

CHAPITRE 3

FONDATIONS PROFONDES

1. DEFINITIONS

Un pieu est une fondation élancée qui reporte les charges de la structure sur des couches de terrain, plus ou moins profondes, de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol et limiter les déplacements à des valeurs très faibles.

➤ Une fondation est considérée comme profonde lorsque l'élancement :

- $D/B > 6$ D : longueur de la fondation enterrée dans le sol.
- $D > 3\text{m}$ B : largeur de la fondation.
- $D_e/B > 5$ D_e : hauteur d'encastrement équivalente.

Les fondations semi profondes assument la transition avec les fondations superficielles.

On définit comme suit :

- La couche d'ancrage : couche de caractéristiques mécaniques favorables dans laquelle est arrêté la base de la fondation.
- L'ancrage h : hauteur de pénétration du pieu dans la couche d'ancrage.
- La fondation dans une monocouche : lorsque le pieu est fiché dans un milieu homogène
- La fondation dans un multicouche : lorsque le pieu traverse au moins 2 couches de caractéristiques différentes.
- Le multicouche vrai : épaisseur et poids volumique des couches supérieures à la couche d'ancrage sont tels que la contrainte verticale effective σ'_v est supérieure ou égale à 100kPa.

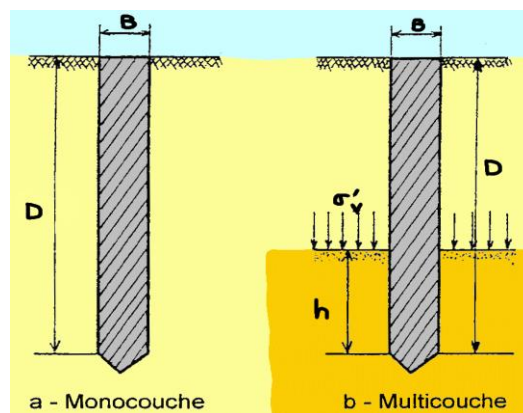


Figure 1. Pieu type.

➤ La charge limite d'un pieu Q_u :

$$Q_u = Q_{pu} + Q_{su} \quad (1)$$

Q_{pu} : charge limite de pointe (poinçonnement du sol sous la base du pieu).

Q_{su} : charge limite de frottement (frottement du pieu et du sol).

➤ **Comportement d'un pieu :**

- *Mobilisation par effet de pointe (cas -a-) :*

Le pieu traverse un sol mou pour s'ancrer dans une couche très résistante.

- *Mobilisation par effet de pointe et par frottement latéral (cas-b-) :*

Le pieu traverse un sol mou pour s'ancrer dans un sol plus résistant, sans pour autant atteindre le rocher.

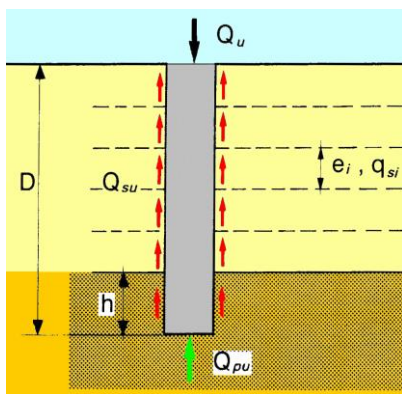


Figure 2. Charge limite de pointe et de frottement

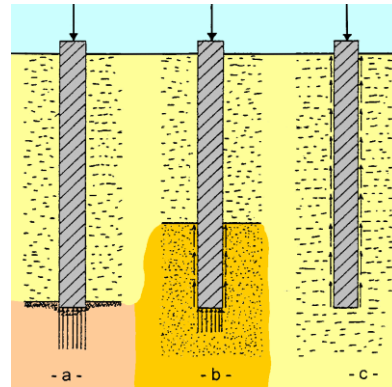


Figure 3. Couche d'ancrage

2. CLASSIFICATION DES PIEUX (DTU 13.2), (fascicule 62 titre V)

Traditionnellement, on classe les pieux :

- Soit suivant la nature du matériau constitutif : bois, métal, béton.
- Soit suivant le mode d'introduction dans le sol :
 - Pieu battu, façonné à l'avance et mis en place, le plus souvent par battage,
 - Pieu foré, exécuté en place par bétonnage dans un forage, à l'abri ou non d'un tube métallique.

