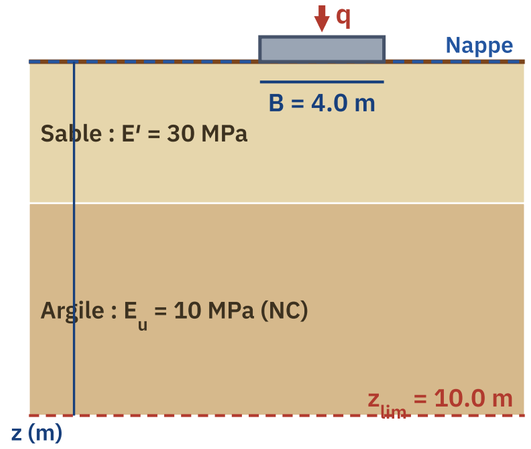
Présentation de cours de géotechnique · Tassement

# Tassement total : couches d'argile et de sable

Cours : combinaison du tassement immédiat (élastique) et de la consolidation de l'argile dans un profil de couches d'argile et de sable, tassement au centre, à l'angle et sous fondation rigide, tassement total en fonction du temps ; exemple de calcul pour chaque sujet.

- $S = S_e + S_c$
- Couches d'argile et de sable
- Steinbrenner
- Chemin de contraintes
- Centre · angle · rigide
- Courbe tassement–temps



# Que verrons-nous dans ce cours ?

- Distinction du tassement selon le type de couche : couche **cohérente** = tassement immédiat + consolidation, couche **granulaire** = tassement élastique uniquement
- Combiner dans les mêmes tranches les calculs de **Steinbrenner** (immédiat) et du **chemin de contraintes** (consolidation)
- Voir l'effet de la fouille : la **pression nette** détermine le tassement immédiat, tandis que le **soulèvement et la recompression** déterminent la consolidation
- Déterminer le tassement au **centre** et au **coin** d'une semelle flexible, ainsi que celui de la semelle rigide et le tassement différentiel, à partir du tassement total
- Construire la courbe tassement–temps $\mathbf{S(t) = S_e + \Sigma\, U_i(t)\, S_{c,i}}$
- Vérifier que le résultat du module est égal à la somme des modules à un seul type de sol (Tassement élastique + Consolidation)

### DÉROULÉ DU COURS

Chaque thème est traité en **trois étapes** :

1 · **Théorie** : quelle est la règle, pourquoi en est-il ainsi ?

2 · **Énoncé** : données et à déterminer

3 · **Solution** : étape par étape, avec les valeurs numériques

Profil de l'exemple : 6 m d'argile normalement consolidée sur 4 m de sable ; semelle de 4 × 6 m, q = 150 kPa. Les tassements sont exprimés en mm.

# Tassement total = tassement immédiat + consolidation

THÉORIE

$$S = S_e + S_c \qquad \text{couche cohérente : } S_e(\text{non drainé}) + S_c \qquad \text{couche granulaire : } S_e(\text{drainé})$$

Les deux composantes sont calculées **dans les mêmes tranches**, avec le même accroissement de contrainte de Boussinesq, la même fouille et la même profondeur de calcul. La solution est **analytique** : coefficients d'influence en forme fermée, chemin de contraintes tranche par tranche et théorie de Terzaghi ; il n'y a pas d'éléments finis.

L'argile saturée ne change pas de volume lorsque la charge est appliquée (v = 0.5) : c'est son tassement immédiat. L'eau s'évacue lentement et l'argile se comprime le long du chemin de contrainte : c'est la consolidation. Le sable libérant immédiatement son eau, la totalité de son tassement est élastique.

> Pour un profil d'un seul type, le module donne **le même résultat** que le module Tassement élastique ou le module Consolidation (Exemple 6).

> Le type de chaque couche est choisi dans le tableau Profil de sol et détermine les paramètres requis pour la couche.

