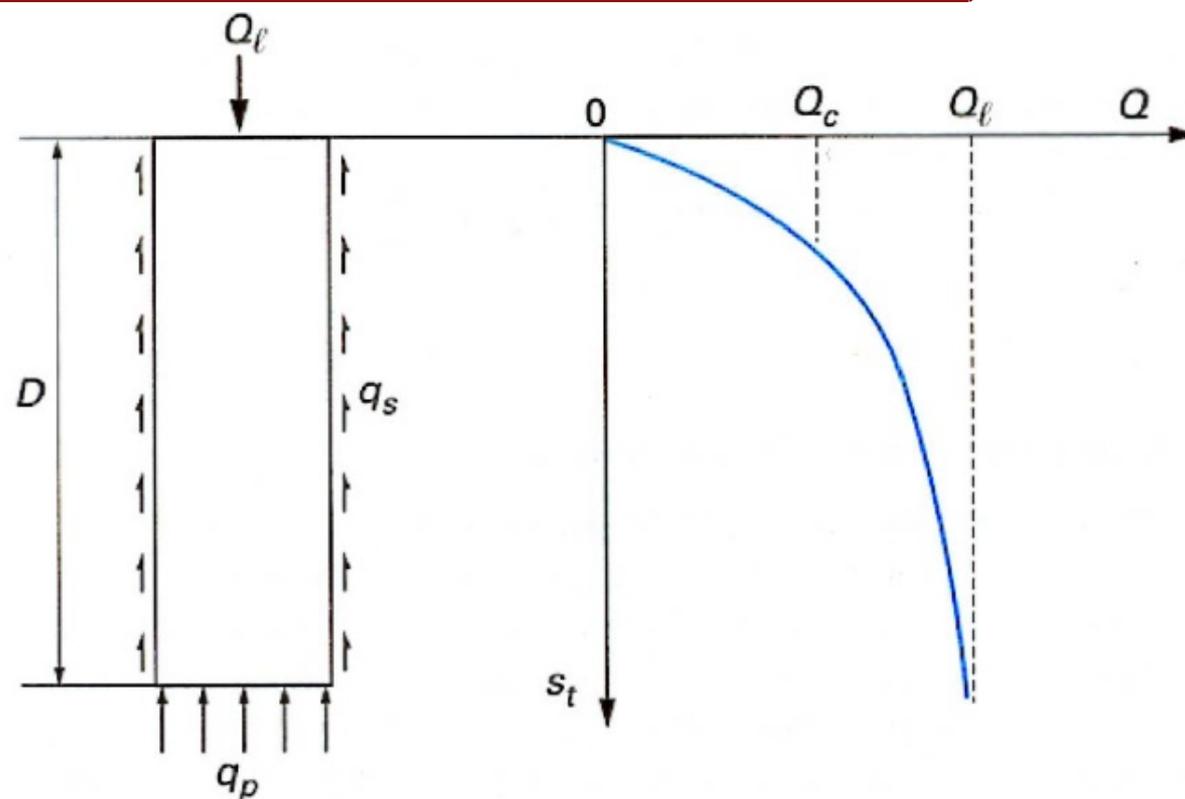


FONPROF : Capacité portante d'une fondation  
profonde au sens de la norme NF P 94 262

Fahd Cuira  
Terrasol

# Notions préliminaires



$D$  profondeur du pieu

$Q$  charges en tête

$Q_c$  charge de fluage

$Q_\ell$  charge limite

$q_p$  résistance unitaire de pointe

$q_s$  frottement latéral unitaire  
limite

$s_t$  enfoncement en tête

# Notions préliminaires

Résistance limite en frottement	$Q_s = \sum A_{si} q_{si}$
Résistance limite en pointe	$Q_p = A_p q_p$
Charge de rupture	$Q_l = Q_s + Q_p$
Charge de fluage (pieu non refoulant le sol)	$Q_c = 0,7Q_s + 0,5Q_b$
Charge de fluage (pieu refoulant le sol)	$Q_c = 0,7Q_s + 0,7Q_b$

- $q_{si}$  Frottement latéral unitaire limite dans la couche « i »
- $A_{si}$  Surface latérale du pieu dans la couche « i »
- $q_p$  Contrainte limite en pointe du pieu
- $A_p$  Section en pointe du pieu

