

VII.1.Ferrailage des voiles

VII.1.1.introduction

Le calcul des voiles peut se faire par plusieurs méthodes où chacune ayant des avantages et caractéristiques, parmi ces méthodes la méthode de l'ACI 318 (règlement américaine), qui considère les éléments voile - poteau comme un élément de forme (I, U ...) soumise à un effort normale (P) et un effort tranchant (V) et un moment fléchissant (M)

Selon le règlement il convient que :

- Les armatures horizontales et verticales assurent la résistance à l'effort tranchant (V).
- Les armatures verticales dans les éléments de rive (zone de confinement) aux 02 extrémités de la section transversale du voile ou trumeau assurent la résistance à la flexion composée (P .M).

Le voile en béton armée doit faire l'objet des vérifications suivantes :

- Justification de la stabilité de forme (résistance au flambement).
- Résistance à l'effort normale.
- Résistance à l'effort tranchant.
- Résistance en flexion composée.

Dans ce qui suit nous exposant la méthode réglementaire du code américaine l'ACI 318-02

VII.1.2.Calcul des voiles par la méthode réglementaire (ACI 318-02)

VII.1.2.1. Justification de la stabilité et la résistance à la compression (flambement)

Lorsque P_u est un effort de compression axiale ou excentré de $e \leq a/6$, le voile est stable vis-à-vis du flambement si on vérifie que : $P_u \leq \Phi P_n$

$$P_n = 0,55 \cdot f_{bc} \cdot A_g \cdot \left[1 - \left(\frac{k \cdot h_s}{32 \cdot a} \right)^2 \right]$$

Avec :

P_u : Effort normale ultime de compression de la combinaison la plus défavorable.

P_n : Effort nominal limite de la section transversale du voile.

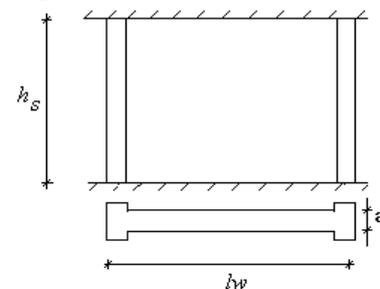
Φ : Facteur de réduction ($\Phi = 0,70$)

A_g : Section transversale brute du voile

h_s : Hauteur libre de chaque niveau.

a : L'épaisseur du mur

f_{bc} : Contrainte admissible du béton.



K : Coefficient de flambement.

$$K = \frac{l_f}{l}$$

Soit :

l : h_s

l_f : La longueur libre de flambement d'un mur non raidi.

Les valeurs du rapport $\left(\frac{l_f}{l}\right)$ sont données par le tableau suivant :

Tableau VII.1 : Valeurs de (l_f/l)

Liaisons du mur		Mur armé verticalement	Mur non armé verticalement
		Valeur de k	
Mur encasté en tête et en pied	Il existe un plancher de part et d'autre	0,80	0,85
	Il existe un plancher d'un seul côté	0,85	0,90
Mur articulé en tête et en pied		1,00	1,00

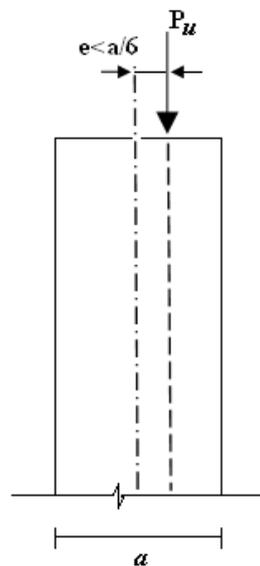


Figure VII.1 : Etat d'un mur en compression

VII.1.2.2. Justification de la résistance vis-à-vis de l'effort normale

-Pourcentage minimale des armatures de la zone comprimée

	Armatures horizontales	Armatures verticales
Espacement maximale entre axe des armatures	$\leq \min (l_w/5 ; 3a ; 45\text{cm})$	$\leq \min (l_w/ 3 ; 3a ; 45\text{cm})$
Armatures minimales Pourcentages minimales	$A_{sh} \geq \rho_h \cdot 100 \cdot a$ $\geq 0.0025 \rho_h$	$A_{sv} \geq \rho_v \cdot l_w \cdot a$ $= 0.0025 + 0.5 \rho_v$ $\left(2.5 - \frac{h_w}{l_w} \right) (\rho_h - 0.0025) \geq 0.0025$

h_w : Hauteur totale du voile mesurée a partir de la base jusqu'au sommet de la structure.

ρ_v : Pourcentage des armatures verticales dans l'âme du mur

La section d'armature verticale correspondant au pourcentage doit être répartie par moitié sur chacune des faces de la bande de mur considérée dans le cas de la compression.

La section d'armature horizontale parallèle aux faces du mur doit être répartie par moitié sur chacune des faces d'une façon uniforme sur la totalité de la longueur du mur ou de l'élément de mur limité par des ouvertures.

-Limitation de l'effort normal de compression de calcul par la condition de résistance

Les voiles doivent être de dimension dans le but de limiter le risque de rupture fragile sous sollicitation d'ensemble due au séisme, l'effort normal de compression de calcul est limité par la condition suivante :

$$\frac{P_u}{P_o} \leq 0,35$$

Tel que :

$$P_o = 0,85 \cdot f_{bc} \cdot (A_g - A_s) + A_s \cdot f_e \quad \text{et} \quad A_g = a \cdot l_w$$

P_o : Etant la charge axiale nominale (limite) de la section du voile.

