

## Exercice #6

### Tassements des Fondations Superficielles

#### 1 Interactions entre 2 bâtiments

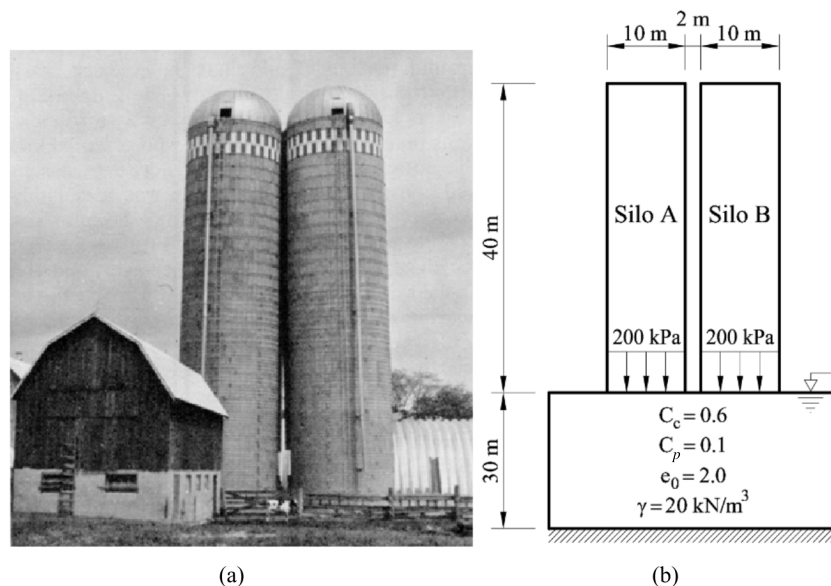


Figure 1: Deux silos voisins: a) problème (Bozozuk, 1976; © NRC Canada); b) configuration.

On considère un exemple de deux silos de base carré de  $10\text{m} \times 10\text{m}$  A et B, construits à une distance de 2 m (Fig.1). La charge sur le sol est uniforme et de  $q = 200 \text{ kPa}$  (égale à la pression de contact - fondation flexible). Le niveau de la nappe phréatique se trouve en surface au sommet d'une couche d'argile de 30 m d'épaisseur, normalement consolidée et reposant sur une roche incompressible.

Calculez les tassements (déplacements verticaux) des deux silos en 4 points (à l'extrémité chaque silos sur la ligne médiane passant par le centre des 2 bâtiments) afin de calculer l'inclinaison de chaque silos. On utilisera les formules de compaction non-linéaires des sols pour estimer les tassements à la fin de la consolidation primaire (i.e. on n'essaie pas ici de calculer le passage non-drainée / drainée mais directement le tassement final drainée). On étudiera les 2 scénarios suivants:

1. Les silos A et B sont construits simultanément
2. Le silo B est construit après la construction et la destruction du silo A. Il est évidemment construit après nivellement du terrain en surface (i.e ses tassements ne comprennent pas les déformations du sol qui se sont produites avant sa construction).

On subdivisera la couche de 30 mètres en 3 couches chacune de 10 mètres pour un calcul plus réaliste.

## 2 Consolidation primaire - secondaire

Un terrain consiste (de haut en bas) de 1 mètre de sable sec ( $\gamma = 17kN/m^3$ ), 4 mètres de sable saturé ( $\gamma = 20kN/m^3$ ), 2 mètres d'argiles ( $\gamma = 18kN/m^3$ ), 5 mètres de sable ( $\gamma = 20kN/m^3$ ), 4 mètres d'argiles ( $\gamma = 19kN/m^3$ ) et finalement une épaisse couche de sable.

Le terrain est surchargé par une couche supplémentaire de 2 mètres de sable sec ( $\gamma = 17kN/m^3$ ), (e.g petit remblai). On fera l'hypothèse que ce remblai est infini. Les déformations des 2 couches d'argiles vont être analysé par des essais oedométriques (avec des échantillons de 5 cm de haut et un drainage seulement sur la surface inférieure de l'échantillon).

