

VI.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.

VI.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 voiles porteurs, 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 (voiles porteurs) afin de prendre en considération conformément aux lois de comportement de chaque type de structure.

VI.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.

a) 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.

b) 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.

c) 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%.

d) 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.

e) 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

VI.4 Ferrailage des voiles :

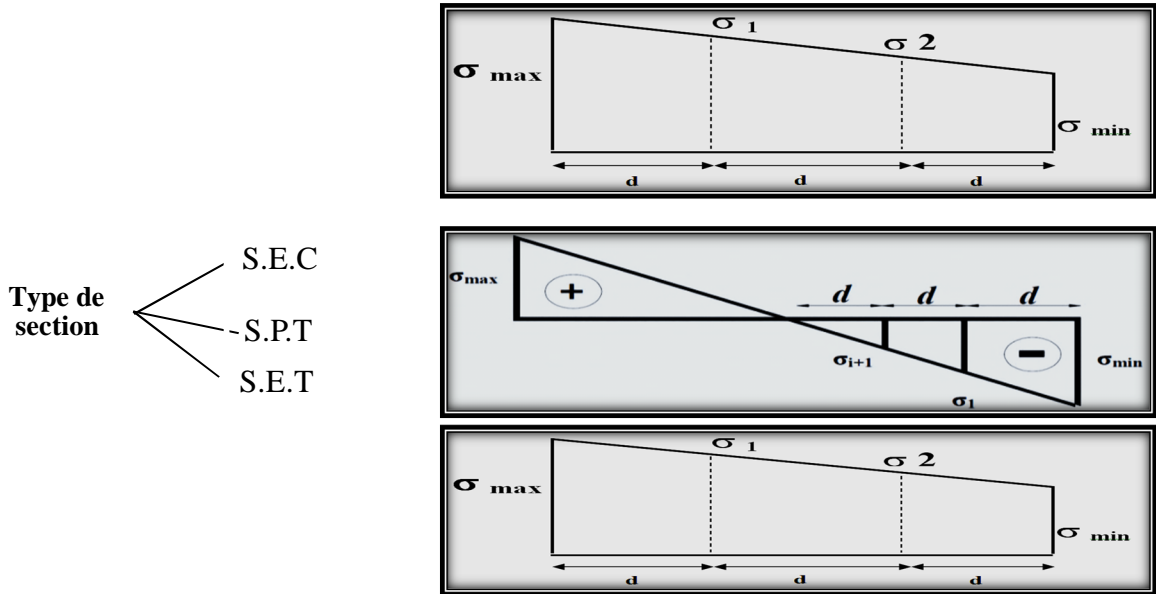
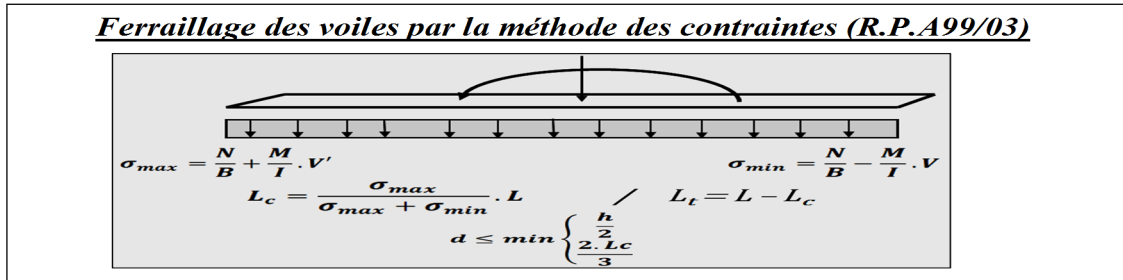


