

VIII.1 Introduction :

L'instabilité des constructions lors d'un séisme majeur est souvent causée par le sous-dimensionnement des fondations. Celles-ci doivent transmettre au sol, les charges verticales et les charges sismiques horizontales. Cela exige d'une part une liaison efficace des fondations avec la superstructure, et d'autre part, un bon ancrage au niveau du sol.

VIII.2 Le voile périphérique :

Afin de donner plus de rigidité à la partie sous-sol de la construction et une capacité de reprendre les efforts de poussée des terres à ce niveau, il est nécessaire de prévoir un voile périphérique armé d'un double quadrillage d'armatures.

D'après le RPA 99/2003, le voile périphérique doit avoir les caractéristiques minimales suivantes :

- L'épaisseur ≥ 15 cm ;
- Les armatures sont constituées de deux nappes ;
- Le pourcentage minimal des armatures est de 0,1% dans les deux sens (horizontal et vertical) ;
- Un recouvrement de 40Φ pour le renforcement des angles.

On adopte $e = 20$ cm, la hauteur du voile périphérique = 6,12 m ($=3.06*2s/sol$) et on fait le calcul pour une bande de 1 m de largeur :

- Q : surcharge d'exploitation = 1,5 kN/m² ;
- γ : poids volumique de la terre = 17 kN/m³ ;
- Φ : angle de frottement interne du sol = 35° ;
- Ka : coefficient de poussée des terres : $Ka = \tan^2(\pi/4 - \Phi/2)$

On a : $\beta = \lambda = 0^\circ$

$$Ka' = \frac{Ka}{\cos(\beta - \lambda)} = Ka = \tan^2(45^\circ - 17,5^\circ) = 0,271$$

1. Calcul des charges :

On prend comme hypothèse pour le calcul des voiles, un encastrement parfait au niveau du massif des fondations et libre à l'autre côté.

a) Poussée des terres :

$$p_1 = Ka \times \gamma \times h = 0,271 \times 1,7 \times 6,12 = 2,82 \text{ t/ml}$$

b) Poussée supplémentaire due à la surcharge :

$$p_2 = Ka' \times q \times h = 0,271 \times 0,15 \times 6,12 = 0,24 \text{ t/ml}$$

Le diagramme des pressions correspondant à p_2 est alors un rectangle de hauteur h et de base $Ka' \cdot \Phi$ et la résultante p_2 passe au milieu de la hauteur du mur.

c) la charge pondérée :

$$Q = 1,35p_1 + 1,5p_2 = 4,17 \text{ t/ml}$$

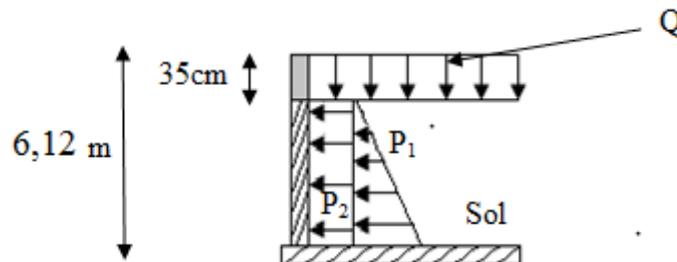


Figure VIII 1 : Coupe explicative des charges que subit le voile périphérique.

2. Calcul des sollicitations :

L'étude se fait pour le cas d'une dalle uniformément chargée.

$$\begin{cases} L_x = 6,12 - 0,35 = 5,77 \text{ m} \\ L_y = 4,1 - 0,4 = 3,7 \text{ m} \end{cases} \Rightarrow \alpha = \frac{L_x}{L_y} = 1,6 > 0,4$$

Ce qui veut dire que la dalle qui est appuyée sur 4 cotés travaille dans les deux sens.

$$\begin{aligned} \text{Avec : } \begin{cases} \alpha = 0,8 \\ \nu = 0 \text{ (ELU)} \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} \mu_x = 0,068 \\ \mu_y = 0,432 \end{cases} \begin{cases} M_{0x} = \mu_x \times q \times L_x^2 \\ M_{0y} = \mu_y \times M_{0x} \end{cases} \\ &\Rightarrow \begin{cases} M_{0x} = 0,068 \times 2,08 \times 5,77^2 = 4,71 \text{ t.m} \\ M_{0y} = 0,423 \times 1,04 = 0,45 \text{ t.m} \end{cases} \end{aligned}$$

Les valeurs des moments en travées sont : $\begin{cases} M_{tx} = 0,85M_{0x} = 4 \text{ t.m} \\ M_{ty} = 0,85M_{0y} = 0,38 \text{ t.m} \end{cases}$

➤ Vérification :

$$M_{ty} \geq \frac{M_{tx}}{4} \Leftrightarrow 1 \text{ t.m} > 0,22 \text{ t.m}$$

3. Calcul du ferrailage :

- Sens x :

$$M_{tx} = 0,88 \text{ t.m} ; b = 100 \text{ cm} ; h = 20 \text{ cm} ; d = 18 \text{ cm}$$

$$\mu = \frac{M_{tx}}{f_{bc} \times d^2 \times b} = \frac{4 \times 10^4}{14,20 \times 18^2 \times 100} = 0,086 < \mu_l = 0,392$$

$$\rightarrow \begin{cases} A' = 0 \\ \mu = 0,020 \rightarrow \beta = 0,990 \end{cases}$$

$$A_s = \frac{M_{tx}}{\beta \times d \times \sigma_s} = \frac{4 \times 10^4}{0,990 \times 18 \times 348} = 6,45 \text{ cm}^2$$

- Sens-y :

$$M_{ty} = 0,38 \text{ t.m} ; b = 100 \text{ cm} ; h = 20 \text{ cm} ; d = 18 \text{ cm}$$

$$\mu = \frac{M_{ty}}{f_{bc} \times d^2 \times b} = \frac{0,38 \times 10^4}{14,20 \times 18^2 \times 100} = 0,008 < \mu_l = 0,392$$

$$\rightarrow \begin{cases} A' = 0 \\ \mu = 0,008 \rightarrow \beta = 0,996 \end{cases}$$

$$A_s = \frac{M_{ty}}{\beta \times d \times \sigma_s} = \frac{0,38 \times 10^4}{0,996 \times 18 \times 348} = 0,61 \text{ cm}^2$$

➤ Condition de non fragilité :

- Sens L_y :

D'après le RPA 99/2003 :

$$A_{y \min} = 0,1\% b \times h = 0,1\% \times 100 \times 20 = 2 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

D'après le BAEL 91 :

$$A_{y \min} = 8h = 8 \times 0,20 = 1,6 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$$\text{Donc : } A_{\text{adoptée}} = \max\{A_{t \text{ cal}} ; A_{\min \text{ RPA}} ; A_{\min \text{ BAEL}}\} = 2 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

