



# Foxta v4

|  |
|--|
| <b>Manuel utilisateur – Partie C.2 – Notice technique du module FONDPROF</b> |
|--|

| <b>Date</b> | <b>Révision</b> | <b>Etabli par</b> | <b>Commentaires</b> |
|-------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 06/07/2020  | Ind A           | F. Cuira          | Première émission   |
|             |                 |                   |                     |
|             |                 |                   |                     |

# Table des matières

|  |    |
|--|----|
| 1. Préambule .....   | 3  |
| 2. Définitions .....   | 4  |
| 2.1. Classification des fondations profondes .....                     | 4  |
| 2.2. Notion de charge limite $Q_l$ .....                               | 4  |
| 2.3. Notion de charge critique de fluage $Q_c$ .....                   | 5  |
| 2.4. Section de calcul.....  | 5  |
| 3. Prévion des charges limites $Q_s$ et $Q_p$ .....                    | 6  |
| 3.1. A partir des résultats d’essais pressiométriques (PMT) .....      | 6  |
| 3.1.1. Estimation de $Q_s$ .....                                       | 6  |
| 3.1.2. Estimation de $Q_p$ .....                                       | 8  |
| 3.2. A partir des résultats d’essais pressiométriques (CPT) .....      | 10 |
| 3.2.1. Estimation de $Q_s$ .....                                       | 10 |
| 3.2.2. Estimation de $Q_p$ .....                                       | 12 |
| 4. Formalisme de justification ELS/ELU .....                           | 14 |
| 4.1. Principe.....   | 14 |
| 4.2. Mise en œuvre – notion de courbe de portance .....                | 15 |
| 4.3. Traitement de certains cas particuliers .....                     | 16 |
| 4.3.1. Pieu de grande longueur .....                                   | 16 |
| 4.3.2. Effet de groupe.....  | 16 |
| 4.3.3. Pieu travaillant en traction à l’ELS QP .....                   | 16 |
| 4.4. Contrôle de la contrainte de compression d’un pieu en béton ..... | 17 |

# 1. Préambule

Le module FONDPROF est un programme de calcul qui permet de prévoir la charge limite  $Q_l$ , ainsi que les charges maximales autorisées sous sollicitations ELU et ELS à partir des résultats d'essais pressiométriques ou pénétrométriques. Il est basé sur les concepts et formulations recommandés par les règlements aux états limites en vigueur en France (actuellement la norme NF P 94 262, qui est la norme d'application française de l'Eurocode 7 pour les fondations profondes). FONDPROF permet également une vérification selon les anciennes règles du Fascicule 62 - Titre V (conservées uniquement à titre indicatif).

Le concept de fondation profonde tel que défini dans la norme NF P 94 262 s'applique aux massifs de fondation dont la base est située à une profondeur  $D$  supérieure ou égale à 5,0 fois le diamètre de forage  $B$ . Pour  $D < 5,0 B$ , il convient d'appliquer des modèles adaptés :

- aux fondations semi-profondes pour  $2,5B < D < 5,0 B$  (cf. module SEMIPROF) ;
- aux fondations superficielles pour  $D < 2,5B$  (cf. module FONDSUP).

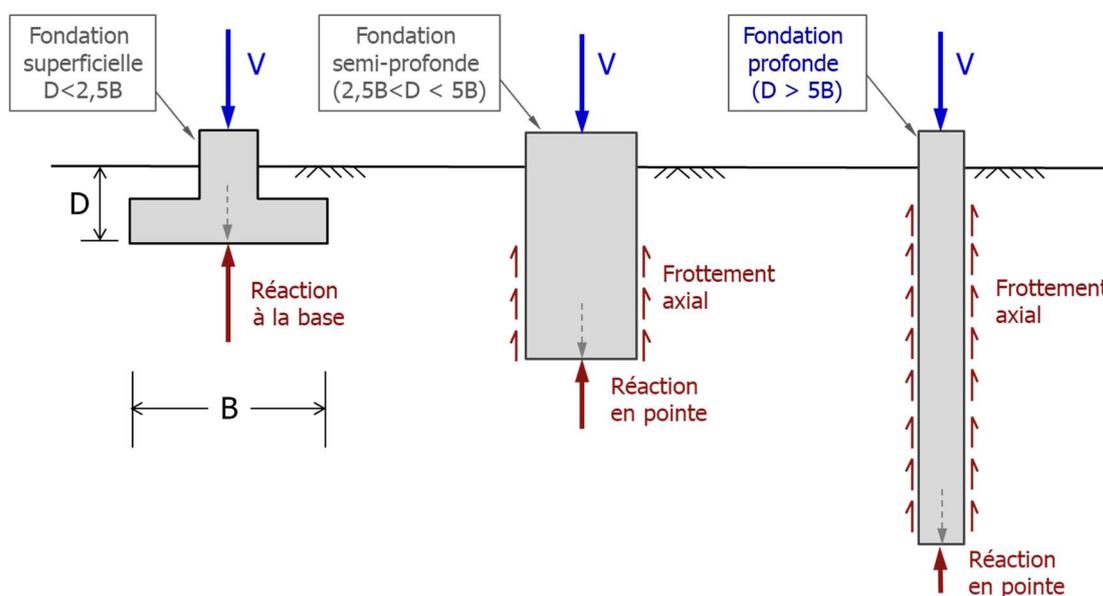


Figure 1 : Domaine conventionnel d'application du concept de fondation profonde

Les calculs réalisés à l'aide du module FONDPROF permettent de couvrir les vérifications liées à capacité portante géotechnique à partir d'un modèle pressiométrique (PMT) ou pénétrométrique (CPT) du terrain. FONDPROF permet également de vérifier la résistance structurale du béton en compression (pour une fondation en béton). Au sens de la norme NF P 94 262, la procédure de calcul appliquée par FONDPROF s'apparente à la procédure du « modèle de terrain ».

Les vérifications menées dans FONDPROF doivent dans certains cas être complétées par :

- une vérification du tassement et des effets de frottement négatif éventuels à l'aide du module Taspie+ ;
- une vérification du comportement transversal à l'aide du module Piecoef+ (charges transversales en tête ou poussées transversales du terrain en profondeur d'origine statique ou sismique).

