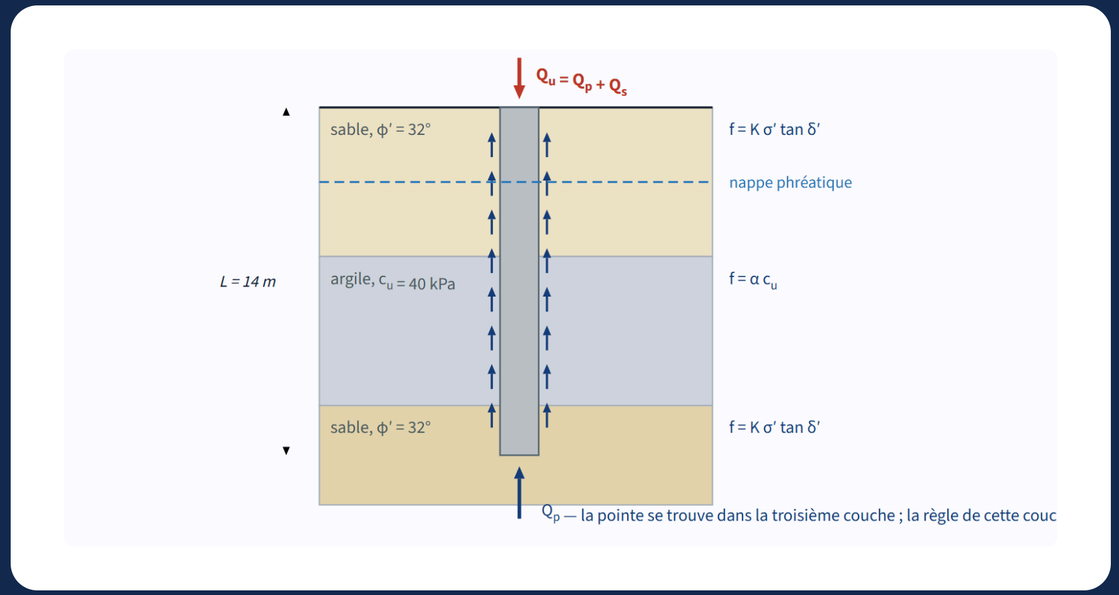
Présentation de cours de géotechnique · Pieux

Capacité portante des pieux dans un sol stratifié

Cours : capacité d'un pieu traversant des couches de sable et d'argile. Quelle règle s'applique et où, comment la contrainte effective s'accumule à travers les couches ; un exemple de calcul pour chaque sujet.



Calcul couche par couche

Pointe : couche de la pointe

Règles sable + argile

Pieu foré

Exemples de calcul

Introduction

Que verrons-nous dans ce cours ?

Le cumul de la contrainte effective **couche par couche** ; la manière dont une couche d'argile, même si sa propre résistance ne se transmet pas au sable, influe par son poids sur le sable sous-jacent

Savoir que la **résistance de pointe** ne dépend que de la couche où se trouve la pointe et qu'elle est calculée selon la règle de cette couche

Appliquer la règle K–δ **dans la couche de sable** (la profondeur critique L′ = 15D concerne l'ensemble du pieu) et les règles α, λ et β **dans la couche d'argile**

La **sommation de la résistance du fût sur l'ensemble des couches** ; l'interprétation des sauts de frottement aux interfaces et de l'effet de la longueur du pieu

Comprendre, pour un **pieu foré**, la fenêtre de α* et le fait que c_{ub} peut provenir de plusieurs couches

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

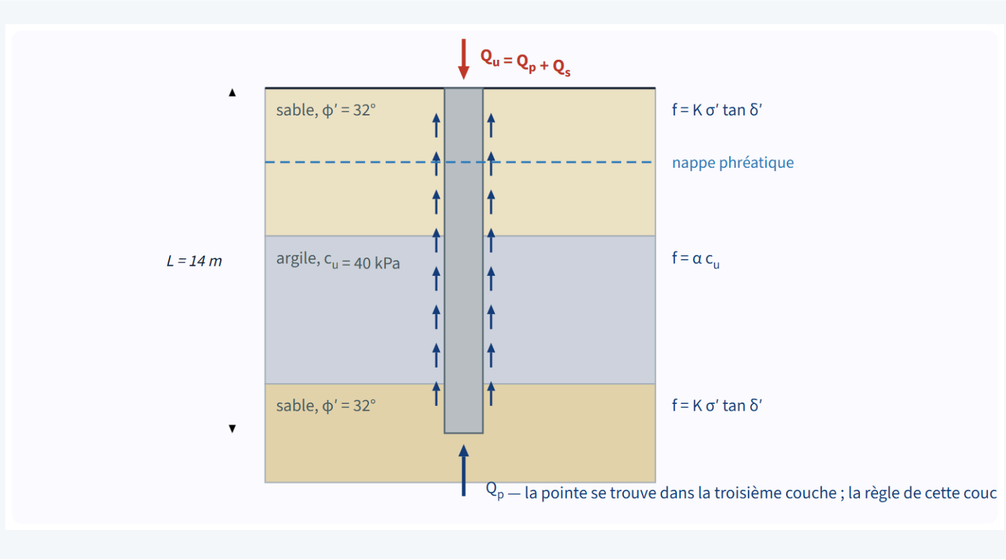
3 · **Solution** : étape par étape, avec les valeurs numériques

La plupart des exemples sont traités avec le même pieu : pieu de 0.4 m de diamètre et de 14 m de long, traversant un profil sable–argile–sable.

Cette présentation s'appuie sur les présentations **pieux dans le sable** et **pieux dans l'argile** : les règles y ont été établies ; on examine ici laquelle s'applique et dans quel cas.

Chaque couche répond selon sa propre règle

THÉORIE



Un pieu pénètre rarement dans un seul sol. Le profil comporte **plusieurs couches** ; chacune est définie comme sable ou argile et l'on applique **la règle de son propre matériau**. La capacité comporte toujours deux parties, mais elle ne se lit plus dans une formule unique ; elle est **construite pièce par pièce** :

$$Q_u = Q_p + Q_s \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{FS}$$

Aucune théorie nouvelle : les règles du sable relèvent du module sable, celles de l'argile du module argile.

Ce qui est nouveau, c'est le **schéma de calcul** : quelle règle s'applique à quelle partie du fût et comment la contrainte effective se cumule à partir des couches supérieures.

La résistance de pointe provient d'**une seule couche**, le frottement latéral de **la somme de toutes les couches**.