On prend : 5T10 $\rightarrow A_{ty} = 3,93 \text{ cm}^2/\text{ml}$

- Sens L_x :

D'après le RPA 99/2003 :

$$A_{x \min} = 0,1\%b \times h = 0,1\% \times 100 \times 20 = 2 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

D'après le BAEL 91 :

$$A_{x \min} = A_{y \min} \left(\frac{3 - \alpha}{2} \right) = 2 \left(\frac{3 - 0,7}{2} \right) = 2,30 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$$\text{Donc : } A_{adoptée} = \max\{A_{t \text{ cal}} ; A_{\min \text{ RPA}} ; A_{\min \text{ BAEL}}\} = 2,30 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$$\text{On prend : } 5T10 \rightarrow A_{tx} = 3,93 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

4. Les vérifications :

a) Vérification de l'effort tranchant :

On a $\alpha = 0,7 > 0,4$ donc :

$$\begin{cases} V_x = Q_u \times \frac{L_x}{2 \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)} = 4,17 \times \frac{5,77}{2 \left(1 + \frac{0,7}{2}\right)} = 8,91 \text{ t} \\ V_y = Q_u \times \frac{L_x}{3} \leq V_x \Rightarrow 4,17 \times \frac{5,77}{3} = 8,02 \text{ t} < V_x = 8,91 \text{ t} \end{cases}$$

$$V_x = V_{\max} = 8,91 \text{ t}$$

$$\tau_u = \frac{V_{\max}}{db_0} = \frac{8,91 \times 10^4}{18 \times 100 \times 10^2} = 0,49 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ultime} = \frac{0,2 \times f_{c28}}{\gamma_b} = \frac{0,2 \times 25}{1,5} = 3,33 \text{ MPa}$$

$\tau_u < \tau_{ultime} \Rightarrow$ La dalle est bétonnée sans reprise dans son épaisseur alors les armatures transversales ne sont pas nécessaires.

b) Vérification des contraintes à l'E.L.S :

$$\text{Avec : } \begin{cases} \alpha = 0,7 \\ \nu = 0,2 \text{ (ELS)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mu_x = 0,074 \\ \mu_y = 0,582 \end{cases}$$

$$Q_{ser} = p_1 + p_2 = 3,06 \text{ t/ml}$$

$$\begin{cases} M_{0x} = \mu_x \times q \times L_x \\ M_{0y} = \mu_y \times M_{0x} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M_{0x} = 0,074 \times 3,06 \times 5,77 = 1,31 \text{ t.m} \\ M_{0y} = 0,582 \times 1,31 = 0,76 \text{ t.m} \end{cases}$$

Les valeurs des moments en travées sont : $\begin{cases} M_{tx} = 0,85M_{0x} = 1,11 \text{ t.m} \\ M_{ty} = 0,85M_{0y} = 0,64 \text{ t.m} \end{cases}$

- Sens x :

a) Position de l'axe neutre :

$$\frac{b}{2}y^2 + 15A'(y - c) - 15.A(d - y) = 0 \rightarrow 50y^2 + 58,95y - 1061,1 = 0$$

$$\rightarrow y = 4,05 \text{ cm}$$

b) Moment d'inertie :

$$I = \frac{b}{3}y^3 + 15A(d - y)^2 = 13686,15 \text{ cm}^4 = 27372,3 \text{ cm}^4$$

c) Détermination des contraintes dans le béton comprimé σ_{bc} :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser}}{I} \times y = \frac{1,11 \times 10^4}{13686,15} \times 4,05 = 3,28 \text{ MPa}$$

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0,6f_{c28} = 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bc} = 3,28 \text{ MPa} < \bar{\sigma}_{bc} = 15 \text{ MPa} \text{ Condition vérifiée}$$

d) Détermination des contraintes dans l'acier tendue σ_{st} :

$$\sigma_{st} = \min \left[\frac{2}{3}f_e ; 110\sqrt{\eta f_{t28}} \right]; \text{ Fissuration préjudiciable}$$

η : Coefficient de fissuration pour HA $\Phi \geq 6 \text{ mm}$; $\eta = 1,6$

$$\bar{\sigma}_{st} = \min(266,67 \text{ MPa} ; 201,63 \text{ MPa}) = 201,63 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{st} = \eta \frac{M_{ser}}{I} (d - y) = 15 \times \frac{1,11 \times 10^4}{13686,15} \times (18 - 4,05) = 169,71 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{st} = 169,71 \text{ MPa} < \bar{\sigma}_{st} = 201,63 \text{ MPa} ; \text{ Condition vérifiée}$$

Donc les armatures calculées à l'ELU conviennent

• Sens-y :

a) Position de l'axe neutre :

$$\frac{b}{2}y^2 + 15A'(y - c) - 15.A(d - y) = 0 \rightarrow y = 4,05 \text{ cm}$$

b) Moment d'inertie :

$$I = \frac{b}{3}y^3 + 15A(d - y)^2 = 13686,15 \text{ cm}^4$$

c) Détermination des contraintes dans le béton comprimé σ_{bc} :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser}}{I} \times y = \frac{0,64 \times 10^4}{13686,15} \times 4,05 = 1,89 MPa$$

$$\overline{\sigma}_{bc} = 0,6f_{c28} = 15 MPa$$

$$\sigma_{bc} = 1,89 MPa < \overline{\sigma}_{bc} = 15 MPa \text{ Condition vérifiée}$$

d) Détermination des contraintes dans l'acier tendue σ_{st} :

$$\sigma_{st} = \eta \frac{M_{ser}}{I} (d - y) = 15 \times \frac{0,64 \times 10^4}{13686,15} \times (18 - 4,05) = 97,85 MPa$$

$$\sigma_{st} = 97,85 MPa < \overline{\sigma}_{st} = 201,63 MPa ; \text{ Condition vérifiée}$$

Donc les armatures calculées à l'ELU conviennent.

Le voile périphérique sera ferrailé en deux nappes avec 5T10 = 3,93 cm²/ml chacune est avec un espacement St = **20 cm**.

VIII.3 Etude des fondations :

Les fondations d'une construction sont constituées par les parties de l'ouvrages 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 leur bonne conception et réalisation découle la bonne tenue de l'ensemble.

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

D'après le rapport du sol notre terrain a une contrainte admissible de 2,00 bars à un ancrage de 2,20 m.

- Pour qu'il n'y a pas chevauchement entre deux fondations, il faut au minimum une distance de 40 cm ;
- Le béton de propreté prévu pour chaque semelle aura 10 cm d'épaisseur ;
- Le calcul des fondations se fait comme suit :
 1. Dimensionnement à l'ELS ;
 2. Ferrailage à l'ELU.

