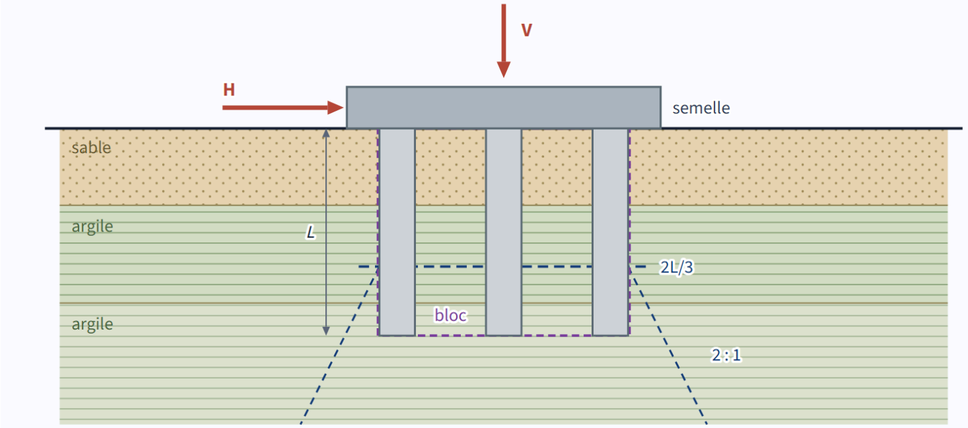
Présentation de cours de géotechnique · Pieux

Analyse de groupe de pieux

Cours : pour un groupe de pieux sous une semelle de répartition, la charge sur chaque pieu, la capacité, le tassement et le comportement sous charge latérale ; un exemple de calcul pour chaque thème.

- Semelle de répartition rigide
- Efficacité du groupe · bloc
- Tassement
- Charge latérale : multiplicateurs p
- Exemples de calcul



Basé sur la page de théorie de GeoTerva · geoterva.com

Que verrons-nous dans ce cours ?

- Déterminer la **charge reprise par chaque pieu** sous une semelle rigide sur pieux et repérer le pieu sollicité en traction
- Établir la capacité du **pieu isolé** couche par couche, comme base de la capacité du groupe
- L'application du **coefficient d'efficacité du groupe** (Converse–Labarre, Los Angeles, Seiler–Keeney ; règles pour pieux battus et forés dans le sable) couche par couche
- À vérifier la **rupture en bloc** du groupe et à retenir **la plus petite**
- Calculer le tassement élastique (Vesic) et le tassement de **consolidation** (diffusion 2:1)
- Interpréter les multiplicateurs p et les parts inégales des rangées sous **charge latérale**

DÉROULÉ DU COURS

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

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

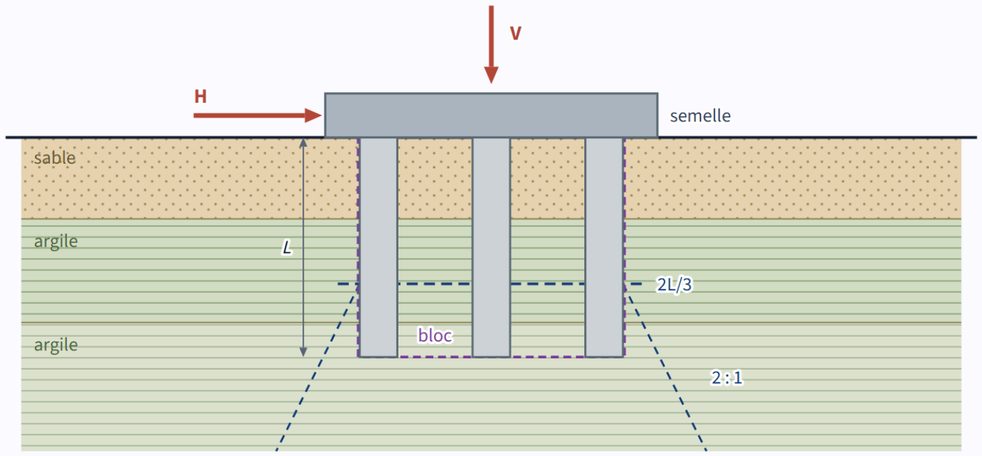
2 · **Énoncé** : données et à déterminer

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

Cette présentation prolonge celle sur le **pieu dans un sol stratifié** : le calcul couche par couche du pieu isolé y a été exposé ; on examine ici sa place au sein du groupe.

Qu'est-ce qui change lorsque les pieux agissent ensemble ?

THÉORIE



Les pieux sont disposés en files sous une **semelle de répartition** ; lorsqu'ils sont proches, le sol situé entre eux et autour d'eux doit les servir tous à la fois. Trois choses changent, et le module traite chacune d'elles comme une vérification distincte :

Capacité : le sol situé entre les pieux est sollicité par le fût de chaque pieu ; chaque pieu porte moins que s'il était seul (efficacité $\eta < 1$). Si le sol est faible et les pieux rapprochés, le groupe et le sol compris entre eux peuvent aussi rompre comme un seul **bloc**.

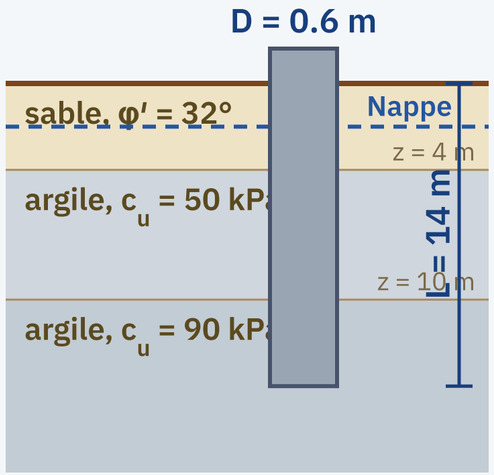
Tassement : la charge du groupe se répartit sur **toute l'aire du groupe** et non sur celle d'un seul pieu, et atteint les couches d'argile situées bien au-dessous des pointes ; le groupe tasse beaucoup plus qu'un pieu isolé.

Charge latérale : les rangées arrière travaillent dans un sol poussé et sollicité par les pieux précédents ; la rangée avant reprend davantage de charge, les autres moins.

Le groupe que nous utiliserons tout au long du cours

Groupe d'exemples (modèle ouvert par le module)

Pieux	**9 pieux forés (diamètre D = 0.60 m, longueur L = 14 m), 3 rangées × 3 pieux, base de la semelle de répartition dans le sol**
Espacement	$s_x = s_y = 1.80\ \mathrm{m}\ (3.0\,D)$
Sol	**sable de 0–4 m (φ′ = 32°), argile de 4–10 m (c_u = 50), argile de 10–18 m (c_u = 90 kPa) ; γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³**
Nappe phréatique	**à 2.0 m de profondeur**
Charges	$V = 1\,600\ \mathrm{kN},\ H = 900\ \mathrm{kN},\ M_y = 900\ \mathrm{kN\cdot m}$
Matériau, sécurité	$E_p = 30\,000\ \mathrm{MPa},\ E_s = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu_s = 0.30;\ FS = 3$



La plupart des exemples sont traités avec ce groupe ; les résultats sont identiques aux valeurs de l'onglet **Modèle** du module.

Semelle de répartition rigide : les pieux sont des ressorts identiques

THÉORIE

La semelle de répartition est supposée rigide et les pieux sont assimilés à des ressorts verticaux identiques. Une semelle rigide se déplace comme un **plan** : son tassement et ses rotations sont les seules inconnues. La charge reprise par chaque pieu est donc une fonction **linéaire** de sa position (règle du groupe de boulons) :

$$P_i = \frac{V}{n} + B\,x_i + C\,y_i$$

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} \qquad C = \frac{M_x}{\sum y^2} \qquad \left(\sum xy = 0\right)$$

$$\sum x^2 = n_y s_x^2\,\frac{n_x\left(n_x^2 - 1\right)}{12}$$

Si M_y est positif, il ajoute de la pression du côté **+x** (le côté poussé par la charge latérale, le côté avant). Les moments sont pris **à la base de la semelle de répartition** : une charge H à la hauteur h au-dessus de la base donne M_y = H h.

Si les pieux sont disposés en quinconce (triangulaire), Σxy n'est pas nul ; le module prend les sommes à partir des positions des pieux et résout simultanément les deux équations.

La charge la plus forte revient aux pieux avant, la plus faible aux pieux arrière ; **si le moment est important**, le pieu arrière peut tendre à être sollicité en traction.

Énoncé

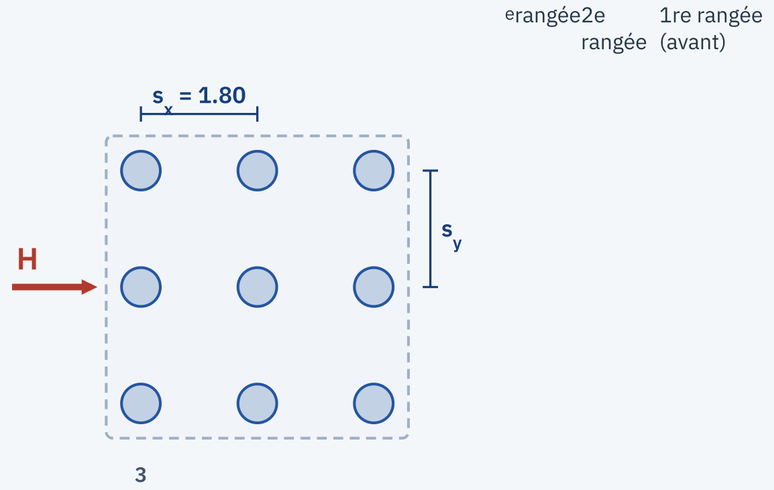
EXEMPLE

Données

Groupe	**9 pieux forés, 3 rangées × 3 pieux, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Sol	**sable 0–4 m (φ′ = 32°) · argile 4–10 m (c_u = 50) · argile 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Charges	$V = 1\,600$ kN, $M_y = 900$ kN·m **(à la base du titre)**
Titre	**rigide ; pieux identiques**

À DÉTERMINER

Déterminer la charge reprise par **chaque pieu**. Les rangées sont numérotées **depuis l'avant** (avant = côté poussé par la charge latérale, +x).



