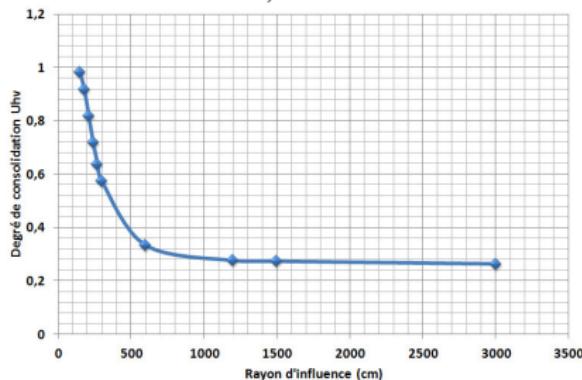
# Théorie de la consolidation radiale ET verticale

Retour sur l'influence du rayon du drain par rapport à celle du rayon d'influence

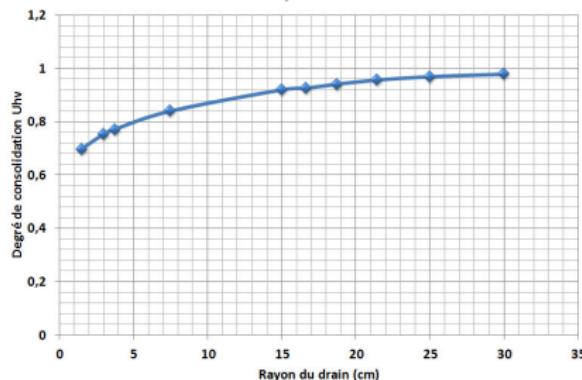
Consolidation d'une couche de sol de 10m d'épaisseur, drainée sur un seul côté ( $H_d=10\text{m}$ ).  $C_v=C_h=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  et  $t=6 \text{ mois}$

Etude de l'influence du diamètre des drains ( $d$ ) et de la géométrie des drains ( $D$  varie suite à un changement d'espacement  $L$  ou un changement de maillage)

$d = 60 \text{ cm}$ , fixé.  $D$  varie.



$D = 300 \text{ cm}$ , fixé.  $d$  varie.



➡ Influence prépondérante du diamètre de la zone d'influence (directement lié à l'espacement des drains)

# Dimensionnement d'un réseau de drains verticaux

## Méthode itérative (1/5)

### EXEMPLE

On veut dimensionner un réseau de drains qui permette d'obtenir un **degré de consolidation de 80 % en trois mois** dans une couche de sol compressible de 20 m d'épaisseur drainée des deux côtés. Le sol compressible a pour coefficient de consolidation verticale  $C_v=2.10^{-8}\text{m}^2/\text{s}$  et pour coefficient de consolidation horizontale  $C_h=5.10^{-8}\text{m}^2/\text{s}$ .

Dimensionner un **réseau de drains de 30 cm de diamètre disposés selon une maille triangulaire**.

# Dimensionnement d'un réseau de drains verticaux

## Méthode itérative (2/5)

(1) Déterminer  $T_v$

$$T_v = \frac{C_v t}{H_d^2} = \frac{2 \cdot 10^{-8} \times 7776000}{10^2} = 0,0015$$

(2) En déduire  $U_v$  selon la théorie de Terzaghi

$$U_v = 4,5\%$$

(3) Calculer  $U_h$  par la formule de Carillo, connaissant  $U_{hv}$  (donné) et  $U_v$ .

