

Chapitre 3

Fondations profondes

3.1 Classification des pieux

Traditionnellement, on classe les pieux :

- soit suivant la nature du matériau constitutif : bois, métal, béton ;
- soit suivant le mode d'introduction dans le sol :
 - pieux battus, façonnés à l'avance et mis en place, le plus souvent, par battage,
 - pieux forés, exécutés en place par bétonnage dans un forage, à l'abri ou non d'un tube métalliques.

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 extraction du sol du forage et qui, de ce fait, ne provoquent pas de refoulement du sol ;
- certains pieux particuliers dont le comportement est intermédiaire.

On se reportera aux références bibliographiques [1] [32].

3.1.1 Pieux refoulant le sol à la mise en place

Les principaux types de pieux actuels entrant dans ce groupe sont les suivants.

■ Pieu battu préfabriqué

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

■ Pieu en métal battu

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 (figure 41) :

- en forme de H ;
- en forme d'anneau (tube) ;
- de formes quelconques, obtenues par soudage de palplanches par exemple (palpieux).

Ils ne sont classés dans ce groupe que si leur base est obturée. Sinon, ils font partie des pieux particuliers (§ 3.1.3).

■ Pieu en béton foncé

Ces pieux sont constitués d'éléments cylindriques en béton armé, préfabriqués ou coffrés à l'avance, de 0,50 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.

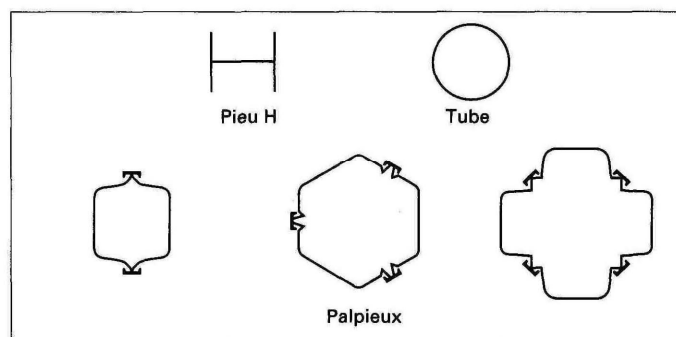


Figure 41 - Profils métalliques battus

■ Pieu en métal foncé

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.

■ Pieu battu pilonné

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 pilonnées à l'aide du mouton de battage au fur et à mesure de l'extraction du tube. Suivant les cas, les pieux peuvent être armés.

■ Pieu battu moulé (figure 42)

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.

■ Pieu battu enrobé

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 profils 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.

■ Pieu tubulaire précontraint

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 œuvre 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.

■ Pieu vissé moulé

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.

3.1.2 Pieux ne refoulant pas le sol à la mise en place

■ Pieu foré simple (et barrette exécutée dans les mêmes conditions)

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 le soutènement de parois, ne s'applique que dans les sols suffisamment cohérents et situés au-dessus des nappes phréatiques.

■ Pieu foré à la boue et barrette

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. Le forage est rempli de béton de grande ouvrabilité sous la boue, en utilisant une colonne de bétonnage (figure 43).

Les formes de section des différents types de barrettes exécutées dans ces conditions sont données à la figure 44 (page 56).