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Espacement égal

$$\frac{V}{n} = \frac{1\,600}{9} = \mathbf{177.8}\ \mathrm{kN}$$

2 Σx² (groupe symétrique, forme explicite)

$$\sum x^2 = n_y s_x^2\,\frac{n_x(n_x^2-1)}{12} = 3(1.8)^2\,\frac{3(9-1)}{12} = \mathbf{19.44}\ \mathrm{m}^2$$

3 Coefficient de moment (C = 0 puisque $M_x = 0$)

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} = \frac{900}{19.44} = \mathbf{46.30}\ \mathrm{kN/m}$$

Solution (2/2)

SOLUTION

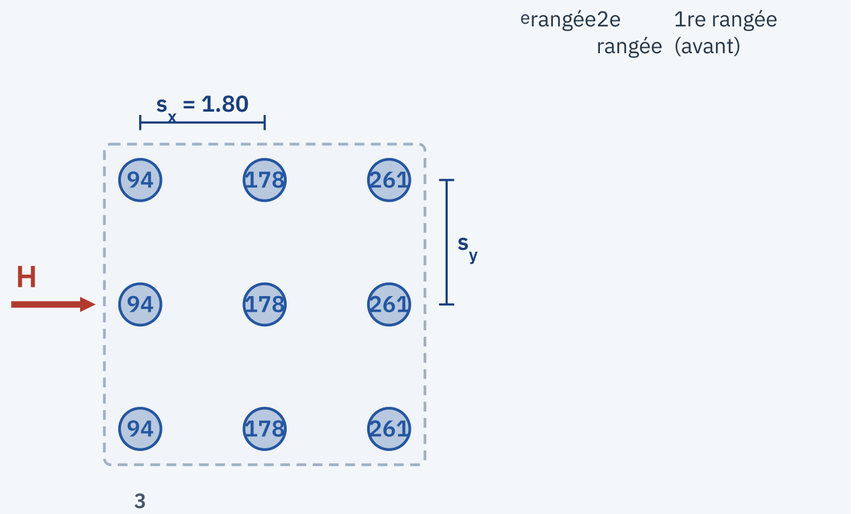
4 Charges par file : P = V/n + B x (x = +1.8 ; 0 ; −1.8 m)

$$P_1 = 177.8 + 46.30(1.8) = \mathbf{261.1}\ \text{kN}\ (\text{avant})$$

$$P_2 = \mathbf{177.8}\ \text{kN}$$

$$P_3 = 177.8 - 46.30(1.8) = \mathbf{94.4}\ \text{kN}\ (\text{arrière})$$

Total : 3(261.1 + 177.8 + 94.4) = **1,600 kN** = V. La charge la plus forte est sur les pieux avant (261.1 kN), la plus faible sur ceux de l'arrière (94.4 kN) ; **aucun pieu n'est en traction**.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Si le moment est grand, les pieux arrière sont en traction

THÉORIE

Si le moment est grand par rapport à la charge verticale, les pieux situés du côté opposé au moment sont **déchargés** et peuvent être sollicités en traction. Le pieu reprend la traction **uniquement par son fût** : la couche d'argile avec sa valeur entière, la couche de sable avec les **trois quarts** de sa résistance en compression ; la pointe n'apporte rien.

$$T_u = \sum_i \chi_i \, Q_{s,i} \qquad \chi = 1 \text{ (argile)},\ \chi = 0.75 \text{ (sable)}$$

$$T_g = \min(T_{ind},\, T_{block}) \quad T_{ind} = n_T \sum_i \eta_i \chi_i Q_{s,i}$$

Pieu isolé en traction : $T_{max} \le T_u/FS$. Pieux en traction **pris ensemble** : $\Sigma T \le T_g/FS$; le bloc est retenu par son propre poids et par le cisaillement sur ses faces latérales.

VÉRIFICATION EN COMPRESSION

$$P_{max} \le \frac{Q_u}{FS}$$

La charge maximale sur un pieu est comparée à la charge admissible d'un **pieu isolé** ; l'effet de groupe n'intervient pas ici. Sous moment, le pieu le plus chargé reçoit plus que V/n et peut dépasser sa part **même lorsque le groupe, pris dans son ensemble, reste dans sa capacité**.

Énoncé

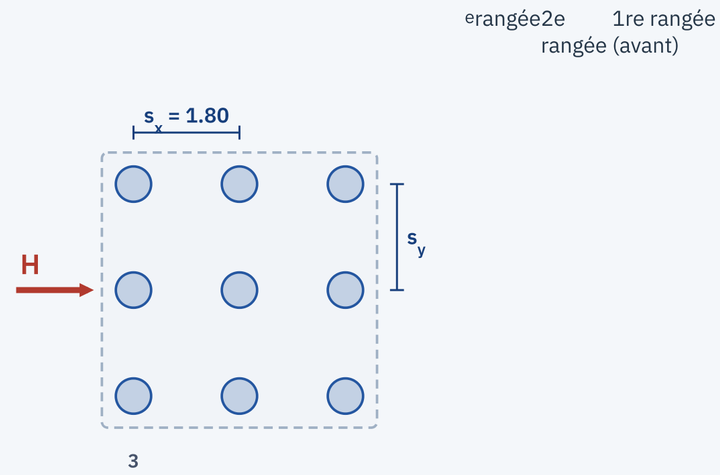
EXEMPLE

Données

Groupe	**9 pieux forés, 3 rangées × 3 pieux, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Sol	**sable 0–4 m (φ′ = 32°) · argile 4–10 m (c_u = 50) · argile 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Charge	$V = 1\,600$ kN, **moment majoré :** $M_y = 2\,400$ kN·m
Pieu isolé	**Contributions de Q_s (Exemple 3) : sable 49.8, argile 311.0, argile 317.2 kN**
Efficacité	**sable 0.767, argile 0.727 (Exemple 5–6)**

À DÉTERMINER

Déterminer les charges ; vérifier avec FS = 3 la capacité du pieu tendu et celle des pieux tendus **pris ensemble**.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Charges ($B = M_y/\Sigma x^2$)

$$B = \frac{2\,400}{19.44} = 123.46\ \text{kN/m}$$

$$P_{front} = 177.8 + 123.46(1.8) = \mathbf{400.0}\ \text{kN}$$

$$P_{rear} = 177.8 - 123.46(1.8) = \mathbf{-44.4}\ \text{kN (traction)}$$

2 Capacité d'un pieu isolé en traction (sable × 0.75, argile × 1)

$$T_u = 0.75(49.8) + 311.0 + 317.2 = \mathbf{665.6}\ \text{kN} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_u}{FS} = 221.9\ \text{kN}$$

Pieu en traction : T_{max} = **44.4 kN** ≤ T_u/FS = 221.9 kN → **satisfaisant**. Le nombre de pieux en traction est de 3 (rangée arrière), traction totale ΣT = 133.3 kN ; la vérification du groupe est traitée à l'étape suivante.

Solution (2/2)

SOLUTION

3 Capacité combinée des 3 pieux en traction : somme des fûts efficaces × 3

$$T_{ind} = 3\left[\eta_s \chi_s Q_{s1} + \eta_c Q_{s2} + \eta_c Q_{s3}\right] = \mathbf{1{,}456}\ \text{kN}$$

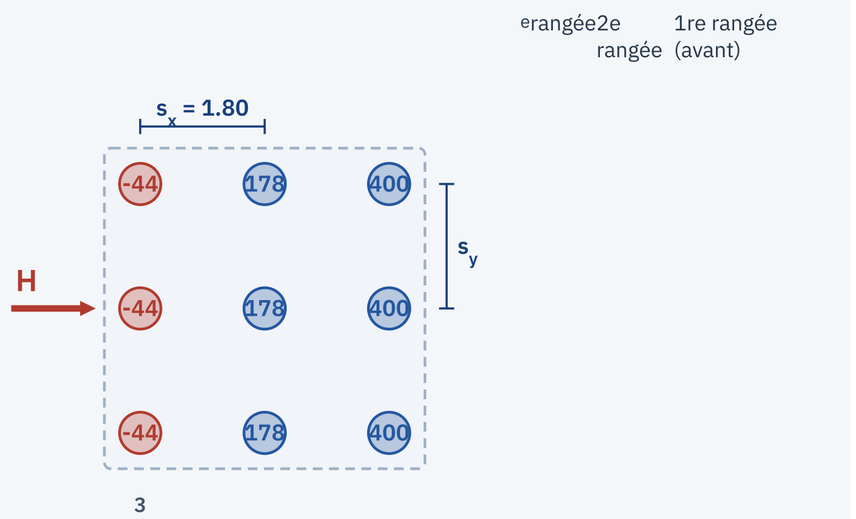
4 Bloc en traction (3 pieux, L_t = D = 0.6 m, B_t = 4.2 m) : cisaillement latéral + poids du bloc

$$T_{block} = \sum \tau_i P_t \Delta L_i + W = 6{,}692 + 369 = \mathbf{7{,}061}\ \text{kN}$$

5 Vérification : minimum et FS

$$T_g = \min(1{,}456;\ 7{,}061) = 1{,}456\ \text{kN}$$

$$\sum T = 133.3 \leq \frac{T_g}{3} = 485\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{suffisant}$$



