

VII.1 Etude des voiles

Le voile ou le 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.

On utilise les voiles dans tous les bâtiments quelle que soit leurs destination (d'habitations, de bureaux, scolaires, hospitaliers, industriels,...)

Les systèmes de contreventement représentent la partie de la structure qui doit reprendre les forces horizontales dues au vent "action climatique" ou aux séismes "action géologique".

Dans notre construction, le système de contreventement est mixte (voile - portique); ce système de contreventement est conseillé en zone sismique car il a une capacité de résistance satisfaisante.

V II.2 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 :

- 1) $G + Q \pm E$ (pour la vérification du béton)
- 2) $0,8G \pm E$ (pour le calcul des aciers de flexion)

Le calcul des armatures sera fait à la flexion composée, par la méthode des contraintes et vérifier selon le règlement R.P.A 99(version 2003).

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

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

V II.3 Méthode de calcul :

On utilise la méthode des contraintes (la formule classique de la R.D.M) :

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

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 :

1^{er} cas :

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

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

2^{eme} cas :

Si : $(\sigma_1 \text{ et } \sigma_2) < 0 \Rightarrow$ la section du voile est entièrement tendue " pas de zone comprimée" on calcule le volume des contraintes de traction.

3^{eme} cas:

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

- **Armatures verticales :**

Ils sont disposés en deux nappes parallèles servant à reprendre les contraintes de flexion composée, le R.P.A 99 (version 2003) 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.

- **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 de mur limité par des ouvertures; les barres horizontales doivent être disposées vers l'extérieur.

Le pourcentage minimum d'armatures horizontales est donné comme suit :

- globalement dans la section du voile 0,15%
- En zone courante 0,10 %

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

VII.4 Ferrailage des voiles :**VII.4.1 Exemple de calcul :**

1- Voile de rive:**Épaisseur du voile :**

On prend: **a = 18 cm**

$$A = a \times L = 0,18 \times 3,6 = 0,648 \text{ m}^2$$

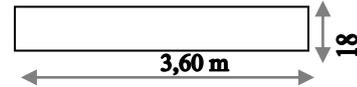
$$I = \frac{a L^2}{12} = \frac{0,18 \times 3,6^2}{12} = 0,194 \text{ m}^4$$

$$V = \frac{3,60}{2} = 1,8 \text{ m}$$

$$N = 991,9 \text{ KN}$$

$$M = 2,41 \text{ KN.m}$$

$$T = 1,27 \text{ KN}$$

**Détermination des contraintes :**

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M V}{I} = 1,55 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{M V}{I} = \frac{991,9}{0,648} - \frac{2,41 \times 1,8}{0,194} = 1,50 \text{ MPa}$$

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)

Calcul des armatures verticales :

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

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

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

$$A_{\min} = 0,15\% \times a \times 1 \text{ m} = 0,0015 \times 18 \times 100 = 2,7 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

Le diamètre :

$$D \leq \frac{1}{10} a \text{ (mm)}$$

$$D \leq \frac{1}{10} \times 180$$

$$D \leq 18 \text{ mm}$$

On adopte : **D= 12 mm**

L'espacement:

Selon le BAEL 91, on a :

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

$$S_t \leq \text{Min} \{36, 33 \text{ cm}\} \Rightarrow S_t \leq 33 \text{ cm} \dots\dots\dots (1)$$

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

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

$$S_t \leq \text{Min} \{27, 30 \text{ cm}\} \Rightarrow S_t \leq 27 \text{ cm} \dots\dots\dots (2)$$

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

$$S_t \leq 27 \text{ cm}$$

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

Le choix de la section des armatures verticales est **5 T 12 (p. m) = 5,65 cm²/ml**

Calcul des armatures horizontales :

D'après le R.P.A 99 (version 2003), on adopte le même ferrailage que les armatures verticales soit **5 T 12 (p. m) = 5,65 cm²/ml** avec un espacement de 20 cm

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 12 mm, les armatures transversales sont à prévoir à raison d'une densité de 4/m² au moins; on prend donc **4φ 6 par m²**.

