

Tableau 5. Valeurs du facteur de portance k_p (*Fascicule 62, Titre V*)

Nature des terrains		Éléments mis en œuvre sans refoulement dusol	Éléments mis en œuvre avec refoulement dusol
Argiles, Limons	A	1,1	1,4
	B	1,2	1,5
	C	1,3	1,6
Sables, Graves	A	1,0	4,2
	B	1,1	3,7
	C	1,2	3,2
Craies	A	1,1	1,6
	B	1,4	2,2
	C	1,8	2,6
Marnes, Marno-calcaires		1,8	2,6
Roches altérées (1)		1,1 à 1,8	1,8 à 3,2
(1) La valeur de k_p pour ces formations est prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s'apparente le plus. Le calcul proposé ici n'affranchit, en aucun cas, d'avoir recours aux méthodes spécifiques de la mécanique des roches.			

4.1.2 Calcul de la charge limite de frottement latéral Q_s

4.1.2.a Frottement latéral unitaire limite q_s

Le frottement latéral unitaire limite est donné en fonction de la pression limite nette p_{nl} (qui exprime la compacité ou le serrage du sol par les courbes de la figure 13. Le choix de la courbe à utiliser en fonction :

- de la nature du sol ;
- du type de pieu. est indiqué au tableau 6.

Pour certains types de pieux forés, deux courbes sont proposées, l'une d'elles correspondant à des conditions particulières explicitées dans les renvois (1), (2) et (3) du tableau 6.

Tableau 6. Choix des courbes pour le calcul du frottement latéral unitaire q_s (principaux types de pieux utilisés en ouvrage d'art) (Fascicule 62, Titre V)

Type de pieu	Nature du sol											
	Argiles. Limons			Sables. Graves			Craies			Marnes		Roches
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	
For é simple	Q ₁	Q ₁ , Q ₂ (1)	Q ₂ , Q ₃ (1)				Q ₁	Q ₃	Q ₄ , Q ₅ (1)	Q ₃	Q ₄ , Q ₅ (1)	Q ₆
For é à la boue	Q ₁	Q ₁ , Q ₂ (1)		Q ₁	Q ₂ , Q ₁ (2)	Q ₃ , Q ₂ (2)	Q ₁	Q ₃	Q ₄ , Q ₅ (1)	Q ₃	Q ₄ , Q ₅ (1)	Q ₆
For é tub é (tube r écup é r é)	Q ₁	Q ₁ , Q ₂ (3)		Q ₁	Q ₂ , Q ₁ (2)	Q ₃ , Q ₂ (2)	Q ₁	Q ₂	Q ₃ , Q ₄ (3)	Q ₃	Q ₄	
For é tub é (tube perdu)	Q ₁			Q ₁		Q ₂	(4)			Q ₂	Q ₃	
Puits (5)	Q ₁	Q ₂	Q ₃				Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆
M étal battu ferm é	Q ₁	Q ₂		Q ₂		Q ₃	(4)			Q ₃	Q ₄	Q ₄
Battu pr éfabriqu é b éton	Q ₁	Q ₂		Q ₃			(4)			Q ₃	Q ₄	Q ₄
Battu moul é	Q ₁	Q ₂		Q ₂		Q ₃	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₃	Q ₄	
Battu enrob é	Q ₁	Q ₂		Q ₃		Q ₄	(4)			Q ₃	Q ₄	
Inject é basse pression	Q ₁	Q ₂		Q ₃			Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅		
Inject é haute pression (6)		Q ₄	Q ₅	Q ₅		Q ₆		Q ₅	Q ₆	Q ₆		Q ₇ (7)

(1) Ré é l é s a g e et rainurage en fin de forage.

(2) Pieux de grande longueur (sup é r i e u r e à 30 m).

(3) Forage à sec, tube non louvoy é

(4) Dans le cas des craies, le frottement lat é r a l peut ê t r e tr è s faible pour certains types de pieux. Il convient d'effectuer une é t u d e sp é c i f i q u e dans chaque cas.

(5) Sans tubage ni virole fonc é s perdus (parois rugueuses).

