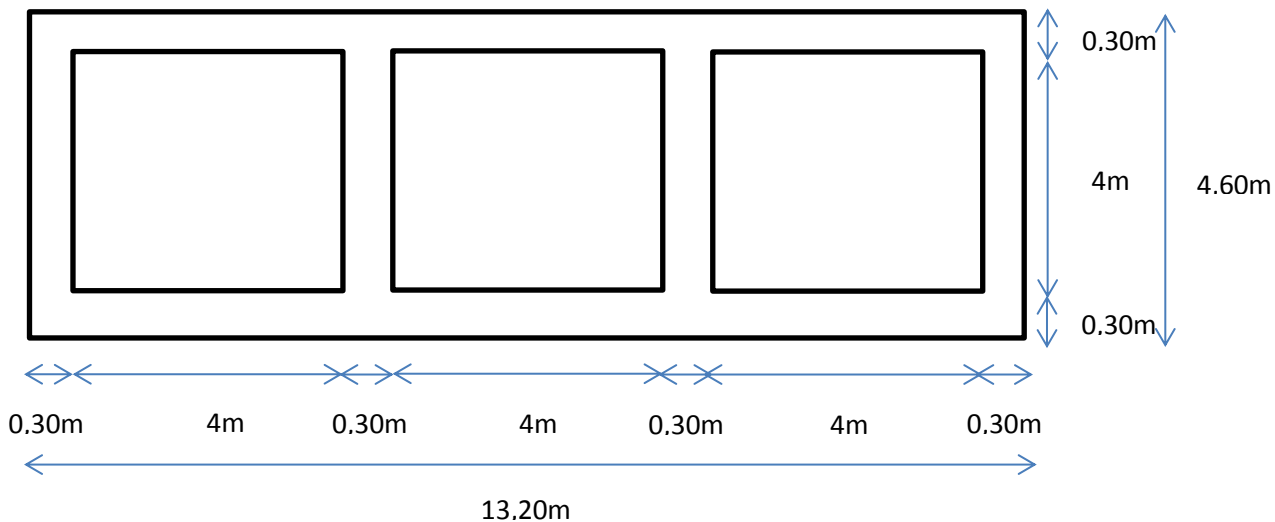


NOTE DE CALCUL D'UN DALOT 3x4.00x4.00m

A- DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Epaisseur de la dalle :	$e_1 = 0,3 \text{ m}$
Epaisseur du radier :	$e_1 = 0,3 \text{ m}$
Epaisseur des voiles :	$e_1 = 0,3 \text{ m}$
Hauteur piédroits :	$H = 4 \text{ m}$
Largeur roulable :	$L_R = 7 \text{ m}$
Largeur chargeable :	$L_C = L_R - (0,5 \times 2) = 6 \text{ m}$
Nombre de voies :	$n = \text{partie entière de } \frac{L_C}{3} = \text{partie entière de } \frac{6}{3} = 2 \rightarrow n = 2 \text{ voies}$
Portée de la travée :	$L = 4 \text{ m}$
Ouverture hydraulique :	$4\text{m} \times 4\text{m}$
Guides roues en béton armé de section :	$0,30\text{m} \times 0,80\text{m}$
Classe du pont : pont de première classe car	$L_R \geq 7 \text{ m}$



B- HYPOTHESES DE CALCUL

B.1- Matériaux

B.1.1- Béton

Dosage : 400 kg/m^3
Résistance en compression : $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$
Résistance en traction : $f_{t28} = 0,6 + 0,06f_{c28} = 2,4 \text{ MPa}$
Densité du béton : 25 KN/m^3
Contrainte admissible du béton en compression à l'ELU :

$$\sigma_{bc} = \frac{0,85f_{c28}}{\gamma_b} = \frac{0,85 \times 30}{1,5} \rightarrow \sigma_{bc} = 17 \text{ MPa}$$

Contrainte admissible du béton en compression à L'ELS :

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 30 \rightarrow \bar{\sigma}_{bc} = 18 \text{ MPa}$$

B.1.2- Acier

Nuance : Acier a Haute Adhérence (HA) *FeE 400*

Limite d'élasticité $f_e = 400 \text{ MPa}$

Contrainte de calcul de l'acier : $\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 347,83 \text{ MPa}$

Fissuration préjudiciable : $\bar{\sigma}_s = \min\left\{\frac{2}{3}f_e; \max(0,5f_e; 110\sqrt{nf_{t28}})\right\}$
 $\bar{\sigma}_s = \min\{266,67; \max(200; 110\sqrt{1,6 \times 2,4})\}$
 $\bar{\sigma}_s = \min\{266,67; \max(200; 215,55)\}$

$$\bar{\sigma}_s = 215,55 \text{ MPa}$$

B.1.3- Remblai

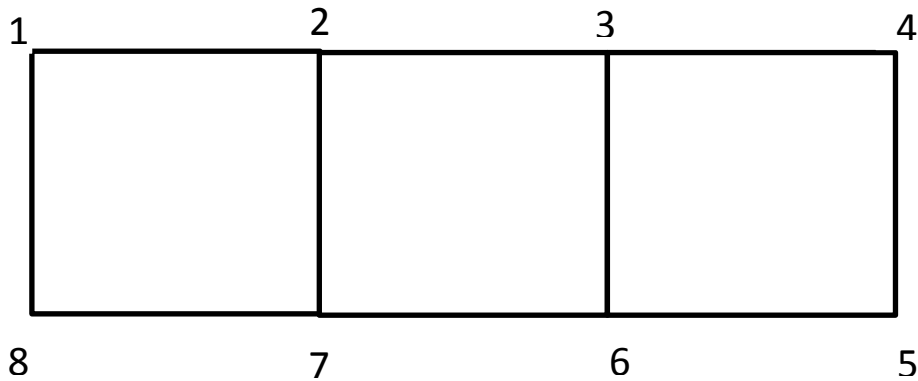
Remblai d'accès en graveleux latéritique : $\gamma_d = 20 \text{ KN/m}^3$ et $K_a = 0,333$

Remblai sur dalot en graveleux latéritique : $\gamma_d = 20 \text{ KN/m}^3$ et épaisseur = 50cm

Coefficient de poussée des terres : $K_a = 0,333$

B.2- Règlement : BAEL 99

C- SCHEMA STATIQUE DE L'OUVRAGE



Moment d'inertie du tablier et du radier = $I1$ = Moment d'inertie du piédroit = $I2$

Module d'élasticité E. Ce paramètre étant constant (même matériau), on peut le prendre égale à 1

D- METHODE DE CALCUL

De manière générale, les études seront faites par bande d'un (01) mètre de dalot ($b=1m$)

Dans notre étude, compte tenu de la symétrie de géométrie de notre ouvrage et de la non symétrie de chargement, nous avons considéré que les piédroits intermédiaires sont dimensionnés en compression simple, ce qui nous permet d'annuler le moment au niveau de ces piédroits, d'où la possibilité d'utiliser la méthode des rotations pour l'étude de l'équilibre de chaque nœud.

Désignons par :

$M_{i,j}$ = moment statique appliqué au nœud i par la barre ij

$m_{i,j}$ = moment d'encastrement appliqué au nœud i par la barre j (déterminé par les charges appliquées à la barre)

a_i = rotation du nœud i

k_1 = caractéristique de la rigidité des barres horizontales = $\frac{2 \times E \times I1}{L} = \frac{2 \times I1}{L}$

k_2 = caractéristique de la rigidité des barres verticales = $\frac{2 \times E \times I2}{L} = \frac{2 \times I2}{L}$

$M_{i,j} = k \times (2 \times a_i + a_j) + m_{i,j}$, $k = k_1$ ou k_2

$b_i =$ constante du nœud i

En considérant pour l'ouvrage, une bande de largeur $b = 1m$

$$I_1 = I_2 = \frac{b \times h^3}{12} = \left(\frac{300 \times 1000^3}{12} \right) = 2,50.10^{10} mm^4$$

$$k_1 = k_2 = \frac{2 \times 2,50.10^{10}}{4300} = 1,163.10^7 N/mm$$

$$2 \times (k_1 + k_2) = 2 \times (1,163.10^7 + 1,163.10^7) = 4,652.10^7 N/mm$$

$$2 \times (2 \times k_1 + k_2) = 2 \times (2 \times 1,163.10^7 + 1,163.10^7) = 6,978.10^7 N/mm$$

L'équilibre du nœud 1 s'écrit :

$$M_{1,2} + M_{1,8} = 0$$

$$\rightarrow k_1 \times (2 \times a_1 + a_2) + m_{1,2} + k_2 \times (2 \times a_1 + a_8) + m_{1,8} = 0$$

$$\rightarrow 2(k_1 + k_2) \times a_1 + k_1 \times a_2 + k_2 \times a_8 = -(m_{1,2} + m_{1,8})$$

En écrivant l'équilibre de tous les nœuds, nous obtenons 8 équations à 8 inconnues
($a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$)

$$\text{Nœud 1 : } 2(k_1 + k_2) \times a_1 + k_1 \times a_2 + k_2 \times a_8 = -(m_{1,2} + m_{1,8}) = b_1$$

$$\text{Nœud 2 : } 2(2 \times k_1 + k_2) \times a_2 + k_1 \times a_1 + k_1 \times a_3 + k_2 \times a_7 = -(m_{2,1} + m_{2,3} + m_{2,7}) = b_2$$

$$\text{Nœud 3 : } 2(2 \times k_1 + k_2) \times a_3 + k_1 \times a_2 + k_1 \times a_4 + k_2 \times a_6 = -(m_{3,2} + m_{3,4} + m_{3,6}) = b_3$$

$$\text{Nœud 4 : } 2(k_1 + k_2) \times a_4 + k_1 \times a_3 + k_2 \times a_5 = -(m_{4,3} + m_{4,5}) = b_4$$

$$\text{Nœud 5 : } 2(k_1 + k_2) \times a_5 + k_1 \times a_6 + k_2 \times a_4 = -(m_{5,4} + m_{5,6}) = b_5$$

$$\text{Nœud 6 : } 2(2 \times k_1 + k_2) \times a_6 + k_1 \times a_5 + k_1 \times a_7 + k_2 \times a_3 = -(m_{6,5} + m_{6,7} + m_{6,3}) = b_6$$

$$\text{Nœud 7 : } 2(2 \times k_1 + k_2) \times a_7 + k_1 \times a_6 + k_1 \times a_8 + k_2 \times a_2 = -(m_{7,6} + m_{7,8} + m_{7,2}) = b_7$$

$$\text{Nœud 8 : } 2(k_1 + k_2) \times a_8 + k_1 \times a_7 + k_2 \times a_1 = -(m_{8,7} + m_{8,1}) = b_8$$

E- CALCUL DES SOLLICITATIONS

E.1- Charges permanentes

Les charges permanentes seront évaluées pour 1 m de largeur de dalot

➤ Sur le tablier

- Poids propre du tablier : $e_1 \times 25 \times b = 0,30 \times 25 \times 1 = 7,50 \text{ KN/ml}$
- Poids du remblai : $e \times \gamma_d \times b = 0,50 \times 20 \times 1 = 10 \text{ KN/ml}$
- Poids propre des guides roues :

$$e \times h \times 25 \times L \times 2 / (L_r + 2 \times e) = \frac{0,30 \times 0,80 \times 25 \times 13,20 \times 2}{7 + 2 \times 0,30} = 20,84 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Charge permanente totale sur le tablier : } P_1 = 7,50 + 10 + 20,84 = \mathbf{38,34 \text{ KN/ml}}$$

