

# *Dynamique des structures*

**Abdellatif MEGNOUNIF**

e-mail: [abdellatif\\_megnounif@yahoo.fr](mailto:abdellatif_megnounif@yahoo.fr)

## **Partie 4 : Calcul d'une Structure en Béton Armé**

### **Chapitre 03B**

## **Théorie des voiles**

**COURS 03B Mardi 21.04.2026**

# 1. Introduction

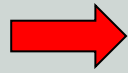
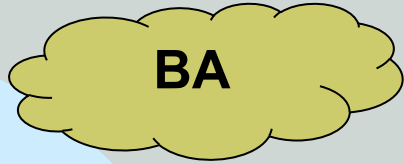
Notion de contreventement

*Assurer la stabilité globale d'une structure face aux forces horizontales (Vent, séismes)*

*Sans contreventement, la structure risquerait de se déformer excessivement ou de s'effondrer sous l'effet des poussées latérales.*

## Rôles principaux ?

1. **Stabilité latérale** : Empêcher le basculement ou la déformation de la structure.
2. **Transmission des charges** : Collecter les efforts horizontaux au niveau des planchers et les transmettre jusqu'aux fondations.
3. **Rigidité** : Limiter les déplacements horizontaux pour protéger les éléments non structuraux (cloisons, vitrages...).



**03 types de contreventement**

**Ossatures en portiques**

**Voiles ou murs ductiles**

**Murs de grandes dimensions faiblement armés (Système 9)**

La résistance aux forces horizontales est assurée principalement par la flexion des barres.

Résistance à l'effort tranchant à la base du bâtiment doit dépasser **65%** de la résistance du système global.

But : Prendre des dispositions pour réaliser un mécanisme plastique global (ex. poutres faibles-poteaux forts)

Éléments verticaux, de section transversale allongée, avec un rapport longueur/épaisseur ( $l_w/b_w > 4$ ).

Sont fixés à la base pour empêcher la rotation relative de la base par rapport au reste du système structurel.

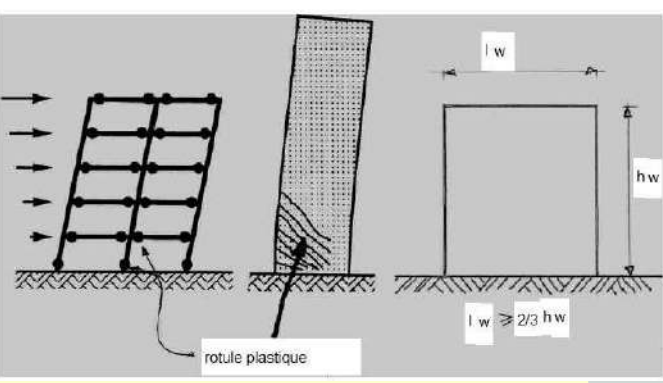
Sont conçus et dimensionnés avec un détail très précis d'armatures pour dissiper l'énergie dans une zone de rotule plastique de flexion juste au dessus de la base (qui ne doit pas présenter d'ouverture ou de perforation large).

Avec ( $l_w \geq \min(4,0 \text{ m}; 2h_w/3)$ ).

Développent une fissuration limitée et transforment en partie l'énergie sismique en énergie **potentiel**, par soulèvement des masses de la structure et en énergie **dissipée dans le sol**, par rotation de corps rigide.

Généralement, ne peuvent pas dissiper efficacement l'énergie dans une rotule plastique à la base.

02 voiles au minimum dans chaque direction, et portent 20% des charges gravitaires, et avoir une période  $\leq$  à 0,5 s



Souvent, on combine



# Combinaisons des 03 types de contreventements

## 1. Introduction

Combinaisons des 03 types de contreventement



Types hybrides

Capacité dissipative diverse

Systemes à ossature (Système 1)

Murs couplés (Système 9)

Systemes mixtes (Systèmes 2, 3 et 4)

Résistance (verticales et latérales) est assurée par des ossatures en portiques dont la résistance à l'effort tranchant à la base dépasse 65 % de la résistance globale.

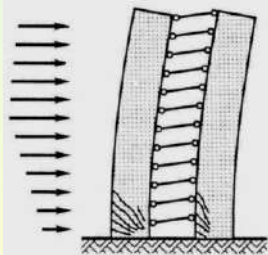
**Murs Couplés :** Murs liaisonnées par des poutres ou linteaux ductiles capables de réduire d'au moins 25% la somme des moments de flexion en base des murs par rapport au cas où les murs travaillent séparément.

Transfert des charges verticales assuré par une ossature en portique et le contreventement est assuré en partie par les portiques et en partie par des voiles.

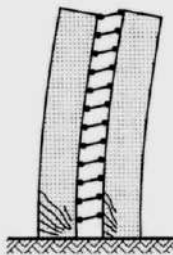
**Systemes de murs :** Résistance aux charges verticales et latérales est assurée par des murs, couplés ou non, dont la résistance à l'effort tranchant à la base dépasse 65% de la résistance totale

**Systeme mixte équivalent à une ossature :** Les portique prennent 50% à 65% de la résistance totale à l'effort tranchant.

