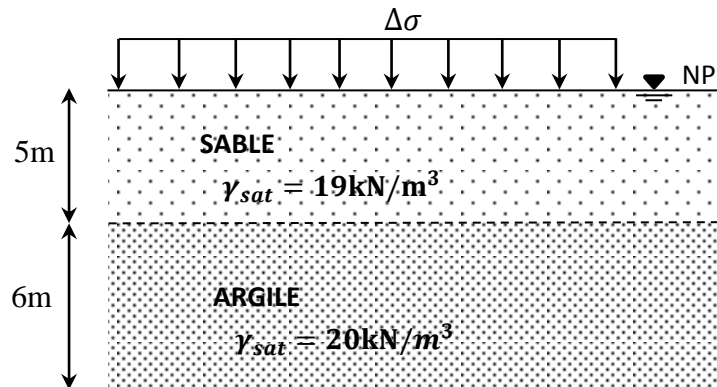


### Exercice 1 :

Une surcharge  $\Delta\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  repose sur une formation de sable de 5m d'épaisseur surmontant une couche d'argile de 6m d'épaisseur. La nappe phréatique est à la surface du sol.

On demande de tracer le diagramme de  $u$  et  $\sigma'_v$  dans les deux cas suivants :

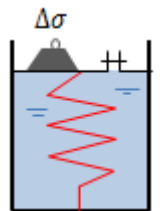
- Immédiatement après l'application de la surcharge  $\Delta\sigma$
- Après plusieurs années d'application de  $\Delta\sigma$



### Solution :

1. Immédiatement après l'application de la surcharge  $\Delta\sigma$  (à court terme)

- L'orifice est fermé c'est-à-dire pas de dissipation de l'eau
- L'application de la charge  $\Delta\sigma$  augmente la pression hydrostatique  $u$ .
- Le ressort n'est pas comprimé, sa pression demeure donc inchangée.



C'est-à-dire :

$$\sigma'_v = \sigma'_{v0}$$

$$u = u_0 + \Delta\sigma$$

*Contrainte effective :*

✚ *Sable :*

$$\sigma' = \gamma' Z \quad (0 \leq Z \leq 5\text{m})$$

$$\text{Pour } Z = 0 \quad \sigma' = 0$$

$$\text{Pour } Z = 5\text{m} \quad \sigma' = (19 - 10) \cdot 5 = 45 \text{ kN/m}^2$$

✚ *Argile :*

$$\sigma' = (19 - 10) \cdot 5 + \gamma' Z \quad (0 \leq Z \leq 6\text{m})$$

$$\text{Pour } Z = 0 \quad \sigma' = 0$$

$$\text{Pour } Z = 6\text{m} \quad \sigma' = 45 + (20 - 10) \cdot 6 = 105 \text{ kN/m}^2$$

Pression interstitielle  $u$  :

$$u = u_0 + \Delta\sigma$$

🚧 Sable :