(6) Injection s é l e c t i v e et r é p é t i t i v e à faible d é b i t.

(7) Injection s é l e c t i v e et r é p é t i t i v e à faible d é b i t et traitement pr é a l a b l e des massifs fissur é s ou fractur é s avec obturation des cavité s.

4.1.3 Calcul de la charge limite totale Q_l . [1]

Dans le cas général des pieux travaillant en compression, on a :

$$Q_l = Q_p + Q_s \quad (18)$$

Dans le cas des pieux travaillant en arrachement, on a :

$$Q_l = Q_s \quad (19)$$

Dans le cas particulier des tubes métalliques battus ouverts et des profilés métalliques non obturés à la base (pieux H et palplanches) dont la capacité portante est essentiellement mobilisée dans des argiles ou des sables, le fascicule 62, titre V, propose les expressions suivantes :

$$Q_p = \rho_p A k_p p_{le}^* \quad (20)$$

$$Q_s = \rho_s P \int_0^h q_s(z) dz \quad (21)$$

La valeur du facteur de portance k_p pour le calcul de Q_p est celle pour un pieu mis en œuvre avec refoulement du sol (tableau 6) et la section A à considérer en pointe est la section enveloppe pour les tubes et les pieux H et la section délimitée par les ailes pour les palplanches (figure 11). La valeur du frottement latéral unitaire limite est celle pour un pieu métallique battu fermé (tableau 6 et figure 11) et le périmètre P à considérer pour le calcul du frottement latéral total Q_s est le périmètre enveloppe pour les tubes et le périmètre développé pour les pieux H et les palplanches (figure 11).

Q_p et Q_s sont affectés des coefficients réducteurs ρ_p et ρ_s donnés par le tableau 7.

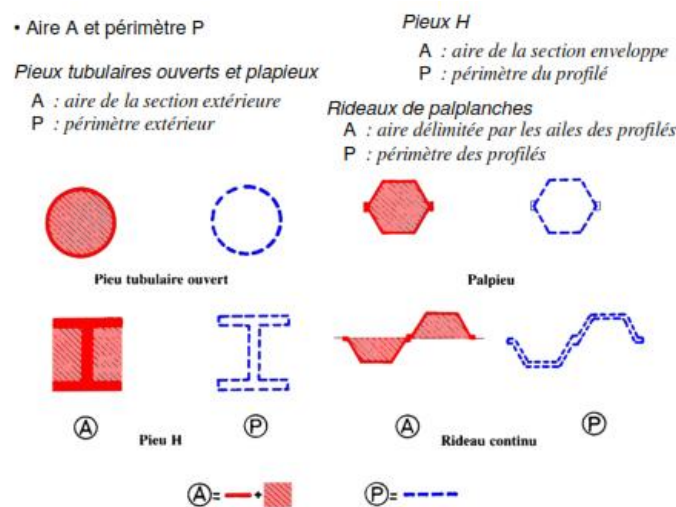


Figure 11 Périmètre P et section A à considérer pour les pieux tubulaires et les profilés métalliques ouverts à la base.

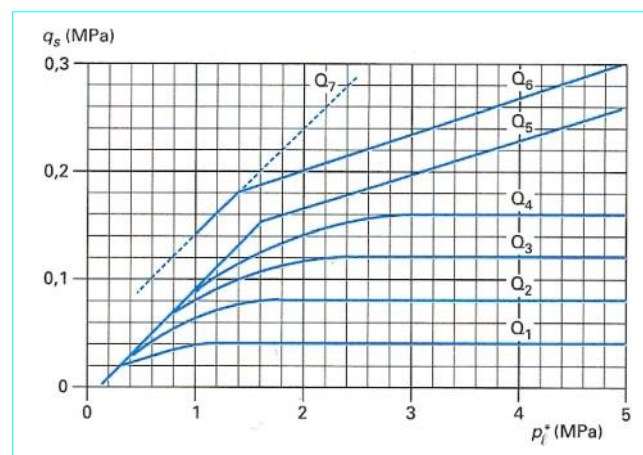


Figure 12. Frottement latéral unitaire limite le long du fut du pieu. [6]