Contrainte continue, frottement en escalier

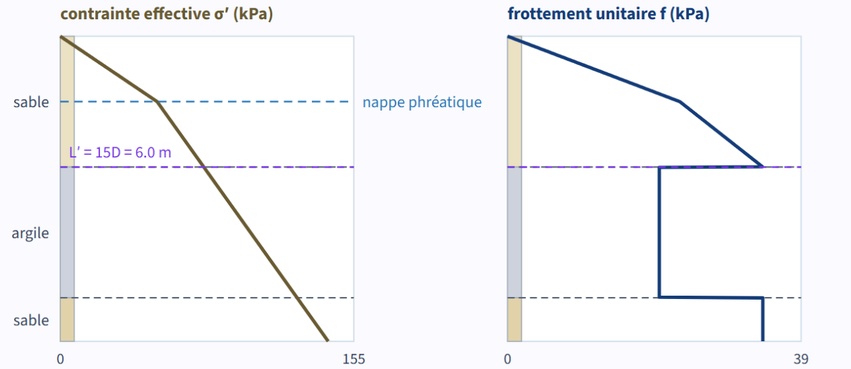
THÉORIE

La contrainte verticale effective est ce qui relie les couches entre elles : le **poids de chaque couche sus-jacente** s'accumule ; au-dessus de la nappe on utilise le poids volumique humide, en dessous le poids volumique déjaugé.

$$\sigma'(z) = \sum \gamma_i h_i \qquad \text{(Au-dessus de la nappe)}$$
$$+ \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \text{(Sous la nappe)}$$

La couche d'argile ne transmet pas sa propre résistance au sable ; mais, **par son poids**, elle modifie la résistance offerte par le sable sous-jacent.

Le frottement, en revanche, n'est pas continu : à la limite sable–argile, **la règle elle-même change** et le frottement unitaire peut présenter un grand saut. Ce saut n'est pas une erreur de calcul, mais la **signature** du profil stratifié.



La contrainte est continue à travers les couches ; le frottement présente un saut à chaque limite, car la règle y change.

Énoncé

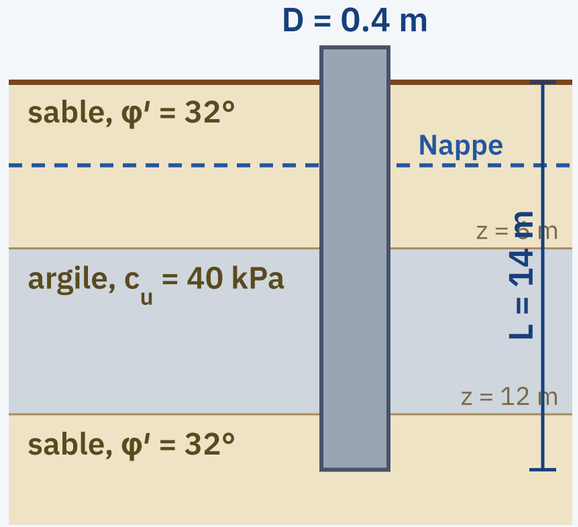
EXEMPLE

Données

Sable 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argile (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sable 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Poids volumique	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(trois couches)**
Nappe phréatique	**à 3.0 m de profondeur**
Pieu	**battu, D = 0.4 m, L = 14 m**
Poids volumique de l'eau	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

À DÉTERMINER

Déterminer la contrainte verticale effective aux profondeurs **3, 6, 12 et 14 m** (14 m = pointe du pieu).



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Jusqu'à la nappe (3 m) : toute la couche est humide, γ = 17

$$\sigma'(3) = 17(3) = \mathbf{51.0}\ \text{kPa}$$

2 6 m (limite sable–argile) : sous la nappe, γ′ = γ_{sat} − γ_w = 18 − 9.81

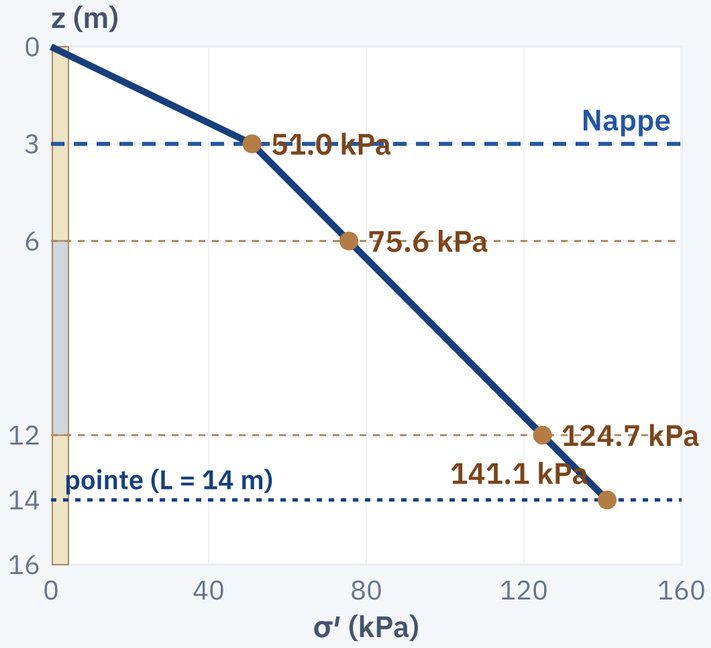
$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

3 12 m (limite argile–sable) : la valeur de γ_{sat} de l'argile est aussi de 18

$$\sigma'(12) = 75.6 + (18 - 9.81)(6) = \mathbf{124.7}\ \text{kPa}$$

4 14 m (pointe du pieu)

$$\sigma'(14) = 124.7 + (18 - 9.81)(2) = \mathbf{141.1}\ \text{kPa}$$



Solution (2/2)

SOLUTION

5 Aire du diagramme de σ′ dans chaque tronçon (trapèze) ; ces aires donneront la contrainte moyenne dans le calcul du frottement latéral

$$A_{0-6} = \tfrac{1}{2}(0 + 51.0)(3) + \tfrac{1}{2}(51.0 + 75.6)(3) = 266.4$$
$$A_{6-12} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 124.7)(6) = 600.8$$
$$A_{12-14} = \tfrac{1}{2}(124.7 + 141.1)(2) = 265.8$$

σ′ est **continue à travers les couches** : il n'y a pas de saut à la limite sable–argile ; la pente ne change qu'au niveau de la nappe et lorsque γ′ change. Ces trois aires seront utilisées comme moyenne σ′ dans les Exemples 4 et 5.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

La pointe n'interroge que sa propre couche

THÉORIE

La résistance de pointe relève d'**une seule couche** : celle dans laquelle se trouve la pointe du pieu. Elle est calculée d'après le matériau de cette couche ; les couches supérieures n'interviennent que par σ′ (**pour une pointe dans le sable**) et **n'ont aucun effet pour une pointe dans l'argile**.

$$\text{sable :}\quad Q_p = A_p\, q'\, N_q^* \le A_p\, q_l,\quad q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi'$$

$$\text{argile :}\quad Q_p = A_p\, c_u\, N_c^*,\quad N_c^* = 9\ \text{(Meyerhof)}$$

Un pieu dont la pointe coïncide **exactement avec une limite** est considéré comme reposant sur la couche située **sous** la limite.

Coyle–Castello est une corrélation pour le **sable** ; elle n'a pas de sens pour une pointe dans l'argile et, même si elle est sélectionnée, la règle de l'argile reste applicable.



En pointe dans le sable, σ′ et N^*_q sont déterminants ; en pointe dans l'argile, seul c_u de cette couche intervient.

