



VII. Etude Des Voiles

VII.1 Introduction :

Le voile ou mur en béton armé est un élément de construction vertical surfacique coulé dans des coffrages à leur emplacement définitif dans la construction. Ces éléments comprennent habituellement des armatures de comportement fixées forfaitairement et des armatures prises en compte dans les calculs.

L'épaisseur minimale est de 15 cm. De plus, l'épaisseur doit être déterminée en fonction de la hauteur libre d'étage h_e et des conditions de rigidité aux extrémités. Pour cette structure, la hauteur 3,06 m pour tous les étages, à cet effet l'épaisseur du voile sera prise en appliquant la formule suivante : $e = h_e/25 = 306/25 = 12,24 \text{ cm}$, l'épaisseur des voiles a été prise égale à 20 cm.

Les voiles sont des éléments verticaux ayant deux dimensions grandes par rapport à l'épaisseur, ainsi tout poteau «allongé» de longueur supérieure à cinq fois son épaisseur est considéré comme un voile.

VII.2 Le système de contreventement :

Les systèmes de contreventement représentent la partie de la structure qui doit reprendre les forces horizontales dues aux actions climatiques et géologiques, dans cette construction, le système de contreventement est mixte (voile - portique), il est conseillé en zone sismiques car il a une capacité de résistance satisfaisante.

Mais ce système structural est en fait un mélange de deux types de structure qui obéissent à des lois de comportement différentes de l'interaction portique-voile, naissent des forces qui peuvent changées de sens aux niveaux les plus hauts et ceci s'explique par le fait qu'à ces niveaux les portiques bloquent les voiles dans leurs déplacement. Par conséquent une attention particulière doit être observée pour ce type de structure.

1. Conception :

- Il faut que les voiles soient placés de telle sorte qu'il n'y ait pas d'excentricité (torsion) ;
- Les voiles ne doivent pas être trop éloignés (flexibilité du plancher) ;



- L'emplacement des voiles ne doit pas déséquilibrer la structure (il faut que les rigidités dans les deux directions soient très proches).

2. Calcul :

Dans les calculs, on doit considérer un modèle comprenant l'ensemble des éléments structuraux (portique - voiles) afin de prendre en considération conformément aux lois de comportement de chaque type de structure.

VII.3 Le principe de calcul :

L'étude des voiles consiste à les considérer comme des consoles sollicitées par un moment fléchissant, un effort normal, et un effort tranchant suivant le cas le plus défavorable selon les combinaisons suivantes :

- $G + Q \pm E$; Vérification du béton ;
- $0,8G + E$; Calcul des aciers de flexion.

Le calcul des armatures sera fait à la flexion composée, par la méthode de contraintes et vérifier selon le règlement RPA 99/2003.

Les murs en béton armé comportent trois catégories d'armature :

- Armatures verticales ;
- Armatures horizontales (parallèles aux faces des murs) ;
- Armatures transversales.

1. La méthode de calcul :

On utilise la méthode des contraintes (la formule classique de la RDM) :

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{A} \pm \frac{M \times V}{I} \leq \bar{\sigma} = \frac{0,85f_{c28}}{1,15} = 18,48 \text{ MPa}$$

Avec :

N : effort normal appliqué ;

M : moment fléchissant appliqué ;

A : section du voile ;

V : distance entre le centre de gravité du voile et la fibre la plus éloignée ;

I : moment d'inertie.



On distingue 3 cas :

- Premier cas :

$(\sigma_1 \text{ et } \sigma_2) > 0$; La section du voile est entièrement comprimée « pas de zone tendue ».

La zone courante est armée par le minimum exigé par le RPA 99/2003 : $A_{min} = 0,15 \times a \times L$

- Deuxième cas :

$(\sigma_1 \text{ et } \sigma_2) < 0$; La section du voile est entièrement tendue « pas de zone comprimée ». On

calcule le volume des contraintes de traction, d'où la section des armatures verticales :

$A_v = F_t / f_e$; On compare A_v par la section minimale exigée par le RPA 99/2003 :

- Si : $A_v < A_{min} = 0,15\% \times a \times L$, on ferraille avec la section minimale ;
- Si : $A_v > A_{min}$, on ferraille avec A_v .

- Troisième cas :

$(\sigma_1 \text{ et } \sigma_2)$ Sont de signe différent, la section du voile est partiellement comprimée, donc on calcule le volume des contraintes pour la zone tendue.

3. Armatures verticale :

Ils sont disposés en deux nappes parallèles servant à répondre les contraintes de flexion composée, le RPA exige un pourcentage minimal égal à 0,15% de la section du béton. Le ferrailage sera disposé symétriquement dans le voile en raison du changement de direction du séisme avec le diamètre des barres qui ne doit pas dépasser le $1/10$ de l'épaisseur du voile.

