

**Exemple d'application
d'une fondation sur pieux :
capacité portante**

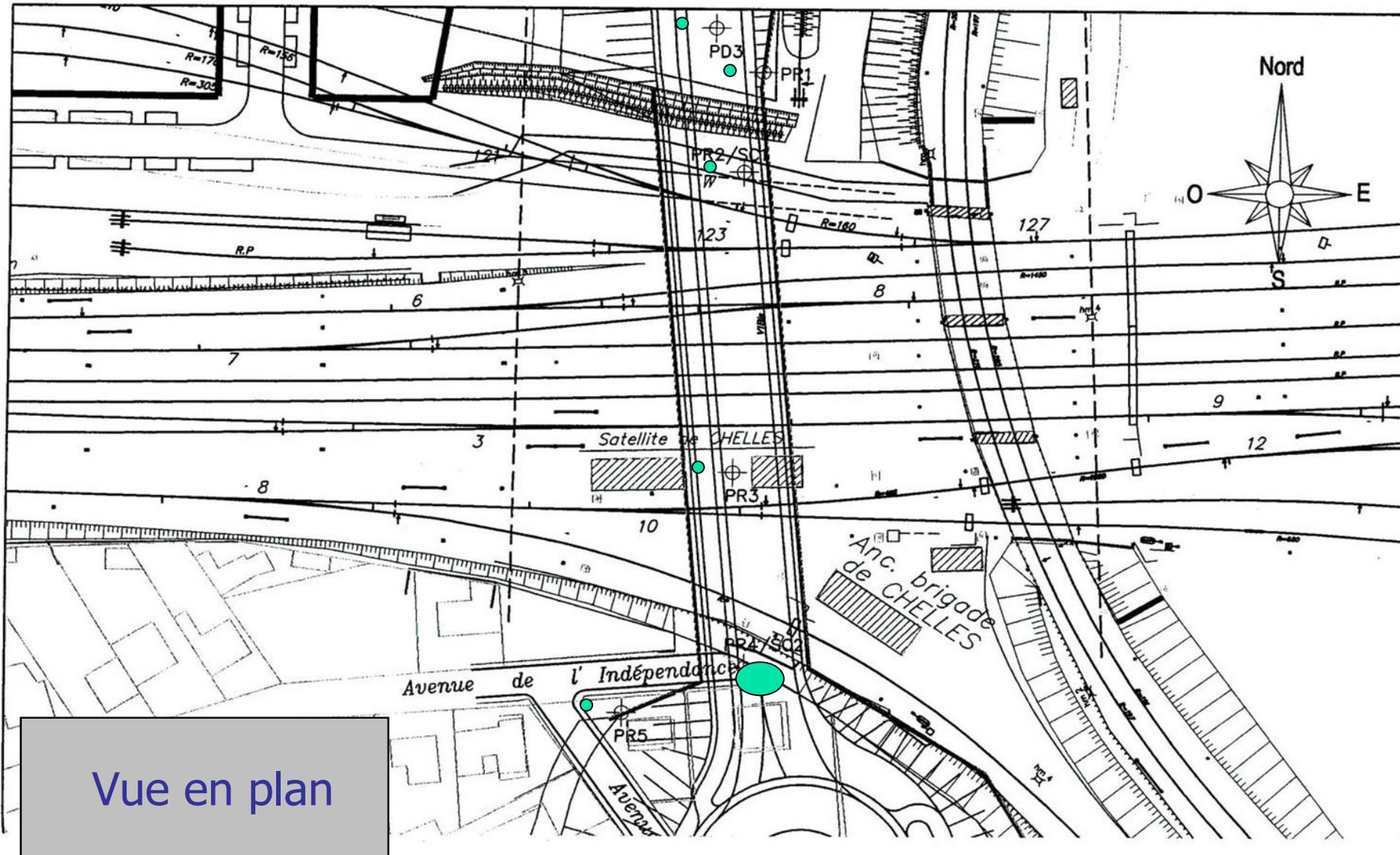
selon la méthode de la norme NF P 94262

S.HEUMEZ

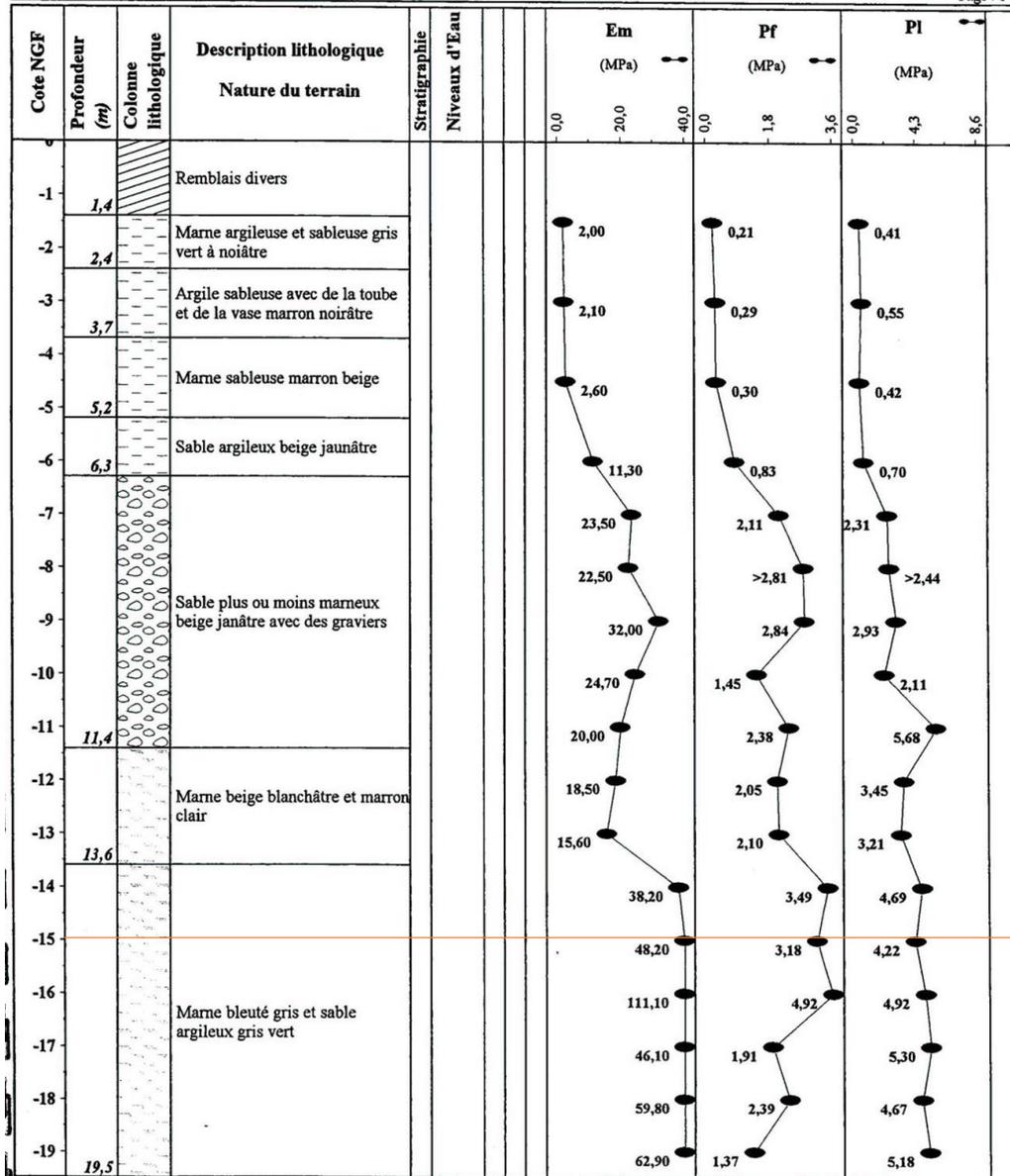
CEREMA IF

Données de l'exemple

- Ouvrage de franchissement des voies SNCF
- 3 appuis : culée C0, pile P1, culée C2
- Pieux de diamètre 1 m, profondeur 15 m
- Les pieux des culées sont susceptibles d'être soumis à des frottements négatifs dus au tassement des sols surchargés par les remblais d'accès
- Pieux classe 2 catégorie 6