### TYPE DE COUCHE

| Couche | Tassement immédiat | Consolidation |
|---|---|---|
| Cohérent | $E_u$ non drainé, v = 0.5 | disponibles : $C_c$, $C_r$, $C_s$, $e_0$, $\sigma'_p$ (ou $m_v$), $C_v$ |
| Pulvérulent | drainé E′, v′ | aucun |

# Loi de Hooke et coefficients de Steinbrenner

THÉORIE

Le tassement sous une fondation parfaitement flexible portant la contrainte nette $q_{net}$ est l'intégrale de la déformation verticale (contraintes de Boussinesq, demi-espace homogène) :

$$S = \int \varepsilon_z \, dz = \int \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} \, dz$$

Solution analytique pour le coin d'un rectangle (Steinbrenner) :

$$S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,I_s \qquad I_s = F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu}F_2$$

m′ = L′/B′, n′ = z/B′. **Centre** : α = 4, B′ = B/2 ; **angle** : α = 1, B′ = B.

Dans la couche cohérente, v = 0.5, d'où $I_s = F_1$ et $(1 - v^2) = 0.75$.

### MODULES DE DÉFORMATION POUR LE TASSEMENT ÉLASTIQUE

Les formules de $F_1$, $F_2$, $A_0$, $A_1$, $A_2$ et les exemples détaillés figurent dans les présentations sur le tassement élastique ; ici, seuls leurs résultats sont utilisés pour la sommation.

# Profil stratifié et pression nette

THÉORIE

Une couche comprise entre les profondeurs $z_{sup}$ et $z_{inf}$ à partir du niveau de la fondation apporte sa différence de $I_s$, avec son propre E et son propre v :

$$\Delta S_e = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,[I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{üst})]$$

La fouille supprime la contrainte verticale effective des terres au niveau de la base ; dans un sol élastique à module d'Young unique, la décharge est récupérée au rechargement, et le tassement immédiat est déterminé par la **pression nette** :

$$q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$$

Si $q_{net} \leq 0$, il ne se produit pas de tassement immédiat (une valeur négative correspond à un soulèvement élastique).

Le résultat ne dépend pas de l'épaisseur des tranches ; les tranches ne servent qu'aux tableaux et aux zones colorées.

**NEDEN FARKLI?**

Le tassement immédiat est calculé avec la **pression nette** et la consolidation avec l'**accroissement de contrainte effective** le long du chemin de contraintes ; la fouille agit sur les deux de manières différentes.

# Chemin de contrainte et compression de la tranche

THÉORIE

Dans les tranches cohérentes, la consolidation est calculée non pas en une seule étape de la contrainte initiale à la contrainte finale, mais le long du **chemin de contrainte** : gonflement dû à l'excavation ($C_s$), puis, au rechargement, annulation préalable du soulèvement, recompression avec $C_r$ jusqu'à $\sigma'_p$, et compression vierge avec $C_c$ au-delà :

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final} \qquad \sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$$

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v)\,, \quad f = \frac{\Delta H}{1 + e_0} \qquad \Delta\sigma_{load} = q\, I_z(z') \qquad \sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

Pour l'argile NC (OCR = 1) : $S = C_c\, f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_{v0})$ (sans excavation).

Le soulèvement est négatif ; $S_{net} = S_c + S_{sou}$. Avec l'option **Conservé**, le tassement est mesuré à partir du sol d'origine ; avec l'option **Remis à zéro**, à partir du fond soulevé.

Profondeur de calcul : $I_z(z') = p$ (couramment 10 %) ou la base du profil ; la méthode $m_v$ est une option linéaire.

**DÉTAIL**

L'exposé complet du chemin de contraintes, des régimes, de la fouille et de la courbe en fonction du temps figure dans la présentation Consolidation.

# Énoncé

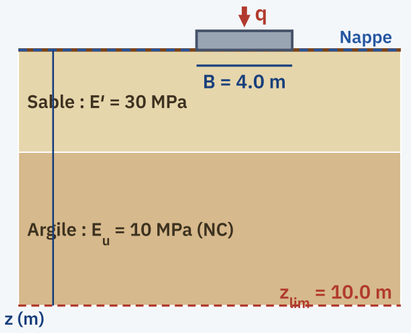
EXEMPLE

## Données

| | |
|---|---|
| Profil | **sable 0–4 m :** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **argile 4–10 m (NC) :** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/an},\ \gamma_{sat} = 18$ |
| Fondation | **Rectangle flexible de 4 × 6 m,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, à la surface du sol ; nappe à la surface ; profondeur de calcul 10 m (base du profil)** |
| Fouille | **aucune ($q_{net}$ = 150 kPa)** |

## À DÉTERMINER

Tassement immédiat $S_e$ au **centre** et au **coin** de chaque couche.