A_g : Section transversale brute du voile.

A_s : Section d'armature verticale de calcul ou choisit.

a : épaisseur du voile.

f_e : contrainte élastique de l'acier.

f_{bc} : contrainte admis

On peut prendre pour la simplicité des calculs $A_s=0$ donc $P_o = 0,85 \cdot f_{bc} \cdot A_{g_e}$ ou bien un pourcentage minimum des armatures verticales $A_{sv} \geq \rho_v \cdot l_w \cdot a$

VII.1.2.3. Justification de la résistance vis-à-vis de l'effort tranchant -Pourcentage minimale des armatures en dehors des zones de rives

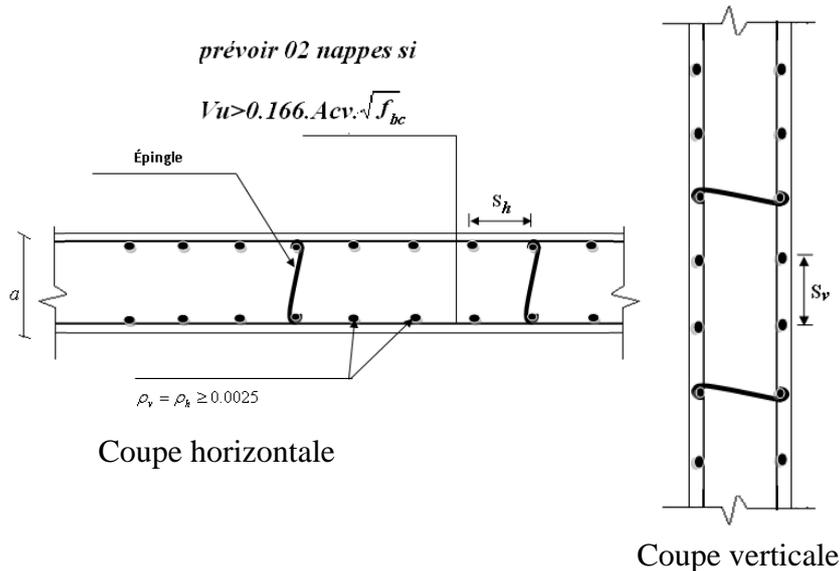


Figure .VI.2 : disposition des armatures de l'âme du voile

Figure VII.2. : Disposition des armatures de l'âme du voile

Valeur de l'effort tranchant	Pourcentage armatures horizontales et verticales	Vérification
$V_u > 0.166 \times A_{cv} \times \sqrt{f_{bc}}$ Ou $a \geq 25$ cm	$\rho_v = \rho_h = \rho_n \geq 0.0025$ En 02 nappes disposées sur chaque face du mur reliées par des épingles Espacement : $S \leq \min(3a ; 45\text{cm})$	$V_u < 0,664 \cdot A_{cv} \cdot \sqrt{f_{bc}}$ Il faut que : $\Phi V_n > V_u$ $= 0,75 \Phi$ $V_u = A_{cv} \cdot (a_c \cdot 0,083 \cdot \sqrt{f_{bc}} + \rho_n \cdot f_y)$ $a_c = 3$ pour : $\frac{h_w}{l_w} \leq 1,5$ $a_c = 2$ pour : $\frac{h_w}{l_w} \leq 2$ Il y a lieu d'interpoler les valeurs de a_c , linéairement pour des valeurs de $\frac{h_w}{l_w}$ entre 1,5 et 2
$V_u > 0,083 \times A_{cv} \times \sqrt{f_{bc}}$ $a \geq 25$ cm	Armature verticale : - $\rho_v \geq 0,0012$ avec des barres HA16 - $\rho_v \geq 0,0015$ autres barres HA Armatures horizontale : - $\rho_h \geq 0,002$ avec des barres HA16 - $\rho_h \geq 0,0025$ autres barres HA Espacement : $S \leq \min(3a ; 45\text{cm})$	Il faut que : $\Phi V_n > V_u$ $V_n = A_{cv} \cdot (a_c \cdot 0,083 \cdot \sqrt{f_{bc}} + \rho_n \cdot f_y)$

A_{cv} : Section brute du béton par mètre linéaire dans la direction de l'effort tranchant

$$A_{cv} = a \cdot 100 .$$

$\Phi = 0,75$: coefficient de sécurité.

V_u : Effort tranchant obtenu par le calcul de la structure dans la combinaison sismique

V_n : Effort tranchant nominale de la section transversale dans la direction de l'effort tranchant

a_c : Coefficient dépendant de l'élanement du mur

ρ_v : Pourcentage des armatures verticales dans l'âme du mur.

