VIII.1 Calcul des fondations :

VIII.1.1 Introduction :

Les fondations d'une construction sont constituées par les parties de l'ouvrage qui sont en contact avec le sol, auquel elles transmettent les charges de la superstructure, elles constituent donc la partie essentielle de l'ouvrage, la bonne conception et réalisation découle la bonne tenue de l'ensemble.

Il est important donc pour déterminer les dimensions de connaître d'une part le poids total de l'ouvrage entièrement achevée, et d'autre part la force portante du sol.

D'après le rapport du sol notre terrain à une contrainte admissible de 2,0 bar à un ancrage de 2,00 m.

Le béton de propreté prévu pour chaque semelle aura d'une épaisseur de 10 cm.

Le calcul des fondations se fait comme suit :

1. Dimensionnement à l'E.L.S $N_{ser} = G+Q$.
2. Ferraillage à l'E.L.U. $N_{ul} = 1,35\ G + 1,5\ Q$

Vu la hauteur de la construction et les charges apportées par la superstructure, ainsi que l'existence des voiles dans cette construction, et la moyenne portance du sol, le dimensionnement des fondations donne des semelles de grandes dimensions qui se chevauchent dans l'un ou dans l'autre sens, donc il est préférable de les relier de manière à former un radier général qui constitue un ensemble rigide qui doit remplir les conditions suivantes :

- ✓ Assurer l'encastrement de la structure dans le sol
- ✓ Transmettre au sol la totalité des efforts
- ✓ Éviter les tassements différentiels.

VIII.1.2 Définition :

Le radier c'est une surface d'appui continue (dalles, nervures) débordant l'emprise de l'ouvrage, elle permet une répartition uniforme des charges a transmises tout en en résistant aux contraintes de sol.

VIII.2 Calcul du radier :

Un radier c'est une semelle unique de très grandes dimensions commun entre tous les poteaux et voiles supportant toute la construction.

Un radier est calculé comme un plancher renversé mais fortement sollicité (Réaction de sol ≈ poids total de la structure).

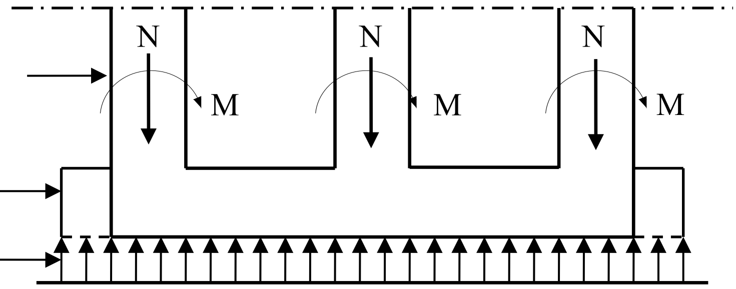


Figure. VIII.1 : Schéma du Radier

VIII.2.1 Pré dimensionnement du radier :

Le radier général supporte la somme des charges permanentes est charges d'exploitations dues à la Superstructure :

$$G_T = \sum_{i=1}^{8} G_i = \mathbf{28483,66\ KN}$$

$$Q_T = \sum_{i=1}^{8} Q_i = \mathbf{3304,20\ KN}$$

Avec :

G_T : la charge permanente total.

Q_T : la charge d'exploitation total.

A. Combinaison d'actions :

A L'E. L. U: $N_U = 1{,}35G_T + 1{,}5Q_T = \mathbf{43409,24\ KN}$

A L'E. L. S: $N_{Ser} = G_T + Q_T = \mathbf{31787,86\ KN}$

B. Surface minimale du radier :

La surface du radier est donnée par la formule suivante :

$$\frac{N}{S} \leq \sigma_{sol} \Rightarrow S \geq \frac{N_{ser}}{\sigma_{sol}} = \frac{31787{,}86}{2 \times 10^2} = 158{,}93\ m^2$$

On prend un débord de 80 cm de chaque côté dans les deux directions ce qui nous donne une surface d'assise $\mathbf{S_{radier}} = \mathbf{491,78\ m^2}$.

