5.3. Portance des sols sous les fondations profondes

Rappels *: Les fondations profondes transmettent des charges aux sols par frottement sur leur paroi latérale et par chargement sous leur base. Ces charges sont généralement évaluées au niveau de la surface du terrain naturel (ou du haut des fondations). Toutes les méthodes de calcul séparent le calcul du frottement latéral et celui de la résistance de pointe. Les fondations profondes peuvent être des pieux de section carrée ou cylindrique ou des barrettes de section rectangulaire ou encore des structures métalliques de formes variées. Leur fonction essentielle est de résister à ces charges axiales, mais elles peuvent aussi supporter des efforts latéraux. Une autre particularité des fondations profondes est d'être le plus souvent en groupe, ce qui crée des interactions complexes.*
Dans ce chapitre, nous étudions seulement la portance des pieux isolés sous charge axiale. Les autres formes de chargement sont étudiées dans des cours spécialisés. Le fonctionnement des pieux dépend de leur mode de réalisation. On distingue dans les calculs les pieux installés en refoulant le sol et les pieux installés par forage. Les formules de calcul de la résistance R_{max} offerte par le sol au pieu sont de la forme :

$$R_{max} = R_p + R_s = q_b A_p + \sum_i P h_i q_{si}$$

où R_p et R_s sont respectivement la résistance de pointe et la résistance latérale, A_p est l'aire de la pointe du pieu, q_b la résistance du sol sous la pointe du pieu, P son périmètre, supposé constant, h_i et q_{si} la hauteur de la couche i traversée par le pieu et le frottement latéral dans cette couche.
Le calcul des pieux se concentre sur l'évaluation de la pression maximale sous la pointe q_b et du frottement latéral unitaire q_s. Le calcul de ces deux résistances est largement fondé sur l'expérience. Il peut être fait, comme pour les fondations superficielles, à partir de caractéristiques mécaniques déterminées en laboratoire (c, φ, c_u) ou de sondages pressiométriques ou pénétrométriques.

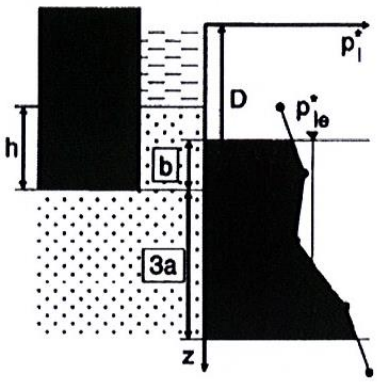
Calcul des pieux à partir de sondages pressiométriques
La résistance q_b du sol sous la pointe d'un pieu est déduite des pressions limites nettes p^*_{LM} issues des essais. La pression limite nette à la profondeur z est la différence entre la pression limite déduite de l'essai p_{LM} et la contrainte totale horizontale σ_{ho} estimée à cette profondeur :

$$p^*_{LM}(z) = p_{LM}(z) - \sigma_{ho}(z)$$

La pression limite nette équivalente p^*_{LMe} est déterminée comme moyenne de la pression limite nette entre D-b et D+3a :

$$p^*_{LMe} = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} p^*_{LM}(z)\,dz$$

où h désigne la hauteur de l'élément de fondation contenu dans la formation porteuse,
- *a vaut la moitié de la largeur B de l'élément de fondation, mais au moins 0,5m ;*
- *b est le plus petit de a et h,*
- *$p^*_{LM}(z)$ est obtenu en joignant sur une échelle linéaire les différents p^*_{LM} mesurés.*



La pression ultime q_b est déduite de la pression limite nette équivalente au moyen du facteur de portance k_p :

$q_b = k_p\ p^*_{LMe}$,.

Le facteur de portance dépend de la nature des terrains et de la méthode d'exécution du pieu. Le frottement latéral unitaire q_s est déduit de la pression limite pressiométrique nette p^*_{LM} par une relation dépendant du type de pieu, de son mode d'exécution et de la nature du sol.

Dans la méthode en vigueur jusqu'en 2012, la valeur de k_p est lue dans le tableau 1. La valeur de q_s est déterminée en utilisant une des courbes de la figure 1, choisie selon les indications du tableau 2.

Tableau 1. Valeur du facteur de portance k_p (méthode en vigueur jusqu'à 2012)

Type de sol	*Valeurs de p^*_{LM}*	*Pieux exécutés sans refoulement*	*Pieux exécutés en refoulant le sol*
Argiles et limons de type A	*<0,7 MPa*	*1,1*	*1,4*
Argiles et limons de type B	*1,2 MPa à 2 MPa*	*1,2*	*1,5*
Argiles de type C	*>2,5 MPa*	*1,3*	*1,6*
Sables de type A	*<0,5 MPa*	*1*	*4,2*
Sables et graves de type B	*1 MPa à 2 MPa*	*1,1*	*3,7*
Sables et graves de type C	*>2,5 MPa*	*1,2*	*3,2*
Craie de type A	*<0,7 MPa*	*1,1*	*1,6*
Craies de type B	*1 MPa à 2,5 MPa*	*1,4*	*2,2*
Craies de type C	*>3 MPa*	*1,8*	*2,6*
Marnes, marno-calcaires		*1,8*	*2,6*
Roches altérées		*1,1 à 1,8*	*1,8 à 3,2*

Tableau 2 - Choix des courbes pour le calcul du frottement latéral unitaire (principaux types de pieux utilisés en ouvrage d'art) (méthode en vigueur jusqu'à 2012)

Nature du sol	Argiles - Limons·			Sables - Graves			Craies			Marnes		Roches
Type du pieu	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	
Foré simple	Q1	Q1.Q2(1)	Q2.Q3(1)				Q1	Q3	Q4. Q6(1)	Q3	Q4.Q5(1)	Q6
Foré à la boue	Q1	Q1, Q2 (1)		Q1	Q2.Q1(2)	Q3. Q2(2)	Q1	Q3	Q4.Q6(1)	Q3	Q4.Q5(1)	Q6
Foré tubé (tube récupéré)	Q1	Q1, Q2 (3)		Q1	Q2.Q1(2)	Q3. Q2(2)	Q1	Q2	Q3. Q4(3)	Q3	Q4	
Foré tubé (tube perdu)	Q1			Q1		Q2	(4)			Q2	Q3	
Puits (5)	Q1	Q2	Q3				Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
Métal battu fermé	Q1	Q2		Q2		Q3	(4)			Q3	Q4	Q4
Battu préfabriqué béton	Q1	Q2		Q3			(4)			Q3	Q4	Q4
Battu moulé	Q1	Q2		Q2		Q3	Q1	Q2	Q3	Q3	Q4	
Battu enrobé	Q1	Q2		Q3		Q4	(4)			Q3	Q4	
Injecté basse pression	Q1	Q2		Q3				Q3	Q4	Q5		
Injecté haute pression (6)		Q4	Q5	Q5		Q6		Q5	Q6	Q6		Q7(7)

Notes

(1) Réalésage et rainurage en fin de forage.
(2) Pieux de grande longueur (supérieure à 30m).
(3) Forage à sec, tube non louvoyé.
(4) Dans le cas des craies, le frottement latéral peut être très faible pour certains types de pieux. Il convient d'effectuer une étude spécifique dans chaque cas.
(5) Sans tubage ni virole foncés perdus (parois rugueuses).
(6) Injection sélective et répétitive à faible débit.
(7) Injection sélective et répétitive à faible débit et traitement préalable des massifs fissurés ou fracturés avec obturation des cavités.

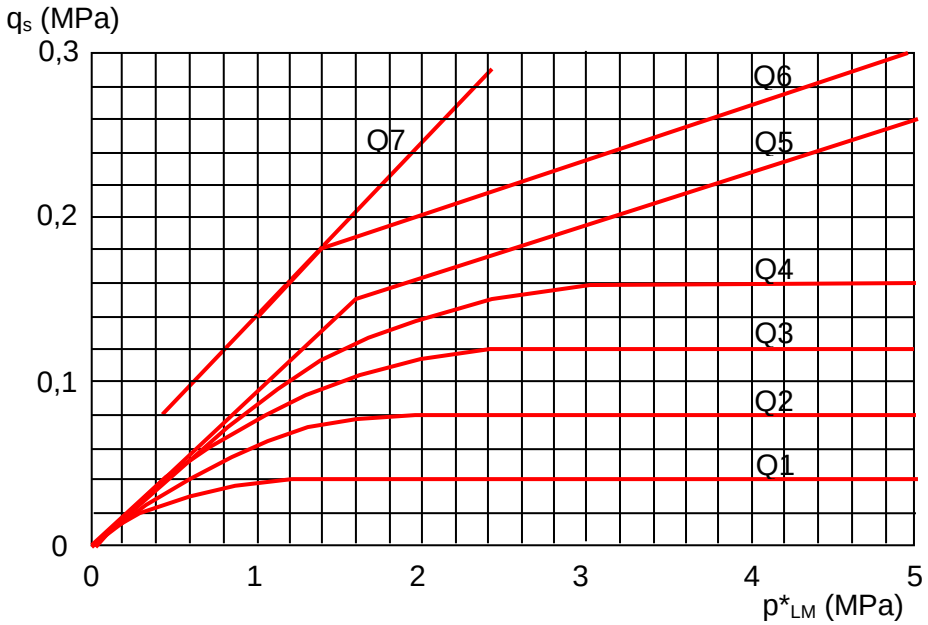


Figure 1. Détermination du frottement latéral unitaire (méthode en vigueur jusqu'en 2012)

La méthode de calcul des fondations profondes a été modifiée en 2013, pour tenir compte de nouvelles données expérimentales sur la portance des pieux et pour détailler de façon plus précise les types de pieux.