➤ Sur le radier

- Poids propre du radier : $e_1 \times 25 \times b = 0,30 \times 25 \times 1 = 7,50 \text{ KN/ml}$
- Poids propre des piédroits :

$$e_1 \times H \times 25 \times 1 \times \frac{4}{3 \times l + 4 \times e_1} = 0,30 \times 4 \times 25 \times 1 \times \frac{4}{3 \times 4 + 4 \times 0,30} = 9,1 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Charge permanente totale sur le radier : } P_2 = 7,50 + 9,1 = \mathbf{16,60 \text{ KN/ml}}$$

➤ Poussée du remblai sur un piédroit uniquement = P_t

$$P_t = K_a \times \rho_t \times h$$

Avec $K_a = 0,333 = \text{coefficient de poussée des terres}$

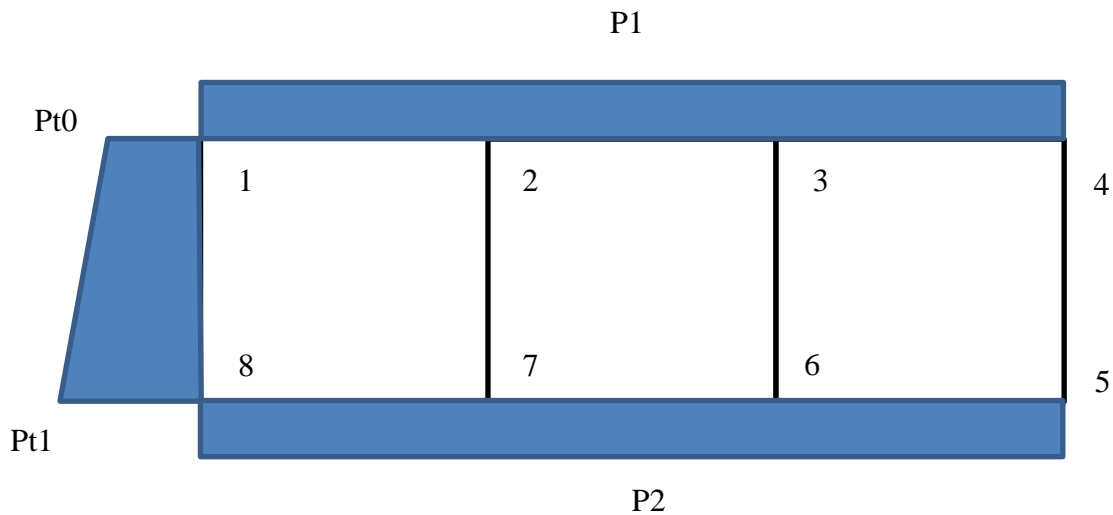
$\rho_t = 20 \text{ KN/m}^3 = \text{poids volumique de la terre}$

$h = \text{hauteur du remblai par rapport au point considéré}$

$$P(h = 0) = P_{t0} = 0,333 \times 20 \times 0 = 0 \text{ KN/m}^2$$

$$P(h = 4,80) = P_{t1} = 0,333 \times 20 \times 4,80 = 31,97 \text{ KN/m}^2$$

Les charges permanentes sur l'ouvrage se présentent donc comme suit :



Les moments d'encastrement pour 1 m de largeur de dalot sont :

$$m_{1,2} = -P_1 \times \frac{L^2}{12} = -38,34 \times \frac{(4)^2}{12} = -51,12 \text{ KN.m}$$

$$m_{2,1} = -m_{1,2} = 51,12 \text{ KN.m}$$

$$m_{2,3} = m_{1,2} = -51,12 \text{ KN.m}$$

$$m_{3,2} = -m_{2,3} = 51,12 \text{ KN.m}$$

$$m_{3,4} = m_{1,2} = -51,12 \text{ KN.m}$$

$$m_{4,3} = -m_{3,4} = 51,12 \text{ KN.m}$$

$$m_{5,6} = -P_2 \times \frac{L^2}{12} = -16,60 \times \frac{(4)^2}{12} = -22,13 \text{ KN.m}$$

$$m_{6,5} = -m_{5,6} = 22,13 \text{ KN.m}$$

$$m_{6,7} = m_{5,6} = -22,13 \text{ KN.m}$$

$$m_{7,6} = -m_{6,7} = 22,13 \text{ KN.m}$$



$$m_{7,8} = m_{5,6} = -22,13 \text{ KN.m}$$

$$m_{8,7} = -m_{7,8} = 22,13 \text{ KN.m}$$

$$m_{8,1} = -(P_{t1} - P_{t0}) \times \frac{H^2}{20} - P_{t0} \times \frac{H^2}{12} = -(31,97 - 0) \times \frac{4^2}{20} - 0 \times \frac{4^2}{12}$$

$$m_{8,1} = -25,58 \text{ KN.m}$$

$$m_{1,8} = (P_{t1} - P_{t0}) \times \frac{H^2}{30} + P_{t0} \times \frac{H^2}{12} = (31,97 - 0) \times \frac{4^2}{30} + 0 \times \frac{4^2}{12}$$

$$m_{1,8} = 17,05 \text{ KN.m}$$

$$m_{2,7} = m_{7,2} = m_{3,6} = m_{6,3} = m_{4,5} = m_{5,4} = 00,00 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{1,2} + m_{1,8}) = b_1 = -(-51,12 + 17,05) = 34,07 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{2,1} + m_{2,3} + m_{2,7}) = b_2 = -(51,12 - 51,12 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{3,2} + m_{3,4} + m_{3,6}) = b_3 = -(51,12 - 51,12 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{4,3} + m_{4,5}) = b_4 = -(51,12 + 0) = -51,12 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{5,4} + m_{5,6}) = b_5 = -(0 - 22,13) = 22,13 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{6,5} + m_{6,7} + m_{6,3}) = b_6 = -(22,13 - 22,13 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{7,6} + m_{7,8} + m_{7,2}) = b_7 = -(22,13 - 22,13 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{8,7} + m_{8,1}) = b_8 = -(22,13 - 25,58) = 3,45 \text{ KN.m}$$

La résolution du système d'équations obtenu donne :

$$a_1 = 8,21914. 10^{-7}$$

$$a_2 = -2,03079. 10^{-7}$$

$$a_3 = 3,01485. 10^{-7}$$

$$a_4 = -1,39355. 10^{-6}$$

$$a_5 = 8,77168. 10^{-7}$$

$$a_6 = -2,12288. 10^{-7}$$

$$a_7 = 9,50755. 10^{-8}$$

$$a_8 = -1,55086. 10^{-7}$$

Nous déduisons alors les moments

$$M_{1,2} = -41,5941 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{1,8} = 50,3641 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{2,1} = 63,1852 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{2,3} = -59,5673 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{2,7} = -3,6179 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{3,2} = 63,0007 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{3,4} = -67,5444 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{3,6} = 4,5436 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{4,3} = 29,4424 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{4,5} = -22,2124 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{5,4} = 4,1960 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{5,6} = -7,6460 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{6,5} = 30,8436 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{6,7} = -29,4121 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{6,3} = -1,4315 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{7,6} = 25,3225 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{7,8} = -25,1722 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{7,2} = -0,1503 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{8,7} = 23,0784 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{8,1} = -35,6184 \text{ KN.m/ml}$$

Les moments isostatiques au milieu des travées du tablier, du radier et piédroits sont :

$$\text{Tablier : } M_{0t} = \frac{P_1 \times L^2}{8} = \frac{38,34 \times 4^2}{8} = 76,68 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Radier : } M_{0r} = -\frac{P_2 \times L^2}{8} = -\frac{16,60 \times 4^2}{8} = -33,20 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Piédroit : } M_{0p} = \frac{P_{t0} \times H^2}{8} + \frac{(P_{t1} - P_{t0}) \times H^2}{16} = \frac{0 \times 4^2}{8} + \frac{(31,97 - 0) \times 4^2}{16} = 31,97 \text{ KN.m/ml}$$

Les moments maximum en travées et sur appuis sont donc :

Tablier :

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } M_{agt} = M_{1,2} = -41,5941 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adt} = -M_{2,1} = -63,1852 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-41,5941 - 63,1852)}{2} + 76,68 = 24,29 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } M_{agt} = M_{2,3} = -59,5673 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adt} = -M_{3,2} = -63,0007 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-59,5673 - 63,0007)}{2} + 76,68 = 15,40 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } M_{agt} = M_{3,4} = -67,5444 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adt} = -M_{4,3} = -29,4424 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-67,5444 - 29,4424)}{2} + 76,68 = 28,19 \text{ KN.m/ml}$$

Radier :

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } M_{agr} = M_{8,7} = 23,0784 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adr} = -M_{7,8} = 25,1722 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tr} = \frac{(M_{agr} + M_{adr})}{2} + M_{0r} = \frac{(23,0784 + 25,1722)}{2} - 33,20 = -9,07 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } M_{agr} = M_{7,6} = 25,3225 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adr} = -M_{6,7} = 29,4121 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tr} = \frac{(M_{agr} + M_{adr})}{2} + M_{0r} = \frac{(25,3225 + 29,4121)}{2} - 33,20 = -5,83 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } M_{agr} = M_{6,5} = 30,8436 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adr} = -M_{5,6} = 7,6460 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tr} = \frac{(M_{agr} + M_{adr})}{2} + M_{or} = \frac{(30,8436 + 7,6460)}{2} - 33,20 = -13,95 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit extrême gauche

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{8.1} = -35,6184 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{1.8} = -50,3641 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip} + M_{asp})}{2} + M_{op} = \frac{(-35,6184 - 50,3641)}{2} + 31,97 = -11,02 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit intérieur 1

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{7.2} = -0,1503 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{2.7} = 3,6179 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip} + M_{asp})}{2} = \frac{(-0,1503 + 3,6179)}{2} = 1,73 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit intérieur 2

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{6.3} = -1,4315 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{3.6} = -4,5436 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip} + M_{asp})}{2} = \frac{(-1,4315 - 4,5436)}{2} = -2,99 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit extrême droit

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{5,4} = 4,1960 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{4,5} = 22,2124 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip} + M_{asp})}{2} = \frac{(4,1960 + 22,2124)}{2} = 13,20 \text{ KN.m/ml}$$

Les réactions à chaque appui sont :

Tablier

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P_1 \times L}{2} = \frac{(-63,1852 + 41,5941)}{4} + \frac{38,34 \times 4}{2} = 71,28 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P_1 \times L}{2} = \frac{(-41,5941 + 63,1852)}{4} + \frac{38,34 \times 4}{2} = 82,08 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P_1 \times L}{2} = \frac{(-63,0007 + 59,5673)}{4} + \frac{38,34 \times 4}{2} = 75,82 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P_1 \times L}{2} = \frac{(-59,5673 + 63,0007)}{4} + \frac{38,34 \times 4}{2} = 77,54 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P_1 \times L}{2} = \frac{(-29,4424 + 67,5444)}{4} + \frac{38,34 \times 4}{2} = 86,20 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P_1 \times L}{2} = \frac{(-67,5444 + 29,4424)}{4} + \frac{38,34 \times 4}{2} = 67,15 \text{ KN/ml}$$