4. Armatures horizontales :

Les armatures horizontales parallèles aux faces du mur sont distribuées d'une façon uniforme sur la totalité de la longueur du mur ou de l'élément du mur limité par des ouvertures, les barres horizontales doivent être disposées vers l'extérieure.

Le pourcentage minimum d'armatures horizontales données comme suit :

- Globalement dans la section du voile 0,15% ;
- En zone courante 0,10%.



5. Armatures transversales :

Les armatures transversales perpendiculaires aux faces du voile sont à prévoir d'une densité de 4 par m² au moins dans le cas où les armatures verticales ont un diamètre inférieure ou égal à 12 mm Les armatures transversales doivent tenir toutes les barres avec un espacement au plus égal à 15 fois le diamètre des aciers verticaux.

Les armatures transversales peuvent être des épingles de diamètres de 6 mm lorsque les barres longitudinales ont un diamètre inférieure ou égal à 20 mm et de 8 mm dans le cas contraire.

6. Armatures de coutures :

L'effort tranchant doit être repris par des aciers de coutures tout au long des joints de reprise de coulage, leur section est donnée par la formule suivante :

$$\begin{cases} A_{vj} = 1,1 \frac{T}{f_e} \\ T = 1,4V_u \end{cases}$$

V_u : Effort tranchant calculé au niveau considéré.

Cette quantité doit s'ajouter à la section d'acier tendue nécessaire pour équilibrer les efforts de traction dus au moment de renversement.

VII.4 Ferrailage des voiles : 1er

$$A = 0.79 \text{ m}^2$$

$$V = 2,7 \text{ m}$$

$$I = 0.328 \text{ m}^4$$

$$0,8G + EY :$$

$$N = 930.29 \text{ KN}$$

$$M = 21.94 \text{ KN.m}$$

$$V_u = 13.61 \text{ Kn}$$

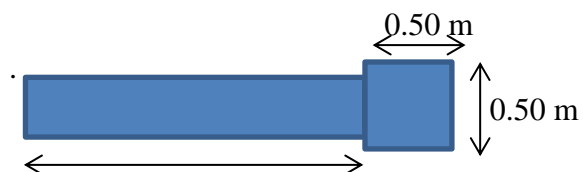


Fig. VII . 1 Schéma du voile +
poteaux



1. Détermination des contraintes :

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M \times V}{I} = \frac{930.29}{0.79} + \frac{21.94 \times 2,7}{0.328} = 1267.87 \text{ Kn/m}^2 \\ \sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{M \times V}{I} = \frac{930.29}{0.79} - \frac{21.94 \times 2,7}{0.328} = 1087.29 \text{ Kn/m}^2 \end{cases}$$

On est dans le 1^{er} cas, (σ_1 et σ_2) > 0 , La section du voile est entièrement comprimée « pas de zone tendue ». La zone courante est armée par le minimum exigé par le RPA 99/2003 :

$$A_{min} = 0,15 \times a \times L.$$

VII.4.1 Calcul des armatures verticales :

D'après le R.P.A 99 (version 2003) on à :

$$A_{min} = 0.15\% .a.L$$

On calcule le ferrailage pour une bande de 1 mètre (L = 1 m)

$$A_{min} = 0.15\% \times a \times 1 \text{ m} = 0.0015 \times 20 \times 100 = 3.00 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

1. Le diamètre : $D \leq 1/10 \times a$ (mm)

$$D \leq (1/10).200$$

$$D \leq 20 \text{ mm}$$

On adopte : D= 12 mm

2. L'espacement:

-Selon le BAEL 91,on à :

$$St \leq \min \{ 2xa, 33 \text{ cm} \}$$

$$St \leq \min \{ 40, 33 \text{ cm} \} \Rightarrow St \leq 33 \text{ cm} \dots \dots \dots (1).$$

- Selon le R.P.A 99 (version 2003) on à:

$$St \leq \min \{ 1.5 \times a ; 30 \text{ cm} \}$$

$$St \leq \min \{ 30 , 30 \text{ cm} \} \Rightarrow St \leq 30 \text{ cm} \dots \dots \dots (2).$$

$$\text{Donc : } St \leq \min \{ St_{BAEL} ; St_{R.P.A 99} \}$$

$$St \leq 30 \text{ cm}$$

On adopte un espacement de 20 cm.