Dans la méthode en vigueur depuis 2013, le système de calcul est le suivant.

Catégories de fondations profondes
Le calcul s'appuie sur un découpage fin des types de pieux et de leur mise en œuvre. On distingue vingt catégories de pieux, qui sont regroupées en huit classes, comme indiqué dans le tableau 3.

Tableau 3. Définition des catégories et classes de fondations profondes (méthode de 2013)

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

Le facteur de portance k_p est donné dans le tableau 4.

Tableau 4. Valeur du facteur de portance pressiométrique k_p (Méthode de 2013)

Terrain / Classe de pieu	Argile C_{CaCO3} < 30% Limon, Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable, Grave	Craie	Marne et calcaire marneux	Roche altérée et fragmentée
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

Note : la méthode de calcul à partir des essais en place distingue des sols intermédiaires entre les sols argileux et les sols sableux ; Il est précisé qu'il s'agit de sables limoneux (silteux), de sables argileux, de limons sableux et d'argiles sableuses. Pour le calcul pressiométrique, ces sols sont rattachés en fonction de la première partie de leur nom : un sable limoneux ou argileux appartient à la catégorie des sables ou graves. Un limon sableux ou une argile sableuse appartient à la catégorie des argiles ou limons.

Calcul du frottement latéral

Le frottement latéral unitaire q_s est fonction de la pression limite nette pressiométrique p^*_{LM}. Il est égal au produit de la fonction $f_{sol}(p^*_{LM})$, qui dépend de la nature du sol, par un coefficient α qui tient compte de l'effet du mode d'installation sur le frottement :

$$q_s\left(z, p_{LM}\right) = \alpha_{pieu-sol} f_{sol}\left(p_{LM}\right).$$

Cette fonction de frottement du sol $f_{sol}(p^*_{LM})$ est issue des courbes de la figure 1, que l'on a voulu rendre continues. Elle est donnée par une équation dépendant de trois paramètres a, b et c, dont la valeur est donnée dans le tableau 5 :

$$f_{sol}\left(p^*_{LM}\right) = \left(a p^*_{LM} + b\right)\left(1 - e^{-c p^*_{LM}}\right) \qquad (p^*_{LM} \text{ en MPa}).$$

Tableau 5. Valeurs des coefficients a, b, c (Méthode de 2013)

	Argile C_{CaCo3} < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable, Grave	Craie	Marne et calcaire marneux C_{CaCo3} > 30%	Roche altérée ou fragmentée
Courbe	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
a (-)	0,003	0,010	0,007	0,008	0,010
b (MPa)	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08
c (MPa^{-1})	3,8	1,2	1,3	3,0	3,0

Les courbes de variation de $f_{sol}(p^*_{LM})$ en fonction de p^*_{LM} sont représentées sur la figure 2.

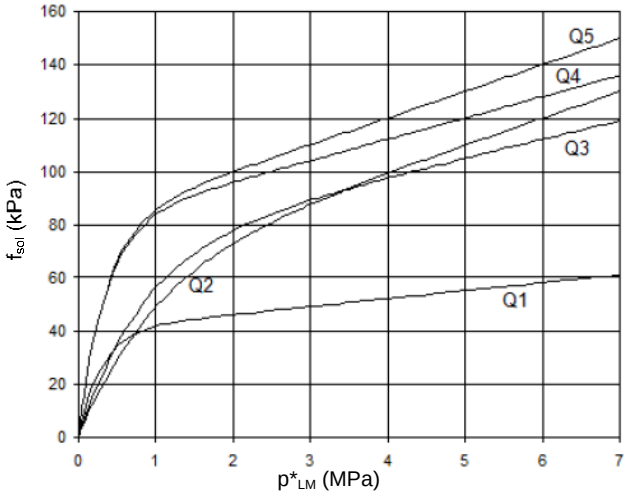


Figure 2. Détermination du frottement latéral unitaire (méthode en vigueur depuis 2013)

Le facteur d'installation $\alpha_{pieu\text{-}sol}$, qui tient compte du mode d'installation du pieu, est donné dans le tableau 6, en fonction de la catégorie de la fondation et de la nature du sol.

Tableau 6. Valeur du facteur d'installation $\alpha_{pieu\text{-}sol}$ (Méthode de 2013)

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Valeurs du paramètre - Facteur d'installation				
			Argile C_{CaCo3} <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	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

Nous ne détaillerons pas dans ces rappels les types de pieux considérés.

Des valeurs maximales sont fixées dans la norme française de calcul pressiométrique pour le frottement axial unitaire q_s. Ces valeurs sont indiquées dans le tableau 7.

Tableau 7. Valeurs maximales du frottement axial unitaire q_s

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Valeurs maximales du frottement axial unitaire en kPa				
			Argile C_{CaCo3} <30% Limon Sols intermédiaires	Sable, Grave	Craie	Marne et Calcaire-Marneux	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

Calcul des pieux à partir de sondages pénétrométriques

Le calcul de la portance des pieux au pénétromètre est parallèle à celui des pieux au pressiomètre.

La valeur de la résistance de base R_b est déduite de la formule :

$$R_b = A_b q_b$$

avec

$q_b = k_c q_{ce}$,

A_b aire de la section du pieu,

q_{ce} résistance de pointe équivalente,

k_c facteur de portance, dépendant de la nature du sol et de la méthode d'exécution du pieu.

Pour le frottement latéral q_s, on applique la formule :

$$q_s(z) = min\left(\frac{q_c(z)}{\beta}; q_{smax}\right)$$

où $q_c(z)$ représente la résistance de pointe lissée à la profondeur z et β et q_{smax} dépendent du type de pieu considéré et de la nature des terrains. Les frottements sont négligés pour les valeurs $q_c(z) < 1MPa$.

La résistance par frottement latéral R_s est calculée par intégration du frottement latéral unitaire q_s le long du pieu de périmètre constant P :

$$R_s = P\int_0^D q_s(z, q_c)dz .$$

Les règles de calcul ont été modifiées en 2012.

Dans la méthode en vigueur jusqu'à 2012, on prend la valeur du facteur de portance q_c dans le tableau 8 et les valeurs de β et de q_{smax} dans le tableau 9.

Tableau 8. Valeur du facteur de portance k_c (méthode en vigueur jusqu'à 2012)

Type de sol	*Valeurs de q_c*	*Pieux exécutés sans refoulement*	*Pieux exécutés en refoulant le sol*
Argiles et limons		*0,4*	*0,55*
Sables et graves		*0,15*	*0,5*
Craie de type A	*< 5 MPa*	*0,2*	*0,3*
Craie de type B	*> 5 MPa*	*0,3*	*0,45*

Tableau 9. Choix du coefficient β et de q_{smax}

		Argiles et limons					*Sables-Graves*			*Craies*	
		A	*B*		*C*		*A*	*B*	*C*	*A*	*B*
Foré	*β*	-	-	*75**	-	-	*200*	*200*	*200*	*125*	*80*
	q_{smax} (kPa)	*15*	*40*	*80**	*40*	*80**	-	-	*120*	*40*	*120*
Foré tubé (tube récupéré)	*β*	-	*100*	*100#*	-	*100#*	*250*	*250*	*300*	*125*	*100*
	q_{smax} (kPa)	*15*	*40*	*60#*	*40*	*80#*	-	*40*	*120*	*40*	*80*
Métal battu fermé	*β*	-	*120*		*150*		*300*	*300*	*300*	**	
	q_{smax} (kPa)	*15*	*40*		*80*		-		*120*		
Battu préfabriqué béton	*β*	-	*75*		-		*150*	*150*	*150*	**	
	q_{smax} (kPa)	*15*	*80*		*80*		-	-	*120*		

 # forage à sec, tube non louvoyé
** réalésage et rainurage en fin de forage*
*** étude spécifique nécessaire*

Selon la méthode en vigueur depuis 2013, il convient d'effectuer les opérations suivantes :

- choisir une catégorie et classe de fondations profondes (comme pour le pressiomètre) ;
- déterminer le facteur de portance k_c en fonction du type de sol (tableau 10) ;

Tableau 10. Valeur du facteur de portance k_c (Méthode en vigueur depuis 2013)

Terrain / Classe de pieu	Argile C_{CaCo3} < 30% Limon	Sol intermédiaire	Sable Grave	Craie	Marne et calcaire-marneux	Roche altérée et fragmentée
1	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3
2	0,45	0,3	0,25	0,3	0,3	0,3
3	0,5	0,5	0,5	0,4	0,35	0,35
4	0,45	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
5	0,35	0,3	0,25	0,15	0,15	0,15
6	0,4	0,4	0,4	0,35	0,2	0,2
7	0,35	0,25	0,15	0,15	0,15	0,15
8	0,45	0,3	0,2	0,3	0,3	0,25

- déterminer le frottement latéral q_s ;
Le frottement latéral unitaire q_s est fonction de la profondeur et de la résistance de pointe pénétrométrique q_c. Il est égal au produit de la fonction $f_{sol}(q_c)$, qui dépend de la nature du sol, par un coefficient $\alpha_{pieu-sol}$ qui tient compte de l'effet du mode d'installation sur le frottement :

$$q_s(z, q_c) = \alpha_{pieu-sol} f_{sol}(q_c) .$$

La fonction de frottement du sol $f_{sol}(q_c)$ est donnée par une équation dépendant de trois paramètres a, b et c, dont la valeur est donnée dans le tableau 11 :

$$f_{sol}(q_c) = (aq_c + b)\left(1 - e^{-cq_c}\right) \quad (q_c \text{ en MPa}).$$

Tableau 11. Valeur des paramètres a, b et c (Méthode en vigueur depuis 2013)

Type de sol	Argile C_{CaCO3} < 30% Limon	Sol intermédiaire	Sable Grave	Craie	Marne et calcaire marneux C_{CaCO3} > 30%	Roche altérée ou fragmentée
Courbe	Q1	Q2	Q3	Q2	Q2	Q2
a (-)	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
b (MPa)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
c (MPa^{-1})	0,4	0,25	0,15	0,25	0,25	0,25

Les courbes de variation de $f_{sol}(q_c)$ en fonction de q_c sont représentées sur la figure 3.