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

La capacité du groupe est fondée sur celle du pieu isolé

THÉORIE

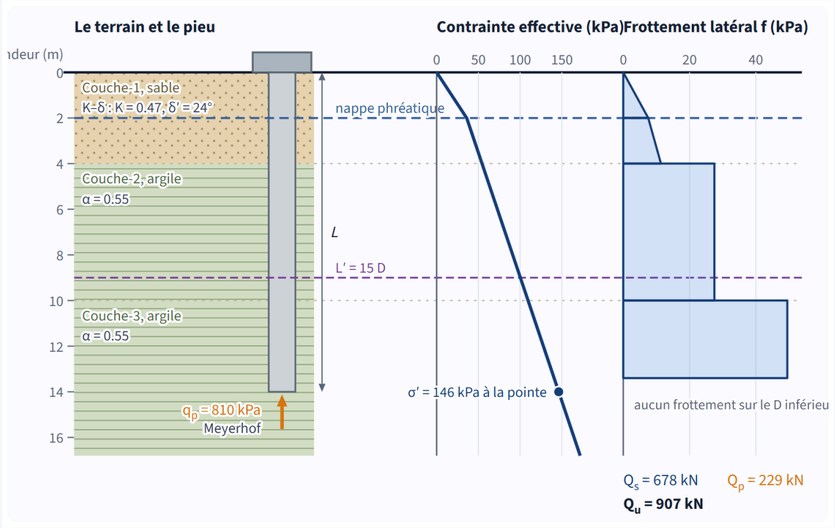
On calcule d'abord la résistance **isolée** d'un pieu du groupe : chaque couche selon la règle de son propre matériau, **sans valeur de résistance saisie**. Les règles sont celles de la présentation *pieu en sol stratifié* :

$$Q_u = Q_s + Q_p \qquad Q_s = p \sum_i f_i \, \Delta L_i \qquad Q_p = A_b \, q_p$$

Sable : f = Kσ′tanδ′ (profondeur critique L′ = 15D). Pour un pieu foré, **K = K₀ = 1 – sinφ′**, δ′ = 0.75φ′ ; pour un pieu battu, K = 1.4K₀.

Argile : α, λ ou β. Pour un pieu foré, **α* = 0.55** ($c_u/p_a \le 1.5$) et α* = 0 sur **les 1.5 m supérieurs et sur 1D en partie basse**.

Pointe : règle de la couche dans laquelle se trouve la pointe : $q'N^*_q \le q_l$ dans le sable, $9c_u$ dans l'argile (pour un pieu foré, Reese–O'Neill peut être sélectionné).



Énoncé

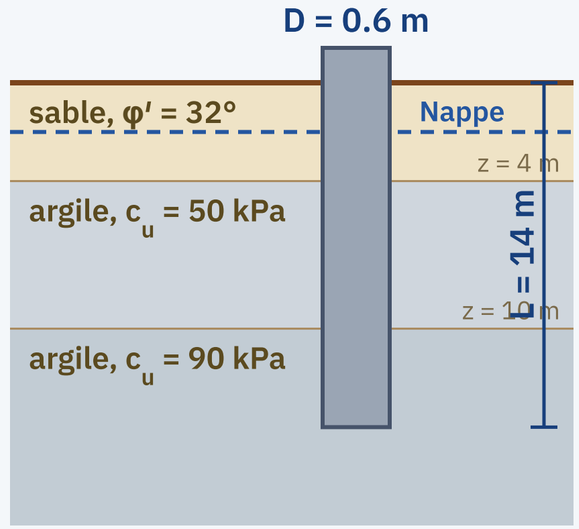
EXEMPLE

Données

Groupe	**9 pieux forés, 3 rangées × 3 pieux, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Sol	**sable 0–4 m (φ′ = 32°) · argile 4–10 m (c_u = 50) · argile 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Mise en place	**pieu foré : K = K_0 = 0.47, δ′ = 0.75φ′ = 24°, α* = 0.55 ; pointe : Meyerhof**
Nappe phréatique	**2.0 m**
Poids volumique	$\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$

À DÉTERMINER

Déterminer, couche par couche, la résistance par frottement latéral du **fût** d'un pieu isolé, sa résistance de **pointe** et la valeur de $\mathbf{Q_u}$; vérifier $P_{max} \le Q_u/FS$.



Solution (1/3)

SOLUTION

1. Sable (0–4 m) : L′ = 15D = 9 m > 4 m, pas de plafonnement ; σ′(2) = 18(2) = 36.0 et σ′(4) = 36.0 + (19 − 9.81)(2) = 54.4 kPa

$$\bar{\sigma}' = \frac{126.4}{4} = 31.6 \text{ kPa}$$

$$f = K \tan\delta' \, \bar{\sigma}' = 0.47(0.4452)(31.6) = 6.61 \text{ kPa}$$

$$Q_{s1} = p \, f \, H = 1.885(6.61)(4) = \mathbf{49.8} \text{ kN}$$

Solution (2/3)

SOLUTION

2 Argile (4–10 m) : α* = 0.55 (c_u/p_a = 0.5 ≤ 1.5) ; la fenêtre 1.5 → L – D = 13.4 m recouvre entièrement la couche

$$f = 0.55(50) = 27.5\ \text{kPa} \qquad Q_{s2} = 1.885(27.5)(6) = \mathbf{311.0}\ \text{kN}$$

3 Argile (10–14 m) : la fenêtre se termine à 13.4 m → le 1D = 0.6 m inférieur est écarté, longueur effective 13.4 – 10 = 3.4 m

$$f = 0.55(90) = 49.5\ \text{kPa} \qquad Q_{s3} = 1.885(49.5)(3.4) = \mathbf{317.2}\ \text{kN}$$

Solution (3/3)

SOLUTION

4 Somme du frottement latéral et résistance de pointe (couche en pointe : argile, c_u = 90 kPa, Meyerhof N^*_c = 9)

$$Q_s = 49.8 + 311.0 + 317.2 \approx \mathbf{678.1}\ \text{kN}$$

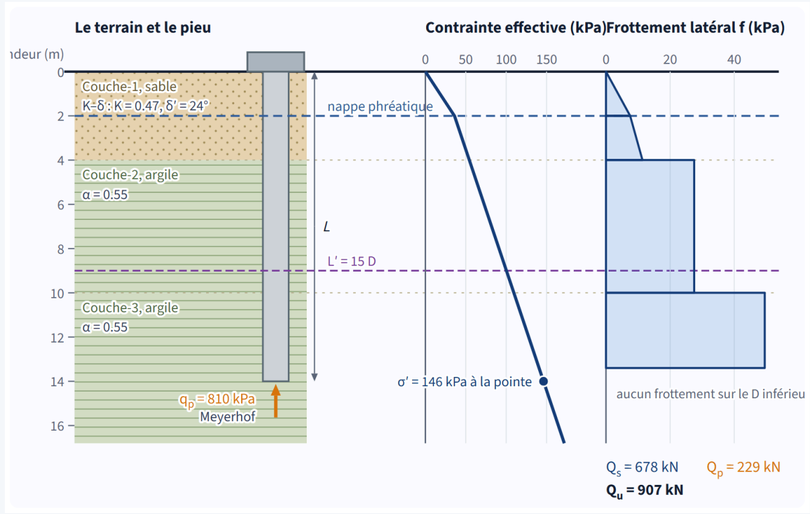
$$q_p = 9(90) = 810\ \text{kPa}$$

$$Q_p = A_b q_p = 0.2827(810) = \mathbf{229.0}\ \text{kN}$$

5 Capacité d'un pieu isolé et vérification

$$Q_u = 678.1 + 229.0 = \mathbf{907.1}\ \text{kN}$$

$$\frac{Q_u}{FS} = 302.4\ \text{kN} \geq P_{max} = 261.1\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{suffisant}$$



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Des pieux rapprochés portent moins que s'ils étaient isolés

THÉORIE

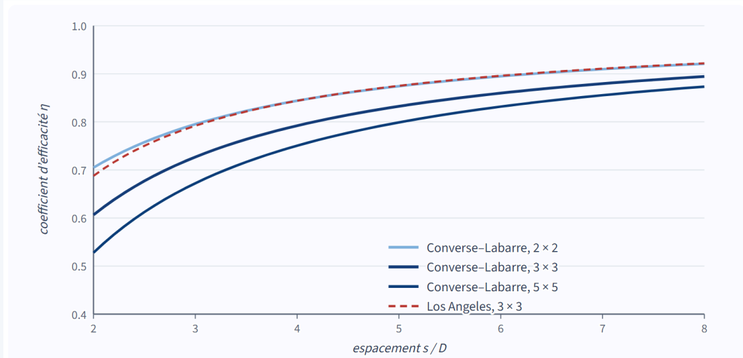
Lorsque les pieux se rapprochent, les sols cisaillés et sollicités par chacun d'eux se recouvrent. Le **coefficient d'efficacité du groupe** est le rapport de la capacité du groupe à la somme des capacités des pieux isolés. La source donne trois équations empiriques pour un groupe de $n_1 \times n_2$ pieux de diamètre D et d'entraxe d :

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u}$$

$$\eta_{CL} = 1 - \frac{\theta}{90}\,\frac{(n_1-1)n_2 + (n_2-1)n_1}{n_1 n_2}, \quad \theta = \tan^{-1}\frac{D}{d}\ \text{(degré)}$$

Converse–Labarre compte les **paires de pieux voisins** : $(n_1 - 1)n_2$ paires l'une derrière l'autre, $(n_2 - 1)n_1$ paires côte à côte, chacune avec l'angle $\theta = \tan^{-1}(D/d)$ correspondant à son propre espacement.

Le module applique cette équation dans l'argile ; il l'utilise pour réduire le frottement le long du fût dans les couches d'argile et la résistance de la base d'un pieu dont la pointe se trouve dans l'argile.



Lorsque l'espacement augmente, l'efficacité tend vers 1 ; dans un groupe 3 × 3, elle vaut environ 0.7 – 0.8 à 3D.

Les deux autres équations et les limites

THÉORIE

Les deux autres équations de la source concernent également un groupe rectangulaire : l'équation de **Los Angeles** et l'équation de **Seiler–Keeney** (avec d en **ft**) :

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{D}{\pi d\, n_1 n_2}\left[n_1(n_2-1) + n_2(n_1-1) + \sqrt{2}(n_1-1)(n_2-1)\right]$$

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11d}{7(d^2-1)}\,\frac{n_1+n_2-2}{n_1+n_2-1}\right] + \frac{0.3}{n_1+n_2}$$

Seiler–Keeney présente un pôle à 1 ft et n'a pas de sens en dessous de 2 ft ; le module le fournit à partir de **2 ft**.