Figure VI.1 : La méthode des contraintes

Recommandations du R.P.A

$A_{min\ total} = 0.15 \% \cdot e \cdot L$

$A_{min\ tendue} = 0.2 \% \cdot e \cdot L_t$

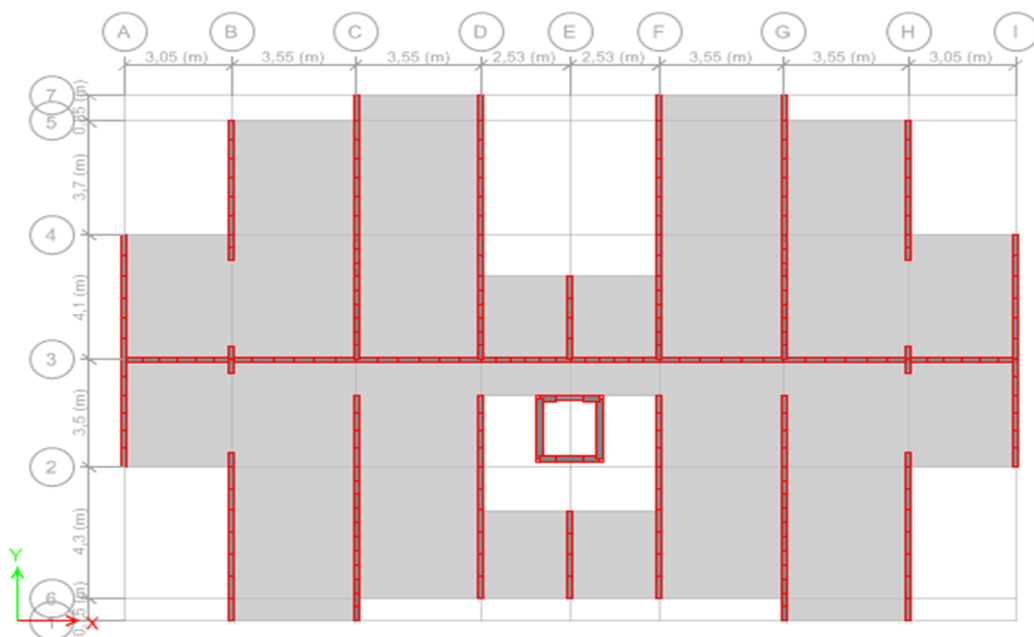


Figure VI.2: Vue en plan du voile plein

a) Voile de 15 cm :

Axe - C - / Caractéristiques géométriques : e = 15 cm L= 17.20 m

N	M	L	E	A	I	v	σ_{max}	σ_{min}
kN	kN.m	M	M	m ²	m ⁴	m	kN/m ²	kN/m ²
1300,79	3,36	17,2	0,15	2,58	63,606	8,6	504,636	503,728

a) Détermination des contraintes :

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M \times V}{I} = \frac{1300,79}{2,58} + \frac{3,36 \times 8,6}{63,606} = 504,636 \text{ KN/m}^2 \\ \sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{M \times V}{I} = \frac{1300,79}{2,58} - \frac{3,36 \times 8,6}{63,606} = 503,728 \text{ KN/m}^2 \end{cases}$$

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 :

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

b) Calcul des armatures verticales :

D'après le RPA99 (version 2003) on à :

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

On calcule le ferrailage pour une bande de 1m :

$$A_{min} = 0,15\% \times a \times 1m \Rightarrow A_{min} = 0,15\% \times 0,15 \times 100 = 2,25 \text{ cm}^2 / ml$$

- Le diamètre

$$D \leq 1.a / 10 \text{ (mm)} \quad D \leq \frac{1 \times a}{10} \text{ (mm)} \Rightarrow D \leq \frac{1 \times 150}{10} \Rightarrow D \leq 15 \text{ mm}$$

On adopte : D= 12 mm

Donc : on prend : **5T12 p.ml** = 5,65 cm²

c) Armatures de couture :

$$A_{vj} = 1,1 \frac{T}{f_e} = 1,1 \frac{1,4V_u}{f_e} = 1,1 \times \frac{1,4 \times 9,42 \times 10}{400} = 0,363 \text{ cm}^2$$

d) Armatures totale :

$$A_v = A_{min} + A_{vj} = 2,25 + 0,363 = 2,61 \text{ cm}^2$$

Donc : on prend : **5T12 p.ml** = 5,65 cm²

e) L'espacement :

$$\text{Selon le BAEL 91, on a : } S_t \leq \min\{2a ; 33 \text{ cm}\} = \min\{30 \text{ cm} ; 33 \text{ cm}\} \Rightarrow S_t \leq 30 \text{ cm}$$