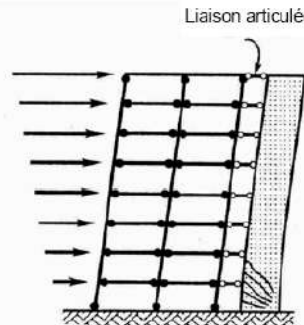
**Systeme mixte équivalent à des voiles:** Les voiles prennent 50% à 65% de la résistance totale à l'effort tranchant.



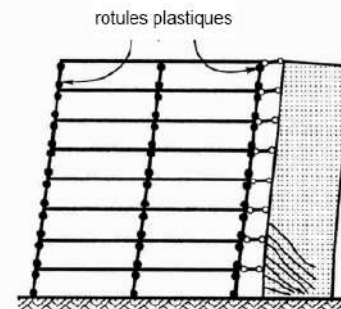
Murs non couplés



Murs couplés



Equivalent ossature



Equivalent Voies

# Combinaisons des 03 types de contreventements

## 1. Introduction

### **Systemes à voiles** (Système 5)

Résistance (verticales et latérales) est assurée par des voiles verticales dont la résistance à l'effort tranchant à la base dépasse 65 % de la résistance globale.

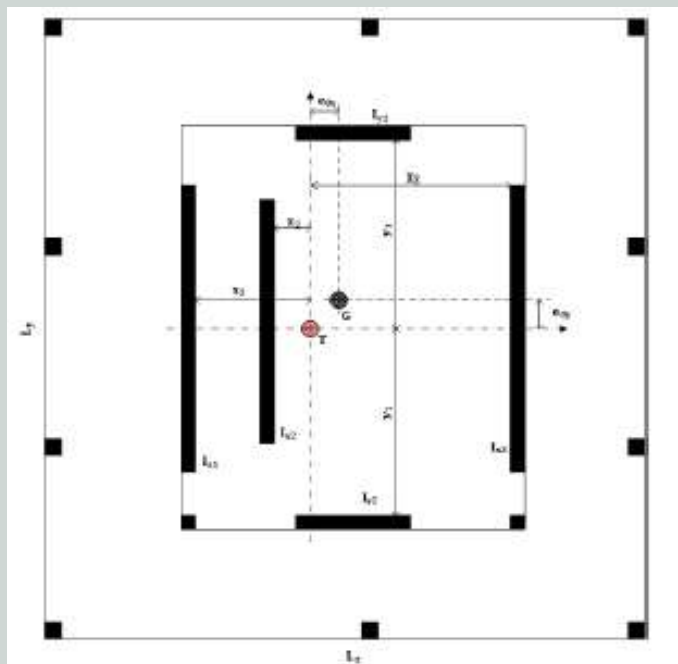
### **Systeme à noyau** (Système 6)

Contreventement mixte ou système de voiles dont la rigidité à la torsion n'atteint pas une valeur minimale prescrite. (Cas des ossatures flexibles combinées avec des murs concentrés en plan à proximité du centre du bâtiment).

### **Systemes en pendule inversé** (Système 8)

50% ou plus de la masse est située dans le 1/3 supérieur de la hauteur de la structure ou dans lequel l'essentiel de la dissipation de l'énergie a lieu à la base d'un élément unique du bâtiment.

### **Systemes console verticale** (Système 7)



## 2. Notions de ductilité locale et de zones dissipatives

Flexion  
Plastique



*Le seul mécanisme local ductile utilisé en BA*

*Obtenu par choix de section et de matériaux favorisant les 02 phénomènes ductiles disponibles au niveau des matériaux*

02 phénomènes ductiles ?

Cas  
ductile 01

*Plastification de l'acier en traction*

1. **Plastification de l'acier en traction** : L'acier est un matériau **ductile** dont l'allongement correspondant à la résistance à la rupture est **limité** par les RPA2024, selon les **classes** d'acier.
2. Sa ductilité doit être au minimum de l'ordre de 20.



Cas  
ductile 02




*Déformation plastique du béton comprimé*

- ❖ Déformation de raccourcissement est très limitée (env  $3.5 \cdot 10^{-3}$ ), très petite que celle de l'armature.
- ❖ On peut améliorer cette déformation, à la rupture si le béton est bien confiné par une armature transversale, on augmente aussi la résistance.
- ❖ L'armature transversale empêche l'expansion transversale du béton (effet Poisson).
- ❖ On augmente ainsi la ductilité, mais uniquement dans la zone intérieure au confinement; la zone extérieure à l'armature transversale se désagrège en cas de déformation importante.
- ❖ Généralement, la déformation à rupture du béton confiné est exprimée en fonction de l'armature transversale ( $\alpha \omega_{wd} : \varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2 \frac{\sigma^2}{f_{ck}} = 0,0035 + 0,1 \alpha \omega_{wd}$ ). ( $\omega_{wd}$ : rapport mécanique en volume des armatures de confinement dans les zones critiques et «  $\alpha$  » coefficient d'efficacité du confinement. **(Plus de détails, chapitre ferrailage des voiles)**)