Énoncé

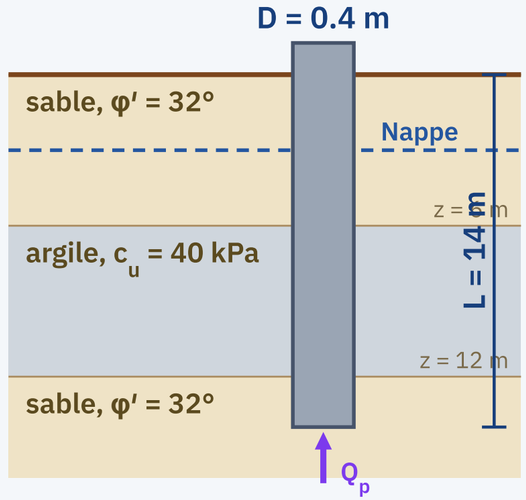
EXEMPLE

Données

Sable 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argile (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sable 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Poids volumique	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(trois couches)**
Nappe phréatique	**à 3.0 m de profondeur**
Pieu	**battu, section circulaire, D = 0.4 m, L = 14 m**
Méthode de la pointe	**Meyerhof**
Pression atmosphérique	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$
Contrainte effective à la pointe	$q' = \sigma'(14) = 141.1\ \mathrm{kPa}$ **(Exemple 1)**

À DÉTERMINER

Déterminer dans quelle couche se trouve la pointe, puis la **résistance de pointe** Q_p.



Solution (1/2)

SOLUTION

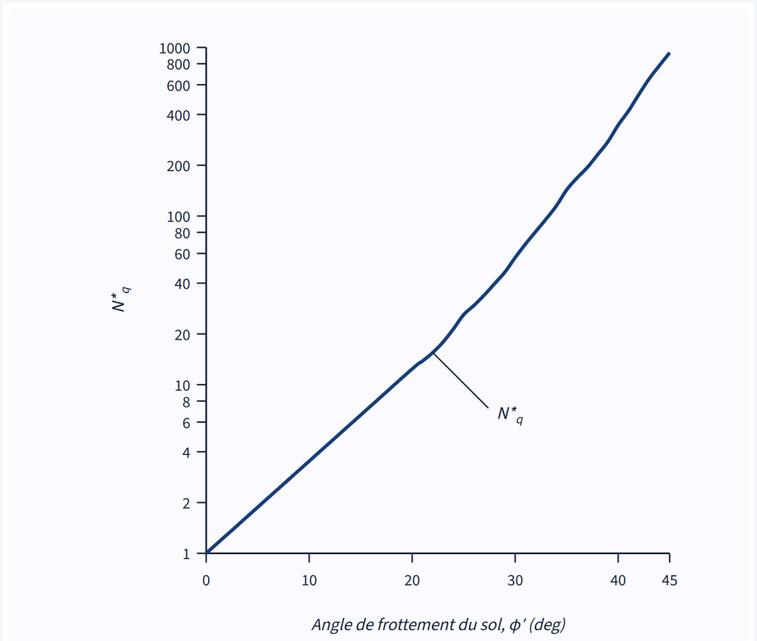
1 Couche en pointe : L = 14 m, dans le sable entre 12–16 m → règle du sable (l'argile sus-jacente n'intervient pas pour la pointe)

$$\varphi' = 32^\circ \qquad q' = \sigma'(14) = 141.1\ \text{kPa}$$

2 N^*_q d'après l'abaque de Meyerhof pour φ′ = 32° ; puis les deux valeurs côte à côte

$$N_q^* = 81$$
$$q' N_q^* = 141.1(81) = 11{,}428\ \text{kPa}$$
$$q_l = 0.5(100)(81)\tan 32^\circ = 2{,}531\ \text{kPa}$$

La valeur de N^*_q lue sur l'abaque (ci-contre) est de 81 ; $q'N^*_q$ = 11,428 kPa, très supérieure à la valeur limite q_l = 2,531 kPa : **la limite est déterminante**.



Solution (2/2)

SOLUTION

3 Résistance de pointe unitaire : la plus petite des deux

$$q_p = \min(q' N_q^*;\ q_l) = \min(11{,}428;\ 2{,}531) = \mathbf{2{,}531}\ \mathrm{kPa}$$

4 Aire de la pointe du pieu et résistance de pointe

$$A_p = \frac{\pi (0.4)^2}{4} = 0.1257\ \mathrm{m}^2 \qquad Q_p = A_p\, q_p = 0.1257(2{,}531) = \mathbf{318.0}\ \mathrm{kN}$$

Résistance de pointe **318.0 kN**. La pointe du pieu se trouvant dans le sable, la règle du sable s'applique ; la limite étant atteinte, la valeur de σ′ ne modifie pas le résultat dans cet exemple.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Énoncé

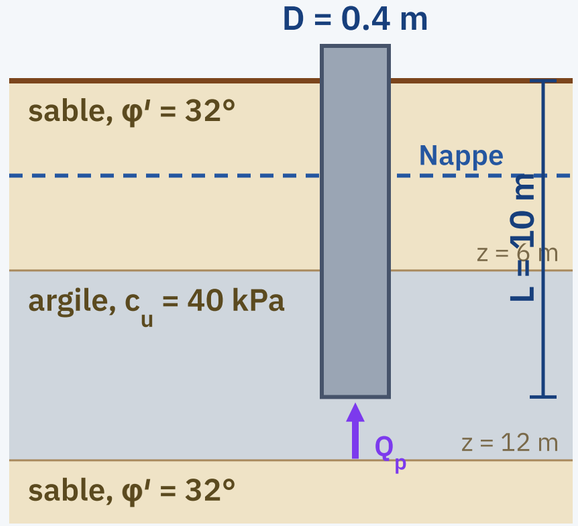
EXEMPLE

Données

Sable 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argile (6–12 m)	$c_u = 40\ \text{kPa}$
Sable 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Poids volumique	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$ **(trois couches)**
Nappe phréatique	**à 3.0 m de profondeur**
Pieu	**même pieu, mais L = 10 m**
Méthodes de pointe	**Meyerhof et Vesic**
Pression atmosphérique	$p_a = 100\ \text{kPa}$

À DÉTERMINER

Si le pieu est raccourci à 10 m, déterminer dans quelle couche reste la pointe et calculer la **résistance de pointe** par deux méthodes.



