

COURS DE MÉCANIQUE DES SOLS

CONTRÔLE DES CONNAISSANCES

Groupes 5 à 8 (Demi-promotion B)

CORRIGÉ

Exercice 1. Classification des sols

Les trois courbes granulométriques définies dans l'énoncé sont tracées sur la figure 1.

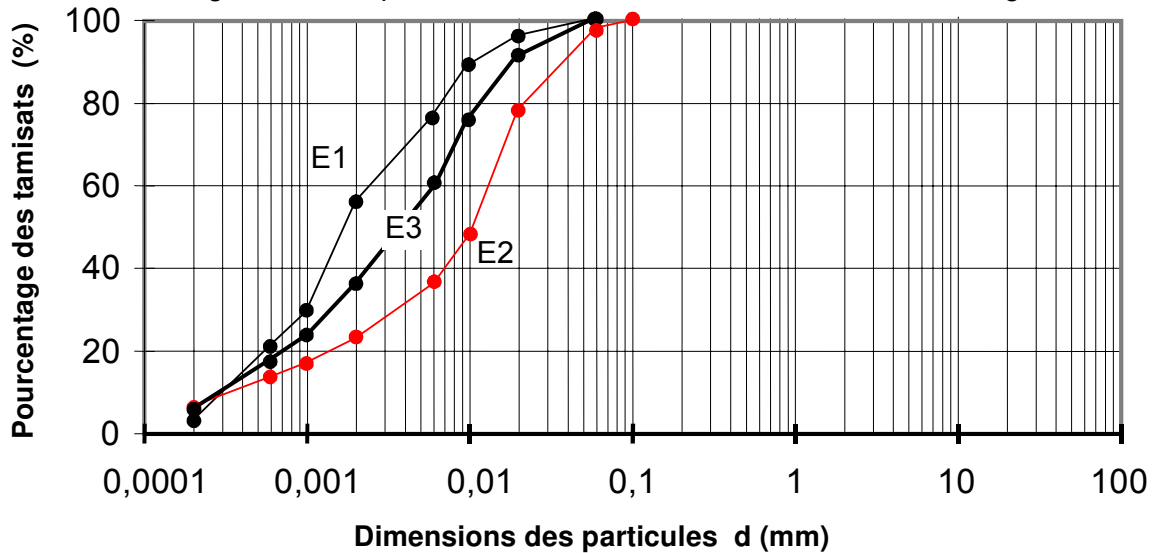


Figure 1. Courbes granulométriques

Les trois sols sont des sols fins (plus de 50% de particules inférieures à 80µm).

Sol 1 - Limites de consistance : $w_L = 40$, $I_P = 18$. Le sol est une argile peu plastique (Figure 2).

Sol 2 - Limites de consistance : $w_L = 30$, $I_P = 12$. Le sol est une argile peu plastique.

Sol 3 - Limites de consistance : $w_L = 33$, $I_P = 13$. Le sol est une argile peu plastique.