Vue en plan

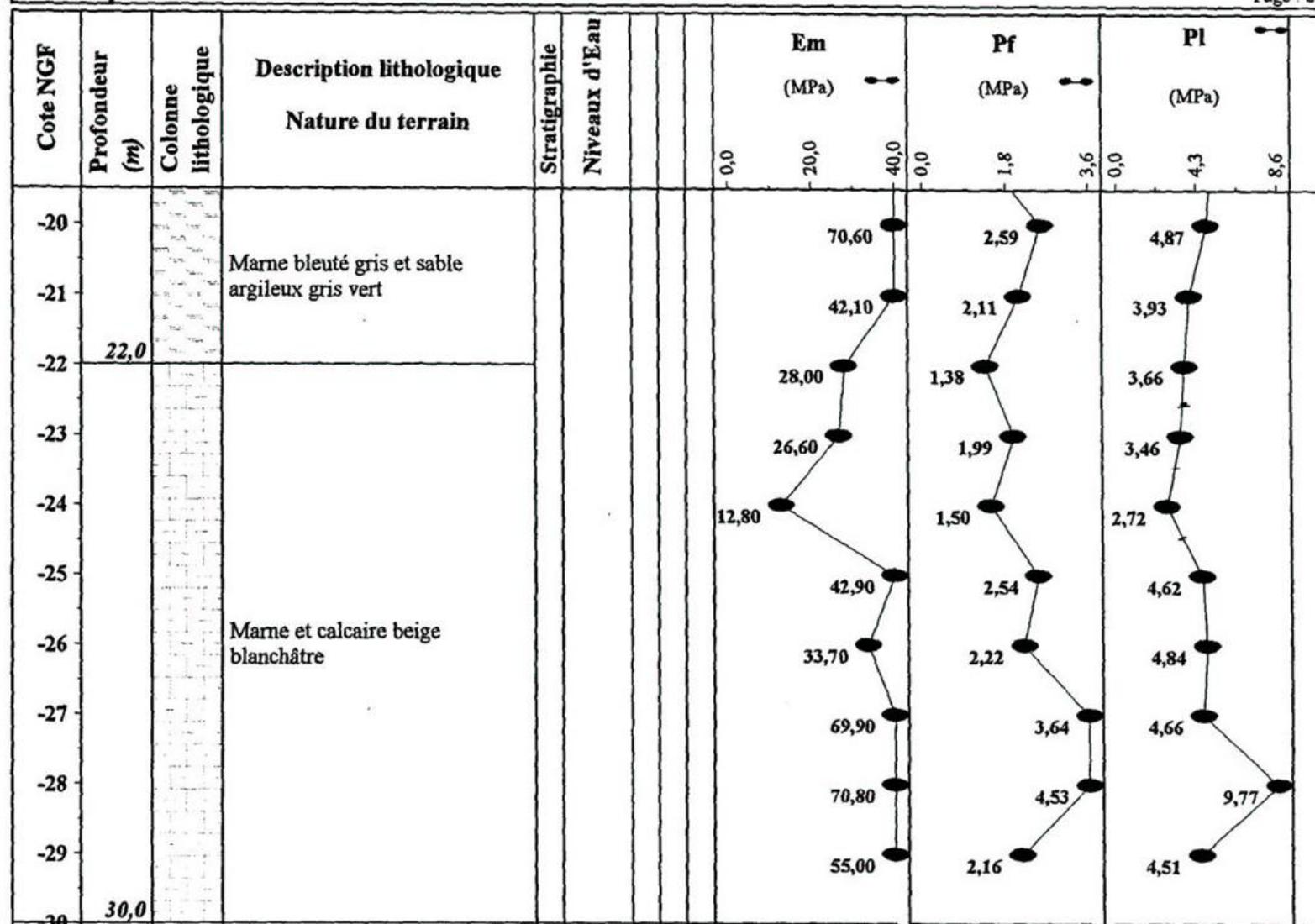


SONDAGE : PR4

Date :