Un espacement inférieur à 2.5D est **signalé** : c'est le plus petit espacement donné par la source pour les pieux flottants (travaillant au frottement), les équations étant écrites pour des espacements plus grands.

Pour une disposition triangulaire, Converse–Labarre s'écrit en comptant les paires voisines ; il s'agit d'une **extension du module** qui donne un coefficient d'efficacité inférieur à celui de la disposition en grille de même espacement.

Énoncé

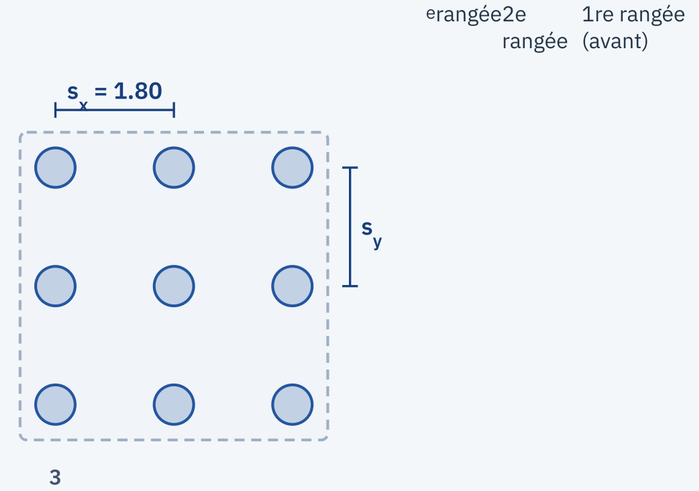
EXEMPLE

Données

Groupe	**3 × 3 pieux, D = 0.60 m, entraxe d = 1.80 m (dans les deux directions)**
Seiler–Keeney	**d en pieds : 1.80 m = 5.906 ft**

À DÉTERMINER

Déterminer le coefficient d'efficacité du groupe à l'aide des équations de **Converse–Labarre**, de **Los Angeles** et de **Seiler–Keeney**.



Solution

SOLUTION

1 Converse–Labarre : θ = tan⁻¹(D/d) ; paires adjacentes : (2)(3) + (2)(3) = 12

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.6}{1.8} = 18.43^\circ \;;\quad \eta_{CL} = 1 - \frac{18.43}{90}\cdot\frac{12}{9} = \mathbf{0.727}$$

2 Los Angeles

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{0.6}{\pi(1.8)(9)}\left[3(2) + 3(2) + \sqrt{2}(2)(2)\right] = \mathbf{0.792}$$

3 Seiler–Keeney (d = 5.906 ft)

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11(5.906)}{7(5.906^2 - 1)}\cdot\frac{4}{5}\right] + \frac{0.3}{6} = \mathbf{0.831}$$

Trois équations dans la plage 0.727 – 0.831. Dans l'argile, le module utilise **Converse–Labarre** (0.727).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Efficacité dans le sable : une règle, pas une équation

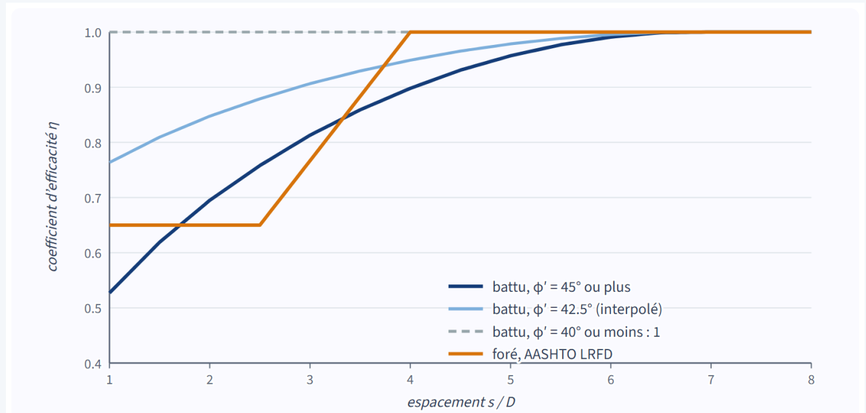
THÉORIE

Un pieu battu **compacte** le sable lâche ou moyennement dense ; dans ce sable, le groupe reprend autant que la somme des pieux (davantage encore lors des essais). Ce n'est que dans le sable dense ($\varphi' > 40°$ environ) qu'un espacement rapproché réduit la capacité. Pour un pieu battu, le module retient l'abaque de la source et **ne porte jamais le coefficient d'efficacité au-dessus de 1** :

- $\varphi' \le 40°$: **$\eta = 1$**
- $40° < \varphi' < 45°$: **interpolation linéaire** entre 1 et la courbe à 45°
- $\varphi' \ge 45°$: courbe à 45° (1.0 pour s/D = 7 ; 0.53 pour s/D = 1)

Le **pieu foré** ne compacte pas le sol, il peut même le décomprimer. L'AASHTO LRFD multiplie la résistance de chaque pieu foré du groupe par **0.65** pour s/D = 2.5 et par **1.0** pour 4 :

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{s/D - 2.5}{1.5} \qquad 2.5 \le s/D \le 4$$



Le coefficient d'efficacité de la couche de sable s'applique au fût de cette couche et à la résistance de pointe du pieu dont la base est dans le sable. Espacement : **la plus petite distance entre deux pieux**.

Énoncé

EXEMPLE

Données

Espacement	**s = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3.0**
Pieu foré	**règle AASHTO pour le sable**
Pieu battu	**sable, $\varphi' = 42^\circ$ (courbe à 45° pour s/D = 3 : $\eta_{45} = 0.813$)**

À DÉTERMINER

Déterminer le coefficient d'efficacité de la couche de sable pour un pieu **foré** et pour un pieu **battu** dans un sable de φ′ = 42° ; que se passe-t-il pour φ′ = 35° ?

Solution

SOLUTION

1 Pieu foré (AASHTO) : s/D = 3.0

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{3.0 - 2.5}{1.5} = \mathbf{0.767}$$

2 Pieu battu, φ′ = 42° : poids w = (φ′ − 40)/5 et courbe à 45°

$$w = \frac{42 - 40}{5} = 0.4 \qquad \eta = 1 - w(1 - \eta_{45}) = 1 - 0.4(1 - 0.813) = \mathbf{0.925}$$

3 Pieu battu, φ′ = 35°

$$\varphi' \leq 40^\circ \;\Rightarrow\; \eta = \mathbf{1.000}$$

Dans la même plage, un pieu **foré** prend la valeur 0.767 dans le sable, tandis qu'un pieu **battu** (dans un sable lâche à moyen) prend 1.00 : le battage compacte, le forage non.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Le module de chaque couche est le module de ce sol

THÉORIE

Le fût du pieu est découpé aux limites des couches et chaque tronçon est calculé par sa propre méthode. Un effet de groupe lié au sol doit lui aussi être appliqué **tronçon par tronçon** : le coefficient d'efficacité d'une couche est celui de ce sol, tandis que la **base** prend celui du sol sur lequel elle repose :

$$Q_{ind} = n \left(\sum_i \eta_i \, Q_{s,i} + \eta_b \, Q_p \right)$$

$$\eta_{group} = \frac{Q_{ind}}{\sum Q_u}$$

Couches d'**argile** et base d'un pieu dont la pointe est dans l'argile : Converse–Labarre.

Sable : abaque pour pieux battus, règle AASHTO pour pieux forés.

Le coefficient d'efficacité du groupe n'est **pas une donnée d'entrée** mais une **moyenne pondérée** des contributions des couches : un pieu qui reprend l'essentiel de sa charge dans le sable reflète l'effet de groupe de ce sable, tandis qu'un pieu flottant dans l'argile reflète celui de l'argile.

Énoncé

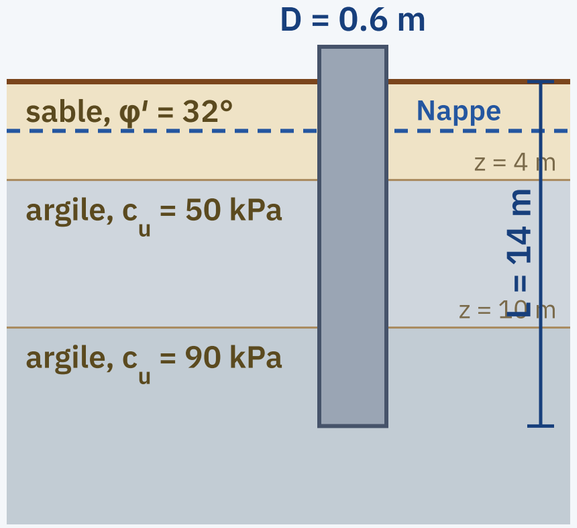
EXEMPLE

Données

Pieu isolé (Exemple 3)	**Q_{s1} = 49.8 (sable), Q_{s2} = 311.0, Q_{s3} = 317.2 (argile), Q_p = 229.0 kN**
Efficacités	**sable (foré, s/D = 3) : 0.767 ; argile : 0.727 ; base (argile) : 0.727**
Groupe	**9 pieux**

À DÉTERMINER

Que sont Q_{ind} et le **coefficient d'efficacité du groupe** $\eta = Q_{ind}/\Sigma Q_u$?