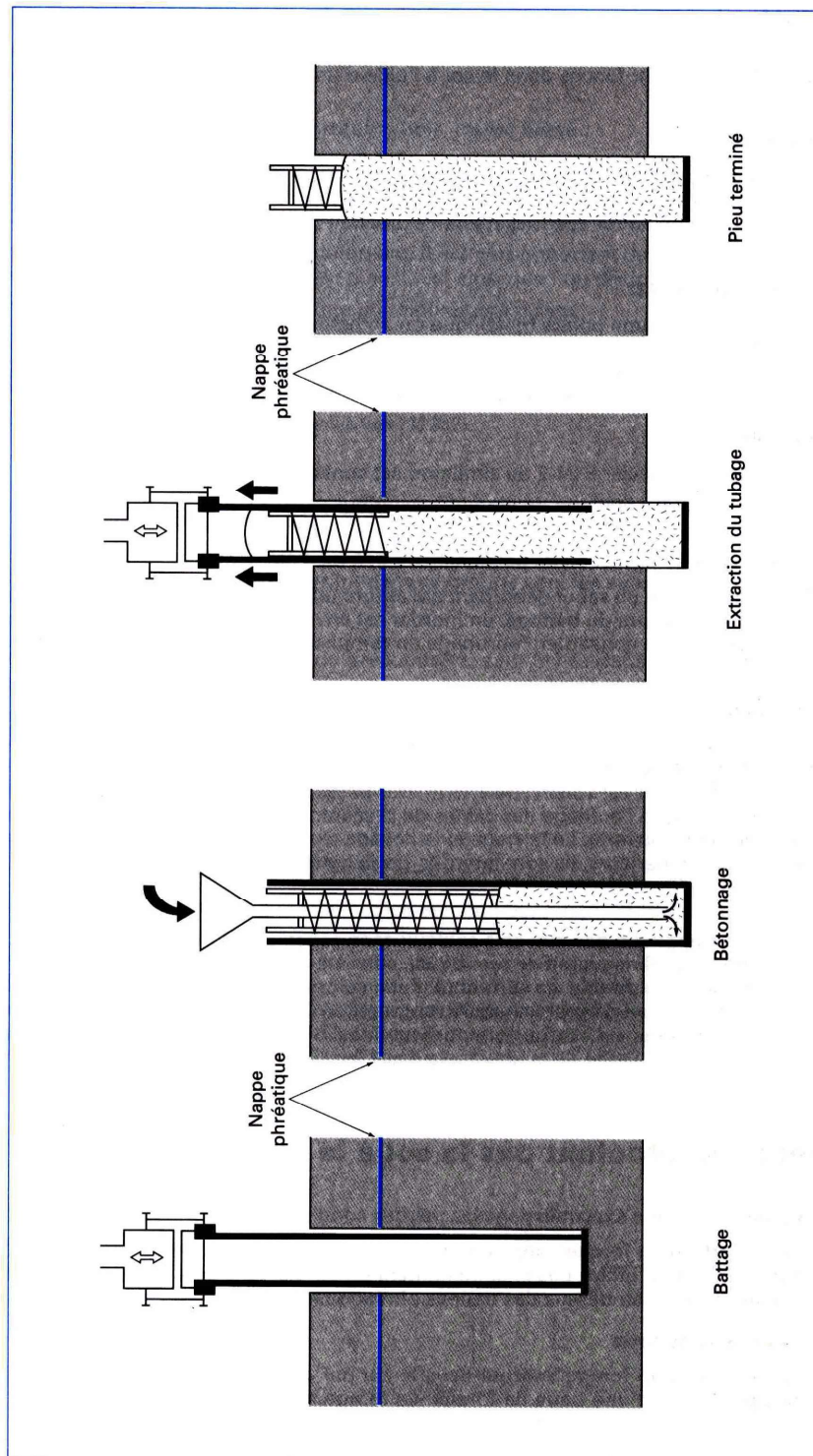


Figure 42 – Pieu battu moulé (d'après doc. Études et Travaux de Fondation)