# Solution

SOLUTION

**1** Sable (0–4 m) : k = q(1 – ν′²)/E′ = 150(0.91)/30 000 = 0.004550 ; 8 $I_s(4)$ = 2.7351

$$\Delta S_e = k\,[(\alpha B' I_s)_4 - 0] = 0.004550(2.7351) = \mathbf{12.4\ mm}$$

**2** Argile (4–10 m) : k = 150(0.75)/10 000 = 0.011250 ; 8 $I_s(4)$ = 2.3398 ; 8 $I_s(10)$ = 3.9643

$$\Delta S_e = 0.011250(3.9643 - 2.3398) = \mathbf{18.3\ mm}$$

Au centre, $S_e$ = 12.4 + 18.3 = **30.7 mm** ; au coin, 3.4 + 9.8 = **13.2 mm** (au coin, α = 1, B′ = B).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

# Boussinesq, profondeur d'influence et méthode du $m_v$

THÉORIE

Sous le centre de la fondation, pour un rectangle B × L, avec le coefficient de coin de Newmark, et pour une bande, avec la solution fermée en α :

$$\Delta\sigma = q\, I_z(z') \qquad I_z = 4\, I_{köşe}(m,n)\ \ (m = \tfrac{B}{2z'},\ n = \tfrac{L}{2z'}) \qquad I_{z,\text{bande}} = \frac{\alpha + \sin\alpha}{\pi}$$

**Profondeur d'influence** : $I_z(z')$ = p (couramment 10 %) ; carrée 2.09 B, 2.55 B pour L = 1.5 B, filante 6.34 B. Si la base du profil est choisie, le calcul s'arrête à la dernière couche (dans le rocher ou dans une grave dense).

Si le profil se termine au-dessus de $z_{lim}$, la dernière couche se prolonge jusqu'à $z_{lim}$.

**Méthode $m_v$** : $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$ ; linéaire, $C_c/C_r/C_s$ ne sont pas combinés.

**DANS CE PROFIL**

La profondeur de calcul est la base du profil (10 m) ; un substratum rigide est supposé. Pour la tranche d'argile à z = 7 m, $I_z(z' = 7) = 0.1916$.

# Énoncé

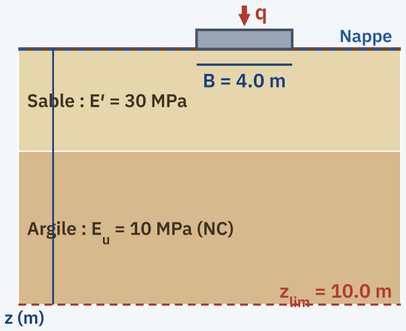
EXEMPLE

## Données

| | |
|---|---|
| Profil | **sable 0–4 m :** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ **· argile 4–10 m (NC) :** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/an},\ \gamma_{sat} = 18$ |
| Fondation | **Rectangle flexible de 4 × 6 m,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, à la surface du sol ; nappe à la surface ; profondeur de calcul 10 m (base du profil)** |
| Tranche | **argile tranche unique,** $H = 6$ **m, point milieu** $z = 7$ **m ;** $f = H/(1 + e_0) = 3$ **m** |
| Contraintes | $\sigma'_{v0} = 9.19(4) + 8.19(3) = 61.33\ \mathrm{kPa}$ |

## À DÉTERMINER

**$I_z$, $\Delta\sigma$, $\sigma'_{final}$** et **$S_c$**.



# Solution

SOLUTION

**1** Boussinesq (z′ = 7 m) : m = 2/7 = 0.2857 ; n = 3/7 = 0.4286

$$I_z = 4\,I_{köşe}(0.2857;\,0.4286) = 4(0.0479) = \mathbf{0.1916} \qquad \Delta\sigma = 150(0.1916) = 28.75\ \text{kPa}$$