# Règles de justification

⇒ Importance du mode de mise en œuvre

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

# Règles de justification

⇒ Importance du mode de mise en œuvre

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation
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

# Règles de justification

⇒ Vérification de la capacité portante aux états limites ultimes

$$V_d \leq \frac{Q_I}{F_{ELU}} \quad V_d \quad \text{Effort axial appliqué en tête du pieu (pondéré)}$$

$$F_{ELU} \quad \text{Coefficient partiel « combiné » } (= \gamma_R \cdot \gamma_{R,d1} \cdot \gamma_{R,d2})$$

Valeurs de $F_{ELU}$	1 <sup>ère</sup> ligne	ELU : Combinaisons fondamentales et situations sismiques			
	2 <sup>nde</sup> ligne	ELU : Situations accidentelles			
		Compression		Traction	
		PMT	CPT	PMT	CPT
Pieux non ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10 et 15		1,39	1,43	1,77	1,83
		1,27	1,30	1,62	1,67
Pieux ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10 et 15		1,69	1,75	2,15	2,21
		1,54	1,60	1,96	2,02
Pieux de catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20 dans les sables, les sols intermédiaires et les roches		1,69	1,75	2,15	2,21
		1,54	1,60	1,96	2,02
Pieux de catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20 dans l'argile, les craies et les marnes		2,42	2,42	2,53	2,53
		2,20	2,20	2,31	2,31

# Règles de justification

⇒ Vérification de la capacité portante aux états limites de service

$$V_d \leq \frac{Q_c}{F_{ELS}} \quad V_d \quad \text{Effort axial appliqué en tête du pieu (pondéré)}$$

$$F_{ELS} \quad \text{Coefficient partiel « combiné » } (= \gamma_{cR} \cdot \gamma_{R,d1} \cdot \gamma_{R,d2})$$

Valeurs de  $F_{ELS}$

	1 <sup>ère</sup> ligne	ELS : Combinaisons quasi-permanentes			
	2 <sup>nde</sup> ligne	ELS : Combinaisons caractéristiques			
		Compression		Traction	
		PMT	CPT	PMT	CPT
Pieux non ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10 et 15		1,39	1,43	2,31*	2,39*
		1,14	1,17	1,69	1,75
Pieux ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10 et 15		1,69	1,75	2,81*	2,89*
		1,39	1,44	2,06	2,12
Pieux de catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20 dans les sables, les sols intermédiaires et les roches		1,69	1,75	2,81*	2,89*
		1,39	1,44	2,06	2,12
Pieux de catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20 dans l'argile, les craies et les marnes		2,42	2,42	3,30*	3,30*
		1,98	1,98	2,42	2,42

(\*) pour les pieux en traction sous combinaisons ELS quasi-permanentes, et en l'absence d'essais de chargement,  $F_{ELS} = 4,7$  de plus, pour les fondations de ponts, il n'est pas admis d'avoir des éléments en traction sous combinaisons quasi-permanentes

# Frottement latéral unitaire limite $q_s$

⇒ A partir des résultats pressiométriques (PMT)

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

Type de sol	Argiles % CaCO <sub>3</sub> < 30% Limos 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

# Frottement latéral unitaire limite $q_s$

⇒ A partir des résultats pressiométriques (PMT)

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

Catégorie de pieux	Argiles % CaCO <sub>3</sub> < 30% Limos 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

# Frottement latéral unitaire limite $q_s$

⇒ A partir des résultats pressiométriques (CPT)

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

Type de sol	Argiles % CaCO <sub>3</sub> < 30 % Limons	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

# Frottement latéral unitaire limite $q_s$

⇒ A partir des résultats pressiométriques (CPT)

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

Catégorie de pieux	Types de sols					
	Argiles % CaCO <sub>3</sub> < 30 % Limons	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

# Frottement latéral unitaire limite $q_s$

⇒ A partir des résultats pressiométriques (PMT / CPT)

$q_{s,max}$

Catégorie de pieux	$q_{s,max}$ en kPa					
	Argiles % CaCO <sub>3</sub> < 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

# Contrainte limite en pointe $q_p$

⇒ A partir des résultats pressiométriques (PMT)