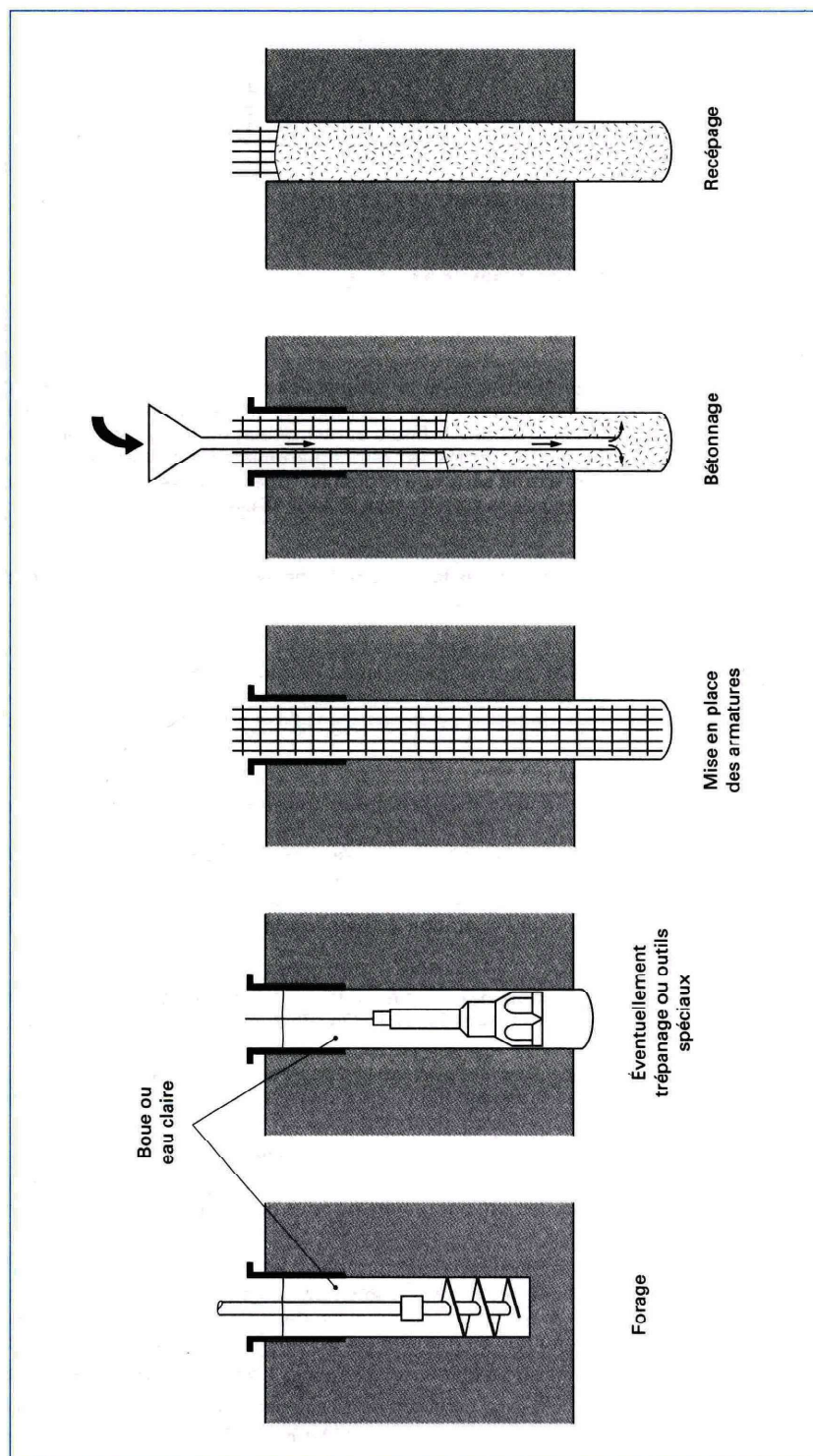


Figure 43 – Pieu foré à la boue (d'après doc. Solétanche)

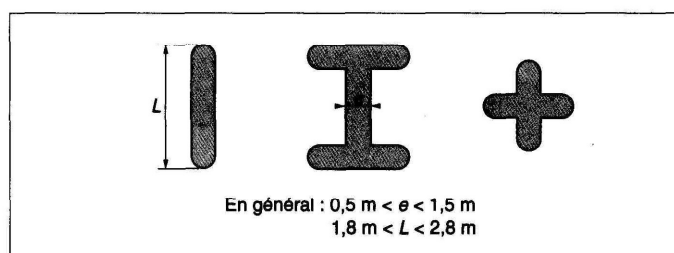


Figure 44 – Différents types de barrettes

■ Pieu foré tubé

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 (figure 45).

