

CHAPITRE 3 : FONDATIONS PROFONDES

3.1. INTRODUCTION

Les fondations profondes sont celles qui permettent de reporter les charges dues à l'ouvrage qu'elles supportent sur des couches situées depuis la surface jusqu'à une profondeur variante de quelques mètres, à plusieurs dizaines de mètres, lorsque le terrain superficiel n'est pas susceptible de résister aux efforts qui sont en jeu, constitué par exemple par de la vase, du sable bouillant, de la tourbe ou d'une façon générale d'un terrain très compressible.

Dans ces conditions, il faut rechercher le terrain résistant à une certaine profondeur. Deux cas peuvent alors se présenter :

- a) Les sondages indiquent qu'à une profondeur accessible, on trouve une couche de terrain ayant une bonne résistance, dans ce cas on réalise des pieux qui seront enfoncés à travers les mauvais terrains jusqu'au bon sol ;
- b) Les sondages montrent que les couches compressibles existent sur une grande hauteur et que le bon sol est pratiquement inaccessible, on devra admettre que seule la résistance au frottement empêche l'enfoncement des pieux et ces derniers devront avoir une longueur telle que cette résistance soit suffisante.

Généralement, une fondation est considérée comme profonde si $D / B > 10$. (Avec D la longueur de la fondation « pieu », et B sa largeur). Cette catégorie de fondation regroupe essentiellement (pieu, caissons, parfois les parois moulées).

La capacité portante d'une fondation profonde est la somme de deux termes: la résistance en pointe et la résistance au frottement latéral; bien qu'il y ait une interaction entre ces deux termes (ils dépendent de la pression limite mesurée à partir du pressiomètre), il est traditionnel de les calculer séparément.

Pieu : un pieu est une fondation élancée, qui reporte les charges de la structure, sur des couches de terrain de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol.

Puits : c'est une fondation creusée à la main, les moyens de forage employés exigent la présence d'homme au fond du forage. Les parois du forage sont soutenues par blindage.

3.2. DÉFINITION ET ELEMENTS CONSTITUTIFS

Les parties principales d'un pieu sont : la tête, la pointe, et le fût compris entre la tête et la pointe les pieux peuvent être classés selon le matériau constitutif (en bois, métal, béton armé), ou selon leur mode d'installation dans le sol, les principaux types sont reportés sur l'organigramme

- **Hauteur d'encastrement (D) :** elle est dite aussi « fiche de pieu », elle représente sa longueur enterrée
- **Ancrage (h) :** c'est la hauteur de pénétration du pieu dans la couche d'ancrage. Si le pieu est fiché dans milieu homogène (monocouche), l'ancrage est égal à la hauteur d'encastrement

- **Ancrage critique (D_c)** : c'est la profondeur au-delà de laquelle la résistance en pointe du pieu devient constante avec la profondeur. La valeur de D_c varie avec le type de sol, elle augmente avec le diamètre du pieu et la résistance du sol. Pour simplifier et dans les cas courants on pourra adopter les valeurs de D_c
 - pour une seule couche de sol $D_c = 6B$ avec un minimum de 3m,
 - pour un sol multicouche pour lequel la contrainte effective σ'_v due au poids des terrains au-dessus de la couche d'ancrage est au moins égale à 100 kPa (environ 7 à 10 m de terrain) $D_c = 3B$ avec un minimum de 1.5m ;
- **Couche d'ancrage** : c'est la couche dont la quelle est arrêté la base de la fondation ou de pieu.

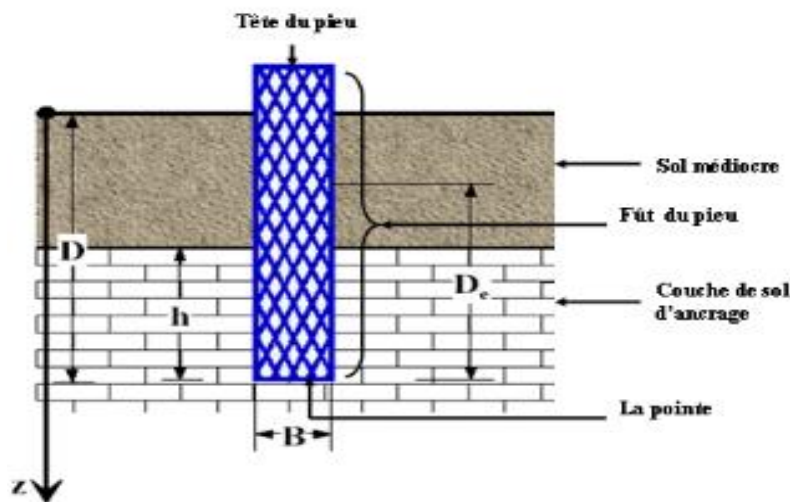


Figure (3.1) Schéma représentant les différentes parties d'un pieu.

