

Dynamique des Structures

Abdellatif MEGNOUNIF

E-mail: abdellatif_megnounif@yahoo.fr

Exemple de ferrailage d'un voile

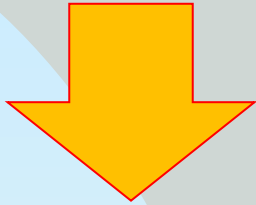
Application Samedi 11.07.2026

1. Introduction

- ✓ L'objectif de cette application est de décrire étape par étape les applications du logiciel « Calcul de voile » à travers un exemple déjà simulé par ROBOT et dont les efforts internes N, M et T sont déjà calculés.
- ✓ Une procédure détaillée concernant l'utilisation du logiciel (ferraillage de voile) est décrite.

**Finalité : Utilisation du logiciel
(ferraillage de voile)**

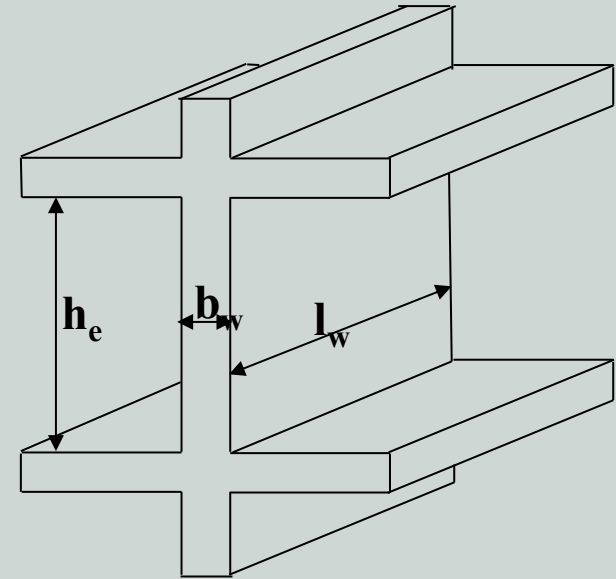
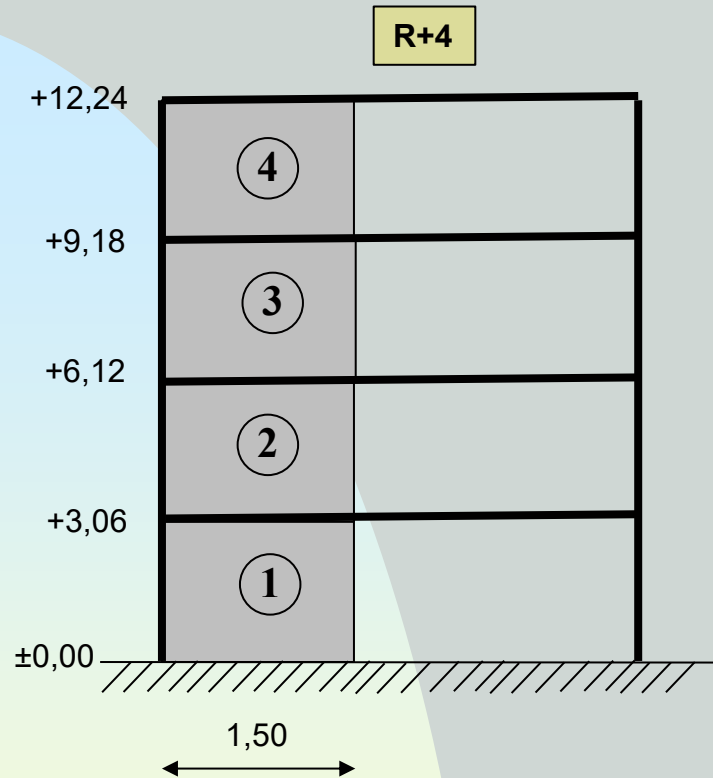
Données de l'exemple



**Exemple déjà
traité par ROBOT**

A vérifier

2. Données de l'exemple



$b_w = 0,20 \text{ m}$
 $l_w = 1,50 \text{ m}$
 $h_e = 2,66 \text{ m}$
 $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$
 $f_e = 400 \text{ MPa}$
 $M_{RD} = 1002 \text{ KN.m}$

Système de
contreventement type 2

Zone sismique II

$Q_f = 1,1$
 $T_0 = 0,40 \text{ s}$
 $T_2 = 0,30 \text{ s}$

Utile pour la
vérification de la
ductilité du voile type 1

Différents types de voiles selon
RPA2024

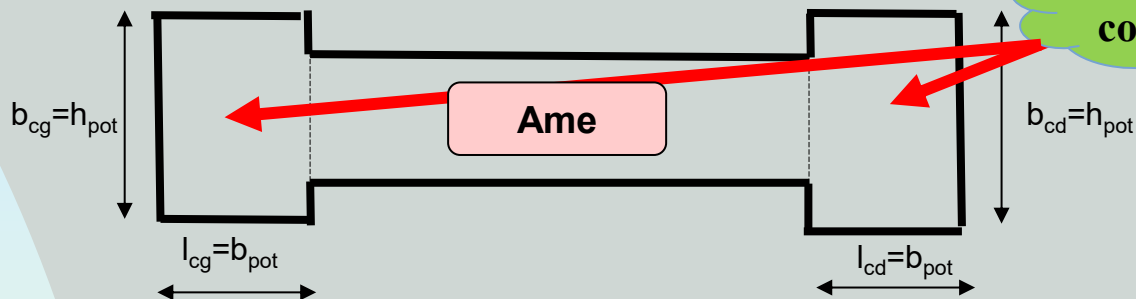
Types de voiles définis dans le logiciel