VIII.2.2 Calcul de l'épaisseur du radier :

L'épaisseur du radier doit satisfaire les conditions suivantes :

1^{ére} Condition :

$$\tau_u = \frac{V_u}{b.d} \leq 0{,}06.f_{c28} \Rightarrow d \geq \frac{V_u}{0{,}06 f_{c28}.b}$$

Avec :

V_u : l'effort tranchant ultime ; $V_u = \frac{Q_u.L}{2}$

L : Longueur maximal d'une bande 1m ; **L=6,50 m**

$$Q_u = \frac{N_u}{S} = \frac{43409{,}24}{491{,}78} = \mathbf{88{,}27\ KN/m^2}$$

Pour une bande de 1 mètre linéaire :

$$Q_u = 88{,}27 \times \mathbf{1ml} = \mathbf{88{,}27\ KN/m}$$

$$V_u = \frac{Q_u . L}{2} = \frac{1m \times 88{,}27 \times 6{,}50}{2} = \mathbf{286{,}87\ KN}$$

$$\Rightarrow d \geq \frac{286{,}87 \times 10^{-3}}{0{,}06 \times 25 \times 1} = \mathbf{0{,}19m.}$$

2^{éme} Condition :

$$\begin{cases} \frac{L}{25} \leq d \leq \frac{L}{20} \Rightarrow 26\ cm \leq d \leq 32{,}5\ cm. \\ L = 6{,}50\ m \end{cases}$$

Donc : $h \geq d + c = 30 + 5 = 35$ cm

Soit : d=30cm, h= 35 cm

VIII.3 Détermination de la hauteur de la poutre de libage :

Pour pouvoir assimiler le calcul du radier à un plancher infiniment rigide, la hauteur de la poutre de libage doit vérifier la condition suivante :

$$\frac{L}{9} \leq h \leq \frac{L}{6} \Rightarrow 73{,}88\ cm \leq h \leq 110{,}83\ cm$$

On prend comme dimension : $\begin{cases} \textbf{h= 75 cm, d=67,5cm.} \\ \textbf{b= 50cm.} \end{cases}$

VIII.3.1 Vérification des contraintes du sol :

On doit vérifier la de sol sous radier a L'ELS sous l'action de la superstructure ainsi son poids propre et compris les poutres de libage.

Poids propre du radier :

$$\boldsymbol{G_{radier}} = \gamma_{BA}.(h_r.S_r + h_p.b_p.\sum L_i)$$

$$\boldsymbol{G_{radier}} = 25.(0{,}35 \times 491{,}78 + 0{,}75 \times 0{,}50 \times 168{,}54) = \mathbf{5883{,}13\ KN.}$$

$$\boldsymbol{N_{ser}} = \boldsymbol{G_{radier}} + \boldsymbol{N}_{\text{ser superstructure}} = \mathbf{5883{,}13 + 31787{,}86 =}$$

$$\mathbf{37671\ KN.}$$

Donc on va vérifier la condition suivante :

$$\frac{N_{ser}}{S_{radier}} < 200KN/m^2$$

$$\frac{N_{ser}}{S_{radier}} = \frac{37671}{491{,}78} = 76{,}60KN/m^2 < 200KN/m^2 \text{.................condition vérifiée.}$$

VIII.3.2 La longueur élastique :

La longueur élastique de la poutre de libage est donnée par :

$$L_e = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K.b}}$$

Avec : I : Inertie de la poutre : $I = bh^3/12 = 0{,}5 \times 0{,}75^3/12 = 0{,}018m^4$.

E : module d'élasticité du béton, $E = 3216420\ t/m^2$.

b : largeur de la poutre $b = 0{,}50m$.

K : coefficient de la raideur de sol $k = 500\ t/m^3$.

$$L_e = \sqrt[4]{\frac{4 \times 3216420 \times 0{,}018}{500 \times 0{,}50}} = 5{,}51m$$

$L_{max} = 6{,}50m < \dfrac{\pi}{2} \times L_e = 8{,}66m$................................condition vérifiée.

L_{max} : la longueur maximale entre nues des poteaux.

Donc on peut considérer que le radier est infiniment rigide.

VIII.4 Evaluation des charges pour le calcul du radier :

VIII.4.1 Poids unitaire du radier :

$$\sigma_{max} = \frac{N_{ser}}{S_{radier}} = \frac{37671}{491{,}78} = 76{,}60 KN/m^2$$

$$\sigma_{radier} = \gamma_b \times h = 25\ \times 0{,}35 = 8{,}75\ KN/m^2$$

$$Q = \sigma_{max} - \sigma_{radier} = 76{,}60 - 8{,}75 = 67{,}85\ KN/m^2$$

Donc la charge en « m² » à prendre en compte dans le calcul du ferraillage du radier est de : $\mathbf{Q = 67,85\ KN/m^2}$

VIII.5 Ferraillage du radier :

VIII.5.1 Ferraillage des dalles :

Soit une dalle reposant sur 4 côtés de dimensions entre nus des appuis L_x et L_y avec $L_x \leq L_y$.

