

Dynamique des Structures

Abdellatif MEGNOUNIF

E-mail: abdellatif_megnounif@yahoo.fr

Partie 4: Calcul d'une structure en Béton Armé.

Chapitre 12B **Ferrailage du mur Voile**

Part 2 : Détermination des armatures du voile

Cours 12 Samedi 16.05.2026

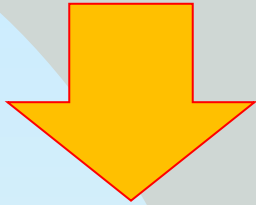
1. Introduction

- ✓ L'objectif de ce chapitre est de calculer les sections d'acier nécessaires pour les murs voiles, à partir de sollicitations déterminées par une analyse numérique, par ROBOT.
- ✓ On prendra comme exemple, un **seul mur voile**.
- ✓ Le calcul sera basé sur les règles de BAEL en utilisant une des méthodes de calcul des ferrailage (méthode des contraintes...)
- ✓ Les sections déterminées doivent aussi vérifiées les conditions des RPA2024,
- ✓ Le calcul comprend la détermination des armatures dans deux zones : Zone critique (hauteur critique) et la zone supérieure.
- ✓ Le voile est un élément structurant de la structure qui permet de transmettre surtout les charges horizontales.
- ✓ La finalité de cette partie est la présentation du dossier détaillé d'exécution.

Finalité : Plans d'exécution BA



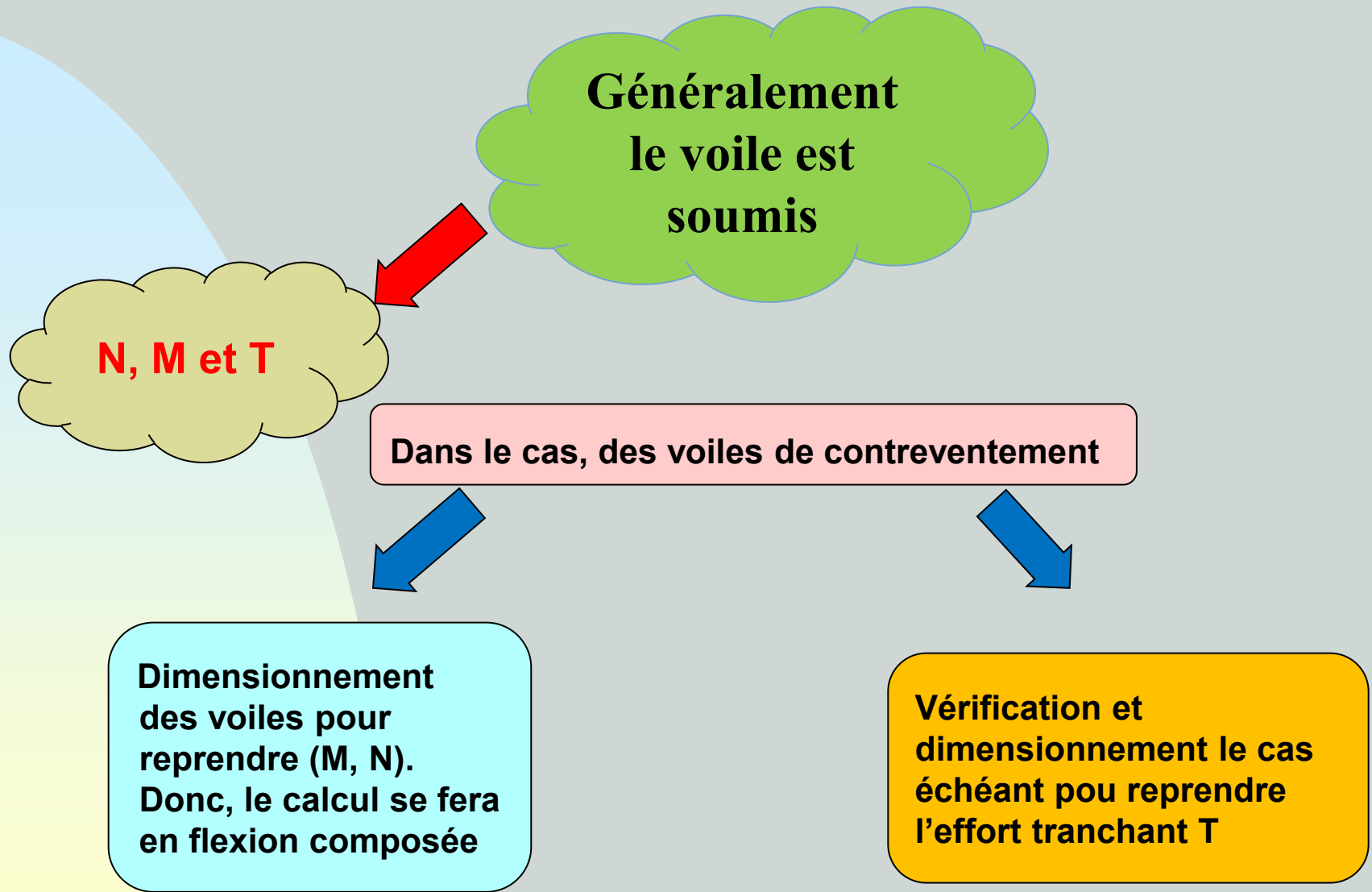
Après la détermination des efforts N,
T et M, on va ferrailer les voiles