Chaque voile

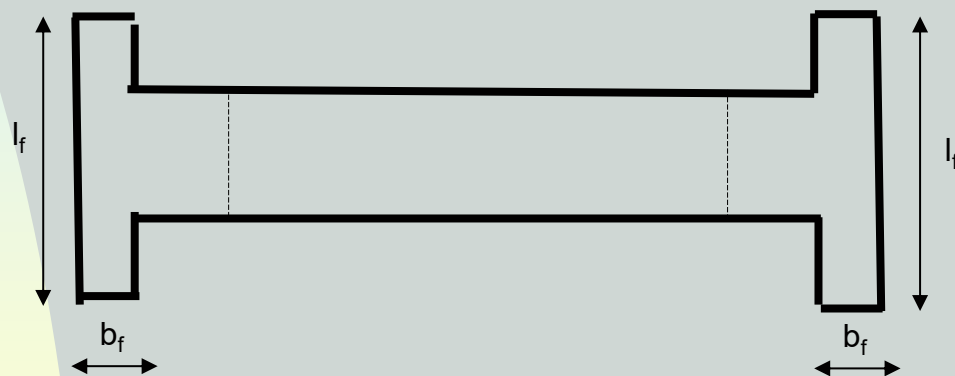
Type 1



Type 2



Type 3



Type 4

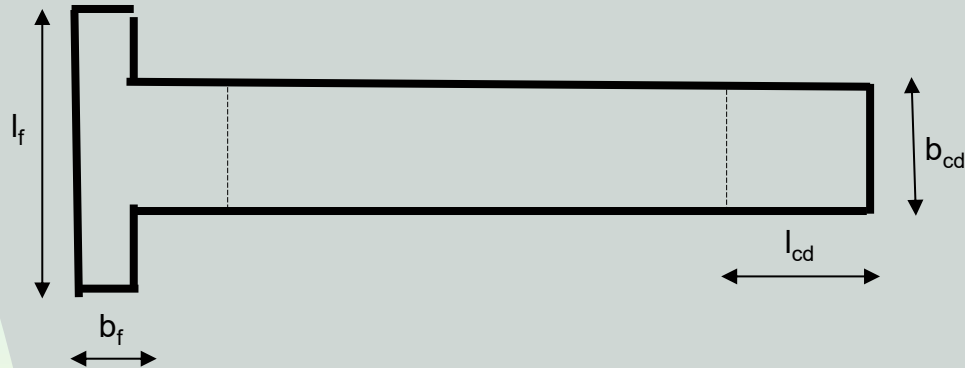


Types de voiles définis dans le logiciel

Type 5



Type 6

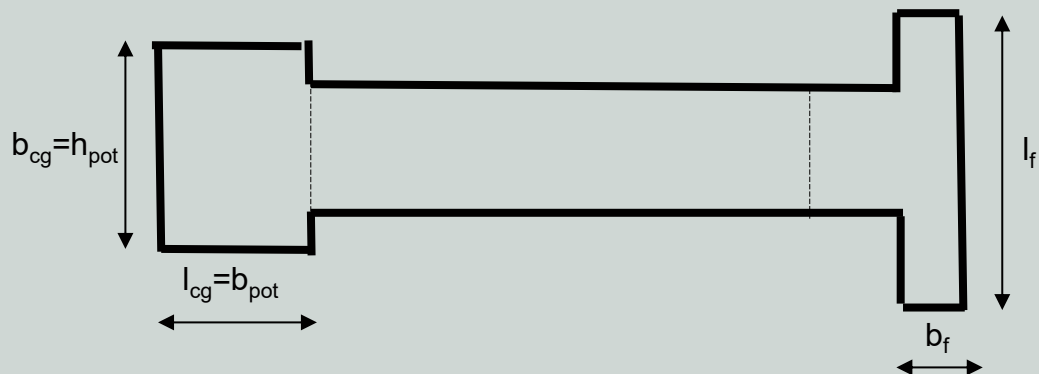


Type 7

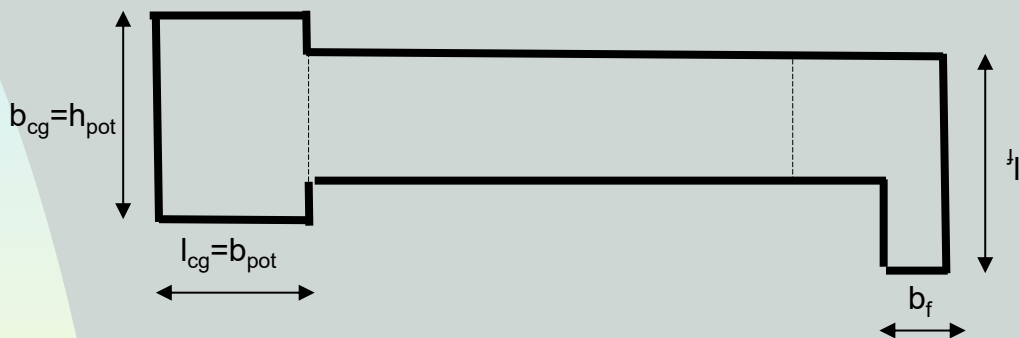


Types de voiles définis dans le logiciel

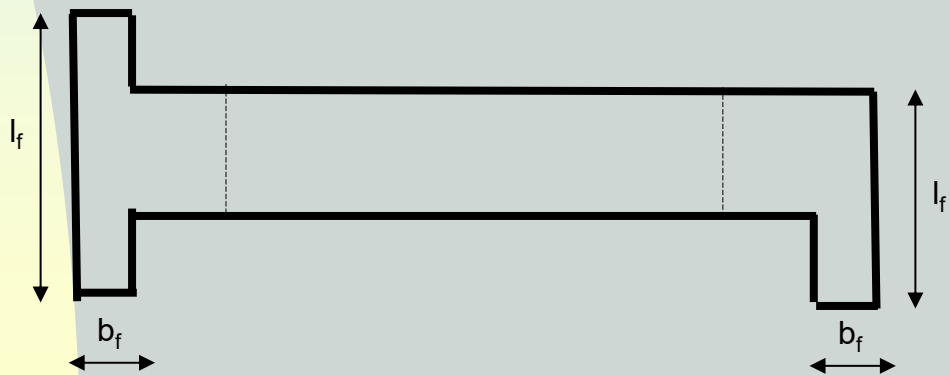
Type 8



Type 9



Type 10



Passer aux 1ères vérifications selon
RPA2024

Les 1ères vérifications

1.

Voile ?

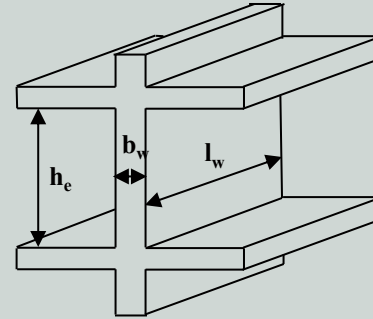


Si $l_w \geq \max(\frac{h_e}{3}, 4 b_w, 1 \text{ m})$ Voiles
Sinon : Eléments linéaires (poteaux)

2.

Epaisseur minimale = $b_w \geq \max(15 \text{ cm}, \frac{h_e}{20})$

En plus, pour stabilité de forme (non flambement)
épaisseur doit être déterminée en fonction de « h_e » et
des conditions de rigidité aux extrémités (ci-dessous)



$$b_w \geq \max\left(15 \text{ cm}, \frac{h_e}{20}\right) = \max\left(15 \text{ cm}, \frac{266}{20}\right) = 15 \text{ cm}$$

$$b_w = 20 \text{ cm}$$

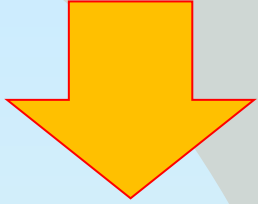
C.V

$$\text{et } l_w \geq \max\left(\frac{h_e}{3}, 4 b_w, 1 \text{ m}\right) = \max\left(\frac{2,66}{3}, 4 * 0.2, 1 \text{ m}\right) = 1 \text{ m}$$

$$l_w = 1,50 \text{ m}$$

C.V

Efforts sur le voile



Voile le plus sollicité

**N, M et T
Voile de
contreventement**

**Normalement un voile
suivant X et un voile
suivant Y**

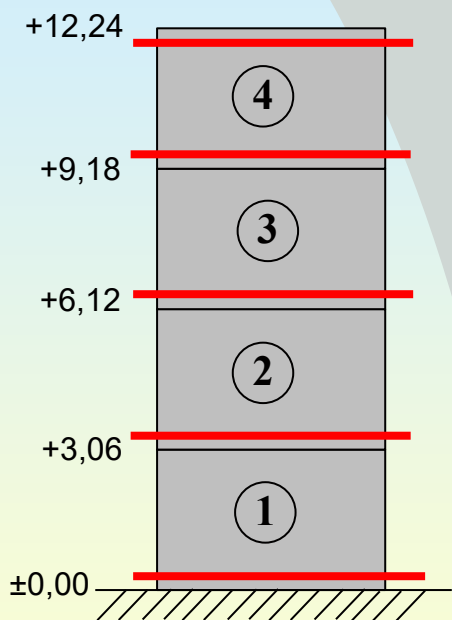
**Tirer des
résultats de
ROBOT**

2. Données de l'exemple

Récapitulatif des efforts internes pour le ferrailage

Récapitulatif

ELA



Niveau	NRx (KN)	TRy (KN)	MRz (KN.m)
0,00	173,10	-88,56	215,94
3,06	25,32	-78,14	116,85
6,12	-37,99	-47,22	58,69
9,18	-92,61	-18,65	27,29
12,24	-44,86	11,78	-44,77

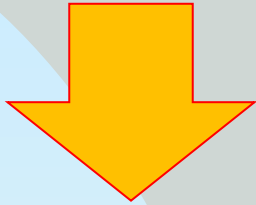
Ce sont les résultats finaux du voile choisi



Moments enveloppes ou efforts tranchants enveloppes ?



Vérifier voile élancé ou non



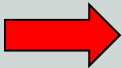
**Enveloppe de
calcul des
efforts
(Tranchants et
moments)**

**Vérifier voile
élancé ou non**

2. Détermination des efforts du voile

Moments

Elancé ?



$h_w/l_w > 2.0$

$h_w/l_w = 12,24/1,5 = 8,16 > 2,0$ Voile élancé

Hcr ?

$h_{cr} = \max(l_w, \frac{h_w}{6})$

et

$$h_{cr} \leq \begin{cases} 2.l_w \\ h_e: \text{ pour } n \leq 6 \text{ niveaux} \\ 2.h_e: \text{ pour } n > 6 \text{ niveaux} \end{cases}$$

$h_{cr} = \max(l_w, h_w/6) = \max(1,5, 12,24/6) = 2,04 \text{ m}$
 $h_{cr} \leq (2l_w, h_e) = \leq (2 \times 1,5, 2,66) \leq 2,66$

EXCEL

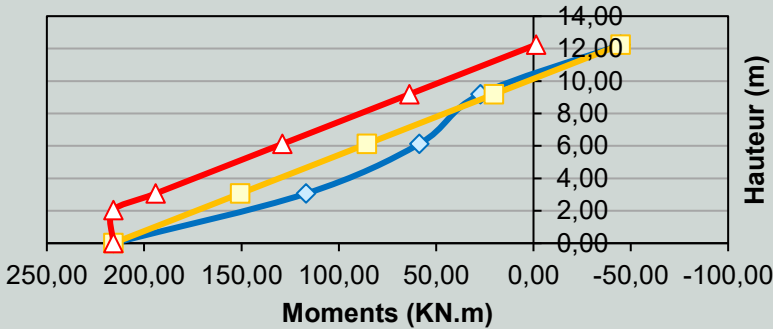


hauteur(m)	Moments avant (KN.m)	Moments translates (KN.m)
0,00	215,94	215,94
2,04	/	215,94
3,06	116,85	194,21
6,12	58,69	129,04
9,18	27,29	63,86
12,24	-44,77	-1,32

Rem : Pour le ferrailage, et pour question pratique (sur chantier), il vaut mieux aller au niveau de l'étage (+3,06 m) et ne pas s'arrêter à Hcr (2,04 m).

Moments Vs hauteur

—◇— Moments d'analyse —■— Enveloppe lineaire
—△— Enveloppe decalée



Efforts tranchants ?

« T »
Modifié ?

Systèmes de contreventement
mixte avec voiles élancés

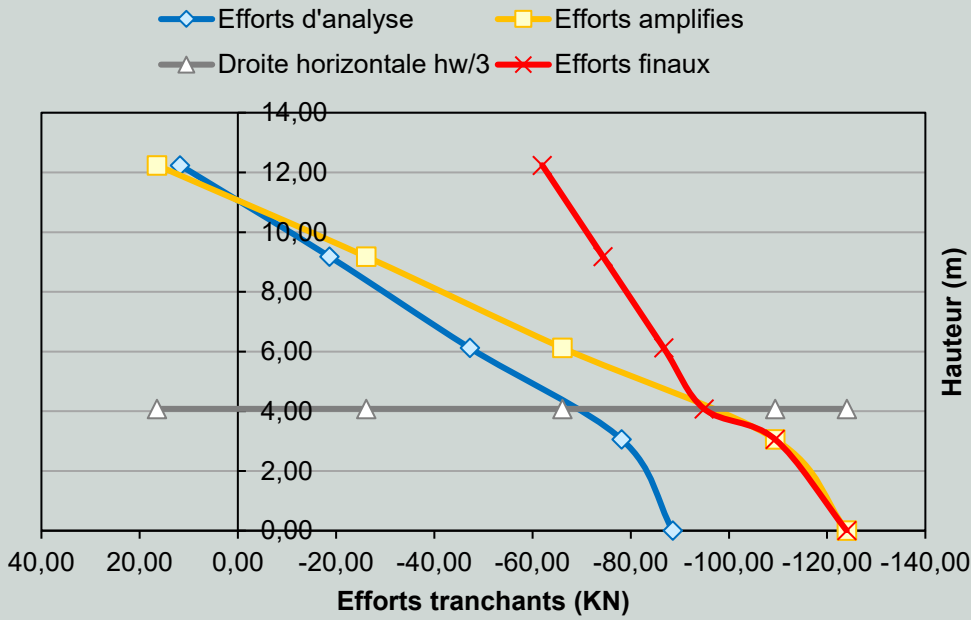
Systèmes 2, 3, 4, et 6

Efforts
tranchants

Vers EXCEL

Nouvelle hauteur (m)	Efforts tranchants avant (KN)	Efforts tranchants finaux (KN)
0,00	-88,56	-123,98
3,06	-78,14	-109,40
4,08	/	-94,97
6,12	-47,22	-86,72
9,18	-18,65	-74,36
12,24	11,78	-61,99

