

## Exercice 6 - Capacité portante des pieux (chargement axial)

### 1 battage d'un pieu et critère d'arrêt de battage

Soit une fondation profonde constituée de pieux préfabriqués en béton armé, un pieu sous chaque colonne et une série sous un mur. Leurs caractéristiques sont les suivantes:

Caractéristique du pieu :

- Matériaux : Béton C25/30;  $E_c = 40'000 \text{ N/mm}^2$ ;
- Longueur  $L$  : 11 m;
- Diamètre : 50 cm;

Caractéristique de l'outillage :

- Poids du mouton  $P_D$ : 30 kN;
- Poids du casque  $P_C$ : 3 kN;
- Hauteur de chute  $h$ : 1.5 m;

1. Déterminer à l'aide de la formule de Crandall le critère d'arrêt de battage d'un pieu pour une charge admissible de 800kN.

On rappelle que le raccourcissement élastique du pieu sous une charge dynamique peut être estimé à partir de l'équation générale en considérant que l'énergie de battage se transforme en énergie due au choc et en déformation élastique.

2. Quelle est le critère d'arrêt de battage si la formule des Hollandais est appliquée ?

### 2 Capacité portante des pieux et effet de groupe

On envisage de fonder un pile de pont dans un fond de vallée. La nappe est au niveau du sol. La lithologie est donnée sur la figure 1 et consiste de haut en bas, d'une couche de limons argileux (alluvions récentes), d'une couche de graves sableuses, et d'un substratum marneux de forte épaisseur ( $> 100\text{m}$ ). Les propriétés du terrain ont été caractérisées par un profil pressiométrique (pressiomètre Ménard) dont les résultats sont donnés sur la figure 1. On rappelle que l'on dénote la pression limite nette  $p_l = p_L - p_o$ , où  $p_L$  est la pression limite mesurée au pressiomètre et  $p_o$  la contrainte horizontale en place (ou la valeur mesurée au pressiomètre comme marquant le début de la phase élastique).  $p_L$  est la pression limite de rupture mesurée lors de l'essai. Un certain nombre de corrélations reliant les résultats d'un essai pressiométrique aux paramètres mécanique des sols existent ainsi que des formules pour calculer les capacités portantes de pieux (celles-ci sont données à la fin de l'énoncé). La descente de charge de la pile du pont est bien représentée (en première analyse) par 2 actions verticales: i) le poids propre de l'ouvrage de valeur  $G = 72000\text{kN}$ , ii) des charges d'exploitation de valeurs  $Q = 8000\text{kN}$ .

La pile est fondée sur un groupe de 8 pieux forés à la boue de diamètre 1m séparés par une distance  $s$  (valeur que l'on va estimer).

1. Déterminer la profondeur de ces pieux pour satisfaire la sécurité vis à vis de l'état limite ultime (Type 2 externe - capacité portante) à long terme en utilisant la méthode pressiométrique. Précisez également le pourcentage repris par frottement latéral et par la résistance en pointe. On négligera ici toute interférence entre les pieux (pas d'effet de groupe).

