

Exemples d'application

Exemple de justification d'une fondation superficielle

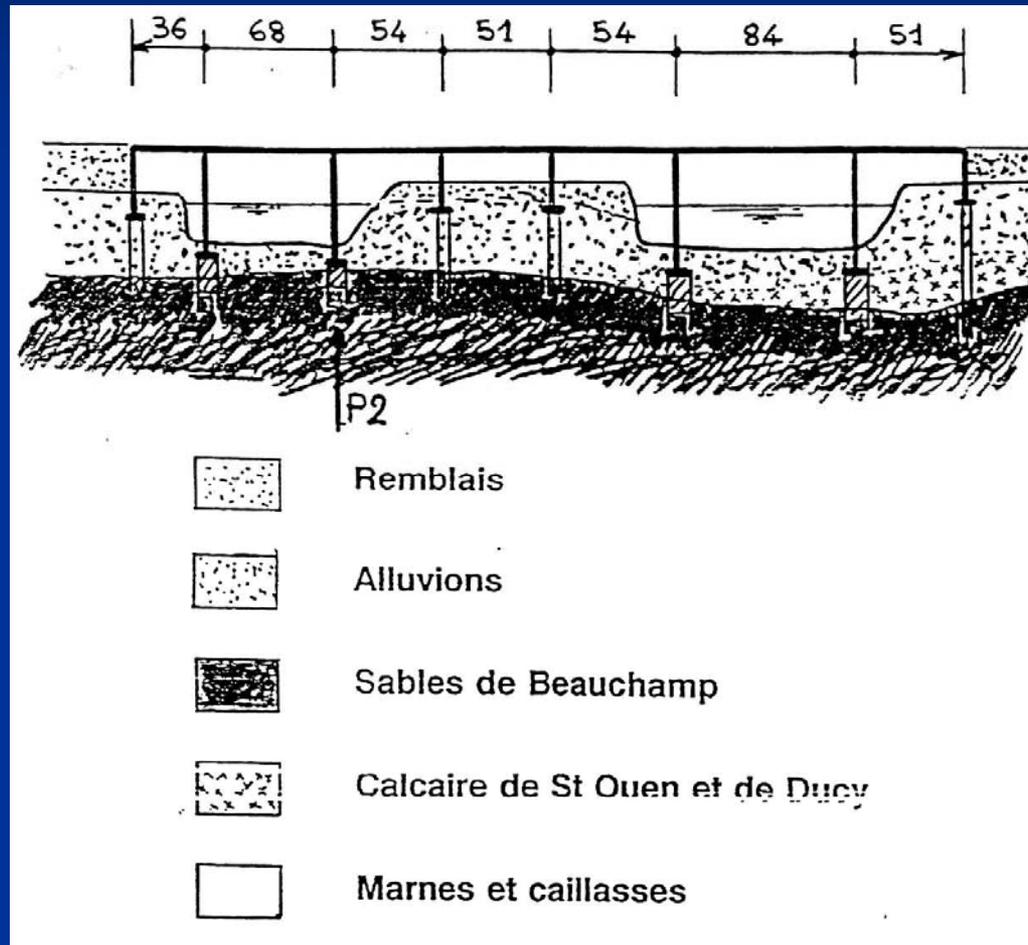
Document de M.Morbois présenté par
Cécile MAUREL

Applications du Fascicule 62

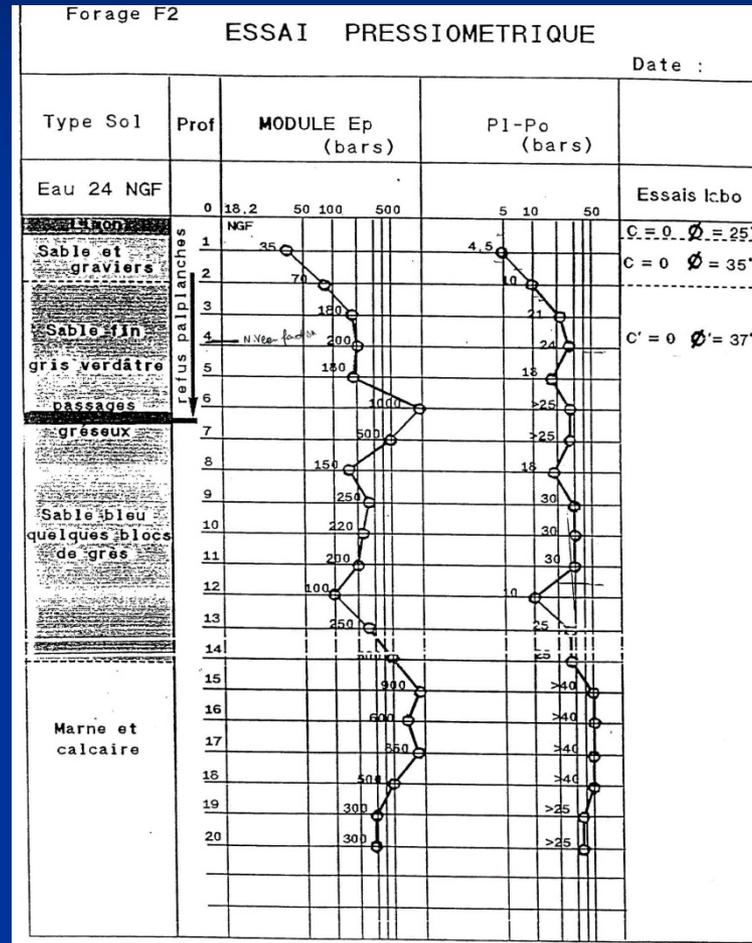
Ponts Formation Edition

Ecole Nationale des Ponts et chaussées

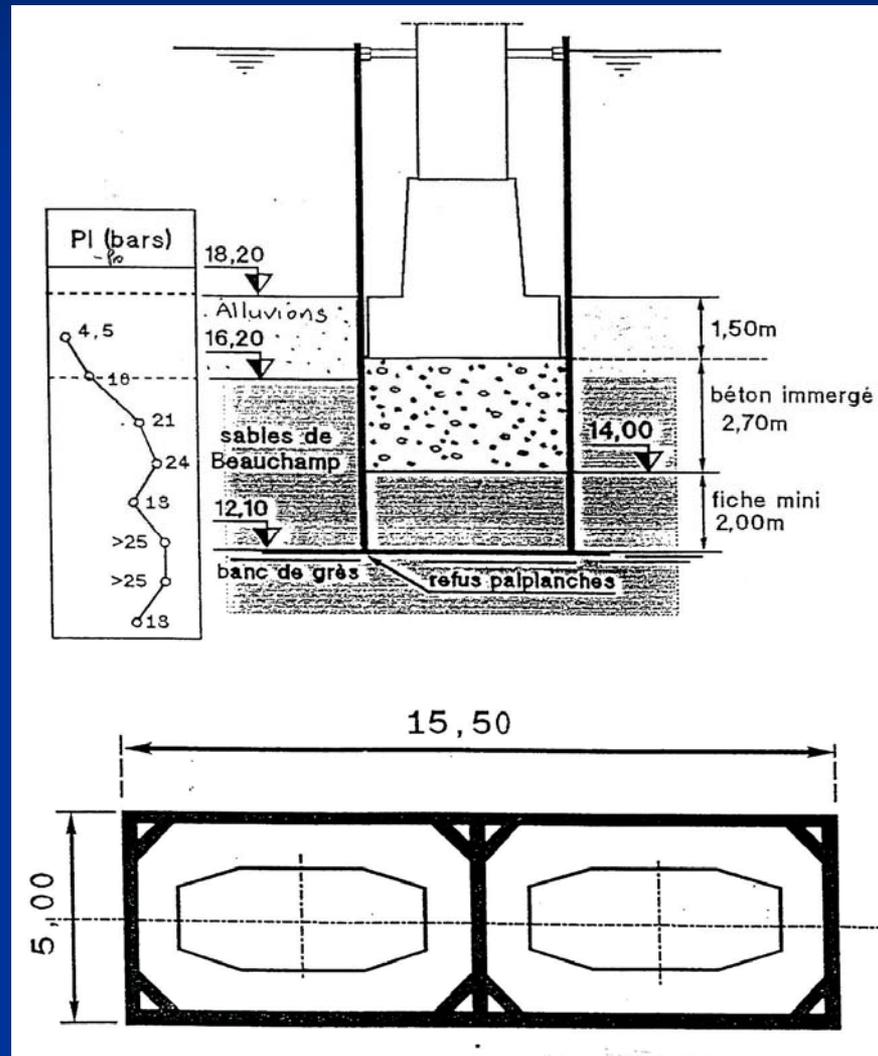
Pont sur la Seine



Forage pressiométrique



Batardeau

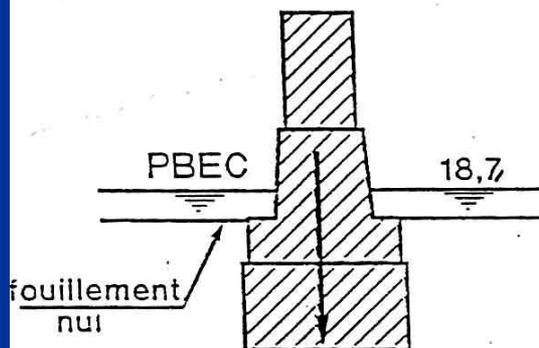


Situations

1 - Situations en cours de construction

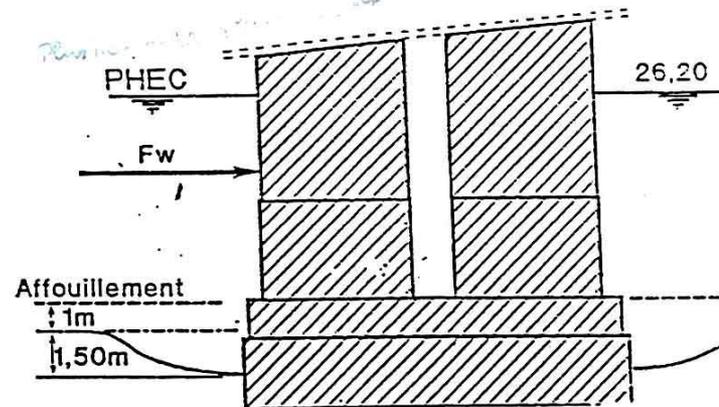
(marché) (batardeau)

2 - Situations en cours d'exploitation



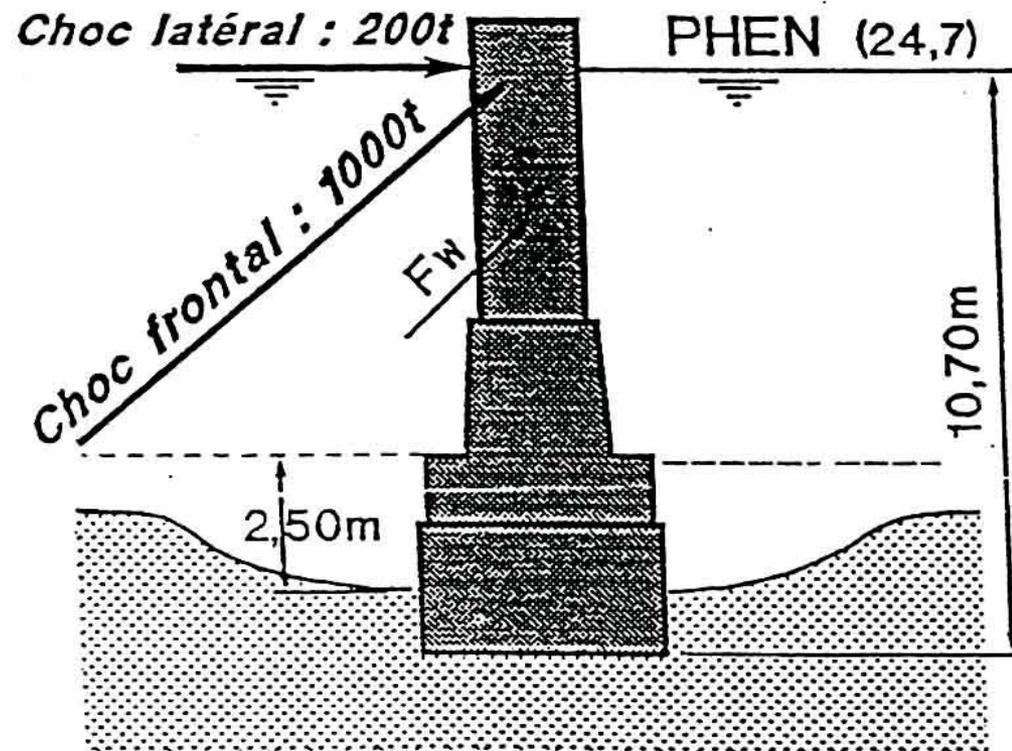
Situation durable

Situation transitoire



Situations (suite)

3 - Situation accidentelle



Actions

Actions permanentes : G

- . Poids propre tablier
- . Poids propre appui

Actions dues à l'eau : F_w

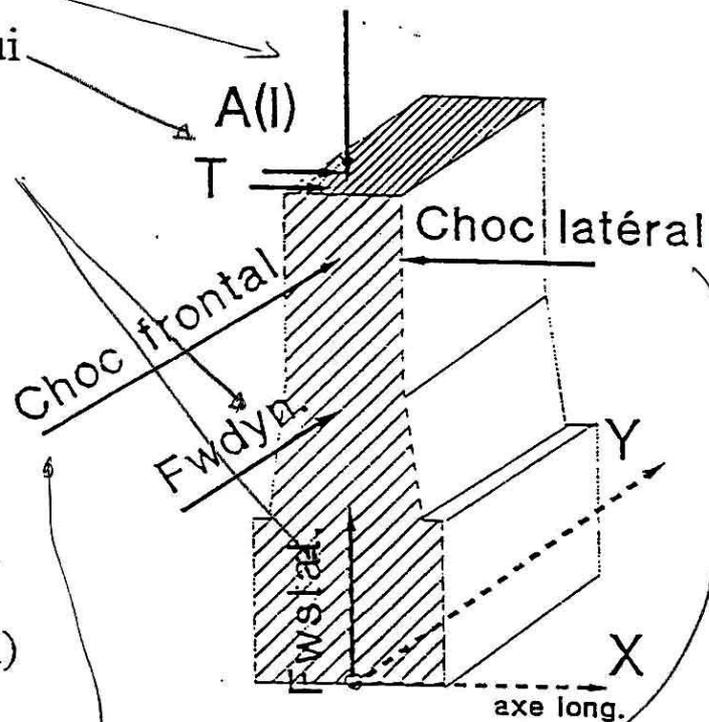
- . Hydrostatique
- . Hydrodynamique

Actions variables : Q_{ik}

- . Charges d'exploitation $A(l)$
- . Température T

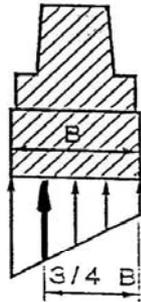
Actions accidentelles : \bar{F}_a

- . Choc de bateau



Situations d'exploitation

E.L. de mobilisation du sol

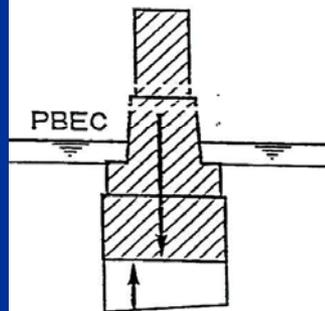


q_{ref}

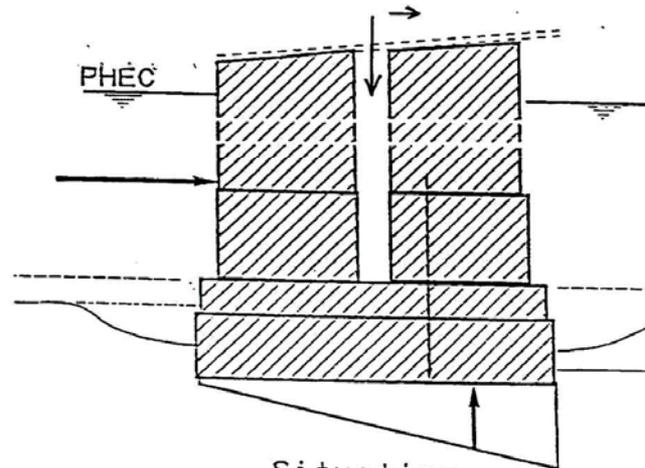
$$q_{ref} = \frac{3q_{max} + q_{min}}{4}$$

$$q_{ref} \leq q'_0 + \frac{1}{\gamma_q} \cdot (q_u - q'_0) \cdot i_{\delta\beta}$$