Efforts tranchants Vs hauteur

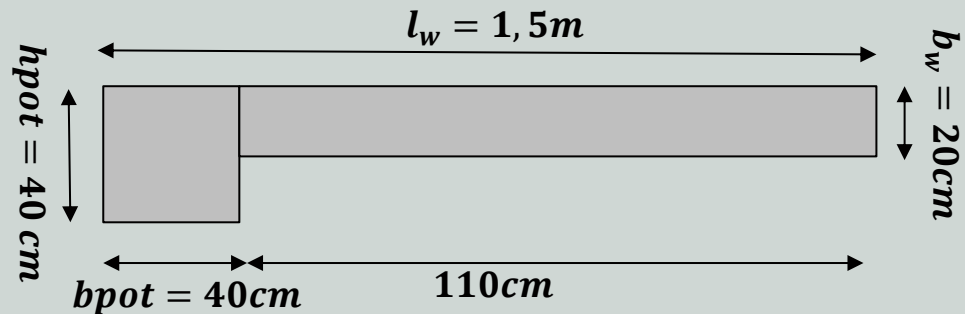
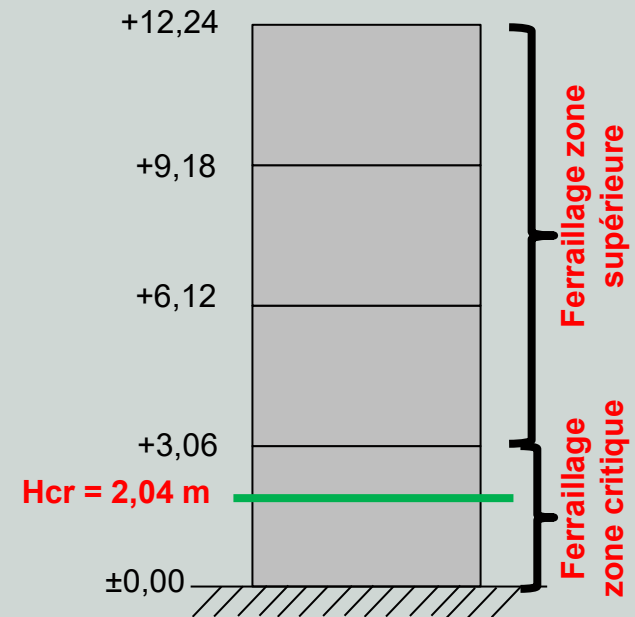


FERRAILLAGE

Après la détermination des efforts N, T et M, on va ferrailer les voiles

Calcul du ferrailage

Zone critique et zone supérieure



3. Ferrailage du voile

1.

Effort normal réduit ?



Limitation de l'effort normal de compression de calcul des voiles :

$$v = \frac{N_d}{B_c \cdot f_{c28}} \leq 0,40$$

A vérifier sous combinaison sismiques réglementaires

2.

Contraintes limites de cisaillement du béton dans les linteaux et trumeaux

$$\tau_b \leq 0,20 f_{c28}$$

où $\tau_b = \frac{\bar{V}}{b_0 d}$ ($\bar{V} = 1,4 V u_{calcul}$)

b_0 : Epaisseur du linteau ou du voile
 d : hauteur utile = 0,90 h
 h : hauteur totale de la section brute

1. $N_d = 173,10 \text{ KN}$ $B_c = h_{pot} \cdot b_{pot} + (l_w - b_{pot}) * b_w$ $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$
 $= 0,4 * 0,4 + 1,1 * 0,2 = 0,38$

$$v = \frac{N_d}{B_c \cdot f_{c28}} = \frac{173,10}{0,38 \cdot 25 \cdot 10^3} = 0,018 \leq 0,40$$

C.V

2. $\bar{V} = -123,98 \text{ KN}$ $b_0 = b_w = 0,2 \text{ m}$ $d = 0,9 \times h = 0,9 \times 3,06$

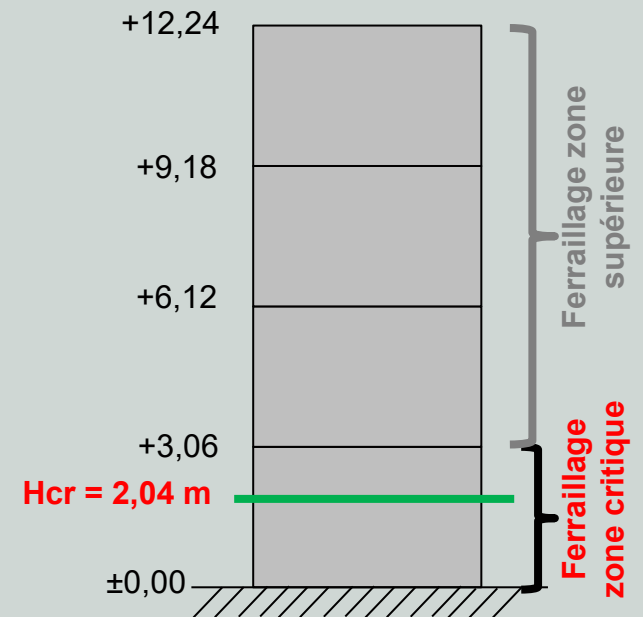
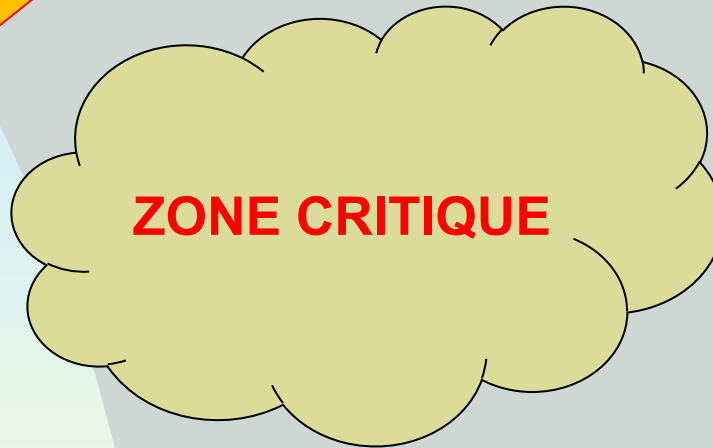
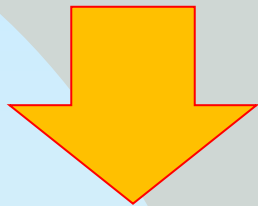
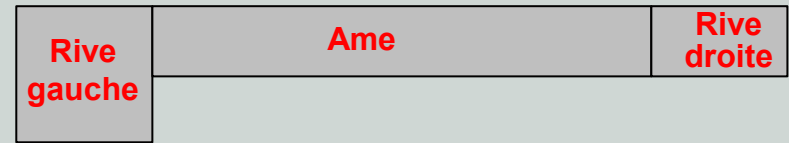
$$\tau_b = \frac{123,98}{0,2 \times 0,9 \times 3,06} 10^{-3} = 0,225 \text{ MPa} \leq 0,20 \times 25 = 5 \text{ MPa}$$

C.V



Ferrailage zone critique

Commencer par la zone critique (De préférence arrêter à l'étage juste au dessus de h_{cr} (pratique en chantier))



Dimensions des éléments de rive

3. Ferrailage du voile

3.1. Dimensionnement des éléments de rive

On prend

02 Types

Sections
rectangulaires

Section L, U,
T...(Composées)

Zone
critique

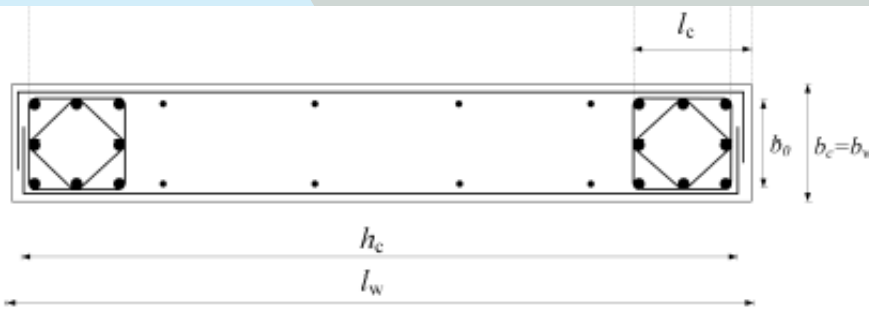


Figure 7.17: Eléments de rive pour les voiles

$$b_c \geq \max\left(20\text{cm}; \frac{h_e}{20}\right)$$

$$l_c \geq \max(0, 15l_w; 1, 5b_w)$$

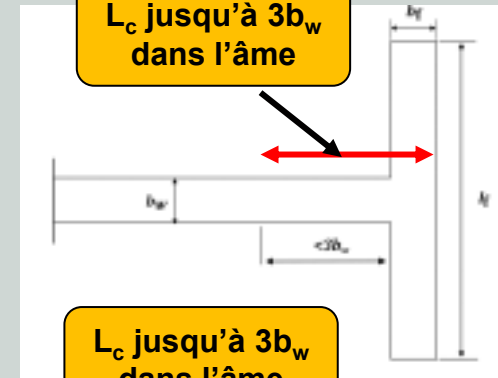
l_w : longueur du voile

b_w : largeur de l'âme du voile

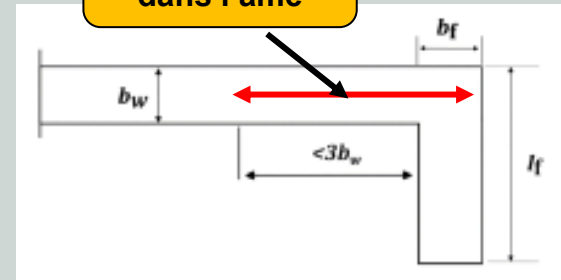
h_e : hauteur libre d'étage



L_c jusqu'à $3b_w$
dans l'âme



L_c jusqu'à $3b_w$
dans l'âme



✓ Si $b_f \geq \frac{h_e}{15}$ et $l_f \geq \frac{h_e}{5}$ avec une prolongation de la membrure dans l'âme jusqu'à $(3b_w)$, alors $b_c = b_w$