Le choix de la section des armatures verticales est **5T10 = 3.93 cm²/ml.**



VII.4.2 Calcul des armatures horizontales :

D'après le R.P.A 99 (version 2003), on adopte le même ferrailage que les armatures verticales soit $5T10 = 3.93 \text{ cm}^2/\text{ml}$ avec un espacement de 20 cm.

VII.4.3 Calcul des armatures transversales :

D'après le D.T.R-B.C-2.42 et le BAEL 91, dans le cas où le diamètre des aciers verticaux est inférieur ou égal à 12 mm, les armatures transversales sont à prévoir à raison d'une densité de $4/\text{m}^2$ au moins; on prend donc **6φ8 par m²**.

VII.4.4 Vérification de la contrainte de cisaillement τ_b :

On calcule la contrainte de cisaillement $\tau_b = \frac{\bar{T}}{a.L}$

Avec : $\bar{T} = 1.4 T_{cal}$ l'effort tranchant de calcul majoré de 40%

a : Épaisseur du voile

L : longueur du voile

Cette contrainte est limitée par: $\bar{\tau} = 0.05.f_{c28} = 1.25 \text{ MPa}$

$$\tau_b = \frac{\bar{T}}{a.l} = \frac{1.905 \times 10^2}{0.20 \times 2.7} = 0.035 \text{ Mpa}$$

$\tau_b = 0.035 \text{ MPa} < 0.05 f_{c28} = 1.25 \text{ MPa}$ condition vérifiée.

VII.5 Disposition des armatures :

VII.5.1 armatures verticales :

-Les arrêts, jonctions et enrobages des armatures verticales sont effectués conformément aux règles de béton armé en vigueur.

-La distance entre axes des armatures verticales d'une même face ne doit pas dépasser deux fois l'épaisseur du mur ni 33 cm. Selon le BAEL 91, et ne doit pas dépasser 1.5 de l'épaisseur du mur ni 30 cm selon le R.P.A 99 (version 2003).

- A chaque extrémité du voile, l'espacement des barres doit être réduit de moitié sur 1/10 de la largeur du voile. Cet espacement d'extrémité doit être au plus égal à 15 cm



On à $St=20\text{ cm} \rightarrow St/2 = 10\text{ cm} < 20\text{ cm} \dots\dots\text{Condition. Vérifiée.}$

$L=270\text{cm} \rightarrow L/10 = 27\text{cm.}$

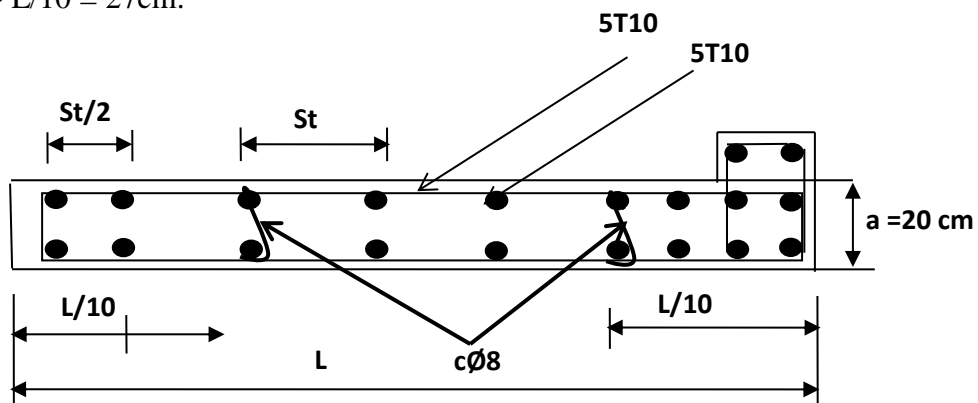


Fig VII. 2 coupe transversal de voile

VII.5.2 Armatures horizontales :

Les barres horizontales doivent être munies de crochets à 135° ayant une longueur de 10ϕ .

Elles doivent être retournées aux extrémités du mur et aux bords libres qui limitent les ouvertures sur l'épaisseur du mur.

Les arrêts, jonctions et enrobages des armatures horizontales sont effectués conformément aux règles de béton armé en vigueur $St \leq \min(1.5a; 30\text{ cm})$.

-Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles ne doit pas dépasser $1/10$ de l'épaisseur du voile.

VII.5.3 Armatures transversales:

Les deux nappes d'armatures doivent être reliées avec au moins 4 épingles au mètre carré.

