

3.1. Introduction

Lorsque les charges apportées par un ouvrage sont élevée et que les couches superficielles sont très compressibles (vases, tourbes, argiles moles..) on envisage des fondations profondes (pieux) ou semi profondes (puits) afin d'atteindre des couches résistante en profondeur.

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 et limiter les déplacements à des valeurs très faibles. Le mot pieu désigne aussi bien les pieux, les puits et les barrettes.

On désigne par pieu, une fondation profonde réalisée mécaniquement et par puits une fondation profonde creusée à la main sous la protection d'un blindage, Figure 3.1).



Fig. 3.1 puits avant mise en place des armatures

3.2. Classification des pieux

On distingue deux grandes classes des pieux selon le mode d'exécution et le mode de fonctionnement.

3.2.1. Classification suivant le mode d'exécution

3.2.1.1. Pieux refoulant le sol à la mise en place

Une large collection de pieux est mise en place par fonçage, battage et/ou vibrofonçage et éventuellement par lançage

❖ Pieux en bois

Ce sont des pieux préfabriqués mis en place par battage (associé quelquefois au lançage). Ils travaillent généralement par effort de pointe et frottement latéral, moins souvent à l'arrachement, à la flexion ou comme pieux de resserrement. Ils sont à l'heure actuelle très peu utilisés.

❖ Pieux battus préfabriqués

Ces pieux, préfabriqués en béton armé ou précontraint, sont fichés dans le sol par battage ou vibro-fonçage.

❖ **Pieux métalliques battus**

Ces pieux, entièrement métalliques, constitués d'acier E 24.2 ou similaire avec addition éventuelle de cuivre (0,2 à 0,5%), sont fichés dans le sol par battage. Leurs sections sont :

- en forme de H,
- en forme d'anneau (tube),
- en forme quelconque, obtenue par soudage de palplanche par exemple.

Ils ne sont classés dans cette catégorie que si leur base est obturée, sinon ils font partie des pieux particuliers.

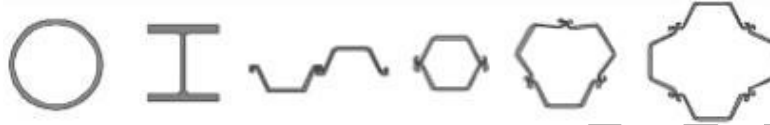


Fig. 3 2 Profils métallique battus

❖ **Pieux en béton foncés**

Ces pieux sont constitués d'éléments cylindriques en béton armé, préfabriqués ou coffrés à l'avancement, de 0,50 m à 2,50 m de longueur et de 30 à 60 cm de diamètre. Les éléments sont foncés dans le sol à l'aide d'un vérin qui prend appui sous un massif de réaction.

❖ **Pieux métalliques foncés**

Ces pieux, entièrement métalliques, sont constitués d'acier E 24.2 ou similaire avec addition éventuelle de cuivre (0,2 à 0,5%). Ils sont foncés dans le sol à l'aide d'un vérin qui prend appui sous un massif de réaction.

❖ **Pieux battus pilonnés**

Un tube, muni à sa base d'un bouchon de béton ferme, est enfoncé par battage sur le bouchon. En phase finale, le béton ferme est introduit dans le tube par petites quantités, successivement pitonnées à l'aide du mouton de battage au fur et mesure de l'extraction du tube. Suivant les cas, les pieux peuvent être armés.

❖ **Pieux battus moulés**

Un tube, muni à sa base d'une pointe métallique ou en béton armé, ou d'une plaque métallique raidie ou d'un bouchon de béton, est enfoncé par battage sur un casque placé en tête du tube ou par battage sur le bouchon de béton. Le tube est ensuite rempli totalement de béton d'ouvrabilité moyenne, avant son extraction. Le cas échéant, ces pieux peuvent être armés.