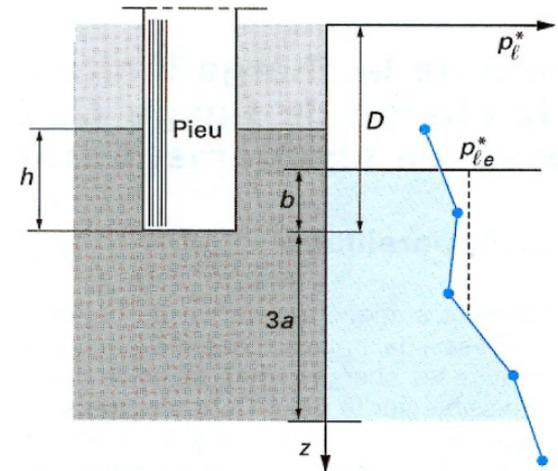
$$q_p = k_p \cdot p_{le}^*$$

⇒ Pression limite équivalente :

$$p_{le}^* = \frac{1}{b + 3a} \int_{D-b}^{D+3a} p_l^*(z) dz \quad \begin{cases} a = \max\left(\frac{B}{2}, \frac{1}{2}\right) \\ b = \min(h, a) \end{cases}$$

⇒ Notion de Hauteur d'encastrement effective

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



# Contrainte limite en pointe $q_p$

⇒ Facteur de portance pressiométrique

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

Terrain	Argiles % CaCO <sub>3</sub> < 30 % Limens Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires marneux	Roches altérées et fragmentées (a)
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

valeurs de  $k_{pmax}$

# Contrainte limite en pointe $q_p$

⇒ A partir des résultats pénétrométriques (CPT)

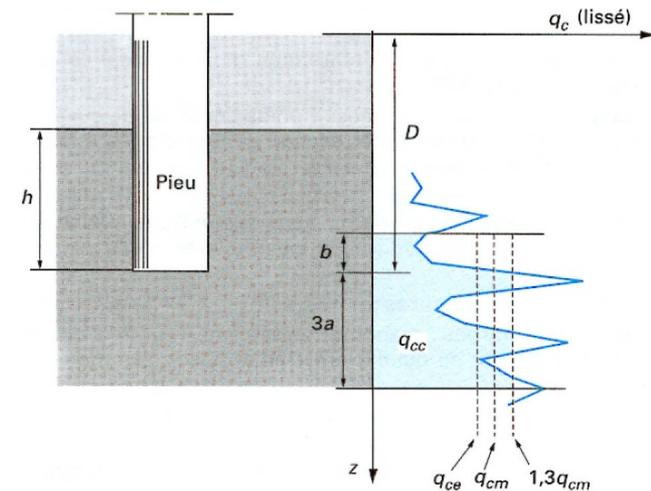
$$q_p = k_c \cdot q_{ce}$$

⇒ Résistance en pointe équivalente :

$$q_{ce} = \frac{1}{b + 3a} \int_{D-b}^{D+3a} q_{cc}(z) dz \quad \begin{cases} a = \max\left(\frac{B}{2}, \frac{1}{2}\right) \\ b = \min(h, a) \end{cases}$$