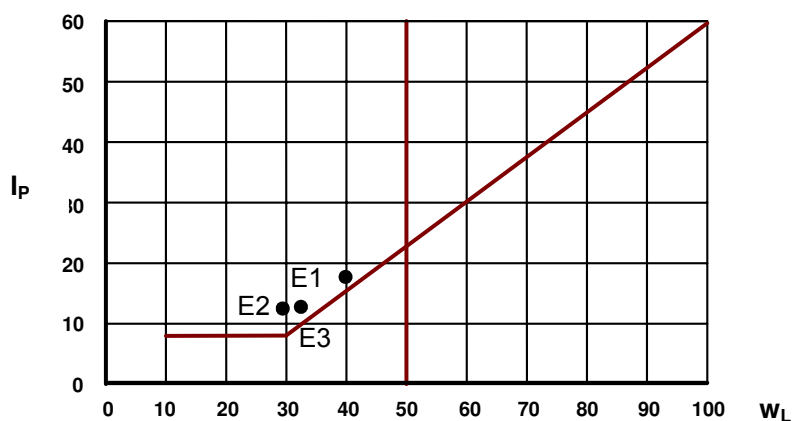


Figure 2. Diagramme pour la classification des sols fins

Exercice 2. Soutènement d'un remblai en bord de rivière

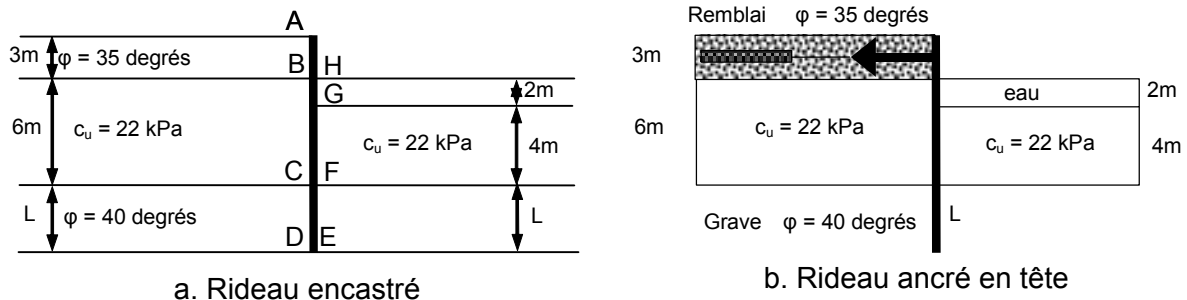


Figure 3. Géométrie des deux solutions pour la construction du rideau et du remblai

a. Étude du rideau encastré

Les pressions horizontales aux points indiqués sur la figure 3.a sont données dans le tableau 1. Pour les calculer, on a utilisé les expressions suivantes :

$K_a = \tan^2(\pi/4 - \phi'/2)$ dans le remblai : $K_a = 0,27$; dans les graves : $K_a = 0,217$.

Poussée à court terme : $\sigma_h = \sigma_v - 2c_u$

Butée à court terme : $\sigma_h = \sigma_v + 2c_u$

Butée $K_p = \tan^2(\pi/4 + \phi'/2)$ dans les graves : $K_p = 4,6$.

Tableau 1. Calcul du rideau encastré (court terme)

Point	σ_v (kPa)	u (kPa)	σ'_v (kPa)	K_a	K_p	$2c_u$ (kPa)	σ'_h (kPa)	σ_h (kPa)
A	0	0	0	0,27	-	-	0	0
B _{remb}	60	0	60	0,27	-	-	16,2	16
B _{argile}	60	0	60	-	-	44	-	18
C _{argile}	168	60	108	-	-	44	-	64
C _{grave}	168	60	108	0,217	-	-	23,4	83,4
D	$168+20L$	$60+10L$	$108+10L$	0,217	-	-	$23,4+2,17L$	$83,4+12,17L$
E	$92+20L$	$60+10L$	$32+10L$	-	4,6	-	$147,2+46L$	$207,2+56L$
F _{grave}	92	60	32	-	4,6	-	147,2	207,2
F _{argile}	92	-	-	-	-	44	-	136
G _{argile}	20	-	-	-	-	44	-	64
G _{eau}	20	20	0	-	-	-	20	20
H	0	0	0	-	-	-	0	0

Les forces correspondantes sont définies sur la figure 4 et leurs valeurs et points d'application sont rassemblés dans le tableau 2.