Solution

SOLUTION

1 Couche en pointe : L = 10 m, dans l'argile entre 6–12 m → règle de l'argile (le sable et σ′ n'interviennent plus dans le calcul)

$$c_u = 40\ \text{kPa} \qquad A_p = 0.1257\ \text{m}^2$$

2 Meyerhof : $N^*_c = 9$

$$q_p = 9\,c_u = 9(40) = 360\ \text{kPa} \qquad Q_p = 0.1257(360) = \mathbf{45.2}\ \text{kN}$$

3 Vesic: $I_{rr} = I_r = 347(c_u/p_a) - 33$

$$I_{rr} = 347(0.4) - 33 = 105.8$$
$$N_c^* = \tfrac{4}{3}(\ln 105.8 + 1) + \tfrac{\pi}{2} + 1 = 10.12$$
$$q_p = 40(10.12) = 405\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ Q_p = 0.1257(405) = \mathbf{50.9}\ \text{kN}$$

Pour le pieu dont la pointe se trouvait dans le sable, Q_p = **318 kN** ; avec la pointe dans l'argile, **45 – 51 kN** : environ un septième. Prolonger le même pieu de 2 m pour amener sa pointe dans le sable accroît brusquement la résistance de pointe.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

K–δ : la profondeur critique appartient au pieu entier

THÉORIE

Dans la couche de sable, le fût résiste par frottement contre la contrainte effective horizontale. Chaque couche de sable porte **ses propres** valeurs de K et δ′ :

$$f = K_i\,\sigma'\tan\delta'_i \quad (z \le L') \qquad f = f_{z=L'} \quad (z > L'),\quad L' = 15D$$

L′ se rapporte à **l'ensemble du pieu** et non à une couche : sous L′, la valeur de σ′ est maintenue à sa valeur en L′.

Une couche de sable en profondeur, où que se situe sa limite, donne un frottement unitaire **constant sur toute la couche**.

Option : **Coyle–Castello**. K propre à la couche (d'après l'abaque), δ′ = 0.8φ′ et la valeur moyenne de σ′ de la couche ; il n'y a pas de profondeur critique, la moyenne en tient lieu.

COYLE–CASTELLO (PAR COUCHE)

$$f_i = K_i\,\bar{\sigma}'_i\tan(0.8\varphi'_i)$$

$$Q_s = p\sum f_i\,\Delta L_i$$

Dans la méthode K–δ, δ′ est le plus souvent pris dans l'intervalle 0.75φ′ – 0.8φ′ ; dans cette présentation, on utilise **δ′ = 0.8φ′ = 25.6°** et **K = 1.0**.

Énoncé

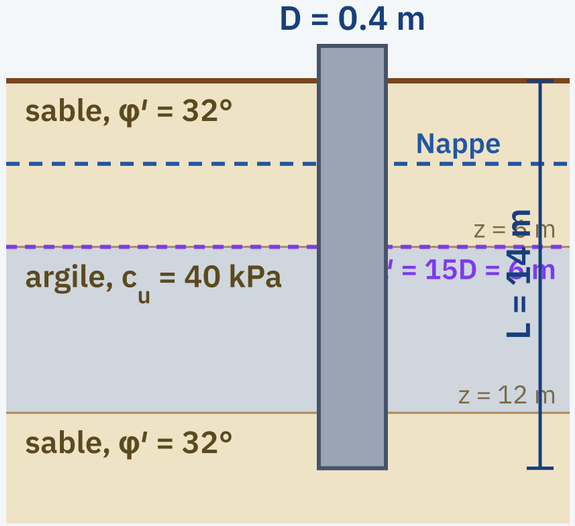
EXEMPLE

Données

Sable 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argile (6–12 m)	$c_u = 40\ \text{kPa}$
Sable 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Poids volumique	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$ **(trois couches)**
Nappe phréatique	**à 3.0 m de profondeur**
Pieu	**battu, D = 0.4 m, L = 14 m**
Périmètre	$p = \pi D = 1.257\ \text{m}$
Dans les couches de sable	$K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6^\circ$ **(saisir ces valeurs dans le module ; le module s'ouvre avec K = 0.66 et δ′ = 24°)**

À DÉTERMINER

Déterminer la résistance du fût dans les **couches de sable** (0–6 m et 12–14 m) par la méthode K–δ. Profondeur critique L′ = 15D.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Profondeur critique (unique pour tout le pieu)

$$L' = \min(15D;\ L) = \min(15(0.4);\ 14) = \mathbf{6}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa (Exemple 1)}$$

2 Sable 1 (0–6 m) : la couche est entièrement comprise dans L′, pas de plafonnement ; σ′ moyen = aire / épaisseur

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{266.4}{6} = 44.4\ \text{kPa}$$

3 Frottement et résistance unitaires

$$f_1 = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}'_1 = 1.0(0.4791)(44.4) = 21.3\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f_1 H = 1.2566(21.3)(6) = \mathbf{160.4}\ \text{kN}$$

Solution (2/2)

SOLUTION

4 Sable 2 (12–14 m) : entièrement sous L′ → la valeur de σ′ est maintenue à sa valeur en L′

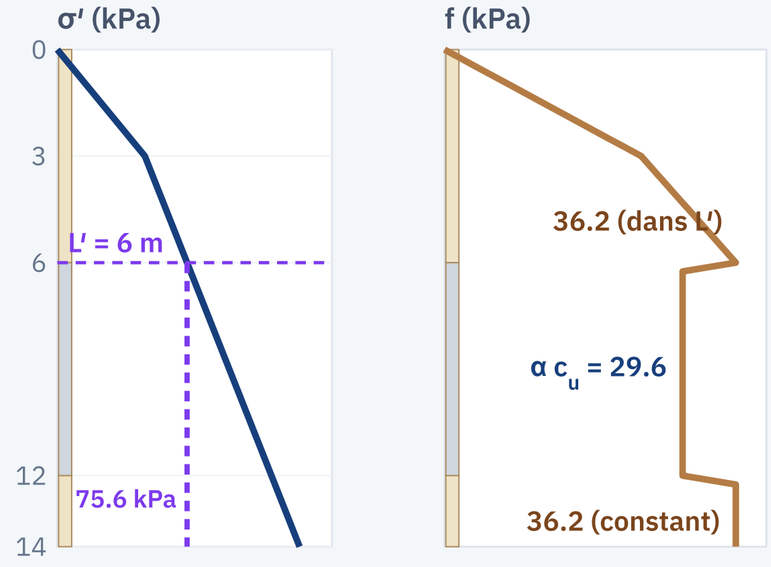
$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6 \text{ kPa}$$

$$f_3 = 1.0(0.4791)(75.6) = \mathbf{36.2} \text{ kPa}$$

5 Résistance (épaisseur 14 − 12 = 2 m)

$$Q_{s3} = p\, f_3 H = 1.2566(36.2)(2) = \mathbf{91.0} \text{ kN}$$

Sans la profondeur critique, ce tronçon donnerait σ̄ = 132.9 kPa, f = 63.7 kPa et Q_{s3} = 160 kN. Le **plafond L′** retranche **69 kN** du tronçon profond du sable.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Dans l'argile aussi, chaque couche choisit sa propre méthode

THÉORIE

Dans la couche d'argile, le fût résiste par **adhérence** ou par **contrainte effective** ; les trois méthodes du module argile peuvent être utilisées couche par couche :

$$\alpha: \ f = \alpha_i c_{u,i} \qquad \lambda: \ f_i = \lambda\,(\bar{\sigma}'_i + 2c_{u,i}),\ \lambda = \lambda(L)$$

$$\beta: \ \beta_i = (1 - \sin\varphi'_{R,i})\tan\varphi'_{R,i}\sqrt{OCR_i}, \quad f_i = \beta_i \bar{\sigma}'_i$$

α : **ne dépend pas** de la profondeur à l'intérieur de la couche ; le frottement est constant sur toute la couche (uniforme).