$$u = \gamma_w Z_w + 80 \quad (0 \leq Z_w \leq 5\text{m})$$

Pour  $Z = 0$   $u = 80 \text{ kN/m}^2$

Pour  $Z = 5\text{m}$   $u = 10.5 + 80 = 130 \text{ kN/m}^2$

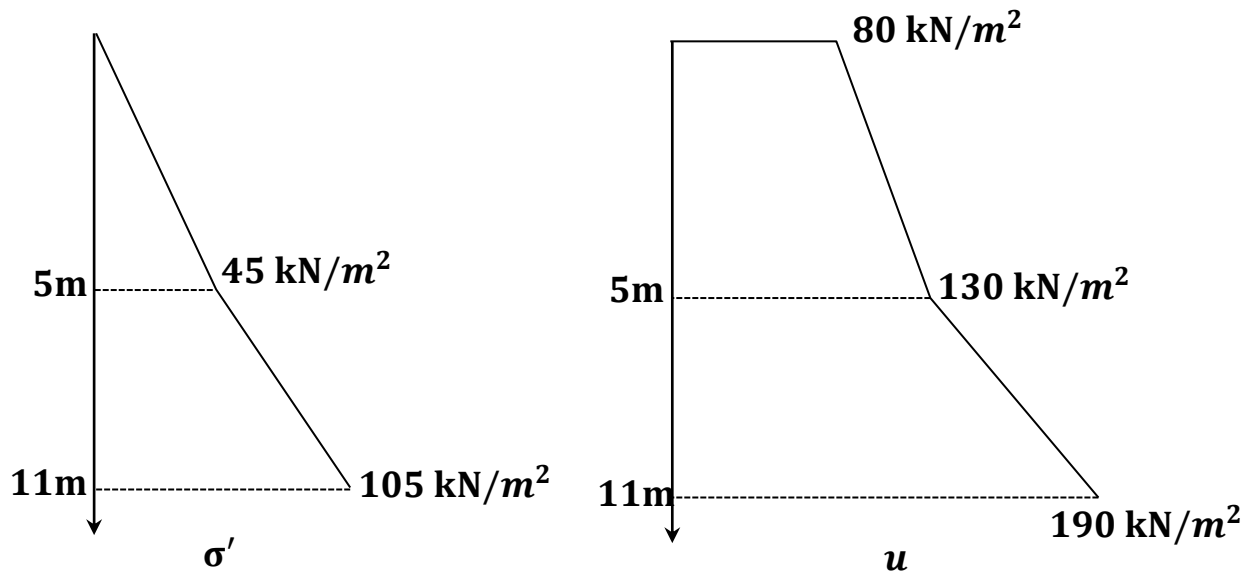
🚧 Argile :

$$u = u_0 + \Delta\sigma$$

$$u = 10.5 + \gamma_w Z_w + 80 \quad (0 \leq Z_w \leq 6\text{m})$$

Pour  $Z = 0$   $u = 130 \text{ kN/m}^2$

Pour  $Z = 6\text{m}$   $u = 50 + 60 + 80 = 190 \text{ kN/m}^2$



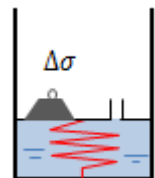
2. Après plusieurs années d'application de  $\Delta\sigma$  (à long terme) :

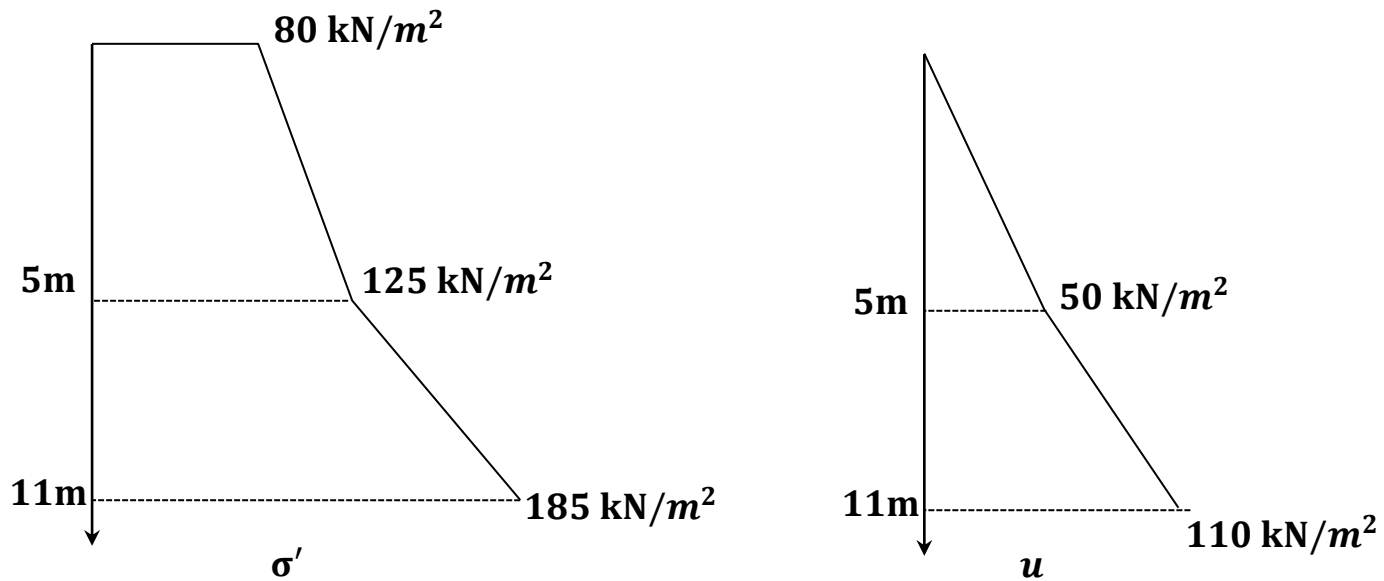
- la surpression interstitielle se dissipe (l'eau ne s'écoule plus)
- le ressort reprend toute la surcharge  $\Delta\sigma$