VI.5 Vérification à l'ELS :

a) L'espaceur :

Selon le RPA 99/03 : $S_t \leq \min\{1,5a ; 30 \text{ cm}\} = \min\{22,5 \text{ cm} ; 30 \text{ cm}\} \Rightarrow S_t \leq 22,5 \text{ cm}$

Donc : $S_t \leq \min\{S_{t \text{ BAEL}} ; S_{t \text{ RPA}}\} \Rightarrow S_t \leq 22,5 \text{ cm}$

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

b) Vérification des contraintes de cisaillement :

• BAEL 91 :

$$\tau_u = \frac{V_u}{b \times d} = \frac{9,42 \times 10}{(15 \times 0,9) \times (1720)} = 0,0040 \text{ MPa}$$

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

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

$\tau_u = 0,0040 \text{ MPa} < \bar{\tau}_u = 3,25 \text{ MPa}$; Condition vérifiée

• RPA 99/2003 :

$$\tau_b = \frac{T}{b \times d} = \frac{1,4 \times 9,42 \times 10}{(15 \times 0,9) \times (1720)} = 0,0058 \text{ MPa}$$

$\tau_b = 0,0058 \text{ MPa} < \bar{\tau}_b = 0,2f_{c28} = 5 \text{ MPa}$; Condition vérifiée

Donc pas de risque de cisaillement

VI.6 Disposition des armatures :**VII.6.1 Armatures verticales :**

- Les arrêts, jonctions et enrobage 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 fois l'épaisseur du mur ni 30 cm, selon le RPA 99/2003.

A chaque extrémité du voile l'espaceur des barres ne doit pas être réduit de moitié sur

$\frac{1}{10}$ De la largeur du voile. Cet espaceur d'extrémité doit être au plus égal à 15 cm :

$$\text{On a : } \begin{cases} S_t = 15 \text{ cm} \rightarrow \frac{S_t}{2} = 7,5 \text{ cm} < 15 \text{ cm} ; \text{Condition vérifiée} \\ L = 1720 \text{ cm} \rightarrow \frac{L}{10} = 172 \text{ cm} \end{cases}$$

VI.6.2 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 : $S_t \leq \min\{1,5e ; 30 \text{ cm}\}$;
- Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles ne doit pas dépasser 1/10 de l'épaisseur du voile.

VI.6.3 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.

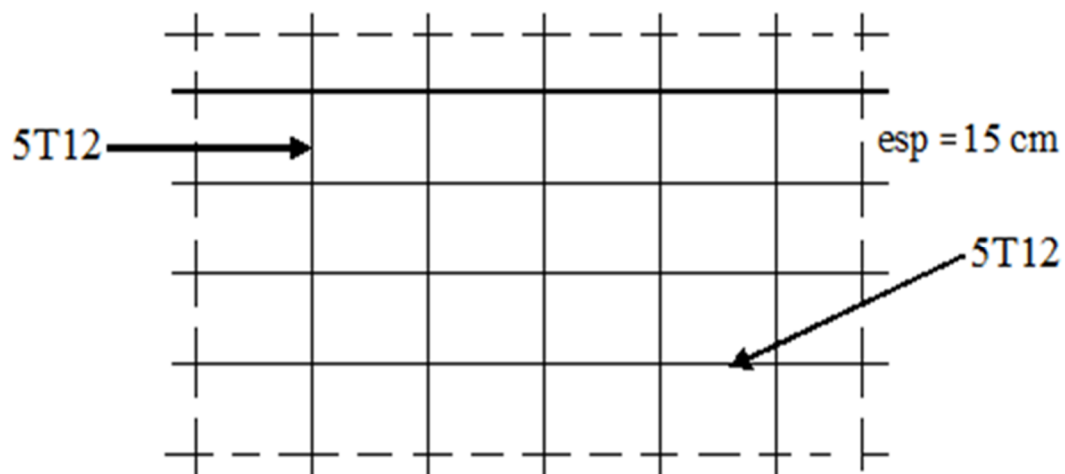


Figure VI.3 : La disposition du ferrailage du voile 15cm.