### 3. Notion de « zone critique » et de « hauteur critique »

**Zone critique**

*La région où apparaissent les combinaisons les plus défavorables des effets (M, N, V, T) des actions et où des rotules plastiques peuvent se produire.*

*Les zones critiques sont les zones dissipatives*

**Hauteur critique**

*La hauteur de la zone dissipative qui dépend des dimensions du voile et du nombre d'étages*

**Les armatures de confinement doivent être présentes sur la hauteur « hcr » dans la zone où se produisent les déformations plastiques (rotules plastiques) (en pied du voile)**

# 4. Résistance des voiles

Projet de Mur ductile



*Prendre en charge les parties les plus sollicitées en compression « Zones de rive »*

*Sections destinées à reprendre l'essentiel du moment de flexion sollicitant « Med »*

Longueur confinée

*Ces zones de rive ont des longueurs confinées minimales «  $l_{c,min}$  » imposées par RPA2024 en fonction des dimensions du voile.*

Des armatures verticales dans ces zones dont le % est bien limité par les RPA2024

*Entre les zones de rive, on dispose les armatures longitudinales « d'âme ».*

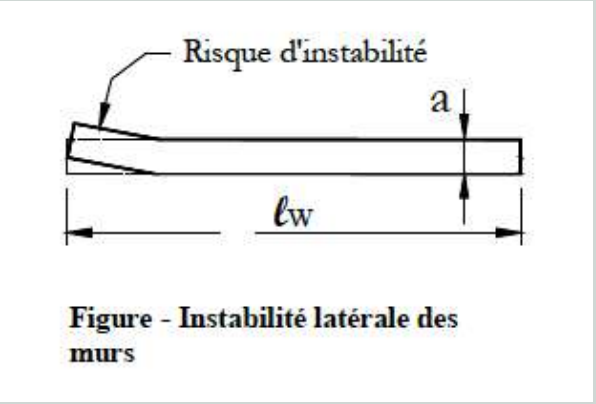


Figure - Instabilité latérale des murs

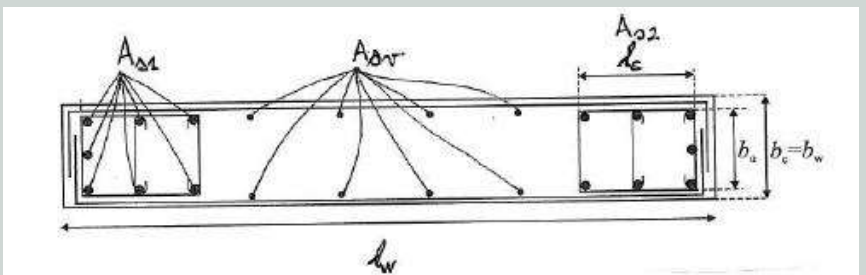


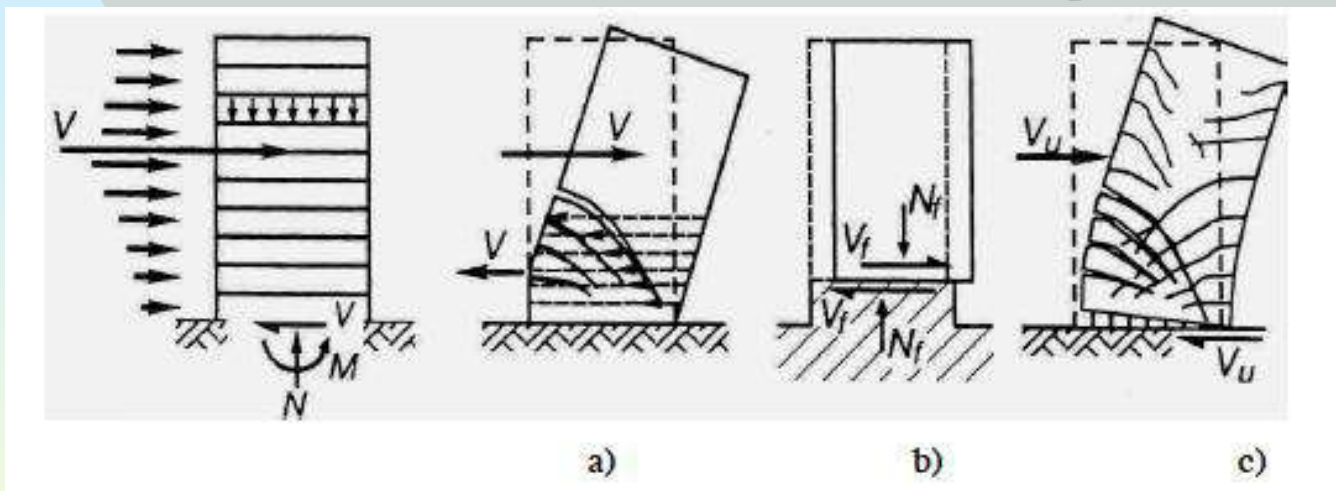
Figure 10.32. Eléments de rive et disposition des armatures verticales  $A_{s1}$ ,  $A_{s2}$  et  $A_{s3}$ .



