

# **Chapitre II: les fondations**

# Introduction

Un ouvrage, quelque soit sa forme et sa destination, prend appui sur un sol d'assise et lui transmet un ensemble de charges. Les éléments qui jouent le rôle d'interface entre la structure porteuse et le terrain constituent **les fondations.**

Adaptées à la fois à l'ouvrage et à la nature du sol, elles prennent des formes diverses de manière à assurer une bonne répartition des contraintes. On distingue **les différents types de fondation** suivant:

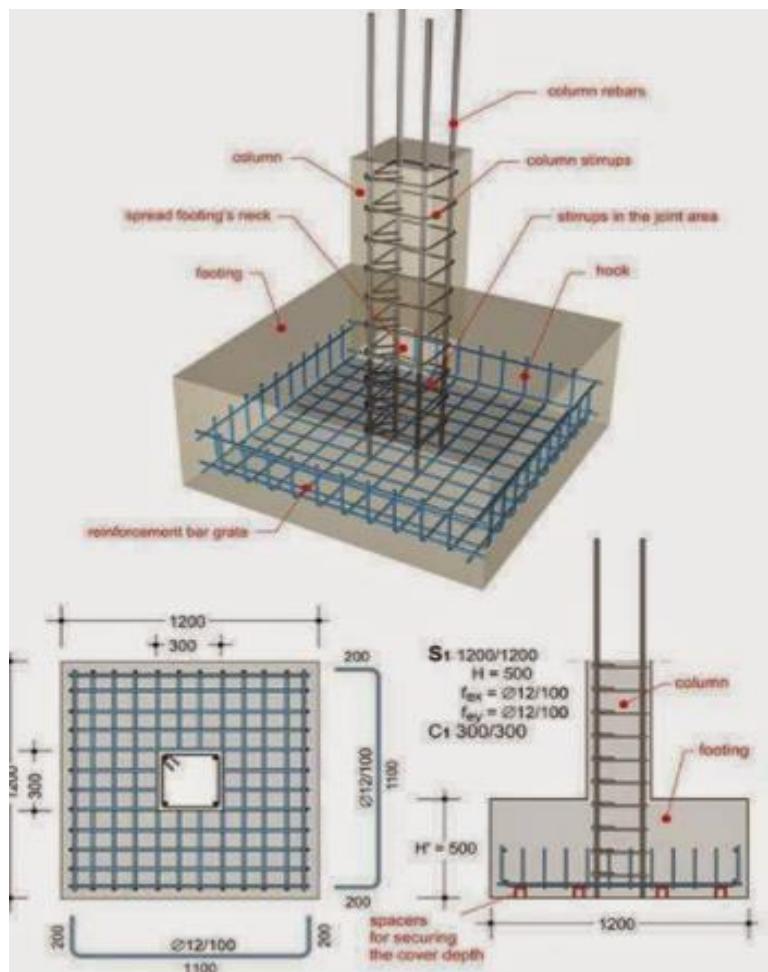
## 1. Fondations superficielles

- Semelles continues sous mur.
- Semelles isolées sous piliers.
- Plots et longrines.

## 2. Fondation par radier général.

## 3. Fondations profondes.

- Sur puits.
- Sur pieux.