## 2. Définitions

### 2.1. Classification des fondations profondes

En France, une identification des techniques de pieu par classes et par catégories est proposée notamment pour l'utilisation des méthodes pressiométrique et pénétrométrique pour la prévision de la capacité portante (NF P 94 262). Ces classes et ces catégories de pieux sont données dans le tableau suivant.

| Classe | Catégorie | Technique de mise en œuvre                              |
|--------|-----------|---|
| 1      | 1         | Foré simple (pieux et barrettes)                        |
|        | 2         | Foré boue (pieux et barrettes)                          |
|        | 3         | Foré tubé (virole perdue)                               |
|        | 4         | Foré tubé (virole récupérée)                            |
|        | 5         | Foré simple ou boue avec rainurage ou puits             |
| 2      | 6         | Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation |
| 3      | 7         | Vissé moulé   |
|        | 8         | Vissé tubé  |
| 4      | 9         | Battu béton préfabriqué ou précontraint                 |
|        | 10        | Battu enrobé (béton - mortier - coulis)                 |
|        | 11        | Battu moulé   |
|        | 12        | Battu acier fermé                                       |
| 5      | 13        | Battu acier ouvert                                      |
| 6      | 14        | Profilé H battu   |
|        | 15        | Profilé H battu injecté                                 |
| 7      | 16        | Palplanches battues                                     |
| 1 bis  | 17        | Micropieu type I  |
|        | 18        | Micropieu type II                                       |
| 8      | 19        | Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)           |
|        | 20        | Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)            |

Tableau 1 : Classes et catégories de pieux (NF P 94 262)

### 2.2. Notion de charge limite $Q_l$

On considère une fondation profonde chargée axialement en tête par une charge  $Q$ . 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 :  
 $Q_p = A_p q_p$  avec  $A_p$  l'aire de la pointe ;
- Résistance due au frottement du sol sur la surface latérale du pieu :  
 $Q_s = \sum A_{si} q_{si}$  avec  $q_{si}$  et  $A_{si}$  respectivement le frottement axial unitaire limite et l'aire du fût du pieu dans la couche « i » ;

Et l'on a :

- Pour une fondation profonde travaillant en compression  $Q_l = Q_s + Q_p$
- Pour une fondation profonde travaillant en traction  $Q_l = Q_s$

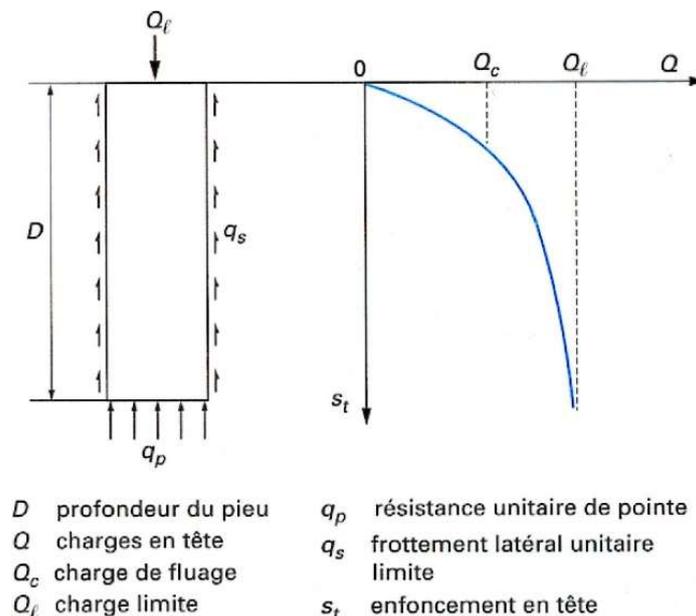


Figure 2 : Courbe de charge enfoncement d'une fondation profonde isolée

### 2.3. Notion de charge critique de fluage $Q_c$

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 critique de fluage (Figure 2). 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 ont permis d'établir des corrélations entre la charge critique de fluage et les résistances de pointe  $Q_p$  et par frottement axial  $Q_s$ . Ces corrélations sont différentes suivant le mode de mise en place du pieu dans le sol. La norme NF P 94 262 propose les corrélations suivantes :

- pour les pieux travaillant en compression refoulant le sol  $Q_c = 0,7Q_s + 0,7Q_p$
- pour les pieux travaillant en compression ne refoulant pas le sol  $Q_c = 0,7Q_s + 0,5Q_p$
- pour les pieux travaillant en traction  $Q_c = 0,7Q_s$

Les méthodes de dimensionnement exposées en §3 permettent de prédire les termes  $Q_s$  et  $Q_p$  en fonction du mode de mise en œuvre de la fondation profonde.

### 2.4. Section de calcul

La section du pieu est caractérisée géométriquement à l'aide de deux paramètres :

- L'aire de la pointe notée  $A_p$  ;
- Périmètre du fût noté  $P$ .

Pour un pieu de section circulaire pleine de diamètre B, ce dernier est défini par l'utilisateur et le programme en déduit l'aire de la pointe et le périmètre du fût comme suit :

$$A_p = \frac{\pi}{4} B^2 \quad \text{et} \quad P = \pi B$$

Pour un pieu de section non circulaire, les valeurs de  $A_p$  et  $P$  sont imposées par l'utilisateur. Les règles de calcul semi-empiriques utilisées dans FONDPROF nécessitent la définition d'un diamètre équivalent de la pointe qui est estimée par le programme comme suit :

$$B_{eq} = 2 \sqrt{\frac{A_p}{\pi}}$$

Toujours dans le cas d'un pieu de section non circulaire, il convient de déterminer les valeurs de  $A_p$  et  $P$  selon les indications de la figure suivante. En particulier, pour un pieu tubulaire,  $A_p$  désigne la section « pleine » du tube (que la pointe soit fermée ou ouverte).

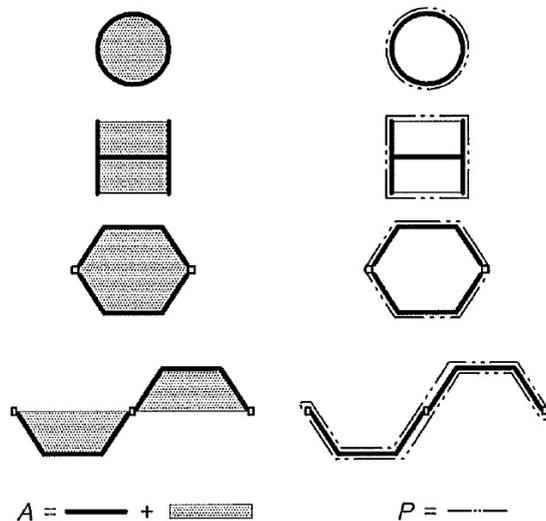


Figure 3: Choix de  $A_p$  et  $P$  pour un pieu de section non circulaire

### 3. Prévision des charges limites $Q_s$ et $Q_p$

#### 3.1. A partir des résultats d'essais pressiométriques (PMT)

##### 3.1.1. Estimation de $Q_s$

La résistance par frottement est déterminée au moyen de la relation :

$$Q_s = P \int_0^D q_s(z) dz$$

Où  $D$  est la profondeur de la fondation profonde et  $q_s(z)$  le frottement axial unitaire limite à la profondeur  $z$ . Le frottement axial  $q_s$  est déterminé par la relation suivante :

$$q_s = \min(\alpha_{\text{pieu-sol}} f_{\text{sol}}; q_{s\text{max}}) \quad \text{avec} \quad f_{\text{sol}} = (a \cdot p_1^* + b)(1 - e^{-c \cdot p_1^*})$$