- **Vérification de la contrainte de cisaillement τ_b :**

La vérification de la résistance des voiles au cisaillement se fait avec la valeur de l'effort tranchant trouvé à la base du voile majoré de 40% (Art 7.2.2 RPA99/version2003).

-La contrainte de cisaillement est : $\tau_b = \frac{1,4 \times T_{cal}}{b_0 \cdot d}$ Avec :

-T : effort tranchant à la base du voile.

-b₀ : épaisseur du voile.

-d : hauteur utile.

-h : hauteur totale de la section brute.

-la contrainte limite est : $\overline{\tau_b} = 0,2 \cdot f_{c28} = 5 \text{ MPa}$

- Il faut vérifier la condition suivante : $\tau_b < \overline{\tau_b}$

On calcule la contrainte de cisaillement

$$\tau_b = \frac{1,4 \times 1,27 \times 10^{-3}}{0,18 \times 0,9 \times 3,6} = 0,0030 \text{ Mpa}$$

$$\tau_b = 0,0027 \text{ MPa} < 0,2f_{c28} = 5 \text{ MPa} \dots\dots\dots\text{condition vérifiée.}$$

2- Voile intermédiaire :**Epaisseur du voile :**

On prend: $a = 18 \text{ cm}$

$$A = a \times L = 0,18 \times 4,5 = 0,81 \text{ m}^2$$

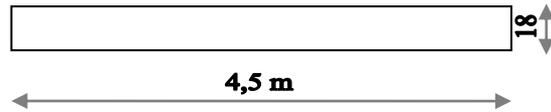
$$I = \frac{a L^2}{12} = \frac{0,18 \times 4,5^2}{12} = 0,303 \text{ m}^4$$

$$V = \frac{4,50}{2} = 2,25 \text{ m}$$

$$N = 1025,44 \text{ KN}$$

$$M = 1,96 \text{ KN.M}$$

$$T = 1,12 \text{ KN}$$

**Détermination des contraintes :**

$$\sigma_1 = 1,28 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = 1,25 \text{ Mpa}$$

Détermination des contraintes :

$$\sigma_1 = 1,28 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = 1,25 \text{ Mpa}$$

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).

Calcul des armatures verticales :

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

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

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

$$A_{\min} = 0,15\% \times a \times 1 \text{ m} = 0,0015 \times 18 \times 100 = 2,70 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

Le diamètre :

$$D \leq \frac{1}{10} a \text{ (mm)}$$

$$D \leq \frac{1}{10} 180$$

$$D \leq 18 \text{ mm}$$

On adopte : **D = 12 mm**

L'espacement:

Selon le BAEL 91, on a :

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

$$S_t \leq \text{Min} \{36, 33 \text{ cm}\} \Rightarrow S_t \leq 33 \text{ cm} \dots\dots\dots (1)$$

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

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

$$S_t \leq \text{Min} \{27, 30 \text{ cm}\} \Rightarrow S_t \leq 30 \text{ cm} \dots\dots\dots (2)$$

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

$$S_t \leq 27 \text{ cm}$$

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

Le choix de la section des armatures verticales est **5 T 12 (p. m) = 5,65 cm²/ml**

Calcul des armatures horizontales :

D'après le R.P.A 99 (version 2003), on adopte le même ferrailage que les armatures verticales soit **5 T 12 (p. m) = 5,65 cm²/ml** avec un espacement de 20 cm

Calcul des armatures transversales :

D'après le C.B.A.93 et le BAEL 91, dans le cas ou 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/m² au moins; on prend donc **4φ 6 par m²**.

-Vérification de la contrainte de cisaillement τ_b :

La vérification de la résistance des voiles au cisaillement se fait avec la valeur de l'effort tranchant trouvé à la base du voile majoré de 40% (Art 7.2.2 RPA99/version2003).

-La contrainte de cisaillement est : $\tau_b = \frac{1,4 \times T_{cal}}{b_0 \cdot d}$ Avec :

-T : effort tranchant à la base du voile.