❖ **Pieux battus enrobés**

Ce pieu, à âme métallique (acier E 24.2 ou similaire), est constitué :

- de tubes d'acier de 150 à 500 mm de diamètre extérieur - de profilés H - de caissons formés de profilés ou de palplanches à 2, 3 ou 4 éléments. La pointe du pieu comporte un sabot

débordant qui assure un enrobage du métal du fût du pieu de 4 cm au minimum, Au fur et à mesure du battage, un mortier est envoyé par un ou plusieurs tubes débouchant au voisinage du sabot, afin de constituer l'enrobage en remplissant le vide annulaire laissé par le débord de celui-ci. (Figure 3.3)

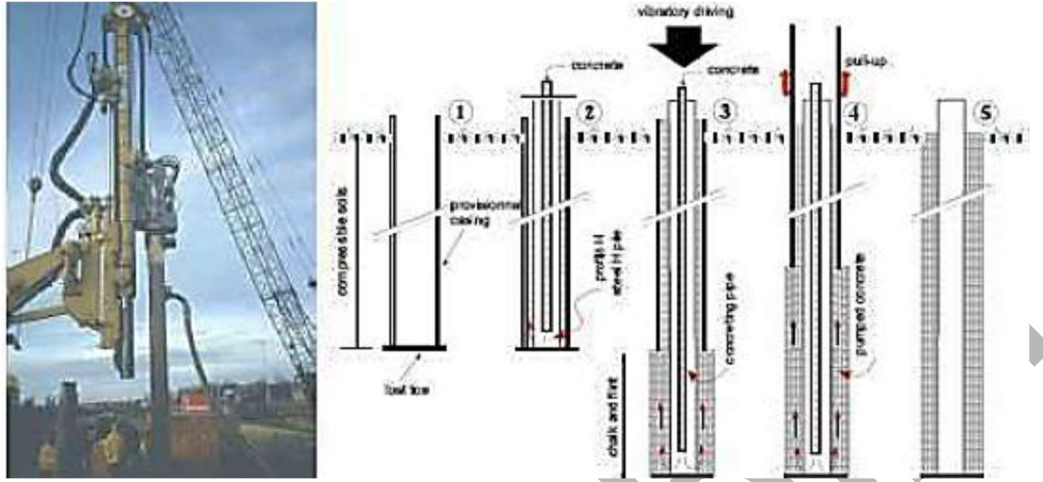


Fig. 3.3 Mise en place de pieu tube par vibro-fonçage

❖ Pieux tubulaires précontraints

Ce pieu est constitué d'éléments tubulaires en béton légèrement armé assemblés par précontrainte, antérieurement au battage. Les éléments ont généralement 1,5 à 3 m de longueur et 0,70 à 0,90 m de diamètre intérieur. Leur épaisseur est voisine de 0,15 m.

Des passages longitudinaux de 2 à 4 cm de diamètre sont ménagés pour permettre l'enfilage des câbles de précontrainte. La mise en oeuvre est normalement faite par battage avec base ouverte. Le lançage et le havage (benne, émulseur) peuvent être utilisés pour la traversée des terrains supérieurs. Ils sont interdits sur la hauteur de la fiche.

❖ Pieux vissés moulés

Ce procédé, qui ne s'applique pas aux sols sableux sans cohésion situés sous la nappe, en raison des éboulements importants qu'il risquerait de provoquer, consiste à faire pénétrer dans le sol, par rotation et fonçage, un outil en forme de double vis surmonté d'une colonne cannelée. Cet outil est percé dans l'axe de la colonne cannelée et muni d'un bouchon. Au sommet de la colonne est disposé un récipient rempli de béton.

L'extraction de l'outil est obtenue en tournant dans le sens inverse de celui de la pénétration. Le béton prend en continu, sous l'effet de la gravité, la place laissée par l'outil figures 3.4.



Fig. 3. 4 Pieu vissé de type Oméga à deux pas de vis ou un seul

❖ Colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont constituées par des fûts de matériaux d'apport granulaires, sans cohésion et sans liant mis en place par refoulement dans le sol et compactés dans le sol par pilonnage ou à l'aide d'un vibreur radial placé à la pointe d'un tube qui lui sert de support et par l'action du lançage (eau ou air). Le matériau d'apport ($d_s > 0,1 \text{ mm}$; $d_{30} > 40 \text{ mm}$; $d_{100} < 150 \text{ mm}$) doit descendre jusqu'à la pointe du vibreur soit par le forage lui-même, soit par l'espace annulaire maintenu entre le vibreur et le sol environnant, soit par tube latéral associé au vibreur, figure 3.5.