Le choix du type des fondations dépend de :

- Type d'ouvrage à construire ;
- La nature et l'homogénéité du bon sol ;
- La capacité portante du terrain de fondation ;
- La raison économique ;
- La facilité de réalisation.

VIII.3.1 - Choix du type de fondations :

Avec une capacité portante du terrain égale à 2,00 bars, Il y a lieu de projeter à priori, des fondations superficielles de type :

- Semelles isolées ;
- Semelles filantes ;
- Radier général.

Commençant par les semelles isolées, pour cela on procède à une première vérification qui est : la surface des semelles doit être inférieure à 50% de la surface totale du bâtiment $\left(S_{semelle} / S_{bâtiment} < 50\% \right)$.

La surface de la semelle est donnée par : $S \geq N / \sigma_{sol}$

Avec : S : la surface totale de la semelle ;

$$\sigma_{sol} = 2 \text{ bar} = 20 \text{ t/m}^2$$

$$\begin{cases} N_u = 1302,23 \text{ t} \Rightarrow S = 65,11 \text{ m}^2 \\ N_{ser} = 936,24 \text{ t} \Rightarrow S = 46,81 \text{ m}^2 \end{cases}$$

VIII.3.1.1 - Vérification du chevauchement :

La surface du bâtiment est de : $S = 251,6 \text{ m}^2$

$$\frac{S_{semelle}}{S_{bâtiment}} = 19 \% < 50\% ; \text{Condition vérifiée}$$

La surface totale de la semelle ne dépasse pas 50% de la surface d'emprise du bâtiment, et vu la nature de notre sol, ainsi que l'existence des voiles périphériques dans cette construction, une semelle filante a été optée comme type de fondation.

VIII.3.2 - Définition de la semelle filante :

Une semelle filante est une semelle continue qui supporte plusieurs colonnes ou bien un mur porteur. Un des principaux avantages de ce type de semelle est qu'elle est mieux adaptée à des sols moins homogènes, car la surface de contact est plus importante ce qui limite le risque de tassement différentiel, en d'autres termes, des tassements plus importants à certains endroits entraînant une instabilité d'ensemble.

VIII.3.3 - Pré dimensionnement des semelles :

1. Semelle continue sous mur voile (semelle filante) :

semelle	combinaison		Poteaux						
			P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
S ₁ (File 6)	G + Q	N (t)	11,49	14,49	16,72	18,07	16,11	13,40	11,91
		M (t. m)	0,102	0,062	0,126	0,164	0,225	0,206	0,153
	1,35 G +1,5 Q	N (t)	7,560	15,937	13,480	12,469	18,182	14,676	8,224
		M (t. m)	0,215	0,328	0,400	0,415	0,400	0,328	0,149
	G + Q + E	N (t)	16,095	22,270	9,945	20,277	24,339	11,774	20,211
		M (t. m)	0,331	0,399	0,445	0,456	0,453	0,416	0,306
	0,8 G + E	N (t)	14,58	18,633	6,838	17,552	20,073	8,376	18,566
		M (t. m)	0,267	0,301	0,324	0,303	0,331	0,314	0,263
S ₂ (File 5)	G + Q	N (t)	11,761	24,18	62,16	16,16	24,14	76,60	12,17
		M (t.m)	0,027	0,038	0,099	0,028	0,043	0,095	0,012
	1,35 G +1,5 Q	N (t)	16,163	33,30	49,84	22,30	33,34	95,04	16,61
		M (t. m)	0,038	0,056	0,139	0,039	0,08	0,134	0,017
	G + Q + E	N (t)	20,316	38,87	62,93	27,51	46,97	74,89	13,89
		M (t. m)	0,156	0,139	0,069	0,129	0,120	0,096	0,182
	0,8 G + E	N (t)	16,48	30,49	40,19	21,68	38,15	48,57	10,67
		M (t. m)	0,168	0,155	0,103	0,140	0,137	0,144	0,188
S ₃ (File 1)	G + Q	N (t)	6,74	10,76	10,56	5,82	/	/	/
		M (t.m)	0,157	0,224	0,248	0,229	/	/	/
	1,35 G +1,5 Q	N (t)	9,19	14,74	13,98	8,04	/	/	/
		M (t. m)	0,218	0,311	0,345	0,319	/	/	/
	G + Q + E	N (t)	20,48	17,83	23,53	7,92	/	/	/
		M (t. m)	0,051	0,147	0,2	0,171	/	/	/
	0,8 G + E	N (t)	18,78	15,56	20,16	5,95	/	/	/
		M (t. m)	0,01	0,07	0,10	0,08	/	/	/
S ₄ (File A)	G + Q	N (t)	6,74	10,23	8,89	15,69	11,76	5,58	/
		M (t.m)	0,157	0,028	0,016	0,05	0,04	0,155	/
	1,35 G +1,5 Q	N (t)	9,18	14	12,18	21,50	16,16	7,56	/
		M (t. m)	0,217	0,04	0,151	0,063	0,053	0,215	/
	G + Q + E	N (t)	20,48	16,46	22,45	17,53	20,36	16,05	/
		M (t. m)	0,052	0,168	0,24	0,24	0,156	0,329	/
	0,8 G + E	N (t)	18,69	13,41	19,72	12,77	16,48	14,72	/
		M (t. m)	0,01	0,162	0,21	0,25	0,148	0,258	/
S ₅ (File D)	G + Q	N (t)	5,85	18,21	15,24	11,51	16,16	9,11	/
		M (t.m)	0,229	0,09	0,06	0,013	0,028	0,298	/
	1,35 G +1,5 Q	N (t)	8,04	25,23	21,08	15,91	22,30	12,45	/
		M (t. m)	0,32	0,127	0,082	0,02	0,040	0,42	/
	G + Q + E	N (t)	7,92	21,09	35,84	16,2	27,51	20,29	/
		M (t. m)	0,171	0,104	0,117	0,135	0,13	0,45	/
	0,8 G + E	N (t)	5,87	14,06	31,14	11,99	21,68	16,50	/
		M (t. m)							

		M (t. m)	0,162	0,13	0,11	0,14	0,14	0,33	/
--	--	----------	-------	------	------	------	------	------	---