λ et β rétablissent la contrainte effective ; ils forment un **palier** selon les couches sus-jacentes.

UNE REMARQUE HONNÊTE

Vijayvergiya et Focht ont exprimé λ comme **une moyenne unique pour toute la longueur enterrée**. L'appliquer séparément à chaque couche d'argile dans un profil stratifié (λ correspondant à la longueur L, avec les valeurs moyennes de σ′ et de c_u de cette couche) constitue **une extension de la méthode propre à ce logiciel** ; le module le signale partout.

φ'_R et OCR sont **saisis**, et non déduits du sol par une corrélation (ouverture avec 30° et 1).

Énoncé

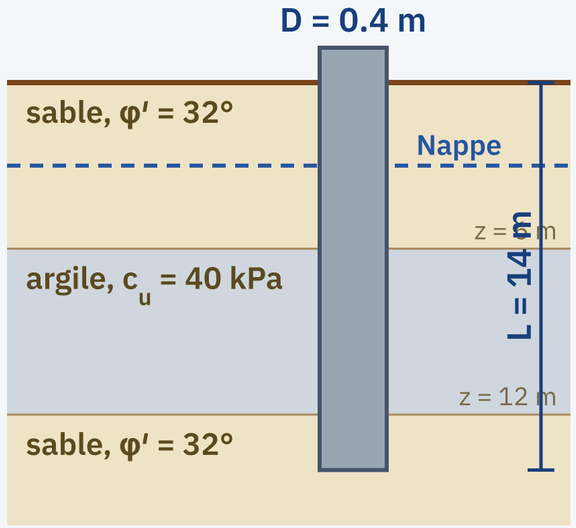
EXEMPLE

Données

Sable 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argile (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sable 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Poids volumique	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(trois couches)**
Nappe phréatique	**à 3.0 m de profondeur**
Pieu	**battu, D = 0.4 m, L = 14 m, p = 1.257 m**
σ′ moyen de l'argile	$\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1\ \mathrm{kPa}$ **(Exemple 1)**
pour β	$\varphi'_R = 30^\circ,\ OCR = 1$
pour α	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$**, α d'après le tableau**

À DÉTERMINER

Déterminer la résistance du fût dans la couche d'argile (6–12 m) par les méthodes **α, λ et β**.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Méthode α : d'après le tableau, α pour $c_u/p_a = 0.4$

$$\alpha = 0.74 \quad f = \alpha c_u = 0.74(40) = 29.6 \text{ kPa} \quad Q_s = 1.2566(29.6)(6) = \mathbf{223.2} \text{ kN}$$

2 Méthode λ : λ est tiré du tableau en fonction de la **longueur du pieu** (L = 14 m) ($\lambda_{10} = 0.245$; $\lambda_{15} = 0.200$)

$$\lambda = 0.209$$

$$f = \lambda(\bar{\sigma}_2' + 2c_u) = 0.209(100.1 + 2(40)) = 37.6 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(37.6)(6) = \mathbf{283.9} \text{ kN}$$

Solution (2/2)

SOLUTION

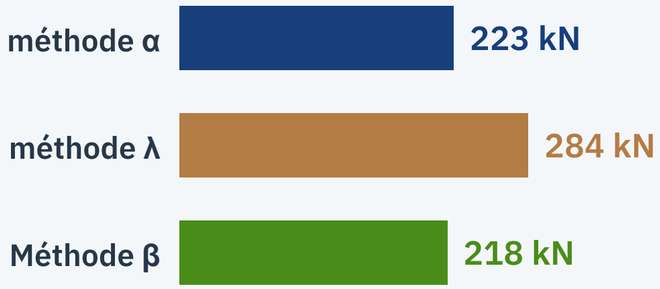
3 Méthode β : $\varphi'_R = 30°$, OCR = 1

$$\beta = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = 0.289$$

$$f = \beta \bar{\sigma}'_2 = 0.289(100.1) = 28.9 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(28.9)(6) = \mathbf{218.0} \text{ kN}$$

Les trois méthodes donnent **223**, **284** et **218 kN** pour la même couche d'argile : α et β sont proches, λ est supérieur d'environ 27 %. L'écart provient des hypothèses sur lesquelles reposent les méthodes ; l'emploi de λ couche par couche est en outre une extension.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Une seule intégrale : le long du pieu

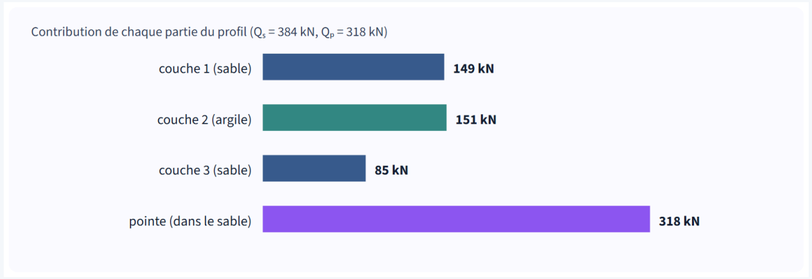
THÉORIE

La résistance de frottement latéral du fût est l'intégrale du frottement le long du pieu multipliée par le périmètre. Le calcul est effectué numériquement ; la limite peut se trouver **n'importe où**, et un pieu qui s'arrête au milieu d'une couche ne nécessite aucun cas particulier :

$$Q_s = p \int_0^L f(z)\,dz \;\approx\; p \sum f_i\,\Delta z_i$$

Vue sous cet angle, la stratification cesse d'être un problème pour devenir une **question de conception** : **quelle partie** du profil porte le pieu ?

Comment la capacité varie-t-elle si le pieu est prolongé au-delà de la limite suivante ou raccourci ?



Contribution de chaque tronçon du pieu de l'exemple (Q_s = 475 kN, Q_p = 318 kN).

Énoncé

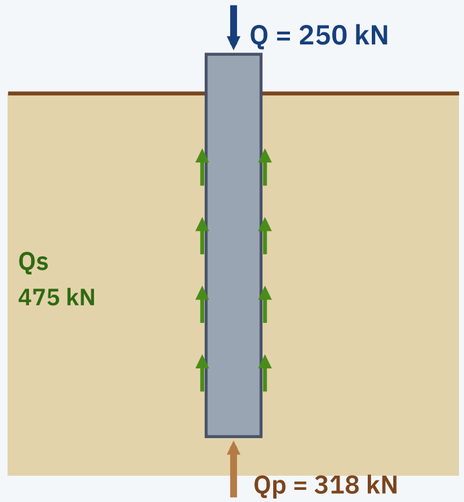
EXEMPLE

Données

Résistance de pointe	Q_p = 318.0 kN (Exemple 2)
Sable 1 (0–6 m)	Q_{s1} = 160.4 kN (Exemple 4)
Argile (6–12 m)	Q_{s2} = 223.2 kN (méthode α, exemple 5)
Sable 2 (12–14 m)	Q_{s3} = 91.0 kN (Exemple 4)
Coefficient de sécurité	FS = 3
Charge de service sur le pieu	Q = 250 kN

À DÉTERMINER

Déterminer la capacité portante **ultime** et **admissible** du pieu ; la charge de service est-elle suffisante ?