**2** Contrainte et compression finales (NC : $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$)

$$\sigma'_{final} = 61.33 + 28.75 = 90.08\ \text{kPa}$$

$$S_c = C_c f \log\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)\log\frac{90.08}{61.33} = \mathbf{150.2\ mm}$$

Le tassement de consolidation de l'argile est de **150.2 mm** : environ **4.9 fois** le tassement immédiat (30.7 mm). Dans une argile NC molle, le tassement principal provient de la consolidation.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

# Centre, coin et semelle rigide

THÉORIE

Pour chaque tranche, les composantes immédiate et (dans la couche cohérente) de consolidation sont additionnées ; la somme sur les couches jusqu'à $z_{lim}$ donne le tassement au **centre** de la fondation souple :

$$S = \sum \Delta S_e + \sum (\Delta S_b + \Delta S_r + \Delta S_v) \quad [+ S_{heave}]$$

$$S_{köşe} = S_{e,köşe} + S_c \qquad S_{rigid} = 0.93\, S_e + S_c \qquad S_{diff} = S_e - S_{e,köşe}$$

Pour le coin, **seul le tassement immédiat** prend la valeur propre du rectangle de coin ; la consolidation provient du chemin de contraintes sur la ligne centrale et est supposée identique au coin.

La fondation rigide tasse uniformément : la part immédiate représente environ 0.93 fois celle du centre de la fondation flexible, et la part de consolidation est celle du centre.

Fouille : la part instantanée est calculée avec $q_{net}$, le soulèvement et la recompression de l'argile l'étant de la même manière ; avec l'option « conservé », $S = S_e + S_c + S_{soulèv}$.

### SI L'ARGILE EST DOMINANTE

La consolidation étant la même au centre et à l'angle, dans les profils où l'argile domine, le **tassement différentiel** n'est que la différence de la composante immédiate.

# Énoncé

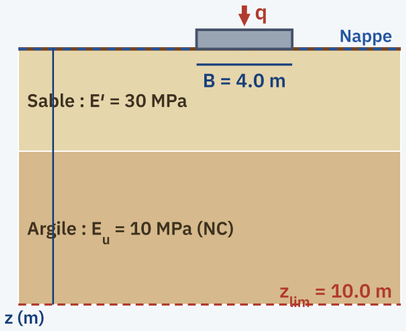
EXEMPLE

## Données

| | |
|---|---|
| Profil | **sable 0–4 m :** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ **· argile 4–10 m (NC) :** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/an},\ \gamma_{sat} = 18$ |
| Fondation | **Rectangle flexible de 4 × 6 m,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, à la surface du sol ; nappe à la surface ; profondeur de calcul 10 m (base du profil)** |
| Exemples précédents | $S_e$ **: 30.7 au centre, 13.2 mm au coin ;** $S_c$ **= 150.2 mm (exemples 1 et 2)** |

## À DÉTERMINER

Tassement total **au centre, à l'angle, de la fondation rigide** ; tassement différentiel ; part de la composante immédiate.



# Solution

SOLUTION

**1** Totaux

$$S_{center} = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0\ mm} \qquad S_{köşe} = 13.2 + 150.2 = \mathbf{163.4\ mm}$$

$$S_{rigid} = 0.93(30.7) + 150.2 = \mathbf{178.8\ mm} \qquad S_{diff} = 30.7 - 13.2 = \mathbf{17.5\ mm}$$

| | $S_e$ (mm) | $S_c$ (mm) | total (mm) |
|---|---|---|---|
| centre (flexible) | 30.7 | 150.2 | **181.0** |
| angle (souple) | 13.2 | 150.2 | **163.4** |
| rigide | 28.6 | 150.2 | **178.8** |

Le tassement immédiat ne représente que **17 %** du total ; le tassement différentiel est de 17.5 mm. La consolidation de l'argile étant identique au centre et au coin, le tassement du coin vaut 90 % de celui du centre.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