- q_u : rupture du sol (pressio.)
- q'_0 : contrainte verticale au niveau de fondation
- $i_{\delta\beta}$: inclinaison des charges et pente du sol



Situation durable



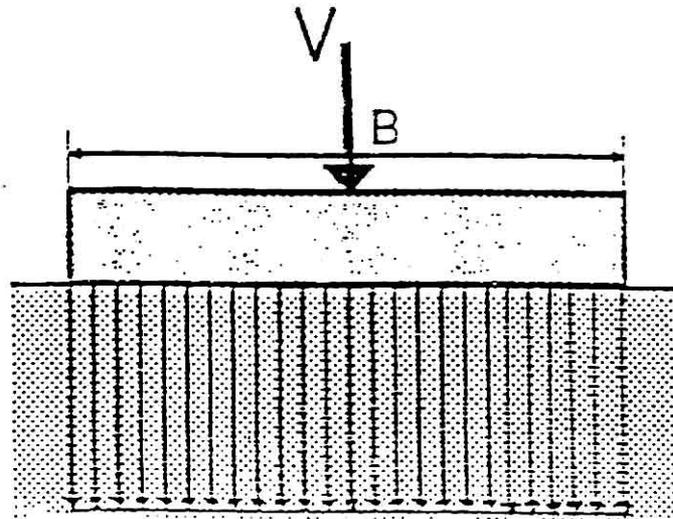
Situation transitoire

Contrainte de référence q'_{ref}

Hypothèses : . le sol ne réagit pas aux efforts de traction
. contraintes proportionnelles aux déplacements
(semelle ou radier rigide)

- Charge centrée

$$q'_{ref} = \frac{V}{B}$$

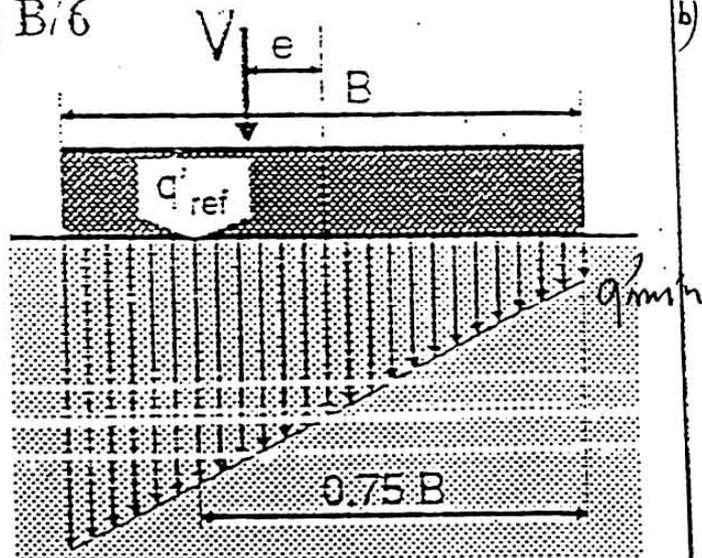


$$q'_{ref} = \frac{3q'_{max} + q'_{min}}{4} \quad \left(\sigma_{3/4} \right)$$

Contrainte de référence q'_{ref}

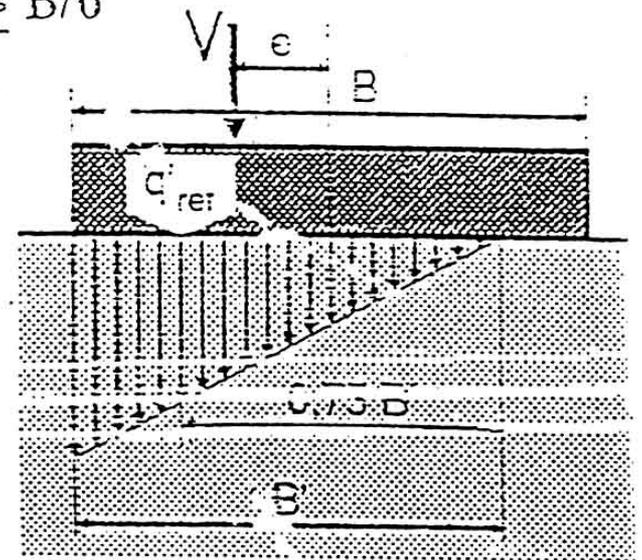
- Charge excentrée :

a) $e \leq B/6$



• si semelle rectang: $q'_{ref} = \frac{V}{B} \left(1 + \frac{3.e}{B}\right)$

b) $e \geq B/6$



$$q'_{ref} = \frac{V}{B - 2.e}$$

E.L.U. de mobilisation du sol

combinaisons fondamentales

$$S(1,125\gamma_{Fw} \cdot F_w + 1,35G_{\max} (+G_{\min}) + \gamma_{Q1} \cdot Q_{1k} + 1,3\psi_{02} \cdot Q_{2k})$$

- Eau . hydrostatique : $\gamma_{Fw} = 1$
 . hydrodynamique : $\gamma_{Fw} = 1,2$
- A(1) : valeur maxi > 0 $\gamma_{Q1} = 1,6$
- T : $\psi_0 = 0,6$

DURABLE	V	H	M	Pondération
P.p.	4865	0	0	1,35
Eau hydrost.	-400	0	0	1,125*1
hydrodyn.	0	0	0	
A(1)	485	11	220	1,60
T	0	7	140	1,3*0,6

Comb.	6894	23	461
-------	------	----	-----

$$q_{\text{ref}} = \frac{V}{B \cdot L} \cdot (1 + 3 \frac{e}{B}) \quad \text{et} \quad e = \frac{M}{V} = 0,07\text{m}$$

$$q_{\text{ref}} = 9,3 \text{ bars}$$

Situation transitoire : action du courant

$$F_{\text{wdyn.}} = k \cdot \rho_w \cdot h \cdot b \cdot v^2$$

. $k = 0,72$
(section rectangulaire)

. $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$

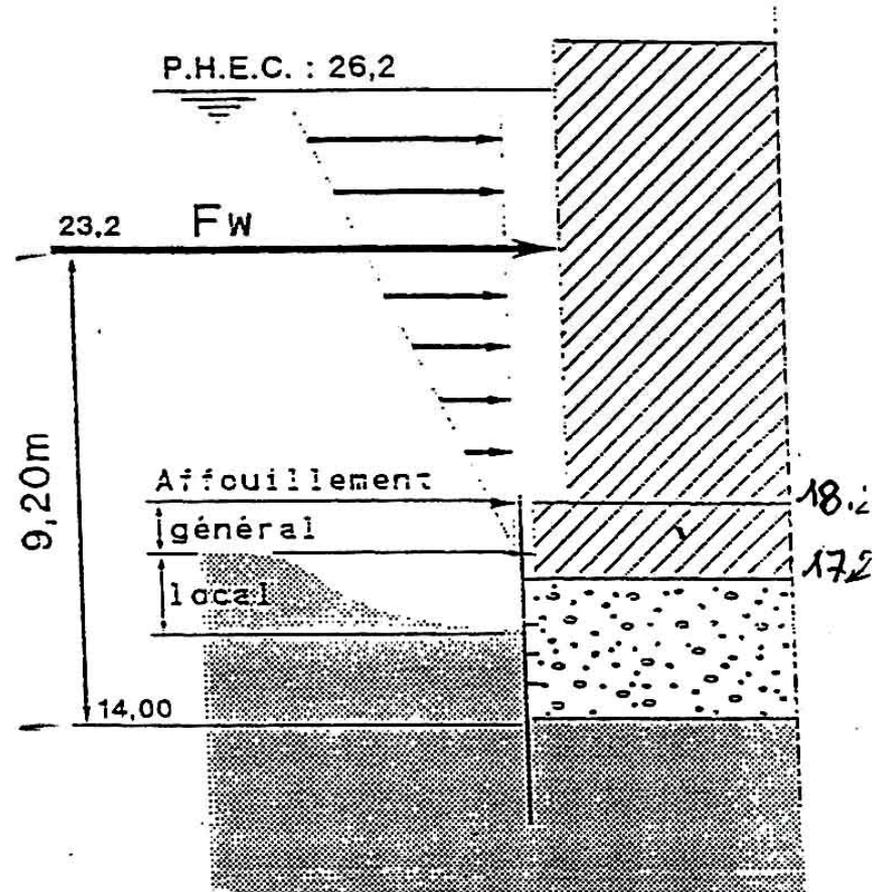
. $h = 9 \text{ m}$

. $b \sim 3,30 \text{ m}$

. $v = 3 \text{ m/s}$

$$F_w = 19 \text{ t} = H_y$$

$$M_x = 19 \cdot (23,2 - 14) = 175 \text{ t.m}$$



Situation transitoire (suite)

TRANS	V	Hx	My	Hy	Mx	Pondération
P.p.	4865	0	0	0	0	1,350
Eau hydrost.	-665	0	0	0	0	1,125*1
hydrodyn.	0	0	0	19	175	1,125*1,2
A(1)	485	11	220	0	0	1,600
T	0	7	140	0	0	1,3*0,6

Comb.	6596	23	461	26	236
-------	------	----	-----	----	-----

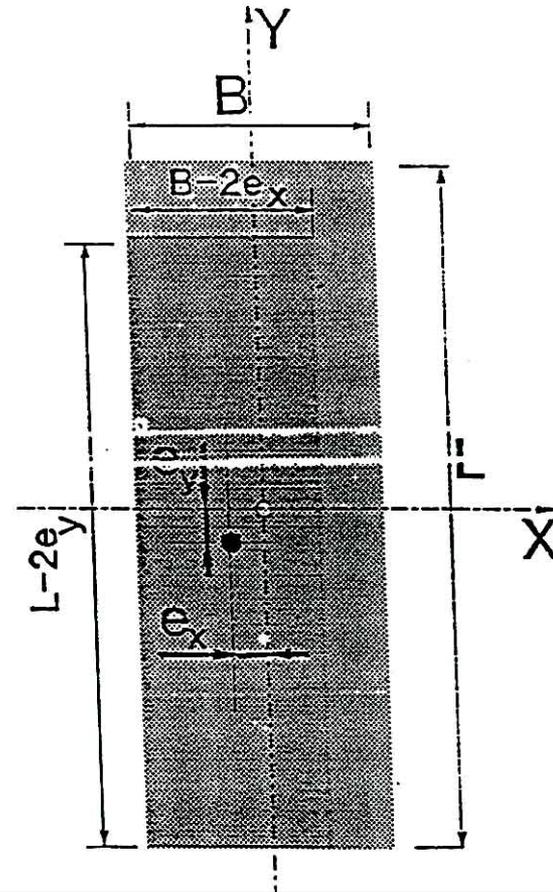
Situation transitoire (suite)

$$q_{\text{ref}} = \frac{V}{(B - 2e_x) \cdot (L - 2e_y)}$$

$$e_x = \frac{M_y}{V} = 0,07\text{m}$$

$$e_y = \frac{M_x}{V} = 0,04\text{m}$$

$$q_{\text{ref}} = 8,8 \text{ bars}$$



E.L.S. de mobilisation du sol

$$S(F_w + G_{\max} (+ G_{\min}) + Q_{1k} + \Psi_{02} Q_{2k})$$

DURABLE	V	H	M	Pondération
P.p.	4865	0	0	1,00
Fau hydrost.	-400	0	0	1,00
hydrodyn.	0	0	0	
A(1)	485	11	220	1,20
T	0	7	140	0,6

Comb.	5047	18	348
-------	------	----	-----

$$q_{\text{ref}} = 6,8 \text{ bars}$$

E.L.S. de mobilisation du sol (suite)

TRANS	V	Hx	My	Hy	Mx	Pondération
P.p.	4865	0	0	0	0	1,000
Eau hydrost.	-665	0	0	0	0	1,00
hydrodyn.	0	0	0	19	175	1,00
A(1)	485	11	220	0	0	1,200
T	0	7	140	0	0	0,6

Comb.	4782	18	348	19	175
-------	------	----	-----	----	-----

$q_{ref} = 6,25 \text{ bars}$

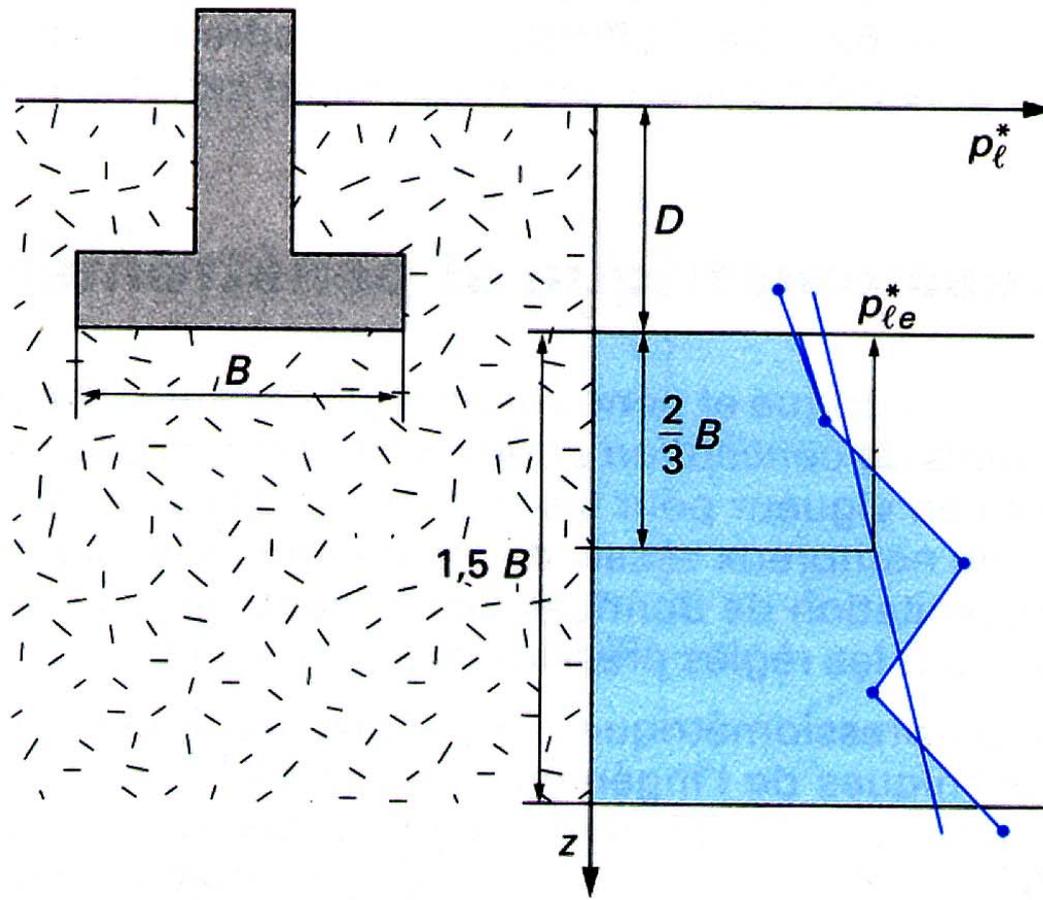
Calcul de la portance

$$\bar{q}_{\max} = q'_0 + \frac{1}{\gamma_q} \cdot (q_u - q'_0) \cdot i_{\delta\beta}$$

$$q_u = k_p \cdot P_{le}^* \div q'_0$$

$$\bar{q}_{\max} = \frac{k_p \cdot P_{le}^*}{\gamma_q} \cdot i_{\delta\beta} \div q'_0$$