Solution

SOLUTION

1 Frottement latéral : somme des tronçons

$$Q_s = 160.4 + 223.2 + 91.0 \approx \mathbf{474.5}\ \text{kN}$$

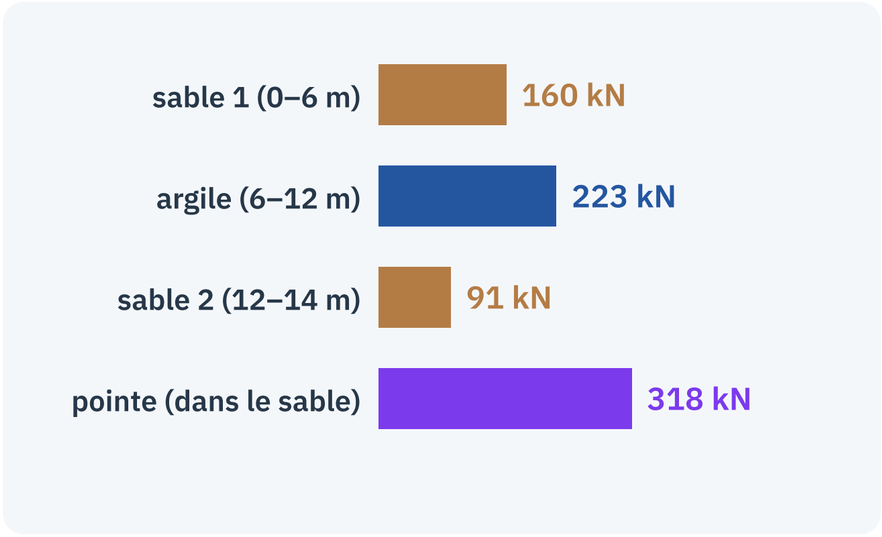
2 Capacité portante ultime

$$Q_u = Q_p + Q_s = 318.0 + 474.5 = \mathbf{792.6}\ \text{kN}$$

3 Contrainte admissible et vérification

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{792.6}{3} = \mathbf{264.2}\ \text{kN}$$

$$Q = 250 \leq 264.2 \ \Rightarrow\ \text{suffisant}$$



Le taux de travail est de 0.95. La couche d'argile ne représente que 43 % de la longueur du pieu, mais elle fournit 47 % du frottement du fût : au-delà de la profondeur critique, le sable cesse de gagner en σ′, tandis que l'argile donne la même valeur α c_u à toute profondeur.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Énoncé

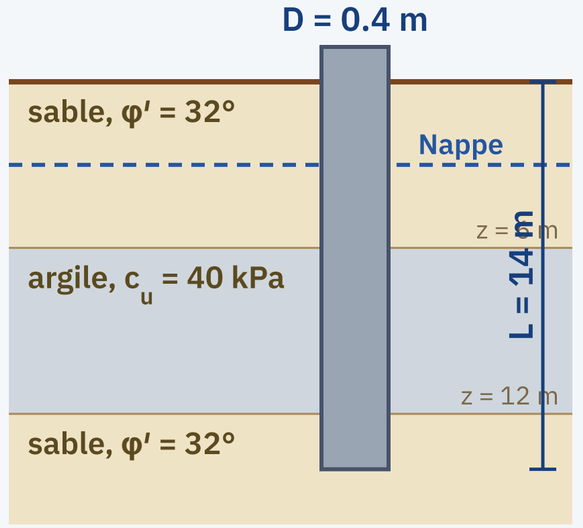
EXEMPLE

Données

Sable 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argile (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sable 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Poids volumique	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(trois couches)**
Nappe phréatique	**à 3.0 m de profondeur**
Méthodes	**battu, D = 0.4 m ; Meyerhof, α, K–δ**
Longueurs	**L = 10, 12, 14 et 16 m**
Données connues	**Exemple 2–6 pour L = 14 m**

À DÉTERMINER

Comment varie Q_u lorsque la longueur du pieu est de **10, 12 et 16 m** ? Expliquer la **raison** de cette variation.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 L = 10 m : pointe dans l'argile (Exemple 3) ; la couche d'argile ne s'étend que de 6 à 10 m

$$Q_p = 45.2\ ; \quad Q_s = 160.4 + 148.8 = 309.2\ ; \quad Q_u = \mathbf{354.4}\ \mathrm{kN}$$

2 L = 12 m : la pointe est exactement à la limite → **le pieu repose sur le sable inférieur** ; le sable 2 n'intervient pas encore dans le fût

$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 = 383.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{701.6}\ \mathrm{kN}$$

3 L = 16 m : le sable 2 est inclus dans le fût sur une épaisseur de quatre mètres (σ′ plafonnée : f constant)

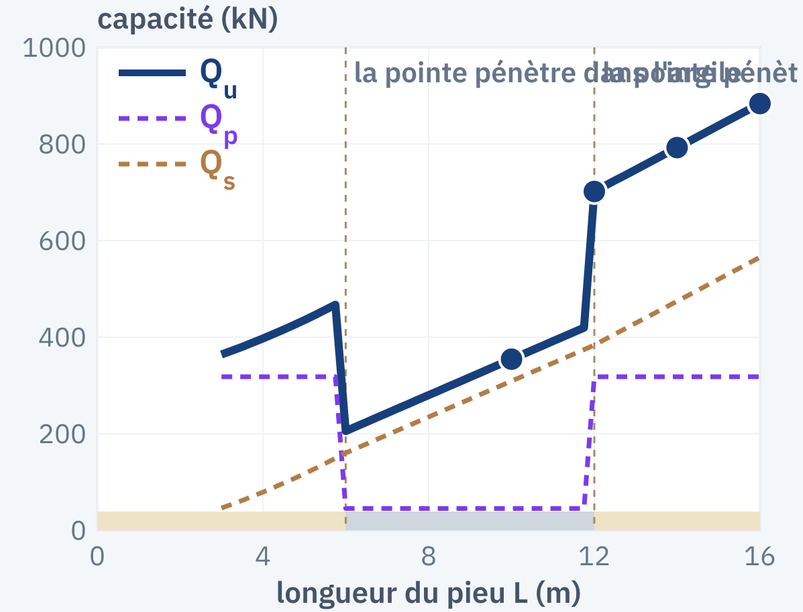
$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \mathrm{kN}$$

Solution (2/2)

SOLUTION

L (m)	Couche de pointe	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
10	argile	45	309	**354**	118
12	sable	318	384	**702**	234
14	sable	318	475	**793**	264
16	sable	318	566	**884**	295