Pour l'évaluation de la force portante, notamment, il est plus important de considérer le type de sollicitation imposée au sol par la mise en place du pieu. C'est ainsi que l'on distingue :

- Les pieux dont la mise en place provoque un refoulement du sol,
- Les pieux dont l'exécution se fait après excavation du sol du forage et qui, de ce fait, ne provoquent pas de refoulement du sol,
- Certains pieux particuliers dont le comportement est intermédiaire.

➤ Pieux refoulant le sol à la mise en place :

- Pieu battu préfabriqué
- Pieu en métal battu.
- Pieu en béton foncé
- Pieu en métal foncé
- Pieu Battu pilonné
- Pieu battu enrobé
- Pieu tubulaire précontraint.
- Pieu Battu moulé

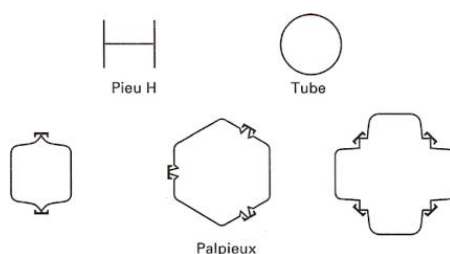


Figure 4. Profilés métalliques battus [1]

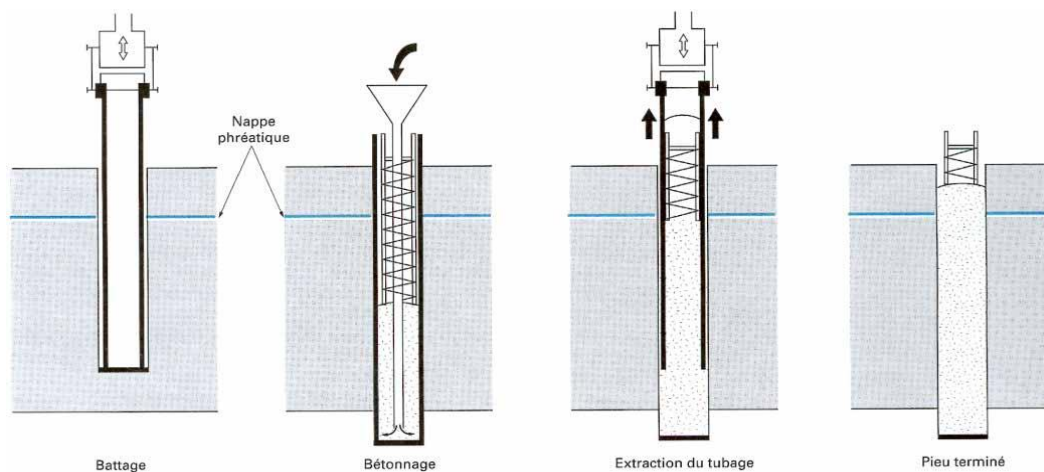


Figure 5. Pieu battu moulé [6]