- b_0 : épaisseur du voile.

-d : hauteur utile.

-h : hauteur totale de la section brute.

-la contrainte limite est : $\overline{\tau_b} = 0,2 \cdot f_{c28} = 5 \text{ MPa}$

- Il faut vérifier la condition suivante : $\tau_b < \overline{\tau_b}$

On calcule la contrainte de cisaillement

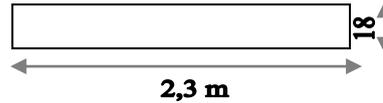
$$\tau_b = \frac{1,4 \times 1,12 \times 10^{-3}}{180 \times 0,9 \times 4500} = 0,0021 \text{ Mpa}$$

$$\tau_b = 0,0021 \text{ MPa} < 0,2f_{c28} = 5 \text{ MPa} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée.}$$

2- Voile intermédiaire :

Épaisseur du voile :

On prend: **a = 18 cm**



$$A = a \times L = 0,18 \times 2,3 = 0,41 \text{ m}^2$$

$$I = \frac{a L^2}{12} = \frac{0,18 \times 2,3^2}{12} = 0,079 \text{ m}^4$$

$$V = \frac{2,3}{2} = 1,15 \text{ m}$$

$$N = 227,67 \text{ KN}$$

$$M = 3,84 \text{ KN.M}$$

$$T = 1,44 \text{ KN}$$

Détermination des contraintes :

$$\sigma_1 = 0,61 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = 0,49 \text{ Mpa}$$

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).

Calcul des armatures verticales :

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

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

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

$$A_{\min} = 0,15\% \times a \times 1 \text{ m} = 0,0015 \times 18 \times 100 = 2,70 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

Le diamètre :

$$D \leq \frac{1}{10} a \text{ (mm)}$$

$$D \leq \frac{1}{10} 180$$

$$D \leq 18 \text{ mm}$$

On adopte : **D = 12 mm**

L'espacement:

Selon le BAEL 91, ona :

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

$$S_t \leq \text{Min} \{36, 33 \text{ cm}\} \Rightarrow S_t \leq 33 \text{ cm} \dots \dots \dots (1)$$

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

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

$$S_t \leq \text{Min} \{27, 30 \text{ cm}\} \Rightarrow S_t \leq 30 \text{ cm} \dots\dots\dots (2)$$

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

$$S_t \leq 27 \text{ cm}$$

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

Le choix de la section des armatures verticales est **5 T 12 (p. m) = 5,65 cm²/ml**

Calcul des armatures horizontales :

D'après le R.P.A 99 (version 2003), on adopte le même ferrailage que les armatures verticales soit **5 T 12 (p. m) = 5,65 cm²/ml** avec un espacement de 20 cm

Calcul des armatures transversales :

D'après le C.B.A.93 et le BAEL 91, dans le cas ou 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/m² au moins; on prend donc **4φ 6 par m²**.

-Vérification de la contrainte de cisaillement τ_b :

La vérification de la résistance des voiles au cisaillement se fait avec la valeur de l'effort tranchant trouvé à la base du voile majoré de 40% (Art 7.2.2 RPA99/version2003).

-La contrainte de cisaillement est : $\tau_b = \frac{1,4 \times T_{cal}}{b_0 \cdot d}$ Avec :

-T : effort tranchant à la base du voile.

-b₀ : épaisseur du voile.

-d : hauteur utile.

-h : hauteur totale de la section brute.

-la contrainte limite est : $\overline{\tau_b} = 0,2 \cdot f_{c28} = 5 \text{ MPa}$

- Il faut vérifier la condition suivante : $\tau_b < \overline{\tau_b}$

On calcule la contrainte de cisaillement

$$\tau_b = \frac{1,4 \times 1,44 \times 10^{-3}}{0,18 \times 0,9 \times 4,5} = 0,0054 \text{ Mpa}$$

$$\tau_b = 0,0021 \text{ MPa} < 0,2f_{c28} = 5 \text{ MPa} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée.}$$