$$R = R_b + R_s$$

$$R_b = A_p k_p p_l \quad \text{terme de pointe}$$

$$R_s = U_p \sum h_i q_{si} \quad \text{terme de frottement latéral}$$

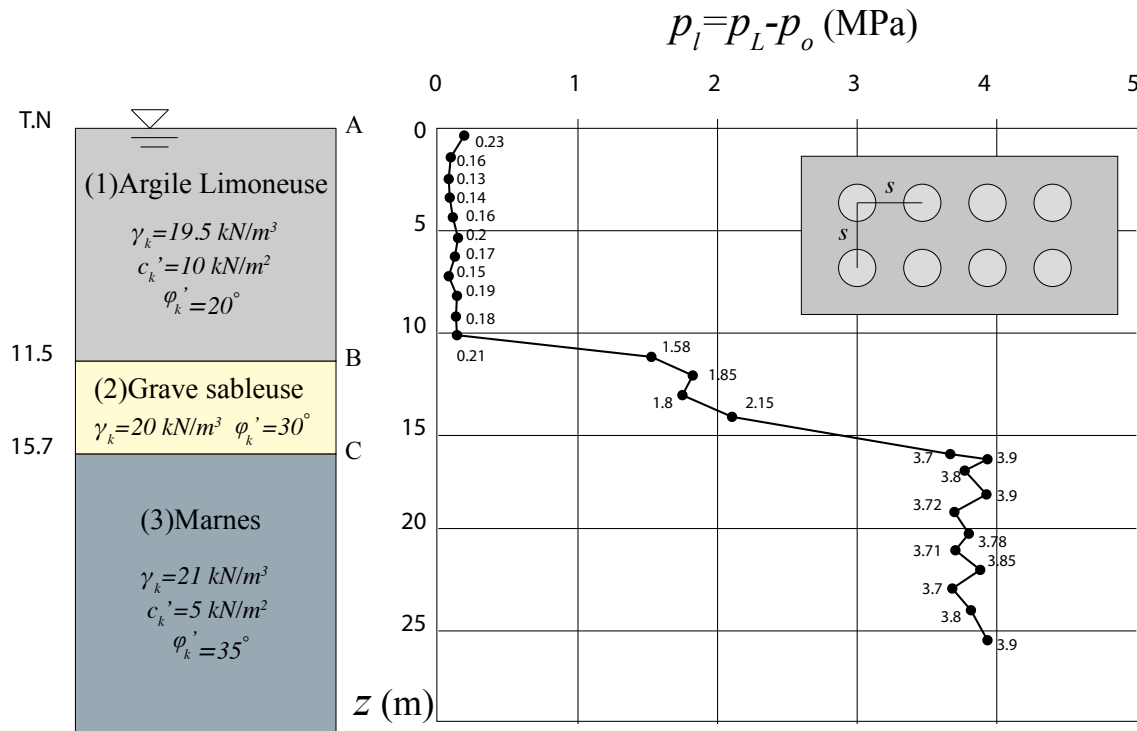


Figure 1: Profil préssiométrique et lithologie (profondeur en mètre). La moyenne des valeurs du module préssiométrique est donnée pour chaque couches.

où  $A_p$ ,  $U_p$  représentent l'aire de la section de pointe et le périmètre de pieu. Le facteur de portance  $k_p$  est donné par le tableau 2. Et le frottement latéral unitaire limite  $q_s$  est donné par les courbes de la figure 2.  $h$  est la hauteur de couche.

2. Refaire la question précédente en utilisant la méthode suggérée par le Document Technique Unifié (DTU)
3. Re-estimer la capacité portante et le pourcentage repris par la pointe en utilisant la méthode de Lang& Huder.
4. On essaie maintenant de prendre en compte l'effet de groupe. En premier lieu, on suppose une rupture de bloc dans les argiles. Par le raisonnement de Terzaghi, on calculera la distance  $s$  entre les pieux afin d'avoir un coefficient d'efficacité du groupe de pieu de 100%. Dans un deuxième temps, avec la valeur de  $s$  précédemment obtenue, on recalculera la valeur du coefficient d'efficacité en utilisant la formule de Converse-Labarre.

**Tableau 1 - Définition des catégories conventionnelles de sols [6]**

Classe de sol			Pressiomètre $p_t$ (MPa)	Pénétromètre $q_c$ (MPa)
Argiles. Limons	A	Argiles et limons mous	< 0,7	< 3,0
	B	Argiles et limons fermes	1,2 à 2,0	3,0 à 6,0
	C	Argiles très fermes à dures	> 2,5	> 6,0
Sables. Graves	A	Lâches	< 0,5	< 5
	B	Moyennement compacts	1,0 à 2,0	8,0 à 15,0
	C	Compacts	> 2,5	> 20,0
Craies	A	Molles	< 0,7	< 5
	B	Altérées	1,0 à 2,5	> 5,0
	C	Compactes	> 3,0	
Marnes. Marno-calcaires	A	Tendres	1,5 à 4,0	
	B	Compacts	> 4,5	
Roches (1) L'appellation de roches altérées ou fragmentées peut regrouper des matériaux calcaires, schisteux ou d'origine granitique. S'il est difficile parfois de fixer des limites précises avec les sols meubles qui constituent leur phase finale d'évolution, on réservera toutefois cette classification aux matériaux qui présentent des modules pressiométriques supérieurs à 50 à 80 MPa.	A	Altérées	2,5 à 4,0	
	B	Fragmentées	> 4,5	

Extrait de : R. FRANK, *Fondations profondes*, réf. C248, Techniques de l'Ingénieur (1995).