Pression limite équivalente



Coefficient de portance

Tableau 6 – Facteur de portance pressiométrique [1]

Type de sol	Expression de k_p	$k_p \text{ max}$ (semelle carrée)	$k_p \text{ max}$ (semelle filante)
Argiles et limons A, craies A	$0,8 \left[1 + 0,25 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	1,30	1,10
Argiles et limons B	$0,8 \left[1 + 0,35 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	1,50	1,22
Argiles C	$0,8 \left[1 + 0,50 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	1,80	1,40
Sables A	$\left[1 + 0,35 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	1,88	1,53
Sables et graves B	$\left[1 + 0,50 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	2,25	1,75
Sables et graves C	$\left[1 + 0,80 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	3,00	2,20
Craies B et C	$1,3 \left[1 + 0,27 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	2,18	1,83
Marnes, marno-calcaires, roches altérées	$\left[1 + 0,27 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	1,68	1,41

Encastrement équivalent

$$D_e = \frac{1}{p_{le}^*} \int_0^D p_{le}^*(z) dz$$

Situation durable Affouillement nul	Situation transitoire Affouillement maxi
--	---

$$D_e = 2,02 \text{ m}$$

$$D_e/B = 0,405$$

$$D_e = 1,47 \text{ m}$$

$$D_e/B = 0,29$$

Résultats

$$\overline{q}_{\max} = q'_0 + \frac{1}{\gamma_q} \cdot (q_u - q'_0) \cdot i_{\delta\beta}$$

$$q_u = k_p \cdot p_{le}^* + q'_0$$

$$\overline{q}_{\max} = \frac{k_p \cdot p_{le}^*}{\gamma_q} \cdot i_{\delta\beta} + q'_0$$

$$\text{.E.L.S. : } \gamma_q = 3$$

$$\text{.E.L.U. : } \gamma_q = 2$$

Résultats (suite)

DURABLE

$$k_p = 1,15$$

$$q'_0 = 0,5 \text{ bars}$$

$$P_{le}^* = 24,7 \text{ bars}$$

- E.L.S. :

$$\bar{q}_{\max} = 9,5 i_{\delta\beta} + 0,5 \text{ (bars)}$$

- E.L.U. :

$$\bar{q}_{\max} = 14,2 i_{\delta\beta} + 0,5$$

TRANSITOIRE

$$k_p = 1,11$$

$$q'_0 = 0,2 \text{ bars}$$

$$P_{ic}^* = 24,7 \text{ bars}$$

$$\bar{q}_{\max} = 9,1 i_{\delta\beta} + 0,2$$

$$\bar{q}_{\max} = 13,7 i_{\delta\beta} + 0,2$$

Justifications

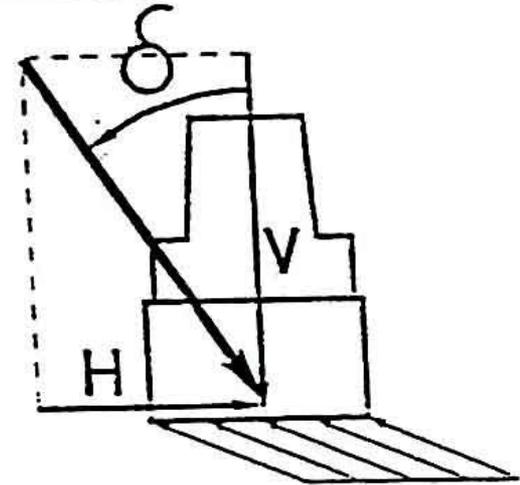
$$\delta < 1^\circ \text{ soit } i_{\delta\beta} = 1$$

SITUATION DURABLE	SITUATION TRANSITOIRE
- E.L.S. $q_{\text{ref}} = 6,8 \text{ bars}$ $\overline{q}_{\text{max}} = 10 \text{ bars}$	$q_{\text{ref}} = 6,3 \text{ bars}$ $\overline{q}_{\text{max}} = 9,3 \text{ bars}$
- E.L.U. $q_{\text{ref}} = 9,3 \text{ bars}$ $\overline{q}_{\text{max}} = 14,7 \text{ bars}$	$q_{\text{ref}} = 8,8 \text{ bars}$ $\overline{q}_{\text{max}} = 13,9 \text{ bars}$

E.L.U. de glissement

$$H \leq \frac{1}{\gamma_{g1}} \cdot (V \cdot \text{tg} \varphi') + \frac{1}{\gamma_{g2}} \cdot (C' \cdot A')$$

- . φ' : angle de frottement interne (37°)
- . C' : cohésion (0)
- . A' : surface comprimée



$$\delta_{\max} \text{ pour : } \begin{cases} V_{\min} \\ H_{\max} \end{cases}$$

E.L.U. de glissement (suite)

Combinaison fondamentale :

$$S(1,125\gamma_{Fw} \cdot F_w (+ 1,35G_{max}) + G_{min} + \gamma_{Q1} \cdot Q_{1k} + 1,3\psi_{02} \cdot Q_{2k})$$

- Eau . hydrostatique : $\gamma_{Fw} = 1,05$
. hydrodynamique : $\gamma_{Fw} = 1,2$
- A(1) : valeur mini (< 0) $\gamma_{Q1} = 1,5$
- T : $\psi_0 = 0,6$

E.L.U. de glissement (suite)

TRANS	V	Hx	My	Hy	Mx	Pondération
P.p.	4865	0	0	0	0	1,000
Eau hydrost.	-665	0	0	0	0	1,125*1,05
hydrodyn.	0	0	0	19	175	1,125*1,2
A(1)	-71	11	220	0	0	1,600
T	0	7	140	0	0	1,3*0,6

Comb.	3966	23	461	26	236
-------	------	----	-----	----	-----

E.L.U. de glissement (suite)

$$H < \frac{1}{\gamma_{g1}} \cdot (V \cdot \text{tg} \varphi') + \frac{1}{\gamma_{g2}} \cdot (C' \cdot A')$$

$$\begin{array}{l} \gamma_{s_1} = 1,2 \\ \gamma_{s_2} = 1,5 \end{array}$$

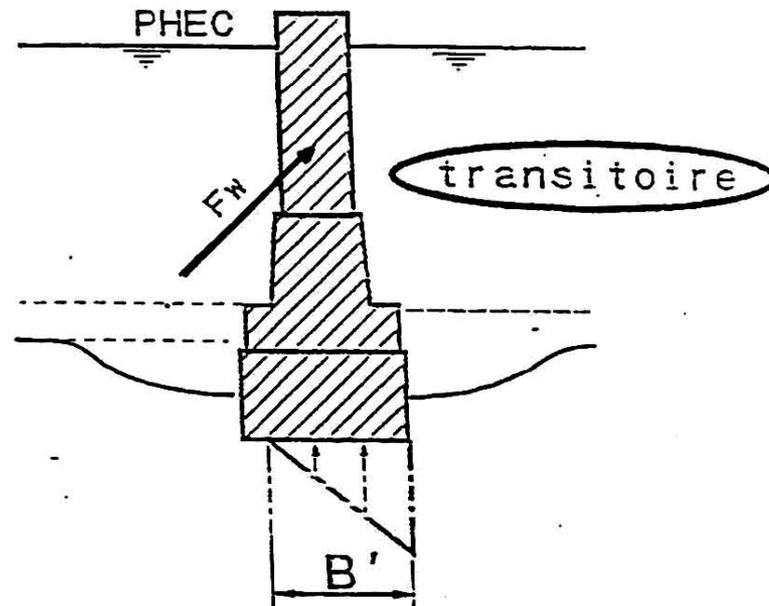
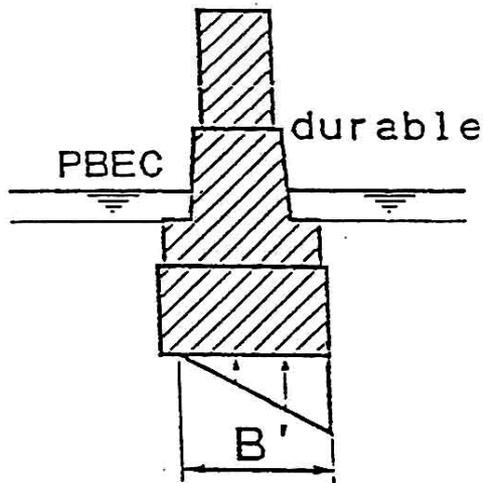
$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} = 35 \text{ t}$$

$$\frac{1}{\gamma_{g1}} \cdot (V \cdot \text{tg} \varphi') = 2490 \text{ t}$$

Non glissement vérifié

E.L.S. de décompression du sol

- Combinaisons rares : $B' > 0,75B$
- Combinaisons fréquentes : $B' = B$



1. Combinaisons rares

$$S(F_w (+G_{\max}) + G_{\min} + Q_{1k} + \Psi_{02} \cdot Q_{2k})$$

. A(1) : valeur mini (<0)

RARE	V	Hx	My	Hy	Mx	Pondération
P.p.	4865	0	0	0	0	1,000
Eau hydrost.	-665	0	0	0	0	1,00
hydrodyn.	0	0	0	19	175	1,00
A(1)	-71	11	220	0	0	1,200
T	0	7	140	0	0	0,6

Comb.	4115	17,5	348	19	175
-------	------	------	-----	----	-----

$$e_x = 0,09m \ll B/6 = 0,83m$$

$$e_y = 0,04m \ll L/6 = 2,58m$$

2. Combinaisons fréquentes

$$S(F_w + G_{\max} + (G_{\min}) + \psi_{11} \cdot Q_{1k} + \psi_{22} \cdot Q_{2k})$$

$$\cdot A(1) : \psi_1 = 0,6 \quad \psi_2 = 0$$

$$\cdot T : \psi_1 = 0,5 \quad \psi_2 = 0$$

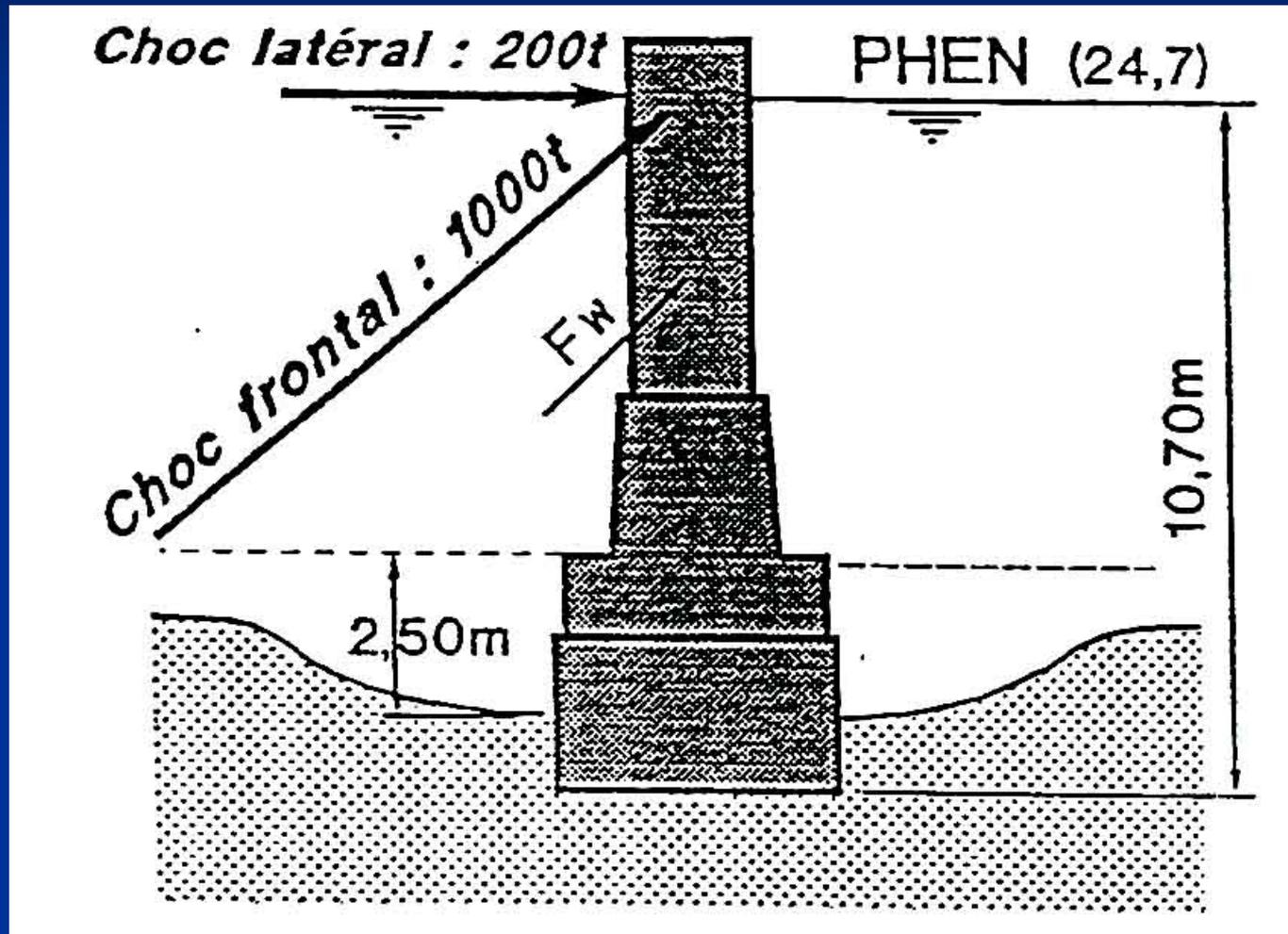
FREQUENTE	V	Hx	My	Hy	Mx	Pondération
P.p.	4865	0	0	0	0	1,000
Eau hydrost.	-665	0	0	0	0	1,00
hydrodyn.	0	0	0	19	175	1,00
A(1)	-71	11	220	0	0	0,600

Comb.	4157	7	132	19	175
-------	------	---	-----	----	-----

$$e_x = 0,03m \ll \frac{B}{6}$$

$$e_y = 0,04m \ll \frac{L}{6}$$

Situation accidentelle



Situation accidentelle (suite)

E.L.U. : Combinaison accidentelle

$$S(F_w + G_{\max} + G_{\min} + F_a + \psi_{11} \cdot Q_{1k})$$

CHOC	V	Hx	My	Hy	Mx
P.p.	4865				
Eau hydrost. hydrodyn.	-665			19	175
Choc frontal latéral		200	2140	1000	10700
FRONTAL	4200	0	0	1019	10875
LATERAL	4200	200	2140	19	175

Choc frontal

1 - E.L.U. DE RENVERSEMENT

$$B' > 10\%.B$$

$$e = \frac{M_x}{V} = 2,59\text{m} \sim L/6 = 15,5/6 = 2,58\text{m}$$

Pas de décompression

3. E.L.U. de glissement

2 - E.L.U. de mobilisation du sol

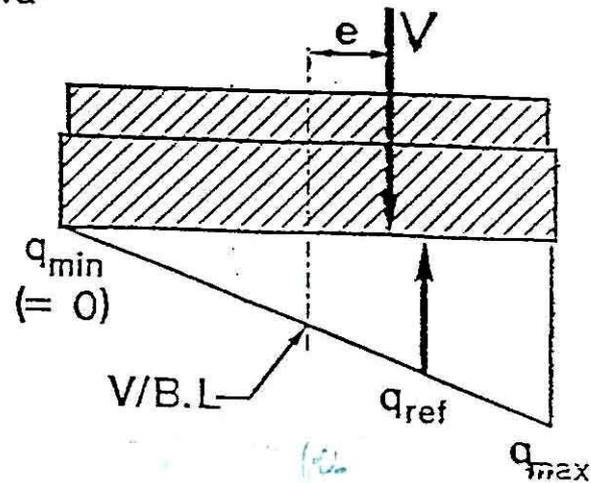
Pour les sables et graves, tels qu'ils sont définis au paragraphe 3 de l'annexe E.1., le coefficient minorateur $i_{\delta\delta}$ est pris égal à :

$$i_{\delta\delta} = \Phi_2(\delta) = \left(1 - \frac{\delta}{90}\right)^2 \left(1 - e^{-\frac{D_c}{B}}\right) + \left[\max\left\{\left(1 - \frac{\delta}{45}\right); 0\right\}\right]^2 \cdot e^{-\frac{D_c}{B}}$$

expression dans laquelle B désigne la largeur de la fondation et D_c , sa hauteur d'encastrement équivalente, telle qu'elle est définie à l'annexe E.2.