Dans chaque nappe, les barres horizontales doivent être disposées vers l'extérieur

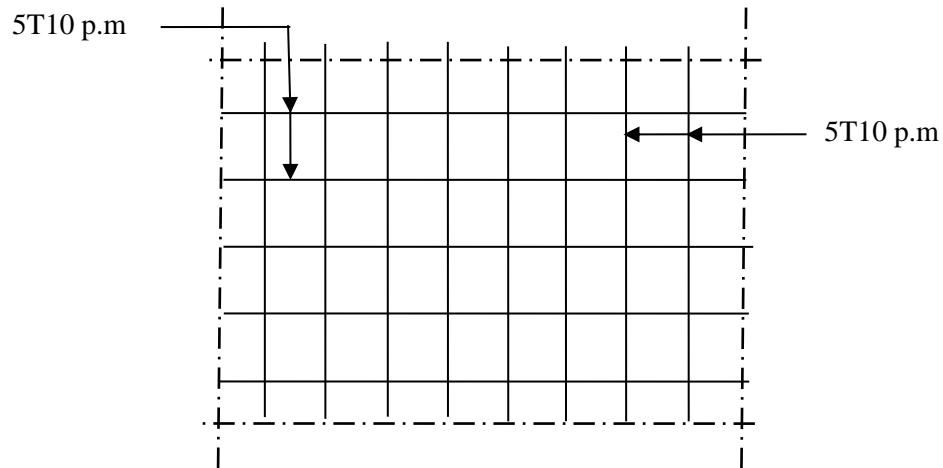


Fig. VII. 3 vue de face de voile

VII.6 Ferrailage des voiles : 2em

$$A = 0.92 \text{ m}^2$$

$$I = 0.63 \text{ m}^4$$

$$V = 3.37 \text{ m}$$

$$0,8G + EY :$$

$$N = 593.38 \text{ KN}$$

$$M = 29.78 \text{ KN.m}$$

$$Vu = 18.36 \text{ Kn}$$

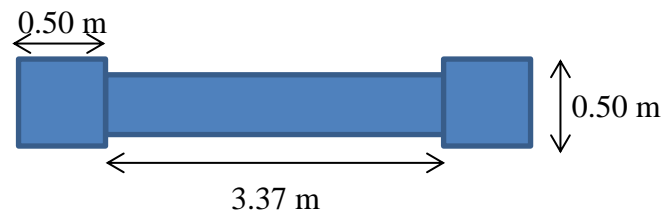


Fig. VII. 4 Schéma du voile + poteaux

1. Détermination des contraintes :

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M \times V}{I} = \frac{593.28}{0.73} + \frac{29.78 \times 3.37}{0.63} = 884.34 \text{ Kn/m}^2 \\ \sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{M \times V}{I} = \frac{593.28}{0.73} - \frac{29.78 \times 3.37}{0.63} = 727.009 \text{ Kn/m}^2 \end{cases}$$

On est dans le 1^{er} cas, $(\sigma_1 \text{ et } \sigma_2) > 0$, La section du voile est entièrement comprimée « pas de zone tendue ». La zone courante est armée par le minimum exigé par le RPA 99/2003 :

$$A_{min} = 0,15 \times a \times L.$$



VII.6.1 Calcul des armatures verticales :

D'après le R.P.A 99 (version 2003) on à :

$$A_{\min} = 0.15\% \cdot a \cdot L$$

On calcule le ferrailage pour une bande de 1 mètre ($L = 1 \text{ m}$)

$$A_{\min} = 0.15\% \times a \times 1 \text{ m} = 0.0015 \times 20 \times 100 = 3.00 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

1. Le diamètre :

$$D \leq 1/10 \times a \quad (\text{mm})$$

$$D \leq (1/10) \cdot 200$$

$$D \leq 20 \text{ mm}$$

On adopte : $D = 12 \text{ mm}$

2. L'espacement:

-Selon le BAEL 91, on à :

$$St \leq \min \{ 2xa, 33 \text{ cm} \}$$

$$St \leq \min \{ 40, 33 \text{ cm} \} \Rightarrow St \leq 33 \text{ cm} \dots \dots \dots (1).$$

- Selon le R.P.A 99 (version 2003) on à:

$$St \leq \min \{ 1.5 \times a ; 30 \text{ cm} \}$$

$$St \leq \min \{ 30, 30 \text{ cm} \} \Rightarrow St \leq 30 \text{ cm} \dots \dots \dots (2).$$

$$\text{Donc : } St \leq \min \{ St_{\text{BAEL}} ; St_{\text{R.P.A 99}} \}$$

$$St \leq 30 \text{ cm}$$

On adopte un espacement de 20 cm.

Le choix de la section des armatures verticales est **5T10 = 3.93 cm²/ml.**

VII.6.2 Calcul des armatures horizontales :

D'après le R.P.A 99 (version 2003), on adopte le même ferrailage que les armatures verticales soit **5T10 = 3.93 cm²/ml** avec un espacement de 20 cm.