Remarque :

Page : 2



Coupe de sol PR4

0

Remblais / Alluvions Modernes

6,3

$Pl^* = 0,5 \text{ MPa}$

Alluvions Anciennes ; $Pl^* = 2 \text{ MPa}$

11,4

Marnes de Pantin ; $Pl^* = 3,5 \text{ MPa}$

13,6

Marnes d'Argenteuil

22

$Pl^* = 4 \text{ MPa}$

Marno calcaire de Champigny

$Pl^* = 4 \text{ MPa}$

Calcul de la portance selon la norme NFP 94262 à partir d'un profil de sol

- Classement conventionnel des terrains
- Classes et catégories de pieux
- Calculs de la résistance de pointe et du frottement axial par la méthode pressiométrique (ELU ELS)
 - ◆ Résistance en **c**ompression
 - ◆ Résistance en **t**raction

Annexe A: classes et catégories de pieux

- 8 Classes
- 20 Catégories

Tableau A.1

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de référence
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS	NF EN 1536
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
	3	Foré tubé (virole perdue)	FTP	
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR	
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU	
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
3	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
	10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	BE	
	11	Battu moulé	BM	
	12	Battu acier fermé	BAF	
5	13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN12699
6	14	Profilé H battu	HB	NF EN12699
	15	Profilé H battu injecté	HBi	
7	16	Palplanches battues	PP	NF EN 12699
1 bis	17	Micropieu type I	M1	NF EN 1536/14199/12699
	18	Micropieu type II	M2	
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS	

Résistance limite de pointe R_b

Méthode pressiométrique (Annexe F)

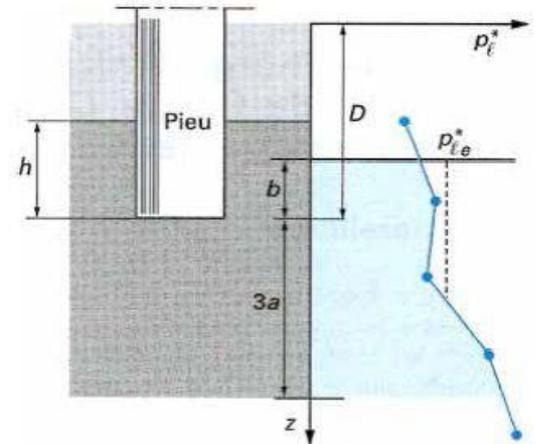
Où

- A est la section du pieu
- k_p : facteur de portance pressiométrique
- p_{le}^* : pression limite nette équivalente

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

$$a = \max\left\{\frac{B}{2}; 0,5\right\}$$

$$b = \min\{a; h\}$$



Calcul de la résistance de pointe à partir d'un profil de sol PR4 – Pieu de 15 m

Cas du pieu de 15 m de profondeur (par rapport au TN):

Sol de fondation = Sables de Beauchamp

$a = 0,50 \text{ m}$; $h = 1,40 \text{ m}$; $b = 0,50 \text{ m}$

$D = 15,00 \text{ m}$

$$P_{le}^* = \frac{1}{2} \cdot \int_{14,5}^{16,5} p_l^*(z) dz$$

$$= \frac{1}{2} \cdot [(4,22 \times 0,5 + 4,22 * 0,5 + 4,92 * 1)]$$

$$P_{le}^* = 4,57 \text{ MPa}$$

Coefficient de portance pressiométrique k_p

1^o étape : Détermination de $k_{p, \max}$

Utilisation des classes de pieu

Utilisation des catégories de sol

=> $k_{p, \max} = 1,6$

Terrain	Argile % CaCO ₃ < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et calcaire- marneux	Roche altérée et fragmentée (a)
Classe de pieu (c)					
1	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)
2	1,3	1,65	1,6	1,6	2,0
3	1,55	3,2	2,35	2,10	2,10
4	1,35	3,1	2,30	2,30	2,30
5 #	1,0	1,9	1,4	1,4	1,2
6 #	1,20	3,10	1,7	2,2	1,5
7 #	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2
8	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)