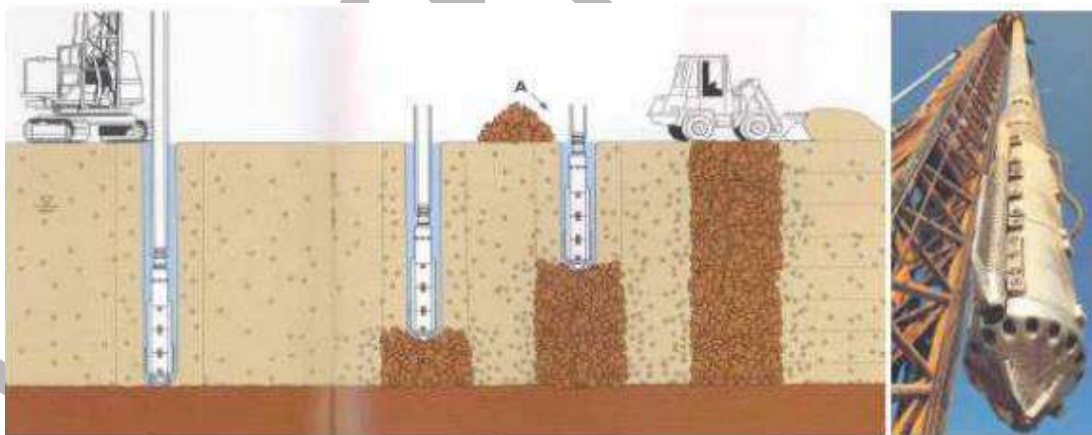


Fig. 3. 5 Méthode de réalisation des colonnes ballastées

3.2.1.2. Pieux ne refoulant pas le sol à la mise en place

❖ Pieux forés simples

Mis en œuvre à partir d'un forage exécuté dans le sol par des moyens mécaniques tels que tarière, benne, etc. Ce procédé, qui n'utilise pas de soutènement de parois, ne s'applique que dans des sols suffisamment cohérents et situés au-dessus des nappes phréatiques.

❖ Pieux forés avec boue et barrettes

Mis en œuvre à partir d'un forage exécuté dans le sol par des moyens mécaniques tels que tarière, benne, etc., sous protection d'une boue de forage benthonique ou avec polymères. Le forage est rempli de béton de grande ouvrabilité sous la boue, en utilisant une colonne de bétonnage, figure 3.6.

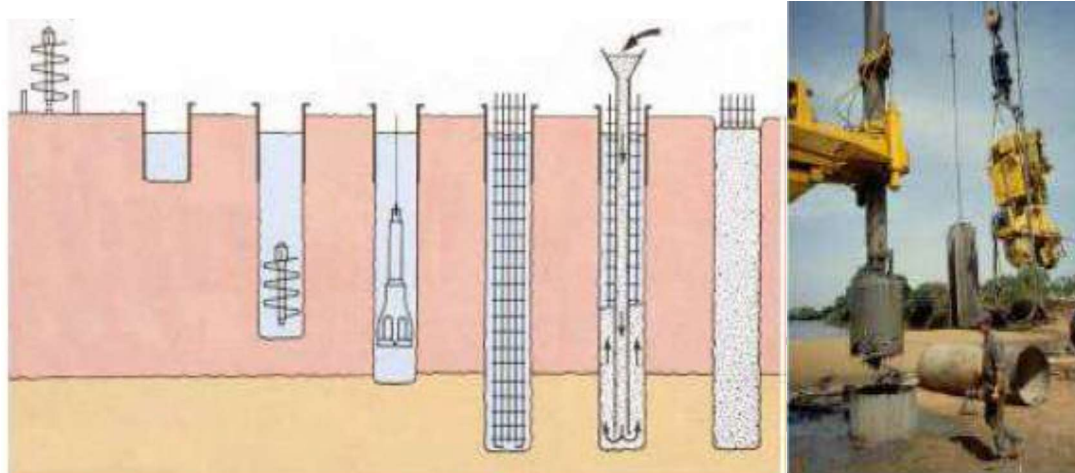


Fig. 3.6 Méthode de réalisation des pieux forés sous boue, vue d'un trépan et d'une tarière à godets.