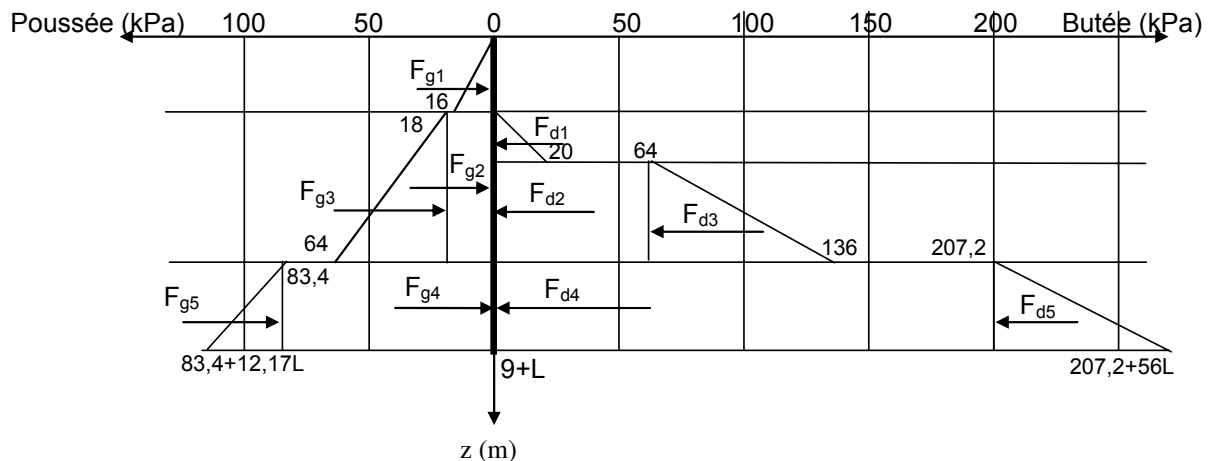


Figure 4. Forces appliquées au rideau

Tableau 2. Valeurs des forces et hauteur du point d'application par rapport au point E

Force	Valeur (kN/m)	Altitude du point d'application (m)
F_{g1}	$0,5 \cdot 3 \cdot 16 = 24$	L+7
F_{g2}	$18 \cdot 6 = 108$	L+3
F_{g3}	$0,5 \cdot 46 \cdot 6 = 138$	L+2
F_{g4}	$83,4L$	L/2
F_{g5}	$0,5 \cdot 12,17L^2 = 6,08L^2$	L/3
F_{d1}	$0,5 \cdot 2 \cdot 20 = 20$	L+4,67
F_{d2}	$4 \cdot 64 = 256$	L+2
F_{d3}	$0,5 \cdot 72 \cdot 4 = 144$	L+1,67
F_{d4}	$207,2 L$	L/2
F_{d5}	$0,5 \cdot 56 L^2 = 28 L^2$	L/3

Conditions d'équilibre

Forces $24 + 108 + 138 + 83,4L + 6,08L^2 \leq 20 + 256 + 144 + 207,2L + 28L^2$
 $270 + 83,4L + 6,08L^2 \leq 420 + 207,2L + 28L^2$

Cette condition est vérifiée pour toute valeur de L (il n'y a pas besoin d'encastrement dans la grave)

Moments $24(L+7) + 108(L+3) + 138(L+2) + 83,4L(L/2) + 6,08L^2(L/3) \leq \dots$
 $\dots \leq 20(L+4,67) + 256(L+2) + 144(L+1,67) + 207,2L(L/2) + 28L^2(L/3)$
 $24 \cdot 7 + 108 \cdot 3 + 138 \cdot 2 + (24+108+138)L + 41,7L^2 + 2,03 L^3 \leq \dots$
 $\dots \leq 20 \cdot 4,67 + 256 \cdot 2 + 144 \cdot 1,67 + (20+256+144)L + 103,6L^2 + 9,3 L^3$
 $414,5 + 270L + 41,7L^2 + 2,03L^3 \leq 749,6 + 420L + 103,6L^2 + 9,3L^3$
 Cette condition est également toujours vérifiée.

Conclusion : à court terme et avec une rivière de 2m de profondeur, la stabilité d'un rideau non ancré est assurée.

Commentaire : la situation déterminante pour la stabilité est le long terme.

b. Étude du rideau ancré en tête

Ce calcul n'est pas nécessaire à court terme. Nous donnons néanmoins le mode de calcul de la force d'ancrage.