Solution

SOLUTION

1 Contribution effective de chaque partie (η Q) : fût dans le sable, fût dans l'argile 1, fût dans l'argile 2, pointe

$$0.767(49.8) = 38.2\ ; \quad 0.727(311.0) = 226.1$$
$$0.727(317.2) = 230.6\ ; \quad 0.727(229.0) = 166.5$$

2 Capacité de service d'un pieu isolé et groupe

$$\sum \eta Q = 38.2 + 226.1 + 230.6 + 166.5 = \mathbf{661.4}\ \text{kN}$$
$$Q_{ind} = 9(661.4) \approx \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

3 Coefficient d'efficacité du groupe

$$\eta = \frac{Q_{ind}}{n\,Q_u} = \frac{5{,}952}{9(907.1)} = \mathbf{0.729}$$

Le groupe reprend **73 %** de la somme des charges des pieux pris isolément (sable η = 0.767, argile η = 0.727).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Le groupe peut rompre comme une fondation profonde

THÉORIE

Si les pieux sont rapprochés, le groupe et le sol compris entre eux peuvent descendre **ensemble** : une fondation profonde de dimensions $L_g \times B_g$ et de profondeur L. Sa capacité est le **cisaillement** sur les quatre faces plus la **portance** sous la base :

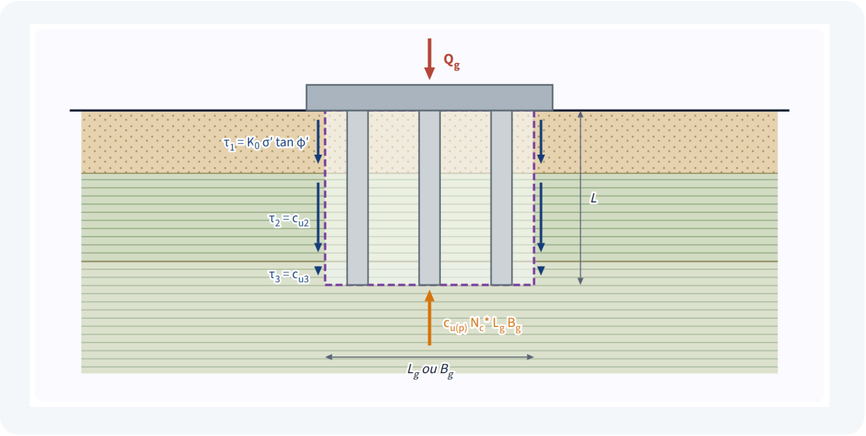
$$Q_{block} = \sum_i \tau_i \, P_b \, \Delta L_i + q_b \, L_g B_g \qquad P_b = 2(L_g + B_g)$$

Face latérale dans l'argile : $\tau = c_u$ (le sol glisse contre le sol, sans réduction par α).

Face latérale dans le sable (extension du module par rapport à la source) : $\tau = K_0 \sigma' \tan\varphi'$, $K_0 = 1 - \sin\varphi'$.

Base dans l'argile : $q_b = c_u N^*_c$; N^*_c est lu sur l'abaque en fonction de L/B_g et de L_g/B_g. **Base dans le sable** : nQ_p.

$$Q_{g(u)} = \min(Q_{ind},\, Q_{block}) \qquad Q_{all} = \frac{Q_{g(u)}}{FS}$$



Énoncé

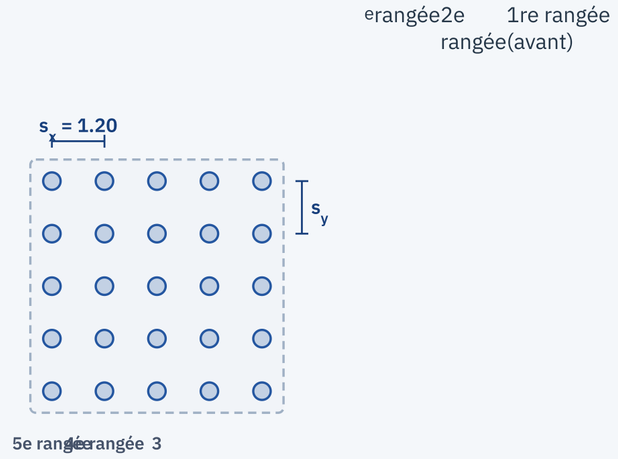
EXEMPLE

Données

Groupe	**9 pieux forés, 3 rangées × 3 pieux, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Sol	**sable 0–4 m ($\varphi' = 32°$) · argile 4–10 m (c_u = 50) · argile 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Bloc	**$L_g = B_g = (3 - 1)(1.8) + 0.6$**
Faces latérales	**sable : $\tau = K_0\sigma'_v\tan\varphi'$ (σ'_v = 31.6 kPa) ; argile : $\tau = c_u$**
Base	**argile, c_u = 90 kPa ; N^*_c d'après l'abaque ($L_g/B_g = 1$)**
Individuel	**Q_{ind} = 5,952 kN (Exemple 6) ; V = 1,600 kN, FS = 3**

À DÉTERMINER

Déterminer la valeur de Q_{bloc}, la capacité du groupe et sa charge admissible.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Dimensions du bloc et périmètre

$$L_g = B_g = 4.2\ \text{m} \qquad P_b = 2(L_g + B_g) = \mathbf{16.8}\ \text{m}$$

2 Cisaillement sur les faces latérales (τ P_b ΔL)

$$\text{sable} : \tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(31.6)(0.6249) = 9.28 \ \Rightarrow\ 624\ \text{kN}$$

$$\text{argile 1} : \tau = 50 \ \Rightarrow\ 50(16.8)(6) = 5{,}040\ \text{kN}$$

$$\text{argile 2} : \tau = 90 \ \Rightarrow\ 90(16.8)(4) = 6{,}048\ \text{kN}$$

Solution (2/2)

SOLUTION

3 Base : N^*_c d'après l'abaque pour $L/B_g = 14/4.2 = 3.33$ et $L_g/B_g = 1$

$$q_b L_g B_g = c_u N_c^* \, L_g B_g = 90(8.90)(17.64) = \mathbf{14{,}126}\ \text{kN}$$

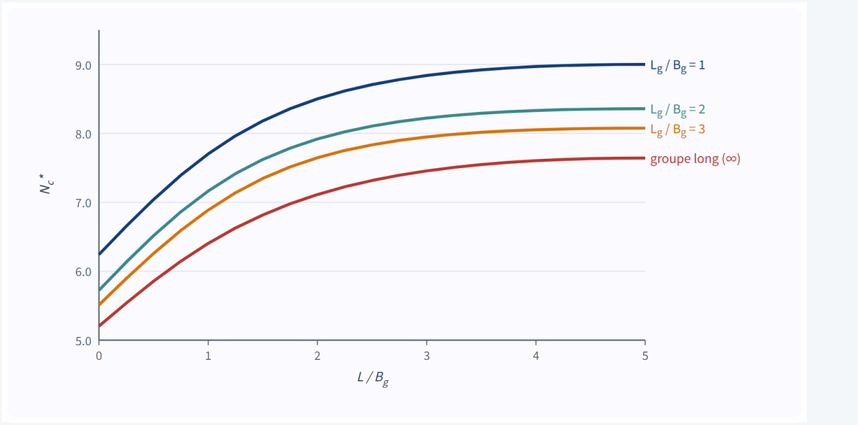
4 Capacité du bloc, capacité du groupe et charge admissible

$$Q_{block} = 11{,}712 + 14{,}126 = 25{,}838\ \text{kN}$$

$$Q_{g(u)} = \min(5{,}952;\ 25{,}838) = \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{5{,}952}{3} = 1{,}984\ \text{kN} \geq V = 1\,600\ \text{kN}$$

La capacité du bloc est **supérieure à 4 fois** la somme des capacités individuelles : dans ce groupe, **ce sont les pieux individuels qui sont déterminants** (individuel). Le bloc intervient dans les groupes à pieux rapprochés et nombreux ; voir l'abaque ci-contre.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Énoncé

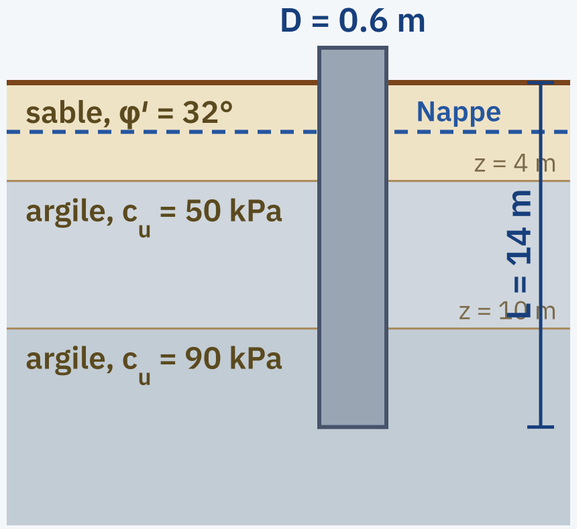
EXEMPLE

Données

Groupe	**5 × 5 pieux battus, D = 0.40 m, s = 1.20 m (3D), L = 12 m**
Sol	**sable unique, φ′ = 32°, γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³, nappe phréatique à 3 m**
Pieu isolé	**Q_s = 285.7, Q_p = 318.0 kN (pieu battu, K–δ et Meyerhof)**
Efficacité	**pieu battu, dans un sable avec φ′ < 40° : η = 1**

À DÉTERMINER

Comparer les valeurs de Q_{ind} et de Q_{bloc} et déterminer la capacité du groupe.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Pieux individuels (η = 1)

$$Q_{ind} = n\,Q_u = 25(603.7) = \mathbf{15{,}094}\ \text{kN}$$

2 Bloc : $L_g = B_g = 4(1.2) + 0.4 = 5.2$ m ; $\sigma'(3) = 54.0$, $\sigma'(12) = 136.7$ kPa

$$P_b = 2(5.2 + 5.2) = 20.8\ \text{m} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{939.2}{12} = 78.3\ \text{kPa}$$

$$\tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(78.3)(0.6249) = 22.99\ \text{kPa}$$

$$\text{glissement latéral} = 22.99(20.8)(12) = \mathbf{5{,}738}\ \text{kN}$$

Solution (2/2)

SOLUTION

3 Base du bloc dans le sable : la base est la somme des résistances de pointe des pieux

$$\text{base} = nQ_p = 25(318.0) = \mathbf{7{,}950}\ \text{kN} \qquad Q_{block} = 5{,}738 + 7{,}950 = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN}$$

4 Capacité et efficacité du groupe

$$Q_{block} = 13{,}689 \ < \ Q_{ind} = 15{,}094$$

$$Q_{g(u)} = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN} \qquad \eta_{group} = \frac{13{,}689}{15{,}094} = \mathbf{0.907}$$

Ici, c'est le **bloc qui est déterminant** : dans un grand groupe, la somme des frottements des fûts des pieux dépasse la capacité de cisaillement du périmètre extérieur du groupe. Bien que les pieux pris individuellement présentent η = 1.00, la capacité du groupe est de **91 %** de la somme individuelle.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Vesic : trois termes, puis le groupe

THÉORIE

Un pieu isolé tasse par le raccourcissement de sa propre longueur, par la compression du sol sous la base et par celle du sol chargé le long du fût. Vesic (1969) additionne ces trois composantes pour la charge de service Q_w (Q_{ws} est la part du fût, Q_{wp} celle de la base) :

$$s_e = s_{e1} + s_{e2} + s_{e3}$$

$$s_{e1} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \qquad s_{e2} = \frac{q_{wp} D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{wp}$$

$$s_{e3} = \frac{Q_{ws}}{pL}\frac{D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{ws} \qquad I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{L/D}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e$$

La charge de service $Q_w = V/n$; le module la répartit entre le fût et la pointe dans le rapport **$Q_s : Q_p$**.