❖ Pieux forés tubés

Mis en œuvre à partir d'un forage exécuté dans le sol par des moyens mécaniques tels que tarière, benne, etc., sous protection d'un tubage dont la base est toujours située au-dessous du fond de forage. Le tubage peut être enfoncé jusqu'à la profondeur finale par vibration ou foncé avec louvoisement au fur et à mesure de l'avancement du forage. Le forage est rempli partiellement ou totalement d'un béton de grande ouvrabilité, puis le tubage est extrait sans que le pied du tubage puisse se trouver à moins de 1 m sous le niveau du béton, sauf au niveau de la cote d'arase.

❖ Pieux tarières creuses

Mis en œuvre avec une tarière à axe creux, d'une longueur totale au moins égale à la profondeur des pieux à exécuter, vissée dans le sol sans extraction notable de terrain. La tarière est extraite du sol sans tourner pendant que, simultanément, du béton est injecté dans l'axe creux de la tarière, prenant la place du sol extrait, figure 3.7.

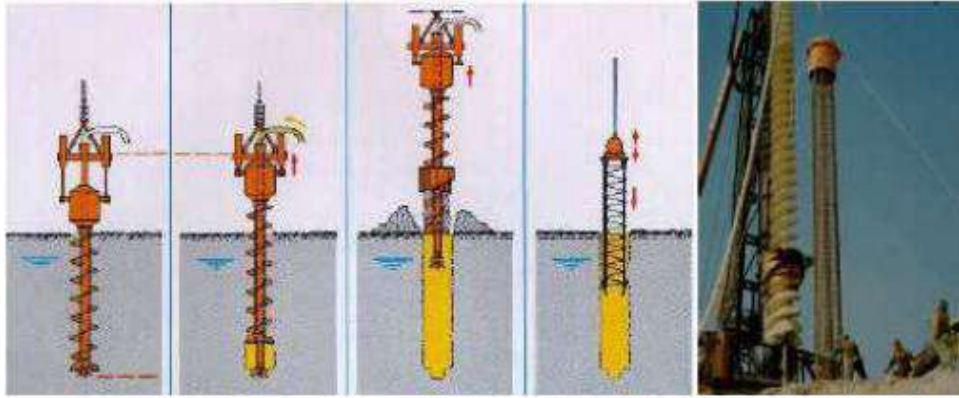


Fig. 3.7 Pieux formés par forage à la tarière continue : technique Starsol de Sol étanche.

Le ferrailage est alors mis en place. Une combinaison de tarière creuse et du foré tubé, les deux éléments tournant en sens inverses, permet de réaliser un pieu dans le terrain ou le sol ne se tient pas (technique appelée pieu à la tarière double)

❖ **Pieux injectés, sous haute pression, de gros diamètre**

Ce type de pieu, par opposition au micro pieux du type II, regroupe des pieux de forts diamètres, supérieurs à 250 cm. L'armature est en principe constituée par un tube équipé d'un dispositif d'injection comprenant des clapets anti-retours. Le dispositif d'injection doit permettre le scellement au terrain sous haute pression.

3.2.2. Classification suivant le mode de fonctionnement

Les pieux agissent sur le sol soit par :

- ✓ Effet de pointe : reposant sur une couche très dure ;
- ✓ Effet de frottement latéral (Pieux flottants) : transmettent essentiellement leurs charges par frottement latéral et ne reposant pas sur une couche résistante.
- ✓ Effet de pointe et frottement latéral (Pieux frottant à la base) : frottement latérale à la partie inférieur du fut qui doit s'ajouter à la résistance de pointe, figure 3.8.