Copyright © 2018 | Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

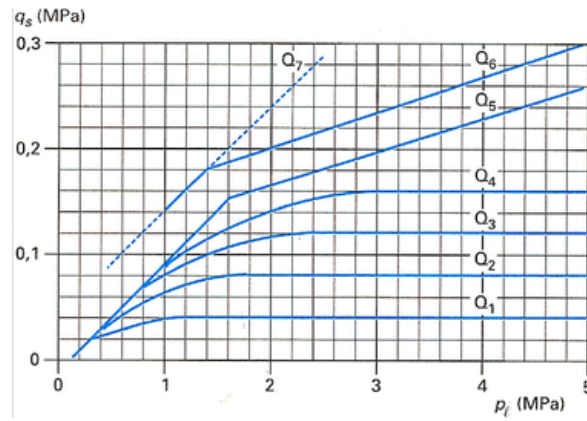


Figure 2: Frottement latéral unitaire limite le long du fût du pieu

**Tableau 2 - Valeurs du facteur de portance  $k_p$  [6]**

Nature des terrains		Éléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Éléments mis en œuvre avec refoulement du sol
Argiles. Limos	A	1,1	1,4
	B	1,2	1,5
	C	1,3	1,6
Sables. Graves	A	1,0	4,2
	B	1,1	3,7
	C	1,2	3,2
Craies	A	1,1	1,6
	B	1,4	2,2
	C	1,8	2,6
Marnes. Marno-calcaires		1,8	2,6
Roches altérées (1) La valeur de $k_p$ pour ces formations est prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s'apparente le plus. Le calcul proposé ici n'affranchit, en aucun cas, d'avoir recours aux méthodes spécifiques de la mécanique des roches.		1,1 à 1,8	1,8 à 3,2

Extrait de : R. FRANK, *Fondations profondes*, réf. C248, Techniques de l'Ingénieur (1995).



Copyright © 2018 | Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

**Tableau 3 - Choix des courbes pour le calcul du frottement latéral unitaire  $q_s$  (principaux types de pieux utilisés en ouvrage d'art) [6]**

Type de pieu	Nature du sol											
	Argiles. Limons			Sables. Graves			Craies			Marnes		Roches
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	
Foré simple	Q <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub> , Q <sub>2</sub> (1) Réalésage et rainurage en fin de forage.	Q <sub>2</sub> , Q <sub>3</sub> [1]				Q <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub> , Q <sub>5</sub> [1]	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub> , Q <sub>5</sub> [1]	Q <sub>6</sub>
Foré à la boue	Q <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub> , Q <sub>2</sub> [1]		Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub> , Q <sub>1</sub> (2) Pieux de grande longueur (supérieure à 30 m).	Q <sub>3</sub> , Q <sub>2</sub> [2]	Q <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub> , Q <sub>5</sub> [1]	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub> , Q <sub>5</sub> [1]	Q <sub>6</sub>
Foré tubé (tube récupéré)	Q <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub> , Q <sub>2</sub> (3) Forage à sec, tube non louvoyé.		Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub> , Q <sub>1</sub> [2]	Q <sub>3</sub> , Q <sub>2</sub> [2]	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub> , Q <sub>4</sub> [3]	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	
Foré tubé (tube perdu)	Q <sub>1</sub>			Q <sub>1</sub>		Q <sub>2</sub>	(4) Dans le cas des craies, le frottement latéral peut être très faible pour certains types de pieux. Il convient d'effectuer une étude spécifique dans chaque cas.			Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	
Puits (5) Sans tubage ni virole foncés perdus (parois rugueuses).	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>				Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>
Métal battu fermé	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>		Q <sub>2</sub>		Q <sub>3</sub>	[4]			Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub>
Battu préfabriqué béton	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>		Q <sub>3</sub>			[4]			Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub>
Battu moulé	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>		Q <sub>2</sub>		Q <sub>3</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	
Battu enrobé	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>		Q <sub>3</sub>		Q <sub>4</sub>	[4]			Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	
Injecté basse pression	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>		Q <sub>3</sub>			Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>		
Injecté haute pression (6) Injection sélective et répétitive à faible débit.		Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>5</sub>		Q <sub>6</sub>		Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>6</sub>		Q <sub>7</sub> (7) Injection sélective et répétitive à faible débit et traitement préalable des massifs fissurés ou fracturés avec obturation des cavités.