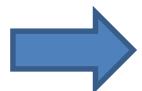
Semelle isolée



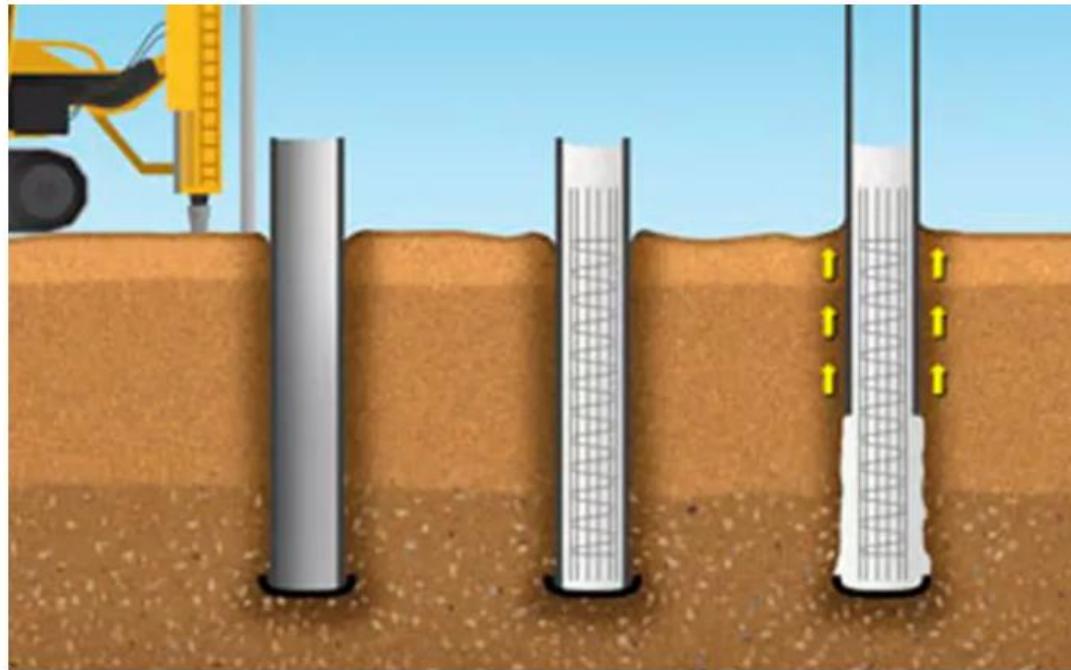
Semelle filante



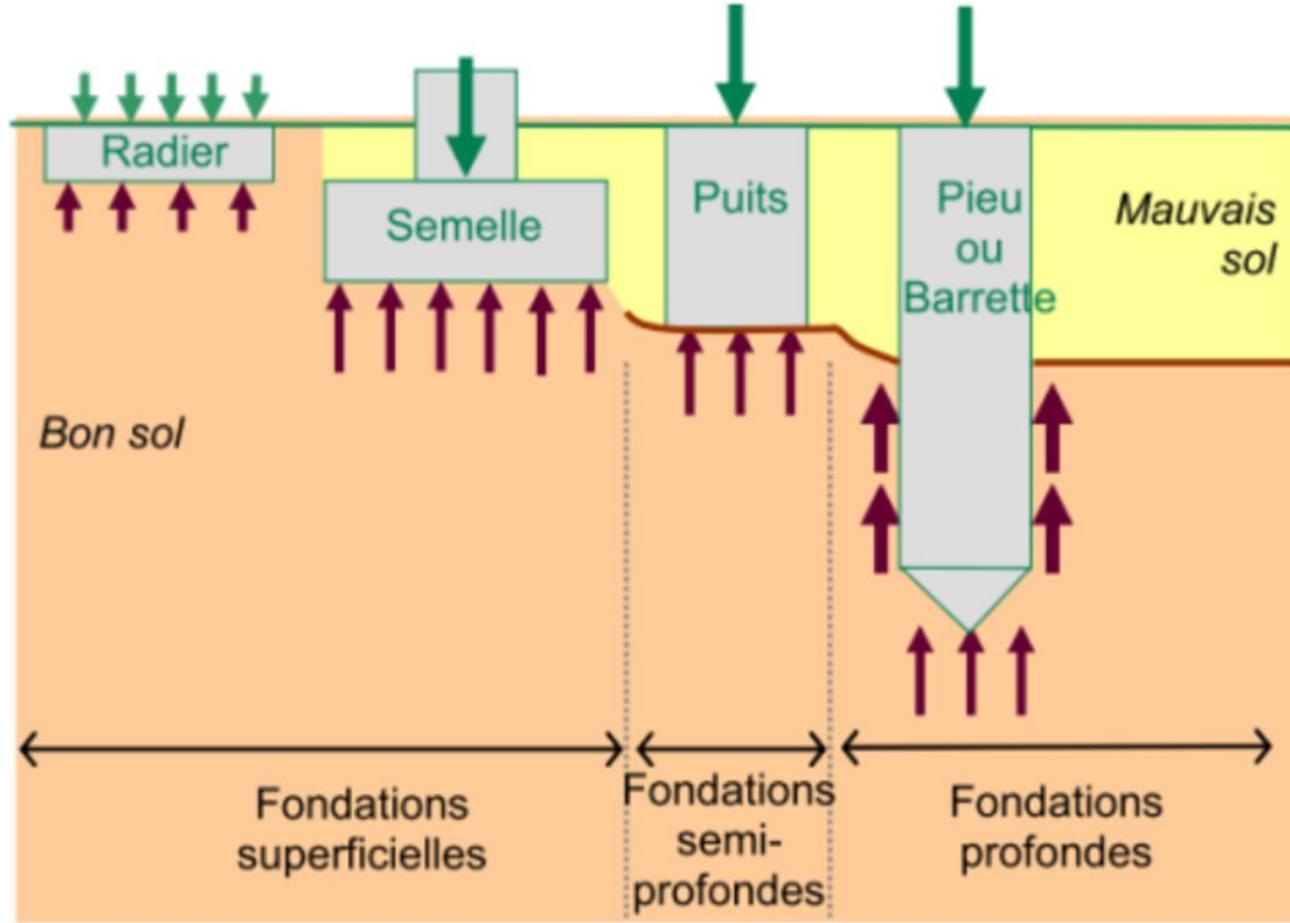
Radier



Radier avec poteaux



Pieux



La technique du Radier est appliquée lorsque le sol présente une faible résistance sur une grande surface et sur une grande profondeur

Si on détecte un bon sol à une profondeur inférieure à 10 mètres, on mettra alors en place des puits

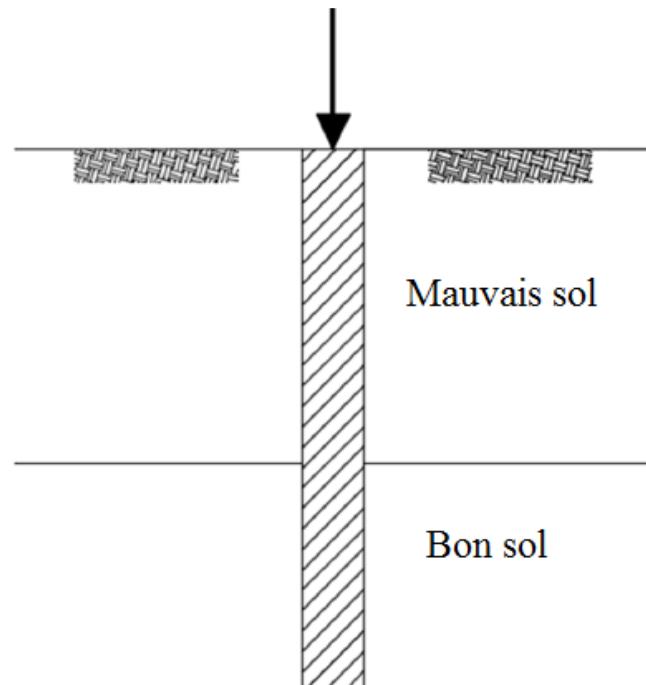
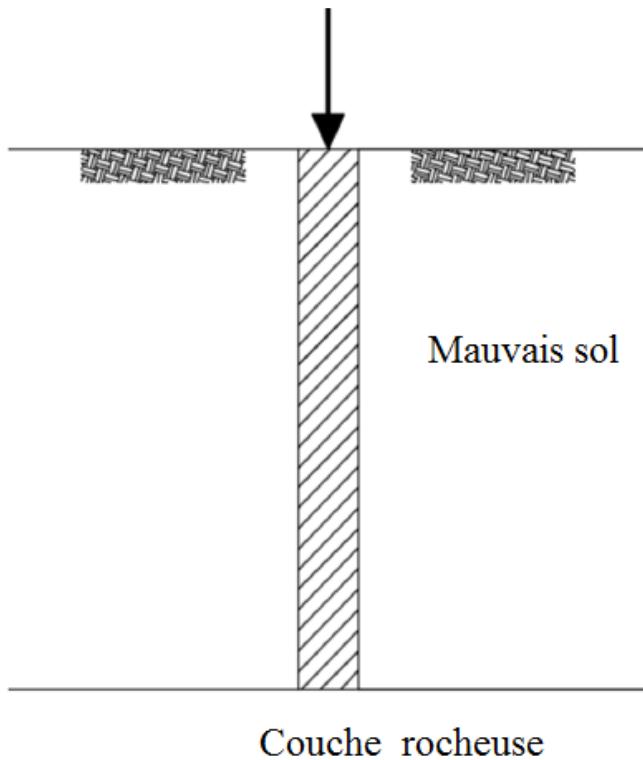
Lorsque le sol est de mauvaise qualité jusqu'à une certaine profondeur supérieure à 10 m, on préconise alors la mise en place de fondations profondes via des sortes de poutres verticales enterrées.