Tableau VIII.1 : les sollicitations des poteaux appliquées sur les semelles sous mur
voile

semelle	combinaison		Voiles					
			V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆
S ₁ (File 6)	G + Q	N (t)	18,07	20,98	22,73	20,17	16,65	14,71
		M (t.m)	0,125	0,113	0,113	0,107	0,121	0,09
	1,35 G + 1,5 Q	N (t)	21,03	20,81	17,53	23,68	22,68	20,01
		M (t.m)	0,21	0,26	0,28	0,28	0,28	0,21
	G + Q + E	N (t)	28,99	28,99	26,40	31,69	31,69	26,31
		M (t.m)	0,17	0,20	0,21	0,25	0,21	0,16
	0,8 G + E	N (t)	24,25	24,25	22,85	26,14	26,14	25,11
		M (t.m)	0,11	0,12	0,13	0,13	0,12	0,10
S ₂ (File 5)	G + Q	N (t)	31,48	/	/	31,43	/	13,15
		M (t.m)	0,012	/	/	0,013	/	0,012
	1,35 G + 1,5 Q	N (t)	39,36	/	/	43,41	/	16,61
		M (t.m)	0,02	/	/	0,02	/	0,02
	G + Q + E	N (t)	50,70	/	/	58,22	/	15,12
		M (t.m)	0,07	/	/	0,07	/	0,183
	0,8 G + E	N (t)	38,79	/	/	46,59	/	10,71
		M (t.m)	0,07	/	/	0,09	/	0,19
S ₃ (File 1)	G + Q	N (t)	14,01	14,01	13,76	/	/	/
		M (t.m)	0,03	0,04	0,04	/	/	/
	1,35 G + 1,5 Q	N (t)	19,18	19,18	18,88	/	/	/
		M (t.m)	0,04	0,05	0,05	/	/	/
	G + Q + E	N (t)	26,68	30,64	32,64	/	/	/
		M (t.m)	0,08	0,09	0,09	/	/	/
	0,8 G + E	N (t)	24,34	26,25	24,25	/	/	/
		M (t.m)	0,06	0,07	0,08	/	/	/
S ₄ (File A)	G + Q	N (t)	13,32	13,32	20,43	/	15,31	/
		M (t.m)	0,03	0,04	0,04	/	0,04	/
	1,35 G + 1,5 Q	N (t)	18,23	18,23	28	/	21,05	/
		M (t.m)	0,04	0,05	0,05	/	0,05	/
	G + Q + E	N (t)	26,68	29,24	30,05	/	27,62	/
		M (t.m)	0,07	0,08	0,09	/	0,12	/
	0,8 G + E	N (t)	24,34	25,67	25,67	/	21,42	/
		M (t.m)	0,06	0,07	0,07	/	0,11	/
S ₅ (File D)	G + Q	N (t)	23,72	/	17,86	22,07	/	/
		M (t.m)	0,02	/	0,013	0,02	/	/
	1,35 G + 1,5 Q	N (t)	32,85	/	27,45	31,01	/	/
		M (t.m)	0,03	/	0,02	0,02	/	/
	G + Q + E	N (t)	29,40	/	45,68	35,83	/	/
		M (t.m)	0,10	/	0,05	0,07	/	/
	0,8 G + E	N (t)	17,97	/	32,27	27,83	/	/
		M (t.m)	0,12	/	0,06	0,07	/	/

Tableau VIII.2 : les sollicitations des voiles appliquées sur les semelles sous mur voile

A titre d'exemple on va faire le calcul de la semelle S₁

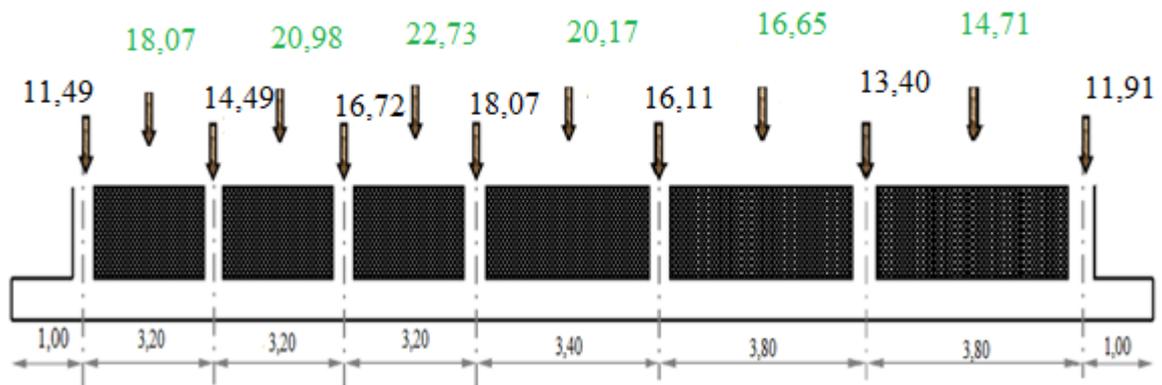


Figure VIII.2 : la distribution des sollicitations appliquées sur les semelles

a) Dimensionnement :

$$N_s = \sum N_i = 215,5 \text{ t.}$$

$$L = 22,6 \text{ m}$$

➤ **Largeur :**

$$B \geq \frac{N_s}{L \sigma_{sol}} = \frac{215,5}{22,60 \times 20} = 0,48 \text{ m}$$

On adopte : B = 80 cm

➤ **Condition de raideur :**

$$h_{min} = 2 * \sqrt[3]{\left(\frac{2 L_{max}}{\pi}\right)^4 \times \frac{3 k}{E_b}} = 20,18 \text{ cm}$$

On prend h = 50 cm et 0,5 < k < 12 kg/cm² on prend k=4 kg/cm²

➤ **Longueur élastique**

$$l_e = 2 * \sqrt[4]{\frac{4 E_b I}{k B}} = \sqrt[4]{\frac{4 \times 321642 \times 80 \times 50^3}{12 \times 4 \times 80}} = 1101,6 \text{ cm}$$

$$\frac{\pi}{2} l_e = 1729,51 \text{ cm}$$

$$l_{max} = 380 \text{ cm} < \frac{\pi}{2} l_e = 1729,51 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{semelle rigide.}$$

➤ **Patin :**

$$\begin{cases} e \geq 6\Phi + 6 \text{ cm} \\ \Phi_{\min} = 12 \text{ mm} \end{cases} \Rightarrow e_{\min} = 15 \text{ cm}$$

➤ **Hauteur moyenne :**

$$h_{\text{moy}} = \frac{h + e}{2} = \frac{(50 + 15) \cdot 2}{2} = 65 \text{ cm}$$