ρ_h : Pourcentage des armatures horizontales dans l'âme du mur

ρ_n : Pourcentage nominale des armatures dans l'âme du mur

h_w : Hauteur totale du voile mesurée à partir de la base jusqu'au sommet de la structure.

l_w : Longueur du mur en plan

- Armatures d'âme nécessaire pour l'effort tranchant

Lorsque V_u est un effort tranchant ; le voile est stable vis-à-vis du cisaillement si on vérifie

$$\text{que : } \Phi \cdot V_n > V_u \text{ et } V_n = A_{cv} \times (a_c \cdot 0,083 \cdot \sqrt{f_{bc}} + \rho_n \cdot f_e)$$

Avec :

$\Phi = 0,75$: coefficient de sécurité.

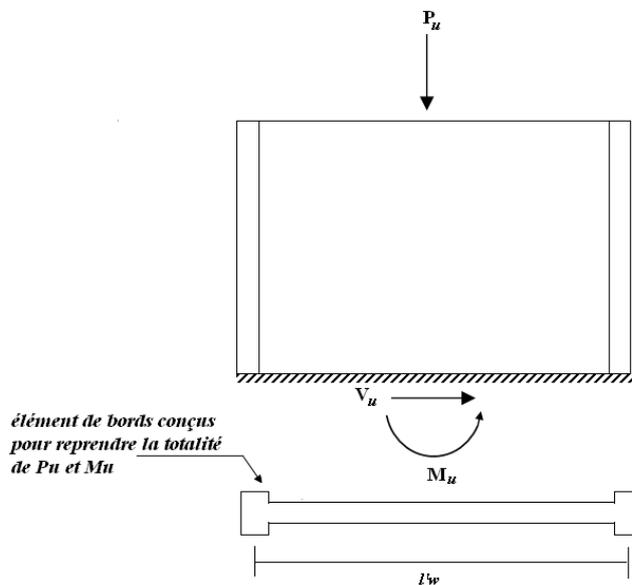
a_c : Coefficient dépendant de l'élanement du mur $a_c = 2$ pour $\frac{h_w}{l_w} \geq 2$

f_e : Contrainte admissible de l'acier

VII.1.3. Calcul des armatures nécessaires à la flexion composée

Le calcul d'un voile ou trumeau est effectué en flexion composée, il convient que les armatures verticales nécessaires pour la vérification de la résistance sous la combinaison sismique la plus défavorable, soient concentrées dans les éléments de rives, aux 02 extrémités de la section transversale du voile.

Les résistances à la flexion sont calculées de façon classique, en utilisant la valeur de l'effort normale P_u et le moment fléchissant M_u , résultant de l'analyse dans la situation sismique de calcul elles visent à éviter les modes de ruine par cisaillement.



Ces éléments de rive constituent en quelque sorte des membrures latérale plus résistantes et plus ductiles que le reste du voile. Comme ces zones sont les plus sollicitées, c'est à cet endroit que se produirait en premier lieu l'éclatement du béton.

On empêche donc la ruine en commençant par le renforcement de ces zones, les armatures de confinement sont des cadres ou des épingles similaires à ceux des poteaux.

On définit les zones confinées de rives de la façon suivante :

En élévation, les armatures de confinement doivent être présentes sur toute la hauteur h_{cr} de la zone critique .en plan, la zone à confiner s'étend horizontale sur une longueur L_{bz} mesurée depuis la fibre de compression extrême du mur jusqu'au point où le béton non confiné peut éclater à cause de déformation de compression importantes.

VII.1.3.1. Dimensionnement des éléments de rives ou de bord

On utilise pour la détermination des éléments de rive l'approche de « **BOUNDARY ELEMENT** » qui prescrit :

Un élément de rive conçu spécialement si :

$$\frac{P_u}{A_g} \geq 0,2 \cdot f_{bc}$$

Dimensionnement de rives (boundary zones)

$$L_{bz} = 0,25.l_w \text{ pour } \frac{P_u}{P_o} = 0,35$$

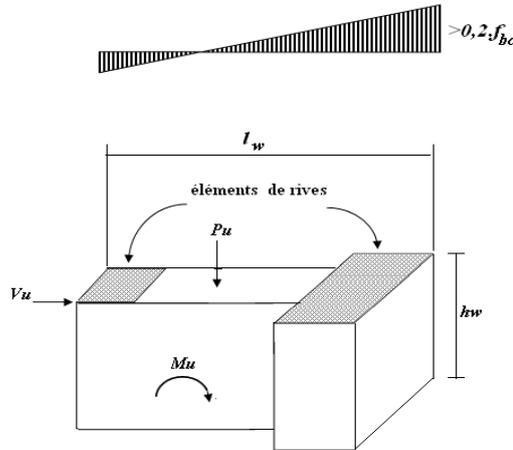


Figure .VII.3 : Etat de contraintes dans un mur

$$L_{bz} = 0,15.l_w \text{ pour } \frac{P_u}{P_o} = 0,15$$

Pour des valeurs de $\frac{P_u}{P_o}$ compris entre 0,15 et 0,35 il y a lieu d'interpoler linéairement

La longueur minimale des éléments de rive $L_{bz} = 0,15l_w$

Il n'y a pas de condition selon le code ACI 318-02 pour une épaisseur minimale T_{bz} des éléments de rive de mur, mais on peut se référer à l'EUROCODE 8 qui prévoit la dimension minimale suivantes :

$$-T_{bz} \geq 200 \text{ mm} \text{ et } T_{bz} \geq 15 \frac{h_s}{15}, h_s, \text{ la hauteur d'étage .}$$