La valeur du facteur d'installation $\alpha_{pieu-sol}$, qui tient compte du mode d'installation du pieu, est donnée dans le tableau 12, en fonction de la catégorie de la fondation et de la nature du sol.

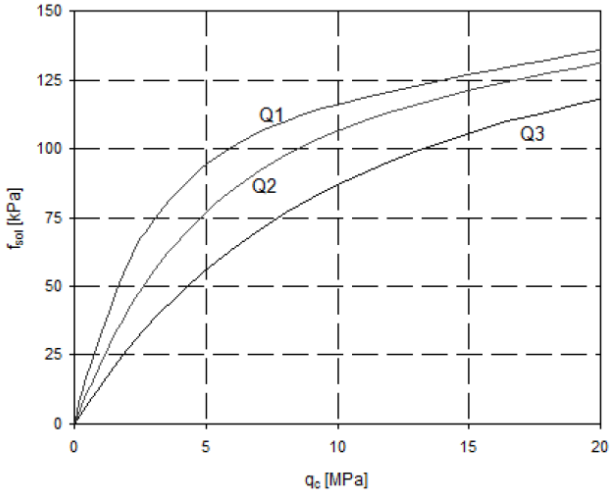


Figure 3. Détermination du frottement latéral unitaire (méthode en vigueur depuis 2013)

Tableau 12. Facteur d'installation $\alpha_{pieu\text{-}sol}$ (Méthode en vigueur depuis 2013)

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Argile $C_{CaCo3} < 30\%$ Limon	Sol intermédiaire	Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire-Marneux	Roche altérée ou fragmentée
1	FS	Foré simple (pieux et barrettes)	0,55	0,65	0,70	0,80	1,40	1,50
2	FB	Foré boue (pieux et barrettes)	0,65	0,80	1,00	0,80	1,40	1,50
3	FTP	Foré tubé (virole perdue)	0,35	0,40	0,40	0,25	0,85	-
4	FTR	Foré tubé (virole récupérée)	0,65	0,80	1,00	0,75	1,3	-
5	FSR, FBR, PU	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	0,70	0,85	-	-	-	-
6	FTC, FTCD	Foré tarière continue simple rotation ou double rotation	0,75	0,90	1,25	0,95	1,5	1,5
7	VM	Vissé moulé	0,95	1,15	1,45	0,75	1,60	-
8	VT	Vissé tubé	0,30	0,35	0,40	0,45	0,65	-
9	BPF, BPR	Battu béton préfabriqué ou précontraint	0,55	0,65	1,00	0,45	0,85	-
10	BE	Battu enrobé (béton-mortier-coulis)	1,00	1,20	1,45	0,85	1,50	-
11	BM	Battu moulé	0,60	0,70	1,00	0,95	0,95	-
12	BAF	Battu acier fermé	0,40	0,50	0,85	0,20	0,85	-
13	BAO	Battu acier ouvert	0,60	0,70	0,50	0,25	0,95	0,95
14	HB	H battu	0,55	0,65	0,70	0,20	0,95	0,85
15	HBi	H battu injecté IGU ou IRS	1,35	1,60	2,00	1,10	2,25	2,25
16	PP	Palplanches battues	0,45	0,55	0,55	0,20	1,25	1,15
17	M1	Micropieu type I	-	-	-	-	-	-
18	M2	Micropieu type II	-	-	-	-	-	-
19	PIGU, MIGU	Pieu ou micropieu injecté (type III)	1,35	1,60	2,00	1,10	2,25	2,25
20	PIRS, MIRS	Pieu ou micropieu injecté (type IV)	1,70	2,05	2,65	1,40	2,90	2,90

Les valeurs du frottement axial unitaire q_s sont limitées aux valeurs du tableau 7.

Note : les formules de calcul de portance des fondations profondes à partir des sondages pressiométriques et pénétrométriques ignorent la contrainte totale verticale au niveau de la pointe du pieu. Le choix fait par les auteurs de la méthode est de donner une résistance qui s'applique en tête de pieu, en admettant que le poids du sol et le poids du pieu s'équilibrent. Cette simplification peut introduire des écarts quand les pieux sont longs et plus lourds et elle

ne dispense pas de faire des calculs de contraintes à l'intérieur du pieu pour contrôler les efforts dans le pieu. Pour faire des calculs « complets », il faut rajouter aux charges le poids du béton du pieu et rajouter à la portance la contrainte verticale totale au niveau de la pointe du pieu.

Calcul des pieux à partir des caractéristiques c et φ

Si les méthodes de calcul des pieux à partir des essais en place sont dominantes en France, les méthodes plus anciennes fondées sur les caractéristiques mécaniques des sols déterminées dans les essais de laboratoire sont utilisées dans d'autres pays.

La méthode de calcul fondée sur c et φ utilise des formules de calcul qui ont été calquées sur les schémas de la figure 2, où la résistance de pointe est analogue à celle des fondations superficielles.

La résistance de pointe est égale à :

$$q_c = c' N_c(\varphi') + \sigma'_{vo} N_q(\varphi')$$

et le frottement latéral est égal à

$$q_s = K\sigma'_v \tan\delta + c'$$

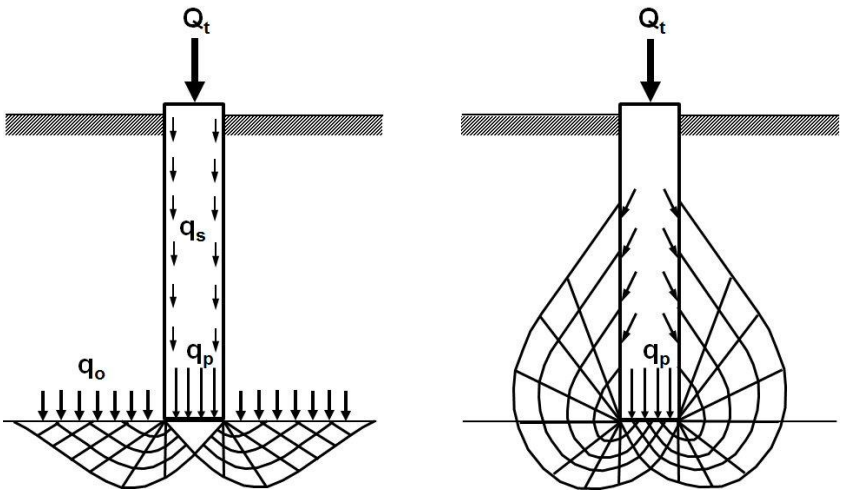


Figure 2. Schémas d'analyse de la portance des pieux (méthode en c et φ)

En situation non drainée, les formules deviennent :

$$q_p = c_u N_c + \sigma_{vo} \quad et \quad q_s = \alpha c_u .$$

La valeur de N_c est la même que pour les fondations superficielles et est habituellement fixée à 9 pour la pointe d'un pieu circulaire. Celle de N_q diffère et différentes solutions ont été proposées. Les techniques d'exécution et la nature des sols sont prises en compte dans le coefficient α pour les calculs non drainés en contraintes totales et dans le facteur K tan δ pour les calculs en contraintes effectives. Le facteur K tanδ, qui est aussi utilisé pour évaluer le frottement négatif créé par le tassement du sol autour du pieu, est évalué, dans la pratique française, comme indiqué dans le tableau 13.

Tableau 13. Valeurs du facteur K tan δ pour le calcul du frottement axial le long d'un pieu.

Sols		*Pieux forés tubés (tube perdu)*	*Pieux forés*	*Pieux battus*
Tourbes	*sols organiques*	*0,10*	*0,15*	*0,20*
Argiles, limons	*mous*	*0,10*	*0,15*	*0,20*
	fermes à durs	*0,15*	*0,20*	*0,30*
Sables, graves	*très lâches*	*0,35*	*0,35*	*0,35*
	lâches	*0,45*	*0,45*	*0,45*
	autres	*1,00*	*1,00*	*1,00*

Exercices avec corrigés détaillés

5.3.1. Exercice 1 – Effet du type, du diamètre et de la longueur du pieu sur la portance

ÉNONCÉ

Dans le cadre d'un projet, on étudie les variantes possibles pour choisir le mode de fondation sur pieux optimal pour l'ouvrage. La coupe géotechnique du terrain est résumée dans le tableau 1.