VII.6.3 calcul des armatures transversales :

D'après le D.T.R-B.C-2.42 et le BAEL 91, dans le cas où le diamètre des aciers verticaux est inférieur ou égal à 12 mm, les armatures transversales sont à prévoir à raison d'une densité de $4/m^2$ au moins; on prend donc **6 ϕ 8 par m^2** .

VII.6.4 Vérification de la contrainte de cisaillement τ_b :

On calcule la contrainte de cisaillement $\tau_b = \frac{\bar{T}}{a.L}$

Avec : $\bar{T} = 1.4 T_{cal}$ l'effort tranchant de calcul majoré de 40%

a : Épaisseur du voile

L : longueur du voile

Cette contrainte est limitée par: $\bar{\tau} = 0.05.f_{c28} = 1.25 \text{ MPa}$

$$\tau_b = \frac{\bar{T}}{a.l} = \frac{2.57 \times 10^2}{0.20 \times 3.37} = 0.053 \text{ Mpa}$$

$\tau_b = 0.053 \text{ MPa} < 0.05 f_{c28} = 1.25 \text{ MPa}$ **condition vérifiée.**

VII.7 Disposition des armatures :

VII.7.1 Armatures verticales :

-Les arrêts, jonctions et enrobages des armatures verticales sont effectués conformément aux règles de béton armé en vigueur.

-La distance entre axes des armatures verticales d'une même face ne doit pas dépasser deux fois l'épaisseur du mur ni 33 cm. Selon le BAEL 91, et ne doit pas dépasser 1.5 de l'épaisseur du mur ni 30 cm selon le R.P.A 99 (version 2003).

- A chaque extrémité du voile, l'espacement des barres doit être réduit de moitié sur 1/10 de la largeur du voile. Cet espacement d'extrémité doit être au plus égal à 15 cm

On à $St=20 \text{ cm} \rightarrow St/2 = 10 \text{ cm} < 20 \text{ cm}$ **Condition. Vérifiée.**

$L=337 \text{ cm} \rightarrow L/10 = 33.7 \text{ cm}$.



$L=270\text{cm} \rightarrow L/10 = 27\text{cm}$.

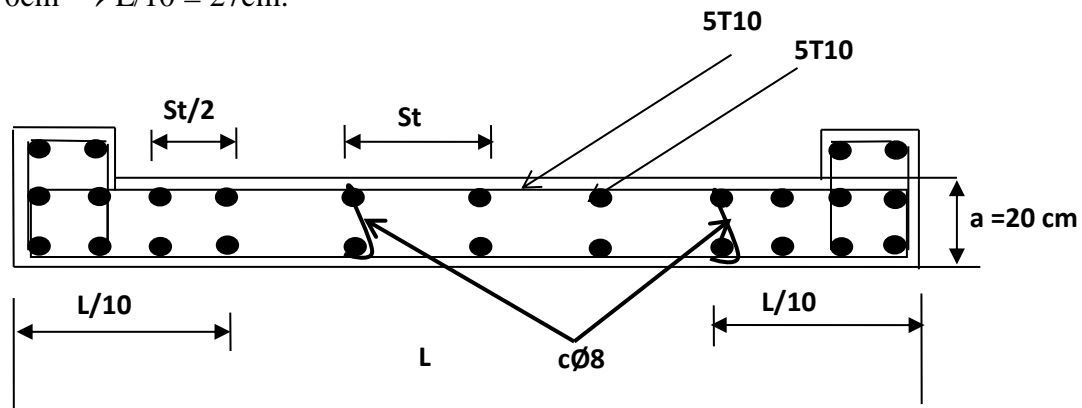


Fig. VII. 5 Disposition des armatures verticales dans les voiles.

VII.7.2 Armatures horizontales :

Les barres horizontales doivent être munies de crochets à 135° ayant une longueur de 10ϕ .

Elles doivent être retournées aux extrémités du mur et aux bords libres qui limitent les ouvertures sur l'épaisseur du mur.

Les arrêts, jonctions et enrobages des armatures horizontales sont effectués conformément aux règles de béton armé en vigueur $St \leq \min(1.5a; 30 \text{ cm})$.

-Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles ne doit pas dépasser $1/10$ de l'épaisseur du voile.

VII.7.3 Armatures transversales:

Les deux nappes d'armatures doivent être reliées avec au moins 4 épingles au mètre carré.

Dans chaque nappe, les barres horizontales doivent être disposées vers l'extérieur.