$$U_h = 1 - \frac{1 - U_{hv}}{1 - U_v} = 1 - \frac{1 - 0,8}{1 - 0,045} = 0,79$$

# Dimensionnement d'un réseau de drains verticaux

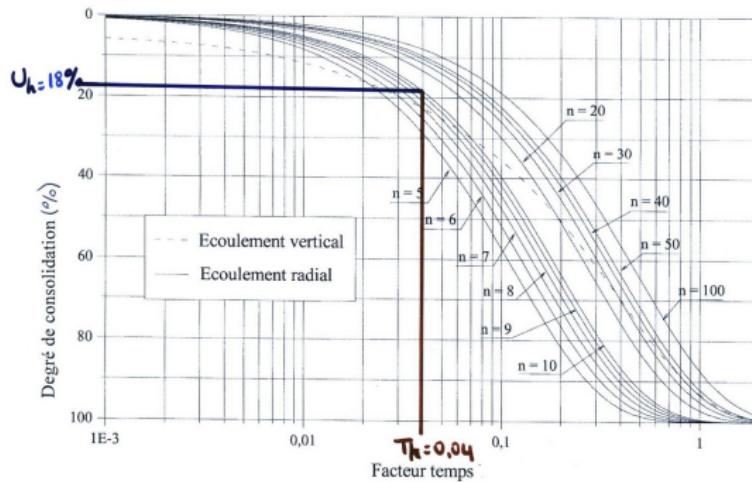
## Méthode itérative (3/5)

### (4) Optimiser l'espacement $n$ par une méthode itérative

(4.1) On suppose  $n = 10$ , soit  $D=n \times d=3$  m.

(4.2) On détermine  $T_h$  associé à ce diamètre d'influence :  $T_h = \frac{C_h t}{D^2} = 0,04$

(4.3) On trouve la valeur de  $U_h$  associée à ce  $T_h$  grâce à l'abaque :



$$U_h = 18\% < 79\%$$

➡ Besoin de diminuer  $n$  !

# Dimensionnement d'un réseau de drains verticaux

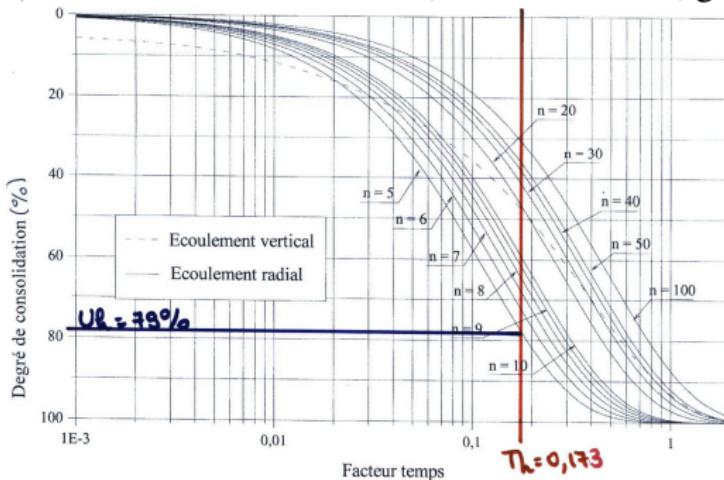
## Méthode itérative (4/5)

### (5) Nouvelle itération

(5.1) On suppose  $n = 5$ , soit  $D=n \times d=1,5$  m.

(5.2) On détermine  $T_h$  associé à ce diamètre d'influence :  $T_h = \frac{C_{ht}}{D^2} = 0,173$

(5.3) On trouve la valeur de  $U_h$  associée à ce  $T_h$  grâce à l'abaque :



$$U_h = 79\% = 79\%$$

➡ Fin du processus itératif !