Sous la même charge par pieu, le groupe tasse **$\sqrt{(B_g/D)}$** fois plus qu'un pieu isolé (relation empirique de Vesic pour les pieux dans le sable).

ξ : répartition du frottement latéral, entre 0.5 (uniforme) et 0.67 (croissant avec la profondeur) ; $I_{wp} = 0.85$.

Énoncé

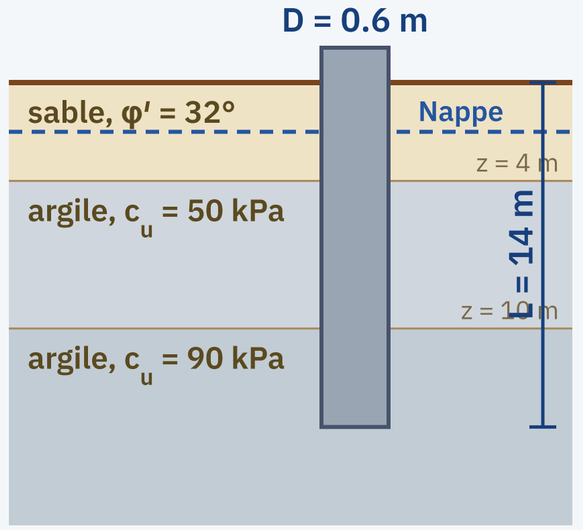
EXEMPLE

Données

Groupe	**9 pieux forés, 3 rangées × 3 pieux, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Sol	**sable 0–4 m (φ′ = 32°) · argile 4–10 m (c_u = 50) · argile 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Charge de service	**Q_w = V/n = 177.8 kN ; Q_s : Q_p = 678.1 : 229.0 (exemple 3)**
Matériau	$E_p = 30\,000$ MPa, $E_s = 30$ MPa, $\nu_s = 0.30$, $\xi = 0.6$, $I_{wp} = 0.85$

À DÉTERMINER

Déterminer le tassement élastique d'un pieu isolé en trois parties, puis celui du **groupe**.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Répartition de la charge de service

$$Q_{ws} = Q_w \frac{Q_s}{Q_u} = 177.8 \frac{678.1}{907.1} = 132.9\ \text{kN} \qquad Q_{wp} = 177.8 - 132.9 = 44.9\ \text{kN}$$

2 Raccourcissement du pieu

$$s_{e1} = \frac{(44.9 + 0.6(132.9))(14)}{(0.2827)(30\,000\,000)} = 0.21\ \text{mm}$$

3 Base

$$q_{wp} = \frac{Q_{wp}}{A_b} = 158.7\ \text{kPa} \quad s_{e2} = \frac{158.7(0.6)}{30\,000}(1 - 0.3^2)(0.85) = 2.46\ \text{mm}$$

Solution (2/2)

SOLUTION

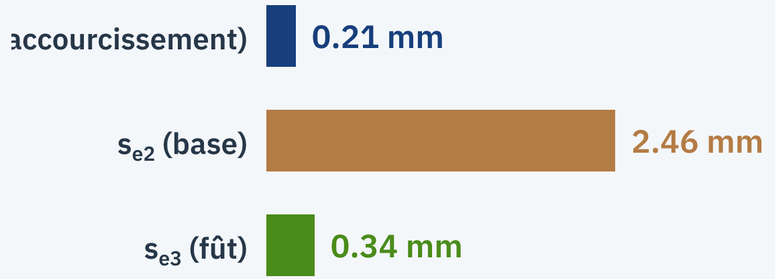
4 Fût : $I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{(14/0.6)} = 3.69$

$$s_{e3} = \frac{132.9}{(1.885)(14)} \cdot \frac{0.6}{30\,000}(0.91)(3.69) = 0.34 \text{ mm}$$

5 Pieu isolé et groupe de pieux

$$s_e = 0.21 + 2.46 + 0.34 \approx 3.00 \text{ mm}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e = \sqrt{\frac{4.2}{0.6}}(3.00) = \mathbf{7.9} \text{ mm}$$



82 % du tassement provient de la composante de la base (s_{e2}) ; le tassement élastique total est de **7.9 mm**. Le tassement principal des couches d'argile intervient à l'étape suivante : la consolidation.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Tassement lent et important des couches d'argile

THÉORIE

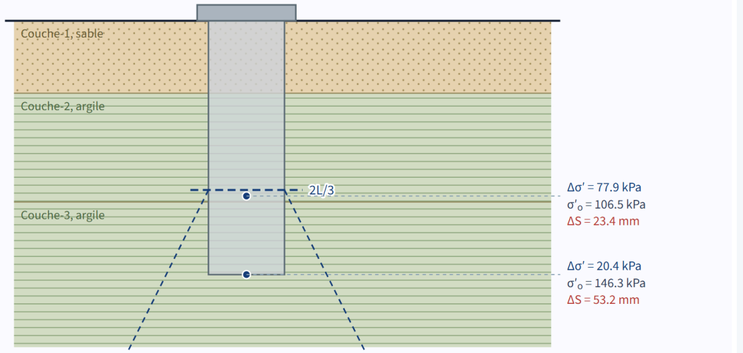
Les argiles sous la tête de groupe tassent lentement et surtout par **consolidation**. La source applique la charge du groupe, depuis le niveau de la semelle de répartition, à une fondation équivalente située **2L/3 plus bas** (les pieux ont transmis une partie de la charge au sol supérieur) et la diffuse en dessous selon **2 verticale : 1 horizontale**. Au milieu d'une couche d'argile, à la profondeur z sous le niveau 2L/3, l'accroissement de contrainte est :

$$\Delta\sigma'_i = \frac{Q_g}{(B_g + z_i)(L_g + z_i)}$$

$$\Delta S_i = \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_i}{\sigma'_o} \quad \text{(NC)}$$

Dans l'argile surconsolidée, C_s (C_c/5 s'il n'est pas donné) est utilisé jusqu'à la contrainte de préconsolidation, et C_c au-delà.

La partie de la couche d'argile située **au-dessous** de 2L/3 entre dans le calcul ; σ'_o est prise au milieu de cette partie, compte tenu de la couche et du niveau de l'eau. $S_c = \Sigma\Delta S_i$.



Énoncé

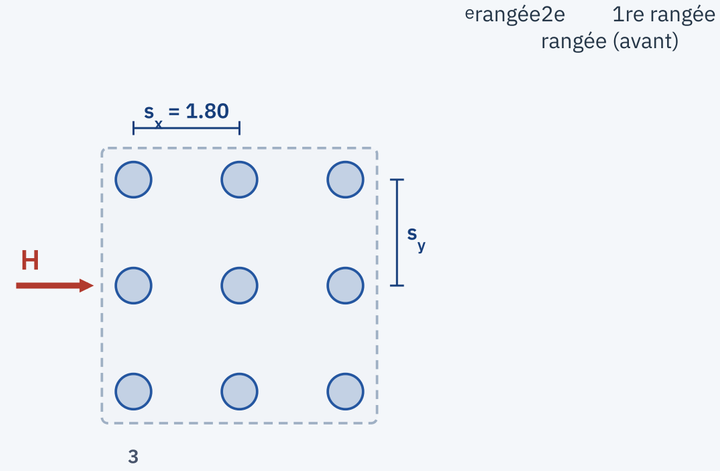
EXEMPLE

Données

Groupe	**9 pieux forés, 3 rangées × 3 pieux, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Sol	**sable 0–4 m (φ′ = 32°) · argile 4–10 m (c_u = 50) · argile 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Charge	$Q_g = V = 1\,600$ kN ; **bloc** $L_g = B_g = 4.2$ m
Argile 1 (4–10 m)	$e_0 = 0.90,\ C_c = 0.28$ **(NC)**
Argile 2 (10–18 m)	$e_0 = 0.70,\ C_c = 0.20$ **(NC)**

À DÉTERMINER

Déterminer le niveau 2L/3, puis calculer le tassement de **chaque couche d'argile** (la partie située sous 2L/3) et le tassement total de consolidation.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Niveau 2L/3 (depuis la base de la semelle de répartition)

$$z_0 = \frac{2L}{3} = \frac{2(14)}{3} = \mathbf{9.33}\ \text{m} \ \Rightarrow\ \text{partie 9.33–10 m de l'argile 1 et totalité de l'argile 2 prises en compte}$$

2 Argile 1 (4–10 m) : 9.33–10 m, H = 0.67 m ; point milieu 9.67 m, z = 0.33 m

$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+0.33)(4.2+0.33)} = 77.9\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 106.5\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.28(0.67)}{1+0.90}\log\frac{106.5+77.9}{106.5} = \mathbf{23.4}\ \text{mm}$$

Solution (2/2)