Pour le ferraillage des dalles on a deux cas :

1 ère cas :

Si $\alpha = L_x/L_y \geq 0{,}4$: La dalle portante suivant les deux directions.

Les moments sont donnés par :

$$\begin{cases} M_{ox} = \mu_x . Q . L_x^2 \\ M_{oy} = \mu_y . M_{ox} \end{cases}$$

Moment en travée :

$M_t = 0{,}85M_o$..................panneau de rive.

$M_t = 0{,}75M_o$..................panneau intermédiaire.

Moment sur appuis :

$M_a = 0{,}4\ M_o$.....................appuis de rive.

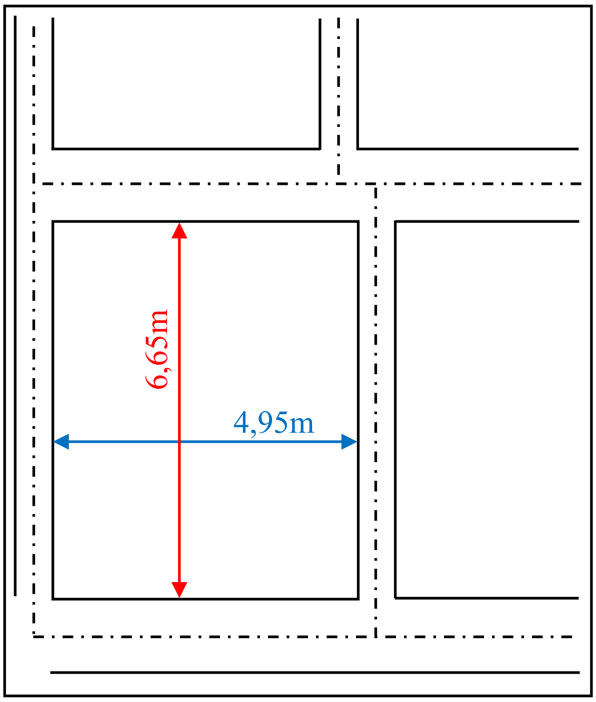
$M_a = 0{,}5M_o$.....................appuis intermédiaire

2éme cas :

Si $\alpha = L_x/L_y < 0{,}4$: La dalle se calcule comme une poutre continue dans les sens de la petite portée.

Pour notre cas, on prend le panneau le plus défavorable.

VIII.5.2 Exemple de calcul :



Figures VIII.2: Schéma du panneau le plus défavorable

$\alpha = \boldsymbol{L_x/L_y = 4,95/6,65 = 0,74 > 0,4}$

Donc La dalle porte dans les deux sens.

$$\alpha = 0{,}74 \Rightarrow \begin{cases} \mu_x = 0{,}0633 \\ \mu_y = 0{,}4938 \end{cases}$$

$$M_{ox} = \mu_x . Q . L_x^2$$

$$M_{ox} = 0{,}0633 \times 67{,}85 \times 4{,}95^2$$

$$M_{ox} = \mathbf{105,23KN.m}$$

$$M_{oy} = \mu_y . M_{ox}$$

$$M_{oy} = 0{,}4938 \times 105{,}23$$

$$M_{oy} = \mathbf{51,96KN.m}$$

En travée :

- **Sens x :**

$$M_{tx} = 0{,}85 M_{0x} = 0{,}85 \times 105{,}23 = 89{,}44 KN.m$$

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{M_{tx}}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \dfrac{89{,}44 \times 10^3}{100 \times 30^2 \times 14{,}17} = 0{,}070 < \mu_l = 0{,}392 \rightarrow A'_s = 0 \rightarrow \beta = 0{,}960 \\ A_s = \dfrac{M_t}{\beta \times d \times \sigma_s} = \dfrac{89{,}44 \times 10^3}{0{,}960 \times 30 \times 348} = 8{,}32\ cm^2/ml \end{cases}$$