# Dimensionnement d'un réseau de drains verticaux

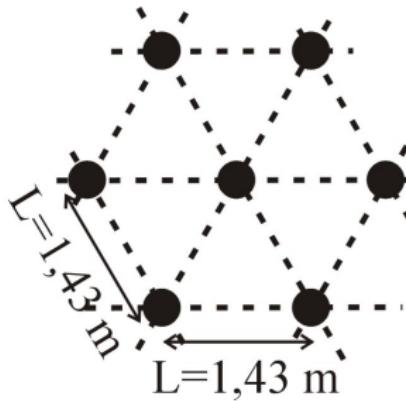
## Méthode itérative (5/5)

- (6) Déterminer l'espacement entre les drains.

$$n=5 \text{ donc } D=1,5\text{m}$$

Les drains sont disposés selon une maille triangulaire donc  $D = 1,05L$

D'où  $L=1,43\text{m}$



# Principaux facteurs pouvant affecter l'efficacité des drains

Dimensionnement effectué sur la base de **drains idéaux** :

- ① perméabilité infinie,
- ② pas d'influence sur le sol avoisinant lors de l'exécution des drains,
- ③ pas de changement de géométrie du drain au cours du temps (notamment, diamètre constant).

Dans la réalité :

- **Perméabilité longitudinale du drain** : le drain doit pouvoir évacuer l'eau sans se mettre en charge (=capacité de décharge suffisante)
- **Remaniement du sol autour du drain** : zone remaniée de perméabilité plus faible et/ou de compressibilité plus forte qui limite l'efficacité du drainage.

# ANNEXES

## Annexe

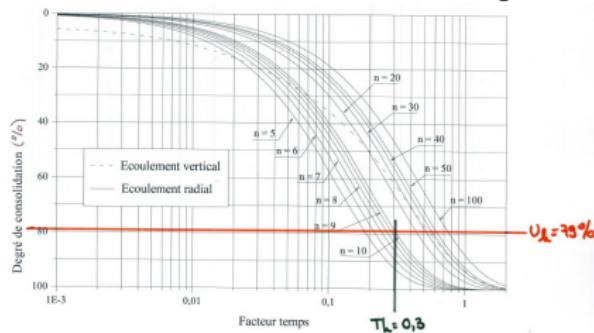
# Dimensionnement d'un réseau de drains verticaux

## Méthode itérative (3/5) - Passage par les $D$

### (4) Optimiser l'espacement $n$ par une méthode itérative

(4.1) On suppose  $n = 10$ .

(4.2) On détermine  $T_h$  en utilisant l'abaque :



$$T_h = 0,3$$

(4.3) On trouve la valeur de  $D$  associée à ce  $T_h$  :

$$\text{Si } T_h=0,3 \text{ alors } D = \sqrt{\frac{C_h t}{T_h}} = 1,14\text{m}$$

(4.4) On trouve le  $n$  associé à ce  $D$  :  $n = \frac{D}{d} = 3,8$

(4.5) On compare : Valeur de 3,8 incompatible avec celle supposée de 10

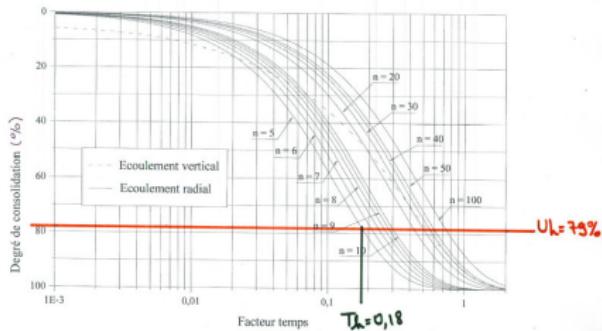
# Dimensionnement d'un réseau de drains verticaux

## Méthode itérative (4/5) - Passage par les $D$

### (5) Nouvelle itération

(5.1) On suppose  $n = 5$ .

(5.2) On détermine  $T_h$  en utilisant l'abaque :



$$T_h = 0,18$$

(5.3) On trouve la valeur de  $D$  associée à ce  $T_h$  :

$$\text{Si } T_h=0,18 \text{ alors } D = \sqrt{\frac{C_h t}{T_h}} = 1,47\text{m}$$

(5.4) On trouve le  $n$  associé à ce  $D$  :  $n = \frac{D}{d} = 4,9$

(5.5) On compare : Valeur de 4,9 compatible avec celle supposée de 5