3.3. CAPACITÉ PORTANTE D'UN PIEU ISOLÉ SOUMIS À UN CHARGEMENT AXIAL

le chargement verticale d'un pieu se traduit par la mobilisation d'une pression verticale en pointe, et des contraintes de cisaillement le long du fût du pieu appelé aussi le frottement latérale. Considérons un pieu dont la base est située à la profondeur D , dans un sol homogène, ce pieu dont on néglige le poids est chargé axialement en tête par une charge Q . si l'on accroît progressivement Q à partir de 0, le pieu s'enfonce en tête de St , et la courbe représentant Q en fonction de St a l'allure indiqué dans la figure I.3, avec une charge limite correspondant à la rupture du sol.

Au moment de la rupture, la charge Q_l est équilibrée par les réactions limites du sol suivantes :

- Ø Résistance unitaire du sol sous la pointe q_p , conduisant à la charge limite de pointe Q_p ;
- Ø Résistance q_s due au frottement du sol sur la surface latérale du pieu conduisant à la charge limite par frottement Q_f .

La charge limite du pieu Q_L est obtenue en additionnant la charge limite de pointe Q_p qui correspond au poinçonnement du sol sous la base du pieu et la charge limite Q_f mobilisable par le frottement latéral entre le sol et le pieu.

Q_p : résistance de pointe Q_f : frottement latéral

$$Q_l = Q_p + Q_f.$$

Et l'on a donc :

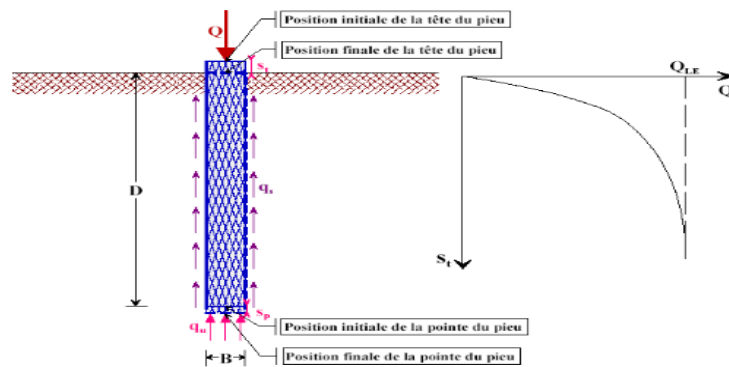
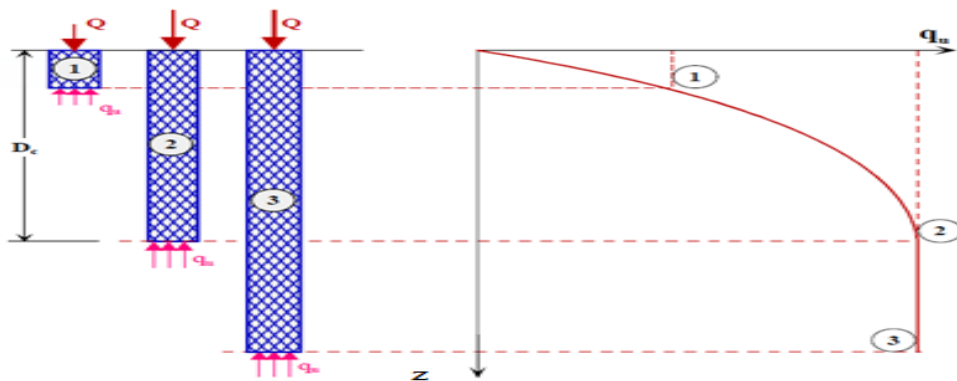


Figure (3.2) Essai de chargement de pieu. Courbe effort déplacement en tête.

3.4. Calcul de la capacité portante à partir des essais de laboratoire

Quand on enfonce un pieu à partir de la surface du sol dans un terrain homogène, la résistance de pointe augmente pratiquement linéairement en fonction de la profondeur jusqu'à une profondeur appelée profondeur critique DC et reste quasi-constante ensuite.