Radier

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } R_{agr} = \frac{(M_{adr} - M_{agr})}{L} - \frac{P_2 \times L}{2} = \frac{(25,1722 - 23,0784)}{4} - \frac{16,60 \times 4}{2} = -32,68 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adr} = \frac{(M_{agr} - M_{adr})}{L} - \frac{P_2 \times L}{2} = \frac{(23,0784 - 25,1722)}{4} - \frac{16,60 \times 4}{2} = -33,72 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } R_{agr} = \frac{(M_{adr} - M_{agr})}{L} - \frac{P_2 \times L}{2} = \frac{(29,4121 - 25,3225)}{4} - \frac{16,60 \times 4}{2} = -32,18 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adr} = \frac{(M_{agr} - M_{adr})}{L} - \frac{P_2 \times L}{2} = \frac{(25,3225 - 29,4121)}{4} - \frac{16,60 \times 4}{2} = -34,22 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } R_{agr} = \frac{(M_{adr} - M_{agr})}{L} - \frac{P_2 \times L}{2} = \frac{(7,6460 - 30,8436)}{4} - \frac{16,60 \times 4}{2} = -39,00 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adr} = \frac{(M_{agr} - M_{adr})}{L} - \frac{P_2 \times L}{2} = \frac{(30,8436 - 7,6460)}{4} - \frac{16,60 \times 4}{2} = -27,40 \text{ KN/ml}$$

Les efforts de compression à prendre en compte dans les piédroits sont :

$$\text{Piédroit extrême gauche } P_{extg} = R_{agt} - R_{agr} = 71,28 + 32,68 = 103,96 \text{ KN/ml}$$

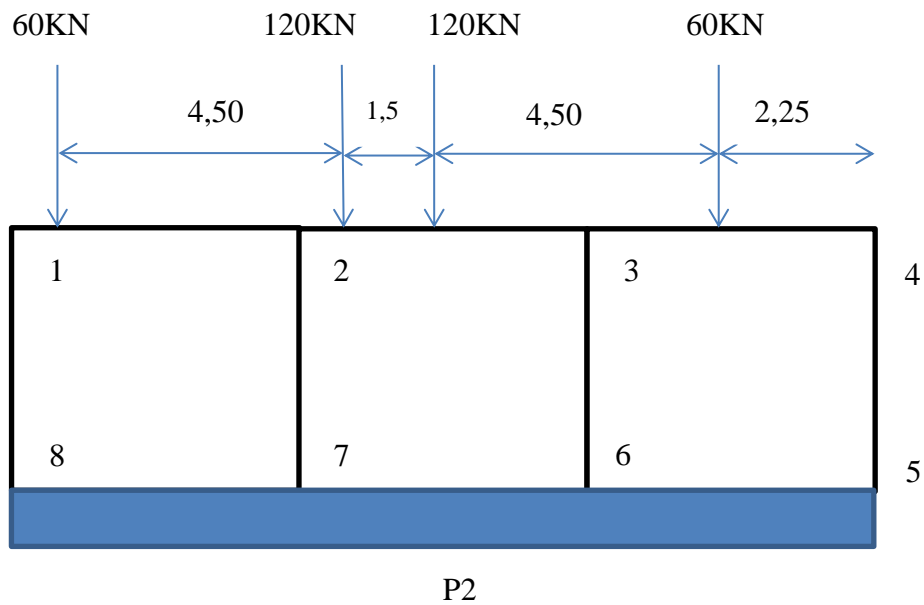
$$\text{Piédroit intérieur 1 } P_{int1} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (82,08 + 33,72) = 231,6 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Piédroit intérieur 2 } P_{int2} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (77,54 + 34,22) = 223,52 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Piédroit extrême droit } P_{extd} = R_{agt} - R_{agr} = 86,20 + 39,00 = 125,20 \text{ KN/ml}$$

E.2 – Charges routières

E.2.1- Sous-système Bc



Dans le cas des surcharges routières du système Bc, le cas le plus défavorable est celui où l'on se retrouve avec les huit roues de nos deux files de camions sur la même travée. Pour le calcul de nos différents moments, nous allons transformer ces charges les plus défavorables en charge de surface. Le schéma ci-dessous nous montre une disposition des roues des deux files de camions sur une travée.

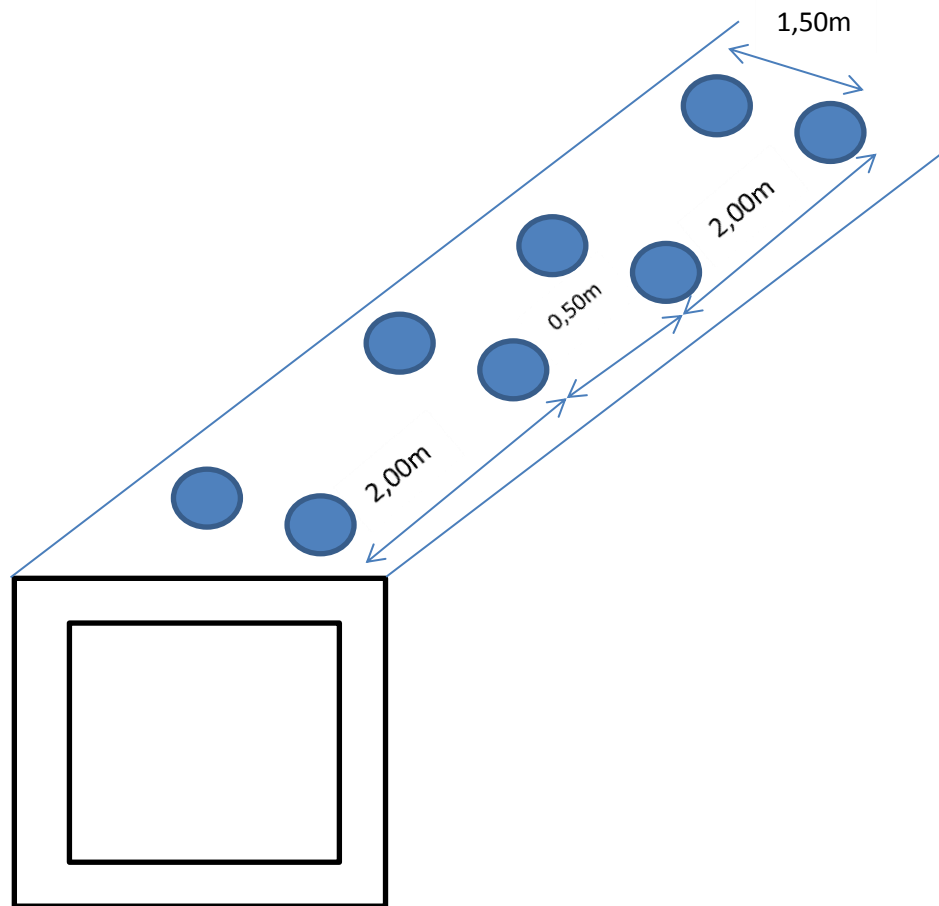


Fig x : Représentation de la répartition
des charges routières sur une travée

Le coefficient bc en fonction de la classe de notre ouvrage et du nombre de voies de notre route est égal à 1,10.

- La charge répartie par mètre linéaire est de :

- Sur le tablier

$$P_1 = \frac{Q \times b_c}{S_{encomb}}$$

$$P_1 = \frac{8 \times 60KN \times 1,10 \times 1m}{2,50m \times 5,50m} = 38,40KN/ml$$

- Sur le radier

$$p_1 = \frac{(120KN + 120KN + 60KN + 60KN) \times 2 \times 1,10 \times 1m}{13,20m \times 7m} = 8,57KN/ml$$

- Sur un piédroit uniquement (piédroit gauche)

$$p_t = 1,20 \times p_0 \times b_c \times 1m = 1,20 \times 10 KN/m^2 \times 1,10 \times 1m = 13,20KN/ml$$

$$p_{t0} = p_{t1} = 13,20KN/ml$$

- Le coefficient de majoration dynamique est de :

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2L} + \frac{0,6}{1 + 4\frac{G}{Q}}$$

Avec L=Max (Largeur roulable ; portée de la travée)

G=Poids total d'une section de couverture de longueur L et toute la largeur relative à cette couverture et aux éléments reposant sur elle.

Q=Poids total maximum des essieux du système (Bc ou Bt) qu'il est possible de placer sur la longueur L.

$$L = \text{Max}(7; 4) = 7m$$

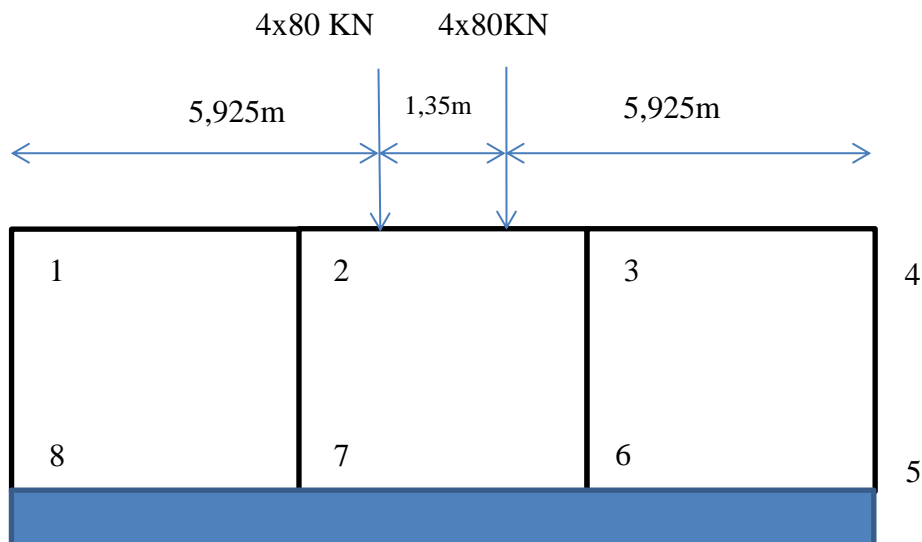
$G = \text{Poids propre du tablier} + \text{accessoires}$

$$G = (25 \times 0,3 \times 7 \times 4) + (20 \times 0,50 \times 7 \times 4) + \left(\frac{25 \times 0,3 \times 0,8 \times 7 \times 2}{7 + 2 \times 0,3} \right) = 501,05 \text{ KN}$$

$$Q = 480 \text{ KN}$$

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \times 7} + \frac{0,6}{1 + 4 \frac{501,05}{480}} = 1,40$$

E.2.2- Sous-système Bt



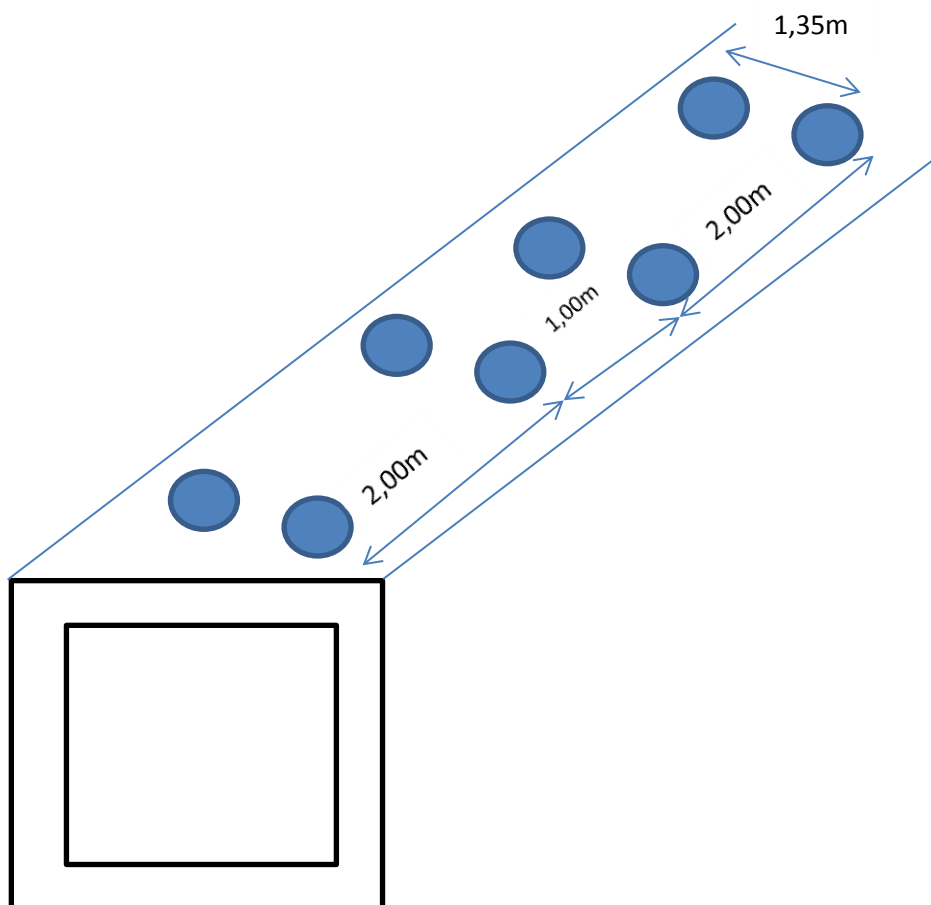


Fig x : Représentation de la répartition des charges routières sur une travée

Le coefficient b_t en fonction de la classe de notre ouvrage et du nombre de voies de notre route est égal à 1.