## Fondations profondes

Les pieux sont des éléments structurels fabriqués en acier, en béton ou en bois. Ils sont utilisés pour construire des fondations sur pieux (classées comme fondations profondes) qui coûtent plus cher que les fondations superficielles.

Malgré leur coût, l'utilisation de pieux est souvent nécessaire pour assurer la sécurité structurale

La figure suivante clarifie la fonction de la fondation sur pieux



# Capacité des pieux

La capacité de charge ultime du pieu peut être exprimée comme suit :

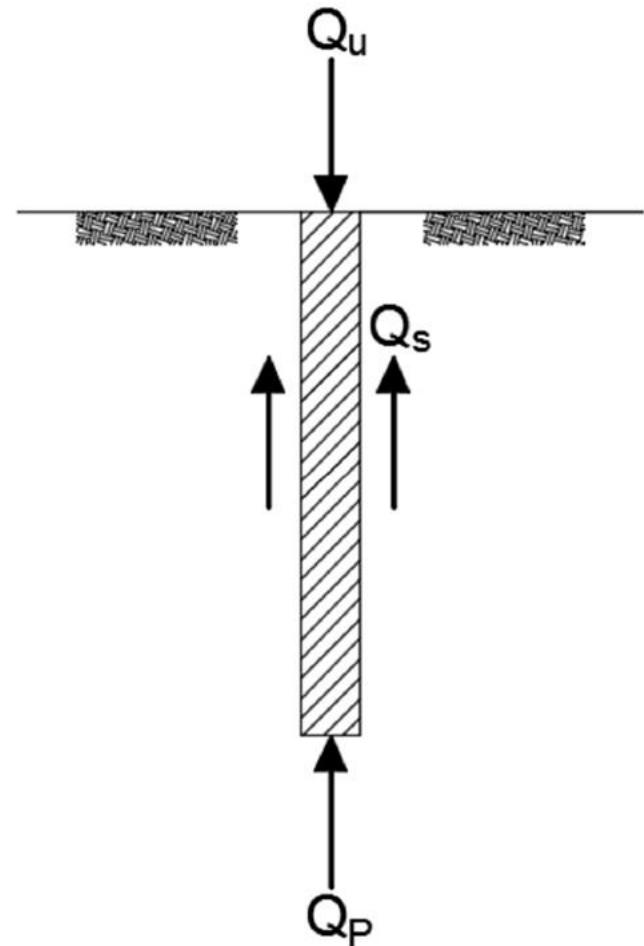
$$Q_u = Q_p + Q_s$$

Lorsque le pieu pénètre dans un sol faible pour se reposer sur un sol solide (la roche), le pieu sera soutenu par la roche ou le sol solide à partir de l'extrémité du pieu (point d'extrémité du pieu).

**$Q_p$ :** Charge supportée au point d'extrémité du pieu

De plus, lorsque le pieu pénètre dans le sol, il faut tenir compte de la résistance au cisaillement entre le sol et le pieu en  $Q_s$  où:

**$Q_s$ :** Charge portée par le frottement développé sur les côtés du pieu (causé par la résistance au cisaillement entre le sol et le pieu)

