



Foxta v4

Manuel utilisateur – Partie C.2 – Notice technique du module FONDPROF
--

Date	Révision	Etabli par	Commentaires
06/07/2020	Ind A	F. Cuirá	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).

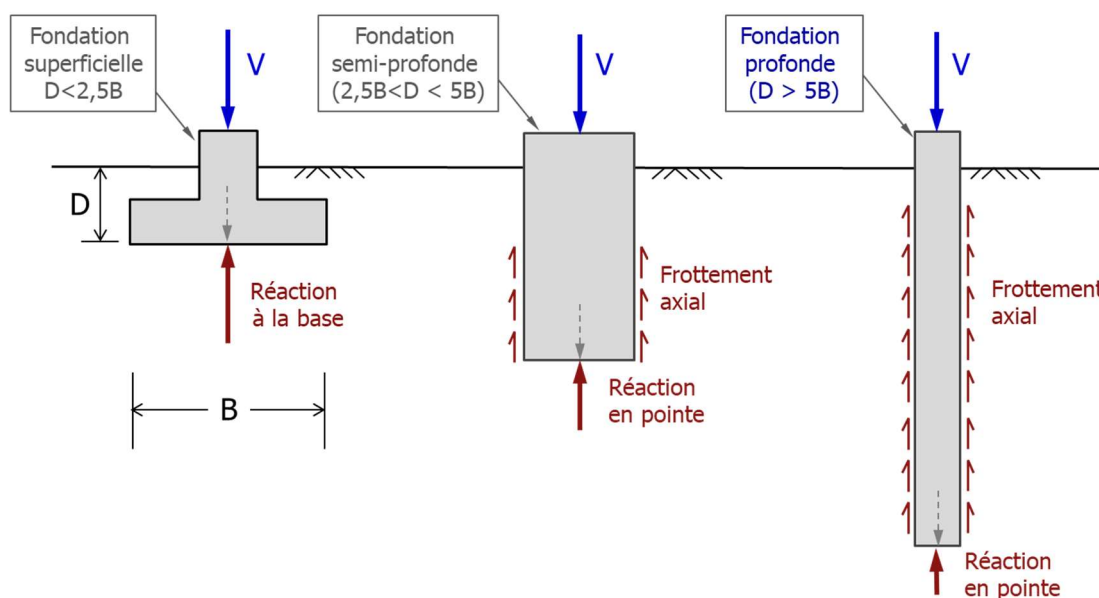


Figure 1 : Domaine conventionnel d'application du concept de fondation profonde

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 $Q_l = Q_s$

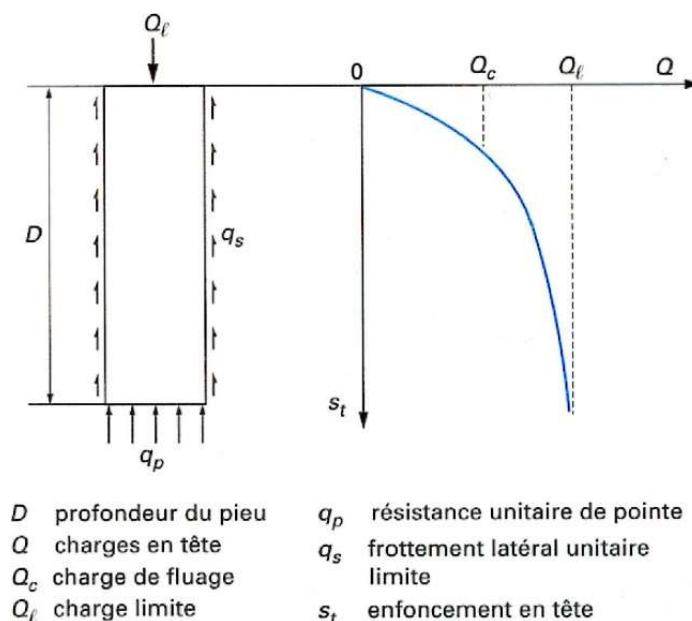


Figure 2 : Courbe de charge enfoncement d'une fondation profonde isolée

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).