SOLUTION

3 Argile 2 (10–18 m) : 10.00–18 m, H = 8.00 m ; point milieu 14.00 m, z = 4.67 m

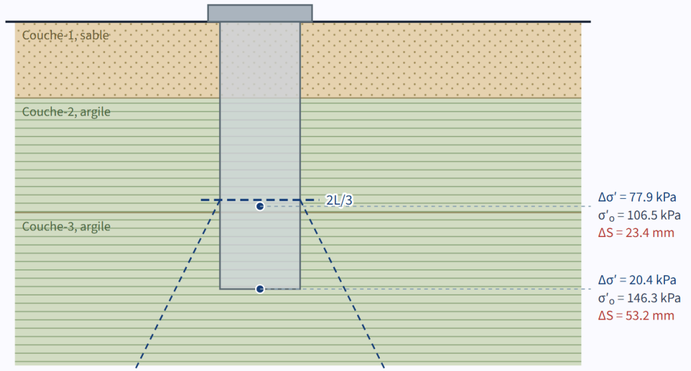
$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+4.67)(4.2+4.67)} = 20.4\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 146.3\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.20(8.00)}{1+0.70}\log\frac{146.3+20.4}{146.3} = \mathbf{53.2}\ \text{mm}$$

4 Tassement de consolidation total et sa combinaison avec la composante élastique

$$S_c = 23.4 + 53.2 = \mathbf{76.7}\ \text{mm}$$

$$S = S_{g(e)} + S_c = 7.9 + 76.7 = \mathbf{84.6}\ \text{mm}$$



91 % du tassement provient de la consolidation, et 69 % de celle-ci provient des argiles de 10–18 m : le tassement du groupe est gouverné par l'épaisse couche d'argile située **bien au-dessous** des pointes ; le tassement d'un pieu isolé ne le révèle pas.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

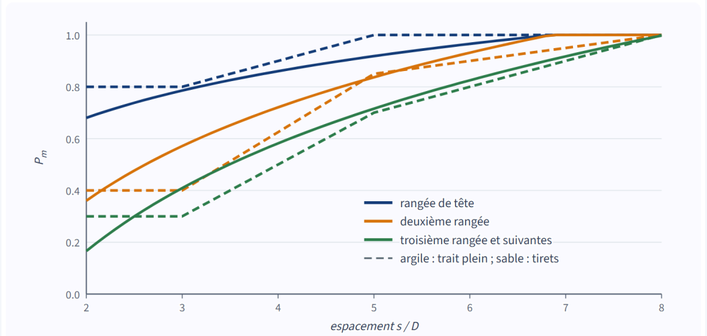
Les rangées arrière se trouvent à l'ombre de celles de devant

THÉORIE

Sous charge latérale, un pieu repousse le sol et le sol réagit le long du pieu (courbe p–y du module de charge latérale). Lorsque des pieux se trouvent **l'un derrière l'autre** dans la direction de la charge, chacun travaille dans un sol sollicité et repoussé par le pieu qui le précède. Les essais (Brown et al. 1988 ; McVay et al. 1995 ; Rollins et al. 2006) montrent que la courbe p–y dans le groupe conserve sa forme mais est réduite par un **multiplicateur p P_m** ; le multiplicateur dépend du rang et de l'entraxe :

$$p_{group}(y) = P_m \; p_{single}(y)$$

$$\text{argile (Rollins) :} \quad \begin{aligned} P_{m1} &= 0.26 \ln \tfrac{s}{D} + 0.5 \\ P_{m2} &= 0.52 \ln \tfrac{s}{D} \\ P_{m3} &= 0.60 \ln \tfrac{s}{D} - 0.25 \end{aligned}$$



Sable : multiplicateurs AASHTO LRFD (à 3D et 5D : 0.8·0.4·0.3 et 1.0·0.85·0.7 ; interpolation linéaire entre les deux).

Dans un sol stratifié, la courbe p–y de **chaque couche** est mise à l'échelle par le multiplicateur correspondant au type de sol de cette couche. Si la charge **s'inverse**, chaque rangée prend la moyenne des multiplicateurs de rangée du groupe.

Énoncé

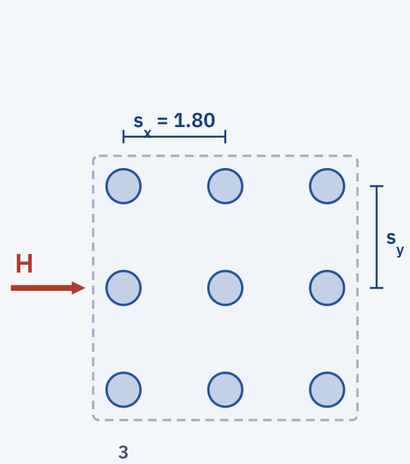
EXEMPLE

Données

Espacement (dans la direction de la charge)	**s_x = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3**
Argile	**équations de Rollins et al. (2006)**
Sable	**AASHTO LRFD : en 3D, $P_m = 0.8 \cdot 0.4 \cdot 0.3$**

À DÉTERMINER

Déterminer les **multiplicateurs p** des trois rangées pour la couche d'argile ; si la charge est **inversée**, quel est le multiplicateur moyen des rangées pour l'argile et pour le sable ?



Solution

SOLUTION

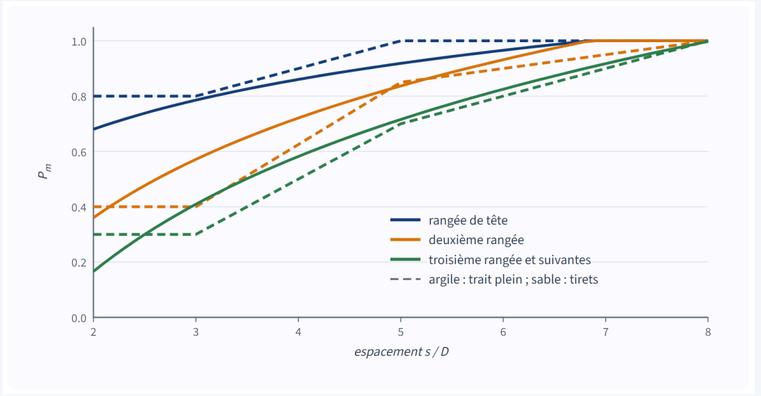
1 Argile : ln(s/D) = ln 3 = 1.099

$$P_{m1} = 0.26(1.099) + 0.5 = \mathbf{0.786}$$
$$P_{m2} = 0.52(1.099) = \mathbf{0.571}$$
$$P_{m3} = 0.60(1.099) - 0.25 = \mathbf{0.409}$$

2 Charge réversible : moyenne des rangées

$$\bar{P}_{m,clay} = \frac{0.786 + 0.571 + 0.409}{3} = \mathbf{0.589}$$
$$\bar{P}_{m,sand} = \frac{0.8 + 0.4 + 0.3}{3} = \mathbf{0.500}$$

La rangée avant conserve environ 79 % de la courbe, tandis que la troisième rangée et les suivantes n'en conservent que 41 % (dans l'argile) ; dans le sable, 80 % et 30 %. À mesure que l'espacement augmente, les multiplicateurs tendent vers 1 (à 5D, sable 1.0 · 0.85 · 0.7).



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

La semelle subit un seul déplacement

THÉORIE

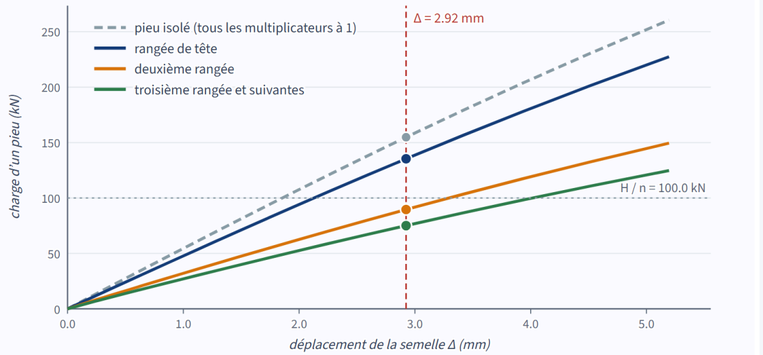
La semelle de répartition est rigide et sa rotation est bloquée : **chaque tête de pieu se déplace du même Δ** ; mais les courbes p–y étant mises à l'échelle différemment, les files reprennent des charges différentes. Le module cherche le Δ pour lequel la somme des charges des files est égale à la charge appliquée à la semelle :

$$\sum_{k=1}^{n_x} n_y \, H_k(\Delta) = H$$

Le pieu de la rangée k est le pieu isolé du **module de pieu sous charge latérale** (éléments finis + Newton) ; ses courbes sont mises à l'échelle par les multiplicateurs de cette rangée.

Le déplacement est **contrôlé** : la tête du pieu est maintenue à Δ et sa réaction est relevée ; le pic de la courbe adoucissante (argile sous chargement cyclique) peut ainsi également être suivi.

La charge maximale que le groupe peut supporter est le **premier pic** de la somme des rangées ; si la charge demandée est supérieure, le module le signale.



Énoncé

EXEMPLE

Données

Solution (module)	**Δ = 2.92 mm ; charge par pieu : 1re rangée 135.3, 2e rangée 89.6, 3e rangée 75.1 kN**
Pieu isolé	**Porte 154.8 kN à Δ ; se déplace de 1.85 mm sous 100 kN**
Charge	**H = 900 kN, n = 9 : part égale H/n = 100 kN**

À DÉTERMINER

Vérifier l'équilibre ; déterminer le rapport du déplacement de la semelle de répartition à celui d'un pieu isolé et l'**efficacité du groupe sous charge latérale**.