1. Quelle doit être la charge initiale (en début du test) pour chaque échantillons? et la charge finale du test?
2. En prenant une perméabilité de  $k = 10^{-10}m/s$  pour ces argiles et une valeur caractéristique de  $m_v$  pour une argile ( $\sim 2 \times 10^{-7}kPa^{-1}$ ) et une porosité de 10% et  $\beta_w = 0.5 \times 10^{-6}kPa^{-1}$ , est ce que l'on doit s'attendre à observer une consolidation primaire lors de ces essais de laboratoire? et in situ?
3. On a fait ces 2 tests, et obtenu 2% de déformations au bout de 1 jour et 3% au bout de 10 jours, ceci pour les 2 couches d'argiles (pour simplifier). *En négligeant les déformations des couches de sable*, prédire les tassements après 1 an, 10 ans, 100 ans?

## Correction Exercice #6

### Tassements des Fondations Superficielles

## 1 Interactions entre 2 bâtiments

On divise la couche d'argile en  $N = 3$  couches de hauteur égale à  $H = 10m$  chacune. La profondeur  $z$  du centre de chaque couche par rapport à la surface de pose des fondations est indiquée dans le tableau suivant :

couche	épaisseur $H$ (m)	$z_i$ (m)
1	10	5
2	10	15
3	10	25

Table 1: Subdivision de la couche d'argile en 3 sous-couches.

En se référant aux paramètres de la figure 2, les facteurs d'influence  $J(a, b, z)$  sont calculés à l'aide de la formule suivante

$$J(a, b, z) = \frac{1}{2\pi} \left[ \arctan\left(\frac{ab}{zR}\right) + \frac{abz}{R} \left( \frac{1}{b^2 + z^2} + \frac{1}{a^2 + z^2} \right) \right]$$

avec  $R^2(a, b, z) = a^2 + b^2 + z^2$ .

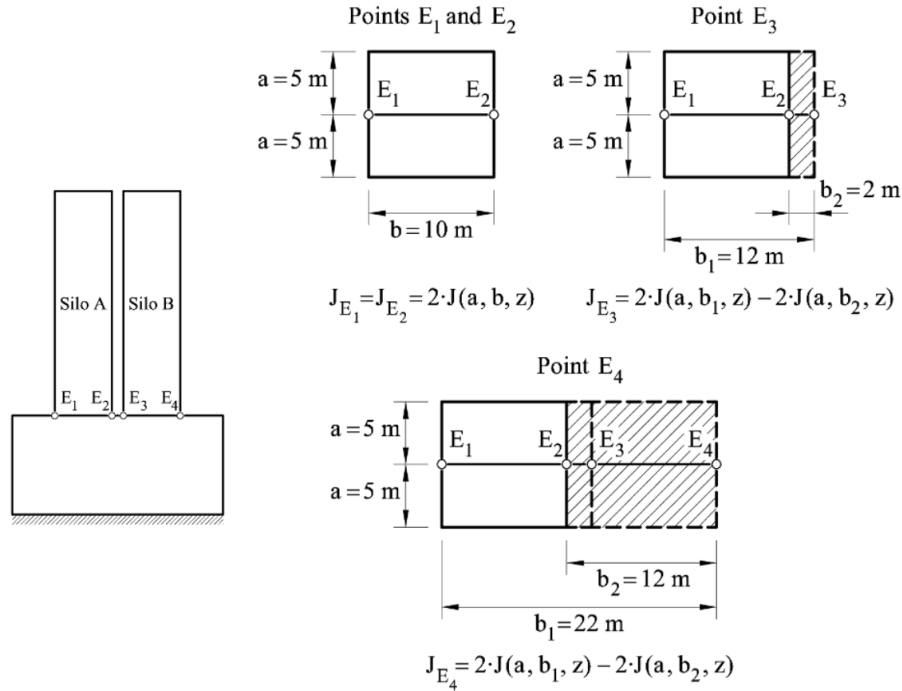


Figure 2: mise en place de fondations fictives : effets de la pression du Silo A sur les contraintes sous les points E1 à E4 .

Les résultats pour chaque couche sont présentés dans le tableau suivant

Couche $i$	$z_i$	$J_{E_1}$	$J_{E_2}$	$J_{E_3}$	$J_{E_4}$
1	5	0.39988	0.39988	0.20147	0.00453
2	15	0.14643	0.14643	0.12177	0.02889
3	25	0.06560	0.06560	0.06044	0.02964

Table 2: Facteurs d'influence aux différents points.

### 1.1 Cas 1: les silos A et B sont construits simultanément

L'état de contrainte verticale effective avant la construction des silos est simplement donné par  $\sigma'_{vo} = \gamma'z = (\gamma_{sat} - \gamma_w)z$ . Les résultats sont présentés résumés dans le tableau 3. Ces contraintes initiales sont égales à la contrainte de préconsolidation pour un sol normalement consolidé.