Notre cas

$$l_c \geq \max(0, 15l_w; 1, 5b_w)$$

$$b_c \geq \max\left(20\text{cm}; \frac{h_e}{20}\right)$$

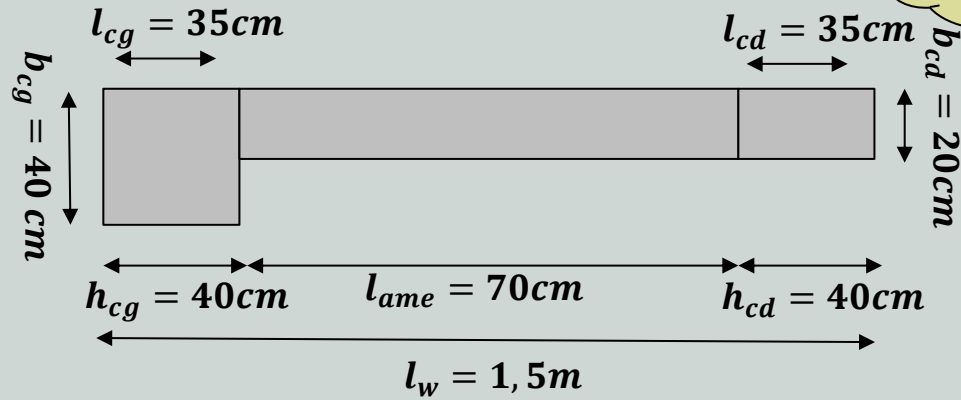
l_w : longueur du voile

b_w : largeur de l'âme du voile

h_e : hauteur libre d'étage

$$l_c \geq \max(0, 15 \times 1,5; 1, 5 \times 0,2)$$

$$b_c \geq \max\left(20\text{cm}; \frac{266}{20}\right)$$



$$l_c \geq 30\text{ cm}$$

$$b_c \geq 20\text{ cm}$$

On prend

Gauche

$$h_{cg} = 40\text{ cm} \text{ (coïncidé avec le poteau)}$$

$$l_{cg} = 35\text{ cm}$$

$$b_{cg} = 40\text{ cm}$$

Droite

$$h_{cd} = 40\text{ cm}$$

$$l_{cd} = 35\text{ cm}$$

$$b_{cd} = 20\text{ cm}$$

Aller à
SOCOTEC/EXPERT ...

3. Ferrailage du voile

Zone critique

Flexion composée

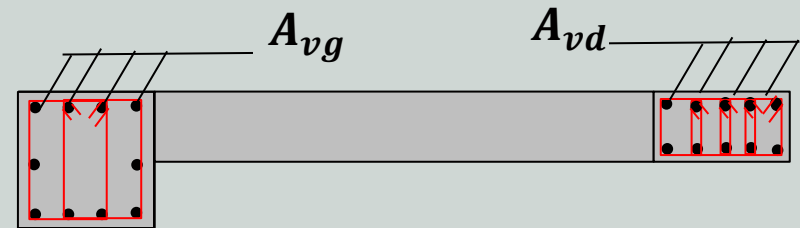
Section $b=b_w$ et $h=l_w$

**Efforts $N=173,10$ KN
et $M=215,9$ KN.m**

SOCOTEC



$A_{sup} = 0 \text{ cm}^2$
 $A_{inf} = 1,58 \text{ cm}^2$



On choisit à gauche et à droite :
(pb de justification de ductilité, après)

$A_{vg} = 10\text{HA}14 = 15,39 \text{ cm}^2$

$A_{vd} = 10\text{HA}14 = 15,39 \text{ cm}^2$



Vérifications des sections A_{vg} et A_{vd}

3. Ferrailage du voile

Avec

$$A_{vg} = 10HA14 = 15,39 \text{ cm}^2$$

$$A_{vd} = 10HA14 = 15,39 \text{ cm}^2$$

Vérifications
RPA

03 types de vérifications

1.

Vérification 1 : % minimal longitudinal
08% zone II (0,8% 40x40) = **12,8 cm²**

(Cas des raidisseurs)

2.

Vérification 2 : % minimal
longitudinal § 7.7.4

$$A_{vg} \geq 0,50\% (l_c - 2d) * (b_c - 2d)$$
$$= 0,5\% (40 - 5 * 40 - 5) = \mathbf{6,13 \text{ cm}^2}$$
$$A_{vg} = 10HA14 = 15,39 \text{ cm}^2 \text{ C.V}$$

$$A_{vg} \geq 0,50\% \text{ surface de la zone confinée}$$

3.

Distance horizontale entre
02 barres verticales
ligaturées $\leq 20\text{cm}$.

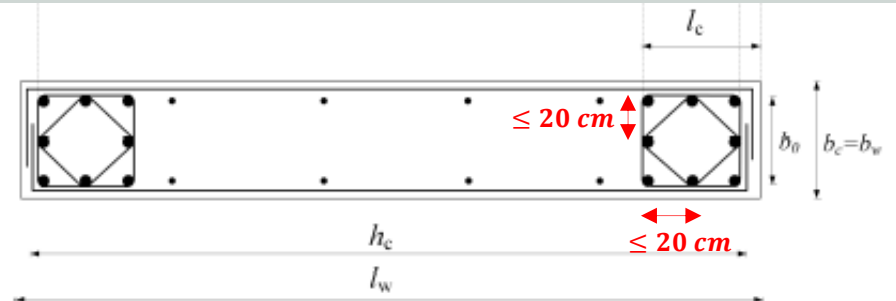


Figure 7.17: Eléments de rive pour les voiles

Moment résistant

3. Ferrailage du voile

**Moment
résistant**

**Calcul du moment
résistant (SOCOTEC)**

Avec $A_{vg} = 15,39 \text{ cm}^2$



On aura
 $M_r = 1002 \text{ KN.m}$

**Zone
critique**



Cadres et étriers

Prévoir



- ✓ Pour les éléments de rive, prévoir des cadres et/ou épingles avec espacement vertical

$$s_t \leq \min\left(\frac{b_c}{2}, 20\text{cm}, 8\phi_l\right)$$

ϕ_l : diamètre min. des armatures longitudinales de rive

- ✓ Section (A_t) de rive, présente sur la hauteur (h_{cr}) doit satisfaire :

$$A_t \geq 0,09 s_t b_0 \frac{f_{c28}}{f_e} \quad \text{Et} \quad A_t \geq 0,30 s_t b_0 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right) \frac{f_{c28}}{f_e}$$

b_0 : Epaisseur confinée de rive

$\frac{A_g}{A_c}$: surface totale de rive / surface confinée

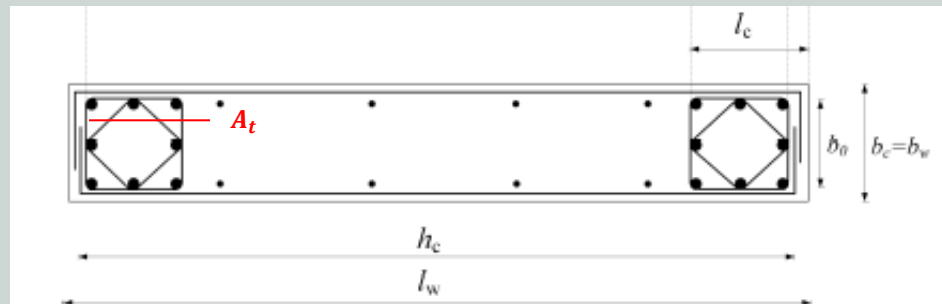
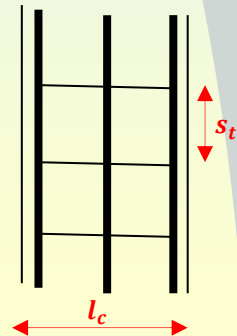


Figure 7.17: Eléments de rive pour les voiles

3. Ferrailage du voile

Espacement verticale des cadres et/ou épingles (St)
§ 7.7.4 (Eq. 7.28)

$$s_t \leq \min \left(\frac{b_c}{2}, 20cm, 8\phi_l \right) = \min \left(\frac{40}{2}, 20cm, 8 \times 1.4 \right) = 11,2 \text{ cm}$$

On prend

$$s_t = 10 \text{ cm}$$

On vérifie après si ça passe pour la ductilité

Section minimale des armatures de confinement § 7.7.4 (Eq. 7.29 & 7.30)

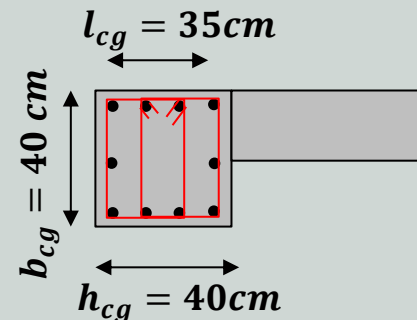
$$A_t \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 0,09 s_t b_0 \frac{f_{c28}}{f_e} \\ 0,30 s_t b_0 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{c28}}{f_e} \end{array} \right.$$

$$A_t \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 0,09 \times 10 \times 35 \times \frac{25}{400} \\ 0,30 \times 10 \times 35 \left(\frac{40 \times 40}{35 \times 35} - 1 \right) \frac{25}{400} \end{array} \right.$$

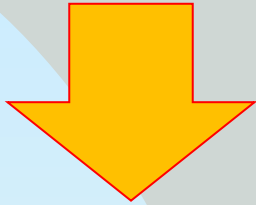
$$A_t \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 1,97 \text{ cm}^2 \\ 2,0 \text{ cm}^2 \end{array} \right.$$

$$A_t = 4HA8 = 2,01 \text{ cm}^2$$

02 cadres



Commencer par la zone critique (De préférence arrêter à l'étage juste au dessus de h_{cr} (pratique en chantier))



