

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.

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. 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.

a. 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).

b. 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.

c. 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 ± 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.

VII.3. 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 trois (03) 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: $A_{min} = 0,15aL$

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:

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

-Si: $A_v < A_{min} = 0,15\%aL$, 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.

a. 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 $\frac{1}{10}$ de l'épaisseur du voile.

b. 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%.

c. 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 12mm. 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 6mm lorsque les barres longitudinales ont un diamètre inférieure ou égal à 20mm et de 8mm dans le cas contraire.

d. Armatures de couture

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

VII.4.1. Exemple de calcul

a. Epaisseur de calcul

$$e = \frac{h_e}{25} = \frac{408}{25} = 16,32 \text{ cm.}$$

On prend: $e = 20\text{cm}$

$$A = (a \times 3,1) + 0,45^2 \times 2 = 1,03 \text{ m}^2$$

$$I = \frac{aL^2}{12} = \frac{0,2 \times 3,10^3}{12} = 0,50 \text{ m}^4$$

$$V = 0,45 + \frac{3,1}{2} = 2 \text{ m}$$

$$A = 1,03 \text{ m}^2.$$

$$I = 0,50 \text{ m}^4.$$

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

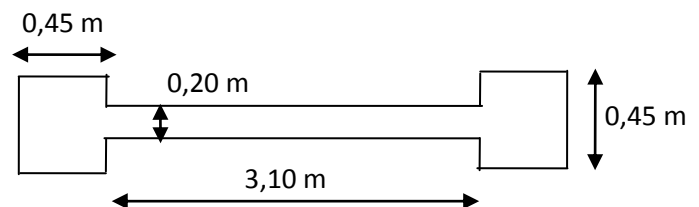


Figure VII.1: Dimensions du voile

$$N = 77,52 \text{ kN}$$

$$M = 1,28 \text{ kN}$$

$$V_u = 0,93 \text{ kN}$$

b. Détermination des contraintes

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M \times V}{I} = \frac{77,51}{1,03} + \frac{1,28 \times 2}{0,50} = 80,37 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{M \times V}{I} = \frac{77,51}{1,03} - \frac{1,28 \times 2}{0,50} = 70,13 \text{ kN/m}^2 \end{cases}$$

On a $(\sigma_1 \text{ et } \sigma_2) > 0 \Rightarrow$ la section du voile est entièrement comprimée " pas de zone tendue";
alors la zone courante est armée par le minimum exigé par le R.P.A 99 (version 2003)

c. Calcul des armatures verticales

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

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

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

$$A_{min} = 0,15\% \times e \times 1 \text{ m} = 0,0015 \times 20 \times 100 = 3,00 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

d. Diamètre des armatures

$$\Phi \leq \frac{1}{10} a$$

$$\Phi \leq \frac{1}{10} 200$$

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

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

e. Espacement des armatures

Selon le BAEL 91, on a:

$$S_t \leq \min \{2a, 33 \text{ cm}\}$$

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

Selon le R.P.A 99 (version 2003), on a:

$$S_t \leq \min \{1,5a; 30 \text{ cm}\}$$

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

Donc: $S_t \leq \min \{S_{t \text{ BAEL}}, S_{t \text{ R.P.A 99}}\}$

$S_t \leq 30\text{cm}$ On adopte un espacement de $S_t = 20\text{ cm}$.

Le choix de la section des armatures verticales est **5T12; $A_s = 5,65\text{cm}^2/\text{ml}$** .

f. Calcul des armatures horizontales

D'après le R.P.A 99 (version 2003), on adopte le même ferrailage que les armatures verticales soit **5T12; $A_s = 5,65\text{cm}^2/\text{ml}$** avec un espacement de 20cm.

g. Calcul des armatures transversales

D'après le C.B.A.93 et le BAEL 91, dans le cas où le diamètre des aciers verticaux est inférieur ou égal à 12mm, les armatures transversales sont à prévoir à raison d'une densité de $4/\text{m}^2$ au moins; on prend donc **4 ϕ 8 par m^2** .