C'est-à-dire :

$$\sigma'_v = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma = \sum \gamma' \cdot Z + \Delta\sigma$$

$$u = u_0$$





### Exercice 2 :

On soumet un échantillon d'argile à un essai œdométrique qui donne les résultats suivants :

| Contraintes (kN/m <sup>2</sup> ) | Tassement $\Delta H$ (mm) |
|----------------------------------|---------------------------|
| 10                               | 0.02                      |
| 20                               | 0.03                      |
| 40                               | 0.05                      |
| 80                               | 0.1                       |
| 160                              | 0.19                      |
| 320                              | 0.43                      |
| 640                              | 1.09                      |
| 1280                             | 1.78                      |
| 160                              | 1.58                      |
| 40                               | 1.43                      |
| 10                               | 1.22                      |

La hauteur initiale de l'échantillon est de 25mm, et son indice des vides  $e_0 = 1,01$  ; on demande de :

- 1) Tracer la courbe de compressibilité ( $e - \log \sigma'_v$ ) ?
- 2) Déterminer la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$  ?
- 3) Calculer l'indice de compression à l'intervalle de contrainte 640 kN/m<sup>2</sup> et 1280 kN/m<sup>2</sup> ?

### Solution :

Pour tracer la courbe de compressibilité ( $e - \log \sigma'_v$ ) ; on doit calculer l'indice des vides pour chaque contrainte :

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

$$H = 25 \text{ mm}$$

$$e_0 = 1,01$$

et :

$$\Delta e = e_i - e_{i+1}$$

Donc :

$$\Delta e = \frac{1 + e_0}{H} \Delta H = \frac{2,01}{25} \Delta H$$

$$\Delta e = 8,04 \cdot 10^{-2} \Delta H$$

✚ Pour  $\sigma'_1 = 10 \text{ kN/m}^2$  :

$$\Delta H_1 = 0,02 \text{ mm}$$

$$\Delta e = 8,04 \cdot 10^{-2} \cdot 0,02 = 16,08 \cdot 10^{-4}$$

$$e_1 = e_0 - \Delta e$$

$$e_1 = 1,01 - 16,08 \cdot 10^{-4} = 1,008$$

✚ Pour  $\sigma'_2 = 20 \text{ kN/m}^2$  :

$$\Delta H_2 = 0,03 \text{ mm}$$

$$\Delta e_2 = 8,04 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta H \quad \text{avec} \quad \Delta H = \Delta H_2 - \Delta H_1$$