La valeur de DC varie avec le type de sol, elle augmente avec le diamètre du pieu et la résistance du sol. figure (3.3)



3.4.1 Mécanismes du frottement latéral positif et négatif

Pour qu'il y ait **frottement latéral** il faut qu'il y ait un **déplacement relatif entre le pieu et le sol**. Si le pieu se déplace plus vite que le sol, le sol par réaction en s'opposant au déplacement exercera un **frottement latéral positif f_p , vers le haut** (Figure 3.4).

Si le sol se déplace plus vite que le pieu (terrain médiocre qui tasse (s_s) sous des surcharges appliquées au niveau de la surface du sol), le sol en tassant entraîne le pieu **vers la basse** et lui applique un **frottement négatif f_n** qui le surcharge. Pour un même pieu on pourra avoir la partie supérieure soumise à un frottement négatif et la partie inférieure à un frottement positif. Le point neutre est le point pour lequel le déplacement du pieu est égal à celui du sol.

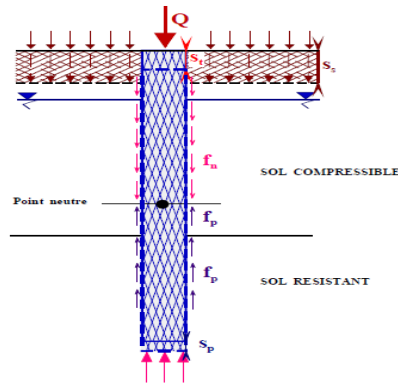


Figure (3.4) Mécanismes du frottement latéral positif et négatif

Le frottement négatif se produit généralement dans des sols fins saturés qui se consolident avec le temps. Il augmente donc avec la consolidation du sol et devient maximal à long terme (généralement plusieurs années)

Le frottement négatif maximal dépend :

- de la compressibilité du sol,
- des surcharges de longue durée appliquées sur le terre-plein,
- de l'interface entre le sol et le pieu.

Il pourra être évalué conformément à la méthode de **COMBARIEU** préconisée par le fasc.62–titre V.

3.4.2. DÉTERMINATION DE LA CONTRAINTE

▪ Calcul de l'ancrage critique dc

La valeur de DC varie avec le type de sol, elle

- pour une seule couche de sol (le sol est homogène depuis sa surface jusqu'au moins 4B sous la base de la fondation) . Augmente avec le diamètre du pieu et la résistance du sol.

$$Dc = \max (6B , 3m)$$

- pour un sol multicouche : Pour un multicouche vrai (pour lequel la contrainte effective σ'_v due au poids des terrains sous-jacentes au toit de la couche d'ancrage est au moins égale à 100 kPa) :

▪ Calcul du frottement latéral

Le frottement latéral total mobilisé à la rupture est donné par la formule :

$$q_s = \sum_{i=0}^{i=n} h_i \cdot q_{si}$$

Avec :

h_i : épaisseur de la couche i

q_{si} : frottement latéral unitaire de la couche i

n : nombre de couche traversées ou atteintes par le pieu.

Pour des sols purement cohérents : le frottement latéral unitaire à la rupture q_s est évalué à partir de la cohésion non drainée C_{uu} par la formule :

$$q_s = \beta \cdot C_u \quad \text{Avec :}$$

β : est un coefficient qui dépend de la cohésion et du type de pieu et dont les valeurs maximales pour certains types de pieux sont données au tableau ci-après :

- Pour des sols pulvérulents : Il y a lieu de retenir pour les calculs préliminaires, les valeurs maximales de q_s .
- Pour les sols intermédiaires : le sol doit être assimilé soit à un sol pulvérulent soit à un sol purement cohérent selon son caractère prédominant.

3.7. Calcul de la capacité portante a partir des essais in situ.

Les résultats de l'essai pressiométrique permettent de calculer la pression limite nette équivalente:

$$p_l^* = p_l - p_o$$

$$p_{le}^* = \frac{1}{3a + b} \int_{D-b}^{D+3a} p_l^*(z) dz$$

p_{le}^* : Pression limite nette équivalente

p_l = pression limite mesurée.

p_o = contrainte totale horizontale au même niveau dans le sol avant essai.