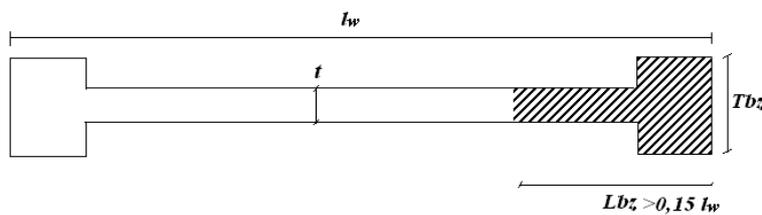


Figure .VII.4: Longueur minimale des éléments de rive confinés

VII.1.3.2. Armatures de résistance à la flexion composée

On calcul la section d'armature nécessaire pour une section en (I, U..), sollicitée en flexion composée

Les armatures choisit seront placées par symétrie dans les deux extrémités du voile étant

Donné que le moment Mu est réversible.

-Disposition constructives et pourcentage minimum dans les éléments de rives

Le pourcentage des armatures longitudinales de rive doit être $\geq 0,5\%$

$$\rho_V \geq 0,005 \text{ C'est-à-dire : } A_{CV} \geq 0,005 \cdot L_{bz} \cdot T_{bz}$$

La distance maximum entre barres longitudinales consécutives maintenues par des armatures de confinement :

Sens x-x : $hx = 30\text{cm}$,

Sens y-y : $hy = \min (L_{bz}/4 , 10+[(35-hx)/3]) \text{ cm}$

Selon RPA -99V03 le pourcentage min est 0,2% avec un espacement max de 15 cm]

[Selon EUROCODE 8 le pourcentage min est 0,5% avec un espacement max de 15 cm]

-Armature transversale dans la zone de confinement

Les armatures de confinement doivent être présentées sur toute la hauteur h_{cr} de la zone critique, en plan, la zone à confiner s'étend horizontalement sur une longueur L_{bz} .

La section d'armatures transversales est donnée par la formule suivante :

$$\text{Avec : } h_c = T_{bz} - 2(\text{enrobage}) \quad A_{sh}^t \geq 0,09 \times S_t \times h_c \times \frac{f_{bc}}{f_e}$$

Avec :

A_{sh}^t : Section d'armatures transversales totale.

f_{bc} : Contrainte admissible du béton.

f_e : Contrainte élastique des armatures transversales.

S_t : Espacement verticale des cadres avec:

$$S_t = \min \begin{cases} 0,25 \times L_{bz} \\ 6d_b \\ S_x \end{cases} \quad d_b : \text{diametre min de } A_{sv}$$

$$10 \text{ cm} \leq S_x = 10 + \left(\frac{36 - h_x}{3} \right) \leq 15 \text{ cm}$$

h_x : Espacement dans le sens x-x entre les barres longitudinales dans la zone de confinement

Le diamètre minimal est :

$$\phi_{st} \geq 0,35 \cdot d_{bl.\max}$$

Hauteur de la zone critique

La hauteur h_{cr} , où de produisent les déformations élastique, ou appelée zone de la « rotule plastique » en pied de mur également appelée zone « critique » est estimer par :

$$h_{cr} = \max[l_w; (Mu / 4Vu)]$$

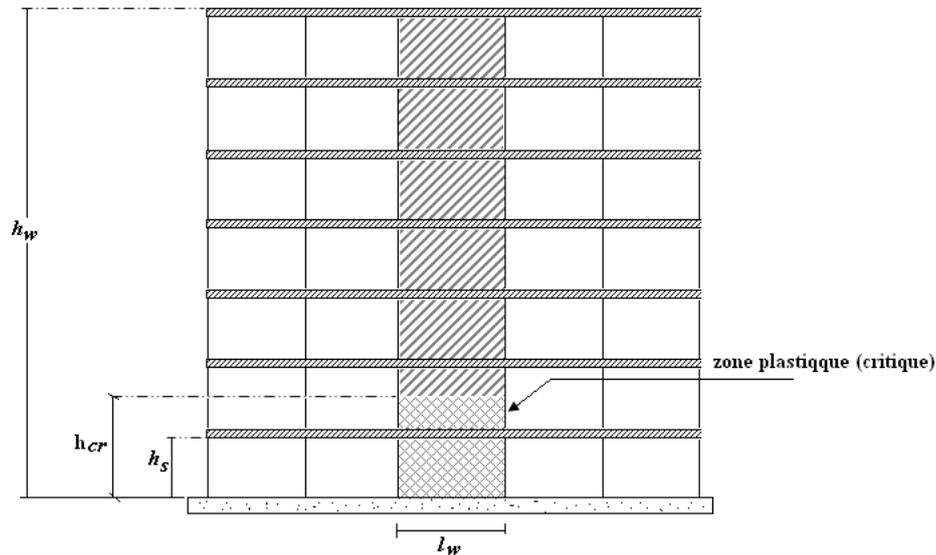


Figure VII.5 : Hauteur de la zone critique

VII.1.4.Exemple de calcul de la méthode réglementaire ACI 318-02

On va traiter l'étude d'un voile d'un immeuble à usage de d'habitation par la méthode du code ACI-318-02.