$$\Delta H = 0,03 - 0,02 = 0,01$$

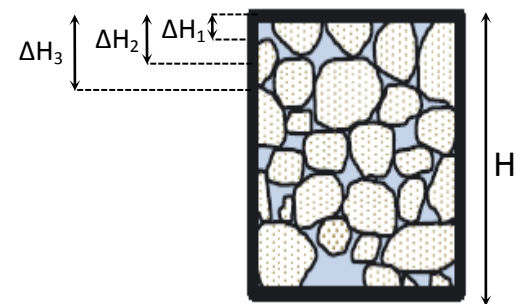
Donc :

$$\Delta e = 8,04 \cdot 10^{-2} \cdot 0,02 = 8,04 \cdot 10^{-4}$$

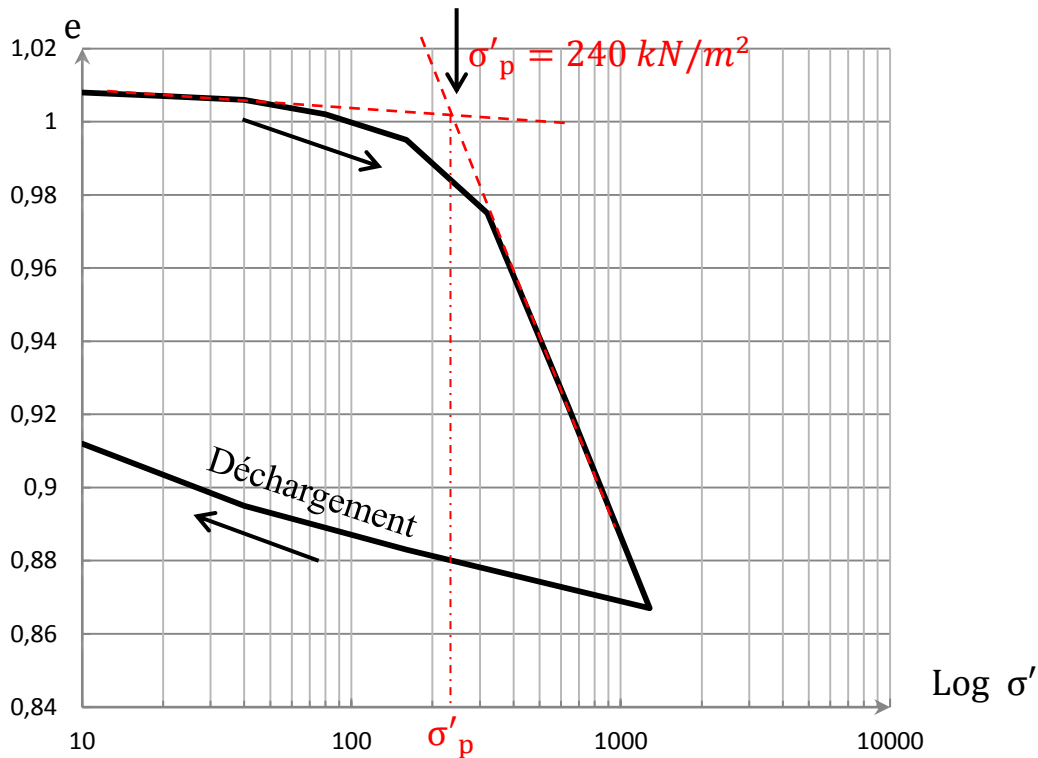
$$e_2 = e_1 - \Delta e_2$$

$$e_2 = 1,008 - 8,04 \cdot 10^{-4} = 1,007$$

On obtient :



| Contraintes (kN/m <sup>2</sup> ) | e     |
|----------------------------------|-------|
| 10                               | 1.008 |
| 20                               | 1.007 |
| 40                               | 1.006 |
| 80                               | 1.002 |
| 160                              | 0.995 |
| 320                              | 0.975 |
| 640                              | 0.922 |
| 1280                             | 0.867 |
| 160                              | 0.883 |
| 40                               | 0.895 |
| 10                               | 0.912 |