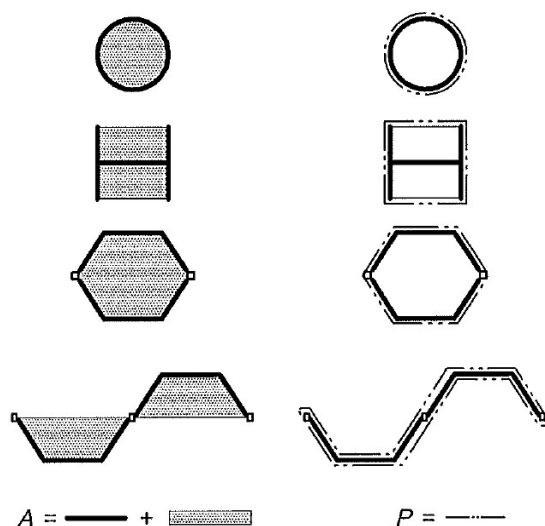


Figure 3: Choix de A_p et P pour un pieu de section non circulaire

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_{sol} , définie par les paramètres a, b et c, ne dépend que du type de sol.

Catégorie de pieux	Argiles % CaCO ₃ < 30% Limons Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sables 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 % CaCO ₃ < 30% Limons Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable 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_{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 % CaCO ₃ < 30 % Limons	Sols intermédiaires	Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires marneux	Roches altérées 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.

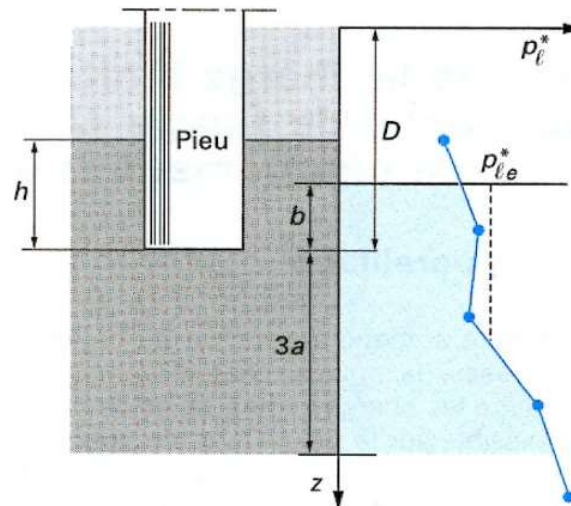


Figure 4 : Définition de la pression limite équivalente au pressiomètre

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 % CaCO ₃ < 30 % Limons Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires marneux	Roches altérées et 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_{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 % CaCO ₃ < 30 % Limens	Sols intermédiaires	Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires Marneux	Roches altérées ou 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 % CaCO ₃ < 30 % Limens	Sols intermédiaires	Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires marneux	Roches altérées ou 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.