10 m → 12 m : la capacité augmente de **347 kN** (98 %) : 273 kN proviennent de **la pénétration de la pointe dans le sable**. Au-delà de 12 m, chaque mètre n'apporte que ≈ 45 kN. Dans un profil stratifié, ce qui détermine la longueur du pieu, c'est **la couche dans laquelle s'arrête la pointe**.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Les règles du pieu foré s'appliquent aussi dans un profil mixte

THÉORIE

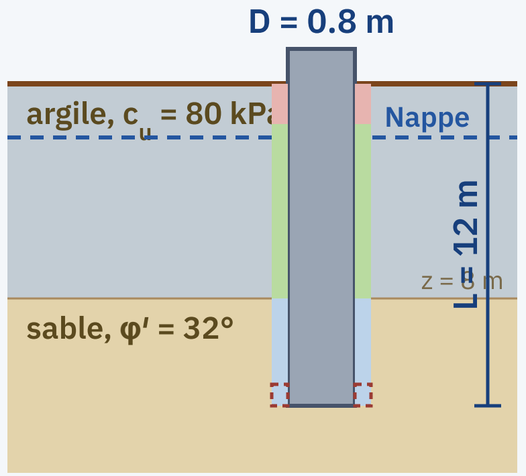
Un trou est foré, le béton est coulé : le sol n'est pas refoulé, l'argile se ramollit sur la paroi du forage, des débris peuvent s'accumuler sous la base du pieu. Dans un profil mixte, chaque moitié de la procédure est appliquée **à la couche à laquelle elle correspond** :

Couches d'argile (α) : $\alpha^* = 0.55$ ($c_u/p_a \leq 1.5$) ; sur les **1.5 m supérieurs et 1D inférieur**, $\alpha^* = 0$. La fenêtre appartient **uniquement à α** et n'est pas reportée sur λ et β.

Les couches de sable conservent leur propre règle K–δ ou de Coyle–Castello ; K est voisin de $\mathbf{K_0 = 1 - \sin\varphi'}$, le sol n'étant pas déplacé lors du forage.

Si la **pointe** du pieu se situe dans l'argile, Reese–O'Neill : $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$. c_{ub} est la moyenne de c_u sur $\mathbf{2D_b}$ sous la pointe ; si la zone s'étend sur plusieurs couches, la moyenne est pondérée par l'épaisseur.

Cette zone doit être **entièrement argileuse** : si elle s'étend dans le sable, le module s'arrête et demande de sélectionner Meyerhof ou Vesic.



Rouge : α* = 0 (1.5 m en partie supérieure). Vert : α* = 0.55. Bleu : K–δ dans le sable. Rouge en tirets : 1D inférieur, pas de fenêtre dans le sable.

Énoncé

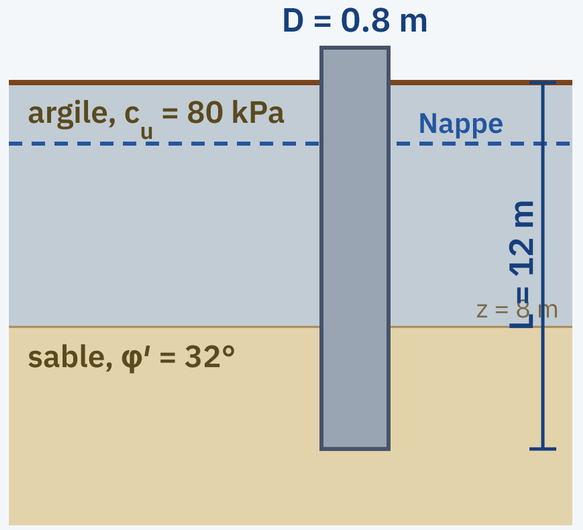
EXEMPLE

Données

Pieu	**pieu foré (par forage), section circulaire, D = 0.8 m, L = 12 m**
Argile (0–8 m)	$c_u = 80\ \text{kPa},\ \gamma = \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$
Sable (8–20 m)	$\varphi' = 32°,\ \gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \text{kN/m}^3$
Nappe phréatique	**à 2.0 m de profondeur**
Pour le sable	$K = K_0 = 0.47,\ \delta' = 0.75\varphi' = 24°$
Pointe	**Meyerhof ; FS = 3**

À DÉTERMINER

Déterminer la **résistance de pointe**, le **frottement latéral** et la **charge admissible** du pieu foré.



Solution (1/3)

SOLUTION

1 Couche d'argile : α* et fenêtre (les 1.5 m supérieurs et le 1D = 0.8 m inférieur sont écartés : 1.5 → 12 − 0.8 = 11.2 m)

$$\alpha^* = 0.55 \ (c_u/p_a = 0.8 \leq 1.5) \qquad L_{eff} = 8 - 1.5 = \mathbf{6.5}\ \mathrm{m}$$

2 Frottement et résistance unitaires

$$f = \alpha^* c_u = 0.55(80) = 44.0\ \mathrm{kPa} \qquad Q_{s1} = \pi(0.8)(44.0)(6.5) = \mathbf{718.8}\ \mathrm{kN}$$

Solution (2/3)

SOLUTION

3 Couche de sable (8–12 m) : sa propre règle K–δ ; L′ = min(15D; L) = min(12; 12) = 12 m, c'est-à-dire pas de plafonnement dans la couche

$$\sigma'(8) = 85.1\ ;\ \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{414.1}{4} = 103.5\ \text{kPa}$$

4 Frottement et résistance unitaires

$$f = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}' = 0.47 \tan 24^\circ (103.5) = 21.7\ \text{kPa}$$

$$Q_{s2} = \pi(0.8)(21.7)(4) = \mathbf{217.8}\ \text{kN}$$

Le segment **inférieur de 1D** (11.2 – 12 m) de la fenêtre α se trouve dans la couche de sable ; la fenêtre appartenant à α, le sable conserve son frottement sur ces 0.8 m également.

Solution (3/3)

SOLUTION

5 Pointe dans le sable → règle du sable (Meyerhof) ; pas de réduction supplémentaire pour le forage, le φ′ saisi est utilisé

$$q' = \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad N_q^* = 81$$

$$q' N_q^* = 9{,}874 > q_l = 2{,}531\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_p = 2{,}531\ \text{kPa}$$

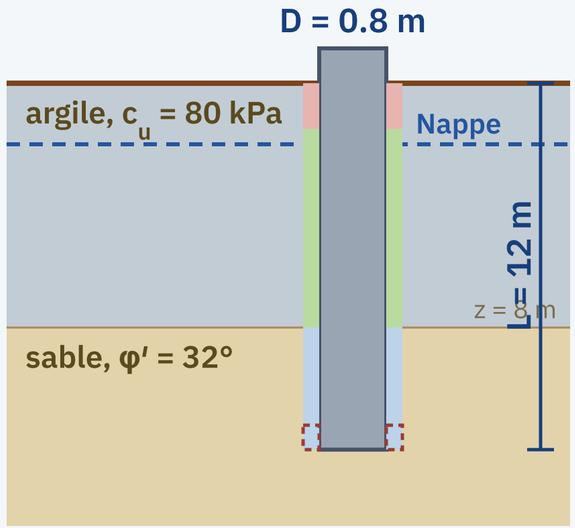
$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272}\ \text{kN}$$