Tableau 1.

Profondeur (m)	*E_M (MPa)*	*p^*_{LM} (MPa)*	*Nature du sol*
2	*35,9*	*1,08*	*Remblai*
3,5	*14,8*	*1,28*	*Argile à blocs*
5	*43,7*	*1,15*	*Argile à blocs*
6,5	*18,5*	*1,14*	*Argile*
8	*31,6*	*1,3*	*Argile*
9,5	*27,4*	*2,5*	*Argile*
11	*43,1*	*3,04*	*Marne*
12,5	*48,3*	*3,1*	*Marne*
14	*250*	*>3,5*	*Marne*
15,5	*155*	*>3,5*	*Marne*
17	*>500*	*>3,5*	*Marne*
18,5	*>500*	*>3,5*	*Marne*
20	*71,6*	*>2,9*	*Marne*
21,5	*108*	*>2,43*	*Marne*
23	*139*	*>2,69*	*Marne*
24,5	*111*	*>5,08*	*Marne*
26	*227*	*>7,79*	*Calcaire marneux*
27,5	*245*	*>7,77*	*Calcaire marneux*
29	*298*	*>7,61*	*Calcaire marneux*
30,5	*663*	*>7,68*	*Calcaire marneux*
32	*712*	*>7,70*	*Calcaire marneux*

L'exercice consiste à comparer plusieurs possibilités concernant les pieux et à analyser la portance calculée, c'est-à-dire la résistance disponible pour porter des charges appliquées à la tête du pieu. La tête des pieux est située au niveau de la surface du terrain (Origine des profondeurs).

L'étude porte sur trois types de pieux et sur trois longueurs : les types de pieux sont « pieu foré à la boue », « pieu foré à la tarière creuse » et « pieu métallique ouvert battu ». Les longueurs sont 8m, 16m et 24m. Les diamètres des pieux sont 0,8 m pour le pieu foré à la boue et 0,6 m pour les deux autres.

La portance de ces neuf pieux (pieux isolés) sera calculée en utilisant les règles pressiométriques françaises de 2013.

CORRIGÉ

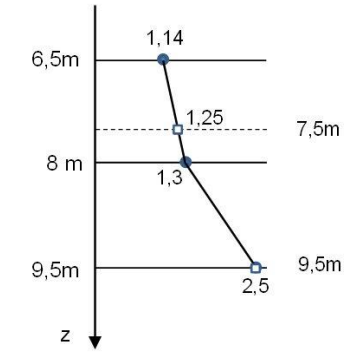
Le calcul d'un pieu de longueur et diamètre donnés utilise la nature du sol, la pression limite nette et le type de pieu. Les données nécessaires au calcul sont rassemblées dans le tableau 2. Les types de pieux sont notés (I) : pieu foré à la boue, (II) : pieu foré à la tarière creuse et (III) : pieu métallique ouvert battu. Ils sont respectivement de catégorie 2, 6 et 13 et de classe 1, 2 et 5. Les valeurs de k_p sont données aux trois profondeurs des pointes des pieux (8 m, 16 m et 24 m).

Profondeur (m)	*p^*_{LM} (MPa)*	*Nature du sol*	*k_p (I)*	*k_p (II)*	*k_p (III)*	*α (I)*	*α (II)*	*α (III)*	*a (-)*	*b (MPa)*	*c (MPa^{-1})*
2	*1,08*	*Remblai*				*1,40*	*1,80*	*0,70*	*0,01*	*0,06*	*1,2*
3,5	*1,28*	*Argile à blocs*				*1,25*	*1,50*	*1,2*	*0,003*	*0,04*	*3,5*

5	*1,15*	*Argile à blocs*				*1,25*	*1,50*	*1,2*	*0,003*	*0,04*	*3,5*
6,5	*1,14*	*Argile*				*1,25*	*1,50*	*1,2*	*0,003*	*0,04*	*3,5*
8	*1,3*	*Argile*	*1,15*	*1,30*	*1,00*	*1,25*	*1,50*	*1,2*	*0,003*	*0,04*	*3,5*
9,5	*2,5*	*Argile*				*1,25*	*1,50*	*1,2*	*0,003*	*0,04*	*3,5*
11	*3,04*	*Marne*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
12,5	*3,1*	*Marne*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
14	*>3,5*	*Marne*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
15,5	*>3,5*	*Marne*	*1,45*	*1,60*	*1,40*	*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
17	*>3,5*	*Marne*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
18,5	*>3,5*	*Marne*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
20	*>2,9*	*Marne*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
21,5	*>2,43*	*Marne*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
23	*>2,69*	*Marne*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
24,5	*>5,08*	*Marne*	*1,45*	*1,60*	*1,40*	*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
26	*>7,79*	*Calcaire marneux*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
27,5	*>7,77*	*Calcaire marneux*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
29	*>7,61*	*Calcaire marneux*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
30,5	*>7,68*	*Calcaire marneux*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*
32	*>7,70*	*Calcaire marneux*				*1,50*	*1,60*	*1,00*	*0,008*	*0,08*	*3,0*

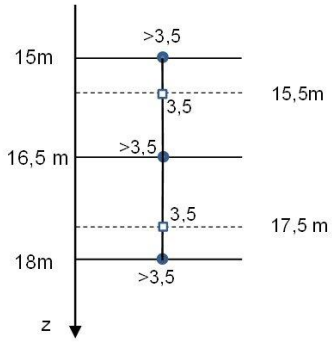
Pour déterminer la valeur de la pression limite nette équivalente aux trois profondeurs retenues pour les pointes des pieux, il faut calculer la moyenne des p^*_{LM} entre b = 0,5 m au-dessus du niveau et 1,5 m au-dessous (les rayons des pieux sont inférieurs à 0,5 m).
Si l'on interpole linéairement entre les valeurs déduites des essais, on obtient les valeurs de la pression limite nette équivalente p^*_{LMe} représentées sur les figures suivantes.

Une fois ces travaux préliminaires effectués, on peut calculer les portances des neuf pieux définis dans l'énoncé.



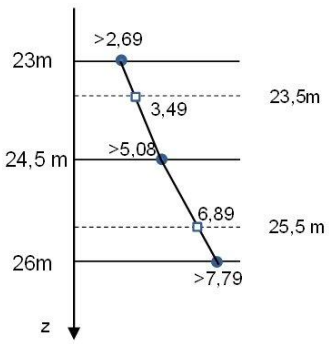
$$p^*_{LMe} = \frac{1}{2}\left(0{,}5\frac{1{,}3+1{,}25}{2} + 1{,}5\frac{1{,}3+2{,}5}{2}\right) = 1{,}74\,\text{MPa}$$

Calcul de p^*_{LMe} à 8 m



p^*_{LMe} = 3,5 MPa

Calcul de p^*_{LMe} à 16 m



$$p^*_{LMe} = \frac{1}{2}\left(1{,}0\frac{3{,}49+5{,}08}{2} + 1{,}0\frac{5{,}08+6{,}89}{2}\right) = 5{,}13\,\text{MPa}$$

Calcul de p^*_{LMe} à 24 m

Pieux forés à la boue (I)

- pieu de 8m (diamètre 0,8 m)

La résistance de pointe est $R_b = A_p\, k_p\, p^*_{LMe} = \left(\pi D^2/4\right) k_p p^*_{LMe} = 0{,}50.1{,}15.1{,}74 = 1{,}00\,MN$.

Le frottement latéral est la somme du frottement latéral par section de pieu de hauteur h_i. Compte tenu des valeurs disponibles, nous retenons le découpage suivant, avec les frottements latéraux associés :

Section (m)	p^*_{LM} (MPa)	$Ph_i\alpha(ap^*_{LM}+b)[1-\exp(-cp^*_{LM})]$ avec P = 2,51m et h_i variable
0-2,75	1,08	2,51.2,75.1,4(0,06+0,01.1,08)[1-exp(-1,2.1,08)]=0,497MN
2,75-4,25	1,28	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.1,28)[1-exp(-3,5.1,28)]=0,204MN
4,25-5,75	1,15	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.1,15)[1-exp(-3,5.1,15)]=0,201MN
5,75-7,25	1,14	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.1,14)[1-exp(-3,5.1,14)]=0,201MN
7,25-8	1,3	2,51.0,75.1,25(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,101MN

Le frottement latéral cumulé vaut donc : R_s = 1,204 MN.
La résistance du pieu est $R_{max} = R_b + R_s$ = 1,00 + 1,20 = 2,20 MN.

- pieu de 16m

La résistance de pointe est $R_b = A_p\, k_p\, p^*_{LMe} = \left(\pi D^2/4\right) k_p p^*_{LMe} = 0{,}50.1{,}45.3{,}5 = 2{,}54\,MN$.