**Zone
critique**



**FERRAILLAGE
DE L'AME**



Voir RPA2024

3. 7. Ferrailage de l'âme

Il faut

Ferrailage des
voiles/trumeaux

Aciers verticaux

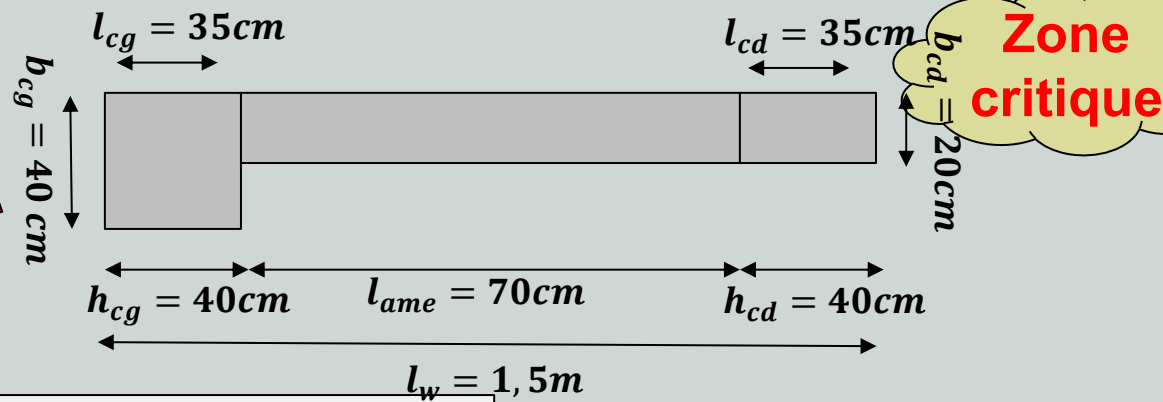
- ✓ Les armatures d'âme en 02 treillis de barre de même adhérence reliés par des **épingles espacés d'environ 500 mm.**
- ✓ Pour les armatures d'âme
$$8\text{mm} \leq \varnothing \leq \frac{b_w}{8} \text{ et } esp \leq \min(250\text{mm}, 25\varnothing)$$
- ✓ Les barres verticales du dernier étage munies de crochets à la partie supérieure
- ✓ Toutes les autres barres n'ont pas de crochets (recouvrement)

Aciers horizontaux

- ✓ Les barres horizontales doivent être munies de crochets.
- ✓ Dans le cas où il existe des talons de rigidité, les barres horizontales devront être ancrées sans crochets si les dimensions des talons permettent la réalisation d'un ancrage droit.
- ✓ Calcul à l'effort tranchant pour le ferrailage horizontal : $\frac{A_h}{s} \geq \frac{\bar{V}}{z.f_e}$. ($\bar{V} = 1,4 Vu$)

3. Ferrailage du voile

Aciers
verticaux



$$8mm \leq \phi \leq \frac{b_w}{8}$$

$$8mm \leq \phi \leq \frac{200}{8} = 25mm$$

On prend

$$\phi = 14mm$$

Espacement vertical

$$S_t \leq \min(250mm, 25\phi_{l,min}) \\ = \min(250mm, 300mm)$$

On choisit donc

$$A_{sv} = 14 HA 14 (21,55cm^2)$$

Avec

$$S_t = S_v = 10cm$$



Le choix de « A_{sv} » est important, il dicte la justification de la ductilité locale (Voir après)

✓ Les longueurs de recouvrement =

- 60ϕ pour les barres situées dans les zones IV, V et VI.
- 50ϕ pour les barres situées dans les zones I, II et III

Zone II, d'où $50\phi = 50 \times 1,4 = 70cm$

3. Ferrailage du voile

**Aciers
horizontaux**

**Résistance à l'effort
tranchant**

Avec

$$\begin{aligned} f_e &= 400 \text{ MPa} \\ z &= 110 \text{ cm} \\ s &= 20 \text{ cm} \\ \bar{V} &= 123,98 \text{ KN} \end{aligned}$$

On aura

$$A_h \geq \frac{s \cdot \bar{V}}{z \cdot f_e} = \frac{20 \times 123,98}{110 \times 400} \times 10 = 0,56 \text{ cm}^2$$

On prend

$$2HA12 = 2,26 \text{ cm}^2$$

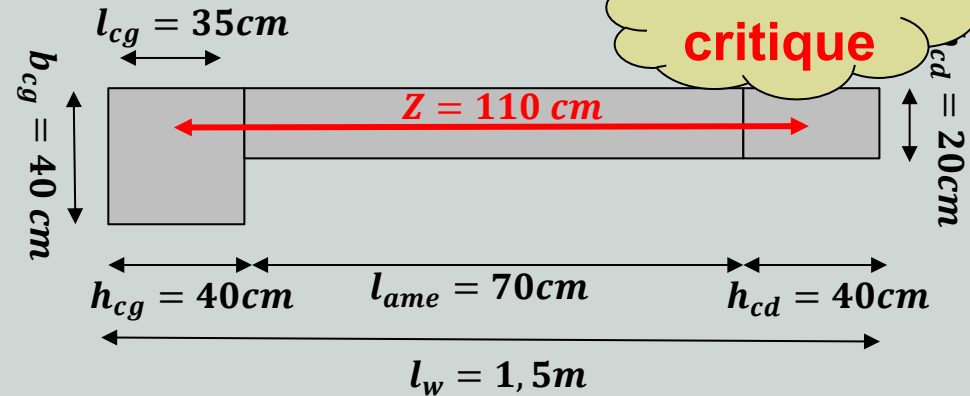
✓ L'espacement des barres, plus petite des 02 valeurs ($s \leq 1,5 b_w$; $s \leq 25 \text{ cm}$)

$$s_h \leq \min(1,5 b_w ; 25 \text{ cm}) = 25 \text{ cm}$$

On prend

$$S_h = 20 \text{ cm}$$

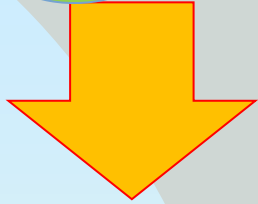
Le long de la
hauteur critique



- ❖ S : Espacement des cours d'armature horizontale suivant la hauteur
- ❖ $\bar{V}$: Effort tranchant de calcul
- ❖ z : distance entre les CDG des armatures des 02 extrémités confinées
- ❖ f_e : Contrainte limite de l'acier

- ✓ Dans le cas des extrémités confinées, les barres horizontales peuvent être ancrées sans crochets si les dimensions des talons permettent l'ancrage droit

**Prochaine
étape**



**Justification de
la condition de
ductilité locale**

**La justification est nécessaire pour
finaliser toutes les armatures des
voiles, surtout au niveau des
sections confinées**

Justification

4. Justification de la ductilité locale

Il faut

§ 7.7.4

02 Conditions

Effort
normale de
compression

Longueur
comprimée
« $l_{c,calcul} \geq l_c$ »
des parties rive

Limitation de l'effort normal de
compression de calcul des voiles

$$v = \frac{N_d}{B_c \cdot f_{c28}} \leq 0,40$$

A vérifier sous combinaison
sismiques réglementaires

N_d : Effort normal de compression
de calcul

B_c : Aire de la section du béton

f_{c28} : Résistance caractéristique
du béton à 28 j

Déjà
vérifié

ça évite une justification
détaillée de « μ_ϕ »

Avec

$$l_{c,calcul} = \chi_u \left(1 - \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu,c}} \right)$$

et

$$l_c \geq \max(0,15l_w; 1,5b_w)$$

$$b_c \geq \max\left(20\text{cm}; \frac{h_e}{20}\right)$$

Hypothèses RPA pour la ductilité

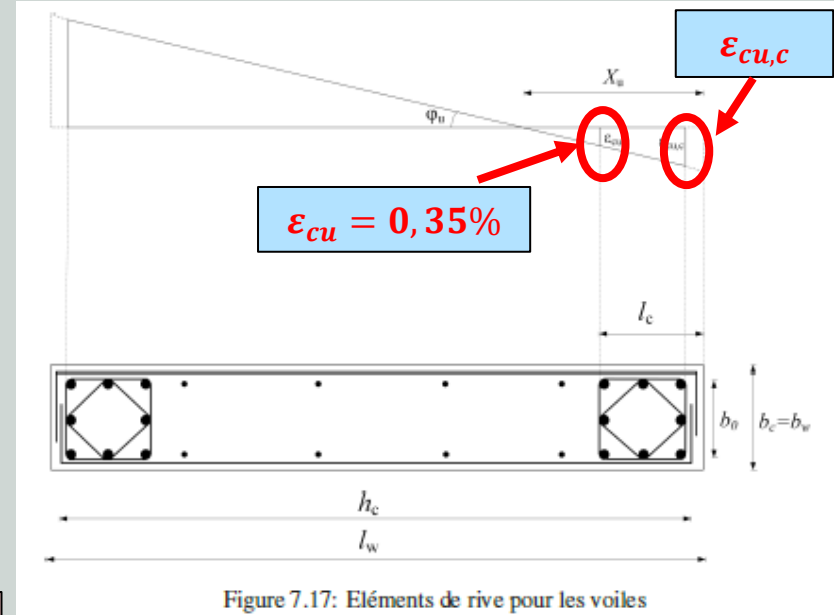


Figure 7.17: Eléments de rive pour les voiles

χ_u : Position de l'axe neutre

ε_{cu} : Déformation critique du béton
0,35%

$\varepsilon_{cu,c}$: Raccourcissement limite à a
rupture

l_w : Longueur du voile

b_w : Largeur de l'âme du voile

h_e : Hauteur libre d'étage

4. Justification de la ductilité locale

calcul

§ 7.7.4

Longueur comprimée
« $l_{c,calcul} \geq l_c$ » des parties rive

ϵ_{cu} : Raccourcissement
où l'éclatement est
attendu (=0,35%)

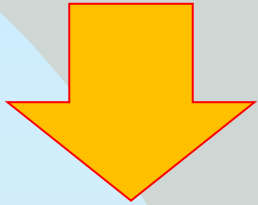
$$l_{c,calcul} = \chi_u \left(1 - \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu,c}} \right) \geq l_c$$

χ_u : Position de
l'axe neutre

$\epsilon_{cu,c}$: Raccourcissement
limite à la rupture

Calcul de la position de l'axe neutre

Commençons par le calcul
de l'axe neutre



L'AXE NEUTRE
« χ_u »

Calcul

4. Justification de la ductilité locale

Calcul de la position de l'axe neutre

RPA2024 (Eq. 7.25)

$$\chi_u = (v_d + \omega_v) \frac{h_c b_c}{b_0}$$

Avec

RPA2024 (Eq. 7.26)

$$v_d = \frac{N_d}{h_c b_c f_{cd}}$$

et

RPA2024 (Eq. 7.27)

$$\omega_v = \frac{A_{sv}}{h_c b_w} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

v_d : Effort normal réduite, cas d'une section rectangulaire
 h_c : Longueur de la partie confinée
 b_c : Largeur de la partie confinée égale à b_w dans le cas d'une section rectangulaire
 b_0 : L'épaisseur confinée de l'élément de rive
 b_w : Largeur de l'âme du voile
 ω_v : Pourcentage normalisé des armatures verticales d'âme
 A_{sv} : Section de ferrailage correspondant à la section du voile (h_c , b_w) (âme)
 f_{yd} : Valeur de calcul de la limite d'élasticité de l'acier
 f_{cd} : Valeur de calcul de la résistance du béton à la compression