# Énoncé

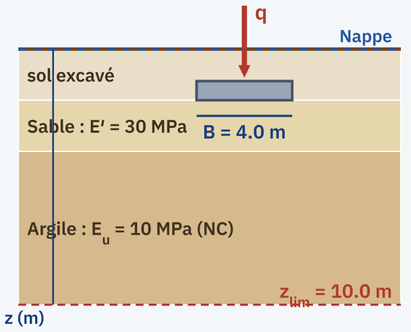
EXEMPLE

## Données

| | |
|---|---|
| Profil | **sable 0–4 m ($E' = 30,\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$) · argile 4–10 m (NC ; $E_u = 10,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_s = C_r = 0.06,\ \gamma_{sat} = 18$) ; nappe phréatique à la surface** |
| Fouille | **excavation large ($I_{exc}$ = 1), profondeur 2 m ; à la base de la fouille de fondation** |
| Fondation | **4 × 6 m, $q_{gross} = 150\ \mathrm{kPa}$ ; profondeur de calcul 10 m** |
| Tranches | **sable 2–4 m (H = 2 m), argile 4–10 m (z = 7 m, f = 3 m)** |

### À DÉTERMINER

$q_{net}$, $S_e$ ; gonflement de l'argile et $S_c$ ; tassement total (conservé et remis à zéro).



# Solution (1/3)

SOLUTION

**1** Pression nette : $q_{soulèvement} = \sigma'_{v0}(2\text{ m}) = 9.19(2) = 18.38$ kPa

$$q_{net} = 150 - 18.38 = \mathbf{131.62}\ \text{kPa}$$

**2** Tassement immédiat : sable (z′ 0–2 m) k = 0.003992 ; argile (z′ 2–8 m) k = 0.009872 ($k = q_{net}(1 - \nu^2)/E$)

$$\text{sable} : \Delta S_e = 0.003992(1.5131 - 0) = 6.0\ \text{mm}$$

$$\text{argile} : \Delta S_e = 0.009872(3.6370 - 1.0554) = 25.5\ \text{mm}$$

L'excavation a réduit la contrainte nette de 150 à 131.6 kPa ; le tassement immédiat passe de 30.7 à **31.5 mm** (les 2 m supérieurs du sable ont été excavés, l'argile est donc moins chargée).

# Solution (2/3)

SOLUTION

**3** Argile : chemin de contrainte (z′ = 5 m : $I_z$ = 0.3204)

$$\sigma'_{exc} = 61.33 - 18.38 = 42.95\ \text{kPa} \qquad \Delta\sigma = 150(0.3204) = 48.05\ \text{kPa}$$

$$\text{soulèvement} = -0.06(3)\log\frac{61.33}{42.95} = -27.8\ \text{mm} \qquad \sigma'_{final} = 42.95 + 48.05 = 91.00\ \text{kPa}$$

**4** Argile NC ($\sigma'_p = \sigma'_{v0}$) : $S_b$ récupère le gonflement, $S_v$ est la compression vierge

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{61.33}{42.95} = 27.8\ \text{mm} \qquad S_v = 0.30(3)\log\frac{91.00}{61.33} = 154.2\ \text{mm}$$

$$S_c = S_b + S_v = \mathbf{182.1\ mm}$$

# Solution (3/3)

SOLUTION

| | $S_e$ (mm) | $S_c$ (mm) | soulèvement (mm) | total (mm) |
|---|---|---|---|---|
| sans fouille (Exemple 3) | 30.7 | 150.2 | 0 | **181.0** |
| excavé, **conservé** (par rapport au terrain d'origine) | 31.5 | 182.1 | -27.8 | **185.8** |
| exécuté en fouille, **remis à zéro** (à partir du fond soulevé) | 31.5 | 182.1 | — | **213.6** |

Le tassement total mesuré à partir du sol d'origine est de **185.8 mm** ($S_e$ + $S_c$ + soulèvement) ; mesuré à partir du fond soulevé, il est de **213.6 mm**. L'écart est égal au soulèvement (27.8 mm).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

# Tassement immédiat d'emblée, consolidation dans le temps

THÉORIE

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \qquad U(T_v) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \qquad M = \frac{\pi(2m+1)}{2}$$

$$S(t) = S_e + \sum_i U_i(t)\, S_{c,i} \;\; [+ S_{heave}] \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

$S_e$ est acquis **immédiatement** ($t = 0^+$) ; la consolidation se développe dans chaque couche cohérente avec son propre $C_v$ et son propre $H_{dr}$ : $H_{dr}$ = H (drainage d'un seul côté) ou H/2 (drainage des deux côtés).