Voile démarre de RDC au 8^{ème} étage (V1) : Voile de contreventement :

$$a=20 \text{ cm}, l_w = 3,06 \text{ m}, h_w = 24,48 \text{ m}$$

Caractéristiques des matériaux :

- Béton :

$$f_{c28} = 25 \text{ MPa} ; f_{bc} = 21,74 \text{ MPa} ; \gamma_b = 1,15 \text{ (situation accidentelle)}, E_{ij} = 32\,164,20 \text{ MPa}$$

- Acier:

$$F_e \text{ E } 400, f_e = 400 \text{ MPa} ; \gamma_s = 1,0 \text{ (situation accidentelle)}, E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

Résultats d'analyse :

La section déterminante est située au rez-de-chaussée :

$$M_u = 4187,96 \text{ kN.m} \quad (G+Q+E)$$

$$P_u = 3750,73 \text{ kN} \quad (G+Q+E)$$

$$V_u = 973,12 \text{ kN} \quad (G+Q+E)$$

VII.1.4.1. Justification de la stabilité et la résistance à la compression (flambement)

On vérifie que $P_u \leq \Phi \cdot P_n$

$$P_n = 0,55 \cdot f_{bc} \cdot A_g \cdot \left[1 - \left(\frac{k \cdot h_s}{32 \cdot a} \right)^2 \right] \text{ D'où : } P_u = 3750,73 \text{ kN}$$

Avec :

P_u : Effort normale ultime de compression de la combinaison la plus défavorable.

P_n : Effort nominal limite de la section transversale du voile.

Φ : facteur de réduction ($\Phi = 0,70$)

A_g : Section transversale brute du voile

K : Coefficient de flambement.

h_s : Hauteur libre de chaque niveau.

a : Etant l'épaisseur du mur

f_{bc} : Contrainte admissible du béton.

Où :

$K = 0,85$ (il existe un plancher d'un seul coté)

$a = 20 \text{ cm}$

$h_s = 3,06 - 0,45 = 2,61 \text{ m}$

On remarque que dans ce cas étudié les poteaux d'extrémités du voile font partie intégrante de

Voile alors :

$$A_g = (4,50 - 0,50) \times 0,2 + 2 \times (0,50)^2 = 1,30 \text{ m}^2$$

AN :

$$P_n = 0,55 \times 21,74 \times 1,30 \times 10^6 \left[1 - \left(\frac{0,85 \times 2,61 \times 10^3}{32 \times 200} \right)^2 \right] = 10015 \text{ KN}$$

$$\Phi \cdot P_n = 0,7 \times 10015 = 7010,5 \text{ KN} > P_u = 3750,73 \text{ KN}$$

Alors : La stabilité au flambement est assurée.

VII.1.4.2. justification de la résistance vis-à-vis de l'effort normale

-Pourcentage minimale des armatures de la zone comprimée

Armatures horizontales :

Espacement maximale, $S_{\max} \leq \min(l_w/5, 3a, 45\text{cm})$

l_w : Longueur du mur en plane

$$\Rightarrow S_{\max} \leq \min(450/5 ; 3 \times 20 ; 45\text{cm}) = 45 \text{ cm}$$

Armatures minimales :

$$A_{sh} \geq \rho_h \cdot 100 \cdot a \text{ et } \rho_h \geq 0,0025$$

ρ_h : Pourcentage des armatures horizontales dans l'âme du mur

$$\Rightarrow A_{sh} \geq 0,0025 \times 100 \times 20 = 5 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

Armatures verticale :

Espacement maximale : $S_{\max} \leq \min(l_w/3, 3a, 45\text{cm}) \Rightarrow S_{\max} = 45 \text{ cm}$

Armatures minimales :

$$A_{sv} \geq \rho_v \cdot l_w \cdot a \text{ et } \rho_v = 0,0025 + 0,5 \times \left(2,5 - \frac{h_w}{l_w} \right) (\rho_h - 0,0025) \geq 0,0025$$

h_w : Hauteur totale du voile mesure a partir de la base jusqu'au sommet de la structure.

ρ_v : Pourcentage des armatures verticales dans l'âme du mur

$$\Rightarrow \rho_v = 0,0025 + 0,5 \times \left(2,5 - \frac{24,48}{4,50} \right) (0,0025 - 0,0025) = 0,0025$$

$$A_{sh} \geq 0,0025 \times 450 \times 20 = 22,5 \text{ cm}^2$$

-Limitation de l'effort normal de compression de calcul par la condition de résistance

Il faut que :

$$\frac{P_u}{P_o} \leq 0,35$$

Tel que : $P_o = 0,85 \cdot f_{bc} \cdot (A_g - A_s) + A_s \cdot f_e$ et $A_g = a \cdot l_w = 0,90 \text{ m}^2$

P_o : étant la charge axiale nominale (limite) de la section du voile.