$$q_{\max} = 13,7 \cdot 0,56 + 0,2 = 7,9 \text{ bars}$$

$$q_{\text{ref}} = 1,5 \cdot \frac{V}{B.L} = 8,1 \text{ bars}$$



Tassement

Combinaison quasi-permanente :

$$S(F_w + G_{\max} + G_{\min} + \psi_2 \cdot Q_k)$$

SITUATION DURABLE

QUASI-PERM.	V	Hx	My
P.p.	4865	0	0
Eau hydrost.	-400	0	0
Comb.	4465	0	0

Tassement (suite)

$$S_f = S_c + S_d$$

$$S_c = \frac{\alpha}{9E_c} \cdot (q - \sigma_{v0}') \cdot \lambda_c \cdot B \quad (\text{consolidation})$$

$$S_d = \frac{2}{9E_d} \cdot (q - \sigma_{v0}') \cdot B_0 \cdot \left(\lambda_d \cdot \frac{B}{B_0}\right)^\alpha \quad (\text{déviateurique})$$

- . q : contrainte appliquée par la fondation
- . σ_{v0}' : contrainte effective initiale
- . B_0 : largeur de référence = 0,60m
- . λ_c, λ_d : coefficients de forme
- . α : coefficient de sol

Tassement (suite)

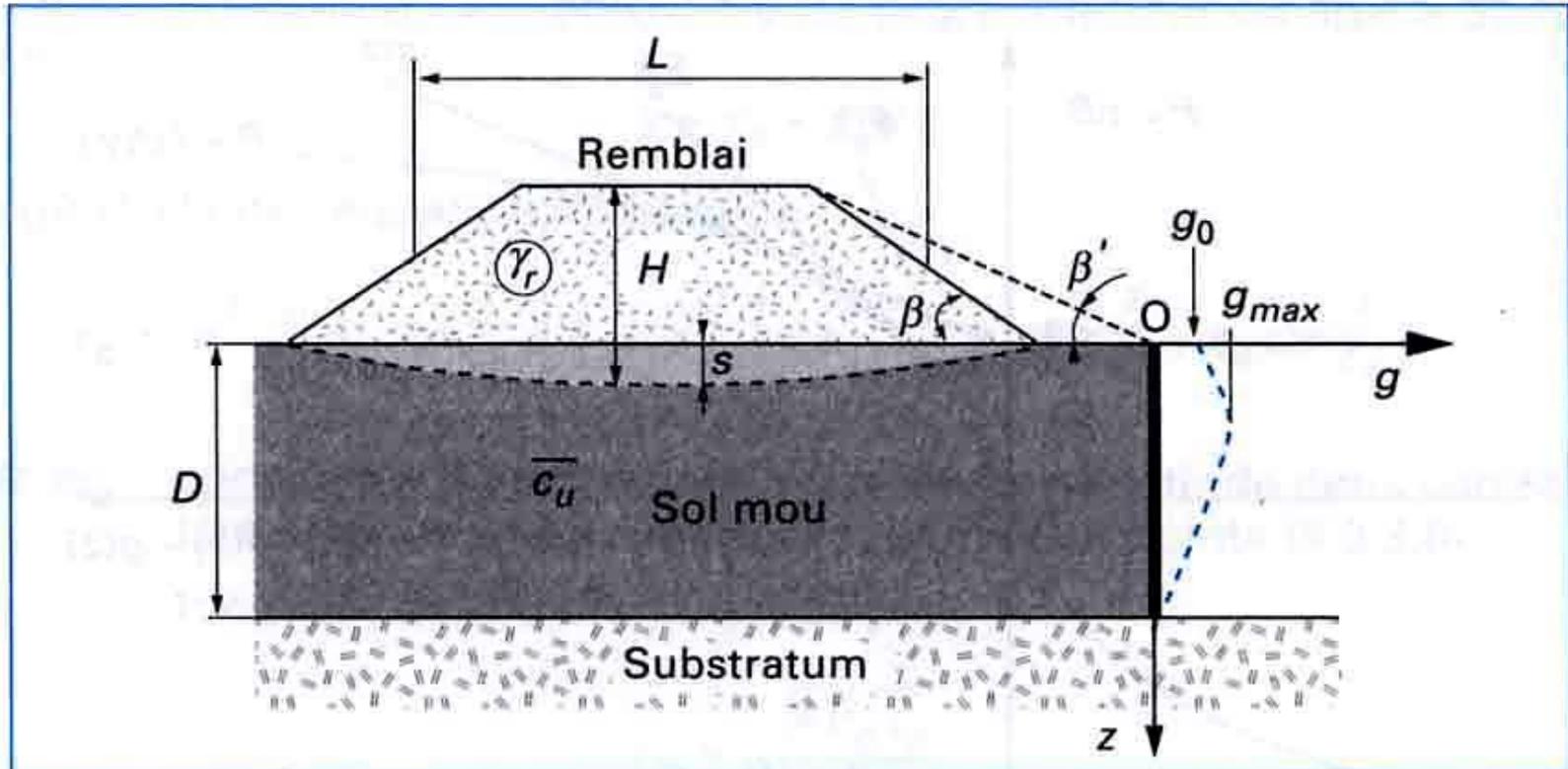


Figure 65 – Définition des paramètres utilisés pour la prévision de la déformée libre du sol [46]

Tassement (suite)

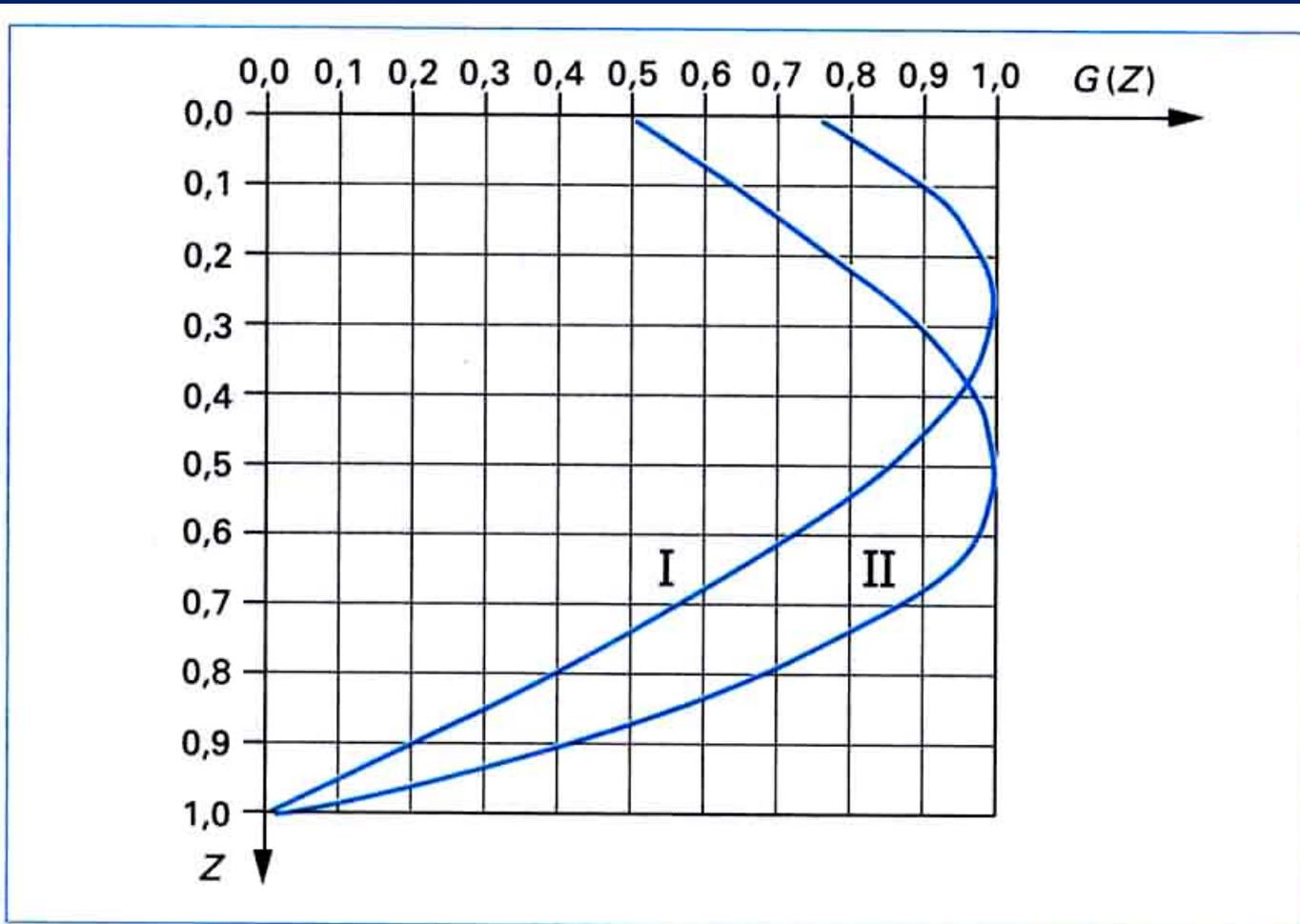


Figure 66 – Déplacement libre du sol : déformées adimensionnelles $G(Z)$ types [1]

Choc frontal (suite)

$$H \leq \frac{1}{\gamma_{g1}} \cdot (V \cdot \operatorname{tg} \varphi') + \frac{1}{\gamma_{g2}} \cdot (C' \cdot A')$$

$$\cdot C' = 0$$

$$\cdot \varphi' = 37^\circ$$

$$\cdot V = 4200 \text{ t}$$

$$\cdot H = 1019 \text{ t}$$

$$\cdot \gamma_{g1} = 1,2$$

$$\cdot (\gamma_{g2} = 1,5)$$

$$\frac{1}{\gamma_{g1}} \cdot (V \cdot \operatorname{tg} \varphi') = 2637 \text{ t}$$