Pour ce calcul on admet que la plaque a une largeur de 1m, donc une surface de frottement de $4m^2$. La force normale sur la plaque est le poids du remblai au-dessus d'elle, soit $N = 1,5 \cdot 20 \cdot 4 = 120$ kN.

La force de frottement maximale vaut donc

$$T_{\max} = N \tan 35 = 84 \text{ kN.}$$

Cette force peut être introduite dans le calcul en complément des forces de butée.

Exercice 3. Consolidation des sols

a. Le coefficient de consolidation peut être déduit de la figure 5. Le temps t_{50} est déterminé graphiquement et vaut 160 secondes. On en déduit

$$c_v = \frac{T_{50} H^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \cdot 10^{-4}}{160} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s.}$$

b. Le temps nécessaire pour atteindre 80% de consolidation correspond à un facteur temps de $T_v = 0,567$. Il faut attendre pendant le temps réel correspondant, soit :

$$t = \frac{0,567 \cdot 2,5^2}{c_v} = \frac{0,567 \cdot 2,5^2}{1,2 \cdot 10^{-7}} = 2,95 \cdot 10^7 \text{ s} = 342 \text{ jours.}$$

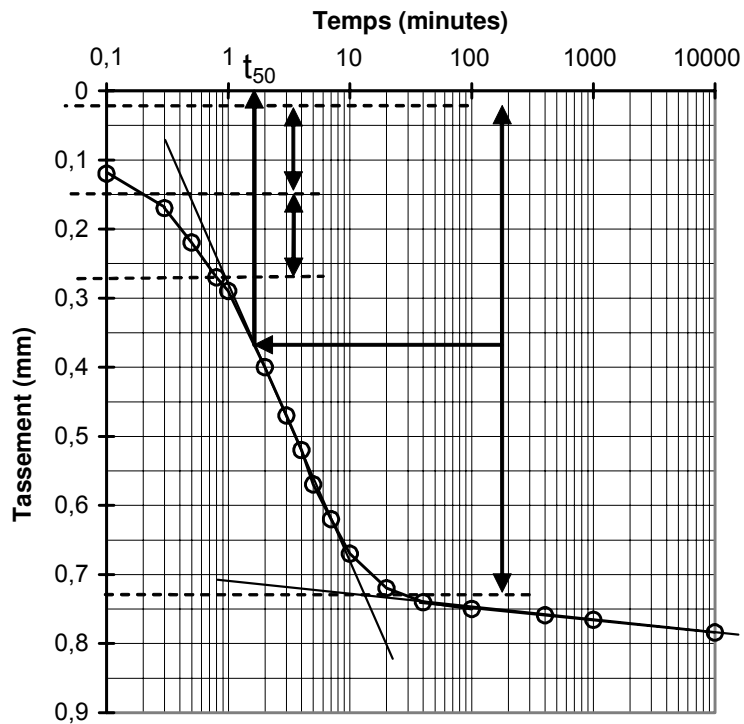


Figure 5. Courbe de consolidation de l'argile sous un incrément de charge de 80 kPa. La construction de Casagrande ($\lg t$) donne un t_{50} de 160 s

c. Courbe de tassement de la couche de sols sous 4m de remblai.

Le tassement final est égal à 16 cm.

On peut calculer les degrés de consolidation et les tassements correspondant à différentes valeurs du temps ou du facteur temps. Le tableau 3 donne les résultats de ce calcul.