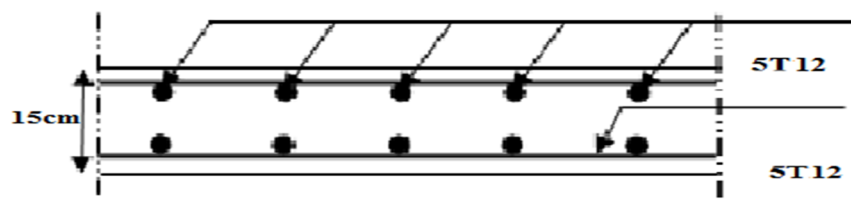


Figure VI.4 : Coupe horizontale du ferrailage du voile.

b) Voile de 20 cm :

Axe - 3 - / Caractéristiques géométriques : e = 20 cm L= 25.50 m

N	M	L	e	A	I	v	σ_{max}	σ_{min}
Kn	kN.m	m	m	m ²	m ⁴	m	kN/m ²	kN/m ²
828,57	14,99	25,5	0,2	5,1	276,356	12,75	163,156	161,773

a) Détermination des contraintes :

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M \times V}{I} = \frac{828,57}{5,1} + \frac{14,99 \times 12,75}{276,356} = 163,156 \text{ KN/m}^2 \\ \sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{M \times V}{I} = \frac{828,57}{5,1} - \frac{14,99 \times 12,75}{276,356} = 161,773 \text{ KN/m}^2 \end{cases}$$

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 :

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

b) Calcul des armatures verticales :

D'après le RPA99 (version 2003) on à :

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

On calcule le ferrailage pour une bande de 1m :

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

- Le diamètre

$$D \leq 1.a / 10 \text{ (mm)} \quad D \leq \frac{1 \times a}{10} \text{ (mm)} \Rightarrow D \leq \frac{1 \times 200}{10} \Rightarrow D \leq 20 \text{ mm}$$

On adopte : D= 12 mm

Donc : on prend : **6T12 p.ml** = 6,79 cm²

c) Armatures de couture :

$$A_{vj} = 1,1 \frac{T}{f_e} = 1,1 \frac{1,4V_u}{f_e} = 1,1 \times \frac{1,4 \times 30,6 \times 10}{400} = 1,18 \text{ cm}^2$$

d) Armatures totale :

$$A_v = A_{min} + A_{vj} = 3 + 1,18 = 4,18 \text{ cm}^2$$

Donc : on prend : **6T12 p.ml** = 6,79 cm²

e) L'espaceement :

$$\text{Selon le BAEL 91, on a : } S_t \leq \min\{2a ; 33 \text{ cm}\} = \min\{40 \text{ cm} ; 33 \text{ cm}\} \Rightarrow S_t \leq 33 \text{ cm}$$

VI.5 Vérification à l'ELS :

a) L'espaceur :

Selon le RPA 99/03 : $S_t \leq \min\{1,5a ; 30 \text{ cm}\} = \min\{30 \text{ cm} ; 30 \text{ cm}\} \Rightarrow S_t \leq 30 \text{ cm}$

Donc : $S_t \leq \min\{S_{t \text{ BAEL}} ; S_{t \text{ RPA}}\} \Rightarrow S_t \leq 30 \text{ cm}$

On adopte un espaceur de $S_t = 15 \text{ cm}$

b) Vérification des contraintes de cisaillement :

• BAEL 91 :

$$\tau_u = \frac{V_u}{b \times d} = \frac{30,6 \times 10}{(20 \times 0,9) \times (2550)} = 0,0066 \text{ MPa}$$