**Calcul du
ferrailage**

**Zone critique
et zone
supérieure**

3. Ferrailage du voile



3. Ferrailage du voile

New

3. 1. Évaluation de l'effort normal réduit

Il faut

Ferrailage des
voiles/trumeauxEmpêcher la rupture d'une section critique du voile, ou la retarder
ou bien quelle se manifeste sous forme de rupture ductileLimitation 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 réglementairesDisposition d'armatures
transversales rapprochées
dans la zone critique

Ruine en flexion : Rupture ductile

Ruine en cisaillement : Rupture fragile

Il faut

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 règlementaires

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

N_d : Effort normal à la base à l'ELU

$$N_d = -299,35 \text{ KN}$$

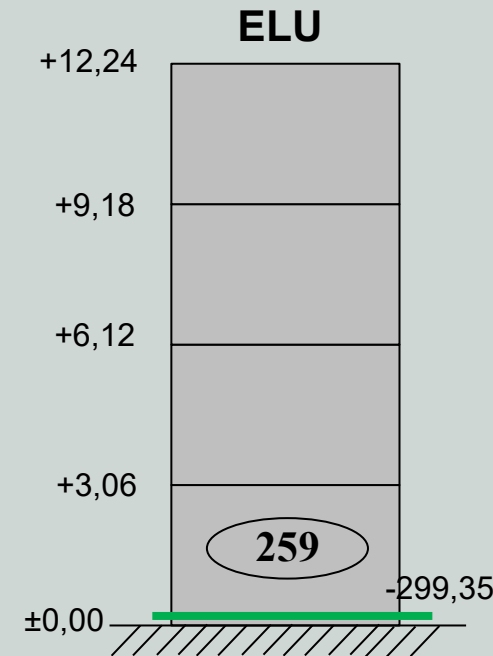
$$B_c = l_w \cdot b_w = 1,5 \times 0,2 = 0,30$$

$$f_{c28} = 25 \text{ MPa}$$

D'où :

$$v = \frac{N_d}{B_c \cdot f_{c28}} = \frac{299,35}{0,30 \cdot 25 \cdot 10^3} = 0,039 \leq 0,40$$

C.V



3. Ferrailage du voile

3. 2. Contraintes limites de cisaillement dans les trumeaux (et linteaux)

Il faut

§ 7.7.2 (Eqs. 7.10 & 7.11)

Acier

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

Contraintes limites de cisaillement du béton dans les linteaux et trumeaux

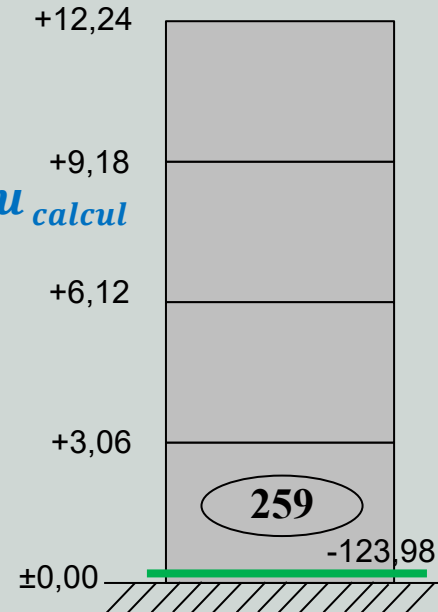
$$\tau_b \leq 0,20 f_{c28}$$

$$\text{où } \tau_b = \frac{\bar{V}}{b_0 d}$$

$$\text{avec } \bar{V} = 1,4 Vu_{\text{calcul}}$$

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

C.V



3. Ferrailage du voile

3.3. Ferrailage des trumeaux

Il faut

Ferrailage des voiles/trumeaux

Trumeaux calculés en flexion composée avec effort tranchant.
Effort normal limité

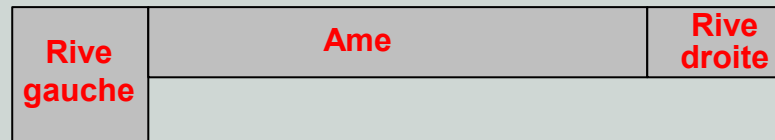
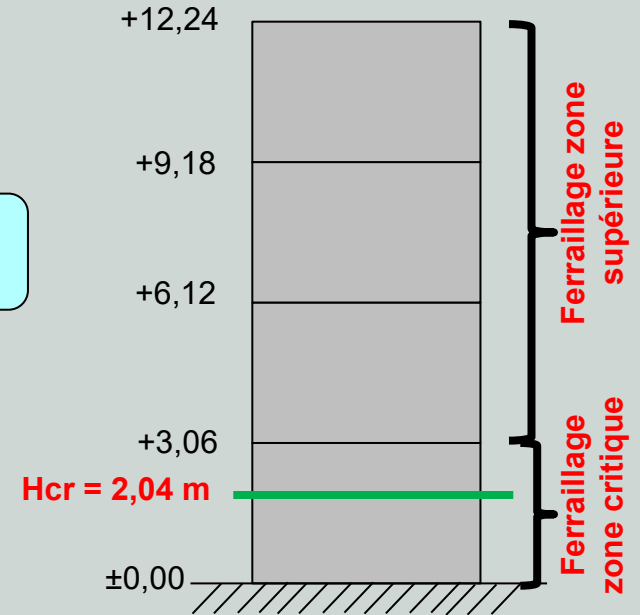
Moyennant la satisfaction des conditions de coffrage des RPA, Le calcul se fera exclusivement dans la direction, de leur plan moyen en appliquant les règles classiques de BA en vigueur.