Tableau F.4.2.1

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB
	3	Foré tubé (virole perdue)	FTP
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD
3	7	Vissé moulé	VM
	8	Vissé tubé	VT
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR
	10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	BE
	11	Battu moulé	BM
	12	Battu acier fermé	BAF
5	13	Battu acier ouvert	BAO
6	14	Profilé H battu	HB
	15	Profilé H battu injecté	HBi
7	16	Palplanches battues	PP
1 bis	17	Micropieu type I	M1
	18	Micropieu type II	M2
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS

Tableau A.1

Coefficient de portance pressiométrique k_p

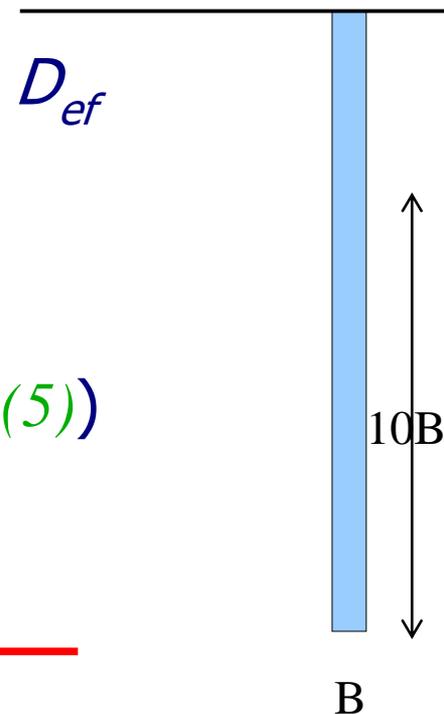
2° étape :

Calcul de la hauteur d'encastrement effectif D_{ef}

$$D_{ef} = \frac{1}{pl_e^*} \int_{D-h_D}^D pl^*(z) dz$$

h_D longueur égale à $10B$

k_p s'obtient alors de la façon suivante (F.4.2(5))



Calcul de la résistance de pointe à partir d'un profil de sol PR4 – Pieu de 15 m

Cas du pieu de 15 m de profondeur (par rapport au TN):

$$D = 15,00 \text{ m} / D-10B = 5\text{m}$$

$$P_{le}^* = 4,57 \text{ Mpa}$$

$$Def = 1/P_{le}^* \cdot \int_5^{15} p_l^*(z) dz$$

$$= [4,22 \cdot 0,5 + 4,69 + 3,21 + 3,45 + 5,68 + 2,11 + 2,93 + 2,44 + 2,31 + 0,7 + 0,42 \cdot 0,5] / 4,57$$

$$= 6,5 \text{ m}$$

$$Def > 5 B \Rightarrow k_p = k_{pmax} = 1,6$$

Avec une section de pieu $A_b = 0,785 \text{ m}^2$

$$\text{Donc } R_b = 5742 \text{ kN}$$

Résistance par frottement axial (anciennement latéral) R_s

Méthode pressiométrique (Annexe F)

$$R_s = P_s \int_0^D q_s(z) dz$$

Détermination de q_s

$$q_s(z) = \alpha_{\text{pieu-sol}} f_{\text{sol}} [pl^*(z)] \leq q_{s,\text{max}}(z)$$