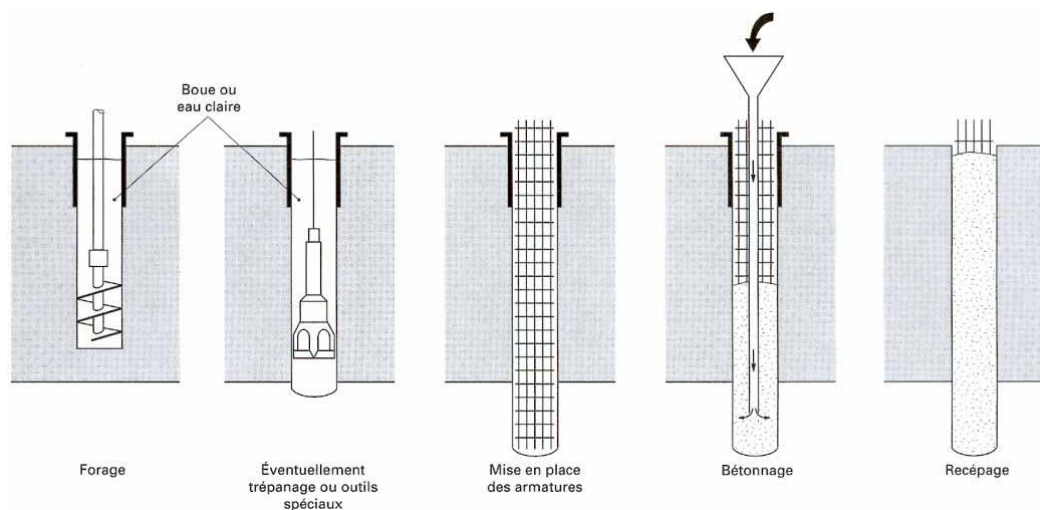


Figure 6. Pieux forés à la boue et barrette. [6]

Pieu ne refoulant pas le sol à la mise en place.

- Pieu foré tubé
- Pieu foré simple.
- Puits.
- Pieu tarière creuse.
- Micropieux.
- Type I ;
- Type II ;
- Type III
- Type IV.

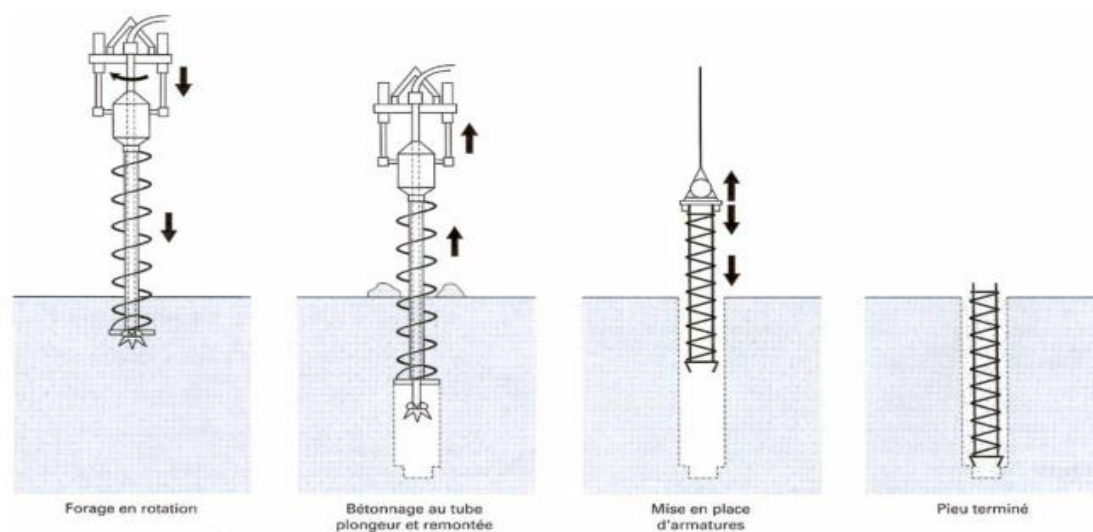


Figure 7. Pieu foré tubé [6]

Les formes de section des différents types de barrettes exécutés dans le cas des pieux forés à la boue sont données sur la figure suivante :

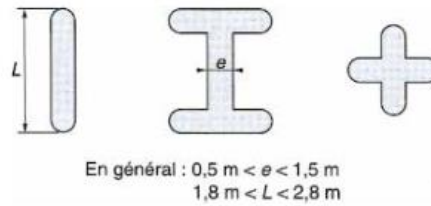


Figure 8. Différents types de barrettes. [6]

3. METHODES DE CALCUL D'UN PIEU SOUS CHARGE AXIALE. (fascicule 62 titre V),[2]

3.1 Charge limite d'un pieu isolé– Formules générales

En générale, les fondations traversent une ou plusieurs couches de qualité plus ou moins bonne pour s'ancrer dans un horizon présentant des caractéristiques mécaniques plus favorables, appelé *couche d'encrage* (Figure 9).

