

Calcul des fondations :**VIII.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 puisque de leurs 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 achevé, et d'autre part la force portante du sol. On a une contrainte admissible de sol de 1,50 bar à un ancrage de 2.00m.

- Le calcul des fondations se fait comme suit :

1- Dimensionnement à l' E.L.S $N_{ser} = G+Q$.

2- Ferrailage à l' E.L.U $N_u = 1,35 G+ 1,5 Q$.

Vu la hauteur de la construction et les charges apportées par la superstructure, ainsi que l'existence de plusieurs voiles dans cette construction, et la faible portance du sol, le dimensionnement des fondation 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
- ❖ Eviter les tassements différentiels.

VIII.2 Définition :

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

VIII.3 Calcul du radier :

- Les radiers sont des semelles de très grandes dimensions supportant toute la construction.

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

VIII.3.1 Pré dimensionnement du radier :

Le poids supporté par le radier est composé par G_T et le Q_T avec :

Superstructure : G_T : la charge permanente totale.

Q_T : la charge d'exploitation totale.

$$G_T = \sum_{i=1}^8 G_i = 37749.03 \text{ KN}$$

$$Q_T = \sum_{i=1}^8 Q_i = 4722.47 \text{ KN}$$

a) Combinaisons d'action :

$$\text{E.L.U: } N_U = 1,35G_T + 1,5Q_T = 58044.90 \text{ KN}$$

$$\text{E.L.S: } N_{\text{ser}} = G_T + Q_T = 42471.50 \text{ KN}$$

b) Surface du radier :

La surface du radier est donnée par la formule suivante : $\frac{N}{S} \leq \sigma_{\text{sol}}$

$$N = N_{\text{ser}} = 42471.50 \text{ KN}$$

$$S \geq N/\sigma_{\text{sol}} = 283.14 \text{ m}^2$$

On prend un débord de 50 cm de chaque coté dans les deux directions ce qui nous donne une surface d'assise $S_{\text{radier}} = 365 \text{ m}^2$.

VIII.3.2 Calcul de l'épaisseur du radier :

L'épaisseur nécessaire du radier sera déterminée à partir des conditions suivantes :

1^{er} condition:

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

$$V_u : \text{Effort tranchant ultime} : V_u = Q.L/2$$

$$L : \text{Longueur maximal d'une bande 1m} ; L = 4,65 \text{ m.}$$

$$Q_u = N_u / S = 58044.90/365 = 159.03 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Par ml: } Q_u = 159.03 \times 1 \text{ ml} = 159.03 \text{ KN/ml.}$$

$$V_u = 159.03 \times 4.65/2 = 369.75 \text{ KN.}$$

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

$$d \geq \frac{369.75 \times 10^{-3}}{0.06 \times 25 \times 1} = 0.25 \text{ m}$$

2^{ème} condition :

$$\frac{L}{25} \leq d \leq \frac{L}{20} ; L = 465 \text{ cm}$$

$$18.60 \leq d \leq 23.25 \text{ cm}$$

$$h = d + c = 23,25 + 5 = 28,25 \text{ cm} ; \text{ on prend : } h = 40 \text{ cm} ; d = 35 \text{ cm.}$$

VIII.3.3 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 :

$$L/9 \leq h \leq L/6 \longrightarrow 51.66 \text{ cm} \leq h \leq 77.5 \text{ cm}$$

On prend : $d=63 \text{ cm}$; $h = 75 \text{ cm}$; $b = 40 \text{ cm}$.

VIII.3.4 Vérification des contraintes du sol :

En tenant compte du poids propre du radier et de la poutre :

$$G_{\text{radier}} = \gamma_{\text{BA}} [h_r \times s_r + h_p \times b_p \times \sum L_i]$$

$$G_{\text{radier}} = 25 [0.4 \times 365 + 0.75 \times 0.4 \times 346.10] = \mathbf{6245.75 \text{ KN}}$$

$$\mathbf{E.L.S : N_{\text{ser}} = 6245.75 + 42471.50 = 48717.25 \text{ KN}}$$

$$\frac{N_{\text{ser}}}{S_{\text{radier}}} = \frac{48717.25}{365} = 133.47 \text{ KN/m}^2 < 150 \text{ KN/m}^2 \dots\dots\dots \text{condition vérifiée}$$

VIII.3.5 La longueur élastique :

La longueur élastique de la poutre est donnée par :

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

Avec: I : Inertie de la poutre : $I = bh^3/12 = 0,4 \times 0,75^3 / 12 = 0.014 \text{ m}^4$

E : Module d'élasticité du béton, $E = 3216420 \text{ t/m}^2$.

b : Largeur de la poutre $b=0,40 \text{ m}$.