➤ **Calcul des poids de la semelle, le remblai et du mur voile :**

$$P_s = h_{\text{moy}} \cdot \gamma_b \cdot B \cdot L = 29,38 \text{ t.}$$

$$P_R = (h - h_{\text{moy}}) \left(B \cdot L - 9b \cdot a - e_{\text{voil}} \cdot \sum L_{\text{voil}} \right) \rho_{\text{sol}} = 81,86 \text{ t.}$$

$$P_v = \gamma_b \cdot e \cdot (h - h_{\text{moy}}) \sum L = 38,62 \text{ t.}$$

➤ **Vérification des contraintes :**

$$\sigma_{\text{moy}} = \frac{Q}{BL} \left(1 + 3 \frac{e_0}{L} \right)$$

<i>Combinaison</i>	N_T (t)	M_T (t. m)	$e = \frac{M_T}{N_T}$ (m)	$\frac{L}{6}$ (m)	σ_{moy} (t/m ²)	σ_{sol} (t/m ²)
<i>G + Q</i>	113,31	2,72	0,0398	3,77	4,15	20
<i>1,35G + 1,5 Q</i>	218,218	3,81	0,0174		5,61	
<i>G + Q + E</i>	301,845	4,11	0,0136		4,15	
<i>0,8 G + E</i>	288,754	3,287	0,0114		4,15	

On adopte :

$$\begin{cases} B = 80 \text{ cm} \\ e_{\min} = 15 \text{ cm} \\ h_{\text{moy}} = 32,50 \text{ cm} \\ h_u = 50 \text{ cm} \end{cases}$$

➤ **Calcul des armatures :**

Vu la présence du mur voile périphérique, la semelle va travailler que dans un seul sens celui de la largeur B et elle sera calculé par la méthode des consoles :

❖ **Suivant la largeur :**

Pour une bande de 1 m :

$$q = \sigma_{\text{moy}} \times 1\text{m}$$

$$q = 4,15 \times 1 = 4,15 \text{ t/ml}$$

$$M = \frac{qx^2}{2} \quad \text{avec } x = \frac{B}{2} = 0,4 \text{ m}$$

$$M = \frac{4,15 \times 0,40^2}{2} = 0,332 \text{ t.m}$$

$$\mu = \frac{M_0}{b d^2 \sigma_{bc}} = 0,002$$

$$\mu = 0,002 < \mu_{\text{ultime}} = 0,392 \Rightarrow \beta = 0,998$$

$$A_u = \frac{M_0}{\beta d \sigma_{acier}} = 0,21 \text{ cm}^2$$

Condition de non fragilité :

$$A_{\min} = 0,23B d \frac{f_{tj}}{f_e} = 5,43 \text{ cm}^2$$

Armatures finales :

$$A_f = \max(A_u; A_{\min}) = 5,43 \text{ cm}^2 \quad \Rightarrow \quad \text{Soit } \begin{cases} \mathbf{6T12} = \mathbf{6,79 \text{ cm}^2/\text{ml}} \\ \mathbf{S_t} = \mathbf{20 \text{ cm}} \end{cases}$$

❖ **Armature de répartition :**

$$A_r = \frac{A_{\text{adpt}}}{4} = \frac{6,79}{4} = 1,70 \text{ cm}^2 \quad \Rightarrow \quad \text{Soit } \begin{cases} \mathbf{5T12} = \mathbf{5,65 \text{ cm}^2/\text{ml}} \\ \mathbf{S_t} = \mathbf{20 \text{ cm}} \end{cases}$$

	combinaison	$N_T (t)$	$M_T (t. m)$	$e = \frac{M_T}{N_T}$ (m)	L (m)	σ_{moy} t/m^2	σ_{sol} t/m^2	B (cm)	h (cm)	h moy (cm)	$\frac{\pi}{2} l_e$ (cm)	l_{max} (cm)
S2	$G + Q$	286,011	0,379	0,001	22,6	4,15	20	80	50	32,5	865,1	380
	$1,35G + 1,5 Q$	415,973	0,54	0,001		5,60						
S3	$G + Q$	75,68	0,968	0,013	11,6	4,10	20	80	50	32,5	865,1	320
	$1,35G + 1,5 Q$	103,69	1,33	0,013		5,54						
S4	$G + Q$	121,25	0,596	0,005	19,5	4,14	20	80	50	32,5	865,1	410
	$1,35G + 1,5 Q$	166,09	0,929	0,006		5,59						
S5	$G + Q$	140,7	0,771	0,005	19,5	4,14	20	80	50	32,5	865,1	410
	$1,35G + 1,5 Q$	194,35	1,076	0,006		5,59						

Tableau VIII.3 : le dimensionnement et les vérifications des semelles continues sous murs voiles

	q (t/ml)	M (t.m)	μ	β	A_u (cm ² /ml)	A_{mip} (cm ²)	A_{adpt} (cm ² /ml)	$A_r = A_{adpt}/4$ (cm ²)	A_r (cm ² /ml)
S2	4,15	0,332	0,002	0,998	0,29	5,43	6T12 A=6,79cm ²	1,41	5T12 A=5,65cm ²
S3	4,10	0,328							
S4	4,14	0,331							
S5	4,14	0,331							

Tableau VIII.4 : ferrailage des semelles continues sous murs voiles

2. Semelle continue sous poteaux (semelle filante) :

semelle	combinaison		Poteaux					
			P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
S₆ (File B et C)	G + Q	N (t)	10,56	55,02	59,25	60,55	36,13	8,75
		M (t.m)	0,25	0,15	0,14	0,1	0,1	0,3
	1,35 G + 1,5 Q	N (t)	14,50	74,60	81,83	83,62	85,84	13,74
		M (t.m)	0,35	0,16	0,2	0,02	0,13	0,4
	G + Q + E	N (t)	23,53	53,74	60,40	61,08	62,93	9,94
		M (t.m)	0,2	0,06	0,09	0,2	0,06	0,5
0,8 G + E	N (t)	20,15	36,05	38,77	38,92	40,18	5,94	
	M (t.m)	0,01	0,02	0,03	0,2	0,10	0,3	
S₇ (File E et F)	G + Q	N (t)	55,87	76,06	11,09	/	/	/
		M (t.m)	0,5	0,1	0,2	/	/	/
	1,35 G + 1,5 Q	N (t)	76,57	105,04	13,57	/	/	/
		M (t.m)	0,7	0,13	0,32	/	/	/
	G + Q + E	N (t)	57,73	77,23	11,76	/	/	/
		M (t.m)	0,3	0,1	0,4	/	/	/
0,8 G + E	N (t)	40,43	49,45	8,36	/	/	/	
	M (t.m)	0,1	0,14	0,31	/	/	/	
S₈ (File 2 et 3)	G + Q	N (t)	10,69	10,69	44,72	18,21		
		M (t.m)	0,23	0,23	0,24	0,24		
	1,35 G + 1,5 Q	N (t)	14,67	71,21	74,60	25,23		
		M (t.m)	0,32	0,32	0,32	0,33		
	G + Q + E	N (t)	16,46	51,99	55,24	21,09		
		M (t.m)	0,41	0,41	0,42	0,41		
0,8 G + E	N (t)	13,41	33,22	36,05	13,76			
	M (t.m)	0,31	0,33	0,32	0,31			