- La hauteur d'encastrement ou fiche du pieu h est la longueur enterrée.
- L'encrage h est la hauteur de pénétration du pieu dans la couche d'ancrage. Si le pieu est fiché dans un milieu homogène (monocouche), l'encrage D est égal à la hauteur d'encastrement.
- ❖ La charge limite Q_u du pieu est obtenue en additionnant la charge limite de pointe Q_{pu} correspondant au poinçonnement du sol sous la base du pieu et la charge limite Q_{su} mobilisable par frottement entre le fut du pieu et le sol, c'est-à-dire :

$$Q_u = Q_{pu} + Q_{su} . \quad (2)$$

- ❖ La charge de pointe est donnée par la formule suivante :

$$Q_{pu} = \rho_p \cdot A \cdot q_{pu} ; \quad (3)$$

- ❖ et la charge limite en frottement latéral par :

$$Q_{su} = \rho_s \cdot P \cdot \sum q_{si} \cdot e_i ; \quad (4)$$

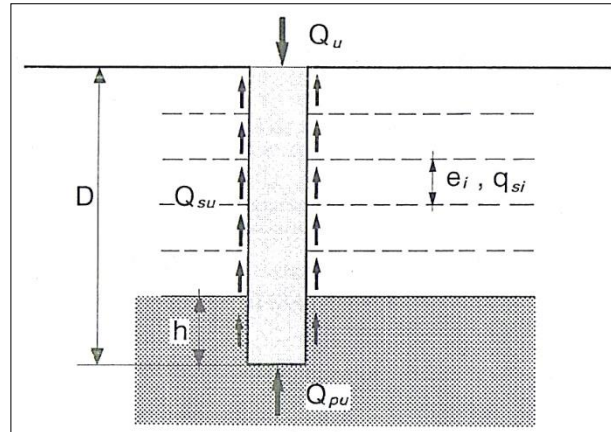
avec :

- ρ_p : coefficient réducteur de l'effet de pointe,
- ρ_s : coefficient réducteur de frottement latéral,
- A : aire de la section droite du pieu,
- P : périmètre de la section droite du pieu,
- q_{pu} : résistance limite de pointe,
- q_{si} : frottement latéral unitaire limite dans la couche i ,
- e_i : épaisseur de la couche i .

Le calcul de l'air et du périmètre des différentes sections est donné plus loin dans le texte.

Remarque : pour la couche d'encrage, il faut remplacer e_i par h .

Figure 9. Comportement général d'un pieu isolé soumis à une charge verticale. [6]



Les valeurs de ρ_p et ρ_s sont données par le tableau suivant :

Tableau 1. Valeurs de ρ_p et ρ_s . (Fascicule 62 titre V)

Type de pieu	Argiles		Sables	
	ρ_p	ρ_s	ρ_p	ρ_s
Section pleine Tubulaire fermé	1,00	1,00	1,00	1,00
Tubulaire ouvert Palpieux	0,50	1,00	0,50	1,00
Pieu H	0,50	1,00	0,75	1,00
Palplanches	0,50	1,00	0,30	0,50

3.2 Principales méthodes pratiques de détermination de la charge ultime d'un pieu sollicité selon son axe.

Les principales méthodes de détermination de la capacité portante d'un pieu soumis à une charge axiale sont :

- les théories classiques du calcul de la charge limite axiale d'un pieu qui reposent sur l'hypothèse du comportement rigide-plastique du sol, supposé partout en état de rupture dans une certaine zone autour du pieu. Dans ces théories, les efforts résistants unitaires (résistance de pointe q_p , frottement latéral limite q_s) ne dépendent que des caractéristiques

de rupture du sol mesurées en laboratoire (cohésion c et angle de frottement φ) et sont reliés directement à la profondeur.