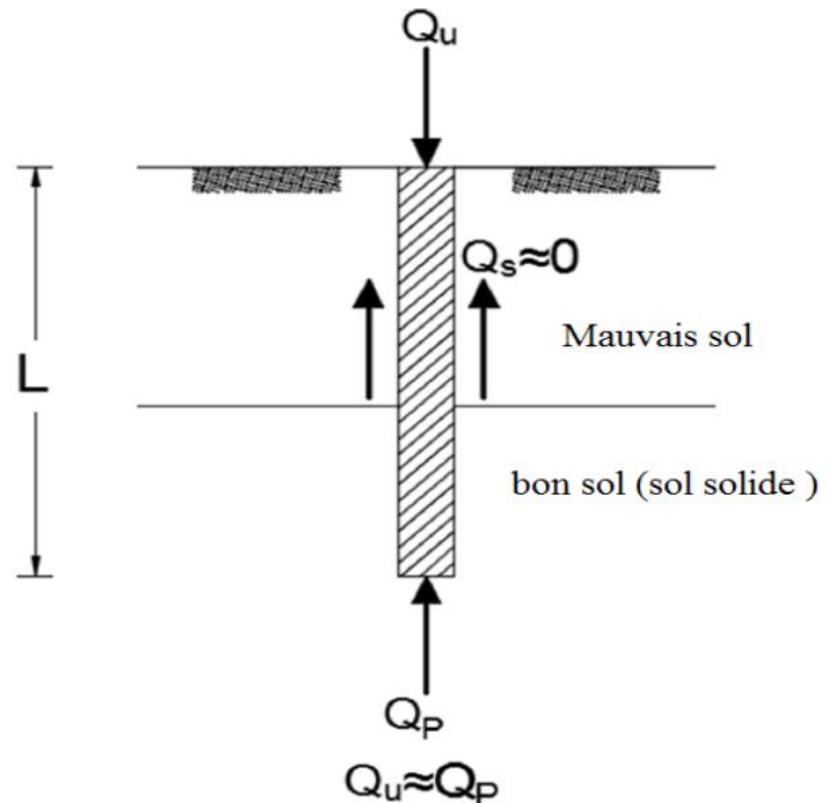
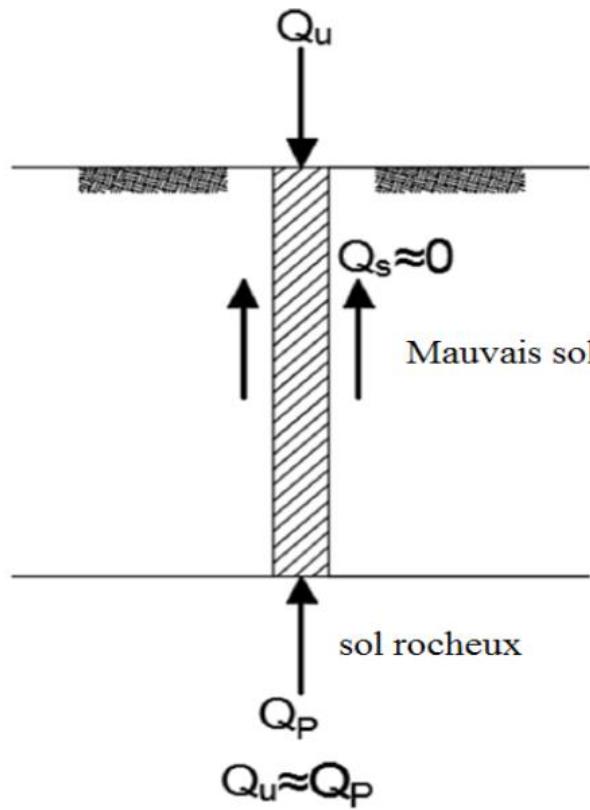


## **Types de pieux ( suivant le mode de fonctionnement)**

Les pieux agissent sur le sol soit par :

- **Effet de pointe** : reposant sur une couche très dure, ici le pieu résistera à la totalité de la charge en fonction de sa charge au point final  $Q_P$  et la valeur de  $\bar{Q}_S$  (résistance de frottement) est très faible dans ce cas, donc :

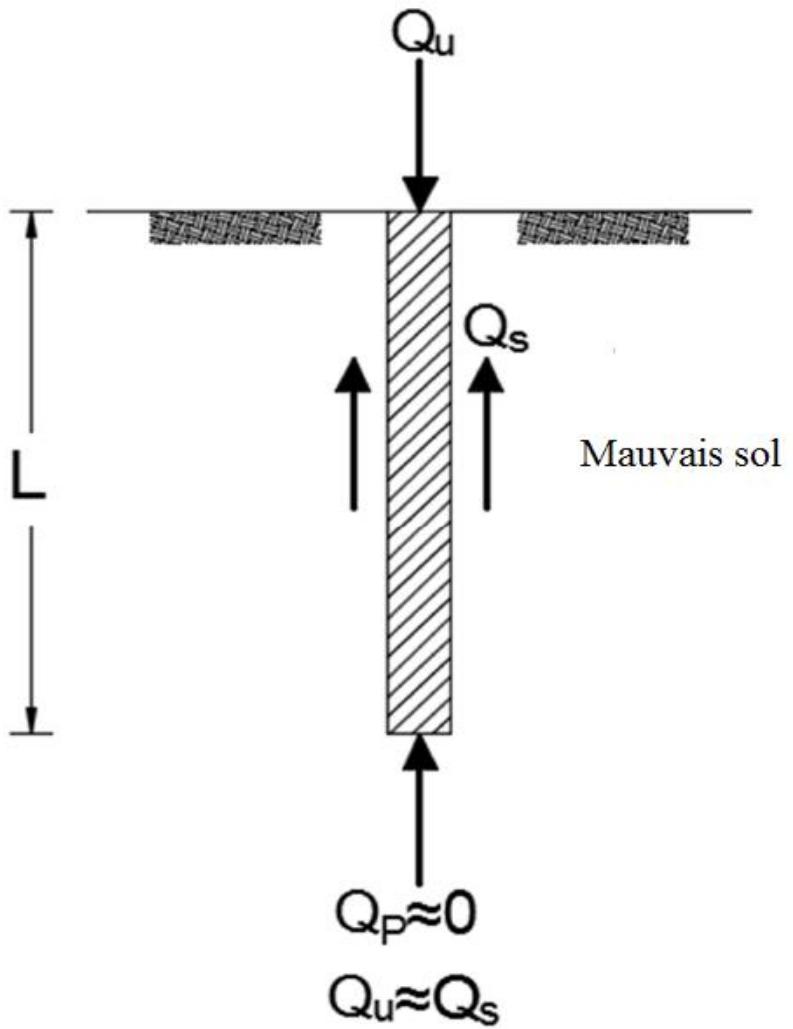
$$Q_u = Q_P + \bar{Q}_S \quad \bar{Q}_S \approx 0.0 \rightarrow Q_u = Q_P$$



Effet de pointe

□ **Effet de frottement latéral** (Pieux flottants) : transmettent essentiellement leurs charges par frottement latéral et ne reposant pas sur une couche résistante (c'est-à-dire quand aucune couche forte ou roche n'est présente à une profondeur raisonnable sur un site, les pieux porteurs deviennent très longs pour atteindre le bon sol, les pieux sont enfouis dans le sol plus mou (plus faible) à une profondeur spécifiée, et ici la charge portante ponctuelle  $Q_P$  est très faible et peut être considérée comme nulle.