$T_{v,50} = 0.197$; $T_{v,90} = 0.848$; $T_v < 0.05$'te $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

La courbe est la somme des courbes des couches ; les valeurs $t_{50}$ et $t_{90}$ du système sont lues sur cette somme. Dans un profil sans couche cohérente, il n'y a pas de courbe en fonction du temps : la totalité du tassement est immédiate.

Avec l'option « conservée », la courbe part d'un soulèvement nul et se termine à la déformation nette.

**SABLE + ARGILE**

Le sable se tasse immédiatement ; **l'argile détermine la forme de la courbe temporelle**.

# Énoncé

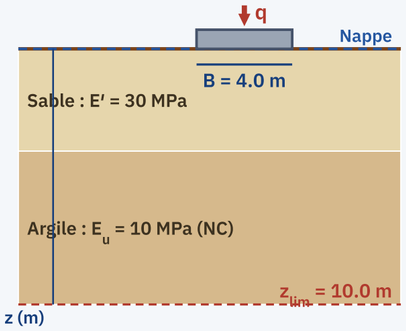
EXEMPLE

## Données

| | |
|---|---|
| Profil | **sable 0–4 m :** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ **· argile 4–10 m (NC) :** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/an},\ \gamma_{sat} = 18$ |
| Fondation | **Rectangle flexible de 4 × 6 m,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, à la surface du sol ; nappe à la surface ; profondeur de calcul 10 m (base du profil)** |
| Exemples précédents | **$S_e$ = 30.7 mm (Exemple 1) ; $S_c$ = 150.2 mm (Exemple 2) ; pas de fouille** |
| Drainage | **l'argile draine en tête (sable) et en pied (substratum rigide) : drainage double, H = 6 m** |
| Temps | **t = 0.25 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 8 ans** |

### À DÉTERMINER

**$H_{dr}$, $t_{50}$, $t_{90}$** et S(t) ; tassement à t = 0⁺.



# Solution (1/2)

SOLUTION

**1** Chemin de drainage et durées ($C_v$ = 2 m²/an)

$$H_{dr} = \frac{H}{2} = 3\ \text{m} \qquad t_{50} = \frac{0.197(3^2)}{2} = \mathbf{0.89}\ \text{an} \qquad t_{90} = \frac{0.848(3^2)}{2} = \mathbf{3.82}\ \text{an}$$

**2** Tassement initial et tassement final

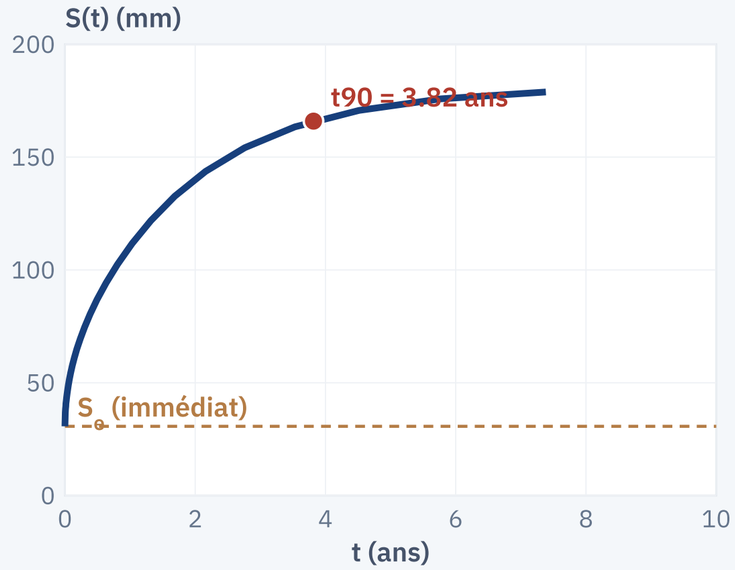
$$S(0^+) = S_e = 30.7\ \text{mm} \qquad S(\infty) = S_e + S_c = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0\ mm}$$

Dès l'application de la charge, le tassement est de 30.7 mm (17 % du total) ; 90 % de la consolidation de l'argile s'achève en **3.82 ans**.