Tableau VIII.5 : les sollicitations appliquées sur les semelles sous poteaux

On prend la semelle S6 comme exemple de calcul détaillé et les autres semelles seront résumées dans un tableau

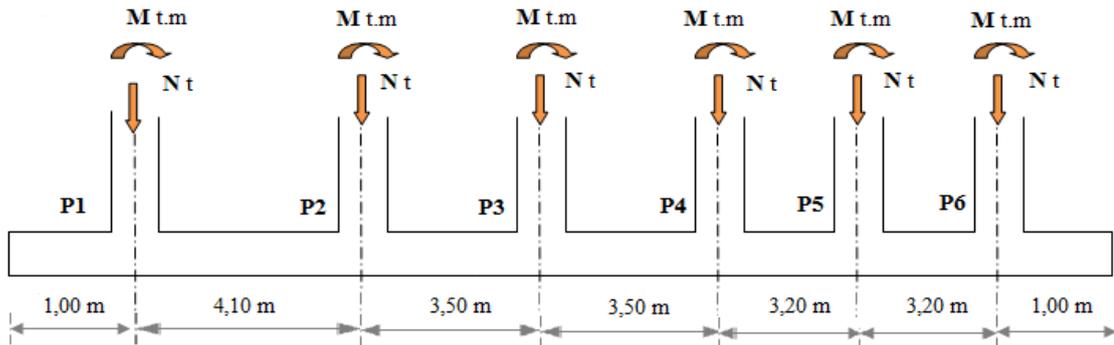


Figure VIII.3 : la distribution des sollicitations appliquées sur les semelles sous poteaux

➤ **Dimensionnement à l'E.L.S :**

$$B \geq \frac{N_s}{L \sigma_{sol}} = \frac{359,16}{19,5 \cdot 20} = 0,92 \text{ m}$$

On prend B = 100 cm

➤ **Rigidité :**

$$\frac{l}{9} < h < \frac{l}{6} \Rightarrow 45,55 < h < 68,33$$

On prend h = 60 cm

➤ **Longueur élastique :**

$$l_e = 2 * \sqrt[4]{\frac{4 E_b I}{k B}}$$

Avec :

$$\begin{cases} I = 2 * \frac{B h^3}{12} = 36. 10^5 \text{ cm}^2 \\ k = 40 \text{ N/cm}^2 \\ B = 100 \text{ cm} \\ E_b = 3216419,5 \text{ N/cm}^2 \end{cases} \Rightarrow l_e = 5,52\text{m}$$

$$l = 4,10 < \frac{\pi}{2} l_e = 8,66 \Rightarrow \text{Semelle rigide (répartition linéaire des contraintes)}$$

➤ **Patin :**

$$\begin{cases} e \geq 6\Phi + 6 \text{ cm} \\ \Phi_{\min} = 12 \text{ mm} \end{cases} \Rightarrow e_{\min} = 15 \text{ cm}$$

➤ **Hauteur moyenne :**

$$h_{\text{moy}} = \frac{h + e}{2} = \frac{60 + 15}{2} = 37,5 \text{ cm}$$

➤ **Poids propre de la semelle et du remblai :**

$$P_s = h_{\text{moy}} \cdot \gamma_b \cdot B L = 24,86 \text{ t}$$

$$P_R = (h - h_{\text{moy}})(B L - 6 b^2)\rho_{\text{sol}} = 115,04 \text{ t}$$

Donc :

$$Q_{\text{ser}} = N_s + P_s + P_R = 359,16 + 24,86 + 115,04 = 499,06 \text{ t}$$

➤ **Type de répartition :**

$$M = \sum M_i + \sum N_i x_i$$

$$M = 0,95 - 10,56 \times 8,75 - 55,02 \times 4,65 - 59,25 \times 1,15 + 60,55 \times 2,35 + 63,13 \times 5,56 + 9,79 \times 8,72 = 163,55 \text{ t m}$$

$$\begin{cases} e_0 = \frac{M_s}{N_s} = 0,7 \text{ cm} \\ \frac{L}{6} = 325 \text{ cm} \end{cases} \Rightarrow e_0 < \frac{L}{6} \dots\dots\dots\text{Répartition trapézoïdale.}$$

➤ **Vérification des contraintes :**

$$\sigma_{3/4} = \frac{Q}{B L} \left(1 + 3 \frac{e_0}{L}\right) = 16,74 \text{ t/m}^2 < 20 \text{ t/m}^2 \dots\dots\dots\text{condition vérifiée.}$$

➤ **Calcul des armatures :**

❖ **Sens transversal** : on utilise la méthode des bielles.

$$A_B = \frac{\hat{N}_i (B - b)}{8 d_b \sigma_s}$$

Avec :

$$\hat{N}_i = N_T \left(1 + 3 \frac{e_0}{B}\right)$$

$$N_{\text{tu}} = 354,14 \text{ t}$$

$$\hat{N}_i = 354,14 \left(1 + 3 \frac{0,4}{100}\right) = 359,08 \text{ t}$$

Donc :

$$A_B = \frac{359,08 \cdot 10^4 (100-40)}{8 \cdot 54 \cdot 348 \cdot 10^2} = 14,33 \text{ cm}^2$$

Soit : 7T12 /ml ; $A_s = 7,92 \text{ cm}^2 /\text{ml}$ avec un espacement $St = 15 \text{ cm}$

❖ Sens longitudinal :

La semelle est calculée comme une poutre renversée chargée par la contrainte moyenne du sol.