Couche $i$	$z_i$	$\sigma'_{voi}[kPa]$
1	5	50.0
2	15	150.
3	25	250.

Table 3: Etat initial - contraintes effectives initiales - sol normalement consolidé.

Nous notons  $\Delta\sigma'_{A1}$ ,  $\Delta\sigma'_{A2}$  l'augmentation de la contrainte verticale en dessous du point 1, respectivement 2 de la figure 2 due à la construction du silo A. De même pour le silo B. La pression que chaque silo transmet au sol est de  $q = 200kPa$ . Dans la couche générique  $j$ , l'augmentation de contrainte sera donc calculée comme suit:

$$\Delta\sigma'_{A1i} = q * J_{E1j}$$

$$\Delta\sigma'_{B1i} = q * J_{E4j}$$

$$\Delta\sigma'_{A2i} = q * J_{E2j}$$

$$\Delta\sigma'_{B2i} = q * J_{E3j}$$

L'augmentation de la contrainte effective (à la fin de la phase de consolidation primaire) est donnée par la somme des incréments partiels, comme suit :

$$\Delta\sigma'_{tot1i} = \Delta\sigma'_{A1i} + \Delta\sigma'_{B1i}$$

$$\Delta\sigma'_{tot2i} = \Delta\sigma'_{A2i} + \Delta\sigma'_{B2i}$$

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous 4. Les résultats sont symétriques pour les points 3 et 4 sous le silo B.

Couche $i$	$z_i$	$\Delta\sigma'_{A1i}$	$\Delta\sigma'_{B1i}$	$\Delta\sigma'_{tot2i}$	$\Delta\sigma'_{A2i}$	$\Delta\sigma'_{B2i}$	$\Delta\sigma'_{tot2i}$
1	5	79.98	0.91	80.88	79.98	40.29	120.27
2	15	29.29	5.78	35.06	29.29	24.35	53.64
3	25	13.12	5.93	19.05	13.12	12.09	25.21

Table 4: Les contraintes dues à la construction des silos en [kPa].

Pour des argiles normalement consolidées, le tassement des couches  $i = 1, 2, 3$ , en dessous du point  $j = 1, 2$  est calculé comme suit:

$$\Delta H_{ij} = \frac{H_i}{1 + e_0} C_c \log_{10} \left( \frac{\sigma'_{voi} + \Delta\sigma'_{totji}}{\sigma'_{voi}} \right)$$

le tassement total est la somme des tassements des différentes couches:

$$\Delta H_j = \sum_{i=1}^{N=3} \Delta H_{ij}$$

Les résultats sont présentés dans le tableau 5 et sur la figure 3. Le déplacement vertical relatif entre les extrémités de la fondation du silo A est égal à :

$$\Delta = \Delta H_2 - \Delta H_1 = 0.33m$$

ce qui se traduit par une rotation du silo de:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta}{B}\right) = 1.90^\circ$$

avec  $B = 10m$  la dimension de la base de la fondation du silo. On voit donc que le haut des 2 silos (séparés de 2 mètres) va se toucher car  $40 \tan \theta \times 2 \approx 2.65m$ .

Couche $i$	$z_i$	$\Delta H_{i1}[m]$	$\Delta H_{i2}[m]$
1	5	0.836	1.064
2	15	0.182	0.266
3	25	0.064	0.083
Total		1.082	1.413

Table 5: Tassement de la fondation (scénario 1).

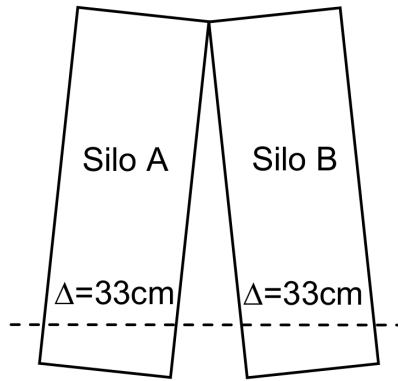


Figure 3: Configuration finale des silos (scénario 1).