On adopte **6T14 / ml ; A = 9,24 cm²/ml ; St = 16 cm**

- **Sens y :**

$$M_{ty} = 0{,}85 M_{0y} = 0{,}85 \times 51{,}96 = 44{,}16 KN.m$$

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{M_{ty}}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \dfrac{44{,}16 \times 10^3}{100 \times 30^2 \times 14{,}17} = 0{,}034 < \mu_l = 0{,}392 \ \rightarrow A'_s = 0 \rightarrow \beta = 0{,}983 \\ A_s = \dfrac{M_t}{\beta \times d \times \sigma_s} = \dfrac{44{,}16 \times 10^3}{0{,}983 \times 30 \times 348} = 4{,}30 \ cm^2/ml \end{cases}$$

On adopte **5T12 / ml ; A = 5,65 cm²/ml ; St = 20cm**

- **Sur appui :**
- **Appui de rive :**

$$M_{a\,rive} = 0{,}4 M_{0y} = 0{,}4 \times 105{,}23 = 42{,}09 KN\,.m$$

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{M_a}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \dfrac{42{,}09 \times 10^3}{100 \times 30^2 \times 14{,}17} = 0{,}033 < \mu_l = 0{,}392 \ \rightarrow A'_s = 0 \rightarrow \beta = 0{,}9835 \\ A_s = \dfrac{M_a}{\beta \times d \times \sigma_s} = \dfrac{42{,}09 \times 10^3}{0{,}9835 \times 30 \times 348} = 4{,}09 \ cm^2/ml \end{cases}$$

On adopte **4T12 / ml ; A = 4,52 cm²/ml ; St = 25cm**

- **Appui intermédiaire :**

$$M_{a\,inter} = 0{,}5 M_{0y} = 0{,}5 \times 51{,}96 = 25{,}98 \ KN\,.m$$

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{M_a}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \dfrac{25{,}98 \times 10^3}{100 \times 30^2 \times 14{,}17} = 0{,}020 < \mu_l = 0{,}392 \ \rightarrow A'_s = 0 \rightarrow \beta = 0{,}990 \\ A_s = \dfrac{M_a}{\beta \times d \times \sigma_s} = \dfrac{25{,}98 \times 10^3}{0{,}990 \times 30 \times 348} = 2{,}51 \ cm^2/ml \end{cases}$$

On adopte **4T12 / ml ; A = 4,52 cm²/ml ; St = 25cm**

VIII.5.3 Vérification de l'espacement :

Dans le sens le plus sollicité :

$$\begin{cases} S_t \leq min\{3h\,; 33\ cm\} \\ S_t \leq 33\ cm \end{cases} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ Condition\ vérifée.$$

VIII.5.4 Disposition du ferraillage :

A. Arrêt des barres :

La longueur de scellement L_s est la longueur nécessaire pour assurer un ancrage correct.

On a : $f_e 400\ et\ f_{c28} = 25\ MPa.$

B. Cas des charges uniformes :

Arrêt des armatures en travée et des chapeaux par moitié, les aciers traversant le contour sont ancrés au-delà de celui-ci.

C. Arrêt des barres sur appuis :

$$L_S = \frac{Q \times f_e}{4 \times \tau_{su}}$$

$$\tau_{su} = 0{,}6 \times \Psi^2 \times f_{tj}$$

$$\tau_{su} = 0{,}6 \times (1{,}5)^2 \times 2{,}1 = 2{,}84\ MPa$$

$$L_S = \frac{1{,}2 \times 400}{4 \times 2{,}84} = 42{,}25\ cm$$

$$L_1 = max\{L_s\,;0{,}2L_x\}$$
$$L_1 = max\{42{,}25\,;99\} = 99\ cm \approx 100\ \ cm$$
$$L_2 = max\left\{L_s\,;\frac{L_1}{2}\right\}$$
$$L_2 = max\{42{,}25\,;50\} = 50\ cm$$

D. Arrêt des barres en travée dans les deux sens :

Les aciers armant à la flexion, la région centrale d'une dalle sont prolongés jusqu'aux appuis à raison d'un cas contraire, les autres armatures sont arrêtées à une distance :