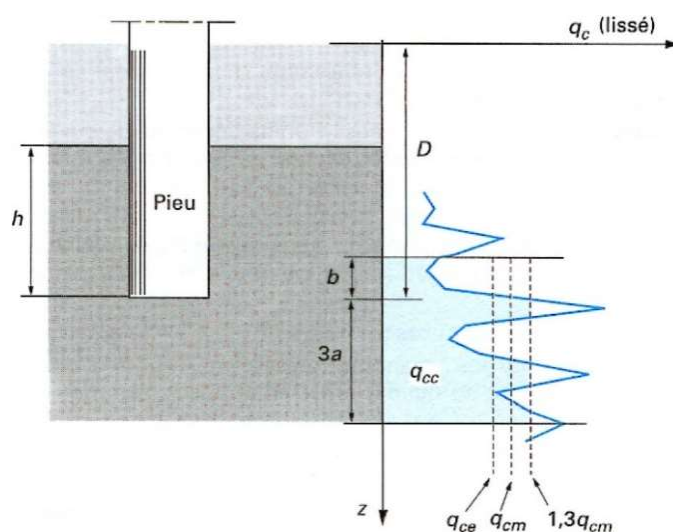


Figure 5 : Définition de la résistance de cône écrêtée

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 % CaCO ₃ < 30 % Limons	Sols intermédiaires	Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires Marneux	Roches altérées ou 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 ;
- μ_s pondération combinée appliquée sur $Q_{s,k}$;
- μ_p pondération combinée appliquée sur $Q_{p,k}$ ($\mu_p = 0$ pour un travail en traction).

Les valeurs de μ_s et μ_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 γ_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 γ_R

Les facteurs de corrélation (pour la charge de fluage) β_s et β_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 γ_{Rd1} et γ_{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.

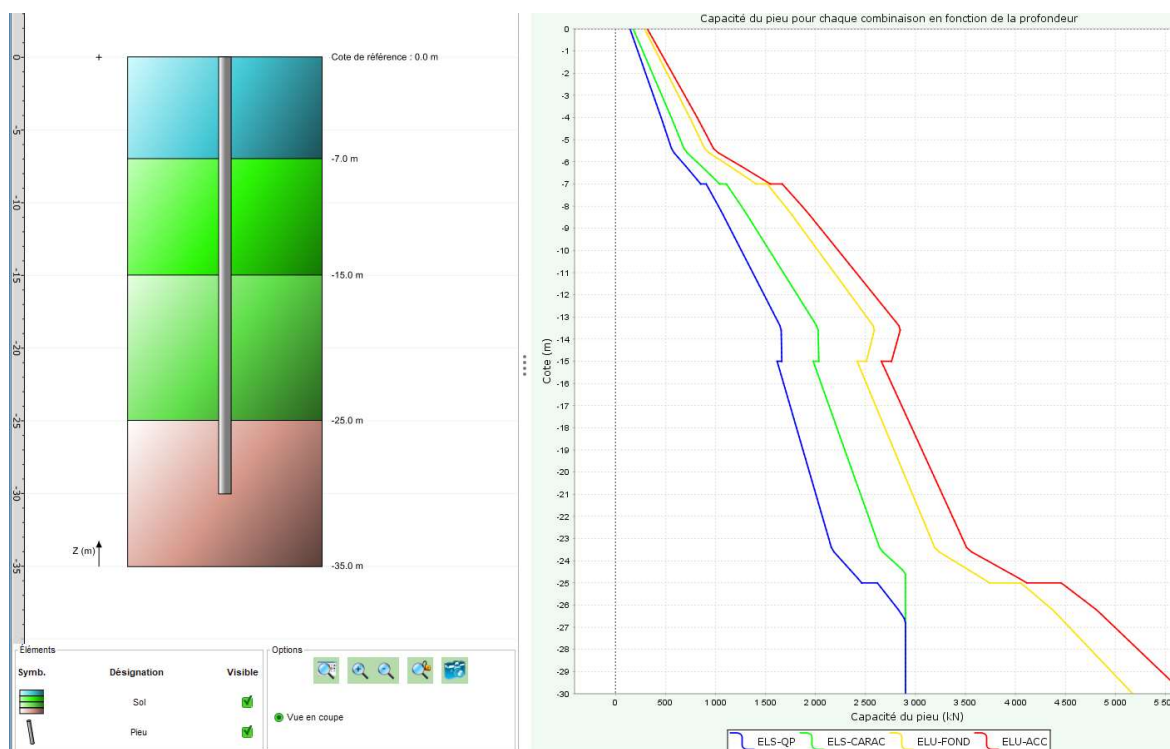


Figure 6 : Exemple de courbes de portance

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 et Essai de contrôle d'exécution	
	3	Essai préalable dans les sols argileux ($lp > 20$) Essai de contrôle de dimensionnement et 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 $0,3k_3 f_{ck}^*$.