## 1.2 Cas 2: Le silo B est construit après la construction et le destruction du silo A

Le silo A est détruit et le sol est bien entendu nivelé en surface avant la construction du silo B. La construction du silo "A" provoque une augmentation des contraintes aux points 3 et 4 égale à: (où  $i$  indique toujours la couche considérée)

$$\begin{aligned}\Delta\sigma'_{A3i} &= \Delta\sigma'_{B2i} \\ \Delta\sigma'_{A4i} &= \Delta\sigma'_{B1i}\end{aligned}$$

Les contraintes de pré-consolidation (contraintes maximale rencontrées par le sol lors de son histoire) à chaque couche en dessous des points 3 et 4 sont donc égales respectivement à :

$$\begin{aligned}\sigma'_{c3i} &= \sigma'_{voi} + \Delta\sigma'_{A3i} \\ \sigma'_{c4i} &= \sigma'_{voi} + \Delta\sigma'_{A4i}\end{aligned}$$

Les valeurs des contraintes de pré-consolidation sont indiquées dans le tableau 6.

Couche $i$	$z_i$	$\sigma'_{voi}[kPa]$	$\sigma'_{c3i}[kPa]$	$\sigma'_{c4i}[kPa]$	$\sigma'_{Bfi}[kPa]$
1	5	50	90.29	50.91	129.98
2	15	150	174.35	155.78	179.29
3	25	250	262.08	255.93	263.12

Table 6: Valeurs des contraintes de pré-consolidation et état final de contraintes (après construction du silo B) en dessous des points 3 et 4 .

Suite à la construction du silo B, l'état de contrainte à l'aplomb des points 3 et 4 sera augmenté d'une valeur égale à :

$$\Delta\sigma'_{B3i} = \Delta\sigma'_{A2i}$$

$$\Delta\sigma'_{B4i} = \Delta\sigma'_{A1i}$$

Il est à noter que la symétrie du problème provoque des  $\Delta\sigma'_{A2i} = \Delta\sigma'_{A1i}$  ce qui implique donc  $\Delta\sigma'_{B3i} = \Delta\sigma'_{B4i}$ . L'état final de contraintes effective  $\sigma'_{Bfi}$  (après la construction du silo B et la phase de consolidation primaire associée) est donc équivalent pour les points 3 et 4, et en particulier, il est égal à :

$$\sigma'_{Bfi} = \sigma'_{voi} + \Delta\sigma'_{B3i} = \sigma'_{voi} + \Delta\sigma'_{B4i}$$

Les valeurs numériques sont données dans le tableau 6. Comme le montre ce tableau, l'état de contraintes au moment de la construction du silo B est surconsolidé dans toutes les couches car

$$\sigma'_{c3i} > \sigma'_{voi}, \sigma'_{c4i} > \sigma'_{voi}.$$

Pour cette raison, le tassement de chaque couche sous les deux points d'intérêt sera calculé avec la formule suivante: ( $i = 1, 2, 3, j = 3, 4$ )

$$\Delta H_{ij} = \frac{H_i}{1 + e_0} \cdot \left[ C_p \cdot \log_{10} \frac{\sigma'_{cji}}{\sigma'_{voi}} + C_c \cdot \log_{10} \frac{\sigma'_{Bfi}}{\sigma'_{cji}} \right]$$

Les résultats numériques sont présentés dans le tableau 7 et sur la figure 4. Le déplacement vertical relatif entre les extrémités de la fondation du silo A est égal à:

$$\Delta = 0.51m$$

Couche $i$	$z_i$	$\Delta H_{i3}[m]$	$\Delta H_{i4}[m]$
1	5	0.402	0.817
2	15	0.046	0.128
3	25	0.010	0.0275
Total		0.458	0.972

Table 7: Tassement de la fondation (scénario 2).

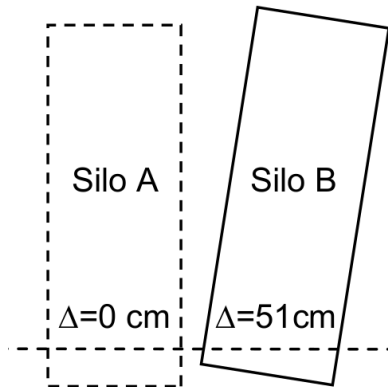


Figure 4: Configuration finale (scénario 2 - construction du silo B après la destruction du silo A).

Il est à noter que la construction du silo A sur le sol sous le silo B a pour effet d'augmenter la contrainte normale de pré-consolidation. Cette augmentation n'est PAS uniforme dans l'espace. Pour cette raison, pour la même contrainte finale due à la construction du silo B atteinte en dessous des points 3 et 4, les déplacements verticaux ne seront pas égaux. Afin de mieux apprécier les caractéristiques de ce modèle de sol non linéaire, il convient de noter que : si la contrainte verticale effective finale aux points 3 et 4 n'avait pas été de nature à dépasser la contrainte de pré-consolidation, les déplacements verticaux auraient été équivalents.