Extrait de : R. FRANK, *Fondations profondes*, réf. C248, Techniques de l'Ingénieur (1995).



Copyright © 2018 | Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

## Correction Exercice #6

### Capacité portante des pieux (chargement axial)

#### 1 Battage d'un pieu et critère d'arrêt de battage

Détermination du critère d'arrêt de battage Caractéristique du pieu

**Matériau: Béton C25/30**

$$E_c = 4.00 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3$$

$$L = 11\text{m}$$

$$D = 0.5\text{m}$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} D^2 = 0.2\text{m}^2$$

$$P_p = \gamma_b A_p L = 55\text{kN}$$

**Caractéristique de l'outillage**

$$P_D = 30\text{kN}$$

$$P_C = 3\text{kN}$$

$$h = 1.5\text{m}$$

**Charge admissible**  $Q_a = 800\text{kN}$

**1. Critère de refus selon la formule de Crandall** On calcule le raccourcissement élastique  $s_0$  à partir de l'équation générale en mettant  $s = 0$ ,

$$P_D h = P_D h \frac{P_P + P_C}{P_D + P_P + P_C} + 0.5 Q_d^2 \frac{L}{E_c A_p}$$

$$Q_d = \sqrt{\frac{2 P_D^2 h}{P_D + P_P + P_C} \frac{E_c A_p}{L}}$$

On obtient donc le raccourcissement élastique du pieu:

$$s_0 = \frac{Q_d L}{A_p E_c} = \sqrt{\frac{L}{A_p E_c} \frac{2 h P_D^2}{P_D + P_P + P_C}} = 0.65\text{cm}$$

D'autre part

$$s = \frac{1}{n Q_a} \frac{h P_D^2}{P_D + P_P + P_C} - \frac{s_0}{2}$$

Pour  $n = 4$  (valeur de conversion capacité portante statique - dynamique pour la méthode de Crandall); on obtient

$$s = 1.54 \text{ mm/coup}$$

$$\text{Nb coups}/10\text{cm} = 65$$

#### 2. Critère de refus selon la formule des Hollandais

$$s = \frac{1}{n Q_a} \frac{h P_D^2}{P_D + P_P + P_C}$$

Pour  $n = 6$  valeur de conversion capacité portante statique - dynamique pour la méthode des Hollandais); on a

$$s = 3.2 \text{ mm/coup}$$

$$\text{Nb coups}/10\text{cm} = 31$$

tue entre les masses statiques et dynamiques du système pieu + casque:

## 2 Capacité portante des pieux et effet de groupe

### 2.1 1. Méthode pressionmétique

Les actions verticales sur chaque pieu:

$$p = \frac{G + Q}{8} = 10000 \text{ kN}$$

Section du pieu:

$$A_p = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4}$$

Périmètre du pieu:

$$U_p = \pi d = \pi$$

$$R = R_s + R_b$$

**Terme de frottement latéral** On doit le calculer dans les 3 couches: argiles limoneuses, sables, marnes. Tout d'abord, dans les argiles limoneuses, on doit prendre la courbe Q1 du diagramme pour le frottement latéral. On voit que au vu des faibles valeurs de  $p_l$  dans le limon, le terme de frottement y est nul.