Exemple de justification d'une fondation sur pieux

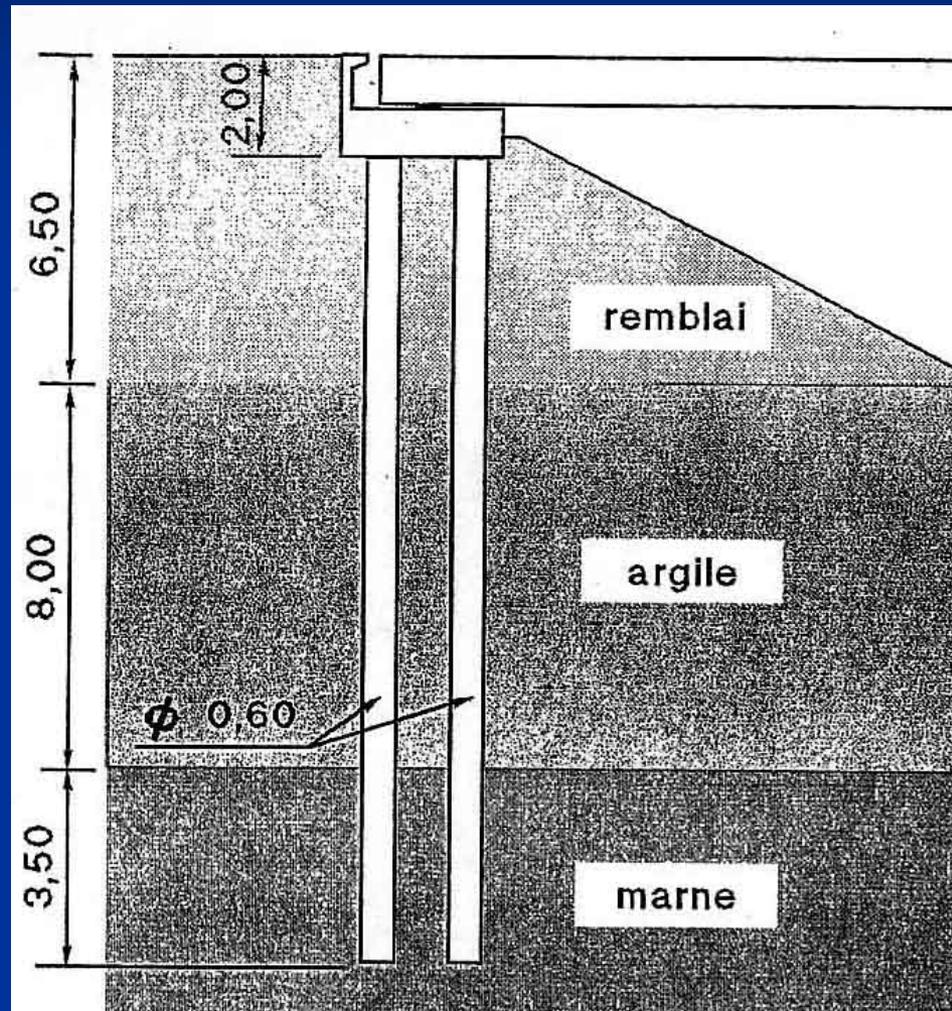
Document proposé par Cécile MAUREL

Applications du Fascicule 62

Ponts Formation Edition

Ecole Nationale des Ponts et chaussées

Fondation sur pieux



Déroulement de la justification

ACTIONS – VALEURS REPRESENTATIVES

A. Actions permanentes

Actions dues au sol

B1 Frottement négatif

B2 poussées latérales

B. Actions variables

COMBINAISONS D'ACTIONS – SOLLICITATIONS

A. ELU

A1. Combinaisons fondamentales

A2. Combinaisons accidentelles

B. ELS

B1. Combinaisons rares

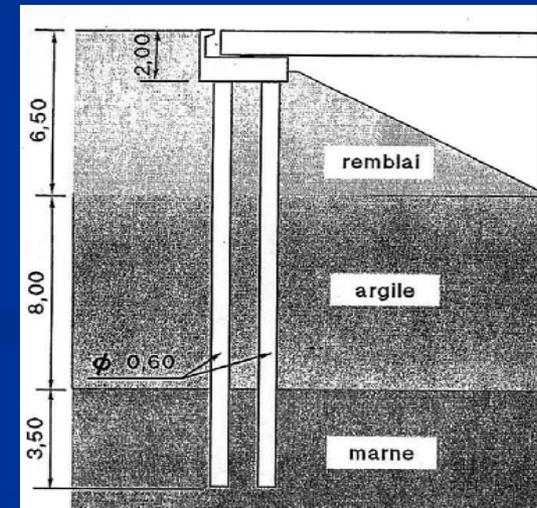
B2. Combinaisons quasi permanentes

DONNEES NECESSAIRES AU CALCUL

A. Modèles de comportement

A1. Rigidité axiale

A2. Comportement transversal



Déroulement de la justification

B. Paramètres de charge Q_u , Q_{tu} , Q_c , Q_{tc}

C. Matériaux

C1. Béton

C2. Acier

PRINCIPAUX RESULTATS

Etats limites de mobilisation du sol

ELS

ELU

Etats limites concernant les matériaux

ELS

ELU

JUSTIFICATIONS

Etats limites de mobilisation du sol

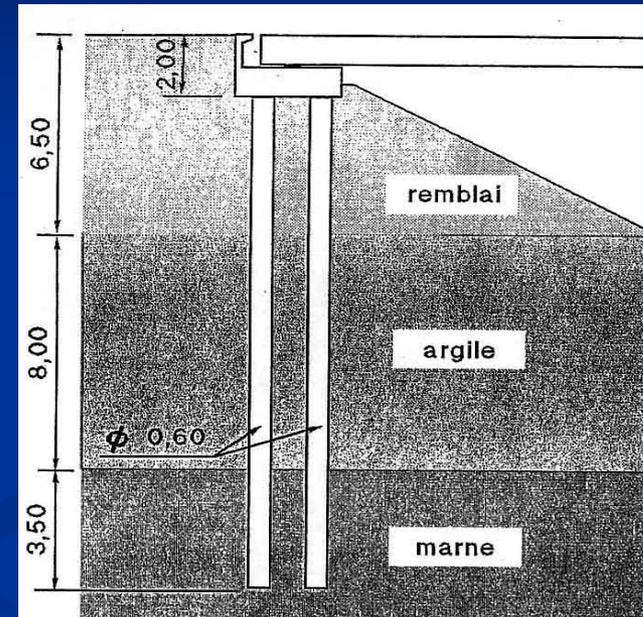
ELS

ELU

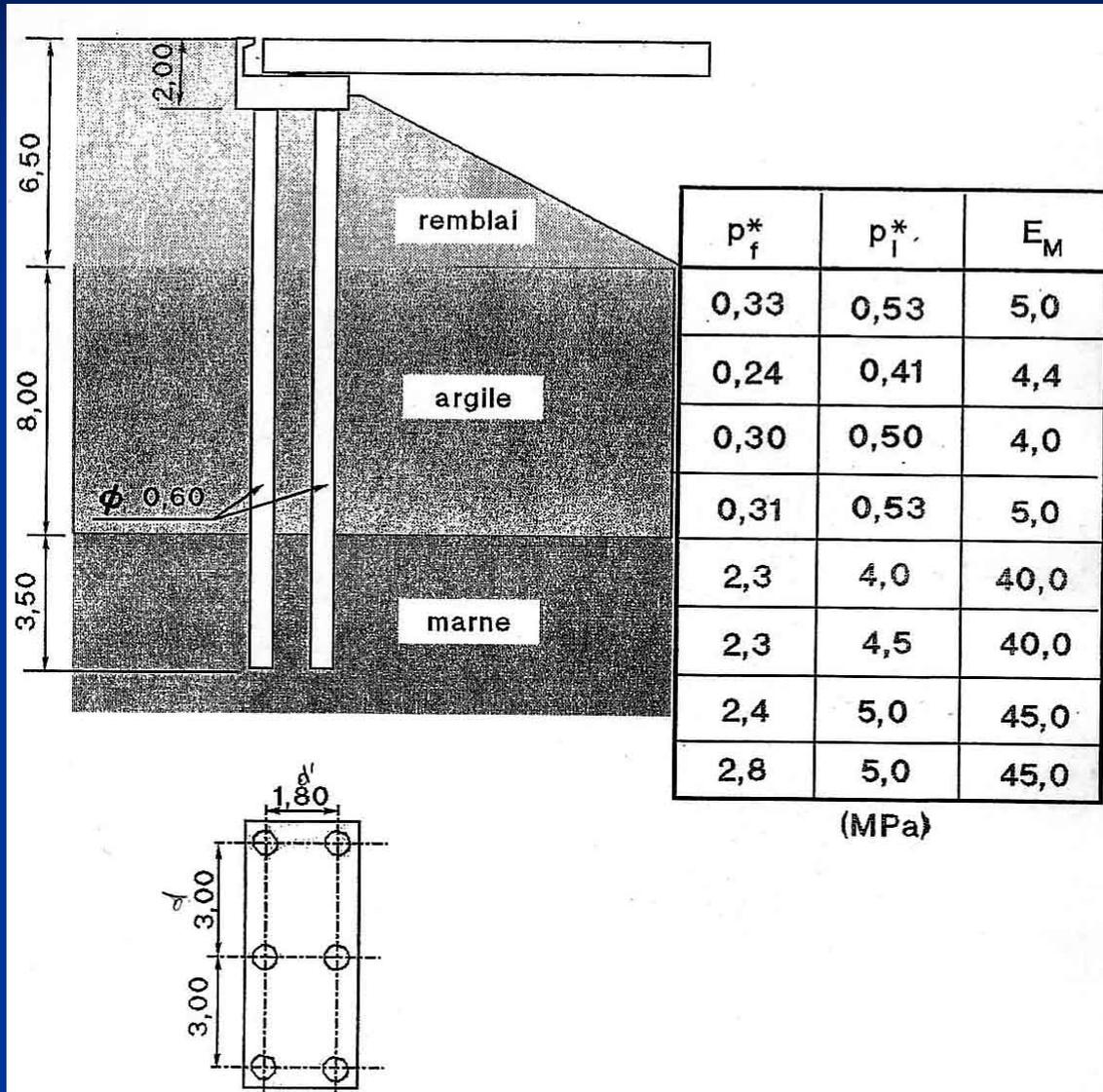
Etats limites concernant les matériaux

ELS

ELU



Présentation de l'exemple



Présentation de l'exemple

Les pieux sont exécutés immédiatement après le remblai

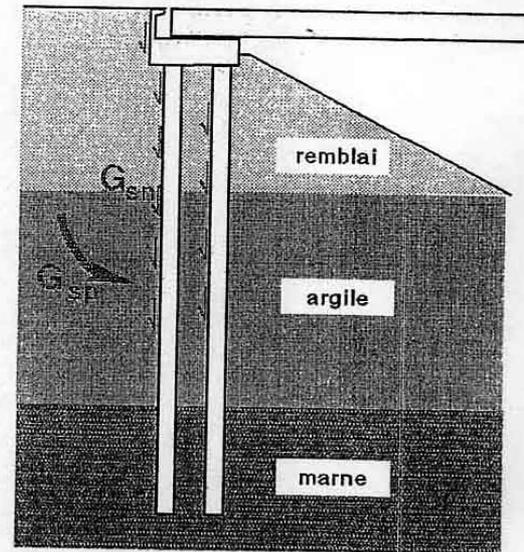
Tassement du remblai

. Total : $s_{\infty} = 0,17 \text{ m}$

. Immédiat : $s_0 = 0,06 \text{ m}$

$$s_{\infty} = s_0 + \Delta s_{\infty}$$

$$\Delta s_{\infty} = 0,11 \text{ m}$$



Nécessité de tenir compte des effets
dûs au déplacement du sol (G_s)

. Frottements négatifs : G_{sn}

. Poussées latérales : G_{sp}

Actions

A – Actions permanentes G

Par simplification, on ne considère que la composante verticale des actions permanentes (autres que G_s) :

Poids propre culée + tablier

$$G_{\max} = G_{\min} = 3 \text{ MN}$$

B – Actions dues au sol (déplacement du sol)

B1 – Frottement négatif G_{sn}

- . Pieux d'angle : 0,66 MN
 - . Autres pieux : 0,52 MN
- } soit 0,61 MN

Hauteurs critiques (comptée à partir de la tête des pieux) :

- . Pieu isolé = 10,5 m ← *Frottement latéral*
- . Groupe illimité = 8,5 m

Frottement négatif

Remblai

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$K \cdot \text{tg} \delta = 1$$

$$\lambda = 0$$

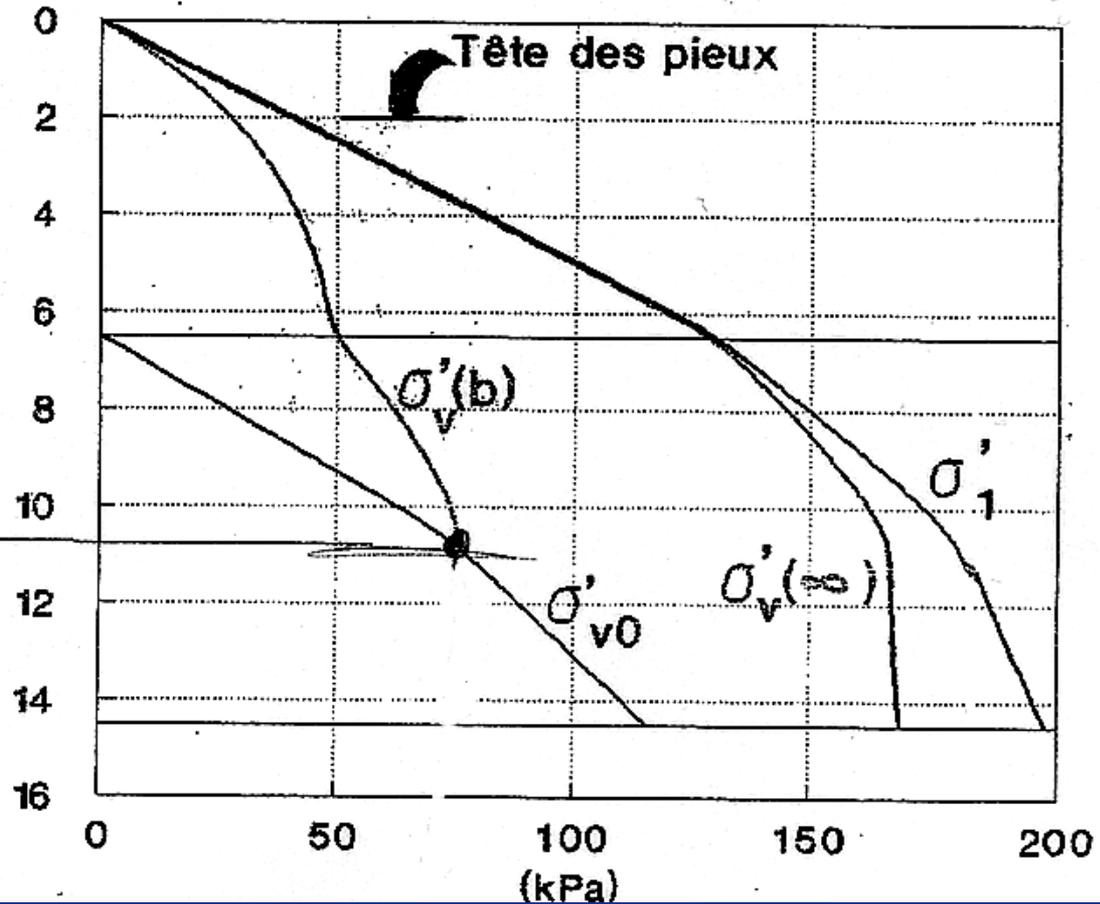
Argile

$$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$$

$$K \cdot \text{tg} \delta = 0,15$$

$$\lambda = 0,235$$



Frottement négatif

- Calcul de la contrainte verticale initiale dans le sol : σ'_{v0}
(voir tableau)

- Calcul de la contrainte verticale dans le sol après remblaiement : σ'_1

- prise en compte de la géométrie du remblai (talus semi infini)
- découpage en intervalles où $d\sigma'_1 / dz$ est constant

- Prise en compte de l'effet d'accrochage du sol sur le pieu (diminution de la contrainte au voisinage du pieu) : $\sigma'_v (\neq 0)$

• Remblai : $\mu = 0$

$$\sigma'_v(z_{j+1}) = \sigma'_v(z_j) + \Delta z_j \cdot \frac{d\sigma'_1}{dz}$$

• Argile : $\mu(\lambda) = \frac{\lambda^2}{1+\lambda} = 0,0447$ ($\lambda = 0,385 - 0,15 = 0,235$)

$$\sigma'_v(z_{j+1}) = \sigma'_v(z_j) + \left[L_0 \cdot \frac{d\sigma'_1}{dz} - \sigma'_v(z_j) \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta z_j}{L_0}} \right)$$

$$\text{avec } L_0 = \frac{R}{\mu(\lambda) \cdot K \cdot \text{tg} \delta} = 44,73$$

$$\sigma'_v(z_{j+1}) = \sigma'_v(z_j) + \left[44,73 \cdot \frac{d\sigma'_1}{dz} - \sigma'_v(z_j) \right] \cdot 0,0221$$

Frottement négatif

- Prise en compte de l'effet de groupe : $\sigma'_v(b)$

$$b = \sqrt{\frac{d \cdot d'}{\pi}} \quad \text{et} \quad \begin{cases} d = 3m \\ d' = 1,80m \end{cases}$$

$$b = 1,31 \text{ m}$$

- **Remblai :**
$$\mu(\lambda, b) = \frac{2}{\left(\frac{b}{R}\right)^2 - 1} = 0,1105$$
- **Argile :**
$$\mu(\lambda, b) = \frac{\lambda^2}{1 + \lambda - \left(1 + \frac{\lambda b}{R}\right) \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{b-R}{R}}} = 0,1745$$

$$\sigma'_v(z_{j+1}) = \sigma'_v(z_j) + \left[L_0 \cdot \frac{d\sigma'_1}{dz} - \sigma'_v(z_j) \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta z_j}{L_0}}\right)$$

$$\text{avec } L_0 = \frac{R}{\mu(\lambda) \cdot K \text{tg} \delta}$$

Frottement négatif

- Calcul de la hauteur d'action du frottement négatif :

Hauteur d'action = $\min (h_1, h_2)$

- $h_1 (\sigma'_v(\infty) = \sigma'_{v0})$
- $h_2 (s = B/100)$

Frottement négatif total

Découpage en tronçons ou $K \cdot \tan \delta$ est constant

a - Pieu isolé

- Remblai ($K \tan \delta$ constant = 1, $\mu = 0$)

$$F_{nr} = P \cdot K \cdot \tan \delta \cdot \int_2^{6,5} \sigma'_1(z) \cdot dz$$

$$F_{nr} = P \cdot K \cdot \tan \delta \cdot \left[\frac{\sigma'_1(6,5) + \sigma'_1(2)}{2} \right] \cdot 4,5 = 721 \text{ kN}$$

- Argile ($K \tan \delta$ constant = 0,15)

. Hauteur d'action : h_1 ($\sigma'_{v(\infty)} = \sigma'_{v0}$) = 14,50 m

h_2 ($s = B/100$) = 12,50 m

$$F_{na} = \frac{P \cdot R}{\mu(\lambda)} \cdot \{ \sigma'_1(h_2) - \sigma'_v(h_2) - (\sigma'_1(6,5) - \sigma'_v(6,5)) \} = 267 \text{ kN}$$

$F_n(\infty) = F_n(\text{remblai}) + F_n(\text{argile}) = 721 \text{ kN} + 267 \text{ kN}$

Soit au total : $F_n(\infty) = 988 \text{ kN} = 0,99 \text{ MN}$

Frottement négatif total

Découpage en tronçons ou $K \cdot \tan \delta$ est constant

b - Pieu dans un groupe illimité

- **Remblai** ($K \tan \delta$ constant = 1)

$$F_{nr} = \frac{P.R}{\mu(\lambda, b)} \cdot (130 - 49,3 - (40 - 28,3)) = 353 \text{ kN}$$

- **Argile** ($K \tan \delta$ constant = 0,15)

$$F_{nr} = \frac{P.R}{\mu(\lambda, b)} \cdot (180,1 - 76,8 - (130 - 49,3)) = 73 \text{ kN}$$

Soit au total	:	$F_n(b) = 426 \text{ kN}$
---------------	---	---------------------------

Frottement négatif total

Découpage en tronçons ou $K \cdot \tan \delta$ est constant

c - Groupe de 6 pieux

$$\text{. Pieux d'angle (4) : } F_{na} = \frac{7}{12} \cdot F_n(b) + \frac{5}{12} \cdot F_n(\infty) = 660 \text{ kN}$$

$$\text{. Pieux "extérieurs" (2) : } F_{na} = \frac{5}{6} \cdot F_n(b) + \frac{1}{6} \cdot F_n(\infty) = 520 \text{ kN}$$

$$\text{Soit en moyenne : } F_n = \frac{1}{6} \cdot (4 \times 660 + 2 \times 520) = 613 \text{ kN}$$