Ferrailage du voile

Zone critique)

Zone supérieure à la zone critique

Rive gauche, Rive droite et Ame



Logiciel disponible (SOCOTEC, EXPERT BA (Robot), etc.)

02 Zones

Critique

Supérieur

Flexion
composée

Tirer les efforts
normaux et moments
(NRx, MRz)

ELU
Accidentelles (08)
 $+E_x + E_y$

On s'intéresse généralement aux éléments rive gauche, rive droite et à l'âme, séparément

Des 02 combinaisons
(ELU, ELA), on prend les
valeurs trouvées (NRx,
MRz)

SOCOTEC

Choix
d'armature pour
la section
correspondante

Flexion composée

Calcul doit être mené en tenant compte de :

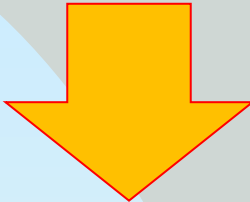
Prendre en compte la totalité de l'effort vertical, en fonction de la combinaison, pour faire le dimensionnement en flexion composée)

En cas d'action sismique, les armatures tendues trouvées en flexion composée doivent être placées aux 02 extrémités du voile, car le séisme agit dans les 02 directions (ferrailage symétrique)

De plus

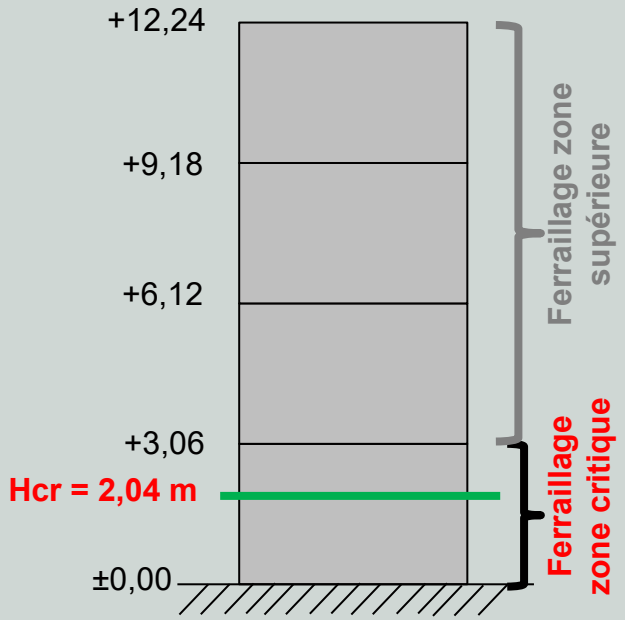
Une fois terminé le calcul en flexion composée et que la position de l'axe neutre est connue, il vérifier l'effort normal limite dans cette zone.

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



ZONE CRITIQUE

**Lancer
SOCOTEC**



3. Ferrailage du voile

3.4. Dimensionnement des éléments de rive

On prend

Sections
rectangulaires

02 Types

Section L, U,
T...(Composées)

Zone
critique

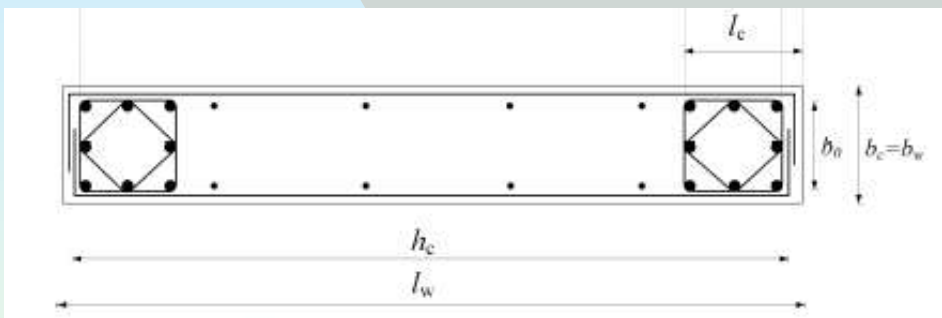
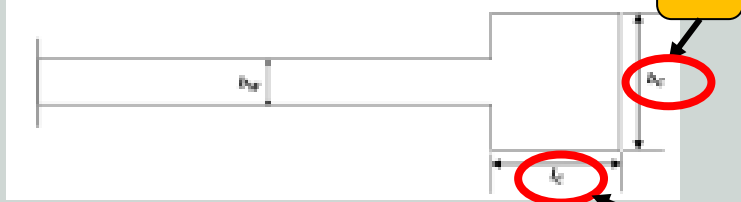