- Essai au pressiomètre : - essai réalisable sur tous les terrains
 - Méthode validée par de nombreux essais de chargement de pieux réels
- Essai au pénétromètre statique : essai bien adapté mais son utilisation est limitée aux pieux fichés dans des sols suffisamment meubles.

3.2.1 Méthode par essais de laboratoire :

a) Contrainte limite de pointe :

Cette méthode basée sur une formule similaire à celle utilisée pour évaluer la contrainte de rupture d'une fondation superficielle et s'écrit :

$$q_{pu} = \gamma \cdot D \cdot N_{q \max} + c \cdot N_{c \max} \quad (5)$$

Les valeurs de $N_{q \max}$ et $N_{c \max}$ proposées par *Caquot* et *Kérisel* sont données par les formules suivantes :

$$N_{q \max} = 10^{3,04 \tan \varphi}, \quad N_{c \max} = \frac{N_{q \max} - 1}{\tan \varphi}. \quad (6)$$

Négligé du fait de la faible largeur de la fondation.

Tableau 2 : valeurs de $N_{q \max}$ et $N_{c \max}$

φ (°)	$N_{q \max}$	$N_{c \max}$	φ (°)	$N_{q \max}$	$N_{c \max}$	φ (°)	$N_{q \max}$	$N_{c \max}$
0	1,00	7,00	16	7,44	22,47	32	79	125
1	1,13	7,45	17	8,50	24,53	33	94	143
2	1,20	7,93	18	9,72	26,84	34	112	165
3	1,44	8,46	19	11,14	29,44	35	134	190
4	1,63	9,03	20	12,78	32,36	36	161	221
5	1,84	9,60	21	14,69	35,66	37	195	257
6	2,09	10,34	22	16,91	39,39	38	237	302
7	2,36	11,10	23	19,52	43,63	39	289	356
8	2,67	11,91	24	22,57	48,44	40	355	421
9	3,03	12,82	25	26,16	53,95	41	439	504
10	3,43	13,80	26	30,39	60,26	42	546	605
11	3,90	14,91	27	35,40	67,51	43	603	732
12	4,43	16,13	28	41,34	75,86	44	862	891
13	5,03	17,40	29	48,43	85,56	45	1096	1095
14	5,73	18,96	30	56,90	96,82			
15	6,53	20,62	31	67,08	109,90			

Le sol soumis à des contraintes élevées se comprime sous la pointe et il se forme des effets de voûte autour de celle-ci, effets qui ont tendance à soulager le sol avoisinant du poids des terres. À partir

d'une certaine profondeur appelée ancrage critique D_c , la résistance limite devient constante en milieu homogène.

Dans un multicouche, l'ancrage critique est plus faible et dépend de la contrainte verticale σ'_v exercée par les couches supérieures. Les résultats expérimentaux ont conduit à retenir les règles suivantes :

- dans un monocouche, l'ancrage critique est donné par l'expression $D_c = \max(6B, 3 \text{ m\AA})$;
- dans un multicouche vrai, $D_c = 3B$.
- Pour un multicouche intermédiaire

$$D_c = D_{c\text{mono}} - (D_{c\text{mono}} - D_{c\text{multi}}) \cdot \sigma_v / 100 \quad (7)$$

$D_{c\text{mono}}$: Ancrage critique dans le monocouche

$D_{c\text{multi}}$: Ancrage critique dans un multicouche vrai

Si l'ancrage du pieu dans la couche porteuse est supérieur à D_c , la formule donnant la résistance de pointe est donnée par :

- A court terme (en kPa) : $q_{pu} = 7\lambda \cdot c_u$ (8)
- A long terme (en kPa) :

$$q_{pu} = a \cdot N_{q \max} + \lambda \cdot c \cdot N_{c \max} \quad (9)$$

avec : a : constante ayant les dimensions d'une pression égale à 50 kPa,

λ : coefficient de forme.

$\lambda = 1,3$ pour les pieux de section circulaire ou carrée,

$\lambda = 1 + 0,3 B/L$ pour les barrettes et parois,

L : plus grande dimension de la section transversale.