- La charge répartie est de :

- Sur le tablier

$$P_1 = \frac{Q \times b_t}{S_{encomb}}$$

$$P_1 = \frac{8 \times 80 \text{KN} \times 1 \times 1 \text{m}}{2,35 \text{m} \times 6 \text{m}} = 45,39 \text{KN/ml}$$

➤ Sur le radier

$$p_1 = \frac{(2 \times 80 \text{KN} + 2 \times 80) \times 2 \times 1 \times 1 \text{m}}{13,20 \text{m} \times 7 \text{m}} = 6,93 \text{KN/ml}$$

➤ Sur un piédroit uniquement (piédroit gauche)

$$P_t = 1,20 \times p_0 \times 1 \times 1 \text{m} = 1,20 \times 10 \text{KN/m}^2 \times 1 \times 1 \text{m} = 12 \text{KN/ml}$$

$$P_{t0} = P_{t1} = 12 \text{KN/ml}$$

• Le coefficient de majoration dynamique est de :

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2L} + \frac{0,6}{1 + 4 \frac{G}{Q}}$$

$$L = 7 \text{m}$$

$$G = 501,05 \text{KN}$$

$$Q = 640 \text{KN}$$

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \times 7} + \frac{0,6}{1 + 4 \frac{501,05}{640}} = 1,31$$

Pour le calcul des sollicitations, on prendra $\delta = \text{Max}(\delta_{BC}; \delta_{Bt}) = \delta_{BC} = 1,40$

E.2.3- Calcul des sollicitations

E.2.3.1- Sous-système Bc

- Sur le tablier

La charge s'appliquant par mètre linéaire est de :

$$P = \delta \times P_1 = 1,40 \times 38,40 = 53,76 \text{ KN/ml}$$

- Sur le radier

La charge s'appliquant par mètre linéaire est de :

$$p = \delta \times p_1 = 1,40 \times 8,57 = 12 \text{ KN/ml}$$

- Sur un piédroit uniquement (piédroit gauche)

$$P_t = \delta \times p_t = 1,40 \times 13,20 = 18,48 \text{ KN/ml}$$

$$P_{t0} = P_{t1} = 18,48 \text{ KN/ml}$$

Les moments d'encastres sont :

$$m_{1,2} = -P \times \frac{L^2}{12} = -53,76 \times \frac{(4)^2}{12} = -71,68 \text{ KN.m}$$

$$m_{2,1} = -m_{1,2} = 71,68 \text{ KN.m}$$

$$m_{2,3} = m_{1,2} = -71,68 \text{ KN.m}$$

$$m_{3,2} = -m_{2,3} = 71,68 \text{ KN.m}$$

$$m_{3,4} = m_{1,2} = -71,68 \text{ KN.m}$$

$$m_{4,3} = -m_{3,4} = 71,68 \text{ KN.m}$$

$$m_{5,6} = -p \times \frac{L^2}{12} = -12 \times \frac{(4)^2}{12} = -16 \text{ KN.m}$$

$$m_{6,5} = -m_{5,6} = 16 \text{ KN.m}$$

$$m_{6,7} = m_{5,6} = -16 \text{ KN.m}$$

$$m_{7,6} = -m_{6,7} = 16 \text{ KN.m}$$

$$m_{7,8} = m_{5,6} = -16 \text{ KN.m}$$

$$m_{8,7} = -m_{7,8} = 16 \text{ KN.m}$$

$$m_{8,1} = -(P_{t1} - P_{t0}) \times \frac{H^2}{20} - P_{t0} \times \frac{H^2}{12} = -(18,48 - 18,48) \times \frac{4^2}{20} - 18,48 \times \frac{4^2}{12}$$

$$m_{8,1} = -24,64 \text{ KN.m}$$

$$m_{1,8} = (P_{t1} - P_{t0}) \times \frac{H^2}{30} + P_{t0} \times \frac{H^2}{12} = (18,48 - 18,48) \times \frac{4^2}{30} + 18,48 \times \frac{4^2}{12}$$

$$m_{1,8} = 24,64 \text{ KN.m}$$

$$m_{2,7} = m_{7,2} = m_{3,6} = m_{6,3} = m_{4,5} = m_{5,4} = 00,00 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{1,2} + m_{1,8}) = b_1 = -(-71,68 + 24,64) = 47,04 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{2,1} + m_{2,3} + m_{2,7}) = b_2 = -(71,68 - 71,68 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{3,2} + m_{3,4} + m_{3,6}) = b_3 = -(71,68 - 71,68 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{4,3} + m_{4,5}) = b_4 = -(71,68 + 0) = -71,68 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{5,4} + m_{5,6}) = b_5 = -(0 - 16) = 16 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{6,5} + m_{6,7} + m_{6,3}) = b_6 = -(16 - 16 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{7,6} + m_{7,8} + m_{7,2}) = b_7 = -(16 - 16 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{8,7} + m_{8,1}) = b_8 = -(16 - 24,64) = 8,64 \text{ KN.m}$$

La résolution du système d'équations obtenu donne :

$$a_1 = 1,10693. 10^{-6}$$

$$a_2 = -2,66616. 10^{-7}$$

$$a_3 = 3,91243. 10^{-7}$$

$$a_4 = -1,85469. 10^{-6}$$

$$a_5 = 8,64149. 10^{-7}$$

$$a_6 = -2,26153. 10^{-7}$$

$$a_7 = 1,01526E. 10^{-8}$$

$$a_8 = -1,16387. 10^{-8}$$

Nous déduisons alors les moments

$$M_{1,2} = -35,7036 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{1,8} = 57,4436 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{2,1} = 65,0221 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{2,3} = -60,0013 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{2,7} = -5,0207 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{3,2} = 64,3496 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{3,4} = -70,8197 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{3,6} = 6,4702 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{4,3} = 19,7600 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{4,5} = -33,0900 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{5,4} = -1,4699 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{5,6} = -8,1100 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{6,5} = 30,3697 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{6,7} = -29,6596 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{6,3} = -0,7102 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{7,6} = 25,3113 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{7,8} = -24,5721 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{7,2} = -0,7392 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{8,7} = 24,0536 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{8,1} = -31,4036 \text{ KN.m/ml}$$

Les moments isostatiques au milieu des travées du tablier, du radier et piédroits sont :

$$\text{Tablier : } M_{0t} = \frac{P \times L^2}{8} = \frac{53,76 \times 4^2}{8} = 107,52 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Radier : } M_{0r} = -\frac{p \times L^2}{8} = -\frac{12 \times 4^2}{8} = -24 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Piédroit : } M_{0p} = \frac{P_{t0} \times H^2}{8} + \frac{(P_{t1} - P_{t0}) \times H^2}{16} = \frac{18,48 \times 4^2}{8} + \frac{0 \times 4^2}{16} = 36,96 \text{ KN.m/ml}$$

Les moments maximum en travées et sur appuis sont donc :

Tablier :

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } M_{agt} = M_{1.2} = -35,7036 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adt} = -M_{2.1} = -65,0221 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-35,7036 - 65,0221)}{2} + 107,52 = 57,16 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } M_{agt} = M_{2.3} = -60,0013 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adt} = -M_{3.2} = -64,3496 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-60,0013 - 64,3496)}{2} + 107,52 = 45,34 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } M_{agt} = M_{3.4} = -70,8197 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adt} = -M_{4.3} = -19,7600 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$\begin{aligned} M_{tt} &= \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-70,8197 - 19,7600)}{2} + 107,52 \\ &= 62,23 \text{ KN.m/ml} \end{aligned}$$

Radier :

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } M_{agr} = M_{8,7} = 24,0536 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adr} = -M_{7,8} = 24,5721 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tr} = \frac{(M_{agr} + M_{adr})}{2} + M_{0r} = \frac{(24,0536 + 24,5721)}{2} - 24 = 0,31 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } M_{agr} = M_{7,6} = 25,3113 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adr} = -M_{6,7} = 29,6596 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tr} = \frac{(M_{agr} + M_{adr})}{2} + M_{0r} = \frac{(25,3113 + 29,6596)}{2} - 24 = 3,48 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } M_{agr} = M_{6,5} = 30,3697 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adr} = -M_{5,6} = 8,1100 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tr} = \frac{(M_{agr} + M_{adr})}{2} + M_{0r} = \frac{(30,3697 + 8,1100)}{2} - 24 = -4,76 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit extrême gauche

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{8.1} = -31,4036 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{1.8} = -57,4436 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip} + M_{asp})}{2} + M_{0p} = \frac{(-31,4036 - 57,4436)}{2} + 36,96 = -7,46 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit intérieur 1

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{7.2} = -0,7392 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{2.7} = 5,0207 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip} + M_{asp})}{2} = \frac{(-0,7392 + 5,0207)}{2} = 2,14 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit intérieur 2

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{6.3} = -0,7102 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{3.6} = -6,4702 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip} + M_{asp})}{2} = \frac{(-0,7102 - 6,4702)}{2} = -3,59 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit extrême droit

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{5.4} = -1,4699 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{4.5} = 33,0900 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip} + M_{asp})}{2} = \frac{(-1,4699 + 33,0900)}{2} = 15,81 \text{ KN.m/ml}$$

Les réactions à chaque appui sont :

Tablier

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-65,0221 + 35,7036)}{4} + \frac{53,76 \times 4}{2} = 100,19 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P_1 \times L}{2} = \frac{(-35,7036 + 65,0221)}{4} + \frac{53,76 \times 4}{2} = 114,85 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-64,3496 + 60,0013)}{4} + \frac{53,76 \times 4}{2} = 106,43 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-60,0013 + 64,3496)}{4} + \frac{53,76 \times 4}{2} = 108,61 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-19,7600 + 70,8197)}{4} + \frac{53,76 \times 4}{2} = 120,28 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-70,8197 + 19,7600)}{4} + \frac{53,76 \times 4}{2} = 94,75 \text{ KN/ml}$$