$Lx/10 = 495/10 = 49{,}5\ cm \approx 50\ \ cm$

➢ **Disposition du ferraillage :**

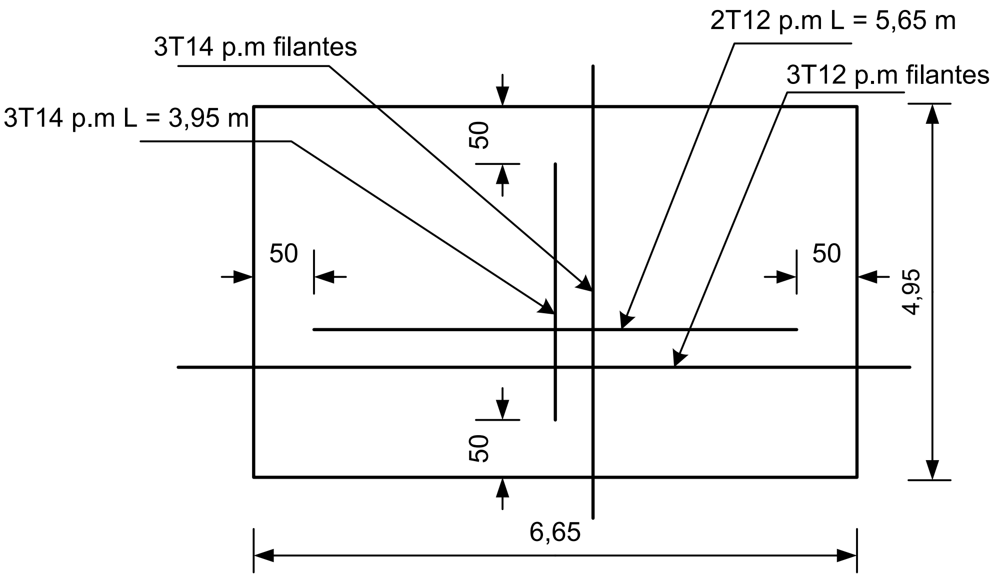


Figure VIII.3 : Armatures supérieures (en travée)

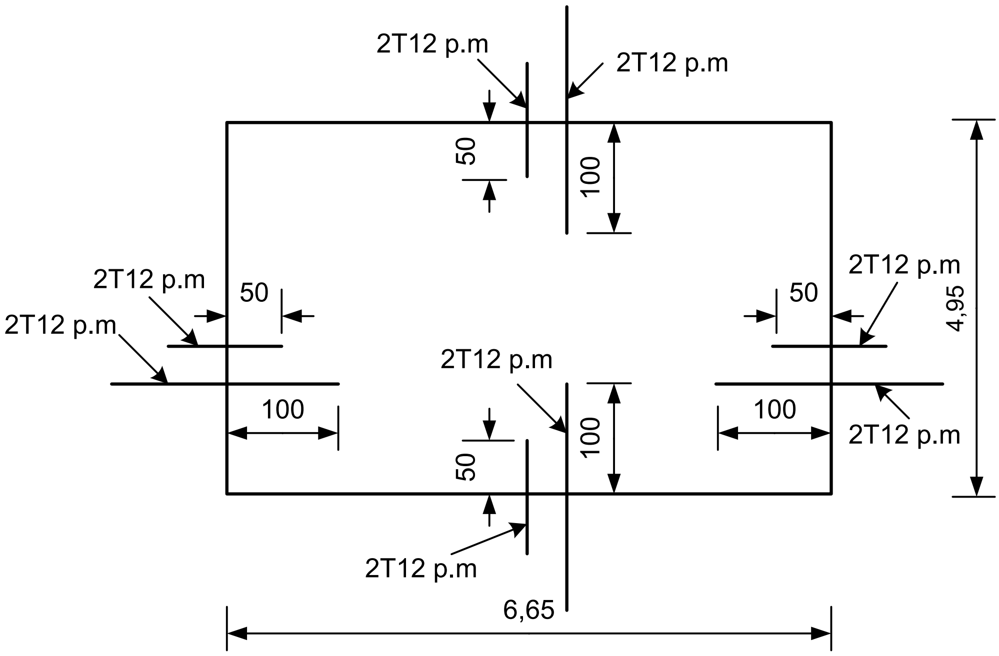


Figure VIII.4 : Armatures inférieures (sur appuis)

VIII.6 Ferraillage des poutres de libage :

Le rapport $\alpha = L_x/L_y \geq 0{,}4$ pour tous les panneaux constituants le radier, donc les charges transmises par chaque panneau se subdivise en deux charges trapézoïdales et deux charges triangulaires pour le calcul du ferraillage on prend le cas le plus défavorable dans chaque sens et on considère des travées isostatiques.