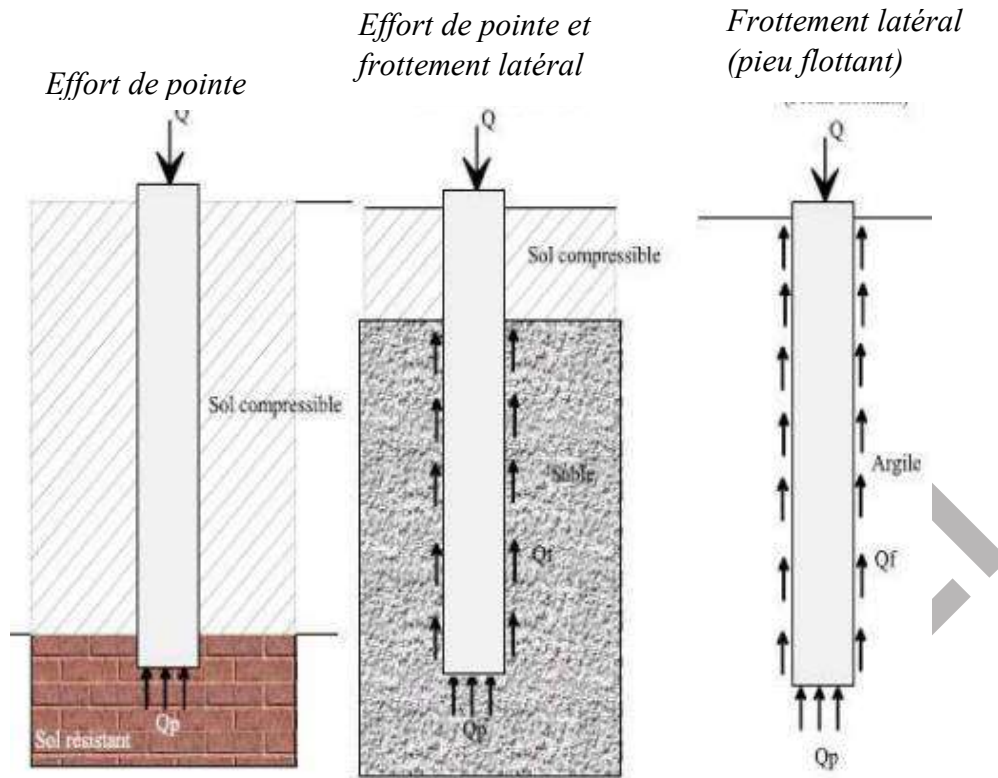


Fig. 3.8 Classification suivant le mode de fonctionnement.

3.3. Calcul de la contrainte admissible (charge)

Les pieux développent leur capacité axiale totale de support Q_{ult} par la résistance en pointe Q_p et la résistance latérale totale Q_s :

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s$$

Ces deux composantes de la capacité axiale dépendent, entre autres, de la résistance du sol au cisaillement et de la géométrie des pieux. L'apport de chacune des composantes à la capacité axiale totale est évalué différemment, selon la nature de sol.

3.3.1. La capacité axiale des pieux dans les sols pulvérulents

Puisque les essais de pénétration standard et de pénétration statique sont couramment utilisés avec les sols pulvérulents, nous évaluerons la capacité axiale des pieux à l'aide des paramètres obtenus de ces deux modes de sondage.

❖ Selon l'essai de pénétration standard

En 1976, Meyerhof a proposé la relation suivante, qui utilise les résultats de l'essai de pénétration standard pour calculer la capacité axiale d'un pieu dans un sol pulvérulent :

$$Qa = \frac{1}{F_s} [(m * N * A_p) + (n * \bar{N} * D * A_s)]$$

Où :

Qa : Charge axiale admissible (kN) ;

F_s : Facteur de sécurité égale à 4 pour cette méthode ;

m : Coefficient empirique $m = 400$ pour les pieux battus, et $m = 120$ pour les pieux forés ;

N : Indice de pénétration standard à la pointe du pieu ;

A_p : Surface à la pointe du pieu (m^2) ;

n : Coefficient empirique $n = 2$ pour les pieux battus, et $n = 1$ pour les pieux forés ;

$\bar{N}$: Indice de pénétration standard moyen le long du fût du pieu ;

$$\bar{N} = \frac{\text{distance}(N_{i+1} + N_i) * \sum N_i}{\sum \text{distance}(N_{i+1} + N_i)}$$

D : Longueur du pieu dans le sol (m) ;

A_s : Surface latérale du pieu par unité de longueur (m^2/m).