A_s : Section d'armature verticale de calcul ou choisit

On prend un pourcentage minimum des armatures verticales $A_{sv} = 50 \text{ cm}^2$

$$P_o = [0,85 \times 21,74 \times (0,97 \cdot 10^6 - 5000) + 5000 \times 400] \cdot 10^{-3} = 27039,04 \text{ KN}$$

$$\frac{P_u}{P_o} = \frac{3750,73}{27039,04} = 0,14 \text{ KN} < 0,35 \text{ ok}$$

VII.1.4.3. justification de la résistance vis-à-vis de l'effort tranchant

- Vérification si 02 nappes d'armatures dans l'âme du voile sont nécessaires pour la résistance à l'effort tranchant

Prévoir 02 nappe si : $V_u > 0,083 \times A_{cv} \times \sqrt{f_{bc}}$ pour : $a < 25 \text{ cm}$

A_{cv} : Section brute du béton dans la direction de l'effort tranchant

$$A_{cv} = a \times l_w = 0,2 \times 4,50 = 0,90 \text{ m}^2$$

AN :

$$V_u = 973,12 \text{ KN} < 0,083 \times 0,90 \times \sqrt{21,74} \times 10^{-3} = 375,38 \text{ KN}$$

Donc 02 nappes d'armatures verticales et horizontales sont nécessaires, donc on dispose sur chaque face du mur 02 nappes qui sont écartées par des épingles.

- Pourcentage minimum des armatures horizontales et verticales de l'âme du voile

Armatures verticale :

$$\text{Espacement maximum : } S_{\max} \leq \min(3a, 45 \text{ cm}) = 45 \text{ cm}$$

La section minimale d'armatures verticales par ml :

$$\rho_v \geq 0,0015$$

$$A_{s_{\min}} = 0,0015 \times 20 \times 100 = 3 \text{ cm}^2 / ml$$

Si on choisit des aciers HA10 sur les deux faces on a : $(2 \times 0,79 = 1,58 \text{ cm}^2)$

$$\frac{1,58}{4,71} \cdot 100 = 33,33 \text{ cm} < 45 \text{ cm} \quad \text{OK}$$

Armatures horizontale :

$$S_{\max} = 45 \text{ cm}$$

La section minimale d'armatures horizontales par ml :

$$\rho_h \geq 0,0025$$

$$A_{s_{\min}} = 0,0025 \times 20 \times 100 = 5 \text{ cm}^2 / ml$$

Si on choisit de acier HA12 sur les deux faces on a : $(2 \times 1,13 = 2,26 \text{ cm}^2)$

$$\frac{2,26}{6,79} \cdot 100 = 33,28 \text{ cm} < 45 \text{ cm} \quad \text{OK}$$

- Armatures d'âme nécessaire pour l'effort tranchant

On opte pour deux nappes d'armatures en HA 12 avec un espacement $s = 20 \text{ cm}$

On vérifie que :

$$\Phi.V_n > V_u \text{ et } V_n = A_{cv} \times (a_c \cdot 0,083 \cdot \sqrt{f_{bc}} + \rho_n \cdot f_e)$$

Avec :

$$\Phi = 0,75$$

a_c : Coefficient de sécurité, Coefficient dépendant de l'élancement du mur

$$a_c = \text{pour } \frac{h_w}{l_w} = \frac{24,48}{4,50} = 5,44 \geq 2$$

ρ_n : Pourcentage nominale des armatures dans l'âme du mur

f_e : Contrainte admissible de l'acier

$$A_{cv} = 0,2 \times 4,50 = 0,90 \text{ m}^2$$

Pour une distance de 100 cm on a : 2 x 5 HA 12 = 11,31 cm²

$$\rho_n = \frac{11,31}{100 \times 20} = 0,00565$$

$$V_n = 0,90 \cdot 10^6 \times (2 \times 0,083 \times \sqrt{21,74} + 0,00565 \times 400) \cdot 10^{-3} = 2942,97 \text{ KN}$$

$$\Phi.V_n = 0,75 \times 2942,97 = 2207,22 \text{ KN} > V_u = 270,94 \text{ KN ok}$$

La vérification de l'effort tranchant est assurée par 02 nappes en HA 12 Horizontales et verticale espacement $s = 20$ cm (treillis en HA12 mailles 20x20 cm x cm), réparties sur Chaque face de l'âme du voile relié par des épingles.

Vérification Selon le RPA (Art.7.72) : $\bar{V} = 1,4V_u$

Le pourcentage d'armatures verticales et horizontales $\rho_{\min} \geq 0,002$

La vérification dans ces cas est la suivante : il faut que $\tau_b = \frac{\bar{V}}{b_o \cdot d} \leq \bar{\tau} = 0,2 \cdot f_{c28}$

b_o : Épaisseur du linteau ou du voile

d : hauteur utile $d = 0,9 \cdot h$

h : hauteur totale de la section brute

AN :

$$\rho_{\min} = 0,0025 \times 2 = 0,005 > 0,002$$

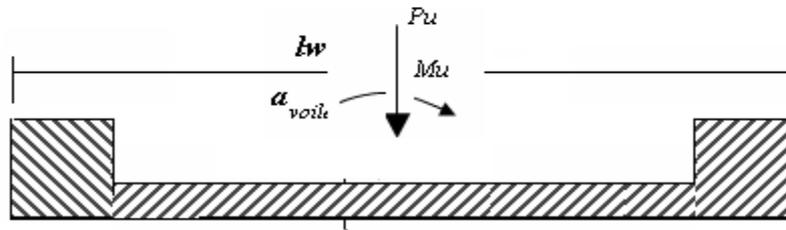
$$\tau_b = \frac{973,12 \times 1,4 \times 10^2}{200 \times 0,9 \times 450} = 1,68 \text{ Mpa} \leq \bar{\tau}_u = 0,2 \times 25 = 5 \text{ Mpa Condition vérifiée.}$$