■ Puits

Fondations creusées à la main. Les moyens de forage employés exigent la présence d'hommes au fond du forage. Les parois du forage sont soutenues par un blindage.

■ Pieu tarière creuse

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.

On distingue trois types de matériel :

- **type 1** : la tarière creuse continue sans enregistrement spécifique des paramètres de forage et de bétonnage ;
- **type 2** : la tarière creuse continue avec enregistrement spécifique des paramètres de forage et de bétonnage (profondeur, pression du béton, quantité de béton) ;
- **type 3** : la tarière de type 2 équipée d'un tube de bétonnage télescopique rétracté pendant la perforation et plongeant dans le béton pendant l'opération de bétonnage (exemple : pieu *Starsol*, figure 46).

■ Micropieux

La technique et l'utilisation de micropieux prennent de plus en plus d'importance dans la géotechnique contemporaine, pour les problèmes les plus variés. On distingue, dorénavant, quatre types de micropieux :

- **type I** : c'est un pieu foré tubé, de diamètre inférieur à 250 mm. Le forage est équipé ou non d'armatures et rempli d'un mortier de ciment au moyen d'un tube plongeur. Le tubage est récupéré en l'obturant en tête et en le mettant sous pression au-dessus du mortier.

Ces micropieux ne sont pas utilisés pour les ouvrages de génie civil ;

- **type II** : c'est un pieu foré, de diamètre inférieur à 250 mm. Le forage est équipé d'une armature et rempli d'un coulis ou de mortier de scellement par gravité ou sous une très faible pression au moyen d'un tube plongeur.

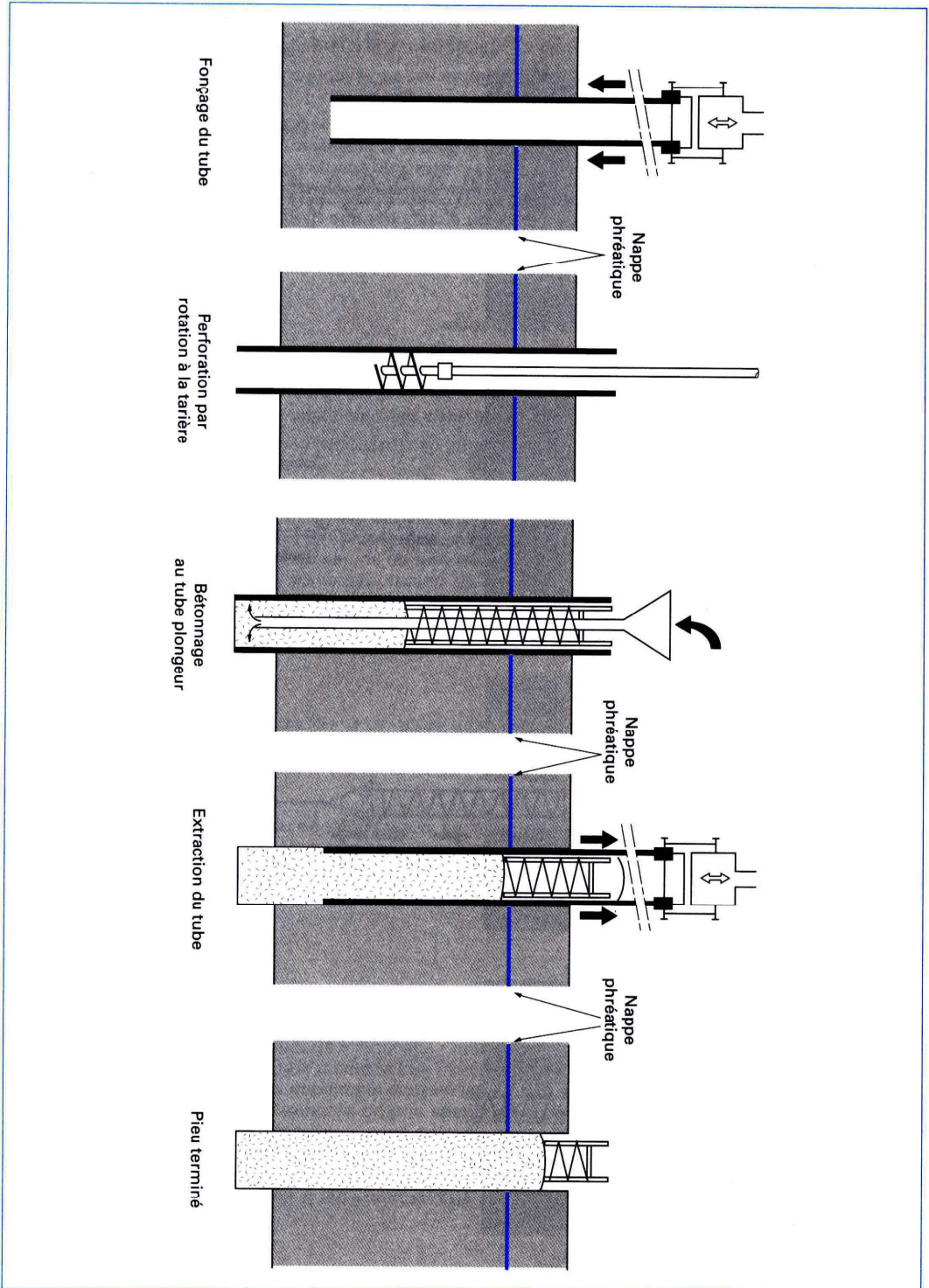
Lorsque la nature du sol le permet, le forage peut être remplacé par le lançage, le battage ou le fonçage ;