Figure 7.17: Eléments de rive pour les voiles

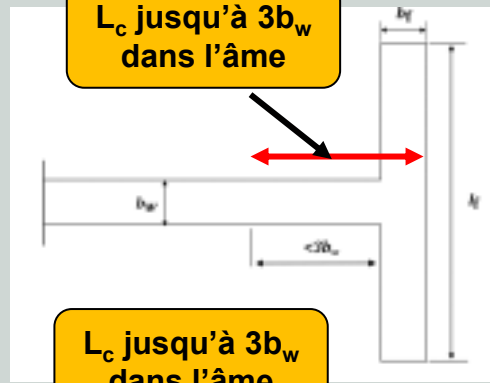
$$b_c \geq \max\left(20\text{cm}; \frac{h_e}{20}\right)$$

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

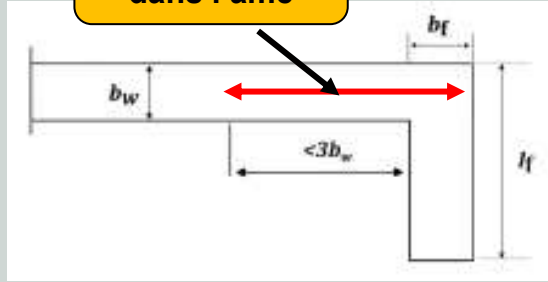
l_w : longueur du voile
 b_w : largeur de l'âme du voile
 h_e : hauteur libre d'étage



L_c jusqu'à $3b_w$
dans l'âme

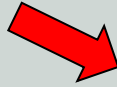


L_c jusqu'à $3b_w$
dans l'âme



✓ 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



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

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

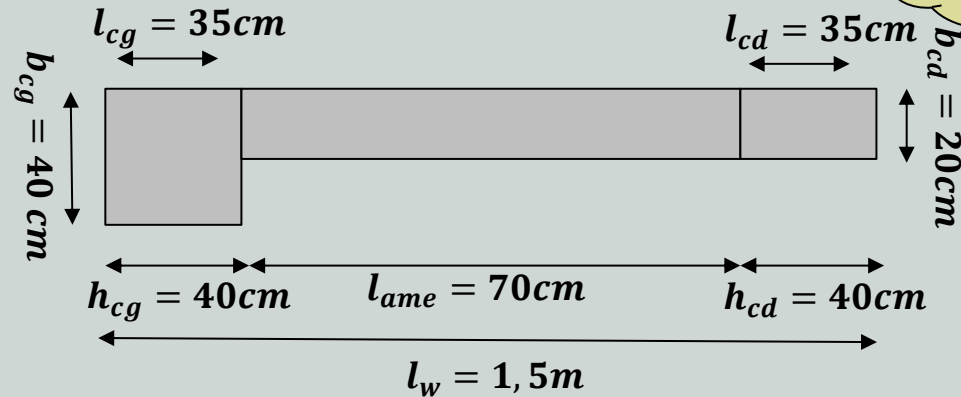
l_w : longueur du voile

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

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

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

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

Droite

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

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

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

✓ Et le % d'armatures longitudinales dans les éléments de rive, au moins **0,5%** de la surface de la zone confinée (A vérifier lors du ferrailage de rive)

3. Ferrailage du voile

3.5. Calcul du voile en flexion composé

Zone critique

Projet - BaelR

Fichier Edition Options Affichage ?

Hypothèses **Saisie** Dessin Résultats Aperçu

Nom d'affaire :

Nom du fichier :

Matériaux

Contrainte béton : f_{cj} MPa Coeff. acier/béton n

Limite élast. acier : f_e MPa

Calcul aux ELL

Effort normal : N_u kN

Moment fléchissant M_u kNm

Coefficients

durée chargement : θ

sécurité du béton : γ_b

sécurité de l'acier : γ_s

Convention signes

$N > 0$: compression
 $M > 0$: tend la fibre inférieure

Fissuration

peu préjudiciable
 préjudiciable
 très préjudiciable

Type d'armature

rond lisse
 barre HA
 barre HA

Géométrie

Largeur : b m

Hauteur : h m

Pos. cdg armatures sup. : d' m

Pos. cdg armatures inf. : c m

Sections d'armatures

supérieures : cm²

inférieures : cm²

1G

Pour l'aide, appuyez sur F1

NUM

Une fois rempli, « Saisie », aller à l'étape suivante « Résultats »