## 4. Résistance des voiles

*Dans le calcul de la résistance des voiles,*

**Eviter les modes de ruine suivants**



- a) Mode recherché, flexion plastique**
- b) Mode indésirable, par glissement à un joint de reprise**
- c) Mode indésirable, par glissement en base**

Voir **chapitre ferrailage des voiles** pour plus de détails concernant la vérification de la **ductilité locale des voiles**

# 5. Voiles de contreventement – RPA2024

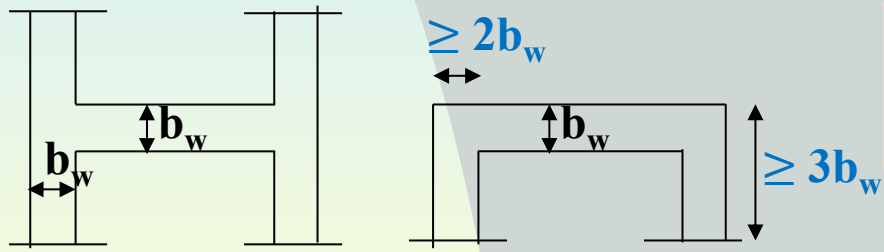
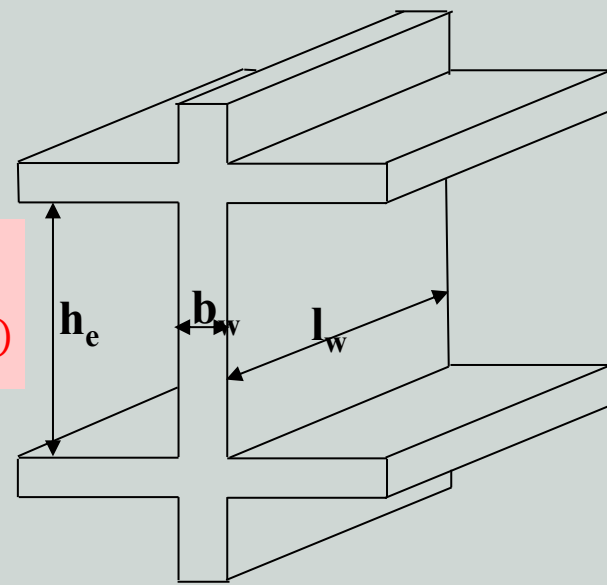


**Il faut**

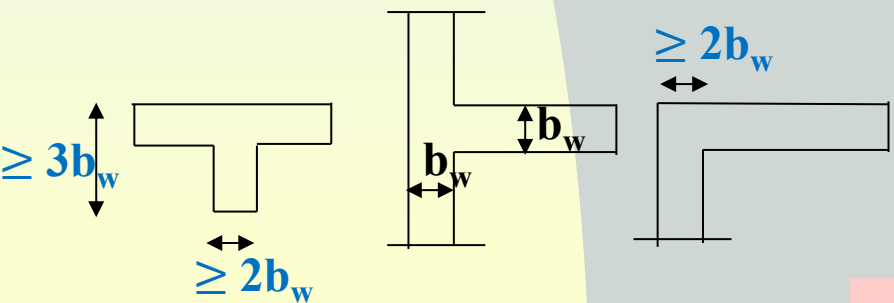
**Coffrage**

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

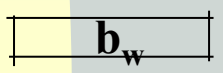
Epaisseur minimale =  $b_w \geq \max(15 \text{ cm}, \frac{h_e}{20})$   
 En plus, pour stabilité de forme (non flambement) épaisseur doit être déterminée en fonction de «  $h_e$  » et des conditions de rigidité aux extrémités (ci-dessous)



$b_w \geq \max(0.15, \frac{h_e}{20})$



$b_w \geq \max(0.15, \frac{h_e}{20})$



$b_w \geq \max(0.15, \frac{h_e}{20})$



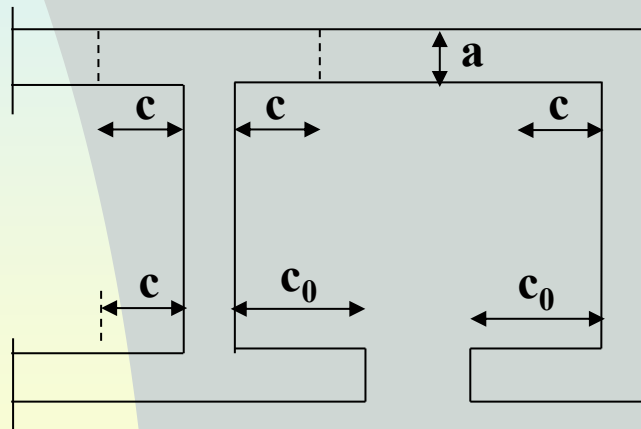
## 5. Voiles de contreventement

RPA2024

Il faut

Coffrage

Pour les calculs de l'inertie des voiles, il est admis de considérer l'influence des voiles perpendiculaires. La longueur du voile prise en compte de chaque coté sera la plus petite selon la figure