h. Vérification des contraintes de cisaillement

BAEL 91:

$$\tau_u = \frac{V_u}{b \times d} = \frac{0,93 \times 10}{20 \times 0,9 \times 400} = 0,0013 \text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_u = \min(0,13f_{c28}; 5 \text{ MPa}); \text{ Fissuration préjudiciable}$$

$$\bar{\tau}_u = \min(3,25 \text{ MPa}; 5 \text{ MPa}) = 3,25 \text{ MPa}$$

$$\tau_u = 0,015 \text{ MPa} < \bar{\tau}_u = 3,25 \text{ MPa}; \text{ Condition vérifiée}$$

RPA 99/2003:

$$\tau_b = \frac{T}{b \times d} = \frac{1,4 \times 0,93 \times 10}{20 \times 0,9 \times 400} = 0,0018 \text{ MPa}$$

$$\tau_u = 0,0018 \text{ MPa} < \bar{\tau}_b = 0,2f_{c28} = 5 \text{ MPa}; \text{ Condition vérifiée}$$

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 33cm. Selon le BAEL 91, et ne doit pas dépasser 1,5 de l'épaisseur du mur ni 30cm 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 15cm

On a $S_t = 20\text{cm} \rightarrow S_t/2 = 10\text{cm} < 20\text{cm} \dots \dots \dots$ Condition vérifiée.

$L = 310\text{cm} \rightarrow L/10 = 31\text{cm}$.

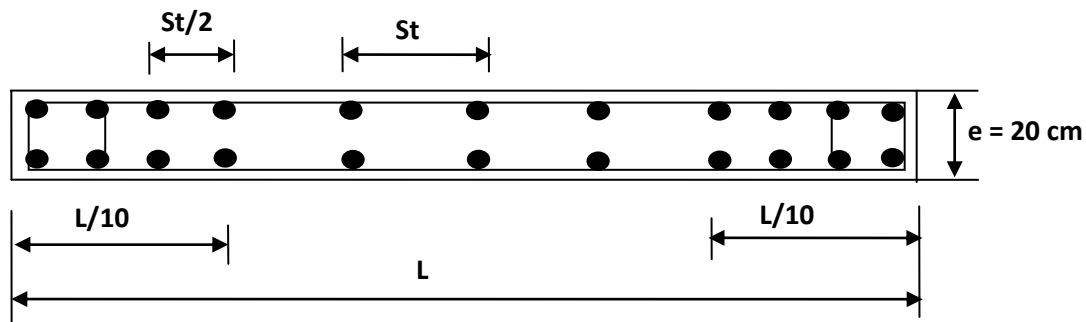


Figure VII.2: Disposition des armatures verticales dans les voiles.

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.

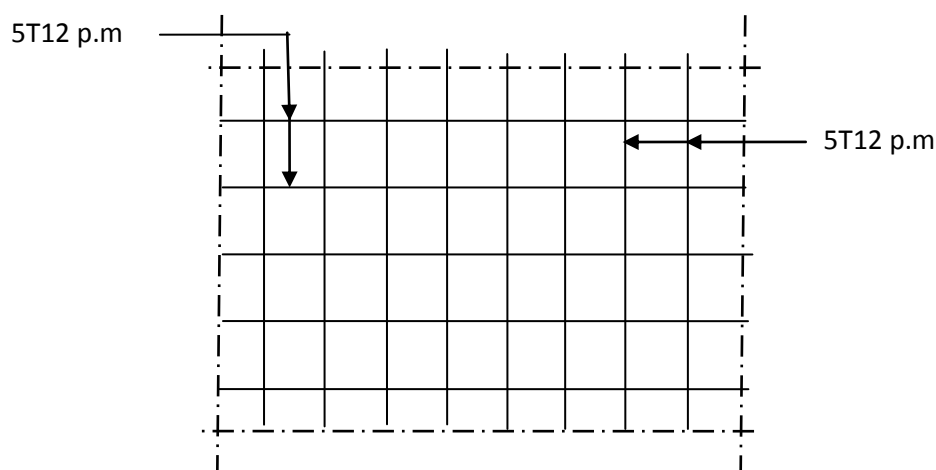


Figure VII.3: Disposition du ferrailage du voile