Résistance par frottement axial

Détermination de f_{sol}

$$f_{sol}(p_i^*) = (ap_i^* + b)(1 - e^{-cp_i^*})$$

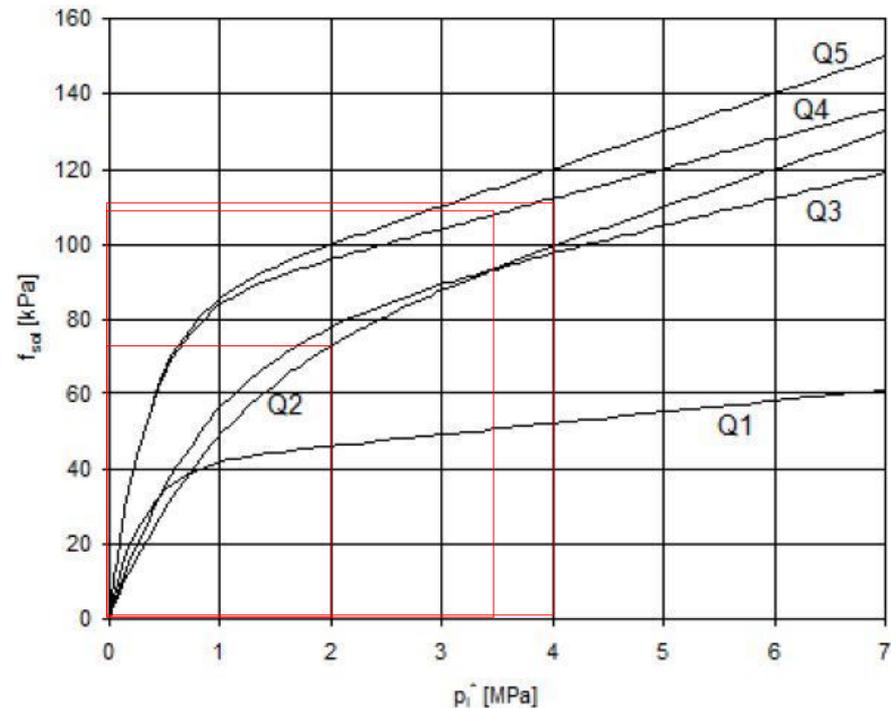
Type de sol	Argile % CaCO3 < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire- Marneux	Roche altérée ou fragmentée
Choix de la courbe	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
a	0,003	0,01	0,007	0,008	0,01
b	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08
c	3,5	1,2	1,3	3	3

Ici :

Sables-graves => courbe Q2

Marnocalcaire => courbe Q4

pour chaque p_i^* => f_{sol}



Résistance par frottement axial

Détermination de $\alpha_{\text{pieu-sol}}$

A partir des 20 catégories de pieux

et des 5 classes de sol

Ici pieu foré boue

Dans sables graves : $\alpha_{\text{pieu-sol}} = 1,8$

et marnocalcaire : $\alpha_{\text{pieu-sol}} = 1,6$

$$\Rightarrow \alpha_{\text{pieu-sol}} f_{\text{sol}}$$

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Classes de sol				
			Argile % CaCO ₃ < 30% Limon Sols Intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire- Marneux	Roche altérée ou fragmentée
1	FS ##	Foré simple (pieux et barrettes)	1,1	1	1,8	1,5	1,6
2	FB ##	Foré boue (pieux et barrettes)	1,25	1,4	1,8	1,5	1,6
3	FTP	Foré tubé (virole perdue)	0,7	0,6	0,5	0,9	---
4	FTR	Foré tubé (virole récupérée)	1,25	1,4	1,7	1,4	---
5	FSR, FBR, PU ##	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	1,3	---	---	---	---
6	FTC, FTCD (c)	Foré tarière continue simple rotation ou double rotation	1,5	1,8	2,1	1,6	1,6
7	VM	Vissé moulé	1,9	2,1	1,7	1,7	---
8	VT	Vissé tubé	0,6	0,6	1	0,7	---
9	BPF**, BPR**	Battu béton préfabriqué ou précontraint	1,1	1,4	1	0,9	---
10	BE**	Battu enrobé (béton - mortier - coulis)	2	2,1	1,9	1,6	---
11	BM**	Battu moulé	1,2	1,4	2,1	1	---
12	BAF**	Battu acier fermé	0,8	1,2	0,4	0,9	---
13	BAO** #	Battu acier ouvert	1,2	0,7	0,5	1	1
14	HB** #	H battu	1,1	1	0,4	1	0,9
15	HBI**	H battu injecté IGU ou IRS	2,7	2,9	2,4	2,4	2,4
16	PP** #	Palplanches battues	0,9	0,8	0,4	1,2	1,2
17	M1	Micropieu type I	---	---	---	---	---
18	M2	Micropieu type II	---	---	---	---	---
19	PIGU, MIGU	Pieu ou micropieu injecté (type III)	2,7	2,9	2,4	2,4	2,4
20	PIRS, MIRS	Pieu ou micropieu injecté (type IV)	3,4	3,8	3,1	3,1	3,1