⇒ Notion de Hauteur d'encastrement effective

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



# Contrainte limite en pointe $q_p$

⇒ Facteur de portance pénétrométrique

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

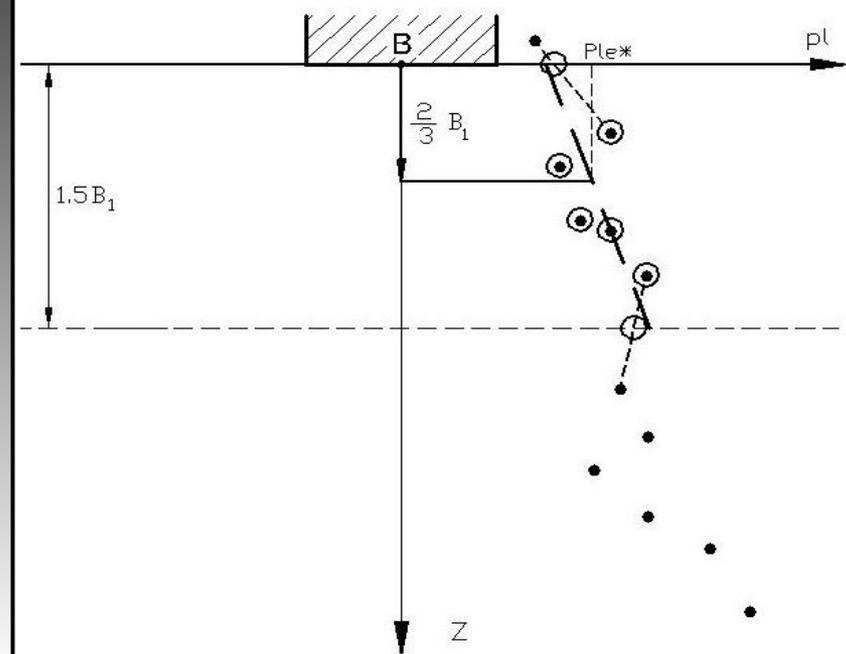
$k_{c,min}$  = 0,30 pour argile  
 = 0,20 pour sol intermédiaire  
 = 0,10 pour sable et grave  
 = 0,15 sinon

Terrain	Argiles % CaCO <sub>3</sub> < 30 % Limons	Sol intermédiaires	Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires Marneux	Roches altérées ou fragmentées
Classe de pieu						
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

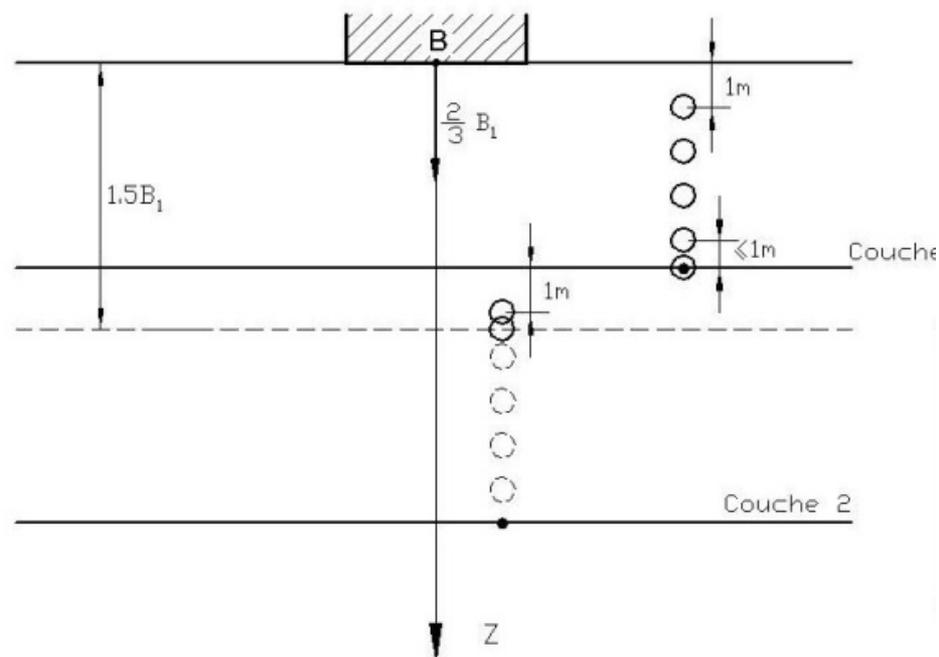
valeurs de  $k_{cmax}$

# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Constitution du profil pressiométrique ( $E_M$ ,  $PI^*$ ) ou pénétrométrique ( $q_c$ )