Actions

B2 - Poussées latérales G_{sp}

Evaluée à partir d'une fonction représentative du sol notée $g(z)$ (Art. A.4.2,34)

- Dans la couche compressible (argile) :

$$g(z) = G(Z).g_{\max}$$

- . $Z = z/D$
- . $D = 8 \text{ m (argile)}$
- . $g_{\max} = 0,0275 \text{ m}$

$$g_{\max} = \Gamma \cdot \Delta s_{\infty} \quad \text{avec } \Gamma = 0,25$$

Courbe-type n°1 :

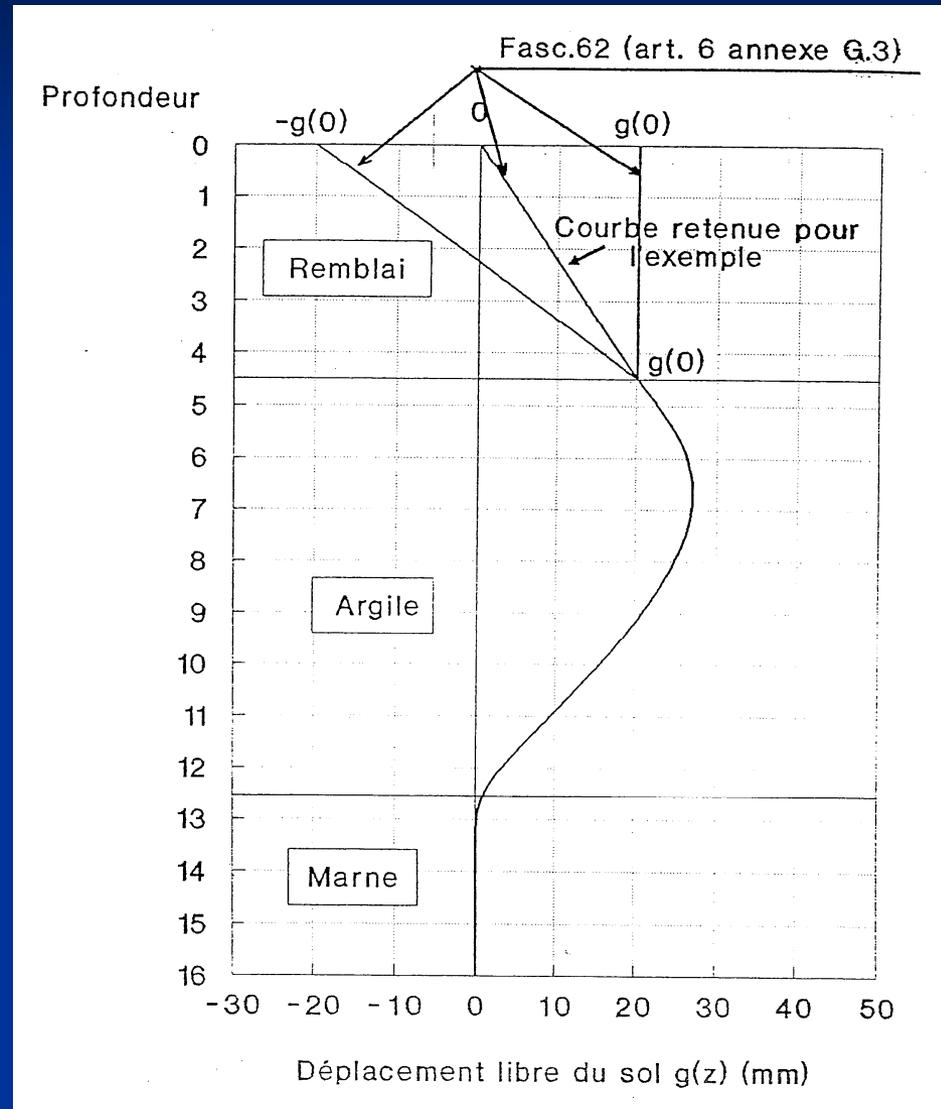
$$G(Z) = 1,83.Z^3 - 4,69.Z^2 + 2,13.Z + 0,73$$

Soit $g(z) =$

- Dans le remblai (Annexe G.3 art. 6)

Déplacement induit par le fluage
de la couche d'argile

Déplacement libre du sol



Actions

C – Action variable Q_{1k}

Charge routière :

$$\begin{array}{l} - "Q_{1\max}" : \\ \quad \cdot V = + 1,2 \text{ MN} \\ \quad \cdot H = +/- 0,1 \text{ MN} \\ \quad \cdot M = +/- 0,1 \text{ MN.m} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} - "Q_{1\max}" : \\ \quad \cdot V = + 1,2 \text{ MN} \\ \quad \cdot H = +/- 0,1 \text{ MN} \\ \quad \cdot M = +/- 0,1 \text{ MN.m} \end{array}} \right\} \text{Freinage}$$

$$\begin{array}{l} - "Q_{1\min}" : \\ \quad \cdot V = - 0,18 \text{ MN} \\ \quad \cdot H = 0 \\ \quad \cdot M = 0 \end{array}$$

Combinaison d'actions

A – Etats-Limites Ultimes (Art. A.5.2)

A1 – Combinaisons fondamentales

$$1,125 \cdot S \{ 1,2 \cdot G_{\max} + 0,9 \cdot G_{\min} + [\gamma_{sn} \cdot G_{sn}] + \gamma_{sp} \cdot G_{sp} + \gamma_{F1Q1} \cdot Q_{1k} \}$$

G_{\max} : actions permanentes défavorables

G_{\min} : actions permanentes favorables

G_{sn} : actions de frottement négatif

$\gamma_{sn} = 1,2$ (ou 1 si favorable)

G_{sp} : actions de poussées latérales

$\gamma_{sp} = 1,2$ (ou 0,6 si favorable)

Q_{1k} : action variable de base

$\gamma_{F1Q1} = 1,33$ (Charges routières)

A2 – Combinaisons accidentelles

(sans objet dans le cas présent)

Combinaison d'actions

B – Etats-Limites de Service *(Art. A.5.3)*

B1 – Combinaisons rares

$$S\{G_{\max} + G_{\min} + [G_{sn}] + G_{sp} + Q_{1k}\}$$

B2 – Combinaisons quasi-permanentes

$$S\{G_{\max} + G_{\min} + G_{sn} + G_{sp}\}$$

Combinaison d'actions

Règles de cumul de G_{sn} et de Q_{1k}

(Article C.3.3)

. Si N a un caractère défavorable :

$$G_{\max} + \max(G_{sn}; Q_{1k})$$

. Si N a un caractère favorable :

$$G_{sn} = 0 \quad \text{en tête de pieu}$$

$$Y_{sn} = 1$$

Données nécessaires au calcul

A – Modèles de comportement

A1 – Rigidité axiale (Art. C.2.1,2)

- . Règles forfaitaires :
 - . pieu libre sur surface latérale
 - . pieu encastré en pointe

→ Elasticité propre du pieu

$$R_i = E_i \cdot S / \ell \quad E_i \# 3.10^4 \text{ MPa (module inst. du béton)}$$

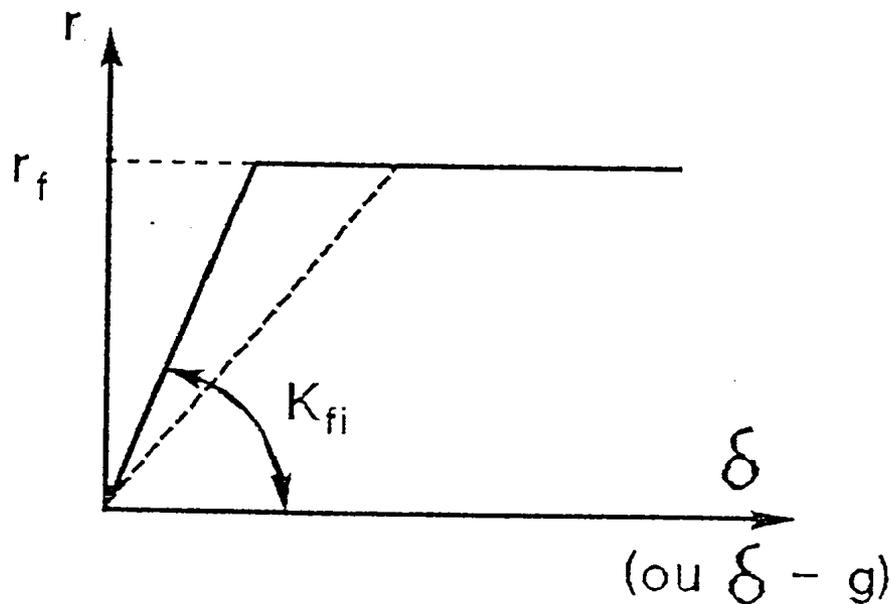
$$R_v = E_v \cdot S / \ell \quad E_v \# 1.10^4 \text{ MPa (module diff. du béton)}$$

. Autres modèles : annexe G.4.

Données nécessaires au calcul

A2 - Comportement transversal (Art. C.2.2 et annexe C.5)

Interaction sol-pieu : réaction frontale



$$r = p \cdot B = K_f \cdot \delta$$

$$r_{\max} = r_f = p_l \cdot B, \text{ car } g(z)$$

$$\text{sinon } r_f = p_f \cdot B$$

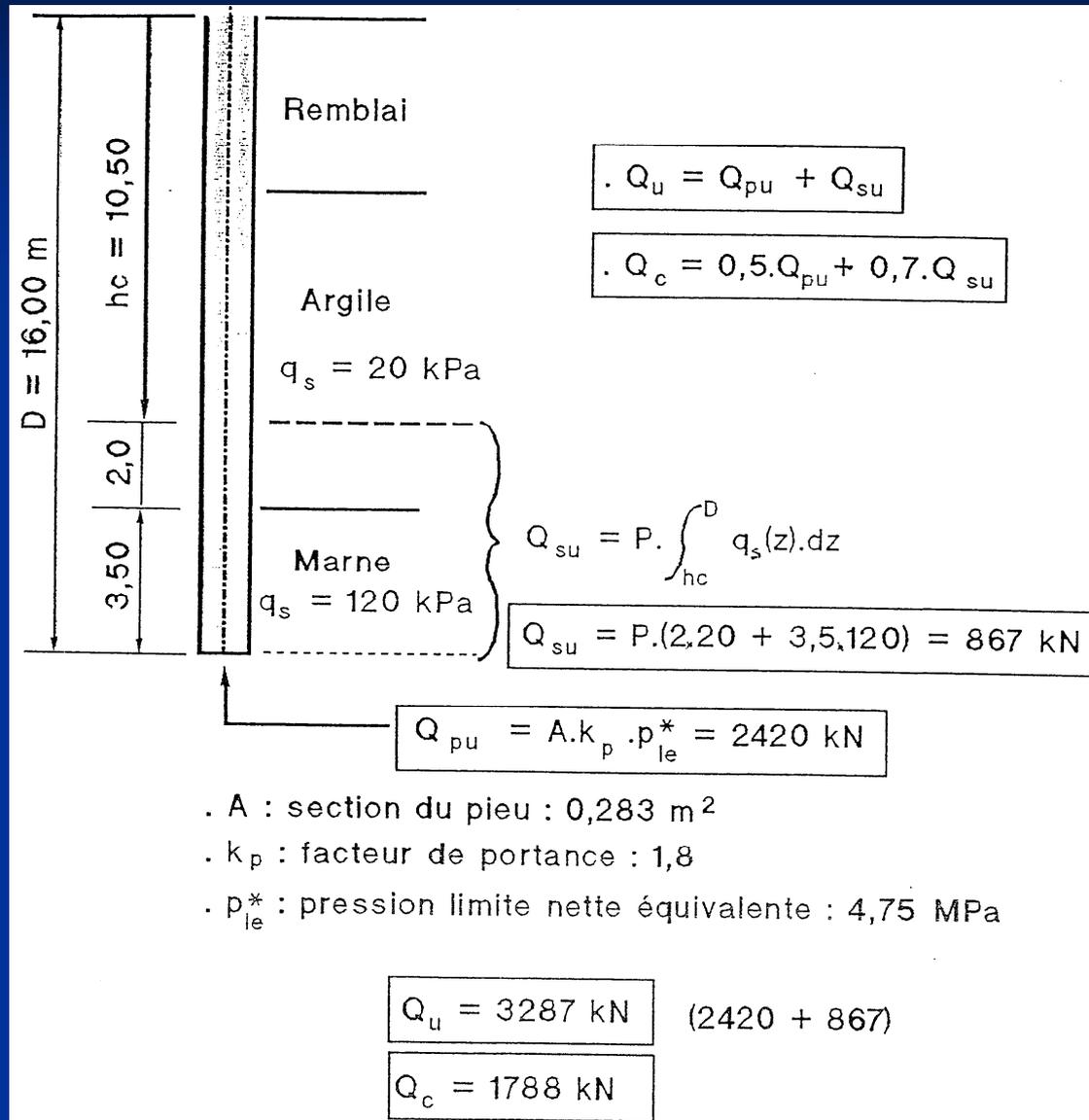
Données nécessaires au calcul

$$K_{fi} = \frac{12.E_M}{\frac{4}{3} \cdot \frac{B_0}{B} \left(2,65 \frac{B}{B_0}\right)^\alpha + \alpha} \quad \text{et} \quad K_{fv} = K_{fi} / 2$$

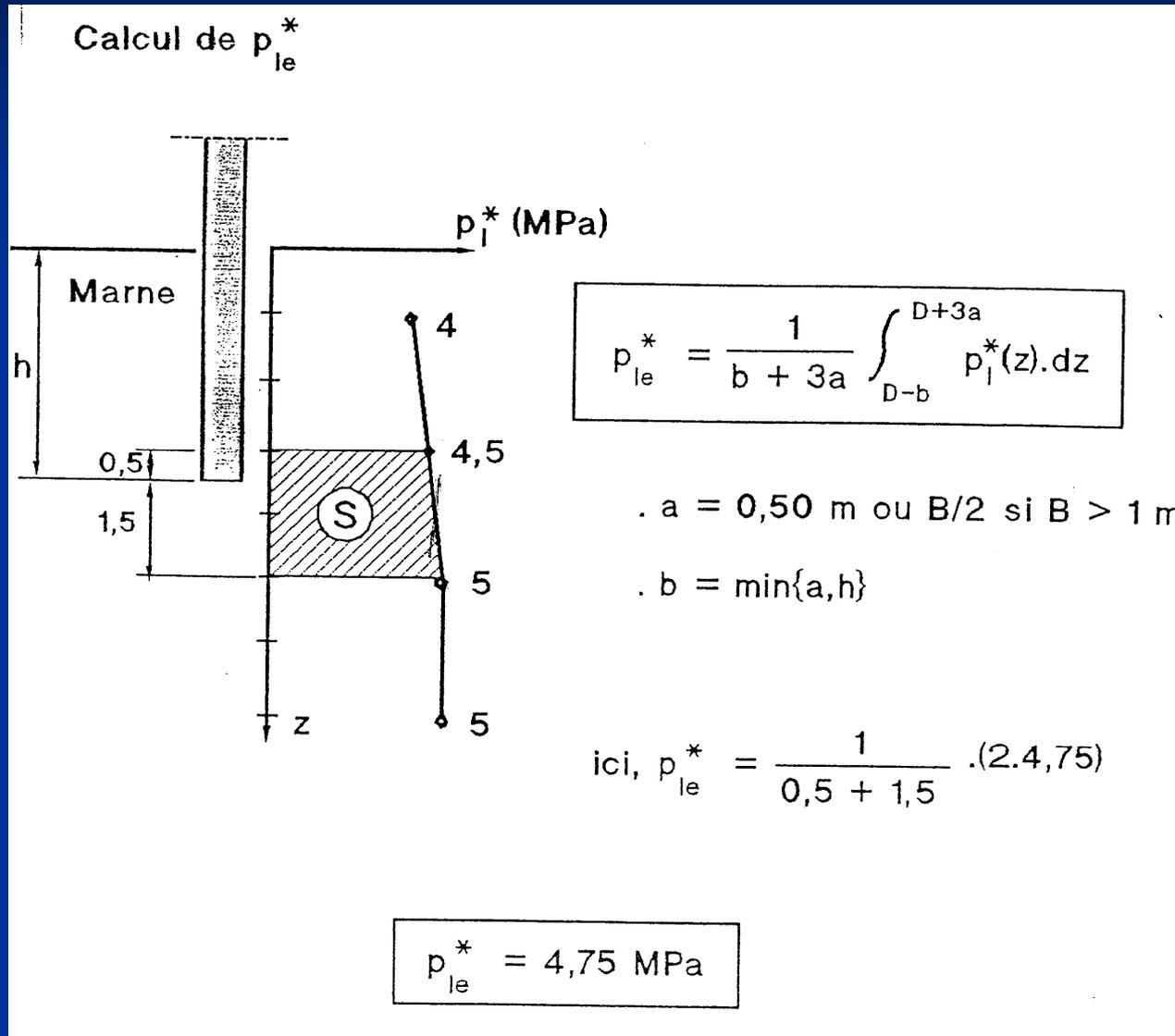
	Remblai	Argile	Marne	
E_M	10	4,5	40	MPa
p_l	1	0,5	4	MPa
α	1/3	1/2	1/2	
K_{fi}	55	20	180	MPa
K_{fv}	27,5	10	90	MPa
r_f	0,6	0,3	2,4	MN/m