Tableau 7. Coefficients r éducteurs p_p et p_s pour les profil és m étalliques ouverts à la base (*Fascicule 62, Titre V*)

Type de pieu	Nature du sol			
	Argiles		Sables	
	p_p	p_s	p_p	p_s
Tubulaire ouvert	0,50	1,00	0,50	1,00
Pieu H	0,50	1,00	0,75	1,00
Palplanches	0,50	1,00	0,30	0,50

4.2 Utilisation des essais au p én étrom ère (statique)

Selon le D.T.U 13.2, la hauteur d'encastrement équivalente D_e est donn ée par la formule :

$$D_e = \frac{1}{q_{ce}} \int_d^D q_c(z) dz \quad (22)$$

avec : q_{ce} : r ésistance de pointe équivalente,
 $q_c(z)$: r ésistance de pointe liss ée à la profondeur z ,
 d : pris en g én éral égale à z_0 ,
 D : hauteur d'encastrement réelle du pieu.

4.2.1 Contrainte limite de pointe :

Selon le fascicule 62, titre V, de 1993 [6], la charge limite de pointe est donn ée par la formule :

$$Q_p = A k_c q_{ce} \quad (23)$$

Avec, A : section de pointe,

k_c : coefficient de portance (tableau 8),

q_{ce} : r ésistance de pointe équivalente.

Le coefficient de portance traduit la proportionnalit é entre la r ésistance de pointe du pieu et celle du p én étrom ère. Ce coefficient d épend de la nature du sol et du mode de mise en œuvre du pieu.

Les valeurs de k_c sont donn ées par le tableau suivant :

Tableau 8. Valeurs de k_c selon le fascicule 62.

Nature du sol	Pieux mis en œuvre sans refoulement du sol	Pieux mis en œuvre avec refoulement du sol
Argile et limons	0,40	0,55
Sables et graves	0,15	0,50
Craies lâches	0,20	0,30
Craies alt ées	0,30	0,45

La résistance de pointe équivalente est obtenue par la formule :

$$q_{ce} = \frac{1}{(b + 3a)} \int_{D-b}^{D+3a} q_{cc}(z) dz \quad (24)$$

Selon le fascicule 62, les valeurs de a et b sont : $a = B/2$ si $B > 1$ m,

$a = \max(B/2 ; 0,50)$, B étant la largeur de la fondation et a étant exprimé en m,

$b = \min(a ; h)$, h étant l'ancrage de la fondation dans la couche porteuse (valable que dans le cas d'une formation porteuse homogène).

q_{cc} : résistance de pointe q_c écriée à $1,3 q_{cm}$ (Figure 13).

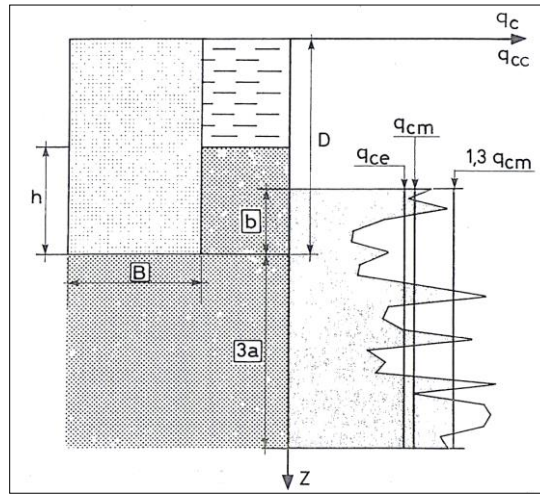


Fig. 13 Résistance de pointe équivalente.

q_{ce} est obtenue comme suit :

- calcul de la contrainte moyenne q_{cm} sur la hauteur b à $+ 3a$ par rapport à la base du pieu,
- plafonnement à $1,3 q_{cm}$ des résistances supérieures à cette valeur, soit $q_{cc}(z)$ le diagramme écrié
- calcul de la nouvelle moyenne q_{ce} avec prise en compte des valeurs plafonds.