# Solution (2/2)

SOLUTION

| t (ans) | U | $S_c(t)$ (mm) | $S(t) = S_e + S_c(t)$ (mm) |
|---|---|---|---|
| 0.25 | 0.266 | 40.0 | **71** |
| 0.50 | 0.376 | 56.5 | **87** |
| 1.00 | 0.531 | 79.8 | **110** |
| 2.00 | 0.729 | 109.6 | **140** |
| 4.00 | 0.910 | 136.7 | **167** |
| 8.00 | 0.990 | 148.7 | **179** |




En 1 an, le tassement total atteint 110 mm (61 % de la valeur finale), en 4 ans 167 mm (92 %). La courbe part du tassement immédiat et s'élève avec la consolidation de l'argile.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

# Énoncé

EXEMPLE

**Données**

| | |
|---|---|
| Profil | **argile seule, 0–6 m (NC) :** $E_u = 10\ \mathrm{MPa}$**,** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ \gamma_{sat} = 18$ **; nappe phréatique à la surface** |
| Fondation | **4 × 6 m,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, pas de fouille ; profondeur de calcul 6 m (base du profil)** |
| Comparaison | **Modules Tassement élastique (sol cohérent) + Consolidation** |

**À DÉTERMINER**

Comparer $S_e$, $S_c$ et le total du module Tassement total avec les résultats des deux modules à type unique.

# Solution

SOLUTION

| Module | $S_e$ (mm) | $S_c$ (mm) | total (mm) |
|---|---|---|---|
| Tassement élastique : sol cohérent | 35.3 | — | — |
| Consolidation | — | 591.6 | — |
| somme des deux modules | 35.3 | 591.6 | **626.9** |
| **Tassement total (2D)** | 35.3 | 591.6 | **626.9** |

Le module Tassement total est **strictement identique** à la somme des deux modules pour un profil d'un seul type (626.9 mm). Le total en angle est de 601.5 mm ($S_{e,ang}$ = 9.9 + $S_c$), celui de la fondation rigide de 624.4 mm.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

# Énoncé

EXEMPLE

## Données

| | |
|---|---|
| Profil | **Remblai, sableux 0–2 m (E = 12 MPa) · Argile-1 2–7 m ($E_u$ = 8 MPa ; $C_c$ = 0.25 ; OCR = 1.6) · Sable 7–11 m (E = 35 MPa) · Argile-2 11–20 m ($E_u$ = 15 MPa ; $C_c$ = 0.30 ; OCR = 1.3) · Sable graveleux 20–30 m (E = 70 MPa)** |
| Semelle, fouille | **10 × 15 m, $q_{brut}$ = 120 kPa ; profondeur d'excavation 2 m (plan de fouille = fondation) ; nappe à 2 m** |
| Profondeur de calcul | **profondeur d'influence, p = 10%** |
| Résultat | **Projet exemple du module Tassement total** |

### À DÉTERMINER

$S_e$ et $S_c$ couche par couche, soulèvement ; centre, coin, total rigide ; $t_{50}$ et $t_{90}$.

# Solution (1/2)

SOLUTION

1 Profondeur de fouille et profondeur de calcul

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 18(2) = 36.0\ \text{kPa} \qquad q_{net} = 120 - 36.0 = \mathbf{84.0}\ \text{kPa}$$

$$z_{lim} = D_f + z' = 2 + 25.47 = \mathbf{27.47}\ \text{m}$$

Le remblai (0–2 m) est retiré par la fouille ; le calcul couvre quatre couches de 2 m à $z_{lim}$ = 27.5 m. La dernière couche (sable graveleux) est coupée par $z_{lim}$ ; la contribution des couches profondes est faible.