$$Q_u = Q_P + Q_s \quad Q_P \approx 0.0 \rightarrow Q_u = Q_s$$



Effet de frottement latéral

## □ Effet de pointe et frottement latéral

En pratique, nous supposons que le pieu résiste aux charges appliquées par l'effet de pointe et sa résistance au frottement pour estimer la charge ultime que le pieu peut supporter.

$$Q_u = Q_P + Q_s$$

Dans les sections suivantes, nous allons apprendre comment calculer la valeur de  $Q_P$  et  $Q_S$  et donc  $Q_u$  pour le sable et l'argile et C – φ sol

## **Calcul de la résistante en pointe $Q_P$**

Nous utiliserons la méthode de Meyerhof pour calculer la valeur de  $Q_P$  pour le sable et l'argile.

### **□ Calcul de la valeur de $Q_P$ pour le sable:**

$$Q_P = A_P \times q_P \leq Q_L$$

$A_P$ : Surface à la pointe du pieu ( $m^2$ )

$$q_P = q' \times N_q^*$$

$q'$ : Contrainte verticale effective au niveau de l'extrémité du pieu ( $q' = \gamma \cdot L$ )

$N_q^*$ : Facteur de capacité de charge (dépend uniquement de la valeur  $\phi$ )

$Q_L$ :valeur limite de la résistante en pointe

$$Q_L = 0.5 \times A_P \times p_a \times N_q^* \times \tan\phi$$

$p_a$ :pression atmosphérique= 100 kN/m<sup>2</sup>

Donc, pour un sol sableux, la valeur de  $Q_P$  est donnée :

$$Q_P = A_P \times q' \times N_q^* \leq 0.5 \times A_P \times p_a \times N_q^* \times \tan\phi$$

**NB:** Le profil de sol peut être constitué de plusieurs couches de sable, la valeur de l'angle de frottement ( $\varphi$ ) utilisée pour calculer  $Q_p$  comme indiqué dans l'équation ci-dessus est l'angle de frottement pour le sol qui soutient l'extrémité du pieu (pour la dernière couche de sol).

---

**Table 11.5** Interpolated Values of  $N_q^*$  Based on Meyerhof's Theory

Soil friction angle, $\phi$ (deg)	$N_q^*$
20	12.4
21	13.8
22	15.5
23	17.9
24	21.4
25	26.0
26	29.5
27	34.0
28	39.7
29	46.5
30	56.7
31	68.2
32	81.0
33	96.0
34	115.0
35	143.0
36	168.0
37	194.0
38	231.0
39	276.0
40	346.0
41	420.0
42	525.0
43	650.0
44	780.0
45	930.0

---

**Table 11.6** Ultimate Point Resistance,  $q_p$ , of Test Pile at the Ogeechee River Site As reported by Vesic (1970)

Pile diameter, $D$ (m)	Depth of embedment, $L$ (m)	$L/D$	$q_p$ (kN/m <sup>2</sup> )
0.457	3.02	6.61	3,304
0.457	6.12	13.39	9,365
0.457	8.87	19.4	11,472
0.457	12.0	26.26	11,587
0.457	15.00	32.82	13,971

## □ Calcul de la valeur de $Q_P$ pour l'argile:

$$Q_P = A_P \times c_u \times N_c^*$$

$c_u$ : Cohésion du sol supportant le pieu à son extrémité

$N_c^*$ : Facteur de capacité portante pour l'argile = 9 (lorsque  $\phi = 0.0$ )

$A_P$ : Surface à la pointe du pieu (m<sup>2</sup>)

Donc

$$Q_P = 9 \times A_P \times c_u$$

□ Si le support du pieu depuis son extrémité est C - φ sol

$$Q_P = (A_P \times q' \times N_q^* \leq 0.5 \times A_P \times p_a \times N_q^* \times \tan\phi) + A_P \times c_u \times N_c^*$$

Ici, la valeur de  $\phi \neq 0 \rightarrow N_c^* \neq 9$  (vous la donnerez en fonction de  $\phi$ ).

**NB:** Mais, si on ne vous donne pas la valeur de  $N_c^*$  à la valeur existante de  $\phi \rightarrow$  Supposez  $N_c^* = 9$  et complétez la solution.

## **Calcul de la résistante de frottement latéral**

### **□ Calcul de la valeur $Q_s$ pour le sable:**

$$Q_s = P \times \sum f_i \times L_i$$

**P:** périmètre du pieu =  $\pi \times D$  (si le pieu est circulaire, avec D est le diamètre du pieu), =  $4 \times D$  (si le pieu est carré, D = dimension du carré)

**f<sub>i</sub>:** La résistance au frottement unitaire à n'importe quelle profondeur

**L<sub>i</sub>:** profondeur de chaque couche de sol

## Comment calculer la valeur de $f_i$ pour chaque couche de sol?

$$f = \mu_s \times N$$

Ici la valeur de ( $f$ ) est verticale, donc  $N$  doit être perpendiculaire à  $f$  (c'est-à-dire que  $N$  doit être horizontal) comme le montre la figure suivante :