4.2.2 Frottement latéral unitaire limite

Il est possible de relier le frottement latéral unitaire limite q_s du pieu et la résistance à la pénétration statique q_c par la formule :

$$q_s = \frac{q_c}{\beta} \quad (25)$$

Il convient de plafonner la valeur de q_s par la formule suivante :

$$q_s = \min \left[\frac{q_c}{\beta}, q_{s \max} \right] \quad (26)$$

Les valeurs de β et $q_{s \max}$ sont données par le tableau suivant :

Tableau 9 : valeurs de β et $q_{s\max}$ selon le fascicule 62.

		ARGILES – LIMONS						SABLES – GRAVES			CRAIES	
		A	B		C			A	B	C	A	B
Foré	β	—	—	75 ⁽¹⁾	—	—		200	200	200	125	80
	$q_{s\max} \text{ (kPa)}$	15	40	80 ⁽¹⁾	40	80 ⁽¹⁾		—	—	120	40	120
Foré tubé (tube récupéré)	β	—	100	100 ⁽²⁾	—	100 ⁽²⁾		250	250	300	125	100
	$q_{s\max} \text{ (kPa)}$	15	40	60 ⁽²⁾	40	80 ⁽²⁾		—	40	120	40	80
Métal battu fermé	β	—	120		150			300	300	300	(3)	
	$q_{s\max} \text{ (kPa)}$	15	40		80			—	—	120		
Battu à fût béton	β	—	75		—			150	150	150	(3)	
	$q_{s\max} \text{ (kPa)}$	15	80		80			—	—	120		

5. TASSEMENT DES PIEUX. [6]

Les tassements verticaux des pieux isolés sous les charges quasi-permanentes sont faibles et se situent dans une fourchette allant de 0,5 à 2 cm. Les pieux traversant des couches molles et travaillant en pointe dans des formations sablo-graveleuses conduisent aux déplacements verticaux les plus élevés. Les pieux sollicités essentiellement en frottement latéral présentent des tassements généralement inférieurs à 1 cm.

6. GROUPE DE PIEUX. [6]

Lorsque les pieux sont suffisamment rapprochés, il ne suffit pas de vérifier la résistance d'un pieu considéré comme isolé. En effet, il arrive que la charge globale Q_{gu} du groupe de n pieux soit inférieure à la somme des charges limites des pieux du groupe Q_{ui} considérés comme isolés. Le coefficient d'efficacité C_e du groupe de pieux se définit comme suit :

$$C_u = \frac{Q_{gu}}{\sum Q_{ui}} \quad (27)$$

La transmission des contraintes en profondeur sous un groupe est différente de celle sous un pieu isolé. La figure ci-dessous montre qu'une couche compressible profonde qui n'est pas ou peu sollicitée par un pieu unique peut poinçonner ou tasser sous l'effet d'un groupe de pieux.

Si les pieux sont flottants, *Terzaghi* a montré que la répartition des contraintes en profondeur peut être estimée en assimilant le groupe à un radier fictif situé au tiers inférieur de la longueur des pieux.

Si les pieux travaillent essentiellement en pointe, le radier fictif doit être situé au niveau de la pointe pour estimer ce risque.