6 Capacité portante totale et admissible

$$Q_s = 718.8 + 217.8 = \mathbf{936.6}\ \text{kN}$$

$$Q_u = 1{,}272 + 937 = 2{,}209\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{2{,}209}{3} = \mathbf{736}\ \text{kN}$$



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Énoncé

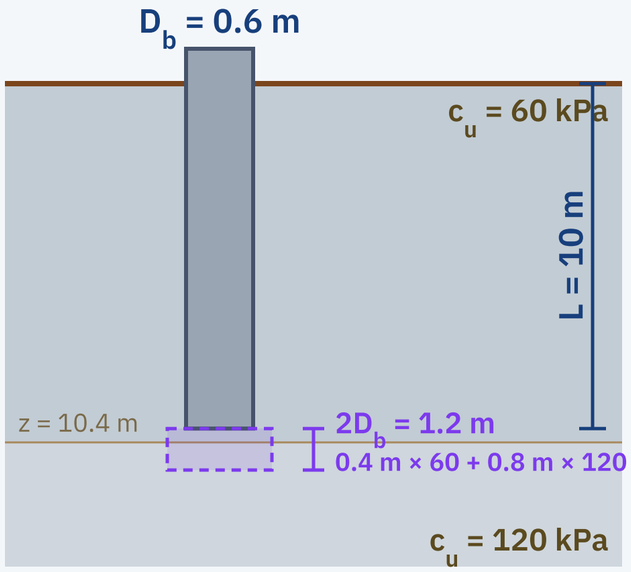
EXEMPLE

Données

Pieu	**pieu foré, $D_b = D = 0.6$ m, $L = 10$ m**
Argile 1 (0–10.4 m)	$c_u = 60$ kPa
Argile 2 (10.4–20 m)	$c_u = 120$ kPa
Base	**Reese–O'Neill ; $p_a = 100$ kPa**

À DÉTERMINER

Déterminer **c_{ub}** dans la zone de **$2D_b$** sous la base, ainsi que **q_p** et **Q_p**.



Solution

SOLUTION

1 Zone 10 → 10 + 2D$_b$ = 11.2 m ; limite à 10.4 m : moyenne pondérée par l'épaisseur

$$c_{ub} = \frac{60(0.4) + 120(0.8)}{1.2} = \mathbf{100}\ \mathrm{kPa}$$

2 La plus petite des trois valeurs

$$6c_{ub}\left(1 + 0.2\frac{L}{D_b}\right) = 2{,}600\ ; \quad 9c_{ub} = 900\ ; \quad 40p_a = 4\,000 \ \Rightarrow \ q_p = \mathbf{900}\ \mathrm{kPa}$$

3 Aire de la base et résistance de pointe

$$A_b = \frac{\pi(0.6)^2}{4} = 0.2827\ \mathrm{m}^2 \qquad Q_p = 0.2827(900) = \mathbf{254.5}\ \mathrm{kN}$$

Si seule la valeur en pointe c$_u$ = 60 kPa avait été retenue, on aurait obtenu Q$_p$ = 152.7 kN : l'argile plus raide située en dessous donne **67 %** de plus.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Coefficient de sécurité unique, mais l'incertitude est grande

THÉORIE

La capacité ultime est la somme des deux composantes ; la capacité admissible s'obtient en appliquant **un seul coefficient de sécurité à l'ensemble de cette somme** :

$$Q_{all} = \frac{Q_p + Q_s}{FS}$$

Pour un pieu isolé, **FS = 2.5 – 4** habituellement.

Extrémité supérieure : lorsque le profil est connu par **peu de sondages**. Un profil stratifié relève précisément de ce cas : entre les sondages, **les limites sont l'endroit le plus incertain**, et l'exemple ci-dessus a montré de combien un seul mètre de limite déplace la capacité.

LES DEUX PROBLÈMES EXIGENT DES CALCULS SÉPARÉS

Dans un profil stratifié, indépendamment du calcul de capacité :

- Une couche molle qui tasse et s'accroche au pieu sous forme de **frottement négatif**
- **Tassement** gouverné par la couche compressible sous la pointe

Règles selon la couche et la mise en œuvre

THÉORIE

Couche	Fût (Q_s)	Pointe (Q_p) : couche à la pointe
Sable	K–δ ($L' = 15D$, valeur unique pour tout le pieu) ou Coyle–Castello (K ♂ $\tan 0.8\varphi'$)	$q'N^*_q \le q_l$ (Meyerhof), Vesic, Coyle–Castello
Argile	$\alpha \cdot \lambda$ (par couche : extension) · β	$9c_u$ (Meyerhof) · $N^*_c(I_{rr})$ (Vesic)
Fore, argile	$\alpha^* = 0.55$; 1.5 m en tête et 1D en pied = 0	Reese–O'Neill : moyenne de $c_{ub} = 2D_b$
Fore, sable	$K \approx K_0 = 1 - \sin\varphi'$; la fenêtre n'est pas appliquée	$q'N^*_q$ (φ' saisi)

Chaque ligne est un choix distinct pour la couche concernée ; **dans un même pieu**, les règles du sable et de l'argile sont utilisées.

Synthèse

Points à retenir

La contrainte effective **s'accumule à travers les couches** et est continue ; le frottement unitaire, lui, **présente un saut aux limites**

La **pointe** est calculée uniquement selon la règle de la couche où elle se trouve ; une pointe située exactement à une limite de couches est considérée comme appuyée dans la couche **inférieure**

Sable : $f = K\sigma'\tan\delta'$ et **$L' = 15D$ s'applique à tout le pieu** · **Argile** : α, λ (une extension par couche), β

La résistance du **fût** est la somme de celles des couches : $Q_s = p\Sigma f_i \Delta z_i$; ce qui détermine la longueur, c'est la couche dans laquelle la pointe se termine

Pieu foré : la fenêtre α* ne concerne que l'argile/α ; si la base est dans l'argile, c_{ub} sur $2D_b$ (éventuellement plusieurs couches)

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, FS = 2.5 – 4 ; pour un ouvrage important, un **essai de chargement**

Références bibliographiques

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.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. Wiley — valeurs de α du tableau 2.

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.

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

O’Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 — coefficient α des pieux forés (drilled shafts), appliqué à un pieu foré.

Reese, L.C. and O’Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA — expression de la résistance de pointe d’un pieu foré dans l’argile.

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

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.

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, ouvrage qui réunit ces méthodes sous la forme suivie par cette page.

REMARQUE

Les figures de cette présentation sont tirées de la page de théorie de GeoTerva ; tous les exemples numériques ont été produits avec les règles de calcul et la bibliothèque propres au module, et le module donne les mêmes valeurs.

Calculs géotechniques en ligne

De la théorie à la pratique

Calculer le pieu de l'exemple de cette présentation pas à pas dans GeoTerva : les valeurs numériques 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