Le frottement latéral est la somme du frottement latéral par section de pieu. Sur les huit premiers mètres, les valeurs sont identiques à celles qui ont été calculées pour le pieu de 8 m. Nous retenons le découpage suivant, avec les frottements latéraux associés :

Section (m)	p^*_{LM} (MPa)	$Ph_i\alpha(ap^*_{LM}+b)[1-\exp(-cp^*_{LM})]$ avec P = 2,51m et h_i variable
0-2,75	1,08	2,51.2,75.1,4(0,06+0,01.1,08)[1-exp(-1,2.1,08)] = 0,497 MN
2,75-4,25	1,28	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.1,28)[1-exp(-3,5.1,28)]=0,204MN
4,25-5,75	1,15	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.1,15)[1-exp(-3,5.1,15)]=0,201MN
5,75-7,25	1,14	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.1,14)[1-exp(-3,5.1,14)]=0,201MN
7,25-8	1,3	2,51.0,75.1,25(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,101 MN
8-8,75	1,3	2,51.0,75.1,25(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,101 MN
8,75-10,25	2,5	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.2,5)[1-exp(-3,5.2,5)] = 0,224 MN
10,25-11,75	3,04	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.3,04)[1-exp(-3,0.3,04)] = 0,589 MN
11,75-13,25	3,1	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.3,1)[1-exp(-3,0.3,1)] = 0,592 MN
13,25-14,75	3,5	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,592 MN
14,75-16	3,5	2,51.1,25.1,5(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,508 MN

Le frottement latéral cumulé vaut donc : R_s = 1,129 + 2,627 = 3,756 MN.
La résistance du pieu est $R_{max} = R_b + R_s$ = 2,54 + 3,76 = 6,30 MN.

- pieu de 24 m

La résistance de pointe est $R_b = A_p k_p p^*_{LMe} = (\pi D^2/4)\, k_p p^*_{LMe}$ = 0,50.1,45.5,13 = 3,72 MN
Le frottement latéral est la somme du frottement latéral par section de pieu. Sur les seize premiers mètres, les valeurs sont identiques à celles qui ont été calculées pour le pieu de 16 m. Nous retenons le découpage suivant, avec les frottements latéraux associés :

Section (m)	p^*_{LM} (MPa)	$Ph_i\alpha(ap^*_{LM}+b)[1-\exp(-cp^*_{LM})]$ avec P = 2,51m et h_i variable
0-2,75	1,08	2,51.2,75.1,4(0,06+0,01.1,08)[1-exp(-1,2.1,08)]=0,497MN
2,75-4,25	1,28	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.1,28)[1-exp(-3,5.1,28)]=0,204MN
4,25-5,75	1,15	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.1,15)[1-exp(-3,5.1,15)]=0,201MN
5,75-7,25	1,14	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.1,14)[1-exp(-3,5.1,14)]=0,201MN
7,25-8	1,3	2,51.0,75.1,25(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,101 MN
8-8,75	1,3	2,51.0,75.1,25(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,101 MN
8,75-10,25	2,5	2,51.1,5.1,25(0,04+0,003.2,5)[1-exp(-3,5.2,5)] = 0,224 MN
10,25-11,75	3,04	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.3,04)[1-exp(-3,0.3,04)] = 0,589 MN
11,75-13,25	3,1	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.3,1)[1-exp(-3,0.3,1)] = 0,592 MN
13,25-14,75	3,5	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,592 MN
14,75-16	3,5	2,51.1,25.1,5(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,508 MN

16-16,25	3,5	2,51.0,25.1,5(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,102 MN
16,25-17,75	3,5	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,610 MN
17,75-19,25	3,5	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,610 MN
19,25-20,75	2,9	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.2,9)[1-exp(-3,0.2,9)] = 0,583 MN
20,75-22,25	2,43	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.2,43)[1-exp(-3,0.2,43)] = 0,562 MN
22,25-23,75	2,69	2,51.1,5.1,5(0,08+0,008.2,69)[1-exp(-3,0.2,69)] = 0,573 MN
23,75-24	5,08	2,51.0,25.1,5(0,08+0,008.5,08)[1-exp(-3,0.5,08)]=0,114MN

Le frottement latéral cumulé vaut donc : R_s = 6,910 MN.
La résistance du pieu est $R_{max} = R_b + R_s$ = 3,72 + 6,91 = 10,63 MN.

Pieux forés à la tarière creuse (II)
- pieu de 8m (diamètre 0,6 m)
La résistance de pointe est $R_b = A_p k_p p^*_{LMe} = (\pi D^2/4)\, k_p p^*_{LMe}$ = 0,283.1,3.1,74 = 0,64 MN.
Le frottement latéral est la somme du frottement latéral par section de pieu de hauteur h_i. Compte tenu des valeurs disponibles, nous retenons le découpage suivant, avec les frottements latéraux associés :

Section (m)	p^*_{LM} (MPa)	$Ph_i\alpha(ap^*_{LM}+b)[1-\exp(-cp^*_{LM})]$ avec P = 1,88m et h_i variable
0-2,75	1,08	1,88.2,75.1,8(0,06+0,01.1,08)[1-exp(-1,2.1,08)] = 0,479 MN
2,75-4,25	1,28	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.1,28)[1-exp(-3,5.1,28)] = 0,183 MN
4,25-5,75	1,15	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.1,15)[1-exp(-3,5.1,15)] = 0,181 MN
5,75-7,25	1,14	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.1,14)[1-exp(-3,5.1,14)] = 0,180 MN
7,25-8	1,3	1,88.0,75.1,5(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,092 MN

Le frottement latéral cumulé vaut donc : R_s = 1,115 MN.
La résistance du pieu est $R_{max} = R_b + R_s$ = 0,64 + 1,12 = 1,76 MN.

- pieu de 16m
La résistance de pointe est $R_b = A_p k_p p^*_{LMe} = (\pi D^2/4) k_p p^*_{LMe}$ = 0,283.1,6.3,5 = 1,58 MN.
Le frottement latéral est la somme du frottement latéral par section de pieu. Sur les huit premiers mètres, les valeurs sont identiques à celles qui ont été calculées pour le pieu de 8 m. Nous retenons le découpage suivant, avec les frottements latéraux associés :

Section (m)	p^*_{LM} (MPa)	$Ph_i\alpha(ap^*_{LM}+b)[1-\exp(-cp^*_{LM})]$ avec P = 1,88m et h_i variable
0-2,75	1,08	1,88.2,75.1,8(0,06+0,01.1,08)[1-exp(-1,2.1,08)] = 0,479 MN
2,75-4,25	1,28	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.1,28)[1-exp(-3,5.1,28)] = 0,183 MN
4,25-5,75	1,15	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.1,15)[1-exp(-3,5.1,15)] = 0,181 MN
5,75-7,25	1,14	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.1,14)[1-exp(-3,5.1,14)] = 0,180 MN
7,25-8	1,3	1,88.0,75.1,5(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,092 MN
8-8,75	1,3	1,88.0,75.1,5(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,092 MN
8,75-10,25	2,5	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.2,5)[1-exp(-3,5.2,5)] = 0,201 MN
10,25-11,75	3,04	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.3,04)[1-exp(-3,0.3,04)] = 0,471 MN
11,75-13,25	3,1	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.3,1)[1-exp(-3,0.3,1)] = 0,473 MN
13,25-14,75	3,5	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,487 MN
14,75-16	3,5	1,88.1,25.1,6(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,406 MN

Le frottement latéral cumulé vaut donc : R_s = 1,115 + 2,130 = 3,245 MN.
La résistance du pieu est $R_{max} = R_b + R_s$ = 1,58 + 3,25 = 4,83 MN.

- pieu de 24 m
La résistance de pointe est $R_b = A_p k_p p^*_{LMe} = (\pi D^2/4) k_p p^*_{LMe}$ = 0,283.1,60.5,13 = 2,32 MN.
Le frottement latéral est la somme du frottement latéral par section de pieu. Sur les seize premiers mètres, les valeurs sont identiques à celles qui ont été calculées pour le pieu de 16 m. Nous retenons le découpage suivant, avec les frottements latéraux associés :

Section (m)	p^*_{LM} (MPa)	$Ph_i\alpha(ap^*_{LM}+b)[1-\exp(-cp^*_{LM})]$ avec P = 1,88m et h_i variable
0-2,75	1,08	1,88.2,75.1,8(0,06+0,01.1,08)[1-exp(-1,2.1,08)] = 0,479 MN
2,75-4,25	1,28	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.1,28)[1-exp(-3,5.1,28)] = 0,183 MN

4,25-5,75	1,15	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.1,15)[1-exp(-3,5.1,15)] = 0,181 MN
5,75-7,25	1,14	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.1,14)[1-exp(-3,5.1,14)] = 0,180 MN
7,25-8	1,3	1,88.0,75.1,5(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,092 MN
8-8,75	1,3	1,88.0,75.1,5(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,092 MN
8,75-10,25	2,5	1,88.1,5.1,5(0,04+0,003.2,5)[1-exp(-3,5.2,5)] = 0,201 MN
10,25-11,75	3,04	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.3,04)[1-exp(-3,0.3,04)] = 0,471 MN
11,75-13,25	3,1	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.3,1)[1-exp(-3,0.3,1)] = 0,473 MN
13,25-14,75	3,5	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,487 MN
14,75-16	3,5	1,88.1,25.1,6(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,406 MN
16-16,25	3,5	1,88.0,25.1,6(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,081 MN
16,25-17,75	3,5	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,487 MN
17,75-19,25	3,5	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,487 MN
19,25-20,75	2,9	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.2,9)[1-exp(-3,0.2,9)] = 0,466 MN
20,75-22,25	2,43	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.2,43)[1-exp(-3,0.2,43)] = 0,448 MN
22,25-23,75	2,69	1,88.1,5.1,6(0,08+0,008.2,69)[1-exp(-3,0.2,69)] = 0,458 MN
23,75-24	5,08	1,88.0,25.1,6(0,08+0,008.5,08)[1-exp(-3,0.5,08)]=0,091MN

Le frottement latéral cumulé vaut donc : R_s = 3,245 + 2,538 = 5,783 MN.
La résistance du pieu est $R_{max} = R_b + R_s$ = 2,32 + 5,78 = 8,10 MN.