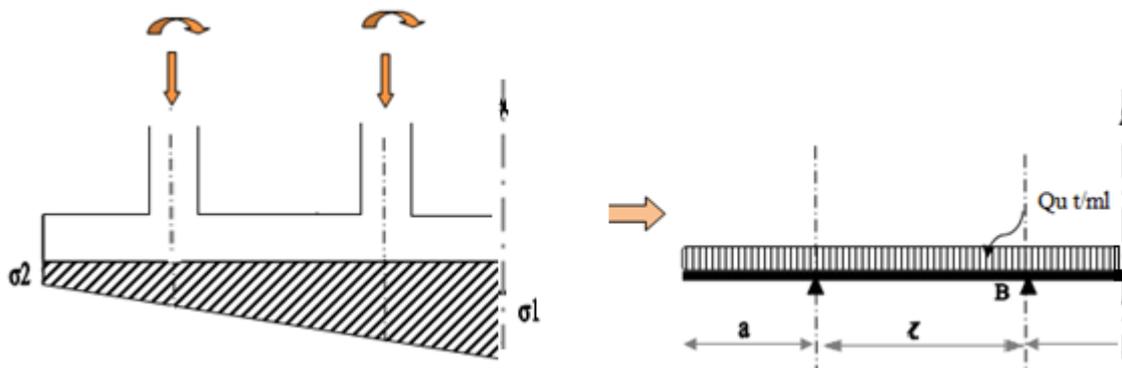


Figure VIII.4 : Exemple de chargement de la semelle

Avec :

$$\sigma_{\text{moy}} = \frac{N_T}{B L} \left(1 + 3 \frac{e_0}{L} \right) = \frac{273,62}{1 \times 19,5} \left(1 + 3 \frac{0,004}{19,5} \right) = 14,04 \text{ t m}^{-2}$$

$$Q_u = \sigma_{\text{moy}} \times B = 14,04 \times 1 = 14,04 \text{ t/m}$$

1. Les Moments :

$$M_0 = \frac{Q_u \cdot l^2}{8} = \frac{14,04 \times 4,1^2}{8} = 29,50 \text{ t.m}$$

$$M_t = 0,85 M_0 = 0,85 \times 29,50 = 25,08 \text{ t.m}$$

$$M_a = 0,4 M_0 = 0,40 \times 29,50 = 11,80 \text{ t.m}$$

1. Ferraillage sur appuis :

$$\mu = \frac{M_A}{b d^2 \sigma_{bc}} = 0,028$$

$$\mu = 0,028 < \mu_{\text{ultime}} = 0,392 \Rightarrow \beta = 0,986$$

$$A_{\text{app}} = \frac{M_A}{\beta d \sigma_{\text{acier}}} = 6,37 \text{ cm}^2$$

$$\text{Choix : } \left\{ \begin{array}{l} 2 \text{ T } 14 \text{ (chapeaux)} + 3 \text{ T } 14 \text{ (filante)} \\ A_s = 7,70 \text{ cm}^2 \end{array} \right.$$

2. Ferrailage en travée :

$$\mu = \frac{M_0}{b d^2 \sigma_{bc}} = 0,060$$

$$\mu = 0,060 < \mu_{ultime} = 0,392 \Rightarrow \beta = 0,969$$

$$A_{app} = \frac{M_0}{\beta d \sigma_{acier}} = 13,77 \text{ cm}^2$$

$$\text{Choix : } \begin{cases} 7T 16 \\ A_s = 14,07 \text{ cm}^2 \end{cases}$$

Pour les autres cas les résultats sont résumés sur le tableau suivant :

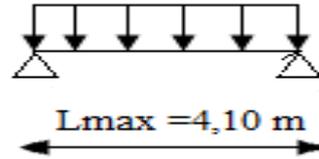
	combinaison	N_T (t)	M_T (t.m)	$e = \frac{M_T}{N_T}$ (m)	L (m)	B (cm)	h (cm)	l_{max} (cm)	$\frac{\pi}{2} l_e$ (cm)	h_{moy} (cm)	Ms (t.m)	Q_{ser} (t)	$\sigma_{3/4}$ (t/m ²)
S7	$G + Q$	142,62	0,80	0,0056	9,6	100	60	410	433,52	37,5	149,4	179,91	18,77
	$1,35G + 1,5 Q$	196,28	1,15	0,0059									
S8	$G + Q$	93,6	0,94	0,01	11,6	80	50	320	377,92	32,5	104,48	128,68	13,90
	$1,35G + 1,5 Q$	185,71	1,29	0,007									

Tableau VIII.6 : le dimensionnement et les vérifications des semelles continues sous poteaux

semelle	N_u (t)	N_i (t)	A_B (cm ²)	$A_{adapté}$ (cm ²)	σ_{moy} (t/m ²)	Q (t/ml)	M_0 (t.m)	A_{app} (cm ²)	$A_{adapté}$ (cm ²)	A_{trav} (cm ²)	$A_{adapté}$ (cm ²)
S7	196,28	199,81	7,97	7T12 As = 7,92 cm ²	20,48	20,48	43,03	9,35	7T14 As = 10,78 cm ²	20,40	9T16+2T14 As = 21,17 cm ²
S8	185,71	192,67	6,15	6T12 As = 6,79 cm ²	20,04	16,03	20,52	5,33	4T14 As = 6,16 cm ²	11,61	6T16 As = 12,06 cm ²

Tableau VIII.7 : ferrailage des semelles continues sous poteaux

VIII.3.4 - Ferrailage des poutres de libages :

2. Dimensionnement :

$$\frac{L_{\max}}{15} \leq h \leq \frac{L_{\max}}{10} \quad \rightarrow \quad \frac{410}{15} \leq h \leq \frac{410}{10} \quad \rightarrow \quad 27,33\text{cm} \leq h \leq 41\text{cm}$$

On prend:

$$\begin{cases} h = 40 \text{ cm} \\ b = 40 \text{ cm} \end{cases}$$

3. Calcul de Q :

$$Q_u = \sigma_{\text{moy}} \times 0,4\text{m}$$

$$Q_u = 5,61 \times 0,4 = 2,24 \text{ t/ml}$$

$$Q_u = 2,24 \text{ t/ml}$$

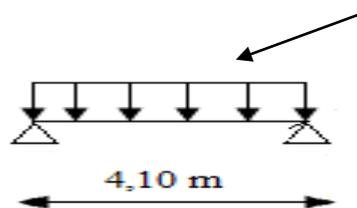


Figure VIII.5 : Répartition des charges sur la poutre de libage

4. Les Moments :

$$M_0 = \frac{Q_u \cdot l^2}{8} = \frac{2,24 \times 4,1^2}{8} = 4,71 \text{ t.m}$$

$$M_t = 0,85M_0 = 0,85 \times 4,71 = 4,01 \text{ t.m}$$

$$M_a = 0,4M_0 = 0,40 \times 8,81 = 1,88 \text{ t.m}$$

5. Calcul du ferrailage :1. En travée :

$$\mu = \frac{M_t}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \frac{4,01 \times 10^4}{40 \times 36^2 \times 14,2} = 0,054 < \mu_1 = 0,392 \rightarrow A'_s = 0$$

→ $\beta = 0,972$; β est tirée du tableau.

$$A_s = \frac{M_t}{\beta \times d \times \sigma_s} = \frac{4,01 \times 10^4}{0,972 \times 36 \times 348} = 3,29 \text{ cm}^2$$

Condition de non fragilité :

$$A_{min} = \frac{0,23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = 1,74 \text{ cm}^2$$