➤ Dans les sols purement cohérents, la formule précédente est remplacée par :

$$q_{pu} = 7\lambda \cdot c_u \quad (10)$$

b) Frottement latéral limite

Le frottement latéral unitaire limite q_s , est la contrainte de cisaillement qui peut être mobilisée au contact du fût et du sol lorsqu'il y a un déplacement de l'un par rapport à l'autre. Si le contact est parfaitement rugueux, la valeur de q_s est donnée par :

$$q_s = c + \sigma_h \cdot \tan \varphi. \quad (11)$$

Pour un point situé à la profondeur z (Fig. 10), le coefficient de pression des terres s'écrit :

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v, \quad (12)$$

(avec : $K_a \leq K \leq K_p$)

alors :

$$q_s = c + K \cdot \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi. \quad (13)$$

Dans ces conditions, le frottement latéral limite total dans un sol homogène est :

$$Q_{su} = P[c.D + 0,5K \cdot \gamma.D^2 \cdot \tan \varphi]. \quad (14)$$

avec : P : périmètre de la section droite du pieu,

D : longueur du pieu, égale à l'ancrage dans un sol homogène.

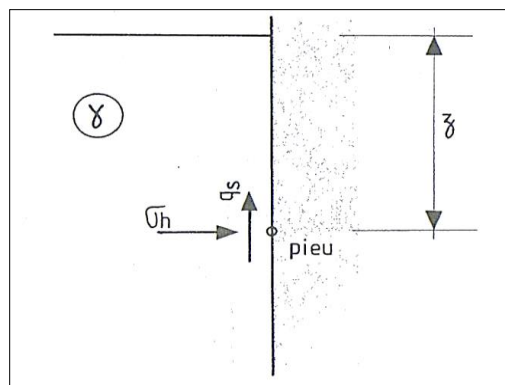


Fig. 10 : Frottement latéral en un point du fût.

Pour les pieux battus, il était admis que le pieu refoulait le sol, c'est-à-dire que : $K = K_p$, la butée est supposée entièrement mobilisée.

- Pour des sols purement cohérents (à court terme):

$$q_s = \beta \cdot c_u. \quad (15)$$

Les valeurs de β sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Coefficient β .

<i>Pieu</i>	<i>Forés⁽¹⁾ gros diamètre</i>	<i>Forés</i>	<i>Battus</i>	<i>Injectés</i>
Fût en béton	0,6	0,7	0,7	-
Fût en acier	-	0,5	0,5	-
Faible pression	-	-	-	1
Forte pression	-	-	-	1,5
(1) Pieu de diamètre supérieur à 1,5 m, barrettes, puits culés à pleine fouille.				

Les valeurs de q_s doivent être bornées par une valeur plafond $q_{s\max}$:

$$q_s = \min(\beta c_u, q_{s\max}) \quad (16)$$

Tableau 4. Les valeurs de $q_{s\max}$ fonction du type de pieu et de la nature de sol (d'après le fascicule 62 titre V).

Limites supérieures de q_s (kPa)

Nature du sol	Pieu foré		Pieu battu		Pieu injecté	
	Fût béton	Tubé	Fût béton	Fût métal	Faible pression	Haute pression
Argile molle et vase	15	15	15	15	35	-
Argile moyennement consistante	(80) 35	(80) 35	(80) 35	35	80	≥ 120
Argile raide à très raide	(80) 35	(80) 35	(80) 35	35	80	≥ 200
Limon	35	35	35	35	80	

- () pieux forés : - exécution soignée du pieu
 - remaniement minimum du sol au contact du fût lors de la mise en place du pieu
 pieux battus : - resserrement du sol sur le pieu après battage

Sol pulvérulent (étude à long terme)

- q_s obtenu expérimentalement ou valeurs maximales suivantes (kPa)