Résistance par frottement axial

Valeurs de $\alpha_{\text{pieu-sol}} f_{\text{sol}}$ à comparer avec $q_{s,\text{max}}$, donné par le *tableau F.5.2.3*

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Valeurs en kPa				
			Argile % CaCO ₃ < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Mame et Calcaire- Mameux	Roche altérée ou fragmentée
1	FS ##	Foré simple (pieux et barrettes)	90	90	200	170	200
2	FB ##	Foré boue (pieux et barrettes)	90	90	200	170	200
3	FTP	Foré tubé (virole perdue)	50	50	50	90	—
4	FTR	Foré tubé (virole récupérée)	90	90	170	170	—
5	FSR, FBR, PU ##	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	90	—	—	—	—
6	FTC, FTCD	Foré tarière continue simple rotation ou double rotation	90	170	200	200	200
7	VM	Vissé moulé	130	200	170	170	—
8	VT	Vissé tubé	50	90	90	90	—
9	BPF**, BPR**	Battu béton préfabriqué ou précontraint	130	130	90	90	—
10	BE**	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	170	260	200	200	—
11	BM**	Battu moulé	90	130	260	200	—
12	BAF**	Battu acier fermé	90	90	50	90	—
13	BAO** #	Battu acier ouvert	90	50	50	90	90
14	HB** #	H battu	90	130	50	90	90
15	HBi**	H battu injecté IGU ou IRS	200	380	320	320	320
16	PP** #	Palplanches battues	90	50	50	90	90
17	M1	Micropieu type I	—	—	—	—	—
18	M2	Micropieu type II	—	—	—	—	—
19	PIGU, MIGU	Pieu ou micropieu injecté (type III)	200	380	320	320	320
20	PIRS, MIRS	Pieu ou micropieu injecté (type IV)	200	440	440	440	500

Ici :

q_s limité à q_s max dans les sables et graves = 170kPa

Q_s max mc = 200 kPa

Calcul de la résistance par frottement axial à partir d'un profil de sol PR4 – Pieu de 15 m

D'où la résistance de frottement axial R_s :

$$R_s = P_s \int_0^D q_s(z) dz$$

$$R_s = 4,08 \quad \text{MN}$$

$$R_b = 5,74 \quad \text{MN}$$

Rappel :

Calcul de $R_{c;k}$ et $R_{t;k}$: Procédure « modèle de terrain »

- La portance caractéristique issue de la procédure alternative (au sens de l'EC7) dite procédure « modèle de terrain » : **(9.2.4)**

$$R_{c;k} = R_{b;k} + R_{s;k} ; \quad R_{b;k} = A_b q_{b;k} ; \quad R_{s;k} = \sum_i A_{si} q_{si;k}$$

$$q_{b;k} = q_b / (\gamma_{R;d1} * \gamma_{R;d2}) \quad \text{et} \quad q_{si;k} = q_{si} / (\gamma_{R;d1} * \gamma_{R;d2})$$

Avec :

q_b et q_{si} déterminées à partir de valeurs représentatives des propriétés des terrains (p_1 , q_c , etc...)

$\gamma_{R;d1}$ coefficient de modèle pour essais PMT ou essais CPT

$\gamma_{R;d2} = 1,1$ (dispersion spatiale des données)

Annexes F et G

Rappel : Choix des $\gamma_{R;d}$: Procédures « pieu modèle » et « modèle de terrain »

Tableau F.2.1 — Valeur des coefficients de modèle pour la méthode pressiométrique

	Procédure du « pieu modèle » (utilisation des coefficients ξ ou de l'annexe D de la norme NF EN 1990)		Procédure du « modèle de terrain »	
	$\gamma_{R;d1}$ Compression	$\gamma_{R;d1}$ Traction	$\gamma_{R;d2}$ Compression	$\gamma_{R;d2}$ Traction
Pieux non ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux BE et HBi	1,15	1,4	1,1	
Pieux ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux BE et HBi	1,4	1,7		
Pieux BE et HBi et pieux de catégorie 17 à 20	2,0	2,0		