Prise en compte des voiles de retour

$$c \leq \min\left(8a; \frac{L_0}{2}; c_0\right)$$

## 5. Voiles de contreventement

RPA2024

Il faut

Ferrailage

Acier

Contraintes limites de cisaillement du béton dans les linteaux et trumeaux

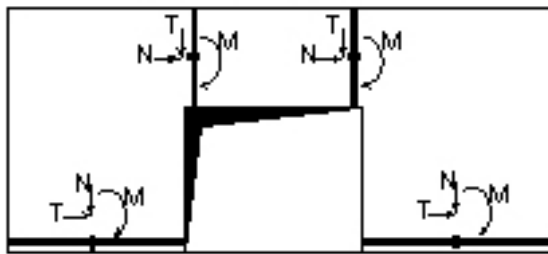
$$\tau_b \leq 0,20 f_{c28}$$

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

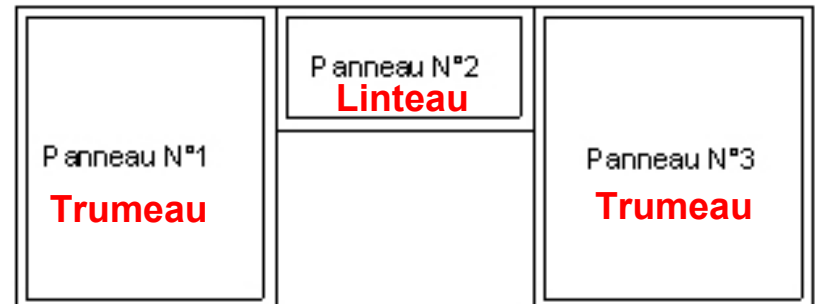
avec 
$$\bar{V} = 1,4 Vu_{calcul}$$

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

Coupe CC Coupe DD



Coupe AA Coupe BB



## 5. Voiles de contreventement

RPA2024

Il faut

Ferrailage des linteaux

Premier cas :  $\tau_b \leq 0,06 f_{c28}$

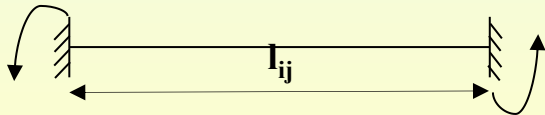
Linteaux calculés en flexion simple (M, V) on devra disposer des aciers longitudinaux ( $A_l$ ), des aciers transversaux ( $A_t$ ) et des aciers en partie courante (de peau) ( $A_c$ )

Armatures  
longitudinales

Inférieurs et supérieurs,  
calculés par:

$$A_l \geq \frac{M}{z f_e} \quad \text{avec} \quad z = h - 2d' \quad (d' \text{ distance d'enrobage})$$

M: moment du à l'effort  
tranchant ( $\bar{V} = 1,4 V u_{calcul}$ )



1<sup>er</sup> sous cas : linteaux  
longs ( $\lambda_g = \frac{l}{h} > 1$ )

$$s \leq \frac{A_t f_e z}{\bar{V}}$$

s : espacement des cours  
d'armatures transversales

$A_t$ : Section d'un cours  
d'armatures transversales

$$\bar{V} = 1,4 V u_{calcul}$$

l : portée du linteau

2<sup>ème</sup> sous cas : linteaux

courts ( $\lambda_g = \frac{l}{h} \leq 1$ )

$$s \leq \frac{A_t f_e l}{V + A_t f_e}$$

V : min ( $V_1$ ;  $V_2$ )

$$V_2 = 2 V u_{calcul}$$

$$V_1 = \frac{|M_{ci} + M_{cj}|}{l_{ij}}$$

$M_{ci}$  et  $M_{cj}$  : moments résistants  
ultimes des sections d'about  
(gauche et droite du linteau)  
( $M_c = A_l f_e z$ )

$l_{ij}$  : portée du linteau

## 5. Voiles de contreventement

RPA2024

Il faut

Ferrailage des linteaux

Deuxième cas :  $\tau_b > 0,06 f_{c28}$

Il y a lieu de disposer les ferrillages longitudinaux (Sup et Inf), transversaux et en zone courante suivant les minimums réglementaires

M, V sont repris suivant des bielles diagonales suivant l'axe moyen des armatures  $A_D$  à disposer obligatoirement

Calculés par :