Où  $p_l^*$  est la pression limite nette mesurée au pressiomètre de Ménard. Les paramètres  $\alpha_{\text{pieu-sol}}$ , a, b et c sont présentés dans le Tableau 2 et le Tableau 3. Le paramètre  $\alpha_{\text{pieu-sol}}$  dépend à la fois du type de sol et de la catégorie de pieu, tandis que la fonction  $f_{\text{sol}}$ , définie par les paramètres a, b et c, ne dépend que du type de sol.

| Catégorie de pieux | Argiles<br>% CaCO <sub>3</sub> < 30%<br>Limons<br>Sols intermédiaires | Sols intermédiaires<br>Sables<br>Graves | Craies | Marnes et calcaires marneux | Roches altérées ou fragmentées |
|--------------------|---|---|--------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1                  | 1,1   | 1                                       | 1,8    | 1,5                         | 1,6                            |
| 2                  | 1,25  | 1,4                                     | 1,8    | 1,5                         | 1,6                            |
| 3                  | 0,7   | 0,6                                     | 0,5    | 0,9                         | -                              |
| 4                  | 1,25  | 1,4                                     | 1,7    | 1,4                         | -                              |
| 5                  | 1,3   | -                                       | -      | -                           | -                              |
| 6                  | 1,5   | 1,8                                     | 2,1    | 1,6                         | 1,6                            |
| 7                  | 1,9   | 2,1                                     | 1,7    | 1,7                         | -                              |
| 8                  | 0,6   | 0,6                                     | 1      | 0,7                         | -                              |
| 9                  | 1,1   | 1,4                                     | 1      | 0,9                         | -                              |
| 10                 | 2   | 2,1                                     | 1,9    | 1,6                         | -                              |
| 11                 | 1,2   | 1,4                                     | 2,1    | 1                           | -                              |
| 12                 | 0,8   | 1,2                                     | 0,4    | 0,9                         | -                              |
| 13                 | 1,2   | 0,7                                     | 0,5    | 1                           | 1,0                            |
| 14                 | 1,1   | 1                                       | 0,4    | 1                           | 0,9                            |
| 15                 | 2,7   | 2,9                                     | 2,4    | 2,4                         | 2,4                            |
| 16                 | 0,9   | 0,8                                     | 0,4    | 1,2                         | 1,2                            |
| 17                 | -   | -                                       | -      | -                           | -                              |
| 18                 | -   | -                                       | -      | -                           | -                              |
| 19                 | 2,7   | 2,9                                     | 2,4    | 2,4                         | 2,4                            |
| 20                 | 3,4   | 3,8                                     | 3,1    | 3,1                         | 3,1                            |

Pour les pieux de catégorie 13, 14, 15 et 16 mis en œuvre par vibrofonçage au lieu de battage, il y a lieu de faire un abattement de 30 % sur les valeurs de  $q_s$ .

Pour les pieux de longueur supérieure à 25 m, le frottement axial unitaire  $q_s$  est divisé par deux pour les zones du pieu situées à plus de 25 m de la pointe.

Pour les micropieux et les pieux de catégorie 17 et 18, il convient de considérer les valeurs de frottement axial unitaire des techniques de pieux les plus proches sur le plan de la technologie.

Tableau 2 : Valeur du paramètre  $\alpha_{\text{pieu-sol}}$  pour la méthode pressiométrique

| Type de sol | Argiles<br>% CaCO <sub>3</sub> < 30%<br>Limons Sols intermédiaires | Sols intermédiaires<br>Sable<br>Grave | Craies | Marnes et calcaires marneux | Roches altérées ou fragmentées |
|-------------|--|---------------------------------------|--------|-----------------------------|--------------------------------|
| a           | 0,003  | 0,010                                 | 0,007  | 0,008                       | 0,010                          |
| b           | 0,04   | 0,06                                  | 0,07   | 0,08                        | 0,08                           |
| c           | 3,5  | 1,2                                   | 1,3    | 3,0                         | 3,0                            |

Tableau 3 : Valeur des paramètres a, b et c pour la méthode pressiométrique ( $p_l^*$  et  $f_{\text{sol}}$  en MPa)

Le Tableau 4 présente les valeurs maximales de frottement axial unitaire  $q_{smax}$ . Ces valeurs sont communes aux méthodes pressiométrique et pénétrométrique.

| Catégorie de pieux | $q_{smax}$ en kPa                                  |                        |                  |        |                                   |                                   |
|--------------------|--|------------------------|------------------|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                    | Argiles<br>% CaCO <sub>3</sub> <<br>30 %<br>Limons | Sols<br>intermédiaires | Sables<br>Graves | Craies | Marnes et<br>calcaires<br>marneux | Roches altérées<br>ou fragmentées |
| 1                  | 90   | 90                     | 90               | 200    | 170                               | 200                               |
| 2                  | 90   | 90                     | 90               | 200    | 170                               | 200                               |
| 3                  | 50   | 50                     | 50               | 50     | 90                                | -                                 |
| 4                  | 90   | 90                     | 90               | 170    | 170                               | -                                 |
| 5                  | 90   | 90                     | -                | -      | -                                 | -                                 |
| 6                  | 90   | 90                     | 170              | 200    | 200                               | 200                               |
| 7                  | 130  | 130                    | 200              | 170    | 170                               | -                                 |
| 8                  | 50   | 50                     | 90               | 90     | 90                                | -                                 |
| 9                  | 130  | 130                    | 130              | 90     | 90                                | -                                 |
| 10                 | 170  | 170                    | 260              | 200    | 200                               | -                                 |
| 11                 | 90   | 90                     | 130              | 260    | 200                               | -                                 |
| 12                 | 90   | 90                     | 90               | 50     | 90                                | -                                 |
| 13                 | 90   | 90                     | 50               | 50     | 90                                | 90                                |
| 14                 | 90   | 90                     | 130              | 50     | 90                                | 90                                |
| 15                 | 200  | 200                    | 380              | 320    | 320                               | 320                               |
| 16                 | 90   | 90                     | 50               | 50     | 90                                | 90                                |
| 17                 | -  | -                      | -                | -      | -                                 | -                                 |
| 18                 | -  | -                      | -                | -      | -                                 | -                                 |
| 19                 | 200  | 200                    | 380              | 320    | 320                               | 320                               |
| 20                 | 200  | 200                    | 440              | 440    | 440                               | 500                               |