La contrainte de préconsolidation est de :  $\sigma'_p = 240 \text{ kN/m}^2$

3. L'indice de compression à l'intervalle de contrainte  $640 \text{ kN/m}^2$  et  $1280 \text{ kN/m}^2$  :

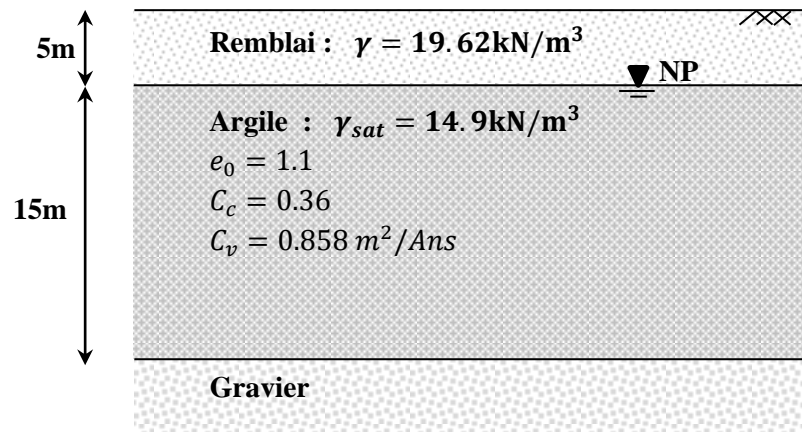
$$C_c = \left| \frac{e_1 - e_2}{(\log \sigma_1 - \log \sigma_2)} \right| = \frac{0,922 - 0,867}{\log 1280 - \log 640} = \frac{0,055}{0,301} = 0,182$$

➤ On peut considérer que ce sol est peu compressible

### Exercice 3 :

Le profil du sol illustré ci-dessous est constitué d'un remblai de 5m d'épaisseur surmontant une couche d'argile compressible de 15m d'épaisseur sur laquelle on trouve un gravier. La nappe phréatique est à 5m sous la surface du sol. Dans ce cas, l'argile est normalement consolidée ; on demande de

- 1) Calculer le tassement de consolidation à mi-hauteur de la couche d'argile produit par le remblai en considérant : **A)** une seule couche, **B)** on divise la couche d'argile en 5 couches ?
- 2) Calculer le tassement et le temps pour atteindre ce dernier au cours de la consolidation ?



### Solution :

1. Le tassement d'un sol normalement consolidé :  $\sigma'_{v0} = \sigma'_p$

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_0} H_0 \log \left( \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma}{\sigma'_{v0}} \right)$$

A . On considère une seule couche :

➤ Le remblai est considéré comme une surcharge  $\Delta\sigma$

$$\sigma'_v = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma \quad (\sigma'_{v0} : \text{contrainte initiale})$$

$$\sigma'_{v0} = \sum \gamma'_i \cdot Z_i$$

Au milieu de la couche d'argile :

$$\sigma' = (14,9 - 10) \cdot 7,5 = \mathbf{36,75 \text{ kN/m}^2}$$

**Donc :**

$$\sigma'_v = 36,75 + \gamma_{rem} \cdot Z_{rem} = 36,75 + 19,63 \cdot 5 = \mathbf{134,85 \text{ kN/m}^2}$$

**Le tassement de consolidation est :**

$$S_c = \frac{0,36}{1 + 1,1} 15 \log \left( \frac{134,85}{36,75} \right) = \mathbf{1,45m}$$