Justification à l'état limite de portance ELU

La valeur de calcul de la portance $R_{c,d}$ se calcule, à partir de $R_{c,k}$:
valeur **caractéristique** de la portance du terrain, par :

$$R_{c,d} = R_{c,k}/\gamma_t \quad \text{ou} \quad R_{c,d} = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s$$

La justification consiste à vérifier :

$$F_{c,d} < R_{c,d}$$

$F_{c,d}$: valeur de **calcul** de la charge de compression axiale sur la fondation
 $R_{c,d}$: valeur de **calcul** de la résistance limite en compression axiale ou
portance limite

NFP 94262 Annexe C :

Facteurs partiels pour les ELU

Tableau C.2.3.1 — Facteurs partiels de résistance (γ_R) pour les pieux – Situations durables et transitoires

Résistance	Symbole	Pieux foncés	Pieux forés	Pieux à la tarière continue (CFA)
Pointe	γ_b	1,1	1,1	1,1
Fut (compression) ^a	γ_s	1,1	1,1	1,1
Total/combine (compression) ^a	γ_t	1,1	1,1	1,1
Fût en traction ^a	γ_{st}	1,15	1,15	1,15
^a conforme aux tableaux A.6 à A.8 de l'annexe A de NF EN 1997-1 – Jeu R2.				

Tableau C.2.3.2 — Facteurs partiels de résistance (γ_R) pour les pieux – Situations accidentelles

Résistance	Symbole	Pieux foncés	Pieux forés	Pieux à la tarière continue (CFA)
Pointe	γ_b	1,0	1,0	1,0
Fut (compression)	γ_s	1,0	1,0	1,0
Total/combine (compression)	γ_t	1,0	1,0	1,0
Fût en traction	γ_{st}	1,05	1,05	1,05

Justification à l'état limite de portance ELS

- Sauf limitation de déplacement imposée, il suffit de vérifier (section 14):

$$F_d \leq R_{c/t;cr;d}$$

avec

$$R_{c/t;cr;d} = R_{c/t;cr;k} / \gamma_{cr}$$

où la charge de fluage caractéristique est :

pour les pieux **sans refoulement du sol**

$$R_{c/t;cr;k} = 0,5 R_{b;k}^* + 0,7 R_s$$

et pour les pieux **avec refoulement du sol**

$$R_{c/t;cr;k} = 0,7 R_{b;k}^* + 0,7 R_s$$

(*compression uniquement)

- Si limitation de déplacement imposée, faire des calculs de déplacement (t-z en axial, cf Frank-Zhao; p-y en transversal,).

NFP 94262 Annexe C :

Facteurs partiels pour les ELS

**Tableau 14.2.1.1 — Facteurs partiels de résistance (γ_R) pour les fondations profondes – ELS –
Combinaisons caractéristiques**

Résistance	Symbole	Valeurs
Fût en compression	γ_{cr}	0,9
Fût en traction (y compris micropieux)	$\gamma_{s;cr}$	1,1

**Tableau 14.2.1.2 — Facteurs partiels de résistance (γ_R) pour les fondations profondes – ELS –
Combinaisons quasi permanentes**

Résistance	Symbole	Valeurs
Fût en compression	γ_{cr}	1,1
Fût en traction (y compris micropieux)	$\gamma_{s;cr}$	1,5

Calcul par modèle de terrain issu du PR4 - Pieu de 15 m

Cas du pieu de 15 m de profondeur (par rapport au TN):

$$D = 15,00 \text{ m} / D-10B = 5\text{m}$$

$$P_{le}^* = 4,57 \text{ Mpa}$$

$$\text{Def} > 5 B \Rightarrow k_p = k_{p\max} = 1,6$$

D'où :

$$\text{la résistance de pointe } R_b = A k_p p_{le}^* = \quad \text{MN}$$

$$\text{La résistance par frottement axial } R_s = \quad \text{MN}$$

$$R_c = \quad \text{MN}$$

$$R_{c,k} = \quad \text{MN}$$

$$R_{c,d} = \quad \text{MN}$$