Tableau 3. Évolution du tassement au cours du temps

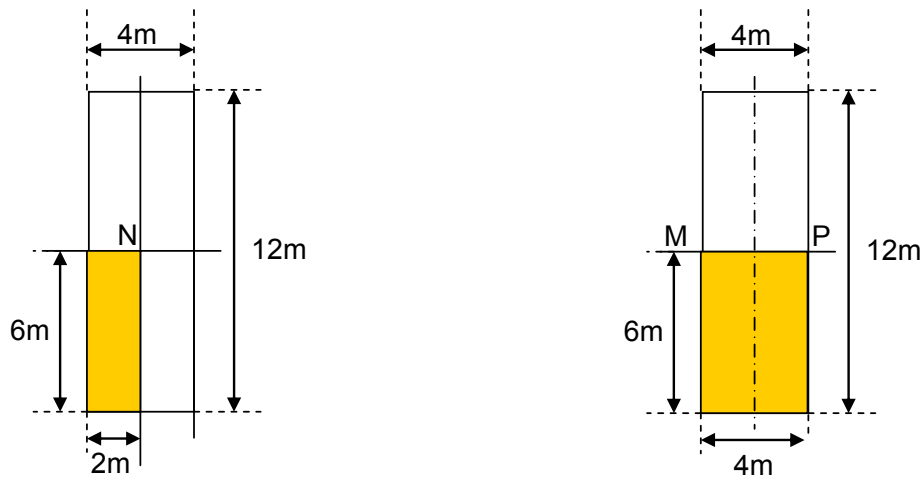
Temps	0 jour	10 jours	50 jours	100 jours	250 jours	342 jours	3 ans
T_v	0	0,017	0,083	0,166	0,415	0,567	1,82
U_v	0	0,15	0,33	0,46	0,71	0,8	0,99
$s(t)$ (m)	0	0,024	0,053	0,074	0,114	0,1	0,16

Exercice 4. Contraintes et tassements

1. Calcul des contraintes en M, N et P

La contrainte initiale (avant la semelle) vaut $\sigma_{v0} = 2.17,4 + 10.20,9 = 243,8$ kPa. Au niveau de la base de la semelle, la contrainte initiale valait $\sigma_{v0}(2m) = 34,8$ kPa. La surcharge est donc égale à $\Delta\sigma = 240$ kPa – $\sigma_{v0}(2m) = 205,2$ kPa.

La diffusion en profondeur de la surcharge est calculée en utilisant l'abaque de calcul sous une charge superficielle uniforme de forme rectangulaire. Le coefficient d'influence est calculé dans les deux configurations suivantes :



$$\Delta\sigma_v(N) = 4I_z(a=2m, b=6m, z=10m) \Delta\sigma$$

$$\Delta\sigma_v(M=P) = 2I_z(a=4m, b=6m, z=10m) \Delta\sigma$$

Les résultats sont donnés dans le tableau 4.

Tableau 4. Calcul des incréments de contraintes en M, N et P

Point	a	b	z	a/z	b/z	I_z	$\Delta\sigma_v$
M=P	4 m	6 m	10 m	0,4	0,6	0,08	$0,16 \cdot 205,2 = 32,8$ kPa
N	2 m	6 m	10 m	0,2	0,6	0,044	$0,176 \cdot 205,2 = 36,1$ kPa

Les contraintes totales et effectives, initiales et finales, aux points M, N et P sont données dans le tableau 5.

Tableau 5. Valeurs des contraintes (verticales) aux points M, N et P

Point	σ_v (kPa)	u (kPa)	σ'_v (kPa)	σ_{vo} (kPa)	σ'_{vo} (kPa)
M=P	$243,8+32,8 = 276,6$	100	176,6	243,8	143,8
N	$243,8+36,1 = 279,9$	100	179,9	243,8	143,8

2. Calcul du tassement

Les valeurs des paramètres de compressibilité sont indiquées sur la figure 6. Le tassement (moyen) de la semelle est la somme du tassement du sable et d'argile.

Pour le tassement du sable, on utilise la formule de calcul :

$$s = \int \frac{\Delta\sigma_v}{E_{oed}} dz$$

Pour simplifier le calcul, on utilise la valeur de $\Delta\sigma_v$ à mi-couche. L'abaque déjà utilisé pour les points M, N et P donne (sous le centre de la fondation) :

$$\Delta\sigma_v(z=7m/TN) = 205,2 \cdot [4I_z(a=2m, b=6m, z=5m)] = 810,8 I_z(a/z=0,4 ; b/z=1,2)$$

soit

$$\Delta\sigma_v = 810,8 \cdot 0,105 = 85,1 \text{ kPa.}$$

Le tassement du sable est donc égal à

$$s_1 = \frac{85,1}{90000} \cdot 10 = 0,0095 \text{ m.}$$

Si l'on avait fait le calcul avec $\Delta\sigma = 205,2$ kPa, on aurait obtenu 0,023m.