- **Sens longitudinal (y) :**

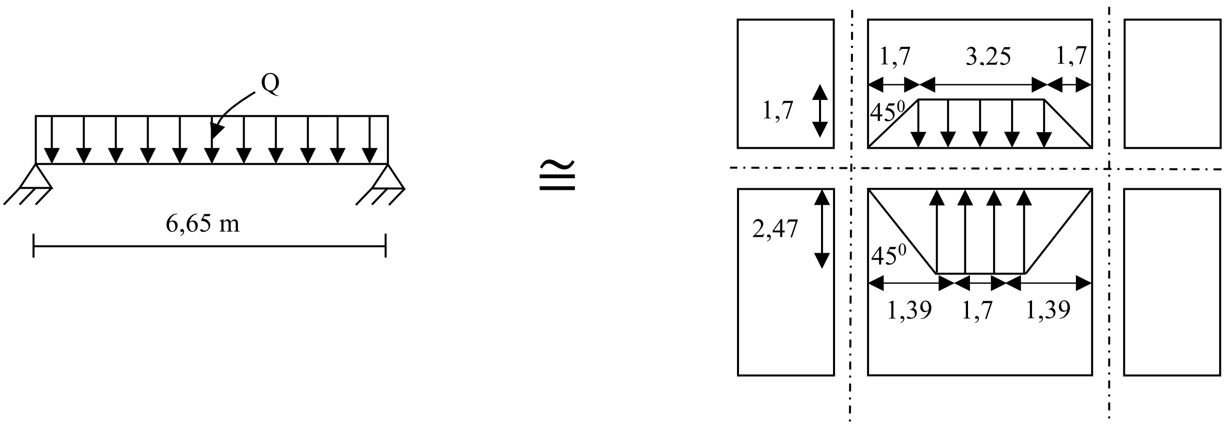


Figure VIII.5 : Répartition des charges sur les poutres selon les lignes

Calcul de Q' :

C'est la charge uniforme équivalente pour le calcul des moments.

$$Q' = \frac{Q}{2}\left[\left(1-\frac{L_{x1}^2}{3.L_{y1}^2}\right).L_{x1}+\left(1-\frac{L_{x2}^2}{L_{y1}^2}\right).L_{x2}\right]$$

Avec : Lx_1= 4,95 m

Ly_1= 6,65 m

Lx_2 = 3,4 m

Q = $67{,}85 KN/m^2$

Donc :

$$Q' = \frac{67{,}85}{2}\left[\left(1-\frac{(4{,}95)^2}{3.(6{,}65)^2}\right).4{,}95+\left(1-\frac{(3{,}4)^2}{(6{,}65)^2}\right).\ 3{,}4\right] = 221{,}91 KN.m$$

$$M_0 = \frac{Q'.L^2}{8} = \frac{221{,}91 \times 6{,}65^2}{8} = 1226{,}67 KN.m$$

a) **Calcul du ferraillage :**

- **En travée :**

$$M_t = 0{,}85 M_{0x} = 0{,}85 \times 1226{,}67 = 1042{,}66\ KN\ .m$$

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{M_t}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \dfrac{1042{,}66 \times 10^3}{50 \times 67{,}5^2 \times 14{,}17} = 0{,}322 < \mu_l = 0{,}392\ \rightarrow A'_s = 0 \rightarrow \beta = 0{,}861 \\ A_s = \dfrac{M_t}{\beta \times d \times \sigma_s} = \dfrac{1042{,}66 \times 10^3}{0{,}861 \times 67{,}5 \times 348} = 51{,}55\ cm^2/ml \end{cases}$$

On adopte : $\begin{cases} 1^{er}\ \ lit\ 4T25 \\ 2^{éme}\ lit\ 4T25 \\ 3^{éme}\ lit\ 4T20 \end{cases}$ $\quad A = 51{,}85\ cm^2$

- **En appuis :**

$$M_a = 0{,}4 M_0 = 0{,}4 \times 1226{,}67 = 490{,}66\ KN\ .m$$

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{M_a}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \dfrac{490{,}66 \times 10^3}{50 \times 67{,}5^2 \times 14{,}17} = 0{,}151 < \mu_l = 0{,}392\ \rightarrow A'_s = 0 \rightarrow \beta = 0{,}9175 \\ A_s = \dfrac{M_a}{\beta \times d \times \sigma_s} = \dfrac{490{,}66 \times 10^3}{0{,}9175 \times 67{,}5 \times 348} = 22{,}76\ cm^2/ml \end{cases}$$