Tableau 4 : Valeurs maximales du frottement axial unitaire limite  $q_{smax}$  pour les méthodes pressiométrique et pénétrométrique

### 3.1.2. Estimation de $Q_p$

#### 3.1.2.1. Expression générale

La résistance en pointe  $Q_p$  est déterminée par la relation :

$$Q_p = A_p q_p \quad \text{avec} \quad q_p = k_p \cdot p_{le}^*$$

Où :

- $q_p$      contrainte limite en pointe ;
- $A_p$      aire de la pointe du pieu (voir §2.4);

- $p_{le}^*$  pression limite nette équivalente (voir §3.1.2.2) ;
- $k_p$  facteur de portance pressiométrique (voir §3.1.2.4).

### 3.1.2.2. Pression limite nette équivalente $p_{le}^*$

La pression limite nette équivalente  $p_{le}^*$  est une pression moyenne autour de la base de la fondation profonde dans le cas d'une formation porteuse sensiblement homogène. Elle est déterminée de la manière suivante (Figure 4) :

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

avec :

- $p_l^*(z) = p_1(z) - p_0(z)$  est la pression limite nette mesurée à la profondeur  $z$  ;
- $a = B/2$  si  $B > 1$  m ;  $a = 0,5$  m si  $B < 1$  m ;
- $b = \min \{a, h\}$  où  $h$  est la hauteur de l'élément de fondation dans la couche porteuse.

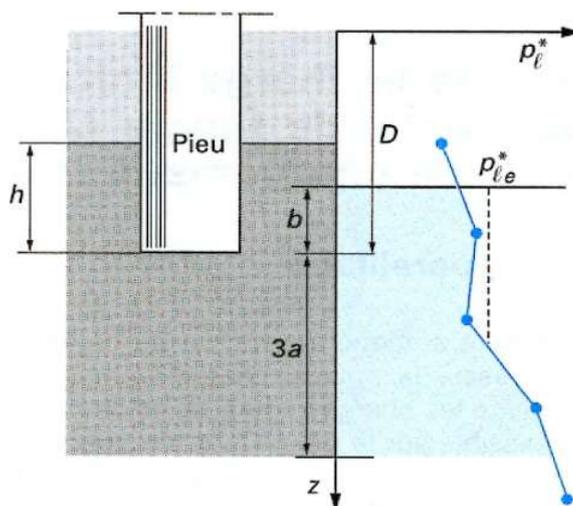


Figure 4 : Définition de la pression limite équivalente au pressiomètre

### 3.1.2.3. Profondeur d'encastrement effective $D_{ef}$

La profondeur d'encastrement effective  $D_{ef}$  est définie à l'aide de la relation :

$$D_{ef} = \frac{1}{p_{le}^*} \int_{D-10B}^D p_l^*(z) dz$$

Où  $B$  est le diamètre (équivalent) de la fondation et  $p_{le}^*$  est telle que définie au paragraphe précédent.

### 3.1.2.4. Facteur de portance pressiométrique $k_p$

Le facteur de portance pressiométrique est évalué au moyen de la relation suivante :

$$k_p = \min \left( 1 + [k_{pma} - 1] \frac{D_{ef}}{5B}; k_{pmax} \right)$$

Les valeurs maximales du facteur de pointe  $k_{pmax}$  sont présentées dans le tableau suivant. Elles dépendent des classes de pieu (Tableau 1) ainsi que des catégories conventionnelles de sols.

Pour les profilés métalliques battus (pieux de classes 5, 6 et 7), l'aire de la pointe du pieu  $A_p$  est déterminée selon les indications de la Figure 3.

| Terrain        | Argiles<br>% CaCO <sub>3</sub> < 30 %<br>Limons<br>Sols intermédiaires | Sols<br>intermédiaires<br>Sables<br>Graves | Craies | Marnes et<br>calcaires<br>marneux | Roches<br>altérées et<br>fragmentées |
|----------------|--|--|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Classe de pieu |  |  |        |                                   |                                      |
| 1              | 1,15   | 1,10                                       | 1,45   | 1,45                              | 1,45                                 |
| 2              | 1,30   | 1,65                                       | 1,60   | 1,60                              | 2,00                                 |
| 3              | 1,55   | 3,20                                       | 2,35   | 2,10                              | 2,10                                 |
| 4              | 1,35   | 3,10                                       | 2,30   | 2,30                              | 2,30                                 |
| 5              | 1,00   | 1,90                                       | 1,40   | 1,40                              | 1,20                                 |
| 6              | 1,20   | 3,10                                       | 1,70   | 2,20                              | 1,50                                 |
| 7              | 1,00   | 1,00                                       | 1,00   | 1,00                              | 1,20                                 |
| 8              | 1,15   | 1,10                                       | 1,45   | 1,45                              | 1,45                                 |

Pour les pieux de classe 5, 6 et 7 mis en œuvre par vibrofonçage, au lieu de battage, il y a lieu de faire un abattement de 50 % sur le facteur  $k_p$ .

Tableau 5 : Valeur du facteur de portance pressiométrique  $k_{pmax}$  pour un encastrement relatif  $D_{ef}/B \geq 5$

## 3.2. A partir des résultats d'essais pressiométriques (CPT)

### 3.2.1. Estimation de $Q_s$

La résistance par frottement est déterminée à partir de la relation :

$$Q_s = P \int_0^D q_s(z) dz$$

Où  $D$  est la profondeur de la fondation profonde et  $q_s(z)$  le frottement axial unitaire limite à la profondeur  $z$ . Le frottement axial  $q_s$  est déterminé par la relation suivante :

$$q_s = \min(\alpha_{\text{pieu-sol}} f_{\text{sol}}; q_{smax}) \quad \text{avec} \quad f_{\text{sol}} = (a \cdot q_c + b) (1 - e^{-c \cdot q_c})$$

Où  $q_c$  est la résistance de cône mesurée au pénétromètre statique. Les paramètres  $\alpha_{\text{pieu-sol}}$ ,  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont présentés dans le Tableau 6 et le Tableau 7. Le paramètre  $\alpha_{\text{pieu-sol}}$  dépend à la fois du type de sol et de la catégorie de pieu, tandis que la fonction  $f_{\text{sol}}$ , définie par les paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$ , ne dépend que du type de sol.