Radier

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } R_{agr} = \frac{(M_{adr} - M_{agr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(24,5721 - 24,0536)}{4} - \frac{12 \times 4}{2} = -23,87 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adr} = \frac{(M_{agr} - M_{adr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(24,0536 - 24,5721)}{4} - \frac{12 \times 4}{2} = -24,13 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } R_{agr} = \frac{(M_{adr} - M_{agr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(29,6596 - 25,3113)}{4} - \frac{12 \times 4}{2} = -22,91 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adr} = \frac{(M_{agr} - M_{adr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(25,3113 - 29,6596)}{4} - \frac{12 \times 4}{2} = -25,09 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } R_{agr} = \frac{(M_{adr} - M_{agr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(8,1100 - 30,3697)}{4} - \frac{12 \times 4}{2} = -29,56 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adr} = \frac{(M_{agr} - M_{adr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(30,3697 - 8,1100)}{4} - \frac{12 \times 4}{2} = -18,43 \text{ KN/ml}$$

Les efforts de compression à prendre en compte dans les piédroits sont :

$$\text{Piédroit extrême gauche } P_{extg} = R_{agt} - R_{agr} = 100,19 + 23,87 = 124,06 \text{ KN/ml}^2$$

$$\text{Piédroit intérieur 1 } P_{int1} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (114,85 + 24,13) = 277,96 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Piédroit intérieur 2 } P_{int1} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (108,61 + 25,09) = 267,40 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Piédroit extrême droit } P_{extd} = R_{agt} - R_{agr} = 120,28 + 29,56 = 149,84 \text{ KN/ml}$$

E.2.3.2- Sous-système Bt

➤ Sur le tablier

La charge s'appliquant par mètre linéaire est de :

$$P = \delta \times P_1 = 1,40 \times 45,39 = 63,55 \text{ KN/ml}$$

➤ Sur le radier

La charge s'appliquant par mètre linéaire est de :

$$p = \delta \times p_1 = 1,40 \times 6,93 = 9,70 \text{ KN/ml}$$

- Sur un piédroit uniquement (piédroit gauche)

$$P_t = \delta \times p_t = 1,40 \times 12 = 16,80 \text{ KN/ml}$$

$$P_{t0} = P_{t1} = 16,80 \text{ KN/ml}$$

Les moments d'encastrement sont :

$$m_{1,2} = -P \times \frac{L^2}{12} = -63,55 \times \frac{(4)^2}{12} = -84,73 \text{ KN.m}$$

$$m_{2,1} = -m_{1,2} = 84,73 \text{ KN.m}$$

$$m_{2,3} = m_{1,2} = -84,73 \text{ KN.m}$$

$$m_{3,2} = -m_{2,3} = 84,73 \text{ KN.m}$$

$$m_{3,4} = m_{1,2} = -84,73 \text{ KN.m}$$

$$m_{4,3} = -m_{3,4} = 84,73 \text{ KN.m}$$

$$m_{5,6} = -p \times \frac{L^2}{12} = -9,70 \times \frac{(4)^2}{12} = -12,93 \text{ KN.m}$$

$$m_{6,5} = -m_{5,6} = 12,93 \text{ KN.m}$$

$$m_{6,7} = m_{5,6} = -12,93 \text{ KN.m}$$

$$m_{7,6} = -m_{6,7} = 12,93 \text{ KN.m}$$

$$m_{7,8} = m_{5,6} = -12,93 \text{ KN.m}$$

$$m_{8,7} = -m_{7,8} = 12,93 \text{ KN.m}$$

$$m_{8,1} = -(P_{t1} - P_{t0}) \times \frac{H^2}{20} - P_{t0} \times \frac{H^2}{12} = -(16,80 - 16,80) \times \frac{4^2}{20} - 16,80 \times \frac{4^2}{12}$$

$$m_{8,1} = -22,4 \text{ KN.m}$$

$$m_{1.8} = (P_{t1} - P_{t0}) \times \frac{H^2}{30} + P_{t0} \times \frac{H^2}{12} = (16,80 - 16,80) \times \frac{4^2}{30} + 16,80 \times \frac{4^2}{12}$$

$$m_{1.8} = 22,4 \text{ KN.m}$$

$$m_{2.7} = m_{7.2} = m_{3.6} = m_{6.3} = m_{4.5} = m_{5.4} = 00,00 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{1.2} + m_{1.8}) = b_1 = -(-84,73 + 22,4) = 62,33 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{2.1} + m_{2.3} + m_{2.7}) = b_2 = -(84,73 - 84,73 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{3.2} + m_{3.4} + m_{3.6}) = b_3 = -(84,73 - 84,73 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{4.3} + m_{4.5}) = b_4 = -(84,73 + 0) = -84,73 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{5.4} + m_{5.6}) = b_5 = -(0 - 12,93) = 12,93 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{6.5} + m_{6.7} + m_{6.3}) = b_6 = -(12,93 - 12,93 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{7.6} + m_{7.8} + m_{7.2}) = b_7 = -(12,93 - 12,93 + 0) = 0 \text{ KN.m}$$

$$-(m_{8.7} + m_{8.1}) = b_8 = -(12,93 - 22,4) = 9,47 \text{ KN.m}$$

La résolution du système d'équations obtenu donne :

$$a_1 = 1,47535. 10^{-6}$$

$$a_2 = -3,4394. 10^{-7}$$

$$a_3 = 4,57237. 10^{-7}$$

$$a_4 = -2,15513. 10^{-6}$$

$$a_5 = 8,77815. 10^{-7}$$

$$a_6 = -2,44351. 10^{-7}$$

$$a_7 = 1,31054. 10^{-7}$$

$$a_8 = -1,98032. 10^{-7}$$

Nous déduisons alors les moments

$$M_{1,2} = -28,0334 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{1,8} = 65,0634 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{2,1} = 67,5082 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{2,3} = -61,0324 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{2,7} = -6,4759 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{3,2} = 64,9853 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{3,4} = -72,7788 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{3,6} = 7,7935 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{4,3} = 13,5393 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{4,5} = -39,9193 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{5,4} = -4,6462 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{5,6} = -8,0038 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{6,5} = 30,1054 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{6,7} = -29,7394 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{6,3} = -0,3659 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{7,6} = 25,7865 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{7,8} = -24,8348 \text{ KN. m/ml}$$

$$M_{7,2} = -0,9517 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{8,7} = 22,4979 \text{ KN.m/ml}$$

$$M_{8,1} = -29,0179 \text{ KN.m/ml}$$

Les moments isostatiques au milieu des travées du tablier, du radier et piédroits sont :

Tablier :
$$M_{0t} = \frac{P \times L^2}{8} = \frac{63,55 \times 4^2}{8} = 127,10 \text{ KN.m/ml}$$

Radier :
$$M_{0r} = -\frac{p \times L^2}{8} = -\frac{9,70 \times 4^2}{8} = -19,40 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit :
$$M_{0p} = \frac{P_{t0} \times H^2}{8} + \frac{(P_{t1} - P_{t0}) \times H^2}{16} = \frac{16,80 \times 4^2}{8} + \frac{0 \times 4^2}{16} = 33,60 \text{ KN.m/ml}$$

Les moments maximum en travées et sur appuis sont donc :

Tablier :

➤ Travée 1

Appui gauche :
$$M_{agt} = M_{1,2} = -28,0334 \text{ KN.m/ml}$$

Appui droit :
$$M_{adt} = -M_{2,1} = -67,5082 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-28,0334 - 67,5082)}{2} + 127,10 = 79,33 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 2

Appui gauche :
$$M_{agt} = M_{2,3} = -61,0324 \text{ KN.m/ml}$$

Appui droit :
$$M_{adt} = -M_{3,2} = -64,9853 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-61,0324 - 64,9853)}{2} + 127,10 = 64,09 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } M_{agt} = M_{3,4} = -72,7788 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adt} = -M_{4,3} = -13,5393 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-72,7788 - 13,5393)}{2} + 127,10 \\ = 105,52 \text{ KN.m/ml}$$

Radier :

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } M_{agr} = M_{8,7} = 22,4979 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adr} = -M_{7,8} = 24,8348 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tr} = \frac{(M_{agr} + M_{adr})}{2} + M_{0r} = \frac{(22,4979 + 24,8348)}{2} - 19,40 = 4,27 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } M_{agr} = M_{7,6} = 25,7865 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adr} = -M_{6,7} = 29,7394 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tr} = \frac{(M_{agr}+M_{adr})}{2} + M_{Or} = \frac{(25,7865+29,7394)}{2} - 19,40 = 8,36 \text{ KN.m/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } M_{agr} = M_{6,5} = 30,1054 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adr} = -M_{5,6} = 8,0038 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tr} = \frac{(M_{agr}+M_{adr})}{2} + M_{Or} = \frac{(30,1054+8,0038)}{2} - 19,40 = -0,34 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit extrême gauche

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{8,1} = -29,0179 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{1,8} = -65,0634 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip}+M_{asp})}{2} + M_{Op} = \frac{(-29,0179-65,0634)}{2} + 33,60 = -13,44 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit intérieur 1

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{7,2} = -0,9517 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{2,7} = 6,4759 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip}+M_{asp})}{2} = \frac{(-0,9517+6,4759)}{2} = 2,76 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit intérieur 2

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{6,3} = -0,3659 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{3,6} = 7,7935 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip} + M_{asp})}{2} = \frac{(-0,3659 - 7,7935)}{2} = -4,08 \text{ KN.m/ml}$$

Piédroit extrême droit

$$\text{Appui inférieur : } M_{aip} = M_{5,4} = -4,6462 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Appui supérieur : } M_{asp} = -M_{4,5} = 39,9193 \text{ KN.m/ml}$$

Au milieu de la travée :

$$M_{tp} = \frac{(M_{aip} + M_{asp})}{2} = \frac{(-4,6462 + 39,9193)}{2} = 17,64 \text{ KN.m/ml}$$

Les réactions à chaque appui sont :

Tablier

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-67,5082 + 28,0334)}{4} + \frac{63,55 \times 4}{2} = 117,23 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-28,0334 + 67,5082)}{4} + \frac{63,55 \times 4}{2} = 136,97 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-64,9853 + 61,0324)}{4} + \frac{63,55 \times 4}{2} = 126,11 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-61,0324 + 64,9853)}{4} + \frac{63,55 \times 4}{2} = 128,09 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-13,5393 + 72,7788)}{4} + \frac{63,55 \times 4}{2} = 141,91 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P \times L}{2} = \frac{(-72,7788 + 13,5393)}{4} + \frac{63,55 \times 4}{2} = 112,29 \text{ KN/ml}$$

Radier

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } R_{agr} = \frac{(M_{adr} - M_{agr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(24,8348 - 22,4979)}{4} - \frac{9,70 \times 4}{2} = -18,81 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adr} = \frac{(M_{agr} - M_{adr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(22,4979 - 24,8348)}{4} - \frac{9,70 \times 4}{2} = -19,98 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } R_{agr} = \frac{(M_{adr} - M_{agr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(29,7394 - 25,7865)}{4} - \frac{9,70 \times 4}{2} = -18,41 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adr} = \frac{(M_{agr} - M_{adr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(25,7865 - 29,7394)}{4} - \frac{9,70 \times 4}{2} = -20,39 \text{ KN/ml}$$

➤ Travée 3

$$\text{Appui gauche : } R_{agr} = \frac{(M_{adr} - M_{agr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(8,0038 - 30,1054)}{4} - \frac{9,70 \times 4}{2} = -24,92 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adr} = \frac{(M_{agr} - M_{adr})}{L} - \frac{p \times L}{2} = \frac{(30,1054 - 8,0038)}{4} - \frac{9,70 \times 4}{2} = -13,87 \text{ KN/ml}$$

Les efforts de compression à prendre en compte dans les piédroits sont :

$$\text{Piédroit extrême gauche } P_{extg} = R_{agt} - R_{agr} = 117,23 + 18,81 = 136,04 \text{ KN/ml}^2$$

$$\text{Piédroit intérieur 1 } P_{int1} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (136,97 + 19,98) = 313,90 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Piédroit intérieur 2 } P_{int1} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (128,09 + 20,39) = 296,96 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Piédroit extrême droit } P_{extd} = R_{agt} - R_{agr} = 141,91 + 24,92 = 166,83 \text{ KN/ml}$$

E.2.4- Récapitulatif des sollicitations

Pour une uniformisation des aciers dans les différentes parties de l'ouvrage ainsi que pour une facilité de mise en œuvre, nous avons décidé de prendre les moments maximaux en travée et sur appuis ainsi que les efforts normaux maximaux pour le calcul de nos sections d'armature.