VII.1.4.4. Calcul des armatures nécessaires à la flexion composée :

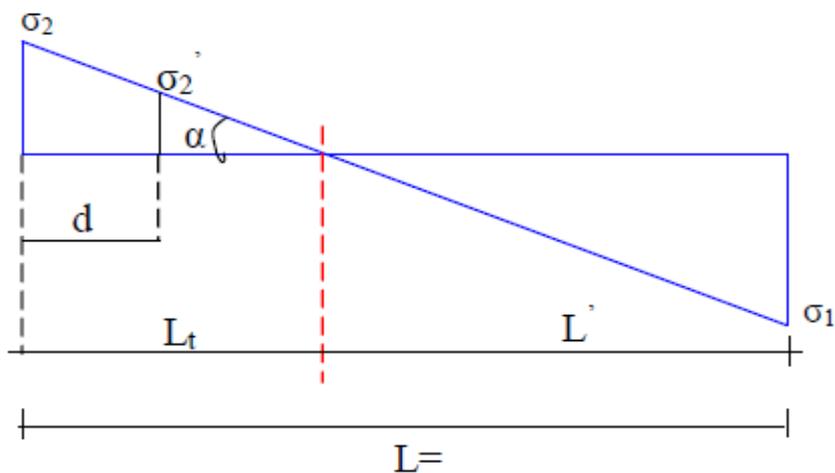
$$M_u = 4187,96 \text{ kN.m}$$

$$N = 3750,73 \text{ kN}$$

La section du voile à étudier est en forme de U (voile de rive), le calcul en flexion d'une telle section de forme U (pas de moyen de symétrie), on peut prendre pour des raisons simplification une section rectangulaire de longueur l_w et d'épaisseur a .



Nous proposons le calcul détaillé en prenant les voiles V1 ($L = 4,50\text{m}$) :



Détermination des sollicitations sous la combinaison $G + Q \pm E$

$$N = 3750,73 \text{ kN} \quad I = (0,2 \times 2,61^3)/12 = 0,3 \text{ m}^4$$

$$M_u = 4187,96 \text{ kN.m} \quad \Omega = 0,52 \text{ m}^2$$

$$v = h/2 = 1,305 \text{ m. (} h = 2,61\text{m)}$$

Armatures verticales:

$$\sigma_1 = \frac{N}{\Omega} + \frac{M \cdot v}{I} = 25,43 \text{ Mpa. (Compression)}$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{\Omega} - \frac{M \cdot v}{I} = -11,00 \text{ Mpa. (Traction)}$$

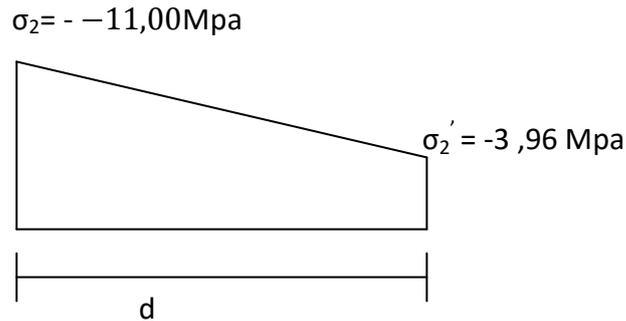
$$L_t = \frac{|\sigma_2|}{|\sigma_1| + |\sigma_2|} \times L = \frac{11,00}{25,43 + 11,00} \times 4,50 = 1,36 \text{ m}$$

$$L' = L - L_t = 2,61 - 1,36 = 1,31 \text{ m}$$

$$d \leq \min(3,75/2, (2/3) \times 1,31) = 0,87 \text{ m} \quad \text{soit : } d = 0,87 \text{ m}$$

$$\text{tg } \alpha = \sigma_2/L_t = \frac{-11,00}{1,36} = -8,09 \text{ Mpa}$$

$$\text{tg } \alpha = \sigma_2' / (L_t - d) \quad \Rightarrow \quad \sigma_2' = \text{tg } \alpha (L_t - d) = -3,96 \text{ Mpa}$$



$$\sigma_2' = \frac{N_1}{\Omega'} + \frac{M_1 \cdot v_1'}{I'} = -3,96 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = \frac{N_1}{\Omega'} - \frac{M_1 \cdot v_1'}{I'} = -11,00 \text{ Mpa}$$