**B.** En divisant la couche d'argile en 5 sous-couches de 3m d'épaisseur :

$$S_c = \sum_1^n S_i$$

| Sous-couches | Z (m)<br>au milieu | $\sigma'_{v0}$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $\sigma'_v$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $\log\left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v0}}\right)$ | $S_i$<br>(m) |
|--------------|--------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------|
| 1            | 1.5                | 7.35                                   | 105.45                              | 1.156                                             | 0.594        |
| 2            | 4.5                | 22.05                                  | 120.15                              | 0.736                                             | 0.378        |
| 3            | 7.5                | 36.75                                  | 134.85                              | 0.564                                             | 0.289        |
| 4            | 10.5               | 51.45                                  | 149.55                              | 0.463                                             | 0.238        |
| 5            | 13.5               | 66.15                                  | 164.25                              | 0.395                                             | 0.203        |

$$\sum S_i = 1,7 \text{ m}$$

$$S_c = \sum_1^5 S_i = 1,7 \text{ m}$$

- Si l'on a une couche d'argile de grande épaisseur, il vaut mieux la subdiviser en sous-couches.

**2.** Le tassement et le temps pour atteindre ce dernier au cours de la consolidation :

Le degré de consolidation d'une couche d'argile au cours de temps peut être exprimé par la relation suivante :

$$U = \frac{S_{c(t)}}{S_c}$$

- On doit calculer et le **temps** correspondant à chaque degré de consolidation :

$$S_{c(t)} = S_c \cdot U$$

Et pour calculer le temps, on utilise la formule suivante :

$$T_v = \frac{c_v t}{H_{dr}^2} = \text{facteur temps}$$

$$\text{Donc : } t = \frac{T_v H_{dr}^2}{c_v} \quad H_{dr} = 7.5 \text{ m (perméable - perméable)}$$

Et :

$$\text{Lorsque } U = 0 \text{ à } 60\%, \quad T_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{U\%}{100} \right)^2$$

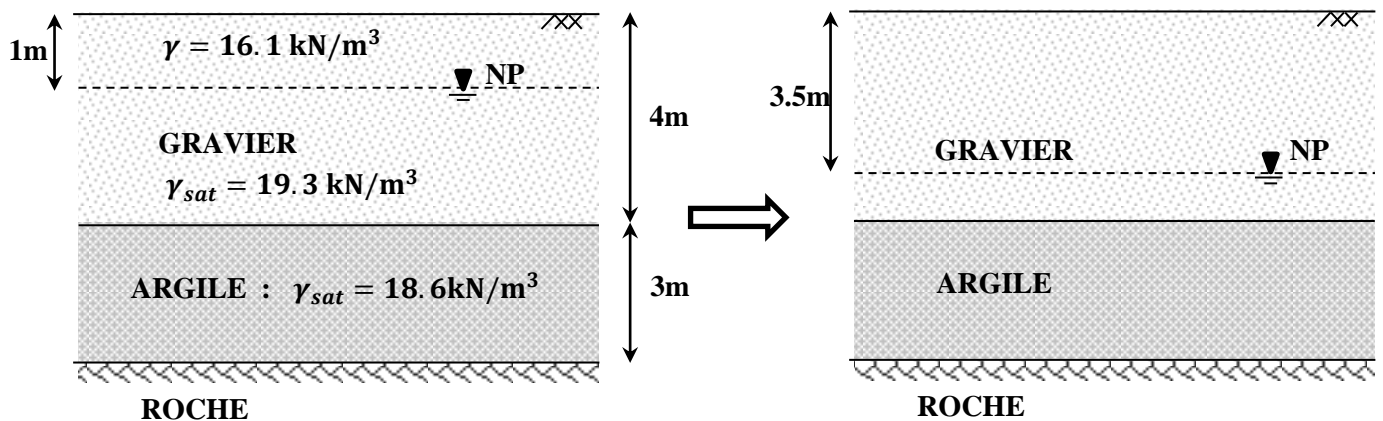
$$\text{Lorsque } U > 60\%, \quad T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U\%)$$

| U (%) | Tv    | Sc(t) | t (ans) |
|-------|-------|-------|---------|
| 10    | 0.008 | 0.17  | 0.524   |
| 20    | 0.031 | 0.34  | 2.03    |
| 30    | 0.071 | 0.51  | 4.65    |
| 40    | 0.126 | 0.68  | 8.26    |
| 50    | 0.197 | 0.85  | 12.92   |
| 60    | 0.287 | 1.02  | 18.82   |
| 70    | 0.403 | 1.19  | 26.42   |
| 80    | 0.567 | 1.36  | 37.17   |
| 90    | 0.848 | 1.53  | 55.59   |
| 95    | 1.163 | 1.615 | 76.25   |