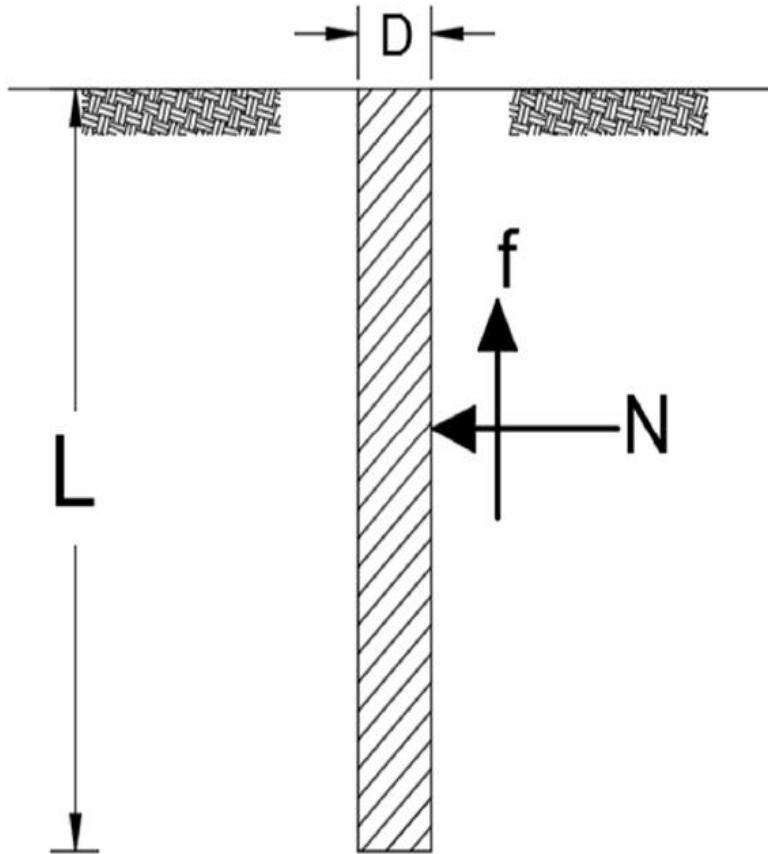
$\mu_s$ : coefficient de friction entre le sol et le pieu =  $\tan \delta$

$\delta$  : angle de frottement sol - pieu  
 $= 0,8\phi \rightarrow \mu_s = \tan 0,8\phi$

$N$  : Contraintes horizontales du sol au pieu

Pour chaque couche

$$N = \sigma'_v \times K$$



$\sigma_V'$ : contrainte effective verticale pour chaque couche  
Mais pour calculer  $\sigma_V'$  pour chaque couche de sol( pour être représentatif), nous prenons la valeur moyenne de  $\sigma_V'$  pour chaque couche.

**K:** Coefficient effectif de pression des terres

Ou  $K = 1 - \sin\phi$  or  $K = 0.5 + 0.008 D_r$

$$K = 0.5 + 0.008 D_r$$

**D<sub>r</sub>:**densité relative (%)

Maintenant, pour chaque couche de sol

$$N = \sigma'_{v,av} \times K$$

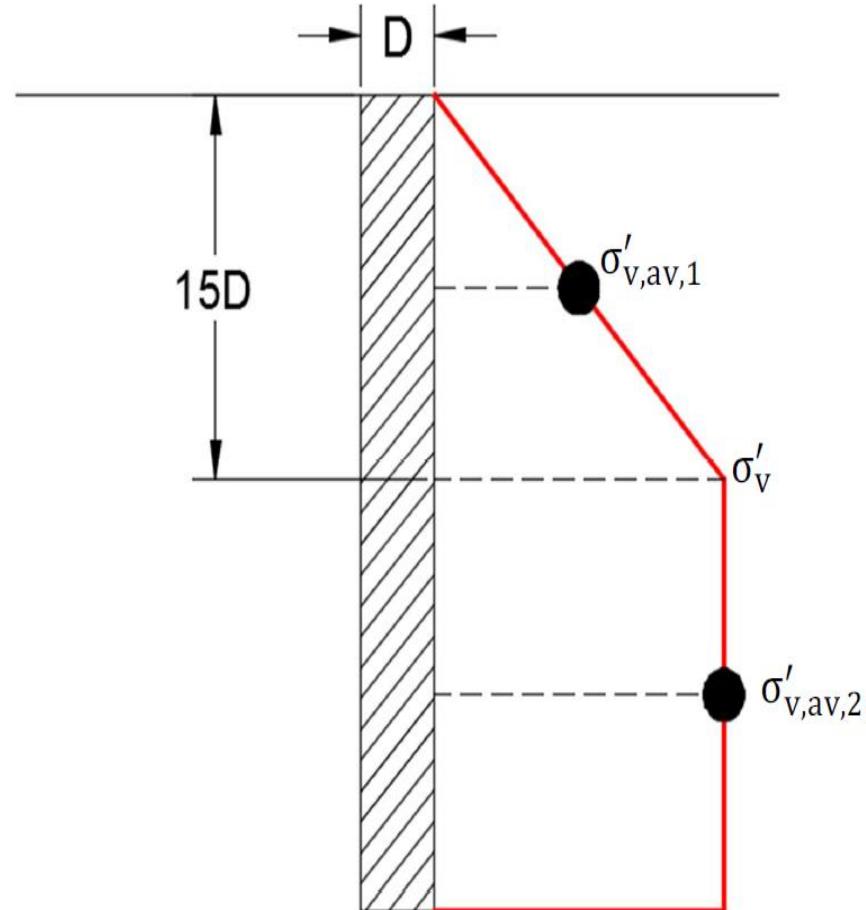
$$f = \tan(0.8\phi) \times \sigma'_{v,av} \times K$$