Valeurs NRx, MRz

A remplir selon le cas

b_w
 I_w

Utiliser b_w et I_w

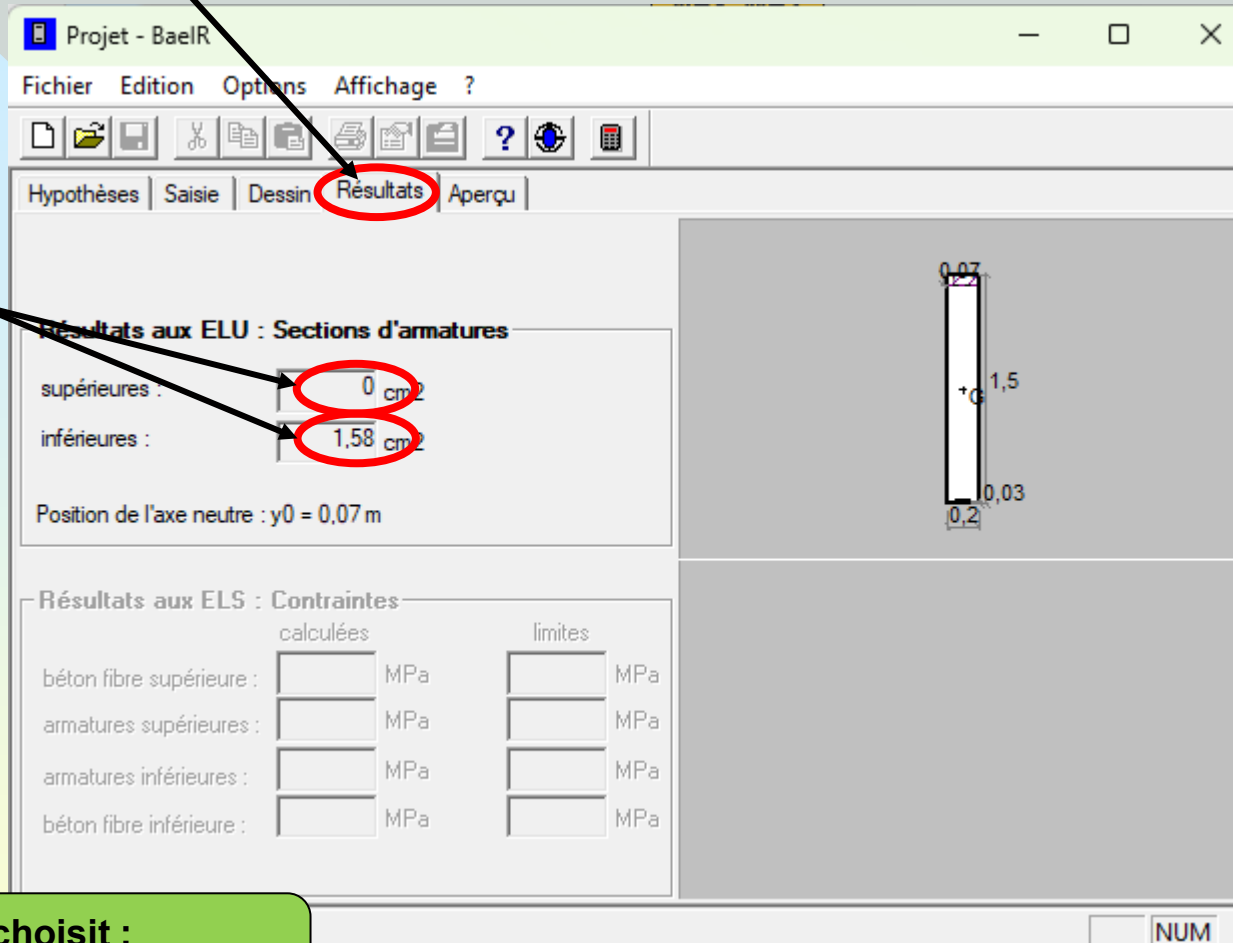
3. Ferrailage du voile

3.5. Calcul du voile en flexion composé

Uniquement ELU et ELA

Zone critique

Résultats



Sections Acier calculées

On choisit :

HA 14 (e = 15 cm)

Soit 10HA14 = 15,39 cm²



3. Ferrailage du voile

Calcul du moment résistant

Zone critique

3. 6. Calcul du moment résistant

Appuyer, une fois terminé les données

Matériaux

Contrainte béton : $f_{c,j}$ 25 MPa
Limite élast. acier : f_e 400 MPa
Module élast. acier : E_a 200 000 MPa
Coeff. acier/béton : n 15

Calcul aux ELU Effort normal Nu : 173,1 kN
 Calcul aux ELS Effort normal Ns : kN

Coefficients

durée chargement : θ 0,85
sécurité du béton : γ_b 1,2
sécurité de l'acier : γ_s 1