Pieux métalliques ouverts battus (III)

- pieu de 8m (diamètre 0,6 m)

La résistance de pointe est $R_b = A_p k_p p^*_{LMe} = (\pi D^2/4)\, k_p p^*_{LMe}$ = 0,283.1,4.1,74 = 0,69 MN
Le frottement latéral est la somme du frottement latéral par section de pieu de hauteur h_i. Compte tenu des valeurs disponibles, nous retenons le découpage suivant, avec les frottements latéraux associés :

Section (m)	p^*_{LM} (MPa)	$Ph_i\alpha(ap^*_{LM}+b)[1-\exp(-cp^*_{LM})]$ avec P = 1,88m et h_i variable
0-2,75	1,08	1,88.2,75.0,7(0,06+0,01.1,08)[1-exp(-1,2.1,08)] = 0,186 MN
2,75-4,25	1,28	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.1,28)[1-exp(-3,5.1,28)] = 0,147 MN
4,25-5,75	1,15	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.1,15)[1-exp(-3,5.1,15)] = 0,144 MN
5,75-7,25	1,14	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.1,14)[1-exp(-3,5.1,14)] = 0,144 MN
7,25-8	1,3	1,88.0,75.1,2(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,073 MN

Le frottement latéral cumulé vaut donc : R_s = 0,694 MN.
La résistance du pieu est $R_{max} = R_b + R_s$ = 0,69 + 0,69 = 1,38 MN.

- pieu de 16m

La résistance de pointe est $R_b = A_p\, k_p\, p^*_{LMe} = \left(\pi D^2/4\right) k_p p^*_{LMe} = 0,283.1,4.3,5 = 1,39 \text{MN}$.

Le frottement latéral est la somme du frottement latéral par section de pieu. Sur les huit premiers mètres, les valeurs sont identiques à celles qui ont été calculées pour le pieu de 8 m. Nous retenons le découpage suivant, avec les frottements latéraux associés :

Section (m)	p^*_{LM} (MPa)	$Ph_i\alpha(ap^*_{LM}+b)[1-\exp(-cp^*_{LM})]$ avec P = 1,88m et h_i variable
0-2,75	1,08	1,88.2,75.0,7(0,06+0,01.1,08)[1-exp(-1,2.1,08)]=0,186MN
2,75-4,25	1,28	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.1,28)[1-exp(-3,5.1,28)]=0,147MN
4,25-5,75	1,15	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.1,15)[1-exp(-3,5.1,15)]=0,144MN
5,75-7,25	1,14	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.1,14)[1-exp(-3,5.1,14)]=0,144MN
7,25-8	1,3	1,88.0,75.1,2(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,073 MN
8-8,75	1,3	1,88.0,75.1,2(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,073 MN
8,75-10,25	2,5	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.2,5)[1-exp(-3,5.2,5)] = 0,161 MN
10,25-11,75	3,04	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.3,04)[1-exp(-3,0.3,04)]=0,294MN
11,75-13,25	3,1	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.3,1)[1-exp(-3,0.3,1)] = 0,296 MN
13,25-14,75	3,5	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,305 MN
14,75-16	3,5	1,88.1,25.1,0(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,254 MN

Le frottement latéral cumulé vaut donc : R_s = 0,694 + 1,383 = 2,077 MN.

La résistance du pieu est $R_{max} = R_b + R_s = 1,39 + 2,08 = 3,47$ MN.

- pieu de 24 m

La résistance de pointe est $R_b = A_p k_p p^*_{LMe} = \left(\pi D^2/4\right) k_p p^*_{LMe} = 0,283.1,4.5,13 = 2,03 MN.$

Le frottement latéral est la somme du frottement latéral par section de pieu. Sur les seize premiers mètres, les valeurs sont identiques à celles qui ont été calculées pour le pieu de 16 m. Nous retenons le découpage suivant, avec les frottements latéraux associés :

Section (m)	p^*_{LM} (MPa)	$Ph_i\alpha(ap^*_{LM}+b)[1-\exp(-cp^*_{LM})]$ avec P = 1,88m et h_i variable
0-2,75	1,08	1,88.2,75.0,7(0,06+0,01.1,08)[1-exp(-1,2.1,08)] = 0,186 MN
2,75-4,25	1,28	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.1,28)[1-exp(-3,5.1,28)] = 0,147 MN
4,25-5,75	1,15	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.1,15)[1-exp(-3,5.1,15)] = 0,144 MN
5,75-7,25	1,14	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.1,14)[1-exp(-3,5.1,14)] = 0,144 MN
7,25-8	1,3	1,88.0,75.1,2(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,073 MN
8-8,75	1,3	1,88.0,75.1,2(0,04+0,003.1,3)[1-exp(-3,5.1,3)] = 0,073 MN
8,75-10,25	2,5	1,88.1,5.1,2(0,04+0,003.2,5)[1-exp(-3,5.2,5)] = 0,161 MN
10,25-11,75	3,04	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.3,04)[1-exp(-3,0.3,04)] = 0,294 MN
11,75-13,25	3,1	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.3,1)[1-exp(-3,0.3,1)] = 0,296 MN
13,25-14,75	3,5	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,305 MN
14,75-16	3,5	1,88.1,25.1,0(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,254 MN
16-16,25	3,5	1,88.0,25.1,0(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,051 MN
16,25-17,75	3,5	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,304 MN
17,75-19,25	3,5	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.3,5)[1-exp(-3,0.3,5)] = 0,304 MN
19,25-20,75	2,9	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.2,9)[1-exp(-3,0.2,9)] = 0,291 MN
20,75-22,25	2,43	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.2,43)[1-exp(-3,0.2,43)] = 0,286 MN
22,25-23,75	2,69	1,88.1,5.1,0(0,08+0,008.2,69)[1-exp(-3,0.2,69)] = 0,286 MN
23,75-24	5,08	1,88.0,25.1,0(0,08+0,008.5,08)[1-exp(-3,0.5,08)]=0,057MN

Le frottement latéral cumulé vaut donc : $R_s = 2,077 + 1,579 = 3,612$ MN.
La résistance du pieu est $R_{max} = R_b + R_s = 2,03 + 3,61 = 5,64$ MN.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant. On observe que, sur ce site, les pieux tubulaires ouverts battus ont une portance plus faible que les pieux forés à la tarière creuse, pour un même diamètre. L'augmentation du diamètre a un effet important sur la résistance du sol, puisque le frottement latéral est proportionnel au diamètre et la résistance de pointe au carré du diamètre.

Type de pieu		Pieu de 8m	Pieu de 16m	Pieu de 24m
Pieu foré à la boue (diamètre 0,8 m)	R_b (MN)	1,00	2,54	3,72
	R_s (MN)	1,20	3,76	6,91
	R_{max} (MN)	2,20	6,30	10,63
Pieu foré à la tarière creuse (Diamètre 0,6 m)	R_b (MN)	0,64	1,58	2,32
	R_s (MN)	1,12	3,25	5,78
	R_{max} (MN)	1,76	4,83	8,10
Pieu métallique ouvert battu (Diamètre 0,6 m)	R_b (MN)	0,69	1,39	2,03
	R_s (MN)	0,69	2,08	3,61
	R_{max} (MN)	1,38	3,47	5,64

5.3.2. Exercice 2 – Influence de la nature du terrain sur la portance des pieux

ÉNONCÉ

Pour analyser l'influence de la nature du terrain, nous allons considérer des pieux dits « flottants » c'est-à-dire dont la pointe ne s'appuie pas sur une couche plus résistante, et nous allons admettre que le sol est homogène sur toute la longueur du pieu et dans la zone qui porte la pointe. L'étude porte sur l'interaction de la technique d'exécution et du comportement du sol et consiste à calculer la portance de pieux de mêmes dimensions réalisés de façon

différente, dans chacune des cinq catégories de terrains que distingue la méthode de calcul des pieux à partir des sondages pressiométriques. Tous les pieux ont 10 m de longueur et un diamètre de 0,6 m.
Les terrains ont les propriétés (homogènes) indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1.

Type de sol	Argile C_{CaCO3} < 30% Limon Sol intermédiaire	Sable Grave	Craie	Marne et calcaire marneux C_{CaCO3} > 30%	Roche altérée ou fragmentée
p^*_{LM} (MPa)	2	2	2	2	2

Les méthodes d'exécution (types de pieux) à considérer sont les suivantes :
- pieu foré à la boue,
- pieu foré à la tarière creuse,
- pieu vissé moulé,
- pieu vissé tubé,
- pieu battu moulé,
- pieu battu ouvert.