## Comment calculer la valeur de $\sigma'_{v,av}$ pour chaque couche de sol:

Nous traçons la contrainte effective verticale le long du pieu, mais la contrainte augmentera linéairement jusqu'à une profondeur de (15D), après cette profondeur la contrainte sera constante et n'augmentera pas (ceci n'est vrai que dans le cas d'un sol sablonneux). S'il y a une couche de sol avant d'atteindre 15D:

$$\sigma'_{v,av,1} = \frac{0 + \sigma'_v}{2} = 0.5\sigma'_v$$

$$\sigma'_{v,av,2} = \frac{\sigma'_v + \sigma'_v}{2} = \sigma'_v$$



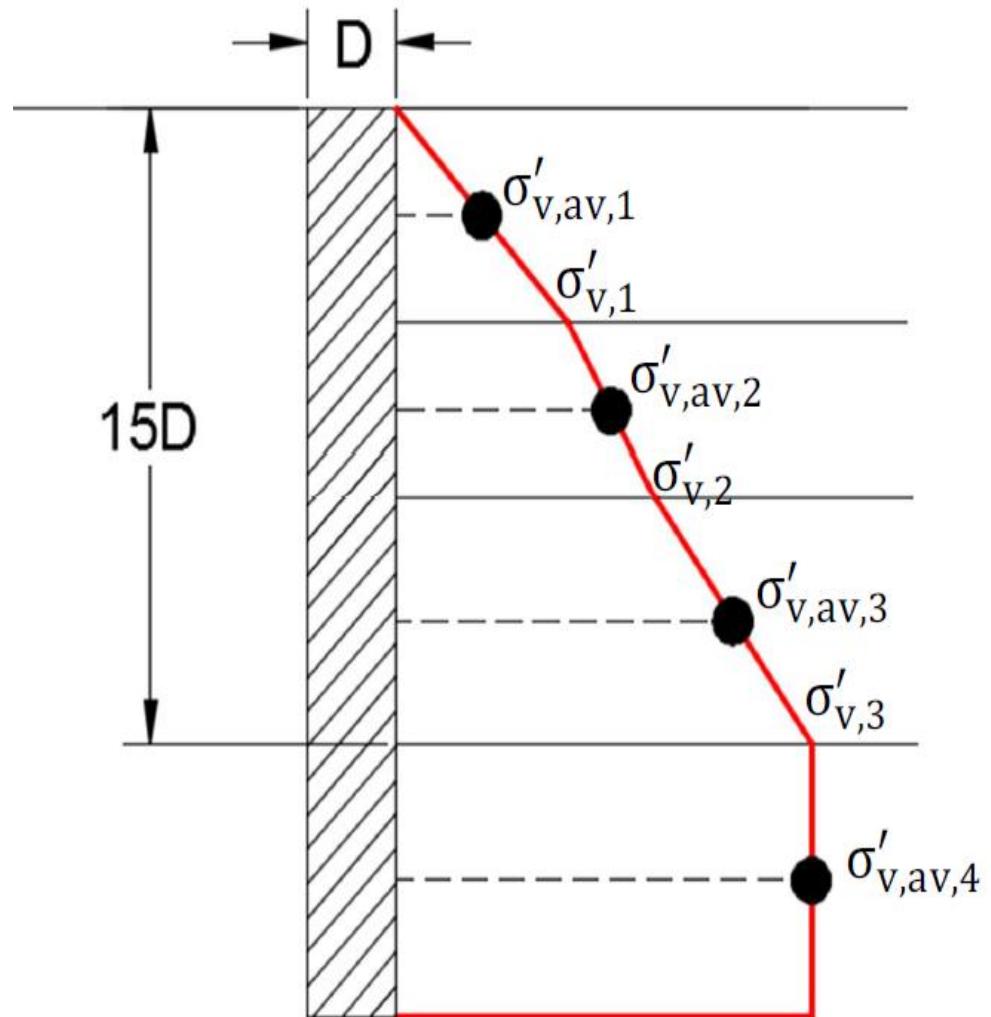
S'il y a plus d'une couche de sol avant d'atteindre 15D :

$$\sigma'_{v,av,1} = \frac{0 + \sigma'_{v,1}}{2} = 0.5\sigma'_{v,1}$$

$$\sigma'_{v,av,2} = \frac{\sigma'_{v,1} + \sigma'_{v,2}}{2}$$

$$\sigma'_{v,av,3} = \frac{\sigma'_{v,2} + \sigma'_{v,3}}{2}$$

$$\sigma'_{v,av,4} = \frac{\sigma'_{v,3} + \sigma'_{v,3}}{2} = \sigma'_{v,3}$$



Enfin, nous pouvons calculer la valeur de comme suit :

$$Q_s = P \times \sum (\tan(0.8\phi_i) \times \sigma'_{v,av,i} \times K_i) \times L_i$$

i = chaque couche de sol

**NB:** Nous prenons la couche de sol à chaque changement des propriétés du sol ou à chaque changement de pente de contrainte verticale

## □ Calcul de la valeur $Q_s$ pour l'argile:

Il existe trois méthodes pour calculer  $Q_s$  dans l'argile :

### 1. $\lambda$ méthode

$$Q_s = P \times \sum f_i \times L_i$$

Mais ici on prend toute la longueur du pieu :

$$Q_s = P \times L \times \sum f_i$$

$$\sum f_i = f_{av} = \lambda \times (\sigma'_{v,av} + 2 c_{u,av})$$

$\sigma'_{v,av}$  = contrainte verticale effective moyenne pour toute la longueur d'enterrement