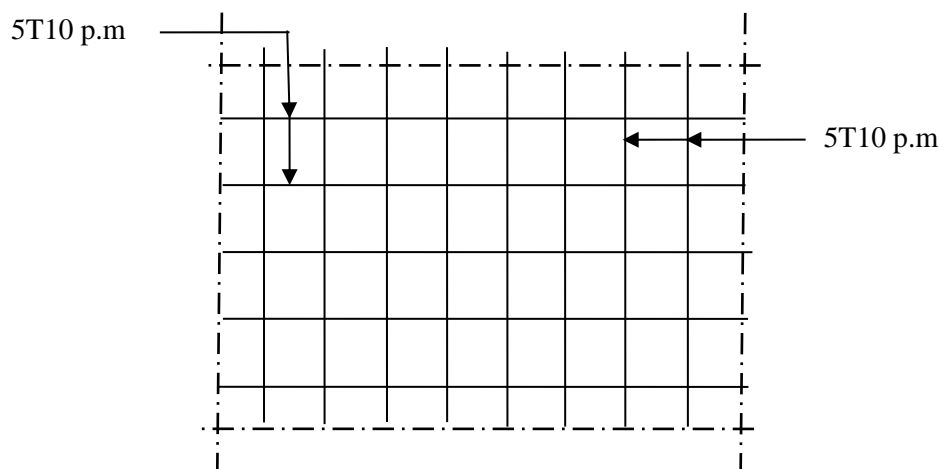


Fig. VII . 6 Disposition du ferrillage du voile.



VII.8 Ferrailage des voiles : 3em

1. Méthode de calcul :

En général, les voiles sans poteaux sont sollicités par un moment de flexion, un effort normal et un effort tranchant, le calcul doit se faire en flexion composée. La section des armatures doit être égale au maximum des sections données par les 6 combinaisons suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Premier genre : } 1,35G + 1,5Q \Rightarrow \begin{cases} N_{max} ; M_{correspondant} \rightarrow A_1 \\ N_{min} ; M_{correspondant} \rightarrow A_2 \\ M_{max} ; N_{correspondant} \rightarrow A_3 \end{cases} \\ \text{Deuxième genre : } \begin{cases} 0,8G \pm E \\ G + Q \pm 1,2E \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} N_{max} ; M_{correspondant} \rightarrow A_4 \\ N_{min} ; M_{correspondant} \rightarrow A_5 \\ M_{max} ; N_{correspondant} \rightarrow A_6 \end{cases} \end{array} \right.$$

Dans le calcul relatif aux ELU, on introduit des coefficients de sécurité γ_s ; γ_b :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Situation accidentelle : } \begin{cases} \gamma_s = 1 \Rightarrow \sigma_s = 400 \text{ MPa} \\ \gamma_b = 1,15 \Rightarrow \sigma_b = 18,48 \text{ MPa} \end{cases} \\ \text{Situation normale : } \begin{cases} \gamma_s = 1,15 \Rightarrow \sigma_s = 348 \text{ MPa} \\ \gamma_b = 1,5 \Rightarrow \sigma_b = 14,17 \text{ MPa} \end{cases} \end{array} \right.$$

2. Ferrailage exigé par le RPA 99/2003 :

- Les armatures longitudinales doivent être haute adhérences droites et sans crochet ;
- Le pourcentage minimale des aciers sur toute la longueur sera de 0,8% (zoneII) ;
- Le pourcentage minimale des aciers sur toute la longueur sera de 0,4% en zone courante, 0,6% en zone de recouvrement ;
- Le diamètre minimum est de 12 mm ;
- La longueur minimale des recouvrements est de : $\begin{cases} 40\Phi \text{ en zone I et II} \\ 50\Phi \text{ en zone III} \end{cases}$
- Le distance dans les barres verticales dans une face du poteau no doit pas dépasser 25 cm en zone IIa.
- Les jonctions par recouvrement doivent être faites si possible à l'extérieure des zones nodales.

On fait un seul exemple de calcul, pour un seul niveau et les résultats des calculs des autres niveaux donnés dans des tableaux.

Le tableau suivant donne les sections minimale et maximale imposée par le RPA 99/2003zone IIa.



$A_{min} = 0,8\% \times S$	$A_{max 1} = 4\% \times S$	$A_{max 2} = 6\% \times S$
43.2	216	324

Tab. VII. 1 Armatures minimales et maximales pour les poteaux

3. Exemple de calcul :

Les sollicitations défavorables :

Le tableau suivant donne les sollicitations défavorables du premier genre, l'unité est de t.m :

Etages		Type 1 (50x 50 cm ²)
Combinaison		
A	N_{max}	2125.4
	M_{cor}	3.413
B	N_{min}	45.96
	M_{cor}	9.145
C	M_{max}	925.2
	N_{cor}	68.431

Tab. VII. 2 Sollicitations du premier genre.