Les valeurs de  $q_{smax}$  sont données dans le Tableau 4.

| Type de sol | Argiles<br>% CaCO <sub>3</sub> < 30 %<br>Limens | Sols<br>intermédiaires | Sables<br>Graves | Craies | Marnes et<br>calcaires<br>Marneux | Roches<br>altérées ou<br>fragmentées |
|-------------|---|------------------------|------------------|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| a           | 0,0018  | 0,0015                 | 0,0012           | 0,0015 | 0,0015                            | 0,0015                               |
| b           | 0,10  | 0,10                   | 0,10             | 0,10   | 0,10                              | 0,10                                 |
| c           | 0,40  | 0,25                   | 0,15             | 0,25   | 0,25                              | 0,25                                 |

Tableau 6 : Valeur des paramètres a, b et c pour la méthode pénétrométrique ( $q_c$  et  $f_{sol}$  en MPa)

| Catégorie de pieux | Types de sols                                      |                        |                  |        |                                   |                                      |
|--------------------|--|------------------------|------------------|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|
|                    | Argiles<br>% CaCO <sub>3</sub><br>< 30 %<br>Limens | Sols<br>intermédiaires | Sables<br>Graves | Craies | Marnes et<br>calcaires<br>marneux | Roches<br>altérées ou<br>fragmentées |
| 1                  | 0,55   | 0,65                   | 0,70             | 0,80   | 1,40                              | 1,50                                 |
| 2                  | 0,65   | 0,80                   | 1,00             | 0,80   | 1,40                              | 1,50                                 |
| 3                  | 0,35   | 0,40                   | 0,40             | 0,25   | 0,85                              | -                                    |
| 4                  | 0,65   | 0,80                   | 1,00             | 0,75   | 1,30                              | -                                    |
| 5                  | 0,70   | 0,85                   | -                | -      | -                                 | -                                    |
| 6                  | 0,75   | 0,90                   | 1,25             | 0,95   | 1,50                              | 1,50                                 |
| 7                  | 0,95   | 1,15                   | 1,45             | 0,75   | 1,60                              | -                                    |
| 8                  | 0,30   | 0,35                   | 0,40             | 0,45   | 0,65                              | -                                    |
| 9                  | 0,55   | 0,65                   | 1,00             | 0,45   | 0,85                              | -                                    |
| 10                 | 1,00   | 1,20                   | 1,45             | 0,85   | 1,50                              | -                                    |
| 11                 | 0,60   | 0,70                   | 1,00             | 0,95   | 0,95                              | -                                    |
| 12                 | 0,40   | 0,50                   | 0,85             | 0,20   | 0,85                              | -                                    |
| 13                 | 0,60   | 0,70                   | 0,50             | 0,25   | 0,95                              | 0,95                                 |
| 14                 | 0,55   | 0,65                   | 0,70             | 0,20   | 0,95                              | 0,85                                 |
| 15                 | 1,35   | 1,60                   | 2,00             | 1,10   | 2,25                              | 2,25                                 |
| 16                 | 0,45   | 0,55                   | 0,55             | 0,20   | 1,25                              | 1,15                                 |
| 17                 | -  | -                      | -                | -      | -                                 | -                                    |
| 18                 | -  | -                      | -                | -      | -                                 | -                                    |
| 19                 | 1,35   | 1,60                   | 2,00             | 1,10   | 2,25                              | 2,25                                 |
| 20                 | 1,70   | 2,05                   | 2,65             | 1,40   | 2,90                              | 2,90                                 |

Pour les pieux de catégorie 13, 14, 15 et 16 mis en œuvre par vibrofonçage, au lieu de battage, il y a lieu de faire un abattement de 30 % sur les valeurs de  $q_s$ .  
 Pour les pieux de longueur supérieure à 25 m, le frottement axial unitaire  $q_s$  est divisé par 2 pour les zones du pieu situées à plus de 25 m de la pointe.  
 Pour les micropieux et les pieux de catégorie 17 et 18, il convient de considérer les valeurs de frottement axial unitaire des techniques de pieux les plus proches sur le plan de la technologie.

Tableau 7 : Valeur du paramètre  $\alpha_{\text{pieu-sol}}$  pour la méthode pénétrométrique

### 3.2.2. Estimation de $Q_p$

#### 3.2.2.1. Expression générale

La résistance en pointe  $Q_p$  est déterminée par la relation :

$$Q_p = A_p q_p \quad \text{avec} \quad q_p = k_c \cdot q_{ce}$$

Où :

- $q_p$      contrainte limite en pointe ;
- $A_p$      aire de la pointe du pieu (voir §2.4);
- $q_{ce}$     résistance de cône équivalente (voir §3.2.2.2) ;
- $k_c$      facteur de portance pénétrométrique (voir §3.2.2.4).

#### 3.2.2.2. Résistance de cône équivalente $q_{ce}$

La résistance de cône équivalente  $q_{ce}$  est une résistance moyenne autour de la base de la fondation profonde dans le cas d'une formation porteuse sensiblement homogène. Elle est déterminée de la manière suivante (Figure 5) :

$$q_{ce} = \frac{1}{b + 3a} \int_{D-b}^{D+3a} q_{cc}(z) dz$$

avec :

- $q_{cc}$  est la résistance de cône écrêtée à  $1,3 q_{cm}$  (voir ci-après) ;
- $a = B/2$  si  $B > 1$  m ;  $a = 0,5$  m si  $B < 1$  m ;
- $b = \min \{a, h\}$  où  $h$  est la hauteur de l'élément de fondation dans la couche porteuse.