Solution

SOLUTION

1 Équilibre : $\Sigma n_\gamma H_k = H$

$$3(135.3 + 89.6 + 75.1) = \mathbf{900}\ \text{kN} = H\ \checkmark$$

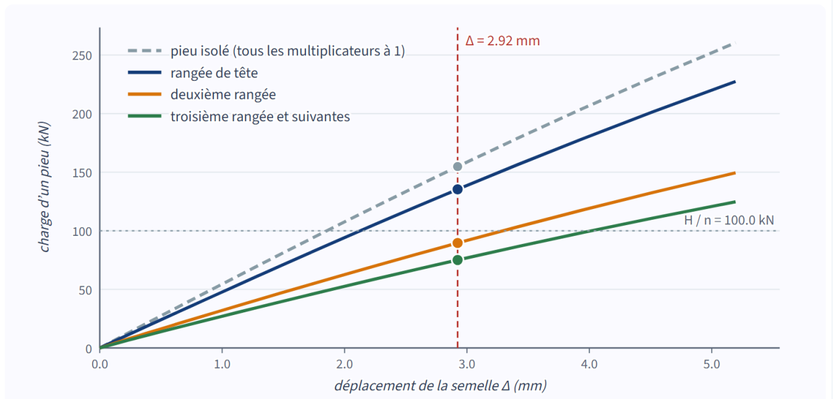
2 Rapport du déplacement de la semelle à celui d'un pieu isolé

$$\frac{\Delta}{y_{single}} = \frac{2.92}{1.85} = \mathbf{1.58}$$

3 Efficacité du groupe sous charge latérale : charge moyenne par pieu / charge du pieu isolé pour le même Δ

$$\eta_{lateral} = \frac{H/n}{H_{single}(\Delta)} = \frac{100.0}{154.8} = \mathbf{0.65}$$

La rangée avant reprend **1.35 fois** la part égale, la troisième rangée 0.75 fois ; la semelle de répartition se déplace **1.58 fois** plus que pour un pieu isolé. Le moment fléchissant maximal se situe en tête de pieu : 207 kN·m.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Quelle valeur pour quelle vérification ?

THÉORIE

Charges sur les pieux : $P_{max} \leq Q_u/FS$ (pieu isolé, sans effet de groupe) ; pieu en traction $T_{max} \leq T_u/FS$, pieux en traction pris ensemble $\Sigma T \leq T_g/FS$

Capacité du groupe : $V \leq Q_{all} = Q_{g(u)}/FS$; lequel des deux modes (individuel ou en bloc) est déterminant

Tassement : élastique + consolidation, comparé à la valeur admissible saisie

Latéral : déplacement de la semelle de répartition, charge de la rangée avant, moment fléchissant maximal et efficacité latérale ; comparés au déplacement admissible

La charge par pieu et le moment fléchissant sont les sollicitations du **dimensionnement structural** de la section du pieu

GROUPE D'EXEMPLE : VÉRIFICATIONS

Vérification	Résultat
$P_{max} \leq Q_u/FS$	261 ≤ 302 kN ✓
$V \leq Q_{all}$	1 600 ≤ 1,984 kN ✓
Tassement	84.6 mm
Δ (latéral)	2.92 mm

Énoncé

EXEMPLE

Données

Groupe	**9 pieux forés, 3 rangées × 3 pieux, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Sol	**sable 0–4 m ($\varphi' = 32°$) · argile 4–10 m (c_u = 50) · argile 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Variable	**entraxe des pieux s = 2.5D · 3D · 4D · 5D · 6D (dans les deux directions)**
Charges	**V = 1 600, H = 900 kN, M_y = 900 kN·m**

À DÉTERMINER

Lorsque l'entraxe augmente, comment varient la capacité du groupe, son efficacité et le déplacement de la semelle de répartition ?

Solution (1/2)

SOLUTION

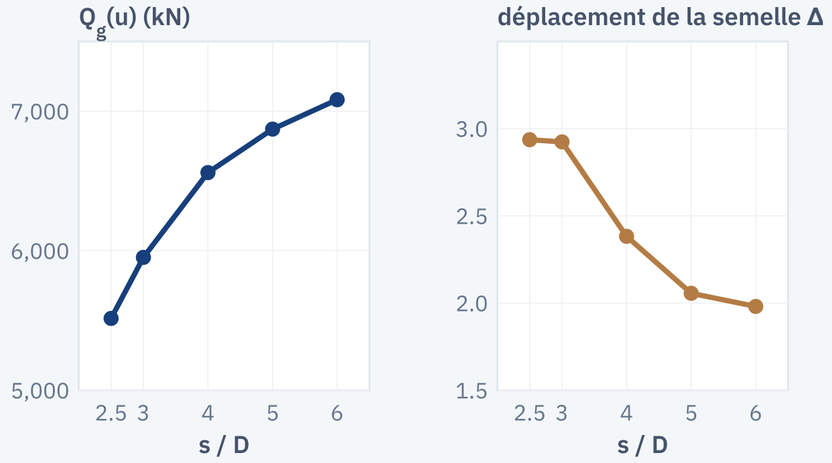
s / D	s (m)	η sable	η argile	$Q_{g(u)}$ (kN)	η groupe	Δ (mm)
2.5	1.50	0.65	0.677	5,515	**0.676**	2.94
3.0	1.80	0.77	0.727	5,952	**0.729**	2.92
4.0	2.40	1.00	0.792	6,560	**0.803**	2.38
5.0	3.00	1.00	0.832	6,871	**0.842**	2.06
6.0	3.60	1.00	0.860	7,083	**0.868**	1.98

s = 2.5D → 6D : capacité **5,515 → 7,083 kN**, coefficient d'efficacité du groupe 0.68 → 0.87, déplacement de la semelle de répartition **2.94 → 1.98 mm**. À mesure que l'espacement augmente, l'efficacité comme les multiplicateurs p tendent vers 1 ; 2.5D est le plus petit espacement donné par la source.

Solution (2/2)

SOLUTION

Commentaire. Porter l'entraxe de 2.5D à 6D augmente la capacité de 28 % et réduit le déplacement de la semelle de répartition de 33 % ; mais la semelle s'agrandit et les pieux s'éloignent. En pratique, le choix est un compromis entre 3D – 3.5D et 5D. Sur le graphique, $Q_{g(u)}$ est à gauche et Δ à droite.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Les hypothèses derrière les chiffres

THÉORIE

Groupe : pieux verticaux, de section et de longueur uniques, disposés en maillage rectangulaire ou triangulaire sous une semelle de répartition rigide. La semelle transmet la charge mais n'ajoute pas de résistance (la butée, le frottement sous la semelle et la portance sont laissés du côté de la sécurité).

Pieu isolé : règles des sols stratifiés, aucune résistance n'est saisie.

Efficacité : équations empiriques pour pieux battus dans l'argile ; dans le sable, un espacement unique (distance minimale). Pour une disposition triangulaire, Converse–Labarre constitue une **extension**.

Bloc : fondation de la source dans l'argile ; le glissement dans le sable et la base sableuse constituent une **extension du module**.

Charges : V inclut le poids de la semelle de répartition ; la charge latérale et les moments sont pris à la base de la semelle. En traction, seul le fût est pris en compte, sable ¾.

Tassement : il s'agit d'une option ; la part élastique avec un seul E_s et v_s, la consolidation avec la diffusion 2:1, au milieu de chaque couche.

Latéral : les multiplicateurs de p proviennent d'essais réalisés sur des sols et des entraxes déterminés ; les entraxes inférieurs à 3D sont signalés.

Synthèse

Points à retenir

Semelle de répartition rigide : **P = V/n + Bx + Cy** ; la plus grande charge est sur le pieu avant, la plus petite sur le pieu arrière ; si le moment est grand, le pieu arrière travaille en **traction**

Le **pieu isolé** est calculé couche par couche ; la capacité du groupe s'appuie sur ce calcul

L'**efficacité** est appliquée couche par couche : Converse–Labarre dans l'argile, abaque pour les pieux battus dans le sable ($\eta \leq 1$) et règle de l'AASHTO pour les pieux forés

Capacité = **min(individuelle, bloc)** ; le bloc intervient dans les groupes de nombreux pieux à faible entraxe

Tassement : élastique (Vesic, avec $\sqrt{(B_g/D)}$) + consolidation (diffusion 2:1 à partir de 2L/3) ; le tassement du groupe est gouverné par l'argile épaisse

Latéral : les multiplicateurs de p diminuent de la rangée avant vers la rangée arrière ; la semelle de répartition subit un déplacement Δ unique, et les rangées reprennent des charges inégales

Références bibliographiques

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

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228.

Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board, Washington.

Coyle, H.M. and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT7), 965–986.

Mansur, C.I. and Hunter, A.H. (1970). Pile tests, Arkansas River project. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1545–1582.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.

Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972). A new way to predict capacity of piles in clay. Proceedings of the 4th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1718.

Burland, J.B. (1973). Shaft friction of piles in clay — a simple fundamental approach. Ground Engineering, 6(3), 30–42.

O'Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, Washington.

Reese, L.C. and O'Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-HI-88-042, Federal Highway Administration, Washington ; pour la base d'un pieu foré dans l'argile.

Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

Kishida, H. and Meyerhof, G.G. (1965). Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 2, 270–274.

Vesic, A.S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. Performance of Deep Foundations, ASTM STP 444, 177–222.

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed. : multiplicateurs de p des groupes de pieux et résistance des groupes de pieux forés dans un sol pulvérulent.

Washington State Department of Transportation (2010). Bridge Design Memorandum No. 07-2010, Bearing resistance of shaft groups.

Brown, D.A., Morrison, C. and Reese, L.C. (1988). Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114(11), 1261–1276.

McVay, M., Casper, R. and Shang, T.-I. (1995). Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(5), 436–441.

Rollins, K.M., Olsen, R.J., Egbert, J.J., Jensen, D.H., Olsen, K.G. and Garrett, B.H. (2006). Pile spacing effects on lateral pile group behavior: analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(10), 1272–1283.

Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1204, 577–594.

Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. Proceedings of the 6th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 2080, 473–485.

American Petroleum Institute (2000). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design, API RP 2A-WSD, 21st ed.

GeoTerva

Calculs géotechniques en ligne

De la théorie à la pratique

Calculez pas à pas dans GeoTerva le groupe d'exemples de cette présentation : les nombres sont identiques.

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