Pour le tassement de l'argile, on utilise la formule de calcul suivante (sol surconsolidé), avec les valeurs de la contrainte à mi-couche ($\sigma'_{vo} = 143,8+4,5 = 148,3$ kPa) et l'incrément de contraintes déjà calculé :

$$s_2 = \frac{H}{1+e_o} C_s \lg \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} = \frac{1}{1+0,85} \cdot 0,02 \lg \frac{183,8}{148,3} = 0,001 \text{ m.}$$

Le tassement sera donc égal à

$$s = s_1 + s_2 = 0,0095 + 0,001 = 0,0105 \text{ m.}$$

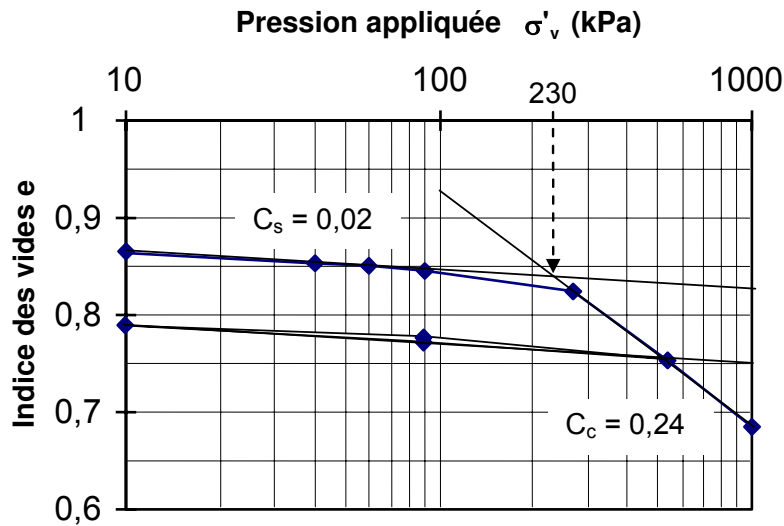


Figure 6 Courbe et paramètres de compressibilité œdométrique de l'argile

Exercice 5. Portance du sol

1. Portance sur le sable

Le calcul s'effectue au moyen de la formule

$$q_{max} = c' N_c s_c + q' N_q s_q + 0,5 \gamma' B N_\gamma s_\gamma + u$$

dans laquelle les paramètres ont pour valeur :

- $c' = 0$
- semelle filante : $s_q = s_g = 1$, s_c sans objet ;
- semelle carrée : $s_\gamma = 1 - 0,3B/L = 0,7$; $s_q = 1 + (B/L) \sin 35 = 1,57$; s_c sans objet ;
- $N_\gamma = 45$;
- $N_q = 33,3$;
- $q' = 10$ kPa (encastrement d'un mètre), 15 kPa (1,5m) ou 20 kPa (2m).

La nappe est au niveau du terrain naturel.

Semelles sur sable

Encastrement	1 m	1,5 m	2 m
Semelle filante	A	B	C
Semelle carrée	D	E	F

Valeurs de la portance

- A $q_{max} = 10.33,2 + 0,5.1.10.45 + 10 = 333 + 225 + 10 = 568$ kPa
- B $q_{max} = 15.33,3 + 0,5.1.10.45 + 15 = 499,5 + 225 + 10 = 750$ kPa
- C $q_{max} = 20.33,3 + 0,5.1.10.45 + 20 = 666 + 225 + 20 = 911$ kPa
- D $q_{max} = 1,57.10.33,3 + 0,7.0,5.1.10.45 = 523 + 157,5 + 10 = 690,5$ kPa
- E $q_{max} = 1,57.15.33,3 + 0,7.0,5.1.10.45 = 785 + 157,5 + 15 = 957$ kPa
- F $q_{max} = 1,57.20.33,3 + 0,7.0,5.1.10.45 = 1046 + 157 + 20 = 1223$ kPa.