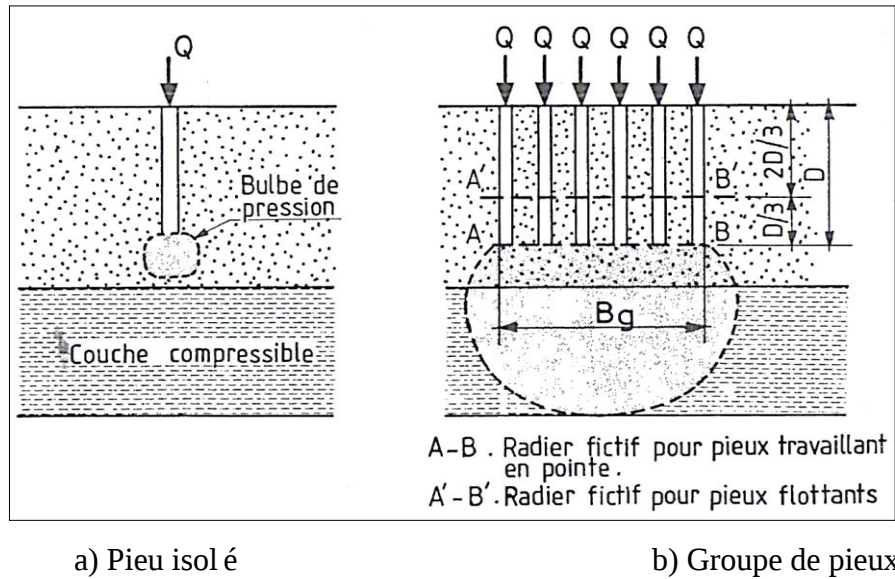


Fig. 14 Action d'un groupe de pieux en profondeur.

7. FROTTEMENTS NEGATIFS. [6]

Considérons un pieu traversant une couche molle pour aller s'ancrer dans un substratum résistant. Si la couche molle est surchargée, par exemple par un remblai, cette couche va tasser sous le poids de la surcharge. Le sol s'enfonce par rapport au pieu et non l'inverse comme c'est le cas dans des conditions courantes de sollicitations des pieux.

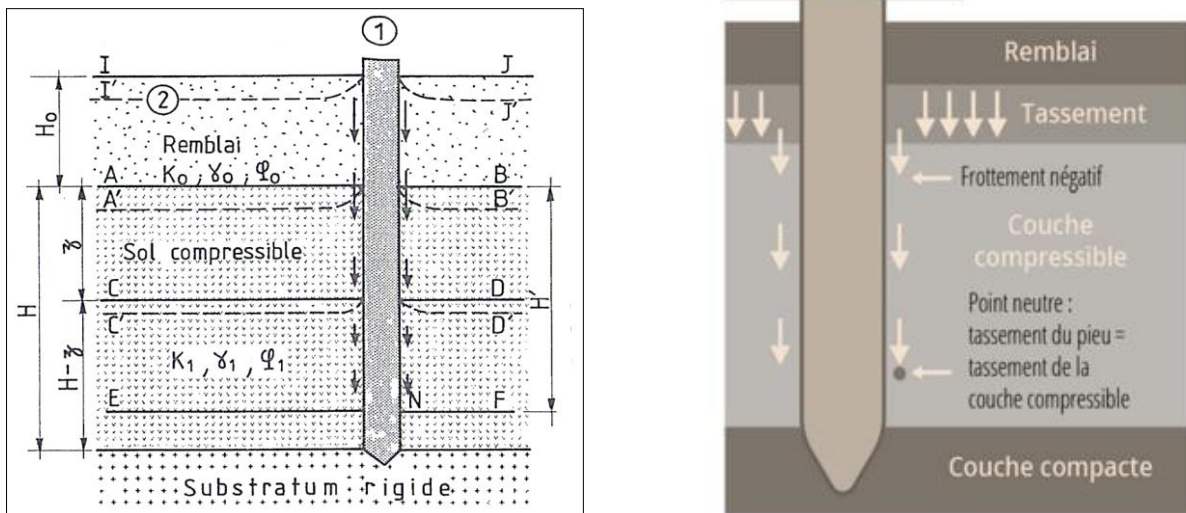


Fig. 15 : Frottement négatif sur un pieu.

S'il y a déplacement, il y a frottement au contact sol/pieu. Il se développe donc un frottement latéral dirigé vers le bas qui provoque un effort de compression dans le pieu. Les tassements sont maximaux dans la partie supérieure et diminuent avec la profondeur. En effet, le tassement AA' est dû au

tassement de la couche d'épaisseur H et le déplacement CC' n'est dû qu'au tassement d'une couche d'épaisseur $H - z$. à partir d'une profondeur H' , le tassement du sol est égal ou inférieur à l'enfoncement du pieu sous l'effet de la charge qu'il supporte. Le pieu situé à cette profondeur est appelé point neutre N .