Le tableau suivant donne les sollicitations défavorables du deuxième genre, l'unité est de [t.m]:

Etages		Type 1 (50x 50 cm ²)
Combinaison		
A	N_{max}	1783.92
	M_{cor}	28.821
B	N_{min}	1076.79
	M_{cor}	9.243
C	M_{max}	640.26
	N_{cor}	146.747

Tab. VII . 3 Sollicitations du deuxième genre.



4. Calcul d'un voile :

Un seul voile de type 1 sera calculé en détail 1^{ère} genre, les résultats de 2^{ème} genre sera noté dans un tableau.

Données :

- Enrobage : $c = 2,5 \text{ cm}$;
- Hauteur utile des aciers tendus : $d = h - c$;
- Contrainte des aciers utilisés : $f_e = 400 \text{ MPa}$;
- Contrainte du béton à 28 jours : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$;
- Contrainte limite du béton: $f_{t28} = 2,1 \text{ MPa}$;
- Fissuration peu préjudiciable.

5. Méthode de calcul :

Pour cet exemple le calcul se fera à l'aide des combinaisons de premier genre.

1. On détermine le centre de pression puis le moment :

$$\begin{cases} e = \frac{M}{N} \\ M_u = N_u \left(d - \frac{h_t}{2} + e \right) \end{cases}$$

3. Sinon, on calcul la section des armatures :

$$\begin{cases} \mu = \frac{M_u}{b \times d^2 \times \sigma_{bc}} \\ A_s = \frac{M_u}{\beta \times d \times \sigma_s} \\ A_{sl} = A_s - \frac{N_u}{\sigma_s} \end{cases}$$

2. On vérifie si la section est surabondante :

$$\begin{cases} N_u \leq 0,81 f_{bc} \times b \times h \\ M_u \leq N_u \times d \times \left(\frac{1 - 0,514 N_u}{b \times d \times f_{bc}} \right) \end{cases}$$

Si les conditions sont vérifiées, alors la section est surabondante et les armatures ne sont pas nécessaires ($A = A' = 0$)

4. On calcul la section des armatures minimale, puis on choisit la plus grande section calculée précédemment :

$$\begin{cases} A_{min} = 0,5\% \times b \times h_t \\ A_{adoptée} = \max\{A_1 ; A_2 ; \dots ; A_{min}\} \end{cases}$$

A_{cal} Est tirée du logiciel SOCOTEC



6. Combinaison du 1^{ère} genre :

$$\longrightarrow N_{max} = 141.11 \text{ t} \quad M_{corresp} = 2.02 \text{ t.m}$$

1. Détermination le centre de pression :

$$e = M/N = 2.02/141.11 = 0.0014 \text{ m}$$

$$Mu = Nu \left(d - \frac{ht}{2} + e \right) = 141.11 * (2.43 - 2.7/2 + 0.0014) = 330.8063 \text{ t.m}$$

2. Vérification si la section est surabondante :

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu \leq 0,81 \times fbc \times b \times h \\ \Rightarrow \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} Nu = 141.11 \text{ t} < 8070030 \text{ t} \dots \dots \dots \text{Condition vérifiée.} \end{array} \right.$$

$$Mu \leq Nu \cdot d (1 - 0,514 Nu / b \cdot d \cdot fbc) \quad Mu = 330.8063 \text{ t.m} < 1679.125848 \text{ t.m} \dots \text{Condition no vérifiée.}$$

7. Calcul la section des armatures :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \frac{Mu}{b \times d^2 \times \sigma_{bc}} = \frac{330.80 \times 10^4}{50 \times 45^2 \times 18,48} = 0.1165 < \mu_1 \rightarrow A' = 0 \\ \text{On a : } \beta = 0.994 \\ \text{La section d'acier :} \\ A_s = \frac{Mu}{\beta \times d \times \sigma_s} - \frac{Nu}{\sigma_s} = \frac{330.80 \times 10^4}{0,937 \times 2.43 \times 348} - \frac{141.11}{348} = 1.5 \text{ cm}^2 \end{array} \right.$$

$$\longrightarrow N_{min} = 60.07 \text{ t} \quad M_{corresp} = 17.26 \text{ t.m}$$

1. Détermination le centre de pression :

$$e = 0.287 \text{ m}$$

$$Mu = 157.2231 \text{ t.m}$$

2. Vérification si la section est surabondante :

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu \leq 0,81 fbc \cdot b \cdot h \\ \Rightarrow \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} Nu = 60.07 \text{ t} < 8070030 \text{ t} \dots \dots \dots \text{Condition vérifiée.} \\ Mu = 157.2 \text{ t.m} < 20.52 \text{ t.m} \dots \dots \dots \text{Condition vérifiée.} \end{array} \right.$$