On adopte : **4T20** (Fil) + **4T20** (chap) ; A =25.13 cm²

b. Sens transversal(x)

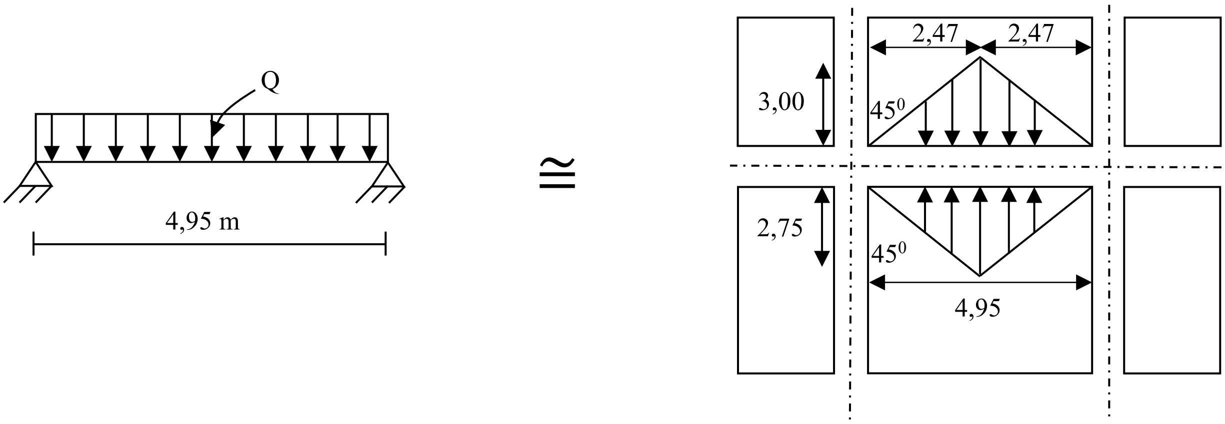


Figure VIII.5 : Répartition des charges sur les poutres selon les lignes

Calcul de Q' :

C'est la charge uniforme équivalente pour le calcul des moments.

$$\begin{cases} Q' = \dfrac{2}{3} \times Q \times L_{x1} = \dfrac{2}{3} \times 67{,}85 \times 4{,}95 = 223{,}90\ KN/m \\ M_0 = \dfrac{Q' \times l^2}{8} = \dfrac{223{,}90 \times 4{,}95^2}{8} = 685{,}76\ KN.m \end{cases}$$

b) Calcul du ferraillage :

➢ **En travée :**

$$M_t = 0{,}85 M_0 = 0{,}85 \times 685{,}76 = 582{,}89\ KN.m$$

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{M_t}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \dfrac{582{,}89 \times 10^3}{50 \times 67{,}5^2 \times 14{,}17} = 0{,}180 < \mu_l = 0{,}392 \rightarrow A'_s = 0 \rightarrow \beta = 0{,}900 \\ A_s = \dfrac{M_t}{\beta \times d \times \sigma_s} = \dfrac{582{,}89 \times 10^3}{0{,}900 \times 67{,}5 \times 348} = 27{,}57\ cm^2/ml \end{cases}$$

On adopte : $\begin{cases} 1^{er} & lit\ 4T20 \\ 2^{éme} & lit\ 4T16 \\ 3^{éme} & lit\ 4T16 \end{cases}$ $A = 24{,}13\ cm^2$

En appuis :

$$M_a = 0{,}4 = 0{,}4 \times 685{,}76 = 274{,}30 KN.m$$

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{M_a}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \dfrac{274{,}30 \times 10^3}{50 \times 67{,}5^2 \times 14{,}17} = 0{,}084 < \mu_l = 0{,}392 \rightarrow A'_s = 0 \rightarrow \beta = 0{,}956 \\ A_s = \dfrac{M_a}{\beta \times d \times \sigma_s} = \dfrac{274{,}30 \times 10^3}{0{,}956 \times 67{,}5 \times 348} = 12{,}21\ cm^2/ml \end{cases}$$

On adopte : **4T20** Soit **(A =12,47 cm²).**

VIII.6.1 Contraint de cisaillement :