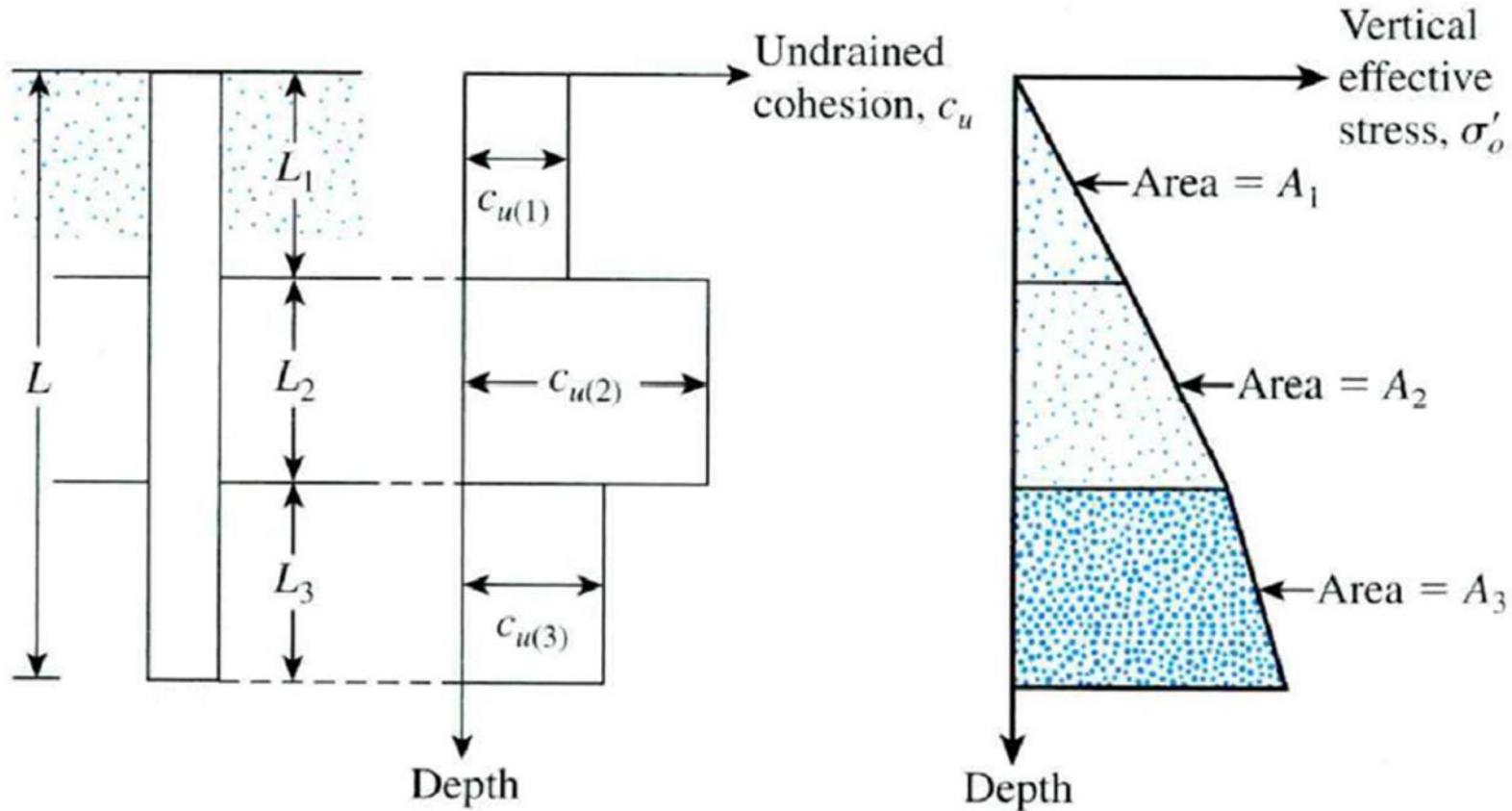
$c_{u,av}$  = résistance moyenne au cisaillement non drainé sur toute la longueur d'enterrement

$\lambda$  = fonction de la longueur du pieu (L)

Table 11.9 Variation of  $\lambda$  with pile embedment length, L

Embedment length, L (m)	$\lambda$
0	0.5
5	0.336
10	0.245
15	0.200
20	0.173
25	0.150
30	0.136
35	0.132
40	0.127
50	0.118
60	0.113
70	0.110
80	0.110
90	0.110

A noter que le sol est argileux, et que la contrainte n'est pas constante après 15D,



$$c_{u,av} = \frac{L_1 \times c_{u,1} + L_2 \times c_{u,2} + L_3 \times c_{u,3}}{L}$$

$$\sigma'_{v,av} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{L}$$

## 2. $\alpha$ méthode

$$Q_s = P \times \sum f_i \times L_i$$

Avec

$$f_i = \alpha_i \times c_{u,i}$$

$\alpha_i$ : fonction de  $\left(\frac{c_{u,i}}{p_a}\right)$



Donc

$$Q_s = P \times \sum \alpha_i \times c_{u,i} \times L_i$$

**Table 11.10** Variation of  $\alpha$  (interpolated values based on Terzaghi, Peck and Mesri, 1996)

$\frac{c_u}{p_a}$	$\alpha$
$\leq 0.1$	1.00
0.2	0.92
0.3	0.82
0.4	0.74
0.6	0.62
0.8	0.54
1.0	0.48
1.2	0.42
1.4	0.40
1.6	0.38
1.8	0.36
2.0	0.35
2.4	0.34
2.8	0.34

Note:  $p_a$  = atmospheric pressure  
 $\approx 100 \text{ kN/m}^2$

### 3. $\beta$ méthode

$$Q_s = P \times \sum f_i \times L_i$$

$$f_i = \beta_i \times \sigma'_{v,av,i}$$

$\sigma'_{v,av,i}$  : contrainte effective verticale moyenne pour chaque couche d'argile

$$\beta_i = K_i \times \tan \phi_{R,i}$$

$\phi_{R,i}$  : angle de frottement drainé de l'argile remaniée (donné pour chaque couche)

$K_i$  : coefficient de pression des terres pour chaque couche d'argile

□ pour les argiles normalement consolidées

$$K = 1 - \sin\phi_R$$

□ pour l'argile sur-consolidée

$$K = (1 - \sin\phi_R) \times \sqrt{OCR}$$

Avec

OCR: coefficient de sur-consolidation

**NB:** Si le sol est  $(C - \phi)$  sol, nous calculons  $Q_s$  pour le sable seul et pour l'argile seule, puis additionnons les deux valeurs pour obtenir la valeur de  $Q_s$  totale

Maintenant, à partir de toutes les méthodes ci-dessus, nous pouvons calculer la charge ultime que le pieu pourrait supporter :

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

Si nous voulons calculer la charge admissible

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} \quad (FS \geq 3)$$