- **type III** : c'est un pieu foré, de diamètre inférieur à 250 mm. Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection qui est un tube à manchettes mis en place dans un coulis de gaine. Si l'armature est un tube métallique, ce tube peut être équipé de manchettes et tenir lieu de système d'injection.

L'injection est faite en tête à une pression supérieure ou égale à 1 MPa. Elle est globale et unitaire.

Lorsque la nature du sol le permet, le forage peut être remplacé par le lançage, le battage ou le fonçage ;

- **type IV** : c'est un pieu foré de diamètre inférieur à 250 mm. Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection qui est un tube à manchettes mis en place dans un coulis de gaine. Si l'armature est un tube métallique, ce tube peut être équipé de manchettes et tenir lieu de système d'injection.



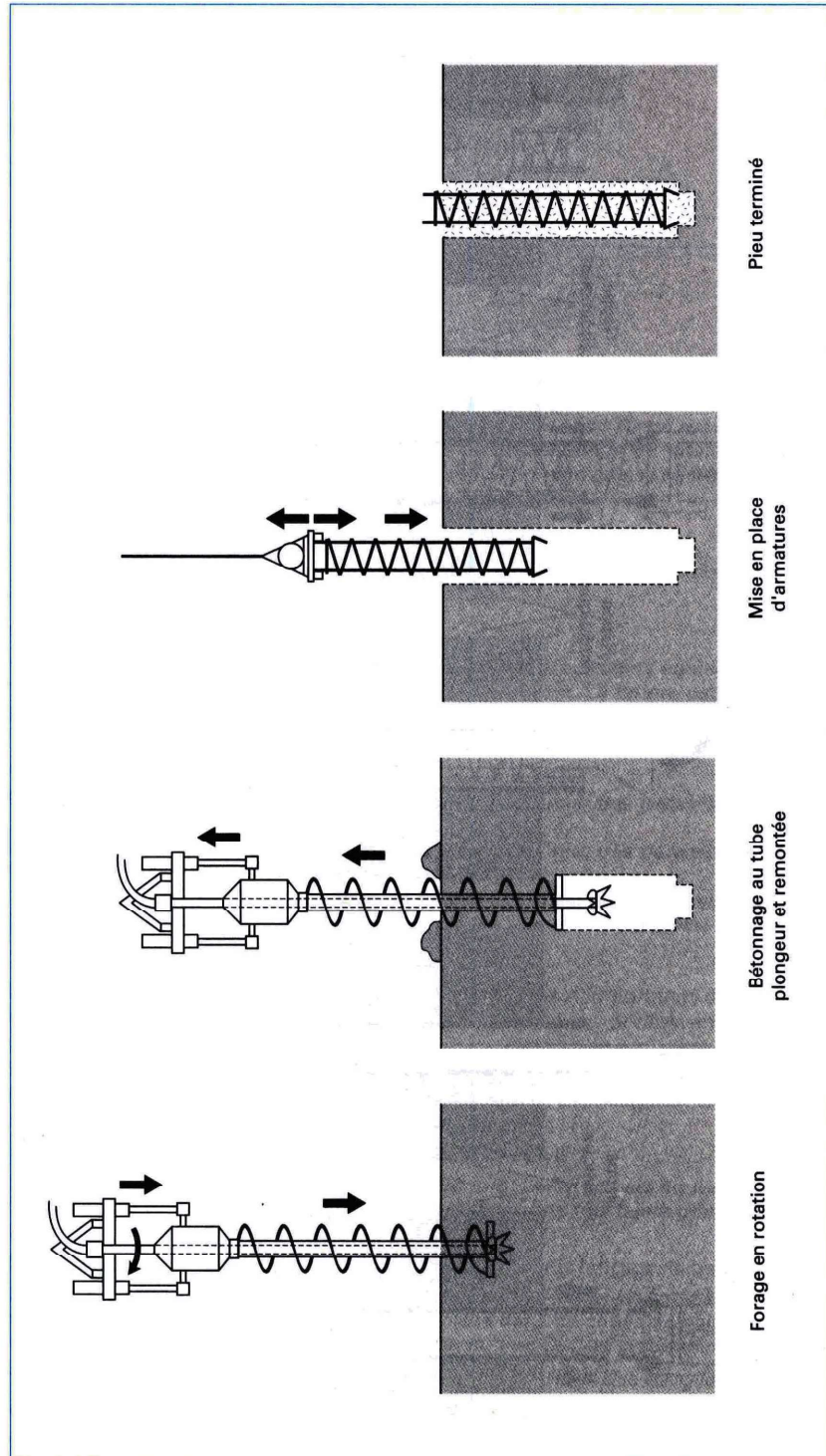


Figure 46 – Pieu *Starsol* de Solétanche

On procède à l'injection à l'obturateur simple ou double d'un coulis ou mortier de scellement à une pression d'injection supérieure ou égale à 1 MPa.

L'injection est répétitive et sélective.

Lorsque la nature du sol le permet, le forage peut être remplacé par le lançage, le battage ou le fonçage.

■ Pieu injecté, sous haute pression, de gros diamètre

Ce type de pieu, par opposition aux micropieux de type III et IV, regroupe les pieux de forts diamètres, supérieurs à 250 mm. Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection constitué par un ou plusieurs tubes à manchettes. Lorsque l'armature est un tube métallique, ce tube peut faire office de tube à manchettes. Dans certains cas, le tube métallique peut être équipé d'une succession de clapets spéciaux indépendants ou de rampes spéciales qui permettent l'injection. L'armature peut être également constituée par des profilés (H ou caissons de palplanches). Le scellement au terrain est effectué par injection sélective sous haute pression d'un coulis ou d'un mortier à partir d'un obturateur simple ou double.

3.1.3 Pieux particuliers

Il s'agit des pieux métalliques (H, tubes, palpieux) étudiés au paragraphe 3.1.1 (figure 41), mais qui sont battus sans obturation de la base. Leur section réelle en pointe est faible par rapport à l'encombrement extérieur du pieu. Pour le calcul de la force portante, ils feront l'objet de recommandations particulières.