$$A_D = \frac{V}{2 f_e \sin \alpha}$$

$$\text{avec } \tan \alpha = \frac{h-2d'}{l}$$

$$V = V_{\text{calcul}}$$

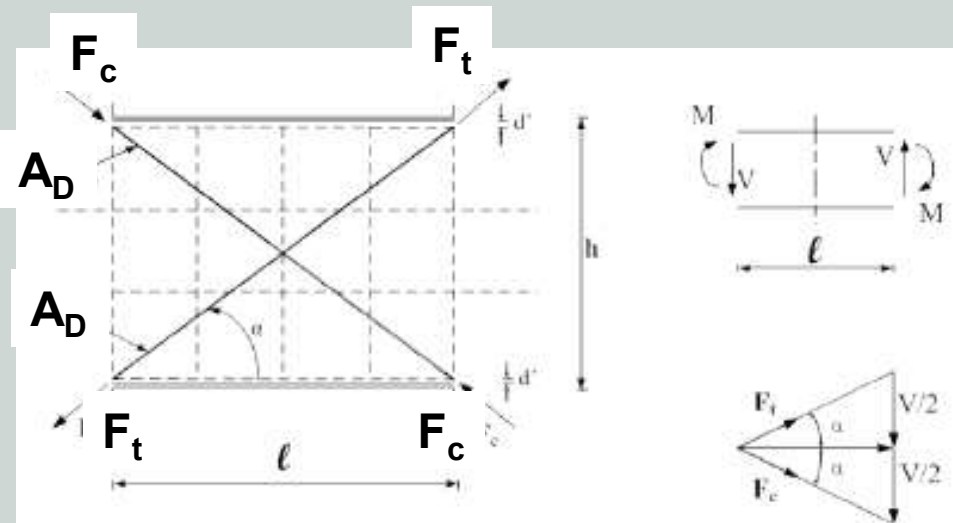


Figure 7.11: Efforts dans les bielles du linteau

## 5. Voiles de contreventement

RPA2024

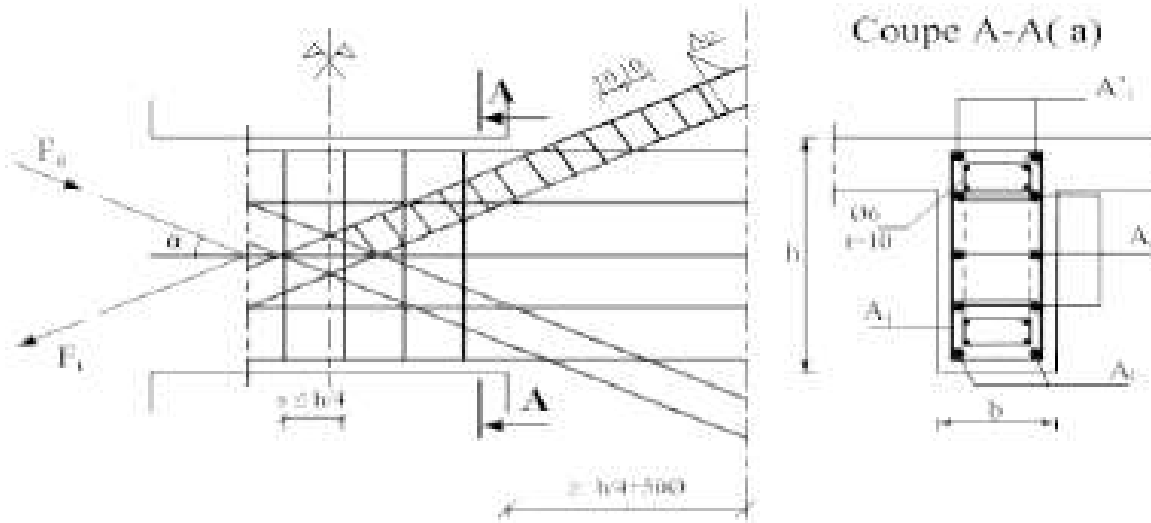


Figure 7.12: Armatures de linteaux

Armatures de linteaux

$$\left\{ \begin{array}{l} A_t, A'_t \geq 0,0015bh \text{ ? } 0,0025bh \text{ ?} \\ A_c \geq 0,0020bh \\ A_D \left\{ \begin{array}{l} \geq 0,0015bh : \text{ si } \tau_b > 0,06f_{c28} \\ = 0 : \text{ si } \tau_b \leq 0,06f_{c28} \end{array} \right. \\ A_t \left\{ \begin{array}{l} \geq 0,0015bs : \text{ si } \tau_b \leq 0,025f_{c28} \\ \geq 0,0025bs : \text{ si } \tau_b > 0,025f_{c28} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

**Ferrailage minimal**

**Armatures  
longitudinales**

$$(A_t, A'_t) \geq 0,0025bh$$

(0,25%)

**Armatures  
transversales**

Si  $\tau_b \leq 0,025f_{c28}$

$$A_t \geq 0,0015bs \quad (0,15\%)$$

Si  $\tau_b > 0,025f_{c28}$

$$A_t \geq 0,0025bs \quad (0,25\%)$$

**Armatures de peau**

Les armatures longitudinales intermédiaires de peau  $A_c$  (2 nappes) doivent être au total d'un minimum égale à 0,20%

Il faut

Ferrailage des 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.