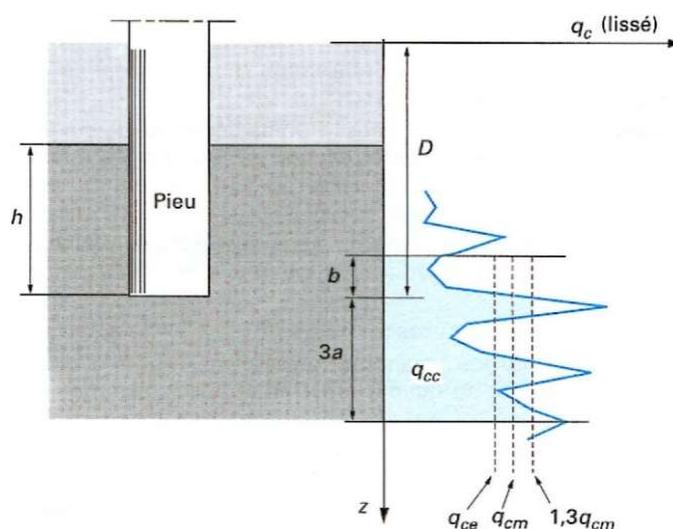


Figure 5 : Définition de la résistance de cône écrêtée

La valeur de  $q_{cc}(z)$  est obtenue à l'aide de la relation suivante :

$$q_{cc}(z) = \min(q_c(z), q_{cm}) \quad \text{avec} \quad q_{cm} = \frac{1}{b + 3a} \int_{D-b}^{D+3a} q_c(z) dz$$

### 3.2.2.3. Profondeur d'encastrement effective $D_{ef}$

La profondeur d'encastrement effective est définie à l'aide de la relation :

$$D_{ef} = \frac{1}{q_{ce}} \int_{D-10B}^D q_{cc}(z) dz$$

Où B est le diamètre (équivalent) de la fondation,  $q_{ce}$  et  $q_{cc}$  sont telles que définies en §3.2.2.2.

### 3.2.2.4. Facteur de portance pénétrométrique $k_c$

Le facteur de portance pénétrométrique  $k_c$  est évalué au moyen de la relation suivante :

$$k_c = \min\left(k_{cmin} + [k_{cmax} - k_{cmin}] \frac{D_{ef}}{5B}; k_{cmax}\right)$$

Les valeurs minimales du facteur de pointe  $k_{cmin}$  sont :

- pour les argiles et limons  $k_{cmin} = 0,30$  ;
- pour les sols intermédiaires  $k_{cmin} = 0,20$  ;
- pour les sables et graves  $k_{cmin} = 0,10$  ;
- pour les autres types de terrain  $k_{cmin} = 0,15$ .

Les valeurs maximales du facteur de pointe  $k_{cmax}$  sont présentées dans le tableau suivant. Elles dépendent des classes de pieu (Tableau 1) ainsi que des catégories conventionnelles de sols. Pour les profilés métalliques battus (pieux de classes 5, 6 et 7), l'aire de la pointe du pieu  $A_p$  est déterminée selon les indications de la Figure 3.

| Terrain | Argiles<br>% CaCO <sub>3</sub> < 30 %<br>Limons | Sols<br>intermédiaires | Sables<br>Graves | Craies | Marnes et<br>calcaires<br>Marneux | Roches<br>altérées ou<br>fragmentées |
|---------|---|------------------------|------------------|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1       | 0,40  | 0,30                   | 0,20             | 0,30   | 0,30                              | 0,30                                 |
| 2       | 0,45  | 0,30                   | 0,25             | 0,30   | 0,30                              | 0,30                                 |
| 3       | 0,50  | 0,50                   | 0,50             | 0,40   | 0,35                              | 0,35                                 |
| 4       | 0,45  | 0,40                   | 0,40             | 0,40   | 0,40                              | 0,40                                 |
| 5       | 0,35  | 0,30                   | 0,25             | 0,15   | 0,15                              | 0,15                                 |
| 6       | 0,40  | 0,40                   | 0,40             | 0,35   | 0,20                              | 0,20                                 |
| 7       | 0,35  | 0,25                   | 0,15             | 0,15   | 0,15                              | 0,15                                 |
| 8       | 0,45  | 0,30                   | 0,20             | 0,30   | 0,30                              | 0,25                                 |

Pour les pieux de classe 5, 6 et 7 mis en œuvre par vibrofonçage, au lieu de battage, il y a lieu de faire un abattement de 50 % sur le facteur  $k_c$ .

Tableau 8 : Valeur du facteur de portance pénétrométrique  $k_{cmax}$  pour un encastrement relatif  $D_{ef}/B \geq 5$

## 4. Formalisme de justification ELS/ELU

### 4.1. Principe

Dans FONDPROF, la valeur de calcul de la capacité portante d'un pieu isolé à l'ELS ou à l'ELU (vis-à-vis des états limites de mobilisation de la résistance du sol) est estimée à l'aide de la relation suivante :

$$Q_d = \mu_s Q_{s,k} + \mu_p Q_{p,k}$$

Où :

- $Q_{s,k}$  valeur caractéristique de la résistance de frottement ;
- $Q_{p,k}$  valeur caractéristique de la résistance en pointe ;
- $\mu_s$  pondération combinée appliquée sur  $Q_{s,k}$  ;
- $\mu_p$  pondération combinée appliquée sur  $Q_{p,k}$  ( $\mu_p = 0$  pour un travail en traction).

Les valeurs de  $\mu_s$  et  $\mu_p$  sont obtenues selon les combinaisons suivantes :

$$\mu_s = \frac{\beta_s}{\gamma_R} \quad \text{et} \quad \mu_p = \frac{\beta_p}{\gamma_R}$$

Le facteur partiel de résistance  $\gamma_R$  dépend du mode de chargement (compression/traction) et de la combinaison d'actions (ELS permanentes ou caractéristiques, ELU fondamentales ou accidentelles) considérée. Il est donné dans le tableau suivant :

|             | ELS QP | ELS CARA | ELU FOND | ELU ACC |
|-------------|--------|----------|----------|---------|
| Compression | 1,10   | 0,90     | 1,10     | 1,00    |
| Traction    | 1,50   | 1,10     | 1,15     | 1,05    |

Tableau 9 : Facteur partiel de résistance  $\gamma_R$

Les facteurs de corrélation (pour la charge de fluage)  $\beta_s$  et  $\beta_p$  sont pris égaux à :

- $\beta_s = \beta_p = 1,0$  à l'ELU (par construction) ;
- $\beta_s = \beta_p = 0,7$  à l'ELS pour des pieux mis en œuvre avec refoulement du sol ;
- $\beta_s = 0,7$  et  $\beta_p = 0,5$  à l'ELS pour des pieux mis en œuvre sans refoulement du sol.