En supposant qu'après la démolition du silo A, le silo B n'est jamais construit, le sol récupère partiellement l'affaissement induit par le silo A. Si l'on considère le point  $j$ , ( $j = 3, 4$ ), le déplacement récupéré  $\Delta H_{ij}^{re}$  peut être calculé comme suit:

Couche $i$	$z_i$	$\Delta H_{i3}^{re}[m]$	$\Delta H_{i4}^{re}[m]$
1	5	-0.0856	-0.0026
2	15	-0.0218	-0.0055
3	25	-0.0068	-0.0034
Total		-0.1142	-0.0115

Table 8: Rebond vertical partiel après démolition du silo A (avant la construction du silo B).

## 2 Consolidation primaire - secondaire

1)

La charge initiale du test pour chacune des deux couches d'argile est égale à la moyenne des contraintes effectives calculée en demi hauteur de chaque couche. Pour la couche d'argile située en haut, on a:

$$\sigma'_{vo} = 17 + 4 \cdot 10 + 1 \cdot 8 = 65kPa$$

Pour la couche d'argile en bas:

$$\sigma'_{vo} = 17 + 4 \cdot 10 + 2 \cdot 8 + 5 \cdot 10 + 2 \cdot 9 = 141kPa$$

Pour la charge finale du test, on prend la contrainte effective verticale en place plus la surcharge appliquée qui est \egale au poids du remblai:

$$q = 17kN/m^3 \cdot 2m = 34kPa$$

la charge finale est donc:

- Couche du haut  $\sigma'_v = 99kPa$
- Couche du bas  $\sigma'_v = 175kPa$

2)

Le temps caractéristique pour la consolidation primaire est égale:

$$t_p = \frac{L^2}{c_v}$$

Avec:  $c_v = \frac{k}{\gamma_w(m_v + n\beta_w)}$  ;  $n = 10\%$  ;  $\beta_w = 0.5 \cdot 10^{-6}kPa^{-1}$  . On a  $c_v = 4.0791 \cdot 10^{-5}m^2/s$ . Au laboratoire la longueur de drainage est de  $L = 0.05m$ . On obtient donc **62.5 secondes** pour le temps de drainage au laboratoire.

In situ les couches d'argiles sont entre des couches de sables perméables, la longueur de drainage dans ce cas est donc égale à la moitié de la hauteur de la couche d'argiles. On obtient donc:

- Pour la couche d'argile supérieure, on a :  $t_p = 1^2/(4 \cdot 10^{-5}) = \mathbf{0.28}$ Jours.
- Pour la couche d'argile inférieure, on a:  $t_p = \frac{2^2}{4.079 \cdot 10^{-5}} = \mathbf{1.135}$ Jours.

3)

Si les tassements ne se stabilisent pas après la fin de la consolidation primaire, il y a du fluage... On prend une équation logarithmique en temps pour estimer les déformation liée à cette compression secondaire...

Selon l'équation de consolidation secondaire

$$\epsilon = \epsilon_p + \epsilon_s \log(t/t_p)$$

avec  $t_p = 1j$ ; on obtient :  $\epsilon_p = 0.02$  et  $\epsilon_s = 0.01$ . Le tassement primaire est  $\Delta H_p = 0.02 \cdot 6m = 0.120m$ .

Après un 1 an, on aura donc:

$$\Delta H_s = 0.01 \cdot \log(365j/1j) \cdot 6m = 0.01 \cdot 2.562 \cdot 6m = 0.154m.$$

Le tassement total est donc  $\Delta H = \Delta H_s + \Delta H_p = 0.274m$ .

De même à 10 ans:

$$\Delta H_s = 0.01 \cdot \log(3650j/1j) \cdot 6m = 0.01 \cdot 3.562 \cdot 6m = 0.214m.$$

et le tassement total est  $\Delta H = \Delta H_s + \Delta H_p = 0.334m$ .

Après 100 ans, on a:

$$\Delta H_s = 0.01 \cdot \log(36500j/1j) \cdot 6m = 0.01 \cdot 4.562 \cdot 6m = 0.274m.$$

Le tassement total à 100 ans est alors de  $\Delta H = \Delta H_s + \Delta H_p = 0.394m$ .