PARTIE D'OUVRAGE	Sollicitations KN.m/ml et KN/ml		Charges permanentes G	Système Bc	Système Bt
TABLIER	Moment fléchissant	à gauche	-67,5444	-70,8197	-72,7788
		à droite	-63,1852	-65,0221	-67,5082
		au milieu	28,19	62,23	105,52
RADIER	Moment fléchissant	à gauche	30,8436	30,3697	30,1054
		à droite	29,4121	29,6596	29,7394
		au milieu	-13,95	-4,76	8,36
PIEDROITS EXTREMES	Moment fléchissant	Inférieur	-35,6184	-31,4036	-29,0179
		Supérieur	-50,3641	-57,4436	-65,0634
		Milieu	13,20	15,81	17,64
	Effort normal		125,20	149,84	166,83
PIEDROITS INTERIEURS	Moment fléchissant	Inférieur	-1,4315	-0,7392	-0,9517
		Supérieur	-4,5436	-6,4702	7,7935
		Milieu	-2,99	-3,59	-4,08
	Effort normal		231,6	277,96	313,90

Les différentes combinaisons sont :

ELU

ELS

$$\text{Cas 1 : } 1,35 \times G + 1,6 \times B_c$$

$$G + 1,2 \times B_c$$

$$\text{Cas 2 : } 1,35 \times G + 1,6 \times B_t$$

$$G + 1,2 \times B_t$$

Les sollicitations à retenir sont les plus grandes de chacun des deux cas

PARTIE D'OUVRAGE	Sollicitations KN.m/ml et KN/ml		CAS 1		CAS 2		MAXIMUM	
			ELU	ELS	ELU	ELS	ELU	ELS
TABLIER	Moment fléchissant	à gauche	-204,50	-152,53	-207,63	-154,88	-207,63	-154,88
		à droite	-189,33	-141,21	-193,31	-144,19	-193,31	-144,19
		au milieu	137,62	102,87	206,89	154,81	206,89	154,81
RADIER	Moment fléchissant	à gauche	90,23	67,29	89,81	66,97	90,23	67,29
		à droite	87,16	65,00	87,29	65,10	87,29	65,10
		au milieu	-26,45	-19,66	-5,46	-3,92	-26,45	-19,66
PIEDROITS EXTREMES	Moment fléchissant	Inférieur	-98,33	-73,30	-94,51	-70,44	-98,33	-73,30
		Supérieur	-159,90	-119,30	-172,09	-128,44	-172,09	-128,44
		Milieu	43,12	32,17	46,04	34,37	46,04	34,37
	Effort normal		408,76	305,01	435,95	325,40	435,95	325,40
PIEDROITS INTERIEURS	Moment fléchissant	Inférieur	-3,11	-2,32	-3,45	-2,57	-3,45	-2,57
		Supérieur	-16,49	-12,31	6,33	4,81	-16,49	-12,31
		Milieu	-9,78	-7,30	-10,56	-7,89	-10,56	-7,89
	Effort normal		757,40	565,15	814,9	608,28	814,90	608,28

F- CALCUL DES SECTIONS D'ARMATURES

F.1- Calcul des armatures du tablier

Données de calcul : $h = 0,30 \text{ m}$ $d = 0,9 \times H = 0,9 \times 0,30 = 0,27 \text{ m}$

$$F_{bu} = \sigma_{bc} = 17 \text{ MPa} \quad \sigma_s = f_{su} = 347,83 \text{ MPa} \quad b = 1 \text{ m}$$

➤ A mi- travée

- Calcul à l'ELU

Moment ultime $M_u = 206,89 \text{ KN. m/ml}$

Moment réduit /Recherche du pivot $\mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{206,89 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,27^2 \times 17)} = 1,669 \cdot 10^{-1}$

On a $0 \leq \mu_u \leq 0,186 \rightarrow \text{Pivot A}$

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times \mu)}\right) = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times 1,669 \cdot 10^{-1})}\right) = 2,297 \cdot 10^{-1}$$

$$z_u = d \times (1 - 0,4 \times \alpha_u) = 0,27 \times (1 - 0,4 \times 2,297 \cdot 10^{-1}) = 0,245 \text{ m}$$

Section théorique d'acier

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{206,89 \cdot 10^{-3}}{0,245 \times 347,83} = 2,428 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 24,28 \text{ cm}^2$$

- Calcul à l'ELS

Moment à l'état de service $M_{ser} = 154,81 \text{ KN. m/ml}$

Paramètre de déformation

$$\overline{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \overline{\sigma}_{bc}}{n \times \overline{\sigma}_{bc} + \overline{\sigma}_{st}} = \frac{15 \times 18}{15 \times 18 + 215,55} = 0,56$$

Fibre neutre

$$\overline{\gamma}_{ser} = \overline{\alpha}_{ser} \times d = 0,56 \times 0,27 = 0,15 \text{ m}$$

Bras de levier

$$\bar{z}_{ser} = d - \frac{\bar{\gamma}_{ser}}{3} = 0,27 - \frac{0,15}{3} = 0,22 \text{ m}$$

Moment résistant

$$\bar{M}_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \bar{\gamma}_{ser} \times \bar{\sigma}_{bc} \times \bar{z}_{ser} = \frac{1}{2} \times 0,30 \times 0,15 \times 18 \times 0,22 = 89,1 \text{ KN.m/ml}$$

On a $M_{ser} > M_{rserb} \rightarrow$ Nécessité d'aciers comprimés

Nous décomposons la section en deux sections fictives et nous déterminons deux sections telles que :

A_{st1} Section d'acier tendu capable d'équilibrer le moment M_{rserb}

A_{st2} Section d'acier tendu

A_{sc} Section d'acier comprimé capable d'équilibrer le moment $(M_{ser} - M_{rserb})$

➤ Sections d'aciers tendus

$$A_{st1} = \frac{M_{rserb}}{\bar{z}_{ser} \times \bar{\sigma}_{st}} = \frac{89,10 \times 10^{-3}}{0,22 \times 215,55} = 18,79 \text{ cm}^2$$

$$A_{st2} = \frac{(M_{ser} - M_{rserb})}{(d - d') \times \bar{\sigma}_{st}} = \frac{(154,81 - 89,10) \times 10^{-3}}{(0,27 - (0,30 - 0,27)) \times 215,55} = 12,70 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} = A_{st1} + A_{st2} = 18,79 + 12,70 = 31,49 \text{ cm}^2$$

➤ Section d'acier comprimé

$$A_{sc} = \frac{(M_{ser} - M_{rserb})}{(d - d') \times \sigma_{sc}}$$

$$\text{Avec } \sigma_{sc} = n \times \bar{\sigma}_{bc} \times \frac{(\bar{\alpha}_{ser} \times d - d')}{\bar{\alpha}_{ser} \times d} = 15 \times 18 \times \frac{0,56 \times 0,27 - 0,03}{0,56 \times 0,27} = 216,43 \text{ MPa}$$

$$A_{sc} = \frac{(154,81 - 89,10) \times 10^{-3}}{(0,27 - 0,03) \times 216,43} = 12,65 \text{ cm}^2$$

- Condition de non fragilité de la section

$$A_{min} = \frac{0,23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0,23 \times 1 \times 0,27 \times 2,4}{400} = 3,73 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 3,73 \text{ cm}^2$$

Les sections d'aciers retenues sont donc $A_{st} = 31,49 \text{ cm}^2$ et $A_{sc} = 12,65 \text{ cm}^2$

Soit $A_{st} = 31,49 \text{ cm}^2 \rightarrow 2 \times 8HA16$ et $A_{sc} = 12,65 \text{ cm}^2 \rightarrow 7HA16$

- Sur appui gauche

- Calcul à l'ELU

Moment ultime $M_u = 207,63 \text{ KN.m/ml}$

Moment réduit /Recherche du pivot $\mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{207,63 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,27^2 \times 17)} = 1,675 \cdot 10^{-1}$

On a $0 \leq \mu_u \leq 0,186 \rightarrow \text{Pivot A}$

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times \mu)}\right) = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times 1,675 \cdot 10^{-1})}\right) = 2,306 \cdot 10^{-1}$$

$$z_u = d \times (1 - 0,4 \times \alpha_u) = 0,27 \times (1 - 0,4 \times 2,306 \cdot 10^{-1}) = 0,245 \text{ m}$$

Section théorique d'acier

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{207,63 \cdot 10^{-3}}{0,245 \times 347,83} = 2,436 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 24,36 \text{ cm}^2$$

- Calcul à l'ELS

Moment à l'état de service $M_{ser} = 154,88 \text{ KN.m/ml}$

Paramètre de déformation

$$\overline{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \overline{\sigma}_{bc}}{n \times \overline{\sigma}_{bc} + \overline{\sigma}_{st}} = \frac{15 \times 18}{15 \times 18 + 215,55} = 0,56$$

Fibre neutre

$$\overline{\gamma}_{ser} = \overline{\alpha}_{ser} \times d = 0,56 \times 0,27 = 0,15 \text{ m}$$

Bras de levier

$$\overline{z}_{ser} = d - \frac{\overline{\gamma}_{ser}}{3} = 0,27 - \frac{0,15}{3} = 0,22 \text{ m}$$

Moment résistant

$$\overline{M}_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \overline{\gamma}_{ser} \times \overline{\sigma}_{bc} \times \overline{z}_{ser} = \frac{1}{2} \times 0,30 \times 0,15 \times 18 \times 0,22 = 89,1 \text{ KN.m/ml}$$

On a $M_{ser} > M_{rserb} \rightarrow$ Nécessité d'aciers comprimés

Nous décomposons la section en deux sections fictives et nous déterminons deux sections telles que :

A_{st1} Section d'acier tendu capable d'équilibrer le moment M_{rserb}

A_{st2} Section d'acier tendu

A_{sc} Section d'acier comprimé capable d'équilibrer le moment $(M_{ser} - M_{rserb})$

- Sections d'aciers tendus

$$A_{st1} = \frac{M_{rserb}}{\overline{z}_{ser} \times \overline{\sigma}_{st}} = \frac{89,10 \times 10^{-3}}{0,22 \times 215,55} = 18,79 \text{ cm}^2$$

$$A_{st2} = \frac{(M_{ser} - M_{rserb})}{(d - d') \times \overline{\sigma}_{st}} = \frac{(154,88 - 89,10) \times 10^{-3}}{(0,27 - (0,30 - 0,27)) \times 215,55} = 12,71 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} = A_{st1} + A_{st2} = 18,79 + 12,71 = 31,5 \text{ cm}^2$$