Commentez le résultat : quelles méthodes sont plus adaptées à chaque type de terrain ? Quel est le domaine d'application préférentiel (en termes de terrains) de chaque méthode d'installation des pieux ?

CORRIGÉ

Si l'on utilise le système de calcul de 2013, la formule de calcul de la portance du pieu est :

$$R_{max} = A_p\, k_p\, p^*_{LMe} + PL\alpha_{sol-pieu}\left(ap^*_{LM} + b\right)\left[1 - exp\left(-cp^*_{LM}\right)\right]$$

Les paramètres communs à tous les pieux ont les valeurs suivantes :
- section du pieu $A_p = \pi D^2/4 = 0{,}283\ m^2$;
- périmètre du pieu $P = \pi D = 1{,}885$ m ;
- longueur du pieu L = 10 m ;
- pression limite nette équivalente p^*_{LMe} = 2 MPa.

Avec ces valeurs, la formule s'écrit :

$$R_{max} = 0{,}283.2k_p + 18{,}85\alpha_{sol-pieu}\left(2a + b\right)\left[1 - exp\left(-2c\right)\right],$$

$$R_{max} = 0{,}566k_p + 18{,}85\alpha_{sol-pieu}\left(2a + b\right)\left[1 - exp\left(-2c\right)\right].$$

Pour choisir les autres paramètres, il faut tenir compte de la nature du terrain et de la technique d'installation. On peut établir le tableau suivant pour k_p et $\alpha_{sol\text{-}pieu}$:

Type de pieu	Catégorie	Classe	Facteur k_p - Facteur $\alpha_{sol\text{-}pieu}$				
			Argile-Limon	Sable-Grave	Craie	Marne	Roche altérée
Pieu foré à la boue	2	1	1,15 – 1,25	1,1 – 1,4	1,45 – 1,8	1,45 – 1,5	1,45 – 1,6
Pieu foré à la tarière creuse	6	2	1,3 – 1,5	1,65 – 1,8	1,60 – 2,1	1,60 – 1,6	2,00 – 1,6
Pieu vissé moulé	7	3	1,55 – 1,9	3,2 – 2,1	2,35 – 1,7	2,10 – 1,7	2,10 – ?
Pieu vissé tubé	8	3	1,55 – 0,6	3,2 – 0,6	2,35 – 1,0	2,10 – 0,7	2,10 – ?
Pieu battu moulé	11	4	1,35 – 1,2	3,1 – 1,4	2,30 – 2,1	2,30 – 1,0	2,30 – ?
Pieu battu ouvert	13	5	1,0 – 1,2	1,9 – 0,7	1,40 – 0,5	1,40 – 1,0	1,20 – 1,0
Note : la catégorie sert à déterminer $\alpha_{sol\text{-}pieu}$ et la classe à déterminer k_p.							

Les valeurs de a, b et c dépendent seulement de la nature du terrain. Elles sont rassemblées dans le tableau suivant.

	Argile C_{CaCo3} < 30% Limon Sol intermédiaire	Sable Grave	Craie	Marne et calcaire marneux C_{CaCo3} > 30%	Roche altérée ou fragmentée
a (-)	0,003	0,010	0,007	0,008	0,010
b (MPa)	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08
c (MPa^{-1})	3,8	1,2	1,3	3,0	3,0

Ces chiffres permettent de faire les calculs suivants :

- pieu foré à la boue
  - Argile/limon : $R_{max} = 0,566.1,15 + 18,85.1,25(0,04 + 0,006)\left[1 - exp(-7,6)\right] = 1,73$ MN
  - Sable/grave $R_{max} = 0,566.1,1 + 18,85.1,1(0,06 + 0,02)\left[1 - exp(-2,4)\right] = 2,13$ MN.
  - Craie : $R_{max} = 0,566.1,45 + 18,85.1,8(0,07 + 0,014)\left[1 - exp(-2,6)\right] = 3,46$ MN.
  - Marne : $R_{max} = 0,566.1,45 + 18,85.1,5(0,08 + 0,016)\left[1 - exp(-6)\right] = 3,54$ MN.
  - Roche altérée : $R_{max} = 0,566.1,45 + 18,85.1,6(0,08 + 0,02)\left[1 - exp(-6)\right] = 3,83$ MN.
- pieu foré à la tarière creuse
  - Argile/limon : $R_{max} = 0,566.1,3 + 18,85.1,5(0,04 + 0,006)\left[1 - exp(-7,6)\right] = 2,54$ MN
  - Sable/grave $R_{max} = 0,566.1,65 + 18,85.1,8(0,06 + 0,02)\left[1 - exp(-2,4)\right] = 3,40$ MN.
  - Craie : $R_{max} = 0,566.1,6 + 18,85.2,1(0,07 + 0,014)\left[1 - exp(-2,6)\right] = 3,98$ MN.
  - Marne : $R_{max} = 0,566.1,6 + 18,85.1,6(0,08 + 0,016)\left[1 - exp(-6)\right] = 3,80$ MN.
  - Roche altérée : $R_{max} = 0,566.2,0 + 18,85.1,6(0,08 + 0,02)\left[1 - exp(-6)\right] = 4,15$ MN.
- pieu vissé moulé
  - Argile/limon : $R_{max} = 0,566.1,55 + 18,85.1,9(0,04 + 0,006)\left[1 - exp(-7,6)\right] = 2,52$ MN
  - Sable/grave $R_{max} = 0,566.3,2 + 18,85.2,1(0,06 + 0,02)\left[1 - exp(-2,4)\right] = 4,69$ MN.
  - Craie : $R_{max} = 0,566.2,35 + 18,85.1,7(0,07 + 0,014)\left[1 - exp(-2,6)\right] = 3,82$ MN.
  - Marne : $R_{max} = 0,566.2,1 + 18,85.1,7(0,08 + 0,016)\left[1 - exp(-6)\right] = 4,26$ MN.
  - Roche altérée : pas de valeur de $\alpha_{sol\text{-}pieu}$.
- pieu vissé tubé
  - Argile/limon : $R_{max} = 0,566.1,55 + 18,85.0,6(0,04 + 0,006)\left[1 - exp(-7,6)\right] = 1,40$ MN
  - Sable/grave $R_{max} = 0,566.3,2 + 18,85.0,6(0,06 + 0,02)\left[1 - exp(-2,4)\right] = 2,63$ MN.
  - Craie : $R_{max} = 0,566.2,35 + 18,85.1,7(0,07 + 0,014)\left[1 - exp(-2,6)\right] = 3,82$ MN.
  - Marne : $R_{max} = 0,566.2,1 + 18,85.0,7(0,08 + 0,016)\left[1 - exp(-6)\right] = 2,45$ MN.
  - Roche altérée : pas de valeur de $\alpha_{sol\text{-}pieu}$.
- pieu battu moulé
  - Argile/limon : $R_{max} = 0,566.1,35 + 18,85.1,2(0,04 + 0,006)\left[1 - exp(-7,6)\right] = 1,80$ MN
  - Sable/grave $R_{max} = 0,566.3,1 + 18,85.1,4(0,06 + 0,02)\left[1 - exp(-2,4)\right] = 3,67$ MN.
  - Craie : $R_{max} = 0,566.2,3 + 18,85.2,1(0,07 + 0,014)\left[1 - exp(-2,6)\right] = 4,38$ MN.
  - Marne : $R_{max} = 0,566.2,3 + 18,85.1,0(0,08 + 0,016)\left[1 - exp(-6)\right] = 3,11$ MN.
  - Roche altérée : pas de valeur de $\alpha_{sol\text{-}pieu}$.
- pieu battu ouvert
  - Argile/limon : $R_{max} = 0,566.1,0 + 18,85.1,2(0,04 + 0,006)\left[1 - exp(-7,6)\right] = 1,61$ MN
  - Sable/grave $R_{max} = 0,566.1,9 + 18,85.0,7(0,06 + 0,02)\left[1 - exp(-2,4)\right] = 2,04$ MN.
  - Craie : $R_{max} = 0,566.1,4 + 18,85.0,5(0,07 + 0,014)\left[1 - exp(-2,6)\right] = 1,53$ MN.
  - Marne : $R_{max} = 0,566.1,4 + 18,85.1,0(0,08 + 0,016)\left[1 - exp(-6)\right] = 2,60$ MN.
  - Roche altérée : $R_{max} = 0,566.1,2 + 18,85.1,0(0,08 + 0,02)\left[1 - exp(-6)\right] = 2,56$ MN.

Tableau récapitulatif (Valeurs en MN)

Type de pieu	Argile, Limon Sol intermédiaire	Sable, Grave	Craie	Marne et calcaire marneux	Roche altérée ou fragmentée
Pieu foré à la boue	1,73	2,13	3,46	3,54	3,83
Pieu foré à la tarière creuse	2,54	3,40	3,98	3,80	4,15
Pieu vissé moulé	2,52	4,69	3,82	4,26	-
Pieu vissé tubé	1,40	2,63	3,82	2,45	-
Pieu battu moulé	1,80	3,67	4,38	3,11	-
Pieu battu ouvert	1,61	2,04	1,53	2,60	2,56

La comparaison des valeurs du tableau récapitulatif montre que la nature du terrain a une forte influence sur la résistance des pieux, et que cette influence varie selon la méthode d'exécution du pieu. Pour une même valeur de la pression limite pressiométrique, le comportement des argiles est globalement considéré comme moins favorable que celui des sols grenus (sables et graves) et les terrains plus rocheux, sauf pour les pieux ouverts battus, plus défavorables dans les sols grenus et les craies. Les contributions de la pointe et du fût du pieu à la résistance globale dépendent du sol et de la méthode d'exécution.