Nature du sol	Pieu foré		Pieu battu		Pieu injecté	
	Fût béton	Tubé	Fût béton	Fût métal	Faible pression	Haute pression
Sable lâche $\varphi' < 32^\circ$	35	35	35	35	80	-
Sable moyennement dense $32^\circ < \varphi' < 38^\circ$	(120) 80	(80) 35	(120) 80	35	120	≥ 200
Sable dense à très dense $\varphi' > 38^\circ$	(150) 120	(120) 80	(150) 120	120	150	≥ 200

- () pieux forés : - exécution soignée du pieu
 - remaniement minimum du sol au contact du fût lors de la mise en place du pieu
 pieux battus : - resserrement du sol sur le pieu après battage

Sols intermédiaires ($c' \neq 0$ et $\varphi' \neq 0$)

- sol assimilé soit à un milieu cohérent, soit à un milieu pulvérulent
 déconseillé d'additionner le frottement dû à la cohésion et celui dû au frottement interne → résultats trop optimistes

Charge nominale Q_n

- obtenue en affectant un coefficient de sécurité au terme de pointe et au terme de frottement latéral (D.T.U 13.2)

	ELS	ELU
Résistance de pointe	0,33	0,5
Frottement latéral	0,5	0,75

- Pour des sols pulvéulents :

Dans ce cas les valeurs de q_{smax} peuvent être considérées pour le prédimensionnement des pieux.

4. METHODE PAR ESSAIS DE CHARGEMENT EN PLACE

Cette méthode, qui consiste à charger directement un ou plusieurs pieux réalisés dans les conditions du chantier, est la plus fiable, à condition que les pieux d'essai soient représentatifs de l'ensemble du site. Les conditions de réalisation des essais sont réglementées par la norme NF P 94-150.

4.1 Prévision de la charge limite Q_1 par la méthode pressiométrique. (Fascicule 62, Titre V)

Classification des sols

Dans les règles proposées ci-après, la nature du sol intervient. C'est ainsi que l'on distingue les catégories de sols suivantes :

- argiles ;
- limons ;
- sables ;
- graves ;
- craies ;
- marnes ;
- marno-calcaires ;
- roches altérées ou fragmentées.

En ce qui concerne les argiles, limons, sables et graves, des critères de classification ont été établis.

Pour les nombreuses formations intermédiaires (graves argileuses, argiles marneuses, sables limoneux) ainsi que pour les sols à structure complexe n'entrant pas dans les catégories ci-avant, une interpolation des paramètres de calcul, au vu des essais d'identification, est nécessaire afin de les placer entre deux des catégories précitées.

L'appellation *roches altérées ou fragmentées* peut recouvrir des matériaux forts divers, à dominante calcaire, schisteuse, granitique, etc., à consistance plus ou moins meuble suivant le degré d'altération.

On pourra, d'un point de vue pratique, réserver cette appellation aux matériaux à caractère rocheux dominant, pour lesquels il y a refus au pénétromètre statique et dont les modules pressiométriques sont supérieurs à 50MPa. Pour les roches altérées plus meubles, on essaiera de les rattacher aux autres classes : argiles, marnes, sables, etc.

Pour le dimensionnement des fondations à partir du pressiomètre Ménard ou du pénétromètre statique, le fascicule 62, titre V, définit les catégories conventionnelles de sols données par le

tableau 4, en fonction de la pression limite p_l mesurée par le pressiomètre Ménard ou de la résistance de pointe q_c mesurée par le pénétromètre statique.

Tableau 4. Définition des catégories conventionnelles de sols. ((Fascicule 62, Titre V)

Classe de sol			Pressiomètre p_9 (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)	A	Altérées	2,5 à 4,0	
	B	Fragmentées	> 4,5	

(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.

4.1.1 Calcul de la charge limite de pointe Q_p

Selon le fascicule 62, titre V, de 1993, la charge limite de pointe est donnée par la formule :

$$Q_p = A k_p p_{le}^* \quad (17)$$

Avec :

A : section de pointe.

p_{le}^* : pression limite nette équivalente.

k_p : facteur de portance.

Pour les fondations profondes et les fondations semi-profondes dont les techniques sont assimilables à celles des fondations profondes, les valeurs du facteur de portance k_p sont données par le tableau 5.