#### Exercice 4 :

Soit le profil du sol illustré ci-dessous constitué d'une couche de gravier de 4m d'épaisseur surmontant une couche d'argile de 3m d'épaisseur reposant sur une roche. Au début, le niveau de la nappe est à 1 m sous la surface de sol. En raison des travaux de construction, son niveau est abaissé de 2.5m pour une période de 2 ans. A la fin de cette période, la consolidation de l'argile est de 50%, et le tassement correspondant est de 70mm.

- 3) Quelles sont les valeurs de coefficients  $m_v$  ( $m^2/kN$ ),  $C_v$  ( $m^2/Ans$ ), et  $k$  ( $m/s$ ) ?





## Solution :

1. Coefficient de changement de volume  $m_v$  :

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma' (1 + e_0)} = \frac{\Delta H}{H \Delta \sigma'}$$

On peut écrire :

$$\Delta H = m_v \cdot H \cdot \Delta \sigma'$$

$$\text{Ou : } S_c = m_v \cdot H \cdot \Delta \sigma'$$

➤ On doit calculer  $S_c$  et  $\Delta \sigma'$

Après 2 années de travaux ; on a :

$$U = 50\% \quad \text{et} \quad S_{c(t)} = 70 \text{ mm}$$

$$\text{Et on a : } U = \frac{S_{c(t)}}{S_c}$$

$$\text{Donc : } S_c = \frac{S_{c(t)}}{U} = \frac{70}{0,5} = \mathbf{140 \text{ mm}}$$

**La contrainte verticale :**

$$\sigma'_{v'} = \sigma'_{v0} + \Delta \sigma'$$

$\sigma'_{v'}$  : contrainte après l'abaissement de la nappe

$\sigma'_{v0}$  : contrainte avant l'abaissement de la nappe

➤ Au milieu de la couche d'argile :

$$\sigma'_{v0} = 16,1 \cdot 1 + (19,3 - 10) \cdot 3 + (18,6 - 10) \cdot 1,5 = \mathbf{56,9 \text{ kN/m}^2}$$

$$\sigma'_{v'} = 16,1 \cdot 3,5 + (19,3 - 10) \cdot 0,5 + (18,6 - 10) \cdot 1,5 = \mathbf{73,9 \text{ kN/m}^2}$$

✚ On remarque que l'abaissement de la nappe augmente la contrainte effective ; dans ce cas le tassement augmente aussi.

Donc :

$$\Delta \sigma' = \sigma'_{v'} - \sigma'_{v0} = 73,9 - 56,9 = \mathbf{17 \text{ kN/m}^2}$$

$$m_v = \frac{S_c}{H \Delta \sigma'} = \frac{140 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 17} = \mathbf{2,74 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kN}}$$

2. Le coefficient de consolidation  $c_v$  :

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$$

$$\text{On a : } T_v = \frac{c_v t}{H_{dr}^2}$$

$$\text{Donc : } c_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{t}$$

Et :

$$\text{Lorsque } U = 0 \text{ à } 60\%, \quad T_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{U\%}{100} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left( \frac{50}{100} \right)^2 = 0,196$$

$H_{dr} = H$  : perméable – imperméable

$$c_v = \frac{0,196 \cdot 3^2}{2} = \mathbf{0,883 \text{ m}^2/\text{ans}}$$

3. Le coefficient de perméabilité  $k$  :

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$$

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w = 0,883 \cdot 2,73 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = \mathbf{0,0242 \text{ m/ans}}$$

$$k = \mathbf{7,67 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}}$$