# Solution (2/2)

SOLUTION

| Couche | z (m) | $S_e$ (mm) | $S_c$ (mm) | soulèvement (mm) | total = $S_e$ + $S_c$ + gonflement (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| Argile-1 (CL, molle) | 2.0 – 7.0 | 20.8 | 198.4 | -62.6 | 156.6 |
| Sable (SM, moyennement dense) | 7.0 – 11.0 | 5.6 | — | — | 5.6 |
| Argile-2 (CH, solide) | 11.0 – 20.0 | 14.1 | 27.0 | -6.5 | 34.6 |
| Sable graveleux (dense) | 20.0 – 27.5 | 1.2 | — | — | 1.2 |
| **Total (centre)** | | **41.7** | **225.4** | **-69.1** | **198.0** |

Centre **198.0 mm** = $S_e$ 41.7 + $S_c$ 225.4 – soulèvement 69.1 (conservé) ; angle 168.7 mm, rigide 195.1 mm. Temps : $t_{50}$ = 0.72 an, $t_{90}$ = 3.71 ans. Le module donne les mêmes valeurs.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

# Points à retenir lors de la lecture des résultats

THÉORIE

Niveau de la fondation = fond de fouille ; pression uniforme sous une fondation entièrement flexible ; fondation rigide ≈ 0.93 × centre flexible pour la part immédiate.

**Tassement immédiat** : contraintes du demi-espace homogène dans chaque couche (avec son propre ν) ; couche cohérente non drainée ($\nu = 0.5$), couche granulaire drainée ; pas de correction d'encastrement ($I_f = 1$).

**Consolidation** : Terzaghi unidimensionnel ; pression interstitielle hydrostatique, le niveau de la nappe n'est pas modifié par la fouille ; $\sigma'_p$ est la contrainte maximale passée, elle ne diminue pas avec la fouille ; l'accroissement de contrainte est pris selon la verticale sous le centre.

Tassement positif, soulèvement négatif ; le sélecteur de l'en-tête inverse ce signe (le moteur reste classique).

**Hors du domaine d'application** : compression secondaire, consolidation des couches granulaires, Schmertmann et abaques SPT/CPT, module de déformation croissant avec la profondeur à l'intérieur d'une couche (subdiviser la couche), rigidité de la fondation et interaction sol–structure, consolidation 2D/3D, éléments finis, capacité portante, liquéfaction.

Synthèse

# Points à retenir

**$S = S_e + S_c$** : couche cohérente = tassement immédiat non drainé + consolidation ; couche granulaire = tassement élastique drainé uniquement

**Tassement immédiat** (Steinbrenner) : $\Delta S_e = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot [I_s(z_{inf}) - I_s(z_{sup})]$ ; $q_{net} = q_{brut} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$

**Consolidation** : chemin de contrainte $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_p \rightarrow \sigma'_{fin}$ ($C_s$, $C_r$, $C_c$) ; dans une argile NC, $S_c = C_c\, f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_{v0})$

**Centre** $S_e + S_c$ ; **angle** $S_{e,ang} + S_c$ ; **rigide** $0.93\, S_e + S_c$ ; tassement différentiel = différence des composantes immédiates

**Fouille** : la partie immédiate avec $q_{net}$, l'argile par gonflement + recompression ; « conservé » $S = S_e + S_c + S_{gonf}$, « remis à zéro » $S_e + S_c$

**Temps** : $S(t) = S_e + \Sigma\, U_i(t)\, S_{c,i}$ ; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$ ; $H_{dr} = H$ (simple) ou $H/2$ (double)

Pour un profil à un seul type de sol, le résultat est **strictement identique** à celui du module Tassement élastique ou Consolidation

# Références bibliographiques

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage.

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage – chap. 10–11 (accroissement de contrainte, tassement de consolidation, évolution dans le temps).

Steinbrenner, W. (1934). Tafeln zur Setzungsberechnung. Die Strasse, 1, 121–124.

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley.

Duncan, J.M. & Buchignani, A.L. (1976). An engineering manual for settlement studies. University of California, Berkeley.

Kulhawy, F.H. & Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI EL-6800.

**REMARQUE**

Tous les exemples numériques ont été produits avec le moteur de calcul propre au module, et le module donne les mêmes valeurs (tranches de l'exemple : dz = épaisseur de la couche).

GeoTerva

Calculs géotechniques en ligne

# De la théorie à la pratique

Construire dans GeoTerva son propre profil stratifié d'argile et de sable ; le module fournit conjointement le tassement et la courbe temps–tassement.

Ouvrir le module →

Page de théorie →

**Ouvrir sur smartphone**
Les modules d'essai ne nécessitent pas d'inscription.

Si vous souhaitez les utiliser dans vos cours : info@geoterva.com