Fissuration

peu préjudiciable
 préjudiciable
 très préjudiciable

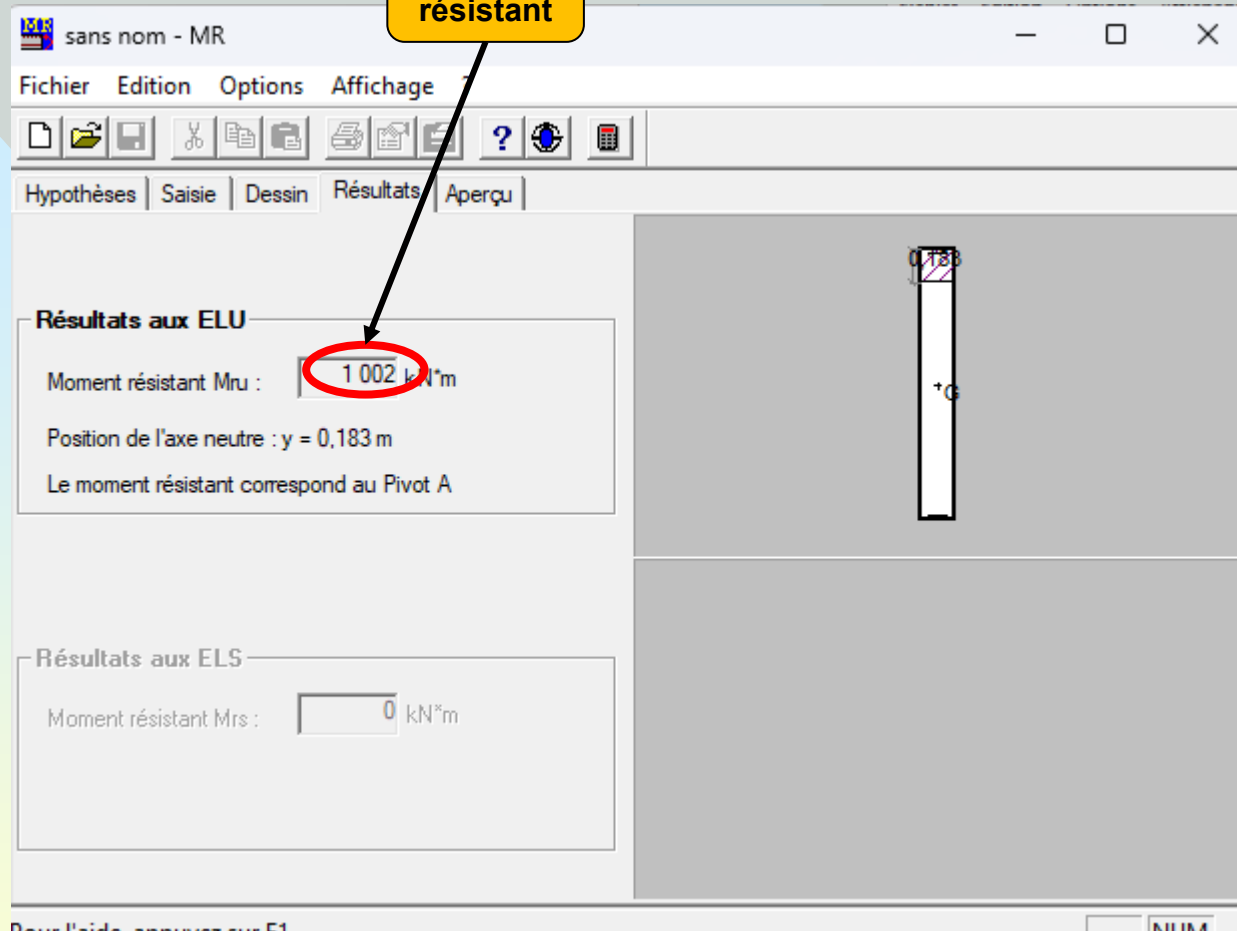
Section

Largeur : b 0,2 m
Hauteur : h 1,5 m
Position cdg armatures sup. : d' 0,025 m
Position cdg armatures inf. : c 0,025 m
Section armatures supérieures A' 15,39 cm²
Section armatures inférieures : A 15,39 cm²

NUM

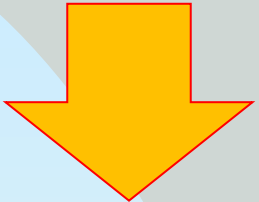
Zone critique

Moment résistant

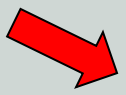


On aura
 $M_r = 1002 \text{ KN.m}$

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

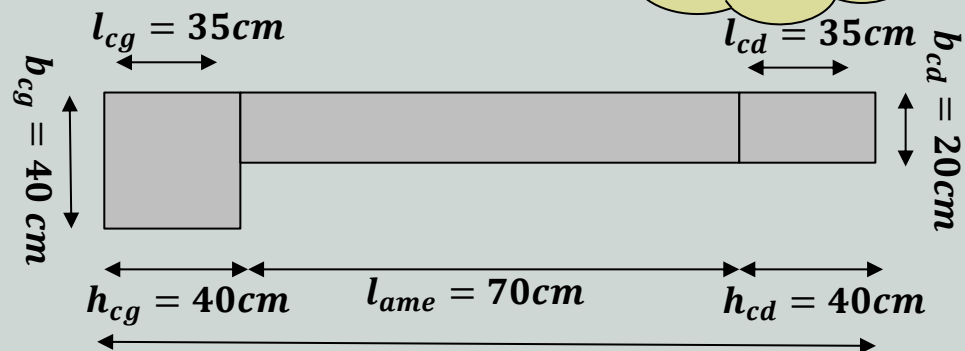
- ✓ Les armatures d'âme en 02 treillis de barre de même adhérence reliés par des **épingles espacés d'environ 500 mm.**
- ✓ Pour les armatures d'âme
 $8\text{mm} \leq \phi \leq \frac{b_w}{8}$ et $esp \leq \min(250\text{mm}, 25\phi)$
- ✓ Les barres verticales du dernier étage munies de crochets à la partie 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 : $\frac{A_h}{s} \geq \frac{\bar{V}}{z.f_e}$. ($\bar{V} = 1,4 Vu$)