3.2 Pieu isolé sous charge axiale

3.2.1 Définitions. Introduction

On développe ici principalement les méthodes de détermination de la capacité portante des pieux basées sur les résultats d'un essai statique de chargement ou sur les résultats d'essais pressiométriques et pénétrométriques. Ces recommandations sont issues des résultats de plus de 200 essais de chargement statique de pieux en vraie grandeur réalisés par les laboratoires des Ponts et Chaussées depuis 1964 [33]. Elles forment les bases des *Règles techniques de conception et calcul des fondations des ouvrages de génie civil* [1].

Par ailleurs, on donne des indications sur l'utilisation des méthodes dynamiques.

Tout ce qui est dit dans ce paragraphe concerne aussi bien les pieux inclinés que les pieux droits, à condition de considérer les charges axiales.

3.2.1.1 Charge limite et charge de fluage

3.2.1.1.1 Charge limite Q_ℓ

Considérons un pieu dont la base est située à la profondeur D dans un sol homogène (figure 47). 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 s_t , et la courbe représentant Q en fonction de s_t a l'allure indiquée sur la figure 47, avec une charge limite Q_ℓ correspondant à la rupture du sol. L'enfoncement ne se stabilise plus sous la charge et la vitesse d'enfoncement est relativement grande. Conventionnellement, Q_ℓ sera la charge correspondant à $s_t = B/10$ (avec B diamètre du pieu) ou à une vitesse d'enfoncement de 1 à 5 mm/min.

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

— résistance unitaire du sol sous la pointe q_p , conduisant à la charge limite de pointe :

$$Q_p = q_p A_p$$

avec A_p section droite de la pointe ;

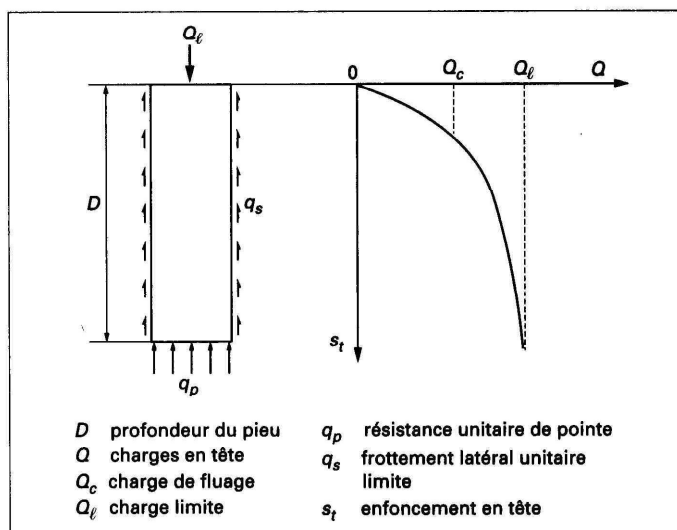


Figure 47 – Courbe de chargement axial d'un pieu

— résistance q_s due au frottement du sol sur la surface latérale du pieu ; si q_s est le frottement latéral unitaire limite, la charge limite par frottement latéral est :

$$Q_s = q_s A_s$$

avec A_s surface latérale du pieu ;

et l'on a :

$$Q_l = Q_p + Q_s$$

3.2.1.1.2 Charge de fluage. Relation avec Q_l

La courbe représentant la charge appliquée au pieu en fonction de l'enfoncement présente une partie sensiblement linéaire se limitant à une charge Q_c appelée charge de fluage (figure 47). Pour les charges supérieures à Q_c , l'enfoncement du pieu ne se stabilise plus dans le temps, à charge constante.