2024

Différence dans la prise en compte des valeurs des moments fléchissants selon les voiles élancés ou courts (modifiés en cas élancé,  $h_w/l_w > 2.0$ )

Elancés

02 étapes:

1. Enveloppe linéaire (moment max à la base avec celui du sommet).
2. Décaler l'enveloppe linéaire verticalement par( $h_{cr}$ )

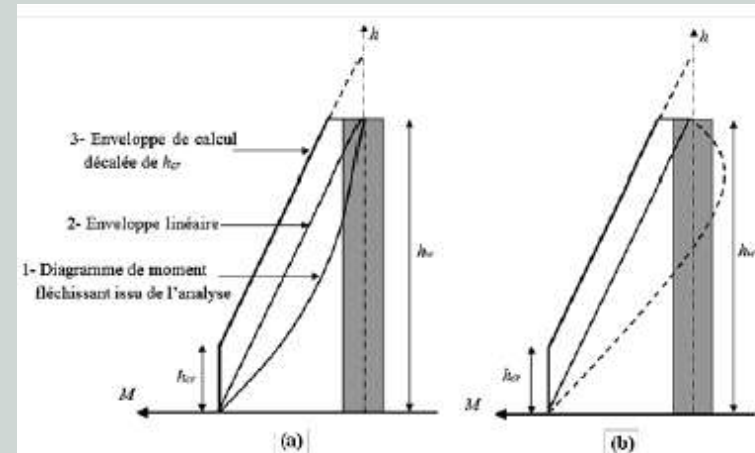


Figure 7.13: Enveloppe de calcul pour les moments fléchissant

$$h_{cr} = \max\left(l_w, \frac{h_w}{6}\right) \text{ et } h_{cr} \leq \begin{cases} 2.l_w \\ h_e: \text{ pour } n \leq 6 \text{ niveaux} \\ 2.h_e: \text{ pour } n > 6 \text{ niveaux} \end{cases}$$

Il faut

Ferrailage des trumeaux

2024

Enveloppe de calcul modifié  
effort tranchant

Systemes de contreventement mixte avec voiles élancés

### 03 étapes:

1. Amplifier le diagramme initial de 40%
2. Maintenir la courbe amplifiée de la base du voile jusqu'à une hauteur ( $h_w/3$ )
3. Enveloppe linéaire entre ( $h_w/3$ ) et le sommet du voile.

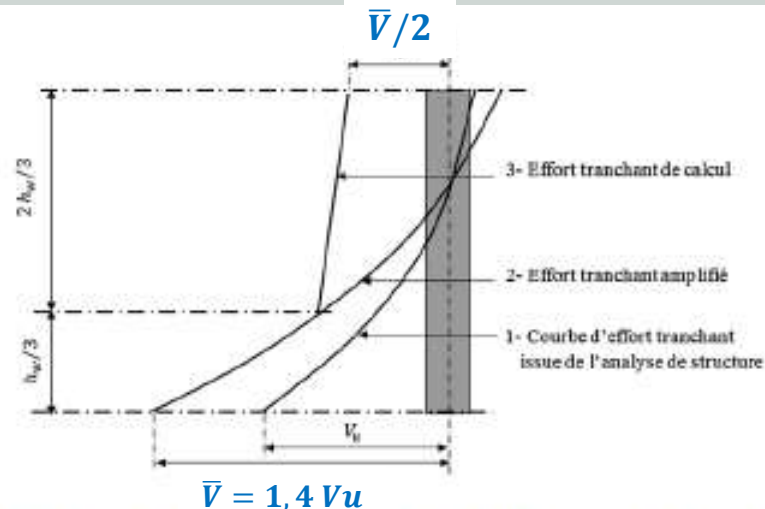


Figure 7.15: Enveloppe de calcul pour les efforts tranchants dans les voiles élancés des systèmes à contreventement mixte

## 5. Voiles de contreventement

Il faut

Ferraillage des trumeaux

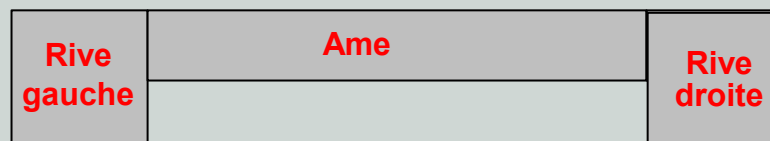
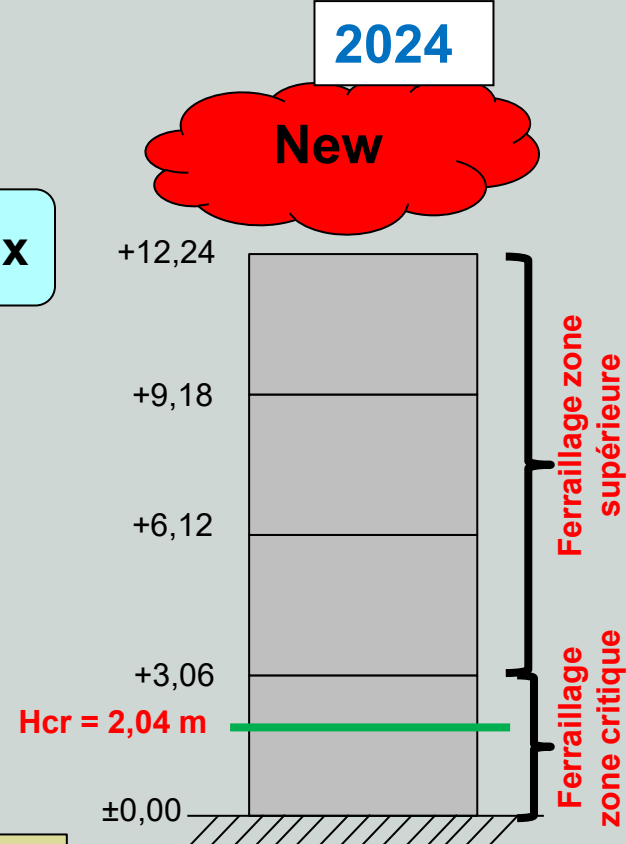
Empêcher la rupture d'une section critique du voile, ou la retarder ou bien quelle se manifeste sous forme de rupture ductile