La figure ci-contre montre l'exemple de désordres survenus dans des hangars reposant sur des pieux de 0,80 m, fondés à travers 4m de sable fin et 14 m d'argile molle, lesquels surmontent une marne compacte. Les trois (3) pieux de la fondation ont subi un tassement de 22 jusqu'à 30cm en 3 ans.

- pieu 25 : ancrage de 2B dans la marne

- pieux 26 et 27 : ancrage dans l'argile entraînés vers le bas par les efforts résultant du frottement négatif.

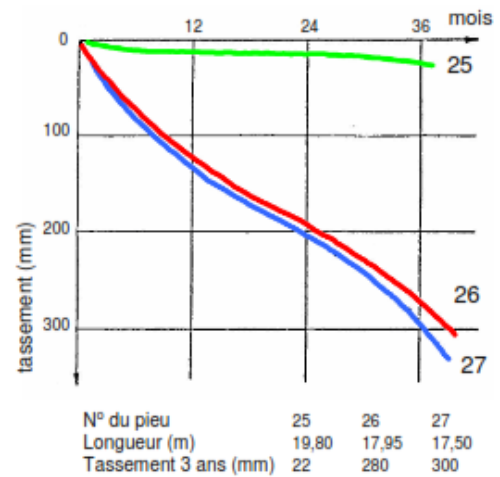


Figure 16. Tassement de Pieux soumis aux frottements négatifs d'une couche d'argile molle (Florentin et l'Hériveau)

7.1 Méthode de calcul

a) Principe de base

Le frottement négatif (figure 15) est un phénomène lent, puisque lié à la consolidation des couches compressibles à prendre en compte : caractéristiques mécaniques effectives c' et ϕ'

- au-delà du point neutre N , le frottement négatif n'existe plus.
- si le pieu traverse un remblai surchargeant le sol, le frottement négatif s'exerce sur toute l'épaisseur du remblai et sur la couche compressible jusqu'en N

b) Calcul du frottement négatif unitaire f_n

- soit $\sigma'_v(z)$ la contrainte effective verticale à une profondeur quelconque z et à proximité immédiate du fût du pieu

$$\sigma'_h(z) = K \cdot \sigma'_v(z)$$

K : coefficient de pression des terres au contact sol/pieu

si δ est l'angle de frottement sol/pieu (dépend du type de pieu et de la nature du sol)

$$f_n(z) = K \cdot \sigma'_v(z) \cdot \tan \delta$$

(28)

c) Calcul de la valeur maximale du frottement négatif

- le frottement négatif total F_n sur le pieu est obtenu par intégration de f_n depuis la partie supérieure du pieu jusqu'à la profondeur du point neutre

$$F_n = P \left[0,5 \gamma_0 \cdot H_0^2 \cdot K_0 \cdot \tan \delta_0 + (\gamma_0 \cdot H_0 \cdot H'_1 + 0,5 \gamma_1 \cdot H_1^2) \cdot K_1 \cdot \tan \delta_1 \right] \quad (29)$$

↓ Remblai sur la partie H_0
↓ remblai et couche d'argile sur la partie H'_1

P : périmètre de la section droite du pieu

Remarque : Si le sol est sous la nappe, il faut utiliser les conditions d'augées

❖ Cette méthode conduit souvent à une surestimation du frottement négatif

On doit considérer l'effet d'accrochage : une partie du poids des terres transmise dans le pieu par le frottement négatif mobilisé au-dessus du point considéré

d) Importance du frottement négatif total F_n

- F_n peut être très élevé et absorber une part prépondérante, voire la totalité de la capacité portante du pieu

Afin de réduire F_n , des dispositions spéciales peuvent être prises :

- traitement de la surface des pieux battus avec des enduits à base de bitume
- double chemisage sur une certaine hauteur.

Tableau 10. Evaluation de $K \cdot \tan \delta$. [6]

Nature du terrain		Type de pieu		
		Pieux forés tubés	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		
	lâches	0,45		
	autres	1,00		

❖ Cas particuliers

- pieux battus ou chemisés enduits de bitume (sols fins) : $K \cdot \tan \delta = 0,02$
- cake annulaire de bentonite : $k \cdot \tan \delta = 0,05$