- $a = B/2$ si $B > 1m$.
- $a = 0.5m$ si $B < 1m$.
- $b = \min \{a, h\}$ ou h est la hauteur de l'élément de fondation dans la couche porteuse.
- h : ancrage dans la couche où se situe la pointe du pieu.

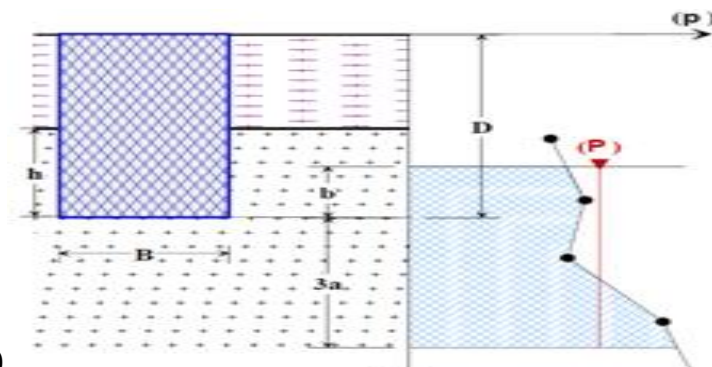


Figure (3.5)

Calcul de la charge limite de pointe

Dans le cas des terrains homogènes « q_p » est obtenue à partir de la pression limite par la formule empirique suivante :

$$q_p = q_0 + k_p (P_L - P_0)$$

$$P_0 = k_0 (q_0 - u) + u$$

q_0 : Contrainte verticale totale au niveau de la pointe lorsque le pieu est en service,

P_L : Pression limite mesurée à ce même niveau

P_0 : Contrainte horizontale totale mesurée à ce même niveau

u : Pression interstitielle au niveau considéré

k_0 : Coefficient de poussée des terres au repos, $k_0 = 1 - \sin \varphi \approx 0,5$

k_p : facteur de portance

Frottement latéral admissible :

A_p : section droite de la pointe

P : périmètre du pieu

u : frottement latérale unitaire limite de la couche « i » d'épaisseur « h_i ».

Car « R_p » n'est pas constante d'où il faudra prendre une moyenne et il faut tenir compte de la profondeur critique d'encastrement (pieu fortement encasté, ou faiblement encasté) car pour un sol homogène la résistance de pointe augmente avec la profondeur jusqu'à une hauteur critique puis reste constante.

Les valeurs de la résistance de pointe Q_p ont été établies empiriquement à partir d'essais de chargement de pieux. La charge limite de pointe est donnée par :

$$Q_p = A \cdot q_p = A k_p \cdot p_{le}^*$$

Avec:

A : section de pointe

k_p : Facteur de portance

Détermination du facteur de portance k_p

La valeur de k_p , facteur de portance, est fixée par le tableau ci-dessous en fonction de la **nature du sol** et du mode de **mise en oeuvre (type de pieu)**, quelle que soit la géométrie de la section droite de l'élément de fondation.

Cette valeur n'est applicable qu'au-delà de la profondeur critique « D_c » en deçà on pourra appliquer une interpolation linéaire entre « 0 » et « D_c ».

Tableau (3.1) Valeurs du coefficient de portance k_p

Classe de sol		Description	Préssiomètre Pl (MPa)
Argiles, Limons	A	Argiles et limons mous	< 0,7
	B	Argiles et limons fermes	1,2 – 2,0
	C	Argiles très fermes à dures	>2,5
Sables, Graves	A	Lâches	<0,5
	B	Moyennement compacts	1,0 – 2,0
	C	Compacts	>2,5
Craies	A	Molles	<0,7
	B	Altérées	1,0 – 2,5
	C	Compactes	>3,0
Marnes ; marno-calcaires	A	Tendres	1,5 – 4,0
	B	Compacts	>4,5

Tableau (3.2) : Classification des sols

Nature des terrains		Éléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Éléments mis en œuvre avec refoulement du sol
Argiles, Limons	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

Dans le cas des terrains stratifiés (cas général), la pression limite « P_L » est remplacée par une pression limite équivalente « P_{Le} » obtenue par une moyenne géométrique mesurée entre le niveau « -3R et 3R ».

(1) Pieux de grande longueur (supérieur à 30m),

(2) Forage à sec, tube non louvoyé,

(3) Dans les cas des craies, le frottement latéral peut être très F=3
coefficient de sécurité

Calcul du frottement latéral : L'effort total limite mobilisable par frottement latéral sur toute la hauteur h concernée du fût du pieu est calculé par l'expression suivante :

$$Q_s = p \int_0^h q_s(z) dz$$

Avec :

- q_s = frottement latéral unitaire limite
- P = périmètre du pieu
- h = la hauteur où s'exerce effectivement le frottement latéral.