Minorations pour talus et surface : non prises en compte (g(z))

Données nécessaires au calcul



Données nécessaires au calcul



Classes de sol

Tableau 5 – Définition des catégories conventionnelles des sols [1]

Classe de sol		Pressiomètre p_e (MPa)	Pénétromètre q_c (MPa)
Argiles , limons	A – Argiles et limons mous	< 0,7	< 3,0
	B – Argiles et limons fermes	1,2 à 2,0	3,0 à 6,0
	C – Argiles très fermes à dures	> 2,5	> 6,0
Sables, graves	A – Lâches	< 0,5	< 5
	B – Moyennement compacts	1,0 à 2,0	8,0 à 15,0
	C – Compacts	> 2,5	> 20,0
Craies	A – Molles	< 0,7	< 5
	B – Altérées	1,0 à 2,5	> 5,0
	C – Compactes	> 3,0	
Marnes, marno-calcaires	A – Tendres	1,5 à 4,0	
	B – Compacts	> 4,5	
Roches (1)	A – Altérées	2,5 à 4,0	
	B – Fragmentées	> 4,5	

(1) L'appellation de roches altérées ou fragmentées peut regrouper des matériaux calcaires, schisteux ou d'origine granitique. S'il est difficile parfois de fixer des limites précises avec les sols meubles qui constituent leur phase finale d'évolution, on réservera toutefois cette classification aux matériaux qui présentent des modules pressiométriques supérieurs à 50 à 80 MPa.

Facteurs de portance

Tableau 6 – Facteur de portance pressiométrique [1]

Type de sol	Expression de k_p	$k_p \text{ max}$ (semelle carrée)	$k_p \text{ max}$ (semelle filante)
Argiles et limons A, craies A	$0,8 \left[1 + 0,25 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	1,30	1,10
Argiles et limons B	$0,8 \left[1 + 0,35 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	1,50	1,22
Argiles C	$0,8 \left[1 + 0,50 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	1,80	1,40
Sables A	$\left[1 + 0,35 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	1,88	1,53
Sables et graves B	$\left[1 + 0,50 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	2,25	1,75
Sables et graves C	$\left[1 + 0,80 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	3,00	2,20
Craies B et C	$1,3 \left[1 + 0,27 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	2,18	1,83
Marnes, marno-calcaires, roches altérées	$\left[1 + 0,27 \left(0,6 + 0,4 \frac{B}{L} \right) \frac{D_e}{B} \right]$	1,68	1,41

Choix des abaques de q_s

Tableau 13 – Choix des courbes pour le calcul du frottement latéral unitaire q_s
(principaux types de pieux utilisés en ouvrage d'art) [1]

Type de pieu	Argiles. Limons			Sables. Graves			Craies			Marnes		Roches
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	
Foré 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
Foré 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
Foré tubé (tube récupéré)	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	
Foré tubé (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
Métal battu fermé	Q ₁	Q ₂		Q ₂		Q ₃	(4)			Q ₃	Q ₄	Q ₄
Battu préfabriqué béton	Q ₁	Q ₂		Q ₃			(4)			Q ₃	Q ₄	Q ₄
Battu moulé	Q ₁	Q ₂		Q ₂		Q ₃	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₃	Q ₄	
Battu enrobé	Q ₁	Q ₂		Q ₃		Q ₄	(4)			Q ₃	Q ₄	
Injecté basse pression	Q ₁	Q ₂		Q ₃			Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅		
Injecté haute pression(6)		Q ₄	Q ₅	Q ₅		Q ₆		Q ₅	Q ₆	Q ₆		Q ₇ (7)

(1) Réalésage et rainurage en fin de forage.

(2) Pieux de grande longueur (supérieure à 30 m).

(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 (parfois 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.

Abaques de q_s

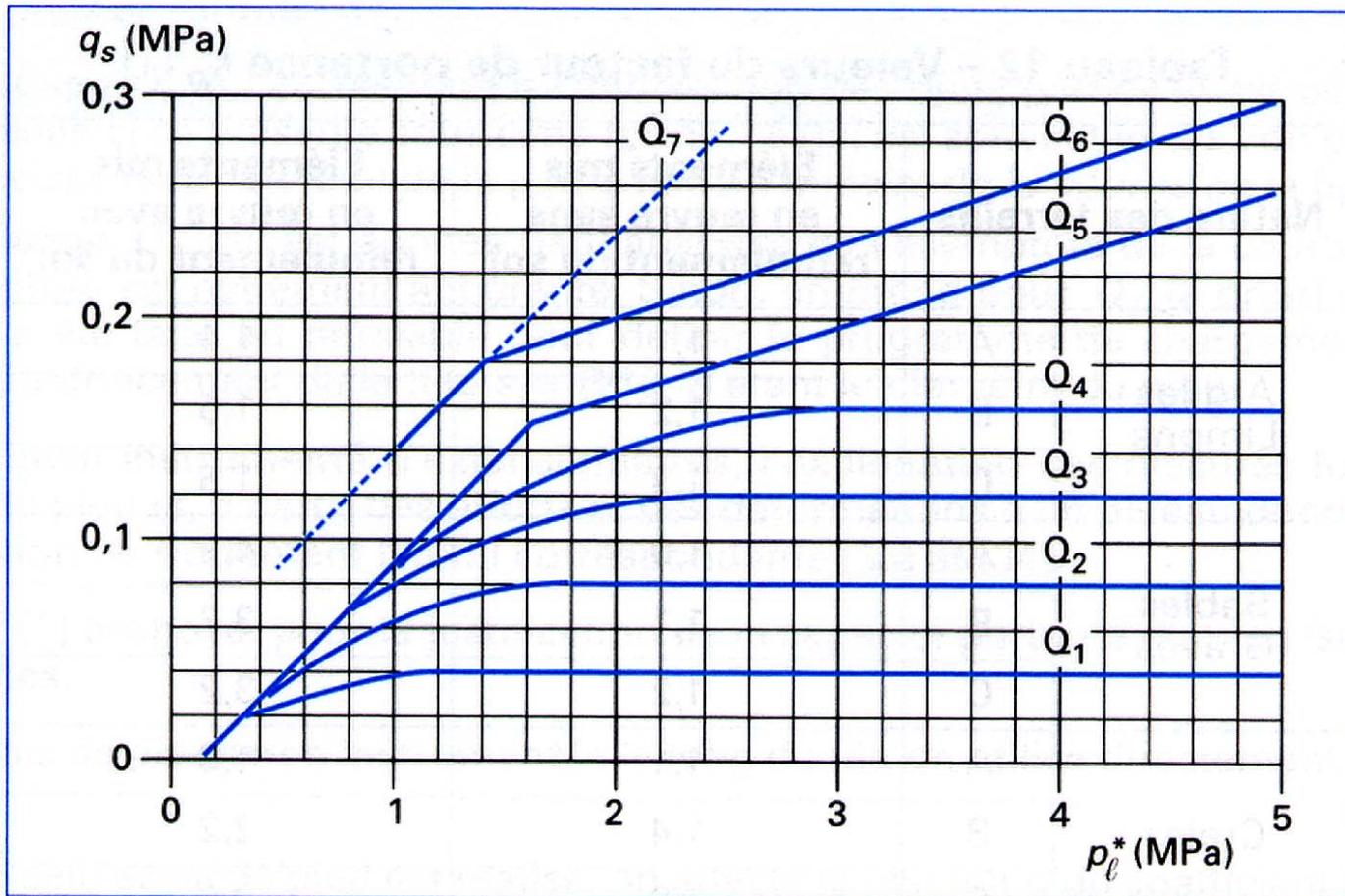


Figure 53 – Frottement latéral unitaire limite le long du fût du pieu [1]

Données nécessaires au calcul

C – Matériaux (*Article A.3*)

C1 – Béton

Résistance conventionnelle :

$$f_c = \frac{\inf\{f_{cj}, f_{c28}, f_{clim}\}}{k_1 \cdot k_2}$$

Données nécessaires au calcul

GROUPE B		f_{clim}	k_1
Pieux battus pilonnés (1)		25 MPa	1,20
Pieux battus moulés		25 MPa	1,20
Pieux et barrettes forés simples		25 MPa	1,20
Pieux forés tubés :	- bétonrés à sec	25 MPa	1,10
	- bétonnés sous l'eau	25 MPa	1,20
Pieux forés à la tarière creuse : (1)	- type 1	25 MPa	1,50
	- type 2	25 MPa	1,20
	- type 3	25 MPa	1,05
Pieux et barrettes bétonnés sous boue, parois moulées		25 MPa	1,20
(1) Sauf dispositions différentes du marché, ces types de pieux ne peuvent être utilisés pour les fondations des ponts (***.*)			

Données nécessaires au calcul

$$f_{clim} = 25 \text{ MPa} \quad k_1 = 1,2$$

$$k_2 = 1,05 \quad (L/B > 20)$$

$$f_c = 20 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bc} = \frac{0,85 \cdot f_c}{1,5} = 11,33 \text{ MPa} \quad (\text{E.L.U. fond.})$$

C2 - Acier $f_e = 400 \text{ MPa}$

$$\sigma_s = \frac{f_e}{1,15} = 348 \text{ MPa} \quad (\text{E.L.U. fond.})$$

Justifications à fournir

Etats-limites de mobilisation du sol

(Article C.4.1)

E.L.U.	comb. fond.	$-\frac{Q_{tu}}{1,40} < N < \frac{Q_u}{1,40}$
E.L.S.	comb. rares	$-\frac{Q_{tc}}{1,40} < N < \frac{Q_c}{1,10}$
	comb. quasi-perm.	$0 < N < \frac{Q_c}{1,40}$

Justifications à fournir

Etats-limites concernant les matériaux (Article C.4.2)

E.L.U.	- résistance sous sollicitations normales - sollicitations tangentes B.A.E.L.
E.L.S.	· $\sigma_{bmax} < 0,6 \cdot f_c$ · $\sigma_{bmoy} < 0,3 \cdot f_c$ surface comprimée · $\sigma_s < \frac{2}{3} \cdot f_e$ (fissuration peu nuisible)

Principaux résultats

Etats-limites de mobilisation du sol

N_{\max} , (N_{\min}) dans un pieu
pour toutes les combinaisons possibles

A - E.L.S.

Principaux résultats (E.L.S. sols)

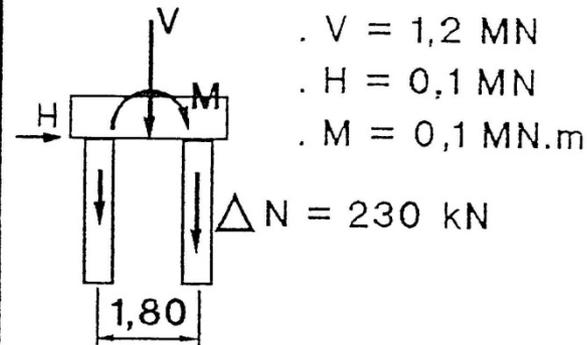
- Combinaisons rares

$$S\{G_{\max} + G_{\min} + [G_{sn}] + G_{sp} + Q_{1k}\}$$

Effet de G_{sn}

$$\Delta N = 613 \text{ kN}$$

Effet de Q_{1k}



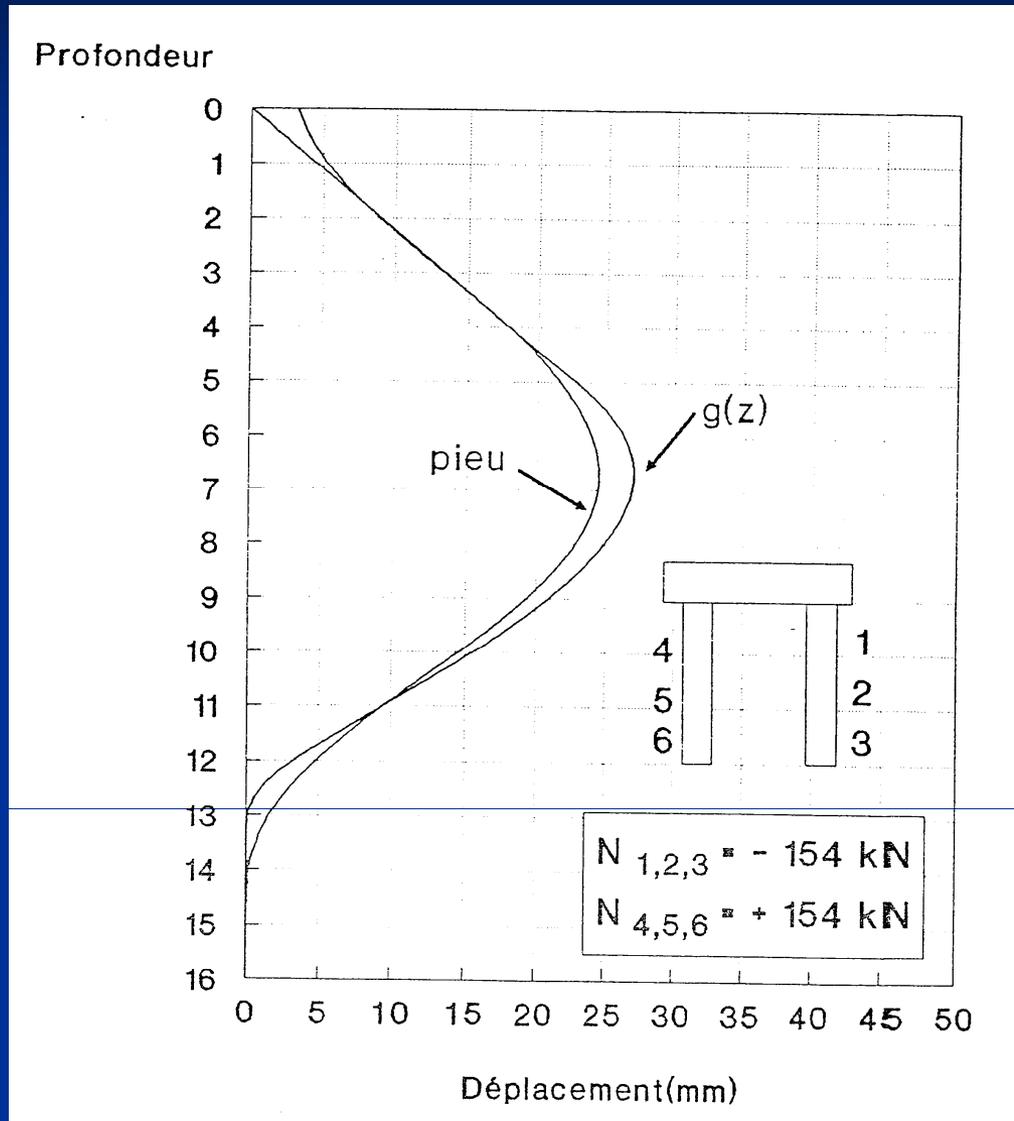
On retient donc : $G_{\max} + G_{sn} + G_{sp}$

$$N_{\max} = 1266 \text{ kN} \quad (653 + 613)$$

- Combinaisons quasi-permanentes : idem "rares"

$$S\{G_{\max} + G_{\min} + G_{sn} + G_{sp}\}$$

Effets de $g(z)$ seul (G_{sp})



Principaux résultats

Etats-limites de mobilisation du sol

N_{\max} , (N_{\min}) dans un pieu
pour toutes les combinaisons possibles

Principaux résultats (E.L.U. sols)

B - E.L.U.