Les termes  $Q_{s,k}$  et  $Q_{p,k}$  sont obtenus selon les expressions générales suivantes (voir notes 1 à 3) :

$$Q_{s,k} = \frac{Q_s}{\gamma_{Rd,1} \gamma_{Rd,2}} \quad \text{et} \quad Q_{p,k} = \frac{Q_p}{\gamma_{Rd,1} \gamma_{Rd,2}}$$

Où  $\gamma_{Rd1}$  et  $\gamma_{Rd2}$  sont des coefficients partiels de modèle dépendant à la fois de la catégorie du pieu et de la méthode de calcul considérée (pressiométrique ou pénétrométrique). La valeur du produit  $\gamma_{Rd1} \gamma_{Rd2}$  est indiquée dans le tableau suivant (NF P 94 262 – A1 de Juillet 2018) :

|  | Méthode PMT |          | Méthode CPT |          |
|--|-------------|----------|-------------|----------|
|  | Compression | Traction | Compression | Traction |
| Pieux non ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10 et 15                    | 1,265       | 1,540    | 1,298       | 1,595    |
| Pieux ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10 et 15                        | 1,540       | 1,870    | 1,595       | 1,925    |
| Pieux de catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20 dans les sables, les sols intermédiaires et les roches | 1,540       | 1,870    | 1,595       | 1,925    |
| Pieux de catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20 dans l'argile, les craies et les marnes                | 2,200       | 2,200    | 2,200       | 2,200    |

Tableau 10 : Valeurs du produit  $\gamma_{Rd1}\gamma_{Rd2}$  (NF P 94 262 – A1 de Juillet 2018)

**Note 1 :**  $Q_s$  et  $Q_p$  sont obtenus selon les modalités du §3.

**Note 2 :** FONDPROF donne la possibilité de distinguer la valeur du produit «  $\gamma_{Rd,1}\gamma_{Rd,2}$  » par couche (notamment pour le calcul de  $Q_{s,k}$ ).

**Note 3 :** il est toujours possible de mener un calcul sous FONDPROF à partir des règles de la version initiale de la norme NF P 94-262 (conservées à titre indicatif). Dans ce cas, la « pondération combinée » affichée par l'interface correspond au rapport  $\mu_{s\text{ ou }p}/\gamma_{Rd,1}\gamma_{Rd,2}$  et s'applique alors directement sur les termes  $Q_s$  et  $Q_p$ .

## 4.2. Mise en œuvre – notion de courbe de portance

La mise en œuvre du formalisme du §4.1 permet d'établir, pour un pieu arrêté à une profondeur donnée D, les charges limites ELS/ELU tenant compte de son mode de mise en œuvre, du type de terrain traversé et de l'essai utilisé. En explorant différentes valeurs pour la profondeur d'ancrage D, il devient possible de tracer la variation des charges limites ELS/ELU en fonction de D. Les courbes ainsi obtenues sont appelées courbes de portance avec la profondeur. La figure suivante en présente un exemple.

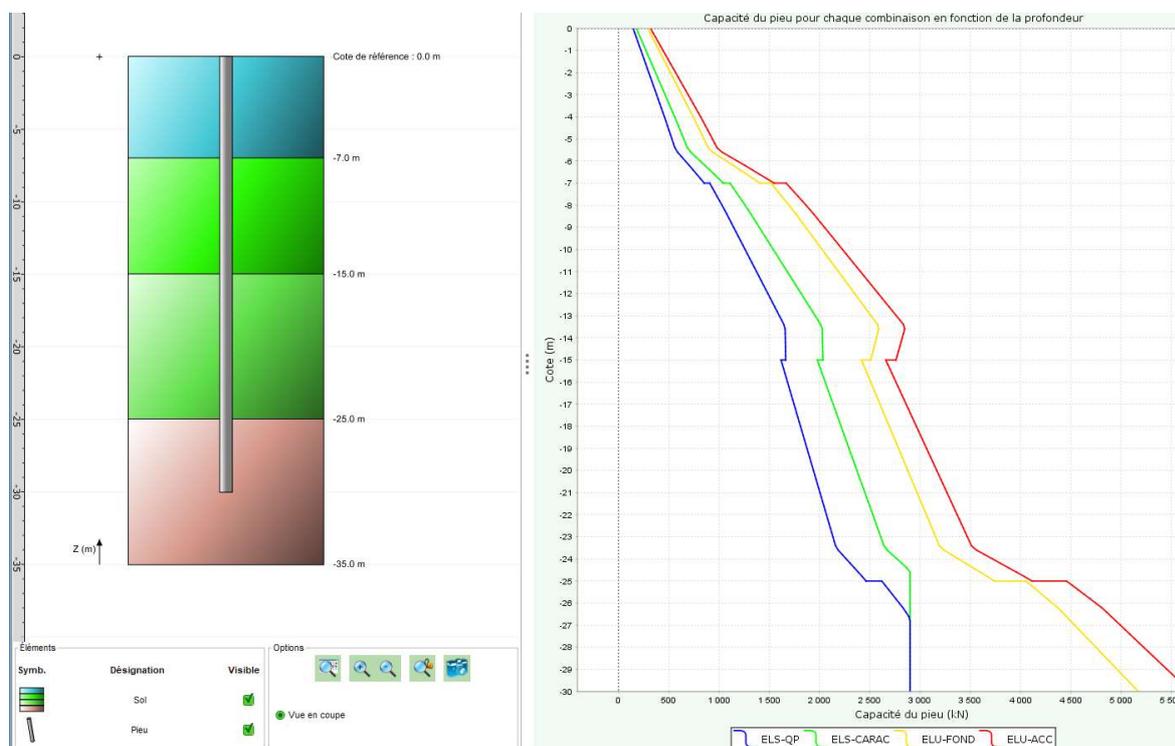


Figure 6 : Exemple de courbes de portance

## 4.3. Traitement de certains cas particuliers

### 4.3.1. Pieu de grande longueur

Conventionnellement, un pieu de grande longueur est un pieu de classe 1 de plus de 25 m de longueur, pour lequel la norme NF P 94 262 recommande une dégradation du frottement axial  $q_s$  dans les couches situées à plus de 25 m au-dessus de la pointe.

Pour ce type de pieux, la résistance de frottement  $Q_s$  est calculée comme suit :

$$Q_s = P \int_0^D q_s(z) dz \quad \text{pour } D < 25\text{m}$$

$$Q_s = \frac{1}{2} P \int_0^H q_s(z) dz + P \int_H^D q_s(z) dz \quad \text{pour } D > 25\text{m}$$

Avec  $H = D - 25$  m ( $D$  et  $H$  en mètres).