➤ Section d'acier comprimé

$$A_{sc} = \frac{(M_{ser} - M_{rserb})}{(d - d') \times \sigma_{sc}}$$

$$\text{Avec } \sigma_{sc} = n \times \overline{\sigma}_{bc} \times \frac{(\overline{\alpha}_{ser} \times d - d')}{\overline{\alpha}_{ser} \times d} = 15 \times 18 \times \frac{0,56 \times 0,27 - 0,03}{0,56 \times 0,27} = 216,43 \text{ MPa}$$

$$A_{sc} = \frac{(154,88 - 89,10) \times 10^{-3}}{(0,27 - 0,03) \times 216,43} = 12,66 \text{ cm}^2$$

• Condition de non fragilité de la section

$$A_{min} = \frac{0,23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0,23 \times 1 \times 0,27 \times 2,4}{400} = 3,73 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 3,73 \text{ cm}^2$$

Les sections d'aciers retenues sont donc $A_{st} = 31,50 \text{ cm}^2$ et $A_{sc} = 12,66 \text{ cm}^2$

Soit $A_{st} = 31,50 \text{ cm}^2 \rightarrow 2 \times 8HA16$ et $A_{sc} = 12,66 \text{ cm}^2 \rightarrow 7HA16$

➤ Sur appui droit

• Calcul à l'ELU

$$\text{Moment ultime} \quad M_u = 193,31 \text{ KN.m/ml}$$

$$\text{Moment réduit /Recherche du pivot} \quad \mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{193,31 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,27^2 \times 17)} = 1,559 \cdot 10^{-1}$$

$$\text{On a } 0 \leq \mu_u \leq 0,186 \rightarrow \text{Pivot A}$$

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times \mu)}\right) = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times 1,559 \cdot 10^{-1})}\right) = 1,704 \cdot 10^{-1}$$

$$z_u = d \times (1 - 0,4 \times \alpha_u) = 0,27 \times (1 - 0,4 \times 1,704 \cdot 10^{-1}) = 0,251 \text{ m}$$

Section théorique d'acier

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{193,31 \cdot 10^{-3}}{0,251 \times 347,83} = 2,214 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 22,14 \text{ cm}^2$$

- Calcul à l'ELS

Moment à l'état de service $M_{ser} = 144,19 \text{ KN.m/ml}$

Paramètre de déformation

$$\overline{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \overline{\sigma}_{bc}}{n \times \overline{\sigma}_{bc} + \overline{\sigma}_{st}} = \frac{15 \times 18}{15 \times 18 + 215,55} = 0,56$$

Fibre neutre

$$\overline{y}_{ser} = \overline{\alpha}_{ser} \times d = 0,56 \times 0,27 = 0,15 \text{ m}$$

Bras de levier

$$\overline{z}_{ser} = d - \frac{\overline{y}_{ser}}{3} = 0,27 - \frac{0,15}{3} = 0,22 \text{ m}$$

Moment résistant

$$\overline{M}_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \overline{y}_{ser} \times \overline{\sigma}_{bc} \times \overline{z}_{ser} = \frac{1}{2} \times 0,30 \times 0,15 \times 18 \times 0,22 = 89,1 \text{ KN.m/ml}$$

On a $M_{ser} > M_{rserb} \rightarrow$ Nécessité d'aciers comprimés

Nous décomposons la section en deux sections fictives et nous déterminons deux sections telles que :

A_{st1} Section d'acier tendu capable d'équilibrer le moment M_{rserb}

A_{st2} Section d'acier tendu

A_{sc} Section d'acier comprimé capable d'équilibrer le moment ($M_{ser} - M_{rserb}$)

➤ Sections d'aciers tendus

$$A_{st1} = \frac{M_{rserb}}{Z_{ser} \times \sigma_{st}} = \frac{89,10 \times 10^{-3}}{0,22 \times 215,55} = 18,79 \text{ cm}^2$$

$$A_{st2} = \frac{(M_{ser} - M_{rserb})}{(d - d') \times \sigma_{st}} = \frac{(144,19 - 89,10) \times 10^{-3}}{(0,27 - (0,30 - 0,27)) \times 215,55} = 10,65 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} = A_{st1} + A_{st2} = 18,79 + 10,65 = 29,44 \text{ cm}^2$$

➤ Section d'acier comprimé

$$A_{sc} = \frac{(M_{ser} - M_{rserb})}{(d - d') \times \sigma_{sc}}$$

$$\text{Avec } \sigma_{sc} = n \times \overline{\sigma_{bc}} \times \frac{(\overline{\alpha_{ser} \times d - d'})}{\overline{\alpha_{ser} \times d}} = 15 \times 18 \times \frac{0,56 \times 0,27 - 0,03}{0,56 \times 0,27} = 216,43 \text{ MPa}$$

$$A_{sc} = \frac{(144,19 - 89,10) \times 10^{-3}}{(0,27 - 0,03) \times 216,43} = 10,60 \text{ cm}^2$$

- Condition de non fragilité de la section

$$A_{min} = \frac{0,23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0,23 \times 1 \times 0,27 \times 2,4}{400} = 3,73 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 3,73 \text{ cm}^2$$

Les sections d'aciers retenues sont donc $A_{st} = 29,44 \text{ cm}^2$ et $A_{sc} = 10,60 \text{ cm}^2$

Soit $A_{st} = 29,44 \text{ cm}^2 \rightarrow 2 \times 8HA16$ et $A_{sc} = 10,60 \text{ cm}^2 \rightarrow 7HA16$

F.2- Calcul des armatures du radier

➤ A mi- travée

- Calcul à l'ELU

Moment ultime $M_u = 26,45 \text{ KN.m/ml}$

Moment réduit /Recherche du pivot $\mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{26,45 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,27^2 \times 17)} = 2,134 \cdot 10^{-2}$

On a $0 \leq \mu_u \leq 0,186 \rightarrow \text{Pivot A}$

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times \mu)}\right) = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times 2,134 \cdot 10^{-2})}\right) = 2,696 \cdot 10^{-2}$$

$$z_u = d \times (1 - 0,4 \times \alpha_u) = 0,27 \times (1 - 0,4 \times 2,696 \cdot 10^{-2}) = 0,267 \text{ m}$$

Section théorique d'acier

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{26,45 \cdot 10^{-3}}{0,267 \times 347,83} = 2,85 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 2,85 \text{ cm}^2$$

- Calcul à l'ELS

Moment à l'état de service $M_{ser} = 19,66 \text{ KN.m/ml}$

Paramètre de déformation

$$\overline{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \overline{\sigma}_{bc}}{n \times \overline{\sigma}_{bc} + \overline{\sigma}_{st}} = \frac{15 \times 18}{15 \times 18 + 215,55} = 0,56$$

Fibre neutre

$$\overline{\gamma}_{ser} = \overline{\alpha}_{ser} \times d = 0,56 \times 0,27 = 0,15 \text{ m}$$

Bras de levier

$$\overline{z}_{ser} = d - \frac{\overline{\gamma}_{ser}}{3} = 0,27 - \frac{0,15}{3} = 0,22 \text{ m}$$

Moment résistant

$$\overline{M}_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \overline{\gamma}_{ser} \times \overline{\sigma}_{bc} \times \overline{z}_{ser} = \frac{1}{2} \times 0,30 \times 0,15 \times 18 \times 0,22 = 89,1 \text{ KN.m/ml}$$

On a $M_{ser} < \overline{M}_{rserb} \rightarrow$ Pas besoin d'aciers comprimés

$$A_s = \frac{M_{ser}}{\overline{z}_{ser} \times \overline{\sigma}_{st}} = \frac{19,66 \times 10^{-3}}{0,22 \times 215,55} = 4,15 \text{ cm}^2$$

- Condition de non fragilité de la section

$$A_{min} = \frac{0,23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0,23 \times 1 \times 0,27 \times 2,4}{400} = 3,73 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 3,73 \text{ cm}^2$$

La section d'acier retenue est donc $A_s = 4,15 \text{ cm}^2$

Soit $A_s = 4,15 \text{ cm}^2 \rightarrow 6HA10$ mais pour des dispositions constructives nous optons

de prendre 6HA12

➤ Sur appui gauche

- Calcul à l'ELU

Moment ultime $M_u = 90,23 \text{ KN. m/ml}$

Moment réduit /Recherche du pivot $\mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{90,23 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,27^2 \times 17)} = 7,28 \cdot 10^{-2}$

On a $0 \leq \mu_u \leq 0,186 \rightarrow \text{Pivot A}$

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times \mu)}\right) = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times 7,28 \cdot 10^{-2})}\right) = 9,457 \cdot 10^{-2}$$

$$z_u = d \times (1 - 0,4 \times \alpha_u) = 0,27 \times (1 - 0,4 \times 9,457 \cdot 10^{-2}) = 0,259 \text{ m}$$

Section théorique d'acier

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{90,23 \cdot 10^{-3}}{0,259 \times 347,83} = 10,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 10,01 \text{ cm}^2$$

- Calcul à l'ELS

Moment à l'état de service $M_{ser} = 67,29 \text{ KN. m/ml}$

Paramètre de déformation

$$\overline{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \overline{\sigma}_{bc}}{n \times \overline{\sigma}_{bc} + \overline{\sigma}_{st}} = \frac{15 \times 18}{15 \times 18 + 215,55} = 0,56$$

Fibre neutre

$$\overline{\gamma}_{ser} = \overline{\alpha}_{ser} \times d = 0,56 \times 0,27 = 0,15 \text{ m}$$

Bras de levier

$$\overline{z}_{ser} = d - \frac{\overline{\gamma}_{ser}}{3} = 0,27 - \frac{0,15}{3} = 0,22 \text{ m}$$

Moment résistant

$$\overline{M}_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \overline{\gamma}_{ser} \times \overline{\sigma}_{bc} \times \overline{z}_{ser} = \frac{1}{2} \times 0,30 \times 0,15 \times 18 \times 0,22 = 89,1 \text{ KN.m/ml}$$

On a $M_{ser} < M_{rserb} \rightarrow$ Pas besoin d'aciers comprimés

$$A_s = \frac{M_{ser}}{\overline{z}_{ser} \times \overline{\sigma}_{st}} = \frac{67,29 \times 10^{-3}}{0,22 \times 215,55} = 14,19 \text{ cm}^2$$

- Condition de non fragilité de la section

$$A_{min} = \frac{0,23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0,23 \times 1 \times 0,27 \times 2,4}{400} = 3,73 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 3,73 \text{ cm}^2$$

La section d'acier retenue est donc $A_s = 14,19 \text{ cm}^2$

Soit $A_s = 14,19 \text{ cm}^2 \rightarrow 8HA16$

- Sur appui droit

- Calcul à l'ELU

Moment ultime $M_u = 87,29 \text{ KN.m/ml}$

Moment réduit /Recherche du pivot $\mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{87,29 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,27^2 \times 17)} = 7,04 \cdot 10^{-2}$

On a $0 \leq \mu_u \leq 0,186 \rightarrow$ Pivot A

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times \mu_u)}\right) = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times 7,04 \cdot 10^{-2})}\right) = 9,13 \cdot 10^{-2}$$

$$z_u = d \times (1 - 0,4 \times \alpha_u) = 0,27 \times (1 - 0,4 \times 9,13 \cdot 10^{-2}) = 0,26 \text{ m}$$

Section théorique d'acier

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{87,29 \cdot 10^{-3}}{0,26 \times 347,83} = 9,65 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 9,65 \text{ cm}^2$$

- Calcul à l'ELS

Moment à l'état de service $M_{ser} = 65,10 \text{ KN.m/ml}$

Paramètre de déformation

$$\overline{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \overline{\sigma}_{bc}}{n \times \overline{\sigma}_{bc} + \overline{\sigma}_{st}} = \frac{15 \times 18}{15 \times 18 + 215,55} = 0,56$$