$$R_{s1} = 0$$

Dans les graves sableuses,

$$p_{l2} = \frac{1.58 + 1.85 + 1.8 + 2.15}{4} = 1.845 \text{ MPa}$$

on prend la courbe Q2. En faisant une moyenne des valeurs pressiométriques, on obtient sur la hauteur de cette couche, un frottement total latéral  $R_{s2}$  ci-dessous.

$$q_{s2} = 0.08 \text{ MPa}$$

$$R_{s2} = U_p h_2 q_{s2} = 1055.58 \text{ kN}$$

$$R_{s1} + R_{s2} < p$$

Donc, Le pieu va être fiché dans les marnes, l'inconnue est sa longueur dans les marnes que l'on nomme ici  $t$ .

$$p_{l3} = \frac{3.7 + 3.9 + 3.8 + 3.9 + 3.72 + 3.78 + 3.71 + 3.85 + 3.7 + 3.8 + 3.9}{11} = 3.796 \text{ MPa}$$

On utilise la courbe Q3 pour la corrélation du frottement latéral dans les marnes.

$$q_{s3} = 0.12 \text{ MPa}$$

$$R_{s3} = U_p t q_{s3} = 376.991 t \quad \text{kN}$$

**Terme de pointe**

$$k_p = 1.8$$

$$R_b = k_p p_{l3} A_p = 5366.98 \text{ kN}$$

On a

$$p = R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_b$$

$$t = 9.489 \text{ m}$$

On a une longueur totale du pieu de 25.189 m.

On calcule maintenant le pourcentage repris en pointe

$$\frac{R_b}{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_b} = 53.67\%$$

et en frottement latéral

$$\frac{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3}}{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_b} = 46.33\%$$

Le pieu travaille donc autant par frottement que par résistance de pointe. Ce n'est pas un pieu colonne. Il a une longueur certaine dans les marnes, mobilisant le frottement latéral dans ces marnes.

## 2.2 Méthode suggérée par le DTU

**Caractéristiques du sol** Pour la couche de limons argileux

$$\gamma_1 = 19.5 \text{ kN/m}^3, \quad \phi'_1 = 20, \quad c'_1 = 10 \text{ kN/m}^2, \quad h_1 = 11.5 \text{ m}$$

Pour la couche de grave sableuse

$$\gamma_2 = 20 \text{ kN/m}^3, \quad \phi'_2 = 30, \quad c'_2 = 0 \text{ kN/m}^2, \quad h_2 = 15.7 - 11.5 = 4.2 \text{ m}$$

Pour la couche de marnes

$$\gamma_3 = 21 \text{ kN/m}^3, \phi'_3 = 35, \quad c'_3 = 5 \text{ kN/m}^2$$

**Etat des contraintes**

$$\sigma_B = \gamma_1 h_1 = 224.25 \text{ MPa}, \quad \sigma'_B = \sigma_B - \gamma_w h_1 = 109.25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_C = \gamma_2 h_2 + \sigma_B = 308.25 \text{ MPa}, \quad \sigma'_C = \sigma_C - \gamma_w (h_1 + h_2) = 151.25 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_{1v} = \frac{\sigma'_B}{2} = 54.625 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_{2v} = \frac{\sigma'_B + \sigma'_C}{2} = 130.25 \text{ MPa}$$

**Terme de frottement latéral** Pour la couche de limons argileux

$$K_1 = 1 - \sin \phi'_1 = 0.658$$

$$q_{s1} = K_1 \sigma'_{1v} \tan \phi'_1 = 13.08 \text{ kN/m}^2$$

$$R_{s1} = q_{s1} U_p h_1 = 472.626 \text{ kN}$$

Pour la couche de grave sableuse

$$K_2 = 1 - \sin \phi'_2 = 0.5$$

$$q_{s2} = K_2 \sigma'_{2v} \tan \phi'_2 = 37.599 \text{ kN/m}^2$$

$$R_{s2} = q_{s2} U_p h_2 = 496.119 \text{ kN}$$

$$R_{s1} + R_{s2} < p$$

Le pieu va être fiché dans les marnes. On suppose la longueur totale d'un pieu est  $L$ .