2. Portance sur l'argile

Les paramètres de calcul sont $c' = 10$ kPa, $\varphi' = 26$ degrés, $c_u = 100$ kPa, $\gamma = 19$ kN/m³.

Pour les conditions non drainées, la formule de calcul de la portance est

$$q_{max} = c_u s_c N_c(\varphi=0) + q N_q(\varphi=0) = 5,14 c_u + q$$

avec

$s_c = 1$ pour une semelle filante et 1,2 pour une semelle carrée.

Semelles sur argile (calcul non drainé)

Encastrement	1 m	1,5 m	2 m
Semelle filante	A	B	C
Semelle carrée	D	E	F

Valeurs de la portance

- A $q_{max} = 5,14.100+20 = 514 + 20 = 534 \text{ kPa}$
- B $q_{max} = 5,14.100+30 = 514 + 30 = 544 \text{ kPa}$
- C $q_{max} = 5,14.100+40 = 514 + 40 = 554 \text{ kPa}$
- D $q_{max} = 1,2.5,14.100+20 = 616,8 + 20 = 636,8 \text{ kPa}$
- E $q_{max} = 1,2.5,14.100+30 = 616,8 + 30 = 646,8 \text{ kPa}$
- F $q_{max} = 1,2.5,14.100+40 = 616,8 + 40 = 656,8 \text{ kPa}$.

Pour les calculs drainés, la formule de calcul de la portance est la même que pour le sable :

$$q_{max} = c'N_c s_c + q'N_q s_q + 0,5\gamma'BN_\gamma s_\gamma + u$$

dans laquelle les paramètres ont pour valeur :

- $c' = 10 \text{ kPa}$,
- semelle filante : $s_c = s_q = s_\gamma = 1$;
- semelle carrée : $s_\gamma = 1-0,3B/L = 0,7$; $s_q = 1+(B/L)\sin 26 = 1,44$; $s_c = (s_q N_q - 1) / (N_q - 1) = 1,48$;
- $N_\gamma = (N_q - 1) \cot 26 = 10,58$;
- $N_q = \exp(\pi \tan 26) \tan^2(45 + 13) = 4,63.2,561 = 11,85$;
- $q' = 9 \text{ kPa}$ (encastrement d'un mètre), $13,5 \text{ kPa}$ (1,5m) ou 18 kPa (2m).

La nappe est au niveau du terrain naturel.

Semelles sur argile (calcul drainé)

Encastrement	1 m	1,5 m	2 m
Semelle filante	A	B	C
Semelle carrée	D	E	F

Valeurs de la portance

- A $q_{max} = 10.22,25+9.11,85+0,5.1.9.10,58+10 = 222,5+106,7+47,6+10 = 386,8 \text{ kPa}$
- B $q_{max} = 10.22,25+13,5.11,85+0,5.1.9.10,58+15=222,5+160+47,6+15 = 447,6 \text{ kPa}$
- C $q_{max} = 10.22,25+18.11,85+0,5.1.9.10,58+15=222,5+213,3+47,6+20 = 505,9 \text{ kPa}$
- D $q_{max} = 1,48.10.22,25 + 1,44.9.11,85 + 0,7.0,5.1.9.10,58 + 10 = 329,3 + 153,6 + 33,3 + 10 = 526,2 \text{ kPa}$
- E $q_{max} = 1,48.10.22,25 + 1,44.13,5.11,85 + 0,7.0,5.1.9.10,58 + 15 = 329,3 + 230,4 + 33,3 + 10 = 608 \text{ kPa}$
- F $q_{max} = 1,48.10.22,25 + 1,44.18.11,85 + 0,7.0,5.1.9.10,58 + 20 = 329,3 + 307,2 + 33,3 + 10 = 689,8 \text{ kPa}$.