Fibre neutre

$$\overline{\gamma}_{ser} = \overline{\alpha}_{ser} \times d = 0,56 \times 0,27 = 0,15 \text{ m}$$

Bras de levier

$$\overline{z}_{ser} = d - \frac{\overline{\gamma}_{ser}}{3} = 0,27 - \frac{0,15}{3} = 0,22 \text{ m}$$

Moment résistant

$$\overline{M}_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \overline{\gamma}_{ser} \times \overline{\sigma}_{bc} \times \overline{z}_{ser} = \frac{1}{2} \times 0,30 \times 0,15 \times 18 \times 0,22 = 89,1 \text{ KN.m/ml}$$

On a $M_{ser} < M_{rserb} \rightarrow$ Pas besoin d'aciers comprimés

$$A_s = \frac{M_{ser}}{z_{ser} \times \bar{\sigma}_{st}} = \frac{65,10 \times 10^{-3}}{0,22 \times 215,55} = 13,73 \text{ cm}^2$$

- Condition de non fragilité de la section

$$A_{min} = \frac{0,23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0,23 \times 1 \times 0,27 \times 2,4}{400} = 3,73 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 3,73 \text{ cm}^2$$

La section d'acier retenue est donc $A_s = 13,73 \text{ cm}^2$

Soit $A_s = 13,73 \text{ cm}^2 \rightarrow 8HA16$

F.3- Calcul des armatures des piédroits centraux

Les calculs sont effectués pour un piédroit considéré au mètre linéaire comme un poteau de 1m x 0,30 m

Données : $H = 4 \text{ m}$ $h = 0,3 \text{ m}$ $c = 0,02 \text{ m}$ $b = 1 \text{ m}$

- Effort normal sollicitant le poteau

$$N_u = 814,90 \text{ KN/ml}$$

Longueur de flambement $l_f = 0,7 \times H = 0,7 \times 4 = 2,8 \text{ m}$

Elancement $\lambda = 3,46 \times \frac{l_f}{h} = 3,46 \times \frac{2,8}{0,3} = 32,29$

On a $\lambda \leq 50 \rightarrow \beta = 1 + 0,2 \times \left(\frac{\lambda}{35}\right)^2 = 1,17$

$$Br = (h - c) \times (b - c) = (0,30 - 0,02) \times (1 - 0,02) = 2744 \text{ cm}^2$$

$$\text{Le béton équilibre : } N_b = \frac{B_r \times f_{bu}}{0,9} = \frac{0,2744 \times 17}{0,9} = 5183,11 \text{ KN}$$

$$\text{Les aciers équilibrent : } N_s = \frac{k \times \beta \times N_u - N_b}{0,85} = \frac{1,10 \times 1,17 \times 814,90 - 5183,11}{0,85} = -4863,92 \text{ KN}$$

Avec $k = 1,10$ car plus de la moitié des charges est appliquée avant 90 jours

$N_s < 0 \rightarrow$ le béton est surabondant; il suffit de prévoir la section minimale

➤ Calcul de la section minimale d'armatures

$$u = 2 \times (h + b) = 2 \times (0,30 + 1) = 2,6 \text{ m} \quad \text{périmètre}$$

$$B = h \times b = 0,30 \times 1 = 0,30 \text{ m}^2 \quad \text{aire béton}$$

$$A_{min} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} 4 \text{ cm}^2/\text{m} \times u \text{ en cm}^2 \\ 0,2 \times \frac{B}{100} \end{array} \right\}$$

$$A_{min} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} 4 \times 2,6 = 10,40 \text{ cm}^2 \\ 0,2 \times \frac{3000}{100} = 6 \text{ cm}^2 \end{array} \right\}$$

$$A = A_{min} = 10,40 \text{ cm}^2$$

$$\text{Vérifions : } A_{max} = 5 \times \frac{B}{100} = 5 \times \frac{3000}{100} = 150 \text{ cm}^2 \rightarrow A_{min} < A_{max} \text{ OK}$$

$$\text{D'où } A_s = 10,40 \text{ cm}^2$$

Soit $A_s = 5.2 \text{ cm}^2$ sur chaque face

Soit $A_s = 5,2 \text{ cm}^2 \rightarrow 5HA12$ sur chaque face

F.4- Calcul des armatures du piedroit extrême gauche

➤ Calcul à l'ELU

$$M_{jGo} = 46,04 \text{ KN.m/ml}$$

$$N_i = 435,95 \text{ KN/ml}$$

$$e_a = \text{Max} \left\{ \frac{2 \text{ cm}}{H/250} \right\} \rightarrow e_a = 2 \text{ cm}$$

$$e_1 = \frac{M_{jG0}}{N_i} + e_a = \frac{46,04}{435,95} + 0,02 = 0,125 \text{ m}$$

- Sollicitations ultimes corrigées pour flambement

Elancement géométrique :

$$l_f = 0,7 \times l_0 = 0,7 \times 4 \text{ m} = 2,8 \text{ m}$$

Type de calcul :

Pièce chargée de façon excentrée

$$\rightarrow \frac{l_f}{h} > \text{Max} \left\{ 20 \times \frac{e_1}{h} \right\} \rightarrow \frac{2,8}{0,30} = 9,33 < 15 \leq \text{Max} \left\{ 20 \times \frac{e_1}{h} \right\}$$

→ Calcul en flexion composée en tenant compte, de façon forfaitaire, de l'excentricité du 2nd ordre

Excentricité du 2nd ordre :

$$\alpha = \frac{M_1^l}{M_1} = \frac{13,20}{13,20 + 17,64} = 0,428$$

$$e_2 = \frac{3 \times l_f^2}{10^4 \times h} (2 + \alpha \times \varphi) = \frac{3 \times 2,8^2}{10^4 \times 0,30} (2 + 0,428 \times 2) = 0,022 \text{ m} = 2,2 \text{ cm}$$

Avec $\varphi = 2$ cas courant

Sollicitations corrigées pour le calcul en flexion composée :

$$\left\{ \begin{array}{l} N_u = N_i \\ M_{uG0} = N_u(e_1 + e_2) \\ e_0 = e_1 + e_2 \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} N_u = 435,95 \text{ KN} \\ M_{uG0} = 435,95 \times (0,125 + 0,022) = 64,08 \text{ KN.m} \\ e_0 = 0,125 + 0,022 = 0,147 \text{ m} \end{array} \right\}$$

Sollicitations ramenées au centre de gravité des aciers tendus :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_A = e_0 + \left(d - \frac{h}{2} \right) \\ M_{uA} = N_u \times e_A \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} e_A = 0,147 + 0,27 - \frac{0,30}{2} = 0,267 \text{ m} \\ M_{uA} = 435,95 \times 0,267 = 116,40 \text{ KN.m} \end{array} \right\}$$

Moment réduit de référence à l'ELU

$$\mu_{BC} = 0,8 \times \frac{h}{d} \times \left(1 - 0,4 \times \frac{h}{d} \right) = 0,8 \times \frac{0,30}{0,27} \times \left(1 - 0,4 \times \frac{0,30}{0,27} \right) = 0,494$$

Moment réduit agissant

$$\mu_{uA} = \frac{M_{uA}}{b_0 \times d^2 \times f_{bu}} = \frac{116,40 \times 10^{-3}}{0,30 \times 0,27^2 \times 17} = 0,31$$

➤ Calcul à l'ELS

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{ser} = N_g + N_q \\ M_{serG0} = M_g + M_q \\ e_{ser0} = \frac{M_{serG0}}{N_{ser}} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} N_{ser} = 325,40 \text{ KN} \\ M_{serG0} = 34,37 \text{ KN.m} \\ e_{ser0} = 0,105 \text{ m} \end{array} \right\}$$

Sollicitations ramenées au centre de gravité des aciers tendus

$$\left\{ \begin{array}{l} e_A = e_{0ser} + \left(d - \frac{h}{2} \right) \\ M_{serA} = N_{ser} \times e_A \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} e_A = 0,105 + 0,27 - \frac{0,30}{2} = 0,225 \text{ m} \\ M_{serA} = 325,40 \times 0,225 = 73,21 \text{ KN.m} \end{array} \right\}$$

Moment réduit limite

$$\gamma_M = \frac{M_{uA}}{M_{serA}} = \frac{116,40}{73,21} = 1,59$$

$$10^4 \mu_{lu} = 3440 \times \theta \times \gamma_M + 49 \times \frac{f_{c28}}{\theta} - 3100$$

$$10^4 \mu_{lu} = 3440 \times 1 \times 1,59 + 49 \times \frac{30}{1} - 3100 = 3839,6$$

$$\mu_{lu} = 0,38$$

On a $\mu_{uA} < \mu_{BC} \rightarrow$ section partiellement comprimée

Et $\mu_{uA} < \mu_{lu} \rightarrow$ Pas besoin d'aciers comprimés

Paramètres de déformation

$$\alpha_{uA} = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times \mu_{uA})}\right) = 1,25 \times \left(1 - \sqrt{(1 - 2 \times 0,31)}\right) = 0,48$$

Bras de levier

$$z_{uA} = d \times (1 - 0,4 \times \alpha_{uA}) = 0,27 \times (1 - 0,4 \times 0,48) = 0,22 \text{ m}$$

$$\mathcal{A} = \frac{M_{uA}}{z_{uA} \times \sigma_s} = \frac{116,40 \times 10^{-3}}{0,22 \times 347,83} = 1,521 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 15,21 \text{ cm}^2$$

Section théorique d'acier

$$A_u = \mathcal{A} - \frac{N_u}{\sigma_s} = 1,521 \times 10^{-3} - \frac{435,95 \times 10^{-3}}{347,83} = 2,68 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 2,68 \text{ cm}^2$$

- Condition de non fragilité de la section

$$A_{min} = \frac{0,23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0,23 \times 1 \times 0,27 \times 2,4}{400} = 3,73 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 3,73 \text{ cm}^2$$

La section d'acier retenue est donc $A_s = 3,73 \text{ cm}^2$

Soit $A_s = 3,73 \text{ cm}^2 \rightarrow 5HA12$

F.5- Récapitulatif des sections d'armatures

PARTIE D'OUVRAGE	Sollicitations KN.m/ml et KN/ml		ELU	ELS	Section de béton (cm)		Section d'acier (cm ²)	
					b	h	Théorique	Choix
TABLIER	Moment fléchissant	à gauche	-207,63	-154,88	100	30	31,50	2 x 8HA16
		à droite	-193,31	-144,19			12,66	7HA16
		au milieu	206,89	154,81			29,44 10,66	2 x 8HA16 7HA16
RADIER	Moment fléchissant	à gauche	90,23	67,29	100	30	14,19	8HA16
		à droite	87,29	65,10	100	30	13,73	8HA16
		au milieu	-26,45	-19,66	100	30	4,15	6HA12
PIEDROIT EXTREME	Moment fléchissant	Inférieur	-98,33	-73,30	100	30	3,73/face	5HA12/face
		Supérieur	-172,09	-128,44	100	30		
		Milieu	46,04	34,37	100	30		
	Effort normal		435,95	325,40	100	30		
PIEDROITS INTERIEURS	Moment fléchissant	Inférieur	-3,45	-2,57	100	30	10,40 soit 5,20/face	5HA12/face
		Supérieur	-16,49	-12,31	100	30		
		Milieu	-10,56	-7,89	100	30		
	Effort normal		814,90	608,28	100	30		