Donc $A_{scal} = 3,29 \text{ cm}^2 > A_{min} = 1,74 \text{ cm}^2$; Condition vérifiée

On prend : 3T12 ; $A_s = 3,39 \text{ cm}^2$

2. Sur appuis :

$$\mu = \frac{M_a}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \frac{1,88 \times 10^4}{40 \times 36^2 \times 14,2} = 0,026 < \mu_1 = 0,392 \rightarrow A'_s = 0$$

→ $\beta = 0,987$; β est tirée du tableau.

$$A_s = \frac{M_a}{\beta \times d \times \sigma_s} = \frac{1,88 \times 10^4}{0,987 \times 36 \times 348} = 1,52 \text{ cm}^2$$

Condition de non fragilité :

$$A_{min} = \frac{0,23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = 1,74 \text{ cm}^2$$

Donc $A_{scal} = 1,52 \text{ cm}^2 < A_{min} = 1,74 \text{ cm}^2$; Condition non vérifiée

Le ferrailage doit se faire suivant le A_{min}

On prend : 3T12 ; $A_s = 3,39 \text{ cm}^2$

6. Vérification à l'E.L.S :

$$Q_{ser} = \sigma_{moy} \times 0,4\text{m} \rightarrow Q_{ser} = 4,15 \times 0,4 = 1,66 \text{ t/ml}$$

$$M_0 = 3,49 \text{ t.m}$$

1. En travée:

a) Position de l'axe neutre : $M_{tser} = 2,96 \text{ t.m}$

$$\frac{b}{2}y^2 + 15A'(y - c) - 15.A(d - y) = 0 \rightarrow 20y^2 + 120,15y - 2698,2 = 0$$

$$\rightarrow y = 8,99\text{cm}$$

b) Moment d'inertie :

$$I = \frac{b}{3}y^3 + 15A'(y - c)^2 + 15A(d - y)^2$$

$$I = 61510,94 \text{ cm}^4$$

c) Détermination des contraintes dans le béton comprimé σ_{bc} :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser}}{I} \times y = \frac{2,96 \times 10^4}{61510,94} \times 8,99 = 4,33 \text{ MPa}$$

$$\overline{\sigma}_{bc} = 0,6f_{c28} = 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bc} = 4,33 \text{ MPa} < \overline{\sigma}_{bc} = 15 \text{ MPa} \text{ Condition vérifiée}$$

d) Détermination des contraintes dans l'acier tendue σ_{st} :

$$\sigma_{st} = \min \left[\frac{2}{3}f_e ; 110\sqrt{\eta f_{t28}} \right]; \text{ Fissuration préjudiciable}$$

n : Coefficient d'équivalence pour HA $\Phi \geq 6 \text{ mm}$; n = 15

$$\overline{\sigma}_{st} = \min(266,67 \text{ MPa} ; 201,63 \text{ MPa}) = 201,63 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{st} = n \frac{M_{ser}}{I} (d - y) = 15 \times \frac{2,96 \times 10^4}{61510,94} \times (36 - 8,99) = 194,96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{st} = 194,96 \text{ MPa} < \overline{\sigma}_{st} = 201,63 \text{ MPa} ; \text{ Condition vérifiée}$$

2. Sur appuis :

e) Position de l'axe neutre : $M_{aser} = 1,40 \text{ t.m}$

$$\frac{b}{2}y^2 + 15A'(y - c) - 15.A(d - y) = 0 \rightarrow 20y^2 + 171y - 2311,2 = 0$$

$$\rightarrow y = 7,29 \text{ cm}$$

f) Moment d'inertie :

$$I = \frac{b}{3}y^3 + 15A'(y - c)^2 + 15A(d - y)^2$$

$$I = 48379,95 \text{ cm}^4$$

g) Détermination des contraintes dans le béton comprimé σ_{bc} :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser}}{I} \times y = \frac{1,40 \times 10^4}{48379,95} \times 7,29 = 2,10 \text{ MPa}$$

$$\overline{\sigma}_{bc} = 0,6f_{c28} = 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bc} = 2,10 \text{ MPa} < \overline{\sigma}_{bc} = 15 \text{ MPa} \text{ Condition vérifiée}$$

h) Détermination des contraintes dans l'acier tendue σ_{st} :

$$\sigma_{st} = \min \left[\frac{2}{3} f_e ; 110 \sqrt{\eta f_{t28}} \right]; \text{ Fissuration préjudiciable}$$

η : Coefficient de fissuration pour HA $\Phi \geq 6$ mm ; $\eta = 1,6$

$$\bar{\sigma}_{st} = \min(266,67 \text{ MPa} ; 201,63 \text{ MPa}) = 201,63 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{st} = \eta \frac{M_{ser}}{I} (d - y) = 15 \times \frac{1,40 \times 10^4}{48379,95} \times (36 - 7,29) = 124,62 \text{ MPa}$$

$\sigma_{st} = 124,62 \text{ MPa} < \bar{\sigma}_{st} = 201,63 \text{ MPa}$; Condition vérifiée.

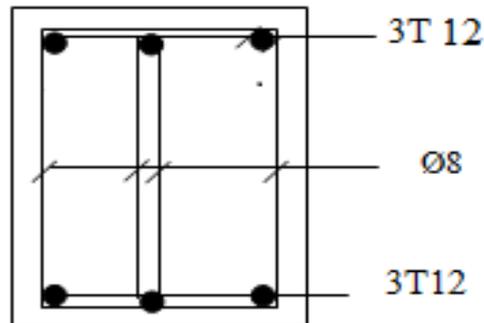


Figure VIII.6 : Ferrailage de la poutre de libage

VIII.3.5 - Ferrailage des longrines :

1. Dimensionnement :

Selon le RPA99/2003 on a :

* Site meuble (S3) $\Rightarrow \min (b \times h) = (25 \times 30) \text{ cm}^2$

On prend : $(b \times h) = (30 \times 30) \text{ cm}^2$

1) Ferrailage :

$$A = \frac{F}{\sigma_s}$$

Avec :

- $F = N / \alpha \geq 20 \text{ KN}$
- $\alpha = 15$ (Zone I ; S3)
- $N = 1050,42 \text{ KN}$

On a:

$$F = N / \alpha = \frac{1050,42}{15} = 70,028 \geq 20 \text{ KN}$$

$$A_u = \frac{F}{\sigma_s} = 70,028 \times \frac{10}{348} = 2,01 \text{ cm}^2$$

$$A_{\min} = 0,6\% b \times h = 5,4 \text{ cm}^2.$$

$$A_f = \max(A_u; A_{\min}) = 5,40 \text{ cm}^2.$$

On adopte : 4T14 ; $A_s = 6,16 \text{ cm}^2$