La section d'acier :

$$A_s = 0.8 \text{ cm}^2$$

$$\longrightarrow N_{\text{corresp}} = 127.14t \quad M_{\text{max}} = 20.62 \text{ t.m}$$

3. Détermination le centre de pression :

$$e = 0.162 \text{ m}$$

$$Mu = 316.8562 \text{ t.m}$$

4. Vérification si la section est surabondante :

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu \leq 0,81 fbc . b . h \\ Mu \leq Nu . d (1 - 0,514 Nu / b . d . fbc) \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Nu = 127.14 \text{ t} < < 8070030 \text{ t} \dots\dots \text{Condition vérifiée} \\ Mu = 316.8562 \text{ t.m} < 316.85 \text{ t.m} \dots\dots \text{Condition} \\ \text{vérifiée.} \end{array} \right.$$

Section adoptée :

$$A_{\text{min}} = 3 \text{ cm}$$

$$A_{\text{adopté}} = \max(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, , A_{\text{min}}) = \max(0, 0, 0, 0, 0, 0, 3) = 3 \text{ cm}^2$$

Niveaux	Combi.	1 ^{er} genre			2 ^{ème} genre				A adoptée [cm ²]
		[t]N _u	M _u [t.m]	A _{cal} [cm ²]	N _{ACC} [t]	M _{ACC} [t.m]	A _{sl} [cm ²]	A _{min} [cm ²]	
Type 1 (50 x 50) cm ²	A	141.11	2.02	1,5	1470.05	9.53	19,41	3	5T10=3.92
	B	60.07	17.26	0,8	748.9	8.57	8,11		
	C	127.14	20.62	1,55	40.65	30.4 2	0,65		

Tab. VII . 4 Ferrailage de voile

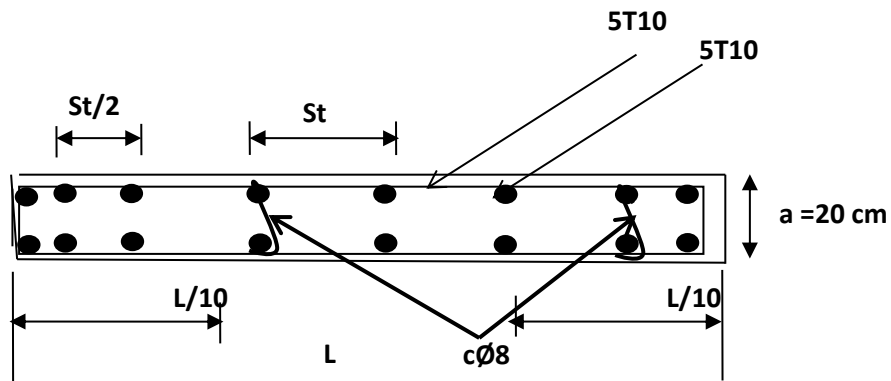


Fig. VII . 7 Disposition des armatures verticales dans les voiles.

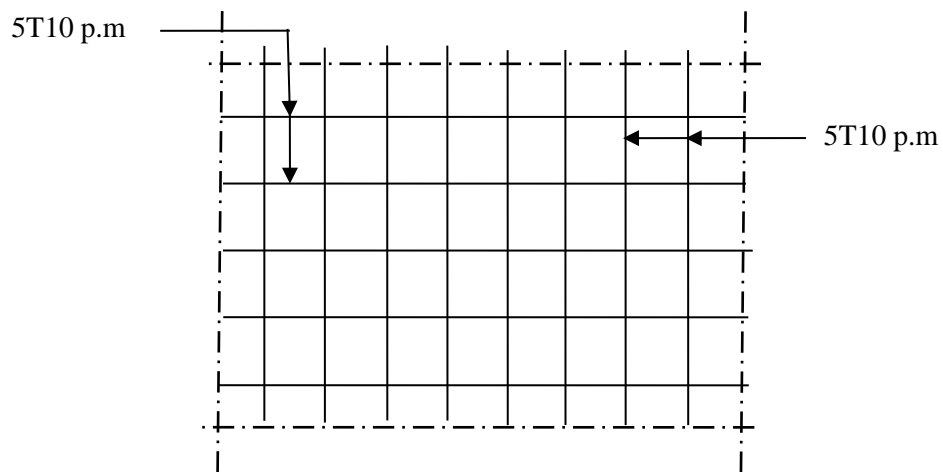


Fig. VII . 8 Disposition du ferrailage du voile.