$$I' = (0,2 \times 0,87^3) / 12 = 0,011 \text{ m}^4$$

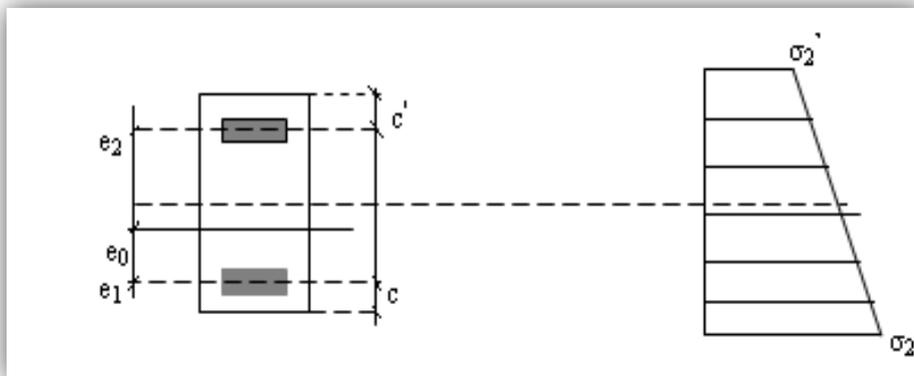
$$v_1' = 0,87 / 2 = 0,44 \text{ m}$$

$$\Omega' = 0,2 \times 0,87 = 0,18 \text{ m}^2$$

Donc:

$$N_1 = (\Omega' / 2) \times (\sigma_2 + \sigma_2') \quad \Rightarrow N_1 = -0,78 \text{ MN.}$$

$$M_1 = (I' / 2v_1') \times (\sigma_2' - \sigma_2) \quad \Rightarrow M_1 = 0,055 \text{ MN.m}$$



$$e_0 = \frac{M_1}{N_1} = -0,07 \text{ m} < d/6 \text{ et } N \text{ est un effort de traction} \Rightarrow \text{S.E.T (section entièrement tendue).}$$

Soit : $c = c' = 5 \text{ cm}$

$$e_1 = d/2 - e_0 - c = 0,31 \text{ m}$$

$$e_2 = h/2 + e_0 - c' = 1,33 \text{ m} \quad (h=2,61\text{m})$$

$$A_s = N_1 \times e_2 / (e_1 + e_2) \times f_e = 15,81 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 0,78 \times 1,33 / (0,31 + 1,33) \times 400 = 15,81 \text{ cm}^2$$

$$A_s' = N_1 \times e_1 / (e_1 + e_2) \times f_e = 3,68 \text{ cm}^2$$

$$A_s' = 0,78 \times 0,31 / (0,31 + 1,33) \times 400 = 3,68 \text{ cm}^2$$

$$A_s = A_s + A_s' = 19,67 \text{ cm}^2$$

$$A_s/\text{ml}/\text{face} = 19,67 / (2 \times 0,87) = 11,3 \text{ cm}^2$$

Armatures minimales de RPA 99:

Dans la zone tendu (d'about) : D'après le RPA 99 (Art 7.7.4.1):

$$A_{RPA} = 0,20\% \ b \ L_t$$

b : épaisseur du voile

L_t : longueur de la section tendue

$$A_{RPA} = 0,002 \times 0,2 \times 1,36 = 5,44 \text{ cm}^2$$

$$A_{RPA}/\text{ml}/\text{face} = , \text{ cm}^2/\text{ml}/\text{face}.$$

Dans la zone courante : D'après le RPA 99 (Art 7.7.4.3):

$$A_{\min} = 0,15\% \times b \times l = 0,15\% \times 0,2 \times 3,75 = 11,25 \text{ cm}^2$$

$$A_{\min}/\text{ml}/\text{face} = 11,25 / (2 \times 3,75) = 1,5 \text{ cm}^2/\text{ml}/\text{face}.$$

$$\text{Donc : } A_{SV} = \max (A_s, A_{RPA}, A_{\min}) = 11,3 \text{ cm}^2$$

Le ferrailage sera fait pour la moitié de voile à cause de la symétrie :

$$A_s = 2 \times 4,50 \times (4,3/2) = 17,60 \text{ cm}^2$$

Choix des barres :

En zone courante : soit 14HA14/ml/face. $(A_s = 21,55 \text{ cm}^2)$

En zone d'about : soit. 8HA14/ml/face $(A_s = 12,32 \text{ cm}^2)$

Espacement :

En zone courante : $S_t \leq \min (1.5e, 30) = 30 \text{ cm}.$

Soit : $S_t = 20 \text{ cm}.$

En zone d'about : $S_{ta} = S_t/2 = 10 \text{ cm}.$

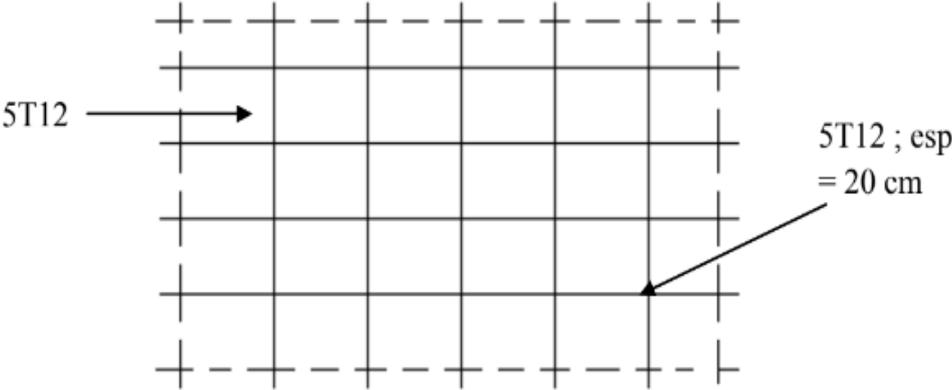


Figure .VII.6 : Exemple de ferraillage des voiles