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

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

$\tau_u = 0,0066 \text{ MPa} < \bar{\tau}_u = 3,25 \text{ MPa}$; Condition vérifiée

• RPA 99/2003 :

$$\tau_b = \frac{T}{b \times d} = \frac{1,4 \times 30,6 \times 10}{(20 \times 0,9) \times (2550)} = 0,0093 \text{ MPa}$$

$\tau_b = 0,0093 \text{ MPa} < \bar{\tau}_b = 0,2f_{c28} = 5 \text{ MPa}$; Condition vérifiée

Donc pas de risque de cisaillement

VI.6 Disposition des armatures :**VI.6.1 Armatures verticales :**

- Les arrêts, jonctions et enrobage 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 fois l'épaisseur du mur ni 30 cm, selon le RPA 99/2003.

A chaque extrémité du voile l'espaceur des barres ne doit pas être réduit de moitié sur

$\frac{1}{10}$ De la largeur du voile. Cet espaceur d'extrémité doit être au plus égal à 15 cm :

$$\text{On a : } \begin{cases} S_t = 15 \text{ cm} \rightarrow \frac{S_t}{2} = 7,5 \text{ cm} < 15 \text{ cm} ; \text{Condition vérifiée} \\ L = 2550 \text{ cm} \rightarrow \frac{L}{10} = 255 \text{ cm} \end{cases}$$

VI.6.2 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 : $S_t \leq \min\{1,5e ; 30 \text{ cm}\}$;
- Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles ne doit pas dépasser 1/10 de l'épaisseur du voile.

VI.6.3 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.

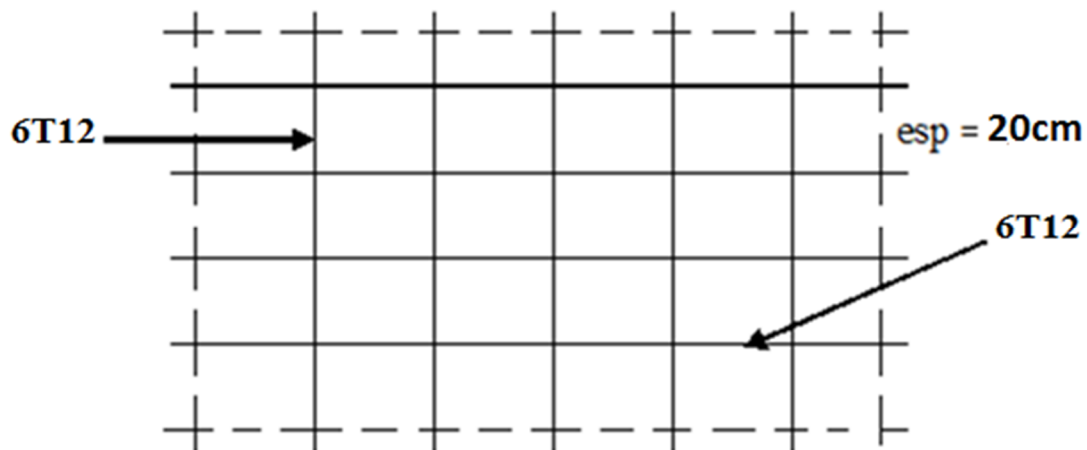


Figure VI.5 : La disposition du ferrailage du voile 20cm.

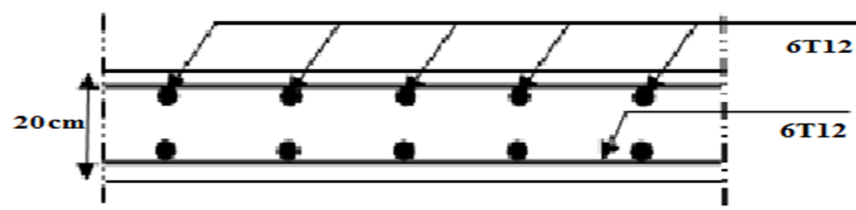


Figure VI.6 : Coupe horizontale du ferrailage du voile.