K : Coefficient du raideur de sol $k = 500 \text{ t/m}^3$

$$L_e = \sqrt[4]{\frac{4 \times 3216420 \times 0,014}{500 \times 0,40}} = 5.47 \text{ m}$$

$$L_{\text{max}} = 4.65 \text{ m} < \frac{\pi}{2} \times L_e = 8.58 \text{ m} \dots\dots\dots \text{Condition vérifiée}$$

L_{max} : La longueur maximale entre nœuds 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 :**

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{N_{\text{ser}}}{S_{\text{radier}}} = \frac{48717.25}{365} = 133.47 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_{\text{rad.}} = \gamma_{\text{BA}} \times h = 25 \times 0.4 = 10 \text{ KN/m}^2$$

$$Q = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{rad.}} = 123.47 \text{ KN/m}^2$$

Donc la charge en « m^2 » à prendre en compte dans le calcul du ferrailage du radier est :

$$\mathbf{Q = 123.47 \text{ KN/m}^2}$$

VIII.5 Ferrailage du radier :**VIII.5.1 Ferrailage 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 ferrailage des dalles on a deux cas :

1^{er} cas :

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

Les moments sont données par :

$$M_{0x} = \mu_x \cdot q \cdot L_x^2 ; M_{0y} = \mu_y \cdot M_{0x}.$$

Moment en travée :

$$M_t = 0,85M_0 \dots \dots \dots \text{panneau de rive.}$$

$$M_t = 0,75M_0 \dots \dots \dots \text{panneau intermédiaire.}$$

Moment sur appuis :

$$M_a = 0,3M_0 \dots \dots \dots \text{appuis de rive.}$$

$$M_a = 0,5M_0 \dots \dots \dots \text{appuis intermédiaire}$$

2^{ème} 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 (le plus grand).

VIII.5.2 Exemple de calcul :

$$\alpha = l_x / L_y = 3.80/4,65 = 0,82 > 0,4$$

La dalle porte dans les deux sens.

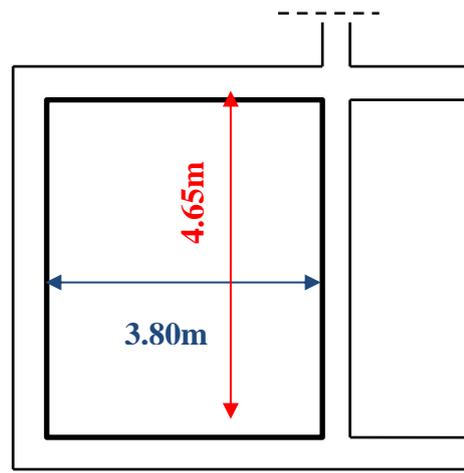
$$\alpha = 0.82 \longrightarrow \mu_x = 0.0539 ; \mu_y = 0.6313$$

$$M_{0x} = \mu_x \times Q \times l_x^2$$

$$M_{0x} = 0.0539 \times 123.47 \times 3.80^2 = \mathbf{96.10 \text{ KN.m}}$$

$$M_{0y} = \mu_y \times M_{0x}$$

$$M_{0y} = 0.6313 \times 96.10 = \mathbf{60.66 \text{ KN.m}}$$



En travée :➤ **Sens L_x :**

$$M_{tx} = 0,85M_{0x} = 0,85 \times 96.10 = 81.69 \text{ KN.m}$$

$$\mu = \frac{M_{tx}}{bd^2.f_{bc}} = \frac{81.69 \times 10^3}{100(35)^2 \times 14,17} = 0,046 < \mu_1 = 0,392 \Rightarrow A' = 0$$

$$\mu = 0,046 \rightarrow \beta = 0,976$$

$$A = \frac{M_{tx}}{\beta.d.\sigma_s} = \frac{81.69 \times 10^3}{0,976 \times 35 \times 348} = 6.87 \text{ cm}^2/\text{m}$$