Aciers verticaux

Zone critique



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

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

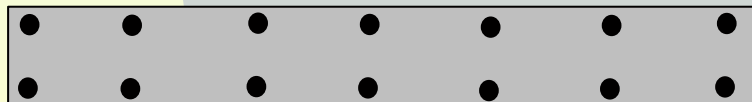
On prend $\phi = 14\text{ mm}$

Espacement vertical

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

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

Avec $S_t = 10\text{ cm}$



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

- ✓ Les barres verticales du dernier niveau (âme de la zone supérieure) doivent être munies de crochets à la partie supérieure.
- ✓ Les autres barres (pas de crochets), prévoir des longueurs de recouvrement

Aciers horizontaux

Résistance à l'effort tranchant

Avec

$f_e = 400 \text{ MPa}$
 $z = 110 \text{ cm}$
 $s = 15 \text{ cm}$
 $\bar{V} = 123,98 \text{ KN}$

On aura

$$A_h \geq \frac{s \cdot \bar{V}}{z \cdot f_e} = \frac{15 \times 123,98}{110 \times 400} \times 10 = 0,43 \text{ cm}^2$$

On prend

2HA12 = 2,26 cm²

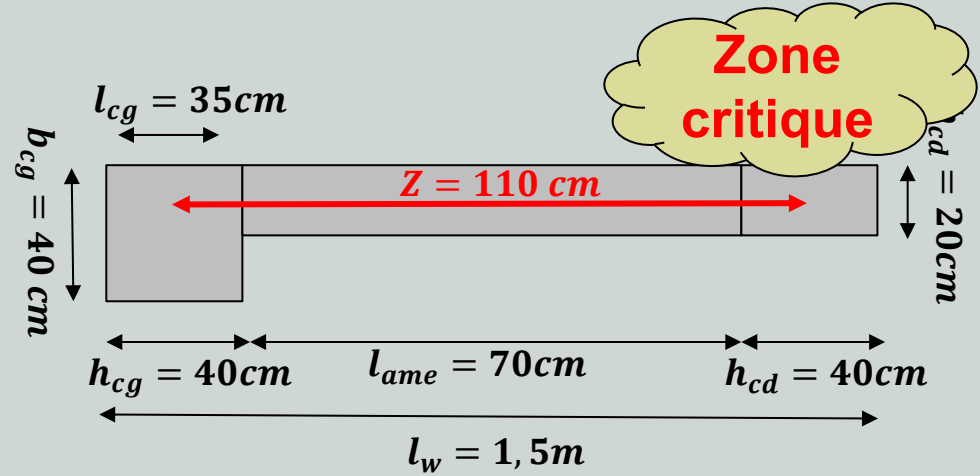
$$s_h \leq \min(1,5 b_w ; 25 \text{ cm}) = 25 \text{ cm}$$

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

On prend

$S_h = 20 \text{ cm}$

Le long de la hauteur critique



- ❖ S : Espacement des cours d'armature transversale
- ❖ V̄ : 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



Il faut

Ferrailage des trumeaux

**Règles communes aux armatures
verticales et horizontales des trumeaux**

- ✓ Le % minimal **hor et vert dans l'âme est de 0.20%**
- ✓ L'espacement des barres, plus petite des 02 valeurs ($s \leq 1,5 bw$; $s \leq 25 \text{ cm}$)
- ✓ Les 02 nappes doivent être reliées avec au moins 04 épingles/m²
- ✓ Dans chaque nappe, les barres horizontales doivent être disposées vers l'extérieur

- ✓ Le diamètre des barres verticales et horizontales (à l'exception des zones d'about) ne devrait pas dépasser $b_w/10$
- ✓ 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**

En cas

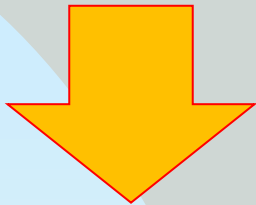
Prévoir des **aciers de couture** le long des joints de reprise de coulage pour reprendre l'effort tranchant, de section

(18C.9)

$$A_{vj} = 1,1 \frac{\bar{V}}{f_e}$$

Cette section doit s'ajouter à la section d'aciers tendus nécessaires pour équilibrer les efforts de traction dus aux moments de renversement

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



Zone critique



**FERRAILLAGE
DES
ELEMENTS DE
RIVE**

**On ferraille rive
gauche puis
rive droite de la
même manière**



3. 8. Ferrailage des éléments de rive

Prévoir

Éléments de rive

- ✓ 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

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

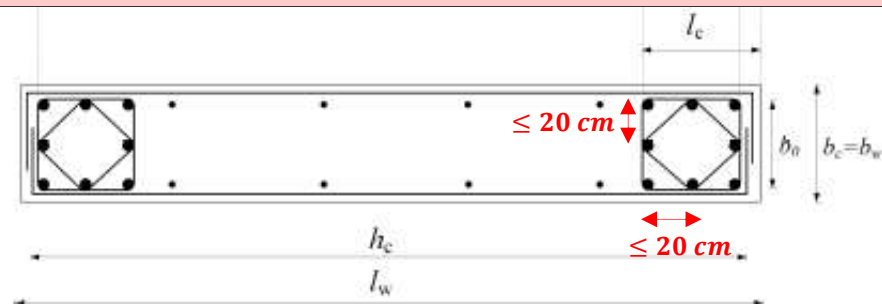
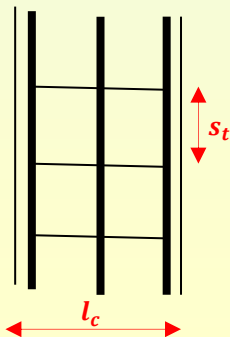