Calcul de la position de l'axe neutre

4. Justification de la ductilité locale

Notre
cas

$$\begin{aligned} N_d &= 173,10 \text{ KN} \\ l_w &= 1,50 \text{ m} \\ b_w &= 20 \text{ cm} \\ b_c &= 40 \text{ cm} \\ b_0 &= 35 \text{ cm} \\ f_{cd} &= \frac{f_{c28}}{\gamma_b} = \frac{25}{1,2} = 20,83 \text{ MPa} \\ f_{yd} &= \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,0} = 400 \text{ MPa} \\ A_{sv} &= 2x(7HA14) = 21,55 \text{ cm}^2 \\ h_c &= l_w - d1 - d2 \\ &= 1,5 - 0,025 - 0,025 = 1,45 \text{ m} \end{aligned}$$

Finalement

$$\begin{aligned} B_c &= h_{pot} \cdot b_{pot} + (l_w - b_{pot}) * b_w \\ &= 0,4 * 0,4 + 1,1 * 0,2 = 0,38 \end{aligned}$$

$$v_d = \frac{N_d}{h_c b_c f_{cd}} = \frac{173,10 \cdot 10^3}{1450 \times 400 \times 20,83} = 0,014 \leq 0,40$$

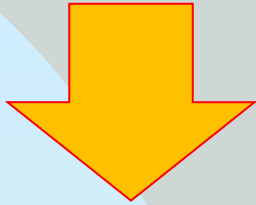
$$\omega_v = \frac{A_{sv}}{h_c b_w} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{21,55 \cdot 10^{-4}}{1,45 \times 0,2} \cdot \frac{400}{20,83} = 0,142$$

$$\begin{aligned} \chi_u &= (v_d + \omega_v) \frac{h_c b_c}{b_0} = (0,014 + 0,142) \frac{145 \times 40}{35} \\ &= 25,85 \text{ cm} \end{aligned}$$



Calcul du raccourcissement limite à la rupture

Calcul du raccourcissement
limite à la rupture



$$l_{c,calcul} = \chi_u \left(1 - \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu,c}} \right)$$

$\varepsilon_{cu,c}$: Raccourcissement
limite à la rupture

Raccourcissement
limite à la rupture

Calcul

4. Justification de la ductilité locale

Calcul du raccourcissement limite à la rupture

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 + 0,1 \alpha \omega_{wd}$$

Avec

$$\omega_{wd} = \frac{\text{Volume des aratures de confinement}}{\text{Volume du noyau confiné}} \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \geq 0,08$$

et

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$$

Avec

$$\alpha_n = 1 - \sum \frac{b_i^2}{6b_0h_0}$$

Sommation sur le nombre total de barres longitudinales latéralement maintenues par les armatures e confinement ou épingles

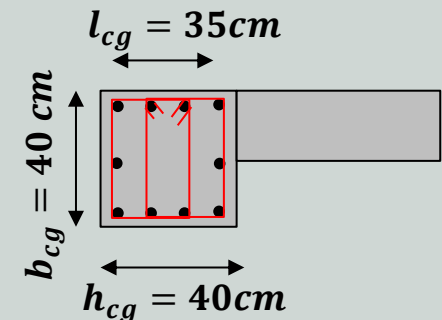
$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s_t}{2b_0}\right) \left(1 - \frac{s_t}{2h_0}\right)$$

ω_{wd} : Rapport mécanique en volume des armatures de confinement

α : Coefficient d'efficacité du confinement

b_i : Distance entre des barres maintenues consécutives

s_t : Espacement des cours successifs des armatures transversales



Calcul du raccourcissement limite à la rupture

4. Justification de la ductilité locale

Calcul du raccourcissement limite à la rupture

L: Longueur totale des armatures transversales (cadres et épingles)

Nbr: Nombre total des cadres et épingles sur la hauteur critique

V_{nc} : Volume du noyau confiné en béton

V_{sc} : Volume des armatures de confinement

Notre cas

$$h_{cr} = 2,04 \text{ m}$$

$$b_c = 20 \text{ cm}$$

$$b_c = 40 \text{ cm}$$

$$b_0 = 35 \text{ cm}$$

$$b_i = 11,67 \text{ cm}$$

$$h_0 = 35 \text{ cm}$$

$$l_c = 40 \text{ cm}$$

$$s_t = 10 \text{ cm}$$

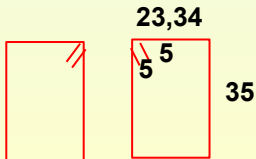
$$\phi_t = 8 \text{ mm}$$

$$L = 253,36 \text{ cm}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{c28}}{\gamma_b} = \frac{25}{1,2} = 20,83 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,0} = 400 \text{ MPa}$$

$$Nbr = \frac{h_{cr} - 10 \text{ cm}}{s_t} = \frac{204 - 10 \text{ cm}}{10} = 19 \text{ cadres}$$



Ainsi

$$\omega_{wd} = \frac{V_{sc} f_{yd}}{V_{nc} f_{cd}} \geq 0,08$$

$$V_{nc} = b_0 l_c h_{cr} = 35 \times 40 \times 204 = 285600 \text{ cm}^3$$

$$V_{sc} = L \left(\frac{\pi \phi_t^2}{4} \right) \cdot Nbr = 253,36 \left(\frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} \right) \cdot 19 = 2419,7 \text{ cm}^3$$

$$\omega_{wd} = \frac{2419,7}{285600} \frac{400}{25} \frac{1,2}{1,0} = 0,162 \geq 0,08$$

$$\alpha_n = 1 - \sum \frac{b_i^2}{6 b_0 h_0} = 1 - 6 \frac{11,67^2}{6 \times 35 \times 35} - 4 \frac{17,5^2}{6 \times 35 \times 35} = 0,73$$

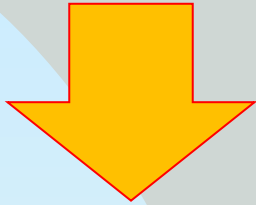
$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s_t}{2 b_0} \right) \left(1 - \frac{s_t}{2 h_0} \right) = \left(1 - \frac{10}{2 \times 35} \right) \left(1 - \frac{10}{2 \times 35} \right) = 0,74$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0,73 \times 0,74 = 0,54$$

$$\epsilon_{cu,c} = 0,0035 + 0,1 \alpha \omega_{wd} = 0,0035 + 0,1 \times 0,54 \times 0,162 = 0,012$$

Calcul du raccourcissement limite à la rupture

**Calcul final de la longueur
comprimée des parties de
rive**



**La longueur
comprimée des
parties de rive**

Calcul

4. Justification de la ductilité locale

calcul

Longueur comprimée
« $l_{c,calcul} \geq l_c$ » des parties rive

$$l_{c,calcul} = \chi_u \left(1 - \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu,c}} \right) \geq l_c$$

$$l_{c,calcul} = 25,85 \left(1 - \frac{0,0035}{0,013} \right) = 18,89 \text{ cm}$$

$$l_c \geq \max(0,15l_w; 1,5b_w) \quad l_c \geq \max(0,15 \times 1,5; 1,5 \times 0,2) = 30 \text{ cm}$$

Mais « l_c » pris dans les calculs était de $l_{c,réel} = 40 \text{ cm}$

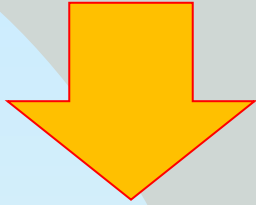
$$l_{c,calcul} < l_{c,réel}$$

Condition non vérifiée

On diminue l'espacement « s_t »

On refait le calcul avec une nouvelle
valeur de « s_t » plus petite que 9 cm

**Sur quelle variable peut-on
jouer pour satisfaire la
condition de ductilité locale ?**



**Comment
satisfaire la
condition de
ductilité locale**

Qlqs remarques

4. Justification de la ductilité locale

$$l_{c,calcul} = \chi_u \left(1 - \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu,c}} \right) \geq l_c$$

1.

On commence par diminuer l'espacement « s_t »

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 + 0,1 \alpha \omega_{wd}$$

$$\omega_{wd} = \frac{V_{sc} f_{yd}}{V_{nc} f_{cd}} \geq 0,08$$

$$V_{nc} = b_0 l_c h_{cr}$$

$$V_{sc} = L \left(\frac{\pi \phi_t^2}{4} \right) \cdot Nbr$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$$

$$\alpha_n = 1 - \sum \frac{b_i^2}{6 b_0 h_0}$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s_t}{2 b_0} \right) \left(1 - \frac{s_t}{2 h_0} \right)$$

2.