On adopte **5T14 / ml ; A = 7.70 cm²/ml ; St = 20 cm**

➤ **Sens L_y :**

$$M_{ty} = 0,85M_{0y} = 0,85 \times 60.66 = 51.56 \text{ KN.m}$$

$$\mu = \frac{M_{ty}}{bd^2.f_{bc}} = \frac{51.56 \times 10^3}{100(35)^2 \times 14,17} = 0,030 < \mu_1 = 0,392 \Rightarrow A' = 0$$

$$\mu = 0,030 \rightarrow \beta = 0,985$$

$$A = \frac{M_{ty}}{\beta.d.\sigma_s} = \frac{51.56 \times 10^3}{0,985 \times 35 \times 348} = 4.30 \text{ cm}^2/\text{m}$$

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

Sur appuis :➤ **Appui de rive :**

$$M_{a \text{ rive}} = 0.3 \times M_{0x} = 0.3 \times 96.10 = 28.83 \text{ KN.m}$$

$$\mu = 0,016 \rightarrow \beta = 0,992$$

$$A = 2.38 \text{ cm}^2/\text{m}$$

On adopte : **4T12 / ml ; A = 4.52 cm²/ml ; St = 25 cm**

➤ **Appui intermédiaire :**

$$M_{a \text{ inter.}} = 0.5 \times M_{0x} = 0.5 \times 96.10 = 48.05 \text{ kN.m}$$

$$\mu = 0,028 \rightarrow \beta = 0,986$$

$$A = 4.01 \text{ cm}^2/\text{m}$$

On adopte : **4T12 / ml ; A = 4.52 cm²/ml ; St = 25 cm**

VIII.5.3 Vérification de l'espacement :

Dans le sens le plus sollicité : **St ≤ min [3h ; 33 cm]**

St ≤ 33 cmcondition vérifié

VIII.6 Ferrailage des poutres de libage :

Le rapport $\alpha = L_x/L_y > 0,4$ pour tous les panneaux constituant le radier, donc les charges transmises par chaque panneau se subdivise en deux charges trapézoïdales et deux

charges triangulaires pour le calcul du ferrailage on prend le cas le plus défavorable dans chaque sens et on considère des travées isostatiques.

a- Sens longitudinal (Y) :

$$L_{\max} = 4.65 \text{ m}$$

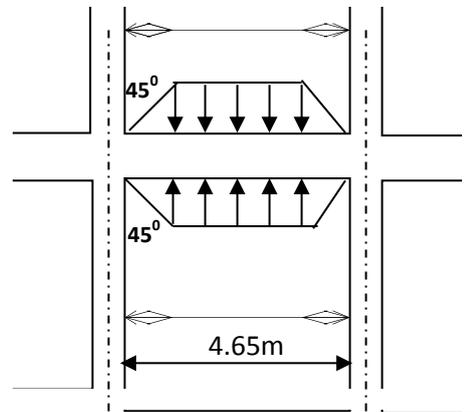
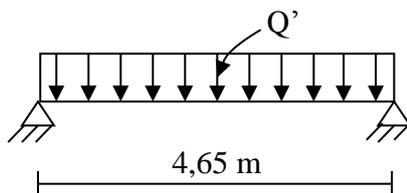


Figure VIII.1 : Répartition des charges sur les poutres selon les lignes de rupture

Calcul de Q' :

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

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

Avec : $L_{x1} = 3.05\text{m}$

$$L_{y1} = 4.65\text{m}$$

$$L_{x2} = 3.70\text{m}$$

$$Q = 123.47 \text{ KN/m}^2$$

Donc :
$$Q' = \frac{123.47}{2} \left[\left(1 - \frac{3.05^2}{3 \times 4.65^2} \right) . 3.05 + \left(1 - \frac{3.70^2}{3 \times 4.65^2} \right) . 3.70 \right] = 342.29 \text{ wKN/m}$$

$$M_0 = \frac{Q'.L^2}{8} = \frac{342.29 \times 4.65^2}{8} = 925.14 \text{ KN.m}$$