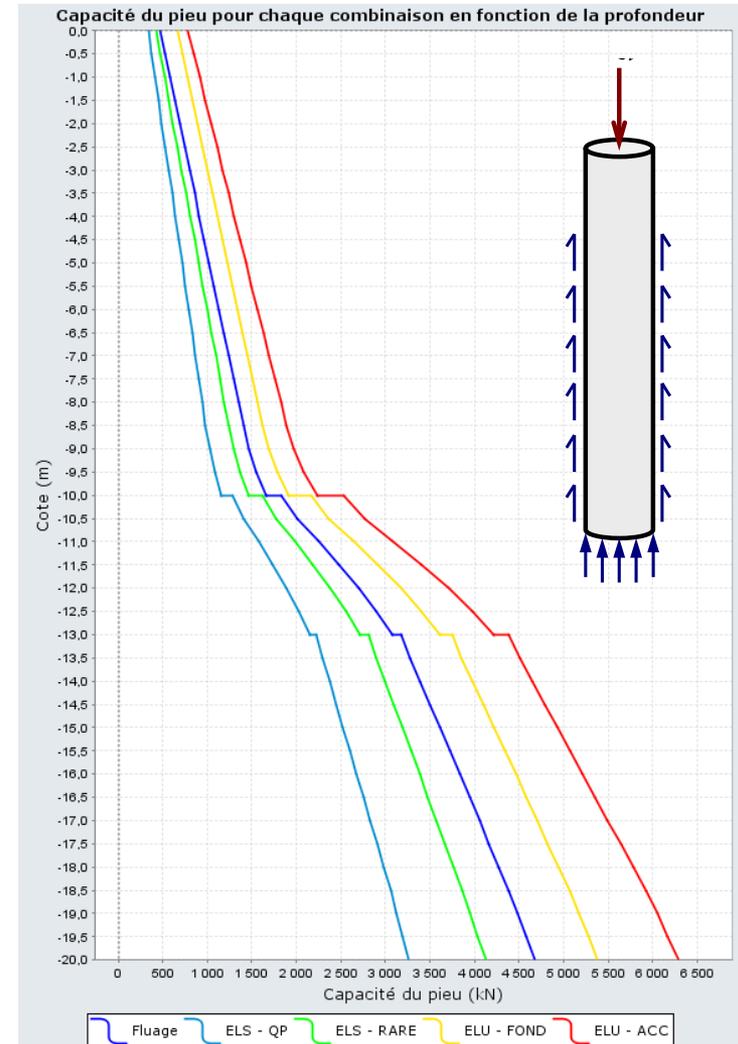
Traitement par mesures



Traitement par couches

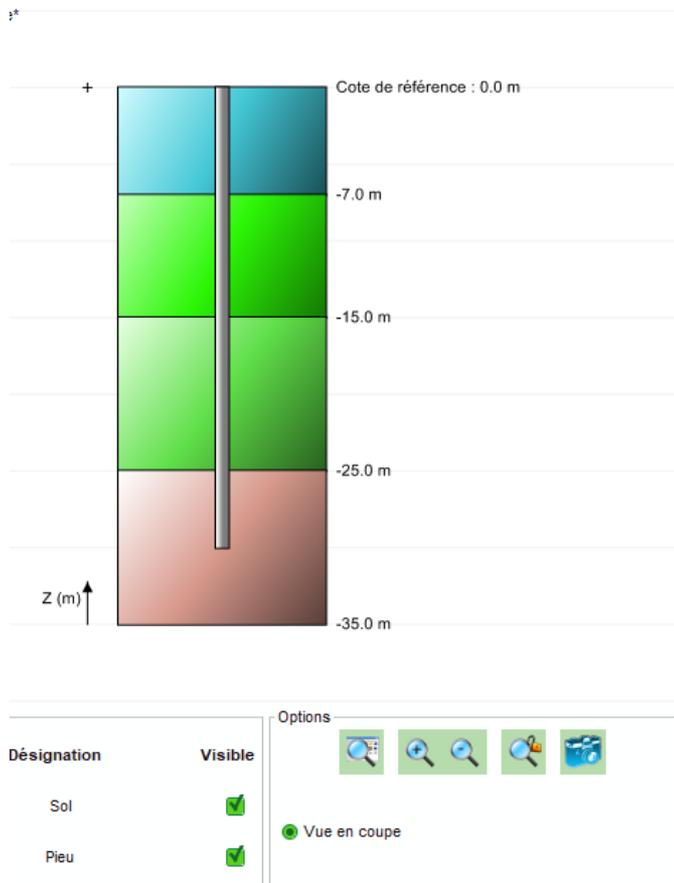
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- ⇒ Pieu circulaire ou de forme quelconque
- ⇒ Evaluation automatique des frottements limites et facteurs de portance
- ⇒ Calcul à longueur imposée (vérification) ou à charge imposée (dimensionnement)
- ⇒ Courbe de portance avec la profondeur pour chaque combinaison
- ⇒ Contrôle additionnel de la contrainte de compression dans le béton