Pour la couche de marnes

$$K_3 = 1 - \sin \phi'_3 = 0.426$$

$$\sigma'_p = \gamma_3 (L - h_1 - h_2) + \sigma_C - \gamma_w L$$

$$\sigma'_{3v} = \frac{\sigma'_C + \sigma'_p}{2}$$

$$q_{s3} = K_3 \sigma'_{3v} \tan \phi'_3$$

$$R_{s3} = q_{s3} U_p (L - h_1 - h_2)$$

**Terme de pointe**

$$N_{qmax} = 10^{3.04 \tan \phi'_3} = 134.472$$

$$N_c = (N_{qmax} - 1) \cot \phi'_3 = 190.617$$

$$\lambda = 1 + 0.3 \frac{d}{d} = 1.3$$

$$q_p = 50 N_{qmax} + \lambda c'_3 N_c = 7962.6 \text{ kN/m}^2$$

$$R_b = q_p A_p = 6253.81 \text{ kN}$$

On a

$$p = R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_b$$

$$L = 28.92 \text{ m}$$

On a une longueur totale du pieu de 28.92 m.

On calcule maintenant le pourcentage repris en pointe

$$\frac{R_b}{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_b} = 62.54\%$$

et en frottement latéral

$$\frac{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3}}{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_b} = 37.46\%$$

**2.3 Méthode Lang & Huder**

**Terme de frottement latéral** Pour la couche de limons argileux

$$K_1 \tan \delta_1 = 0.4 \quad \text{pieux foré}$$

$$q_{s1} = c'_1 + K_1 \tan \delta_1 \sigma'_{1v} = 31.85 \text{ kN/m}^2$$

$$R_{s1} = q_{s1} U_p h_1 = 1150.69 \text{ kN}$$

Pour la couche de grave sableuse

$$K_2 \tan \delta_2 = 0.4 \quad \text{pieux foré}$$

$$q_{s2} = c'_2 + K_2 \tan \delta_2 \sigma'_{2v} = 52.1 \text{ kN/m}^2$$

$$R_{s2} = q_{s2} U_p h_2 = 8161.87 \text{ kN}$$

$$R_{s1} + R_{s2} < p$$

Le pieu va être fiché dans les marnes.

**Terme de pointe** On suppose le pied du pieu se situe dans marnes. La longueur du pieux est de 15.7m, et on vérifie la capacité portante.

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'_3} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'_3}{2} \right) = 33.296$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi'_3 = 46.124$$

$$\chi = 2.9 \left( \frac{L}{d} = 15.7 \right)$$

$$q_p = (c'_3 N_c + \sigma'_C N_q) \chi = 15273.3 \text{ kN/m}^2$$

$$R_b = q_p A_p = 11995.6 \text{ kN}$$

On a

$$p < R_{s1} + R_{s2} + R_b$$

$$L = 15.7 \text{ m}$$

On a une longueur totale du pieu de 15.7 m.

On peut calculer le ratio entre le terme de pointe et la résistance totale maximale de ce pieu.

$$\frac{R_b}{R_b + R_{s1} + R_{s2}} = 86.71\%$$

et en frottement latéral

$$\frac{R_{s1} + R_{s2}}{R_b + R_{s1} + R_{s2}} = 13.29\%$$

## 2.4 Effet de groupe

Pour une rupture de bloc dans les argiles (à court terme), on a le coefficient d'efficacité du groupe:

$$C_e = \frac{2s(m+n-2)}{\pi dmn}$$

(On notera que l'on a négligé le terme de pointe dans la formule précédente).

Avec  $m = 4, n = 2$ , étant donné que l'on veut  $C_e = 1$ , on obtient

$$s = \pi \quad \text{m}$$

Pour la même valeur de  $s$ , la formule de Converse-Labare donne:

$$C_e = 1 - 2 \arctan \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{\pi mn} = 75.48\%$$