- Combinaisons fondamentales

$$1,125.S\{ 1,2.G_{\max} + 0,9.G_{\min} + [1,2.G_{sn}] + 1,2.G_{sp} + 1,33.Q_{1k}\}$$

On retient :

$$1,125.S\{ 1,2.G_{\max} + [1,2.G_{sn}] + 1,2.G_{sp}\}$$

Si on reste dans le domaine linéaire (interaction sol/pieu) :

$$S\{1,35 G_{\max} + 1,35.G_{sn} + 1,35.G_{sp}\}$$

Ici

$$N_{\max} = 1,35.(653 + 613) = 1709 \text{ kN}$$

Principaux résultats

Etats-limites concernant les matériaux

Couples (N, M) les plus défavorables
vis-à-vis de la flexion composée

Principaux résultats (E.L.S. matériaux)

A - E.L.S.

- Combinaisons rares

$$S\{G_{\max} + G_{\min} + [G_{sn}] + G_{sp} + Q_{1k}\}$$

. Effort normal maxi :

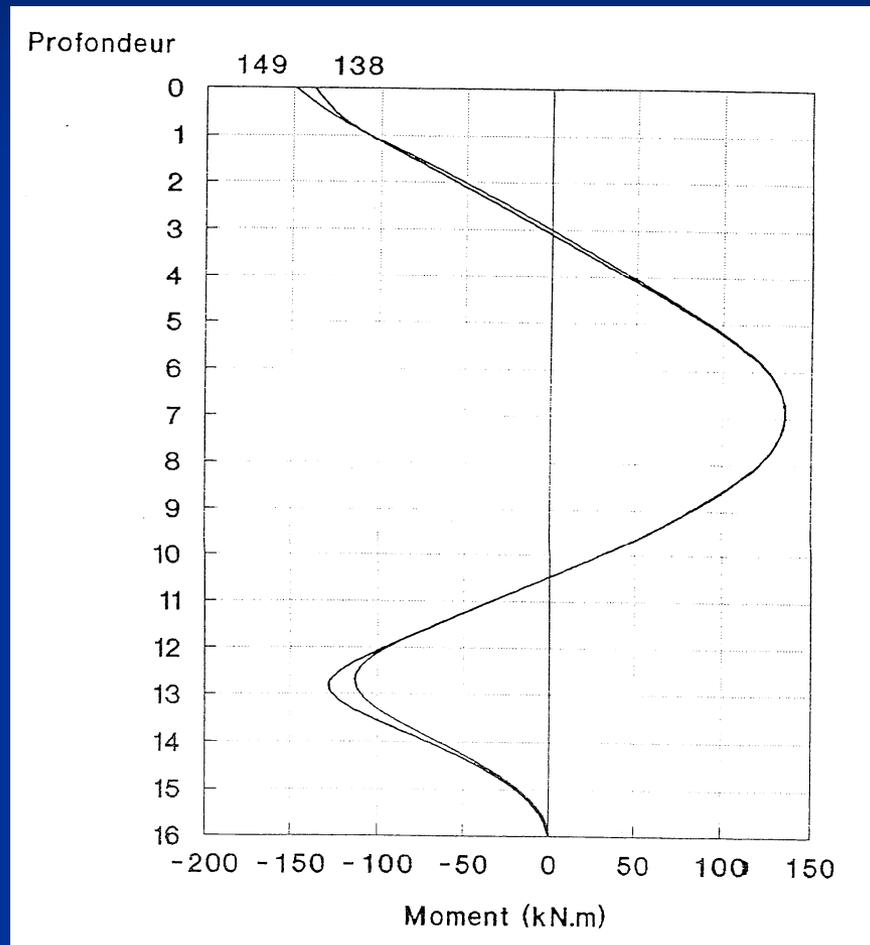
$G_{\max} + G_{sn} + G_{sp}$ (effet de $G_{sn} > Q_{1\max}$)	$N_{\max} = 1266 \text{ kN}$ $M_{\max} = 138 \text{ kN.m}$ (z = 0)
N constant le long du fût (art. C.3.3)	

. Moment maxi :

$G_{\max} + G_{sp} + Q_{1\max}$	$M_{\max} = 148 \text{ kN.m}$ (z = 0) $N_{\max} = 882 \text{ kN}$
---------------------------------	---

(p.m. $N_{\min} = 518 \text{ kN}$)

E.L.S. combinaison rare



Effort normal minimal (E.L.S. matériaux)

. Effort normal mini

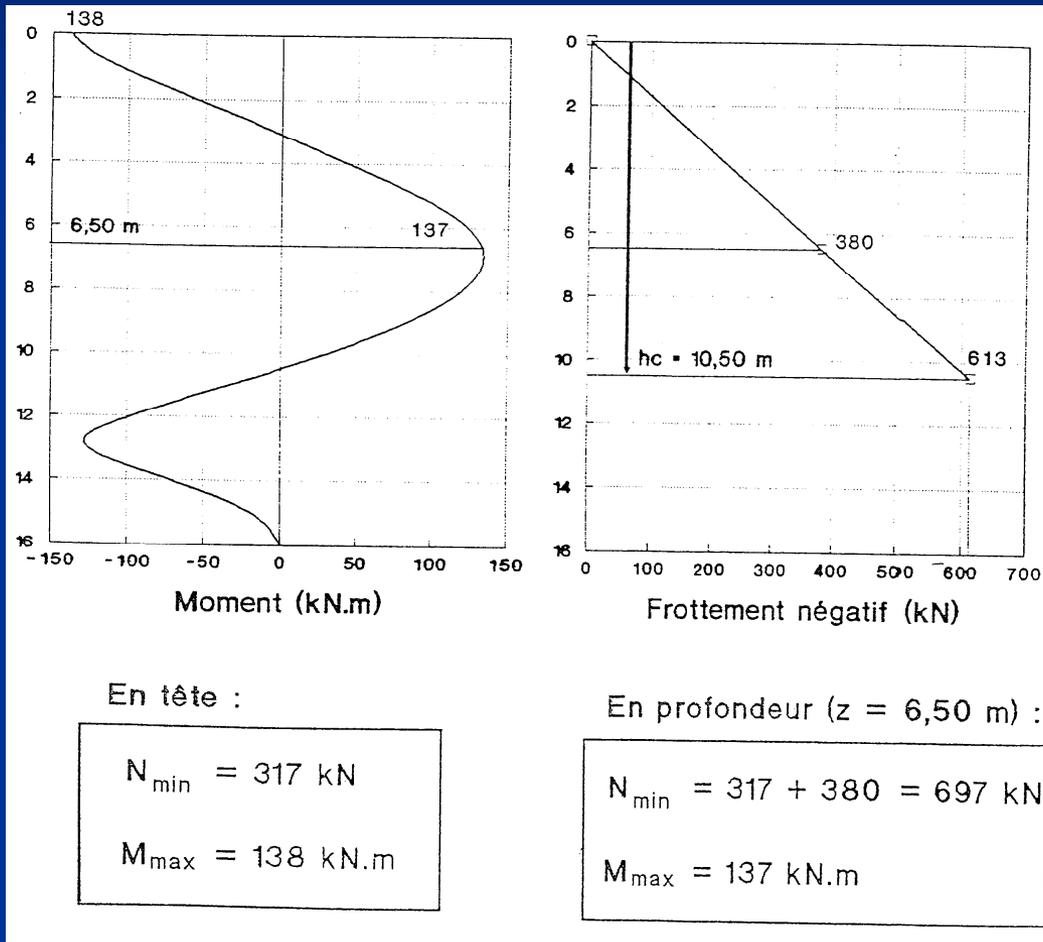
$$G_{\min} + [G_{sn}] + G_{sp} + Q_{1\min}$$

car allègement ($V < 0$)

Prise en compte du frottement négatif : (Art. C.3.3)

N favorable {
· nul en tête
· $\gamma_{sn} = 1$ (à l'ELU)

Effort normal minimal (E.L.S. matériaux)



Etats-limites concernant les matériaux (E.L.U)

B - E.L.U.

Recherche de (N_{\min}, M_{\max})

$$1,125.S\{ 0,9. G_{\min} + [1. G_{sn}] + 1,2. G_{sp} + 1,33. Q_{1\min} \}$$

$$N_{\min} = 1,125.[0,9 . 500 + 0 + 1,2 . (-154) + 1,33 . (-30)] \\ = 253 \text{ kN}$$

$$M_{\max} = 1,125.(1,2 . 138) = 186 \text{ kN.m}$$

Cas N_{\max} , M_{\max} : non traités

Etats-limites de mobilisation des sols

$$\text{. Etat-limite Ultime : } - \frac{Q_{tu}}{1,40} < N < \frac{Q_u}{1,40}$$

$$N_{\max} = 1709 \text{ kN}$$

$$\frac{Q_u}{1,40} = 2348 \text{ kN}$$

Etats-limites de mobilisation des sols

. Etats-limites de Service :

$$\text{Combinaisons rares : } -\frac{Q_{tc}}{1,40} < N < \frac{Q_c}{1,10}$$

$$N_{\max} = 1266 \text{ kN}$$

$$\frac{Q_c}{1,10} = 1625 \text{ kN}$$

$$\text{Combinaisons quasi-perm. : } 0 < N < \frac{Q_c}{1,40}$$

$$N_{\max} = 1266 \text{ kN}$$

$$\frac{Q_c}{1,40} = 1277 \text{ kN}$$

Condition généralement
déterminante en présence
de frottement négatif

Etats-limites concernant les matériaux (E.L.S.)

Etats-limites de Service :

$$\cdot \sigma_{bmax} < 0,6 \cdot f_c = 0,6 \cdot 20 = 12 \text{ MPa}$$

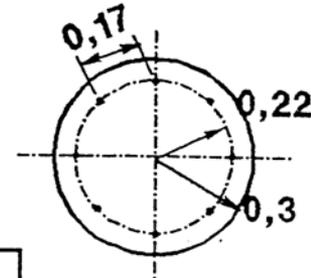
$$\cdot \sigma_{bmoy} < 0,3 \cdot f_c = 0,3 \cdot 20 = 6 \text{ MPa}$$

$$\cdot \sigma_s < \frac{2}{3} \cdot f_e = 0,66 \cdot 400 = 266,7 \text{ MPa}$$

Etats-limites concernant les matériaux (E.L.S.)

Ferrailage minimum : $0,005.S_{\text{béton}}$ ($14,1 \text{ cm}^2$)

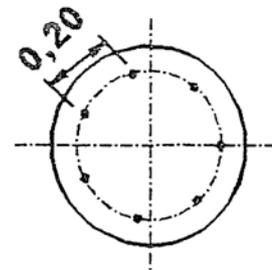
8 HA 16 = $16,1 \text{ cm}^2$



N (kN)	1266 (Nmax)	882	317 (Nmin)
M (kN.m)	138	148 (Mmax)	138
σ_{bmax} (MPa)	10,33	11,04	13,16
σ_{bmoy} (MPa)	4,72	4,76	5,46
σ_{smin} (MPa)	-9,7	-75,7	-306

Avec 7 HA 20 : 22 cm^2

$$\begin{aligned} \sigma_{bmax} &= 11,72 \text{ MPa} \\ \sigma_{bmoy} &= 4,88 \text{ MPa} \\ \sigma_{smin} &= -240 \text{ MPa} \end{aligned}$$



Etats-limites concernant les matériaux (E.L.U.)

Etats-limites Ultimes :

$$\sigma_{bc} = \frac{0,85 \cdot f_c}{1,5} = 11,33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = \frac{f_e}{1,15} = 348 \text{ MPa}$$

Ferraillage : 8 HA 16 (minimum)

N = 253 kN	M _{résistant} = 169 kN.m <i>Insuffisant</i>
M _{max} = 186 kN.m	

Ferraillage : 7 HA 20

N = 253 kN	M _{résistant} = 204 kN.m
M _{max} = 186 kN.m	

Exemple de justification d'une fondation sur pieux

Exemple de justification d'une fondation sur pieux

Tableau récapitulatif

Actions sur la fondation / Sollicitations par pieu

kN, kNm		V	M	H
G	Sur l'ensemble de la fondation	3000	0	0
	Par pieu	500	0	0
Gsn	Sur l'ensemble de la fondation			
	Par pieu	613	0	0
Gsp	Sur l'ensemble de la fondation			
	Par pieu	+154/-154	+138/-138 (Gsp seul)	
Q1 max	Sur l'ensemble de la fondation	1200	+100/-100	+100/-100
	Par pieu	+230/-170	+148/-148 (Q1max+Gsp)	0
Q1 min	Sur l'ensemble de la fondation	-180	0	0
	Par pieu	-30	0	0

Exemple de justification d'une fondation sur pieux

Combinaisons et justifications

Vis à vis du SOL

	Action retenue	V	Valeur limite
ELU fondamental			
<i>1,35 G_{max} ou 1,00 G_{min} + 1,35 G_{sn} ou 1,5 Q_{1max} + 1,35 G_{sp}</i>			
N _{max}	G _{sn}	1710	2348 (Q _u / 1,4)
ELS rare			
<i>G_{max} ou G_{min} + G_{sn} ou Q_{1max} + G_{sp}</i>			
N _{max}	G _{sn}	1267	1625 (Q _c / 1,1)
ELS quasi permanent			
<i>G_{max} ou G_{min} + G_{sn} + G_{sp}</i>			
N _{max}	G _{sn} (oblig.)	1267	1277 (Q _c / 1,4)

(dimensionnant)

Exemple de justification d'une fondation sur pieux

Vis à vis du matériau du pieu (BA)

	Action retenue	V	M	
ELU fondamentale				
<i>1,35 G_{max} + 1,35 G_{sn} ou Q_{1max} + 1,35 G_{sp}</i>				
M _{max} , N	G _{sn}	1710	186	non dimensionnant
<i>1,00 G_{min} + 1,00 G_{sn} + 1,35 G_{sp} + 1,5 Q_{1min}</i>				
M _{max} , N _{min}	G _{sn} = 0 ; Q _{1min}	253	186	(dimensionnant)
ELS rare				
<i>G_{max} + G_{sn} ou Q_{1max} + G_{sp}</i>				
N _{max} , M	G _{sn}	1267	138	
M _{max} , N	Q _{1max}	884	148	
ELS rare				
<i>G_{min} + G_{sn} + G_{sp} + Q_{1min}</i>				
N _{min} , M	G _{sn} = 0 ; Q _{1min}	316	138	(dimensionnant)
ELS quasi permanent				
<i>G_{max} ou G_{min} + G_{sn} + G_{sp}</i>				
N _{max} , M	G _{sn} (oblig.)	1267	138	idem ELS rares
M _{max} , N	G _{sn} (oblig.)	1267	138	idem ELS rares
N _{min} , M	G _{sn} (oblig.)	346	138	non dimensionnant