a.1 Calcul du ferrailage :**En travée :**

$$M_t = 0.85M_o = 0.85 \times 925.14 = 786.36 \text{ KN.m} ; \quad b = 40 \text{ cm} ; \quad h = 75 \text{ cm} ; \quad d = 0.9.h = 67.5 \text{ cm}$$

$$\mu = \frac{M_t}{b.d^2.\sigma_{bc}} = \frac{786.36 \times 10^3}{40 \times (67.5)^2 \times 14.17} = 0.30 < \mu_1 = 0.392 \rightarrow A' = 0$$

$$\beta = 0.816$$

$$A = M / \sigma_s . \beta . d$$

$$A = 41.02 \text{ cm}^2$$

$$\text{on adopte: } \begin{cases} 1^{\text{ere}} \text{ lit } 4\text{T}25 \\ 2^{\text{eme}} \text{ lit } 4\text{T}20 ; \quad A = 44.77 \text{ cm}^2 \\ 3^{\text{eme}} \text{ lit } 4\text{T}20 \end{cases}$$

En appuis :**- Appuis intermédiaires:**

$$M_a = 0.5.M_o = 0.5 \times 925.14 = 462.57 \text{ KN.m} ; \quad b = 40 \text{ cm} ; \quad h = 75 \text{ cm} \quad d = 0.9h = 67.5 \text{ cm}$$

$$\mu = 0.18 < \mu_1 = 0.392 \Rightarrow (A' = 0)$$

$$\mu = 0.18 \rightarrow \beta = 0.900$$

$$A_s = 21.88 \text{ cm}^2$$

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

- Appuis de rive:

$$M_a = 0.3 \times M_o = 0.3 \times 925.14 = 277.54 \text{ KN.m} ; \quad b = 40 \text{ cm} \quad h = 75 \text{ cm} \quad d = 0.9h = 67.5 \text{ cm}$$

$$\mu = 0.10 < \mu_1 = 0.392 \Rightarrow (A' = 0)$$

$$\mu = 0.10 \rightarrow \beta = 0.947$$

$$A_s = 12.47 \text{ cm}^2$$

On adopte : **4T20 ; A = 12.57 cm².**

b- Sens transversal(X) :

$$L_{\max} = 3.05 \text{ m.}$$

$$Q' = (1/2)2/3.Q.L_{x1}$$

$$Q' = 2/3 \times 123.47 \times 3.05 = 251.06 \text{ KN/m}$$

$$M_o = Q'(L_{x1})^2 / 8 = 291.93 \text{ KN.m}$$

b.1 Calcul du ferrailage :**En travée :**

$$M_t = 0.85M_o = 0.85 \times 291.93 = 248.14 \text{ KN.m} ; \quad b = 40 \text{ cm} ; \quad h = 75 \text{ cm} ; \quad d = 0.9.h = 67.5 \text{ cm}$$

$$\mu = \frac{M_t}{b \cdot d^2 \cdot \sigma_{bc}} = \frac{248.14 \times 10^3}{40 \times (67.5)^2 \times 14,17} = 0.096 < \mu_1 = 0.392 \rightarrow A' = 0$$

$$\beta = 0,949$$

$$A = M / \sigma_s \cdot \beta \cdot d$$

$$A = 11.14 \text{ cm}^2$$

on adopte : (8T14) ; A=12.32 cm²

En appuis :**- Appuis intermédiaires:**

$$M_a = 0.5 \cdot M_o = 0,5 \times 291.93 = 145.97 \text{ KN.m}$$

$$\mu = 0.056 < \mu_1 = 0.392 \Rightarrow (A' = 0)$$

$$\mu = 0.056 \rightarrow \beta = 0.971$$

$$A_s = 6.40 \text{ cm}^2$$

On adopte : **(4T16) ; A = 8.04 cm².**

- Appuis de rive:

$$M_a = 0.3 \times M_o = 0.3 \times 291.93 = 87.58 \text{ KN.m}$$

$$\mu = 0.034 < \mu_1 = 0.392 \Rightarrow (A' = 0)$$

$$\mu = 0.034 \rightarrow \beta = 0.983$$

$$A_s = 3.80 \text{ cm}^2$$

On adopte : **4T14 ; A = 6.16 cm².**

VIII .6.1 Armature de peau :

Selon le BAEL 91 : $h_a < 2 (80 - 0,1 f_c) = 80 \text{ cm}$.