5.3.3. Exercice 3 – Calcul d'un pieu à partir d'un sondage au pénétromètre statique

ÉNONCÉ

On veut calculer la portance d'un pieu battu en béton dans un terrain caractérisé par un sondage au pénétromètre statique (Figure 1). Un carottage a permis d'identifier les terrains du site : il s'agit de 2 m de remblai, puis 3 m de sable, puis de la craie tendre puis plus résistante. Calculer la portance d'un pieu de section circulaire, de longueur 8 m et de diamètre 30 cm.

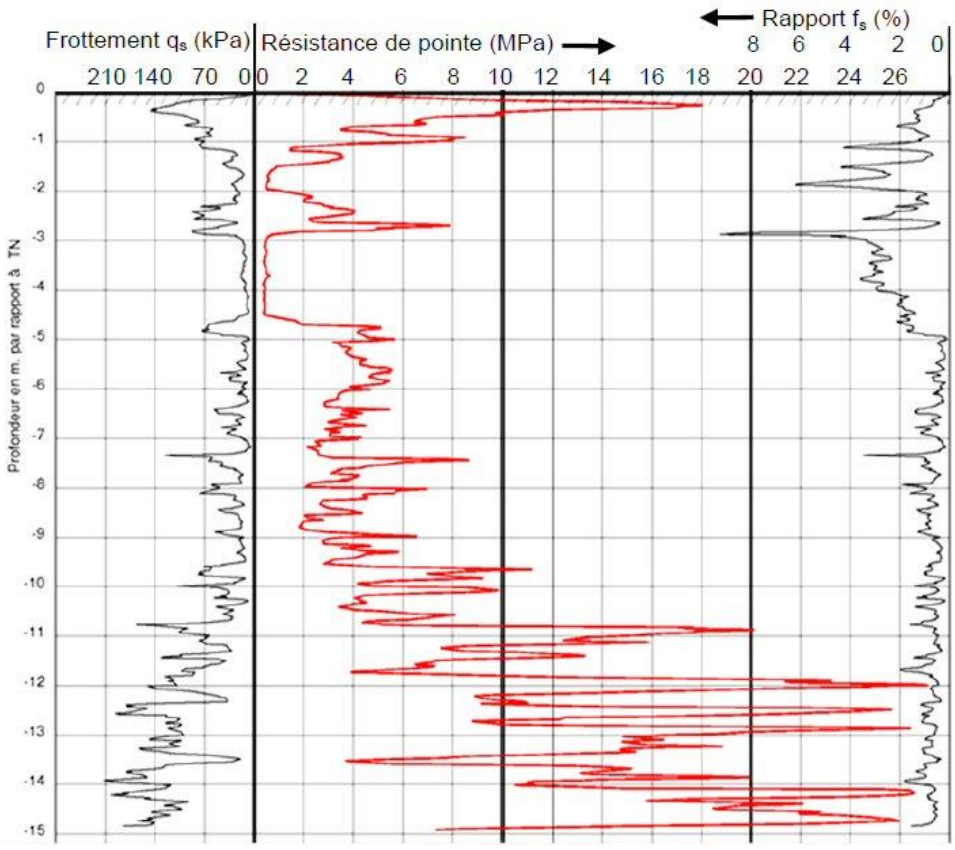


Figure 1.

CORRIGÉ

Le calcul de la portance des pieux au pénétromètre s'effectue en séparant la résistance de pointe R_b et la résistance due au frottement latéral R_s. Chacun de ces termes est calculé à partir de la résistance q_c déterminée au pénétromètre :

$$R_b = A_b\, k_c\, q_{ce}$$

$$R_s = P\int_0^D q_s(z, q_c)dz$$

Le pieu est de catégorie 9 et de classe 4. Au niveau de la pointe, le terrain est de la craie. Le coefficient k_c vaut donc 0,4. La surface A_b est égale à $\pi.0{,}3^2/4 = 0{,}071$. Pour évaluer q_{ce}, il faut calculer la moyenne de q_c entre le niveau de la base du pieu + 0,5m et le niveau de la base du pieu – 1,5m (le rayon du pieu est inférieur à 0,5m).
La résistance de pointe vaut : $R_b = A_b\, k_c\, q_{ce} = 0{,}071.0{,}4.3{,}6 = 0{,}10$ MN.

Pour calculer le frottement latéral, on utilise le périmètre du pieu, $P = \pi D = 0{,}3\pi = 0{,}942$m. Il faut d'autre part calculer la moyenne de q_c sur les sections homogènes du pieu (du point de vue du sol), sachant que l'on annule les valeurs pour $q_c < 1$ MPa.
Les zones adoptées pour calculer des moyennes de q_c sont représentées sur la figure 2.
Ces informations permettent de rassembler les valeurs des paramètres du calcul : tableau 1 pour les valeurs de a, b, c et $\alpha_{pieu\text{-}sol}$; tableau 2 pour les valeurs du frottement latéral par section de pieu de longueur h_i.

Tableau 1. Valeur des paramètres

	Remblai (matériau intermédiaire)	Sable	Craie
a (-)	0,0015	0,0012	0,0015
b (MPa)	0,1	0,1	0,1
c (MPa^{-1})	0,25	0,15	0,25
$\alpha_{pieu\text{-}sol}$ (-) Catégorie 9	0,65	1,0	0,45

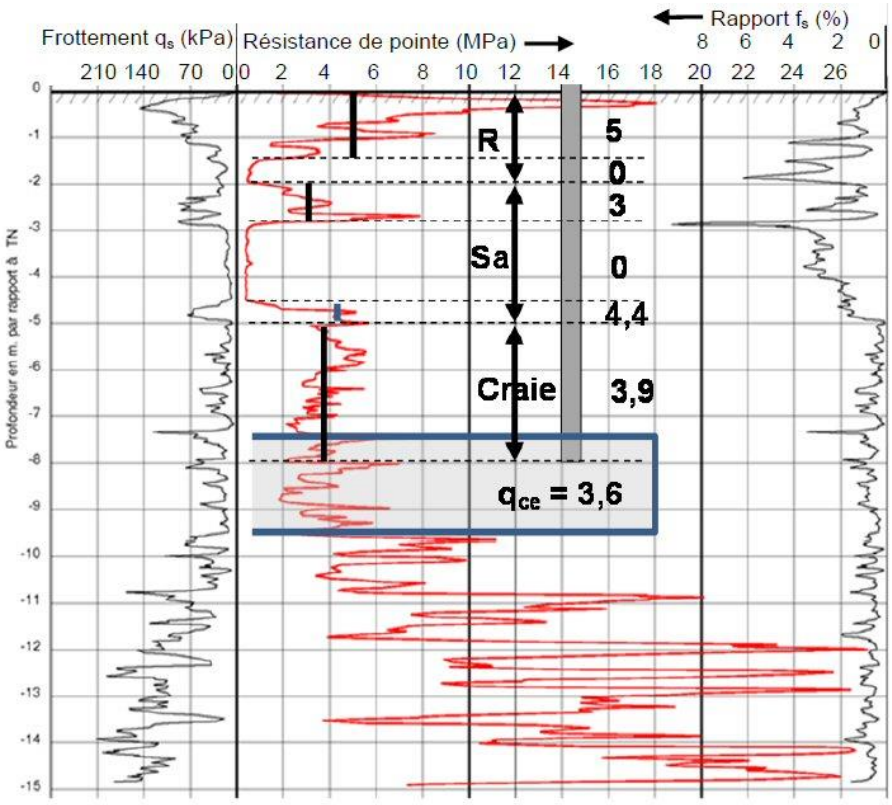


Figure 2. Position du pieu et des sols et valeurs de q_c en MPa.

Tableau 2. Calcul du frottement latéral

Section (m)	q_c (MPa)	$Ph_i\alpha(aq_c+b)[1-\exp(-cq_c)]$ avec P = 0,942m et h_i variable
0-1,4	5	0,942.1,4.0,65(0,1+0,0015.5)[1-exp(-0,25.5)]=0,066MN
1,4-2	0,5 = 0	0,942.0,6.0(0,1+0,0015.0)[1-exp(-0,25.0)] = 0 MN
2-2,8	3	0,942.1,8.1,0(0,1+0,0012.3)[1-exp(-0,15.3)] = 0,064 MN
2,8-4,5	0,4 = 0	0,942.1,7.0(0,1+0,0012.0)[1-exp(-0,15.0)] = 0 MN
4,5-5	4,4	0,942.0,5.1,0(0,1+0,0012.4,4)[1-exp(-0,15.4,4)]=0,024MN
5-8	3,9	0,942.3,0.0,45(0,1+0,0015.3,9)[1-exp(-0,25.3,9)] = 0,084 MN

Le frottement latéral total vaut donc R_s = 0,238 MN.
La résistance totale du pieu vaut : $R_{max} = R_b + R_s$ = 0,10 + 0,24 = 0,34 MN.