- **Calcule de l'effort tranchant :**
- **Sens longitudinal :**

$$T = \frac{Q}{2}\left[\left(1-\frac{L_{x1}}{2L_y}\right).L_{x1}+\left(1-\frac{L_{x2}}{2L_y}\right).L_{x2}\right]$$

$$T = \frac{67,85}{2}\left[\left(1-\frac{4,95}{2.6,65}\right).4,95+\left(1-\frac{3,4}{2.6,65}\right).3,4\right] = 191,02\ KN$$

- **Sens transversal :**

$$T = \frac{Q}{2}.L_{X1} = \frac{67,85}{2}.4,95 = 167,92\ KN$$

Tmax =191,02 KN

$$\tau_u = \frac{T_{max}}{b.d} = \frac{191,02}{0,5\times 0,675\times 1000} = 0,56\ Mpa$$

$\bar{\tau}_u = min(0,10f_{c28}; 4MPa) = min(2,5; 4MPa) = 2,5\ Mpa$ … ….condition vérifiée

VIII.6.2 Armatures transversales :

a) Diamètre :

$$\varphi_t \leq \min(h/35\,;\varphi_l; b/10) = \min(21,42; 14; 50) = 14\ mm$$

on prend $\varphi_t = 10\ mm$

b) Espacement :

$$S_t \leq min\left(\frac{h}{4}; 12\varphi_l\right) = min(18,75; 16,80) = 16,80\ cm$$

On prend $S_t = 15\ cm$

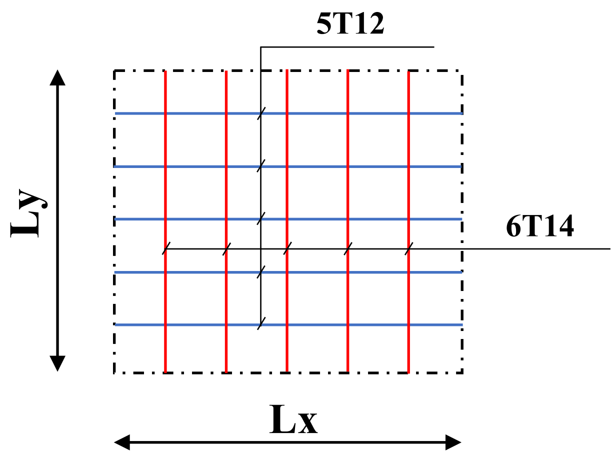
$$S_t \leq \frac{0,8.A_t.f_e}{b(\tau_u - 0.3f_{c28})}$$

$$A_t \geq \frac{b(\tau_u - 0.3f_{c28})S_t}{0,8.f_e} = \frac{(0,56 - 0.3\times 2,1)50\times 15}{0,8\times 400} = 0,16$$

Donc on utilise des armatures HA, Fe400, soit **4T10**, A=3.14cm²/m.

$$\frac{A_t.f_e}{b_0.S_t} \geq max(\tau_u/2\,; 0,4\ MPa) = max(0,28; 0,4\ MPa) = 0,28$$

$\frac{3,14.400}{50.15} = 1,67 > 0,28\ Mpa$ … … … … … … … … … … … … … … ….condion vérifiée



Figures VIII.7 : Disposition des armatures dans le radier par mètre linéaire

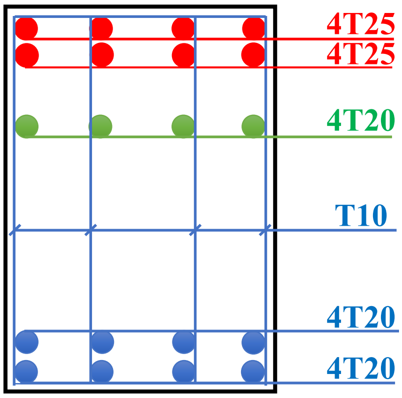


Figure VIII.8 Ferraillage de la poutre de libage (sens longitudinal)

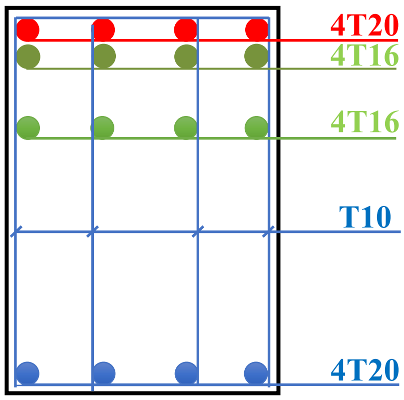


Figure VIII.9 Ferraillage de la poutre de libage (sens transversal)