Dans notre cas $h_a = 75 \text{ cm}$ vue que il n'est pas nécessaire d'ajouter des armatures supplémentaires sur les parois de la poutre (armatures de peau).

VIII.7 Contrainte de cisaillement :**❖ Calcule de l'effort tranchant :****➤ Sens longitudinal :**

$$T = \frac{Q}{2} \left[\left(1 - \frac{L_{x1}}{2L_y} \right) L_{x1} + \left(1 - \frac{L_{x2}}{2L_y} \right) L_{x2} \right] = \frac{123.47}{2} \left[\left(1 - \frac{3.05}{2 \times 4.65} \right) 3.05 + \left(1 - \frac{3.70}{2 \times 4.65} \right) 3.70 \right]$$

$$T = 246.24 \text{ KN}$$

➤ Sens transversal :

$$T = \frac{Q}{2} \cdot L_{x1} = \frac{123.47}{2} \times 3.05$$

$$T = 188.29 \text{ KN}$$

$T_{max} = 246.24 \text{ KN}$

$$\tau_u = \frac{T_{max}}{b \cdot d} = \frac{246.24}{0,40 \times 0,675 \times 1000} = 0.912 \text{ MPa.}$$

$$\bar{\tau}_u = \min(0,10f_{c28}; 4 \text{ MPa}) = 2.50 \text{ MPa.}$$

$\tau_u = 0.912 \text{ MPa} < \bar{\tau}_u = 2.50 \text{ MPa}$condition vérifiée.

VIII.8 Armatures transversales :

a -Diamètre : $\phi_t \leq \min(h/35; \phi_l; b/10) = \min(21.43 \text{ mm}; 14 \text{ mm}; 40 \text{ mm}) = 14 \text{ mm}$
 on prend $\phi_t = 10 \text{ mm}$

b- Espacement :

$$S_t \leq \min\left(\frac{h}{4}, 12\phi_l\right) = \min(18.75 \text{ cm}; 16.80 \text{ cm}) = 16.80 \text{ cm}$$

on prend $S_t = 15 \text{ cm}$.

$$S_t \leq \frac{0.8 \cdot A_t \cdot f_e}{b(\tau_u - 0.3f_{c28})} \Rightarrow f_e \geq \frac{b(\tau_u - 0.3f_{c28})S_t}{0.8A_t}$$

$$f_e \geq \frac{40(0.91 - 0.3 \times 2.1)15}{0.8 \times 3.14} = 66.88 \text{ MPa.}$$

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

$$\frac{A_t \cdot f_e}{b_0 \cdot S_t} \geq \max(\tau_u/2; 0,4 \text{ MPa}) = \max(0,46; 0,4 \text{ MPa}) = 0,46 \text{ MPa}$$

$$\frac{3.14 \times 400}{40 \times 15} = 2.09 > 0.46 \text{ MPa}$$
.....conditi on vérifiée.

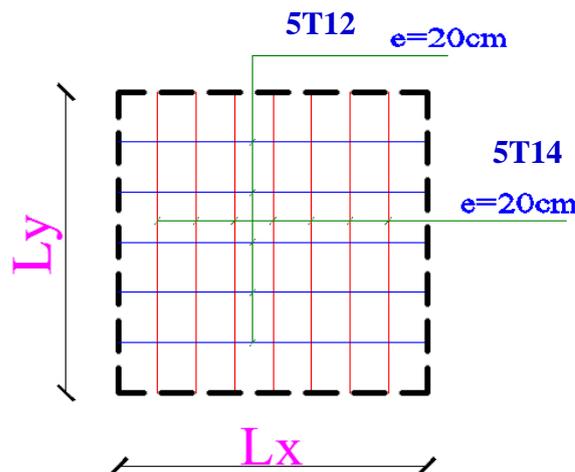


Figure VIII.2 : Disposition des armatures dans le radier par mètre linéaire



Figure VIII.3 Ferrailage de la poutre de libage (sens longitudinal)



Figure VIII.4 Ferrailage de la poutre de libage (sens transversal)