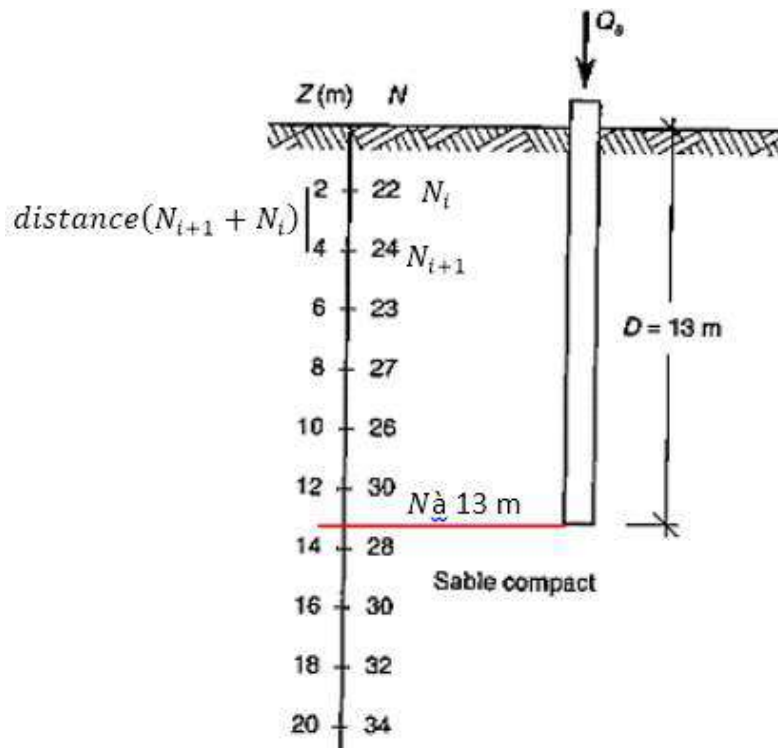


Fig. 3.9 Capacité axiale d'un pieu dans un sable.

❖ Selon l'essai de pénétration statique

Pour déterminer la capacité axiale des pieux dans les sables et les silts, l'essai de pénétration statique est plus efficace. Dans la relation suivante, tirée du manuel canadien d'ingénierie des fondations, on additionne aussi les efforts de résistance en pointe et de frottement latéral le long du pieu :

$$Qa = \frac{1}{F_s} [(q_c * A_p) + (q_s * D * A_s)]$$

Où :

F_s : Facteur de sécurité égale à 2.5 ou 3, selon la quantité et la variabilité des essais ;

q_c : Résistance en pointe du cône obtenue au niveau de la pointe du pieu (kPa)

q_s : Résistance au cisaillement moyenne mesurée le long du pieu (kPa)

3.3.2. La capacité axiale des pieux dans les sols cohérents

On ne dispose pas de méthodes empiriques fondées sur des essais de terrain pour calculer la capacité axiale des pieux enfoncés dans des sols cohérents, car l'interprétation de ces essais donne lieu à des incertitudes. De plus, l'installation des pieux peut diminuer sensiblement la résistance des argiles : le battage, par exemple, remanie le sol autour de pieu. Dans les argiles molles, il en résulte une perte d'adhérence temporaire entre l'argile et la surface latérale du pieu. Dans les argiles raides, le remaniement peut laisser un vide autour du fût du pieu, phénomène dans les conséquences sont encore mal connues. Pour ces raisons, les équations de calcul de la capacité axiale s'appuyant sur la résistance au cisaillement non drainé doivent être utilisées avec prudence.

Les résultats présentés dans cette section pourront être utilisés dans un premier temps pour déterminer une capacité axiale approximative, mais il faudra valider les hypothèses de conception retenues en procédant à des essais de chargement des pieux.