### 4.3.2. Effet de groupe

La norme NF P 94 262 recommande d'appliquer un facteur réducteur vis-à-vis de l'effet de groupe sur les pieux dont l'entraxe est inférieur à 3 fois le diamètre. Ce facteur réducteur, noté  $C_e$ , s'applique uniquement sur la résistance de frottement  $Q_s$  et peut être estimé à l'aide de l'expression suivante :

$$C_e = 1 - C_d \left( 2 - \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right) \right) \quad \text{et} \quad C_d = 1 - \frac{1}{4} (1 + S/B)$$

avec  $B$  le diamètre des pieux,  $S$  l'entraxe,  $n$  et  $m$  respectivement le nombre de files et le nombre de pieux par file.

D'autres approches sont possibles, comme par exemple celle de la fondation fictive équivalente (voir Frank et al. 2018).

### 4.3.3. Pieu travaillant en traction à l'ELS QP

Les modalités suivantes s'appliquent au cas particulier d'un pieu travaillant en traction à l'ELS-QP :

- Les facteurs partiels exposés en §4.1 pour les combinaisons ELS QP supposent la réalisation préalable d'essais de chargement selon les indications du Tableau 11 extrait de la norme NF P 94 262 (amendement de Juillet 2018) ;
- En l'absence d'essais de chargement, la charge limite de traction à l'ELS QP du pieu est limitée forfaitairement à  $0,15Q_s$  (ce plafonnement est appliqué automatiquement par le programme si l'option « Essais réalisés » a été décochée) ;
- Pour les fondations de ponts, il n'est pas admis d'avoir des éléments de fondation en traction sous combinaisons quasi-permanentes.

| Classe de conséquence | Catégorie géotechnique | Pieux de classe 1 à 7 hormis les pieux de catégorie 10 et 15 (Annexe A)   | Micropieux de classe 1bis et 8, pieux de classe 8 et pieux de catégorie 10 et 15 (Annexe A) |
|-----------------------|------------------------|---|---|
| 1                     | 1                      | —   | Essai de contrôle d'exécution   |
|                       | 2                      | Essai de contrôle d'exécution   |   |
| 2                     | 2                      | Essai de contrôle de dimensionnement<br><b>et</b><br>Essai de contrôle d'exécution  |   |
|                       | 3                      | Essai préalable dans les sols argileux ( $l_p > 20$ )<br><br>Essai de contrôle de dimensionnement<br><b>et</b><br>Essai de contrôle d'exécution |   |
| 3                     | 2 ou 3                 |   |   |

Tableau 11 : Essais à réaliser pour autoriser un travail en traction à plus de  $0,15Q_s$ .

#### 4.4. Contrôle de la contrainte de compression d'un pieu en béton

Le contrôle de la contrainte de compression d'un pieu en béton est établi à partir d'une résistance conventionnelle en compression du béton, notée  $f_{ck}^*$ , par application de la formule suivante (NF P 94-262) :

$$f_{ck}^* = \frac{\min(f_{ck}(t); C_{max}; f_{ck})}{k_1 k_2}$$

avec :

- $f_{ck}$  résistance caractéristique en compression à 28 jours, selon la norme NF EN 1992;
- $f_{ck}(t)$  résistance caractéristique à la compression au temps  $t$  ( $t < 28$  jours). En première approximation, on peut prendre :  $f_{ck}(t) = 0,685 f_{ck} \log(t + 1)$ , avec  $t$  en jours ;
- $C_{max}$  contrainte maximale autorisée (Tableau 12) ;
- $k_1$  coefficient qui tient compte du mode de mise en place dans le sol, selon le procédé d'exécution adopté (Tableau 12). Ce coefficient peut être diminué de 0,1 dans certaines conditions ;
- $k_2$  coefficient qui tient compte des difficultés de bétonnage liées à la géométrie de la fondation (diamètre et élancement). La valeur de  $k_2$  est égale à 1,00 dans tous les cas, sauf dans les cas suivants :
  - o  $k_2 = 1,05$  si le rapport de la plus petite dimension  $B$  à la longueur  $D$  est inférieur à  $1/20$ ,
  - o  $k_2 = 1,30 - B/2$  si la plus petite dimension  $B$  est inférieure à 0,60 m ( $B$  en mètres),
  - o  $k_2 = 1,35 - B/2$  si  $B/D < 20$  et  $B < 0,60$  m ( $B$  en mètres).

| Classe |   | $C_{max}$ (MPa) | $k_1$ |
|--------|---|-----------------|-------|
| 1      | Pieux forés et barrettes                                | 35*             | 1,30  |
| 2      | Pieux tarière creuse avec enregistrement des paramètres | 30*             | 1,35  |
| 3      | Pieux vissés moulés                                     | 35*             | 1,30  |
| 4      | Pieux battus moulés                                     | 35*             | 1,30  |

Tableau 12 : Coefficients applicables pour la détermination de la résistance conventionnelle  $f_{ck}^*$  du béton, coulis ou mortier des fondations profondes réalisées en place (NF P 94 262)

(\*) Pour les ponts,  $C_{max}$  est limité à 25 MPa.

Pour les calculs sous combinaisons aux états limites ultimes (ELU), la valeur de calcul de la résistance conventionnelle à la compression du béton, coulis ou mortier des fondations profondes réalisées en place, notée  $f_{cd}$  est obtenue par application de la formule suivante :

$$f_{cd} = \min \left( \alpha_{cc} k_3 \frac{f_{ck}^*}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{f_{ck}(t)}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{C_{max}}{\gamma_c} \right)$$

avec :

- $\alpha_{cc} = 1,0$  pour une section en béton armé et  $\alpha_{cc} = 0,8$  pour une section en béton non armé;
- $k_3 = 1,0$  dans les cas courants; il peut être pris  $k_3 = 1,2$  lorsque des contrôles renforcés d'intégrité et de continuité des fûts sont menés (voir la norme NF P 94-262 et son tableau 6.4.1.2 pour les bâtiments, ou son tableau Q.1.1 pour les ponts) ;
- $\gamma_c = 1,5$  pour les combinaisons fondamentales (situations durables et transitoires) ;
- $\gamma_c = 1,2$  pour les situations accidentelles ;
- $\gamma_c = 1,3$  pour les situations sismiques.

Pour les combinaisons ELS, on doit vérifier que la contrainte de compression moyenne n'excède pas  $0,3k_3 f_{ck}^*$ .