Détermination abaques: frottement latéral unitaire

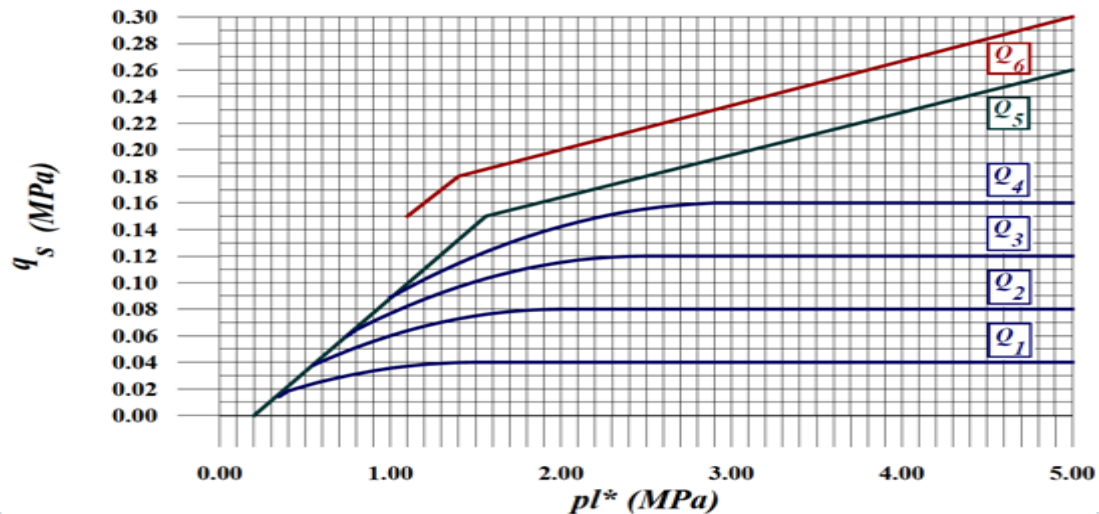


Figure (3.6) Abaques pour la détermination de q_s

Tableau -3.3)

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_1	Q_1, Q_2 (1)	Q_2, Q_3 (1)				Q_1	Q_3	Q_4, Q_5 (1)	Q_3	Q_4, Q_5 (1)	Q_6
Foré à la boue	Q_1	Q_1, Q_2 (1)		Q_1	Q_2, Q_1 (2)	Q_3, Q_2 (2)	Q_1	Q_3	Q_4, Q_5 (1)	Q_3	Q_4, Q_5 (1)	Q_6
Foré tubé (tube récupéré)	Q_1	Q_1, Q_2 (3)		Q_1	Q_2, Q_1 (2)	Q_3, Q_2 (2)	Q_1	Q_2	Q_3, Q_4 (3)	Q_3	Q_4	
Foré tubé (tube perdu)		Q_1		Q_1		Q_2			(4)	Q_2	Q_3	
Puits (5)	Q_1	Q_2	Q_3				Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
Métal battu fermé	Q_1	Q_2		Q_2		Q_3			(4)	Q_3	Q_4	Q_4
Battu préfabriqué béton	Q_1	Q_2			Q_3				(4)	Q_3	Q_4	Q_4
Battu moulé	Q_1	Q_2		Q_2		Q_3	Q_1	Q_2	Q_3	Q_3	Q_4	
Battu enrobé	Q_1	Q_2		Q_3		Q_4			(4)	Q_3	Q_4	
Injecté basse pression	Q_1	Q_2			Q_3		Q_2	Q_3	Q_4		Q_5	
Injecté haute pression (6)		Q_4	Q_5	Q_5		Q_6		Q_5	Q_6		Q_6	Q_7 (7)

(1) Réalésage et rainurage en fin de forage.
(2) Pieux de grande longueur (supérieure à 30 m).
(3) Forage à sec, tube non loupé.
(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.
(5) Sans tubage ni virole foncés perdus (parois rugueuses).
(6) Injection sélective et répétitive à faible débit.
(7) Injection sélective et répétitive à faible débit et traitement préalable des massifs fissurés ou fracturés avec obturation des cavités.