Figure 7.17: Éléments de rive pour les voiles

% minimal longitudinal § 7.7.4

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

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

$$A_{vg} \geq 0,50\% (l_c * b_c) = 0,50\% (40 * 40) = 8 \text{ cm}^2$$

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

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

✓ 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

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

$$s_t \leq \min \left(\frac{b_c}{2}, 20\text{cm}, 8\phi_l \right) = \min \left(\frac{40}{2}, 20\text{cm}, 8 \times 1,2 \right) = 9,6 \text{ cm}$$

On prend

$$s_t = 9 \text{ cm}$$

On vérifie après si ça passe pour la ductilité

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

Section (A_t) de rive (dans le sens parallèle à l'épaisseur du voile) , 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

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

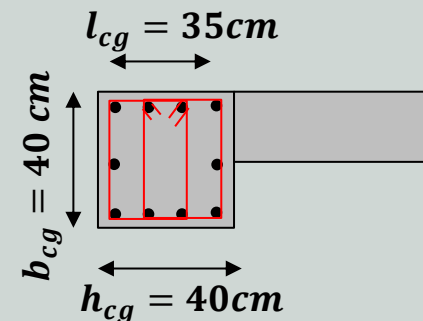
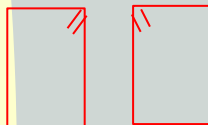
$$A_t \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 0,09 \times 9 \times 35 \times \frac{25}{400} \\ 0,30 \times 9 \times 35 \left(\frac{40 \times 40}{35 \times 35} - 1 \right) \frac{25}{400} \end{array} \right.$$

$$A_t \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 1,77 \text{ cm}^2 \\ 1,80 \text{ cm}^2 \end{array} \right.$$

On prend

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

02 cadres



Zone critique

FERRAILLAGE DE LA RIVE DROITE

Rive droite

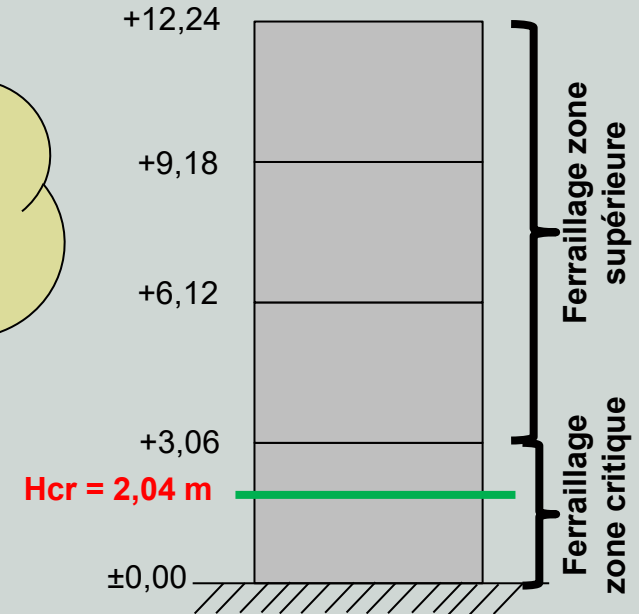
La rive droite de la zone courante sera ferrillée de la même manière que la rive gauche de la zone courante

Suivre les mêmes étapes que la rive gauche

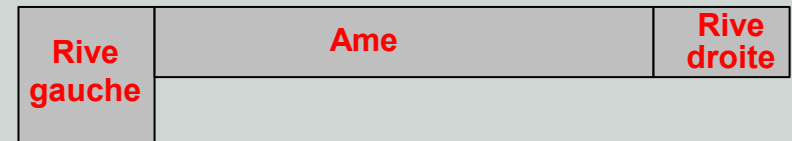
Ferrailage de la zone supérieure

Zone Supérieure

FERRAILLAGE DE LA ZONE SUPERIEURE A LA ZONE CRITIQUE



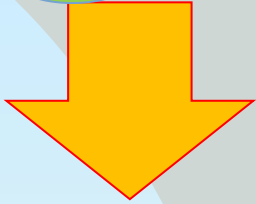
La zone supérieure à la zone critique ($h > h_{cr}$) sera ferrillée de la même manière que la zone critique en utilisant les efforts (moments, efforts tranchants et efforts normaux) au niveau du début de cette zone supérieure)



Suivre les mêmes étapes Rive gauche, rive droite et l'âme que la zone critique

Aller vers justification de la ductilité locale

**Prochaine
étape**



**Justification de
la condition de
ductilité locale**

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

Justification

Merci. Fin du Chapitre 12B

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



Dynamique des structures

Abdellatif MEGNOUNIF

Prochain Cours

Chap. 12C

Ferrailage du Mur Voile

Part 3 : Justification de la Ductilité Locale