On augmente la section des armatures verticales de l'âme « A_{sv} »

$$\chi_u = (v_d + \omega_v) \frac{h_c b_c}{b_0}$$

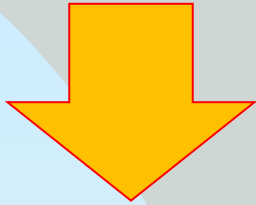
$$v_d = \frac{N_d}{h_c b_c f_{cd}}$$

$$\omega_v = \frac{A_{sv} f_{yd}}{h_c b_w f_{cd}}$$

On diminue l'espacement « s_t »

On refait le calcul avec une nouvelle valeur de « s_t » plus petite que 10 cm

On refait les calculs avec
une nouvelle valeur de
« s_t » plus petite que 10 cm



Refaire les calculs
avec « $s_t = 8 \text{ cm}$ »

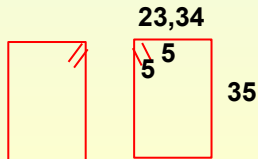
Recalcul

4. Justification de la ductilité locale

Notre cas

$$\begin{aligned}
 h_{cr} &= 2,04 \text{ m} \\
 b_c &= 20 \text{ cm} \\
 b_c &= 40 \text{ cm} \\
 b_0 &= 35 \text{ cm} \\
 b_i &= 11,67 \text{ cm} \\
 h_0 &= 35 \text{ cm} \\
 l_c &= 40 \text{ cm} \\
 s_t &= 8 \text{ cm} \\
 \phi_t &= 8 \text{ mm} \\
 L &= 253,36 \text{ cm} \\
 f_{cd} &= \frac{f_{c28}}{\gamma_b} = \frac{25}{1,2} = 20,83 \text{ MPa} \\
 f_{yd} &= \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,0} = 400 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Nbr &= \frac{h_{cr} - 10 \text{ cm}}{s_t} = \frac{204 - 10 \text{ cm}}{8} \\
 &= 24 \text{ cadres}
 \end{aligned}$$



Ainsi

Calcul du raccourcissement limite à la rupture

$$\omega_{wd} = \frac{V_{sc} f_{yd}}{V_{nc} f_{cd}} \geq 0,08$$

$$V_{nc} = b_0 l_c h_{cr} = 35 \times 40 \times 204 = 285600 \text{ cm}^3$$

$$V_{sc} = L \left(\frac{\pi \phi_t^2}{4} \right) \cdot Nbr = 253,36 \left(\frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} \right) \cdot 24 = 3056,46 \text{ cm}^3$$

$$\omega_{wd} = \frac{3056,46}{285600} \frac{400}{25} \frac{1,2}{1,0} = 0,205 \geq 0,08$$

$$\alpha_n = 1 - \sum \frac{b_i^2}{6 b_0 h_0} = 1 - 6 \frac{11,67^2}{6 \times 35 \times 35} - 4 \frac{17,5^2}{6 \times 35 \times 35} = 0,73$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s_t}{2 b_0} \right) \left(1 - \frac{s_t}{2 h_0} \right) = \left(1 - \frac{8}{2 \times 35} \right) \left(1 - \frac{8}{2 \times 35} \right) = 0,78$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0,73 \times 0,78 = 0,57$$

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{cu,c} &= 0,0035 + 0,1 \alpha \omega_{wd} \\
 &= 0,0035 + 0,1 \times 0,57 \times 0,205 = 0,015
 \end{aligned}$$

L : Longueur totale des armatures transversales (cadres et épingles)

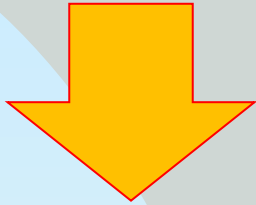
Nbr : Nombre total des cadres et épingles sur la hauteur critique

V_{nc} : Volume du noyau confiné en béton

V_{sc} : Volume des armatures de confinement

Calcul du raccourcissement limite à la rupture

**Calcul final de la longueur
comprimée des parties de
rive**



**La longueur
comprimée des
parties de rive**

Calcul



4. Justification de la ductilité locale

calcul

Longueur comprimée
« $l_{c,calcul} \geq l_c$ » des parties rive

$$l_{c,calcul} = \chi_u \left(1 - \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu,c}} \right) \geq l_c$$

$$l_{c,calcul} = 25,85 \left(1 - \frac{0,0035}{0,015} \right) = 19,82 \text{ cm}$$

$$l_c \geq \max(0,15l_w; 1,5b_w) \quad l_c \geq \max(0,15 \times 1,5; 1,5 \times 0,2) = 30 \text{ cm}$$

Mais « l_c » pris dans les calculs était de $l_{c,réel} = 40 \text{ cm}$

$$l_{c,calcul} > l_{c,réel}$$

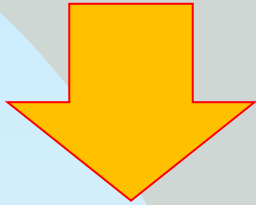
Condition vérifiée

On peut encore réduire l'espacement
« $s_t = 6 \text{ cm}$ », mais c'est toujours loin.

On augmente donc la section des
armatures verticales de l'âme « A_{sv} »

On refait les calculs avec une nouvelle valeur des armatures verticales de l'âme « A_{sv} »

$$A_{sv} = 14 \text{ HA } 14 (21,55 \text{ cm}^2) ?$$



**Refaire les calculs
avec « $A_{sv} =$
30 HA 14 (46,18 cm²) »**

Recalcul

4. Justification de la ductilité locale

Notre
cas

$$N_d = 173,10 \text{ KN}$$

$$l_w = 1,50 \text{ m}$$

$$b_w = 20 \text{ cm}$$

$$b_c = 40 \text{ cm}$$

$$b_0 = 35 \text{ cm}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{c28}}{\gamma_b} = \frac{25}{1,2} = 20,83 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,0} = 400 \text{ MPa}$$

$$A_{sv} = 2x(15HA14) = 46,18 \text{ cm}^2$$

$$h_c = l_w - d1 - d2$$

$$= 1,5 - 0,025 - 0,025 = 1,45 \text{ m}$$

$$B_c = h_{pot} \cdot b_{pot} + (l_w - b_{pot}) * b_w$$
$$= 0,4 * 0,4 + 1,1x 0,2 = 0,38$$

Inchangé

$$v_d = \frac{N_d}{h_c b_c f_{cd}} = \frac{173,10 \cdot 10^3}{1450x400x20,83} = 0,014 \leq 0,40 \quad \text{Inchangé}$$

$$\omega_v = \frac{A_{sv}}{h_c b_w} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{46,18 \cdot 10^{-4}}{1,45x0,2} \cdot \frac{400}{20,83} = 0,306 \quad \text{Changé}$$

$$\chi_u = (v_d + \omega_v) \frac{h_c b_c}{b_0} = (0,014 + 0,306) \frac{145x40}{35}$$
$$= 53,03 \text{ cm} \quad \text{Changé}$$

Finalement



Calcul du raccourcissement limite à la rupture

Inchangé

Notre
cas

$$h_{cr} = 2,04 \text{ m}$$

$$b_c = 20 \text{ cm}$$

$$b_c = 40 \text{ cm}$$

$$b_0 = 35 \text{ cm}$$

$$b_i = 11,67 \text{ cm}$$

$$h_0 = 35 \text{ cm}$$

$$l_c = 40 \text{ cm}$$

$$s_t = 8 \text{ cm}$$

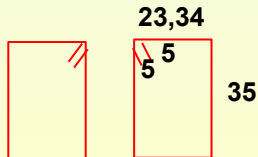
$$\phi_t = 8 \text{ mm}$$

$$L = 253,36 \text{ cm}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{c28}}{\gamma_b} = \frac{25}{1,2} = 20,83 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,0} = 400 \text{ MPa}$$

$$Nbr = \frac{h_{cr} - 10 \text{ cm}}{s_t} = \frac{204 - 10 \text{ cm}}{8} = 24 \text{ cadres}$$



Ainsi

35

$$\omega_{wd} = \frac{V_{sc} f_{yd}}{V_{nc} f_{cd}} \geq 0,08$$

$$V_{nc} = b_0 l_c h_{cr} = 35 \times 40 \times 204 = 285600 \text{ cm}^3$$

Inchangé

$$V_{sc} = L \left(\frac{\pi \phi_t^2}{4} \right) \cdot Nbr = 253,36 \left(\frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} \right) \cdot 24 = 3056,46 \text{ cm}^3$$

Inchangé

$$\omega_{wd} = \frac{3056,46}{285600} \frac{400}{25} \frac{1,2}{1,0} = 0,205 \geq 0,08$$

Inchangé

$$\alpha_n = 1 - \sum \frac{b_i^2}{6 b_0 h_0} = 1 - 6 \frac{11,67^2}{6 \times 35 \times 35} - 4 \frac{17,5^2}{6 \times 35 \times 35} = 0,73$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s_t}{2 b_0} \right) \left(1 - \frac{s_t}{2 h_0} \right) = \left(1 - \frac{8}{2 \times 35} \right) \left(1 - \frac{8}{2 \times 35} \right) = 0,78$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0,73 \times 0,78 = 0,57$$

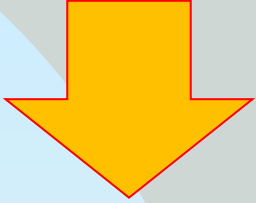
Inchangé

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 + 0,1 \alpha \omega_{wd} = 0,0035 + 0,1 \times 0,57 \times 0,205 = 0,01518$$

Inchangé

Calcul du raccourcissement limite à la rupture

**Recalcul de la longueur
comprimée des parties de
rive**



**La longueur
comprimée des
parties de rive**

Calcul

4. Justification de la ductilité locale

recalcul

$$l_{c,calcul} = \chi_u \left(1 - \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu,c}} \right) \geq l_c$$

$$l_{c,calcul} = 53,03 \left(1 - \frac{0,0035}{0,015} \right) = 40,65 \text{ cm}$$

$$l_c \geq \max(0,15l_w; 1,5b_w) \quad l_c \geq \max(0,15 \times 1,5; 1,5 \times 0,2) = 30 \text{ cm}$$

Mais « l_c » pris dans les calculs était de $l_{c,r\acute{e}el} = 40 \text{ cm}$

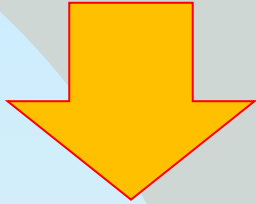
$$l_{c,calcul} > l_{c,r\acute{e}el}$$

Condition vérifiée

On arrête   ce niveau

Cas des murs   section rectangulaire ?