# Exercice d'application

## ⇒ Paramètres généraux



Calcul à charge imposée
Calcul à longueur imposée

Paramètres
Couches
Calcul

### Paramètres généraux

**Contexte de calcul**

Titre du calcul: Calcul à longueur imposée

Cadre réglementaire: EC 7 - Norme NF P94-262/A1 (juillet 2018)

Méthode de dimensionnement: A partir des résultats pressiométriques

Traitement des données: Traitement par couches

Pas du calcul (m): 0,20

**Géométrie du pieu**

Section de calcul: Section de calcul circulaire

Diamètre de calcul (m): 0,80

**Système de pondération**

Classe du pieu: Classe 1 - Pieu/micropieu foré

Catégorie du pieu: Catégorie 2 [FB] - Foré boue (pieux et barrettes)

Pieu de grande longueur

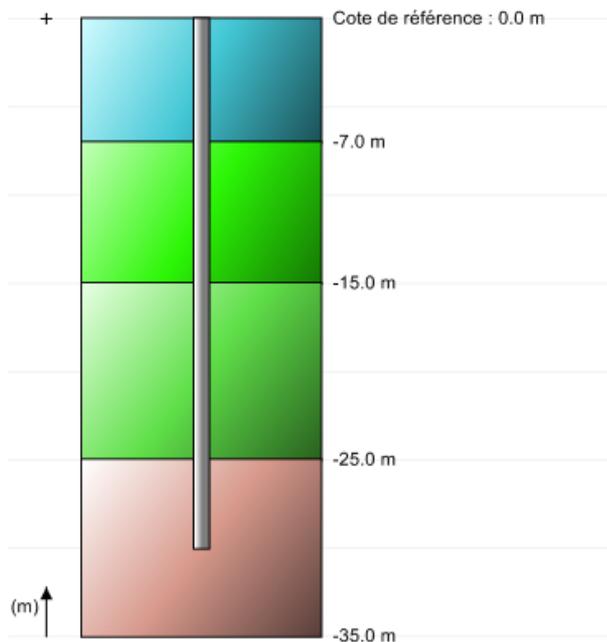
Mode de chargement: Travail en compression

	ELS-QP	ELS-CARAC	ELU-FOND	ELU-ACC
Pondérations combinées sur $Q_{s,k}$	0,636	0,778	0,909	1,000
Pondérations combinées sur $Q_{p,k}$	0,455	0,556	0,909	1,000

Configurer le D.I.
Lancer le calcul
Voir les résultats

# Exercice d'application

⇒ Définitions des couches



Options

Visible

Vue en coupe

Paramètres Couches Calcul

### Données des couches

Définition des couches de sol

Cote de référence (m)

N°	Nom	Couleur	Classe de sol	Z <sub>base</sub> [m]	p <sub>1</sub> <sup>*</sup> [kPa]	q <sub>s1</sub> [kPa]	k <sub>pmax</sub>	Y <sub>R,d1</sub> *Y <sub>R,d2</sub>
1	Remblai limon...		Sols intermédiaires, tenda...	-7,00	800,00	58,75	1,10	1,265
2	Sables et gra...		Sables, graves	-15,00	2000,00	90,00	1,10	1,265
3	Argiles		Argile, limons	-25,00	900,00	51,09	1,15	1,265
4	Marnes		Marne et calcaire marneux	-35,00	2200,00	146,20	1,45	1,265

Calculer q<sub>s1</sub>, k<sub>pmax</sub> et Y<sub>R,d1</sub>\*Y<sub>R,d2</sub>

Base de données

# Exercice d'application

⇒ Type de calcul

Contrainte imposée en tête

Longueur imposée

Longueur du pieu (m)

Prise en compte effet de groupe

Appliquer un facteur réducteur d'effet de groupe

$Ce_{qs}$     $Ce_{qb}$

Contrôle de la résistance structurale de la section

Contrôle de la résistance structurale de la section

$f_{ck}$  (MPa)

$c_{Max}$  (MPa)   $k_1$    $k_2$    $k_3$

Pieu en béton armé