Les nombreux essais de chargement de pieux en vraie grandeur effectués par les laboratoires des Ponts et Chaussées ont permis d'établir des corrélations entre la charge de fluage Q_c et les charges limites de pointe Q_p et de frottement latéral Q_s . Ces corrélations sont différentes suivant le mode de mise en place du pieu dans le sol. On peut retenir :

— pour les pieux refoulant le sol :

$$Q_c = \frac{Q_p}{1,5} + \frac{Q_s}{1,5} = \frac{Q_l}{1,5}$$

— pour les pieux ne refoulant pas le sol :

$$Q_c = \frac{Q_p}{2} + \frac{Q_s}{1,5}$$

— pour les pieux travaillant en arrachement :

$$Q_p = 0 \text{ et } Q_c = Q_s/1,5$$

Les méthodes de dimensionnement données aux paragraphes 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4 et 3.2.5 visent à déterminer la charge limite Q_l . La charge de fluage Q_c en sera déduite par ces formules empiriques, sauf dans le cas de l'essai de chargement statique, où elle sera évaluée directement.

3.2.1.2 Théories classiques rigides-plastiques

Les théories classiques du calcul de la charge limite axiale d'un pieu 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 (par l'intermédiaire de la contrainte verticale q_z due au poids des terres au-dessus du niveau z considéré).

Ainsi, dans les **sols frottants**, pour un sol homogène de poids volumique déjaugé γ' :

$$q_p = c' N_c + q'_0 N_q$$

avec $q'_0 = \gamma' D$ si D est la longueur ou la profondeur du pieu,

N_c et N_q facteurs de capacité portante de cohésion et de profondeur, fonctions de φ uniquement,

et : $q_s = K q_z \tan \delta + c'$

avec $q_z = \gamma' z$,

K rapport entre la contrainte normale au pieu et la contrainte parallèle à l'axe à la profondeur z (assimilée à la contrainte verticale q_z),

δ angle de frottement entre le sol et le pieu (fraction prise souvent égale à 2/3 de l'angle de frottement interne du sol).

Suivant les auteurs et suivant les schémas de rupture adoptés (figure 48), les coefficients N_c et N_q peuvent varier dans le rapport de 1 à 10, et même davantage.

Pour les **sols purement cohérents** ($\varphi = 0$ et $c = c_u$) :

$$q_p = N_c c_u + q_0$$

avec N_c souvent pris égal à 9,

et : $q_s = \alpha c_u$

avec $\alpha \leq 1$ suivant la nature du sol, du pieu et de sa mise en œuvre.

On ne développera pas plus ici ces théories classiques. Elles sont, en effet, de moins en moins utilisées en France pour les ouvrages de génie civil, notamment grâce au développement de méthodes empiriques basées sur les résultats d'essais de reconnaissance en place (pressiomètre, pénétromètre, principalement) et les résultats d'essais de pieux en vraie grandeur, méthodes jugées opérationnelles et plus fiables.

On trouvera dans tous les ouvrages de base de mécanique des sols et des fondations de plus amples informations sur les théories classiques de capacité portante des pieux.

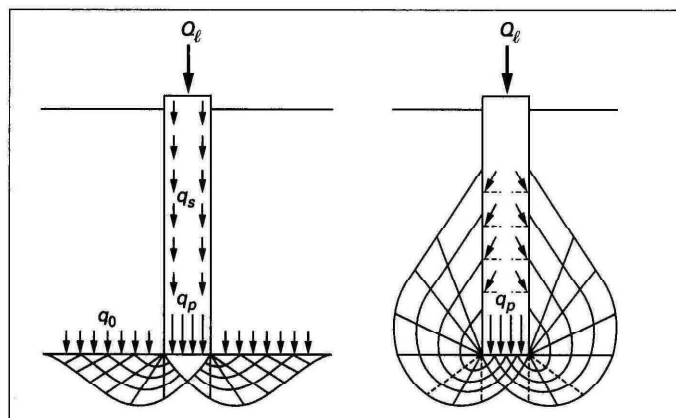


Figure 48 – Exemples de schémas de rupture selon les théories classiques