**Vérification du rapport
mécanique « ω_{wd} » en
volume des armatures de
confinement**



**Cas des murs de
section
rectangulaire
(Sans
excroissance ni
membrures)**

Vérification

4. Justification de la ductilité locale

Valable uniquement pour les sections rectangulaires

Il faut vérifier

Type 1

Dans le cas des sections rectangulaires, il faut vérifier dans les éléments de rive que :

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_{\phi} (v_d + \omega_v) \cdot \varepsilon_{sy,d} \frac{b_c}{b_0} - 0,035$$

ω_{wd} : rapport mécanique en volume des armatures de confinement

μ_{ϕ} : Coefficient de ductilité en courbure

$\varepsilon_{sy,d}$: déformation limite de l'acier en traction

Calcul du coefficient de ductilité « μ_{ϕ} »

4. Justification de la ductilité locale

Calcul de

« μ_ϕ »

Valable uniquement pour les sections rectangulaires

02 cas :

$$\mu_\phi = \begin{cases} 2 \cdot \left(\frac{R}{Q_f} \cdot \frac{M_{ED}}{M_{RD}} \right) - 1 & T_0 \geq T_2 \\ 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{R}{Q_f} \cdot \frac{M_{ED}}{M_{RD}} \right) - 1 \right] \cdot \frac{T_2}{T_0} & T_0 < T_2 \end{cases}$$

R : Coefficient de comportement

Q_f : Facteur de qualité

T_0 : Période fondamentale

T_2 : Période du spectre correspondante à l'accélération constante

M_{ED} : Moment fléchissant issu de l'analyse (enveloppe de calcul décalée) à la base du mur

M_{RD} : Moment résistant à la flexion

Notre cas

$$R = 4,5$$

$$Q_f = 1,1$$

$$T_0 = 0,40 \text{ s}$$

$$T_2 = 0,30 \text{ s}$$

$$M_{ED} = 215,90 \text{ KN.m}$$

$$M_{RD} = 1002 \text{ KN.m}$$

$$T_0 > T_2 \Rightarrow \mu_\phi = 2 \cdot \left(\frac{R}{Q_f} \cdot \frac{M_{ED}}{M_{RD}} \right) - 1 = 2 \cdot \left(\frac{4,5}{1,1} \cdot \frac{215,90}{1002} \right) - 1$$

$$\mu_\phi = 0,76$$

Vérification

2. Justification de la ductilité locale

Vérification

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_{\phi} (v_d + \omega_v) \cdot \varepsilon_{sy,d} \frac{b_c}{b_0} - 0,035$$

$\alpha =$
 $\omega_{wd} =$
 $\mu_{\phi} = 0,76$
 $v_d =$
 $\omega_v =$
 $\varepsilon_{sy,d} = 0,002$
 $b_c =$
 $b_0 =$

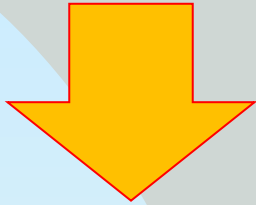
$$\varepsilon_{sy,d} = \frac{f_e}{E} = \frac{400}{200000} = 0,002$$

Normalement avec les résultats de la 1^{ère} partie, on peut calculer (pour une section rectangulaire seulement)

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_{\phi} (v_d + \omega_v) \cdot \varepsilon_{sy,d} \frac{b_c}{b_0} - 0,035$$

Puis, on les compare

Une fois la zone critique est ferraillée
et la ductilité est vérifiée, on passe au
ferraillage de la zone supérieure



**Ferraillage de la
zone supérieure à
la zone critique**

Par logique, il faut se baser sur le ferraillage
de la zone critique pour choisir celui de la
zone supérieure (**condition de continuité de
ferraillage le long de la hauteur totale du bâtiment**)

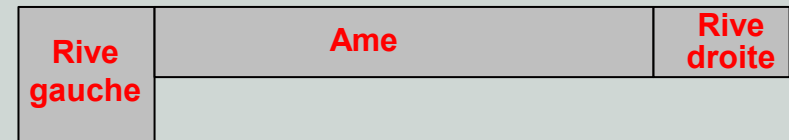
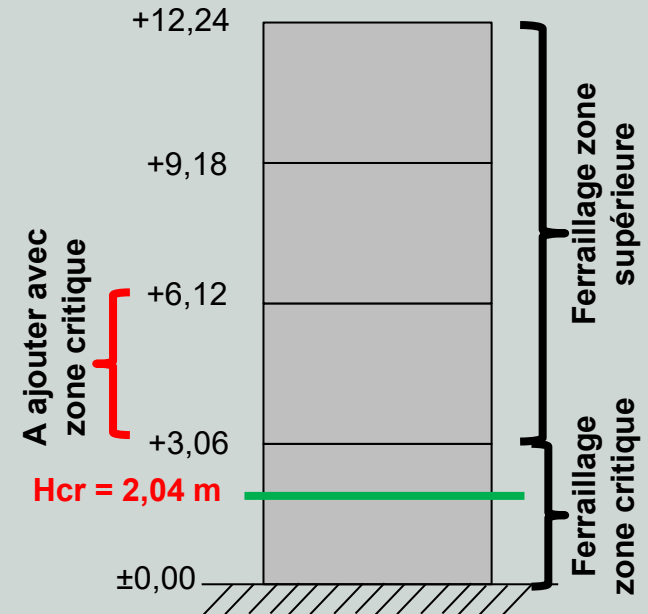
Calcul

Zone Supérieure

**FERRAILLAGE
DE LA ZONE
SUPERIEURE
A LA ZONE
CRITIQUE**

La zone supérieure à la zone critique ($h > h_{cr}$), on prévoit des éléments de rive sur un niveau supplémentaire avec au moins la moitié des armatures de confinement de la zone critique.

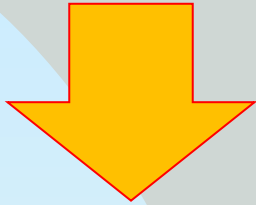
Le reste des niveaux sera ferrailée de la selon les règles du BAEL en utilisant les efforts (moments, efforts tranchants et efforts normaux) à chaque niveau, ils sont ferrailés en une seule section



Suivre les mêmes étapes Rive gauche, rive droite et l'âme que la zone critique pour un niveau supplémentaire.

Exemple terminé

On passe à des structures plus
élancées ?



Exemples
R+10
R+15

Type de ferrailage

Dessin

R+9

Armatures de traction

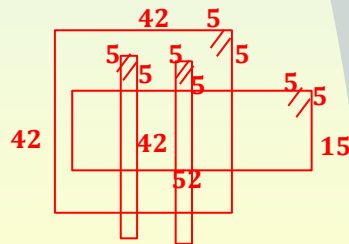
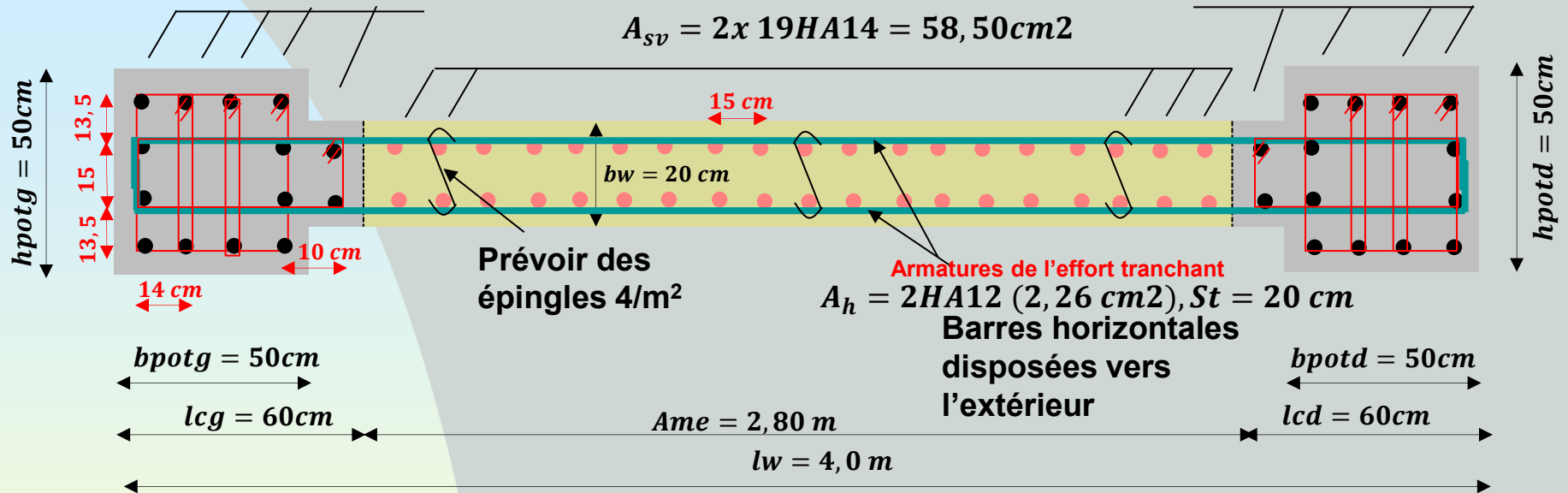
$$A_{vg} = 14HA16 = 28,15 \text{ cm}^2$$

Armatures de l'effort tranchant

$$A_{sv} = 2 \times 19HA14 = 58,50 \text{ cm}^2$$

Armatures de traction

$$A_{vd} = 14HA16 = 28,15 \text{ cm}^2$$



$$A_t = 8HA8 = 4,02 \text{ cm}^2$$

$$L = 178 + 94 + 94 + 144 = 510 \text{ cm}$$

$$b_i (14 \text{ barres}) = 6 \times 14 ; 2 \times 15 ; 4 \times 13,5 ; 2 \times 10$$

Cadres et épingles en HA8, espacement $St=8 \text{ cm}$
Confinement de la zone critique

R+14

$$A_{vg} = 4HA20 + 10HA16 = 32,68 \text{ cm}^2$$
$$A_{vd} = 4HA20 + 10HA16 = 32,68 \text{ cm}^2$$
$$A_{sv} = 2 \times 18HA16 = 72,38 \text{ cm}^2$$
$$A_h = 2H\dot{A}12 (2,26 \text{ cm}^2), St = 20 \text{ cm}$$

Prévoir des épingles 4/m²

$$Ame = 2,80 \text{ m}$$
$$lw = 4,0 \text{ m}$$
$$A_t = 4H A_{10} + 4H A_8 = 5,15 \text{ cm}^2$$
$$L = 185 + 185 + 150 + 110 = 630 \text{ cm}$$

bi (14 barras) = 8x12,5 ; 2x20; 4x15

Cadre+étrier en HA8, espacement $St=10$ cm

02 Cadres en HA10, espacement $St=10$ cm

Confinement de la zone critique



Merci. Fin de l'exemple

www.abdellatif-megnounif.com/?action=cours



Dynamique des structures

Abdellatif MEGNOUNIF

Prochain Cours

Chap. 13

Ferrailage des semelles isolées