❖ Cas des argiles dont $C_u < 100$ kPa

Un sol cohérent doit avoir une consistance suffisamment raide pour que sa résistance en pointe influe sur la capacité axiale d'un pieu. Aussi, on considère qu'en deçà d'une résistance au cisaillement non drainé de 100 kPa un pieu ne développe sa capacité axiale que par le frottement entre le sol et son fût. On peut alors calculer la capacité axiale de la façon suivante :

$$Q_a = \frac{A_s \cdot D \cdot \alpha \cdot C_u}{F_s}$$

Tableau 3. 1 Coefficient d'adhérence (α) du fût du pieu et de l'argile, d'après le manuel canadien d'ingénierie des fondations

c_u (KPa)	Coefficient d'adhérence (α)	
	Pieux en bois ou en béton	Pieux en acier
10	1.0	0.90
20	1.0	0.88
30	1.0	0.80
40	0.95	0.71
50	0.86	0.62
60	0.78	0.54
70	0.71	0.48
80	0.66	0.44
90	0.61	0.40
100	0.57	0.37

Où :

α : Coefficient d'adhérence, tableau 3.1.

C_u : Résistance au cisaillement non drainé moyenne le long du fût du pieu (kPa)

F_s : Facteur de sécurité égal à 3

❖ **Cas des argiles dont $C_u > 100$ kPa**

Lorsque la résistance au cisaillement non drainé est supérieure à 100 kPa, la résistance en pointe s'ajoute à la résistance le long du fût. Toutefois, cette dernière étant considérablement réduite par le remaniement dû au battage, il est plus pertinent d'évaluer la résistance au frottement au moyen des contraintes effectives. Selon le manuel canadien d'ingénierie des fondations, des études réalisées au pénétromètre ont montré qu'au-delà d'une certaine profondeur. Appelée *profondeur critique* (D_{cr}), la résistance au frottement est plutôt constante. Dans l'équation qui suit, il faudra donc limiter la contrainte effective à une valeur correspondant à celle de la profondeur critique. Cette dernière est considérée comme un multiple du diamètre (d) et dépend de l'angle de frottement interne.

Pour $\varphi = 30^\circ \Rightarrow D_{cr} = 7 * d$

Pour $\varphi = 45^\circ \Rightarrow D_{cr} = 22 * d$

On calcule la capacité axiale admissible d'un pieu battu à l'aide de la formule suivante :

$$Q_a = \frac{[(A_p * N_p * c_u) + (A_s * D * \beta * \sigma'_v)]}{F_s}$$

Où :

N_p : coefficient de capacité portante dépendant du diamètre (d) du pieu

$N_p = 9$ si $d < 0.5$ m

$N_p = 7$ si $0.5 \leq d \leq 1$ m

$N_p = 6$ si $d > 1$ m

β : coefficient de résistance le long du fût égal à 0.3 dans l'argile (Burland, 1973)

σ'_v : contrainte effective moyenne le long du fût limitée à la valeur correspondant à la profondeur critique (D_{cr}).

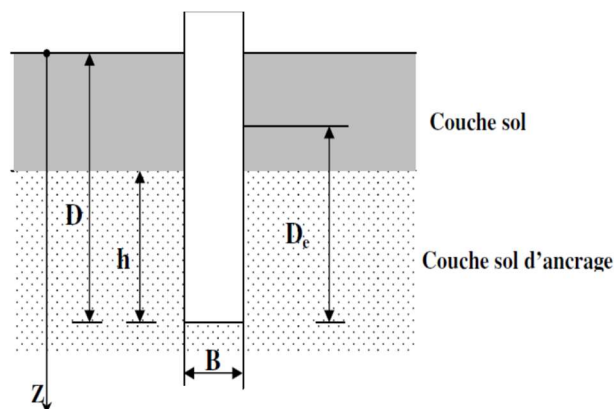


Fig. Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique D et mécanique D_e

3.4. Conclusion

Les fondations profondes sont présentées dans ce chapitre. Nous avons présenté les différentes classes des pieux, que ce soit selon leurs modes d'exécution ou bien suivant le mode de fonctionnement, par la suite, on a donné les méthodes de calcul de la capacité portante des fondations profondes pour les sols pulvérulents et les sols cohérents.

W.Khnebizi