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

Disposition d'armatures transversales rapprochées dans la zone critique



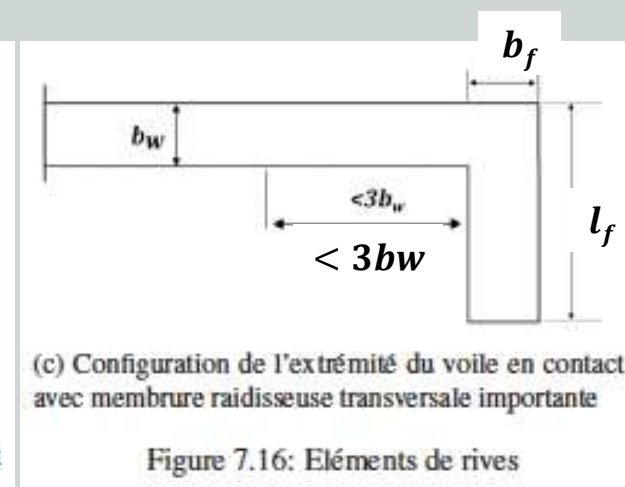
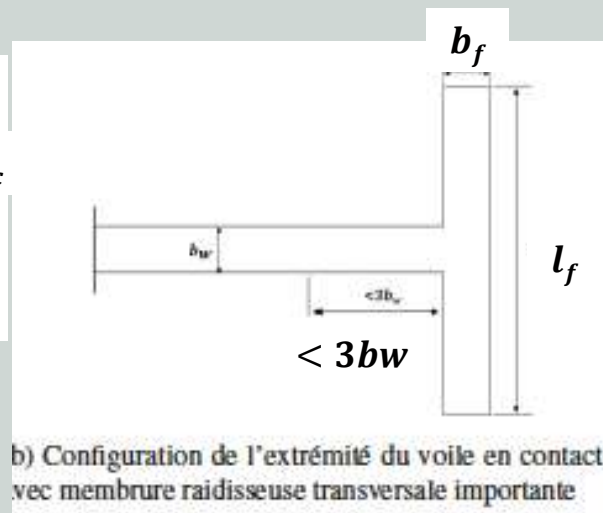
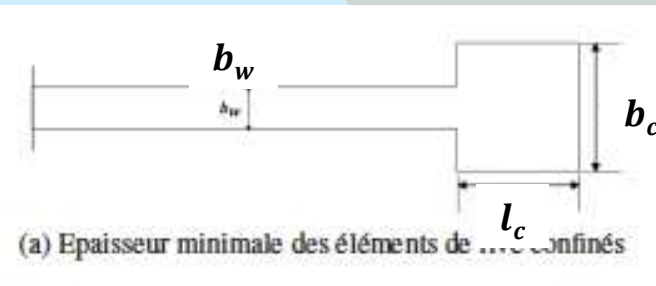
## 5. Voiles de contreventement

2024

Traiter de façon détaillée

Éléments de rive

New



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

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

$l_w$ : longueur du voile

$b_w$ : largeur de l'âme du voile

$h_e$ : hauteur libre d'étage

- ✓ 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 à  $(3b_w)$ , alors  $b_c = b_w$
- ✓ Et le % d'armatures longitudinales dans les éléments de rive, au moins **0,5%** de la surface de la zone confinée

## Éléments de rive

Prévoir

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

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

$\phi_l$ : 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

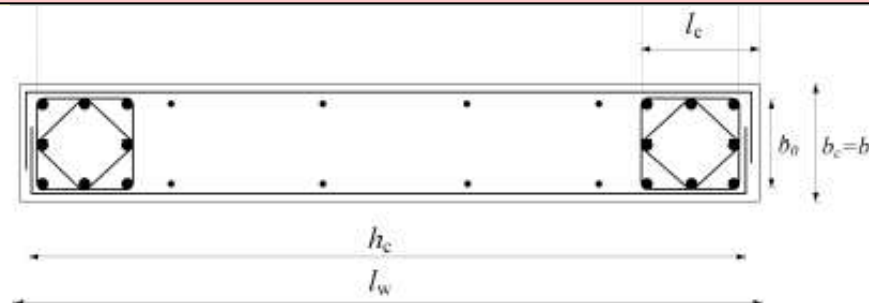


Figure 7.17: Éléments de rive pour les voiles

Il faut

Ferrailage des trumeaux

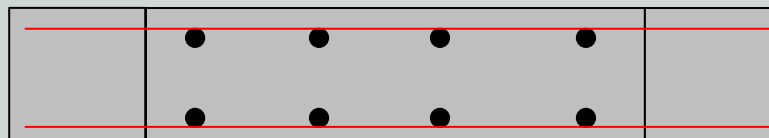
AME

Aciers verticaux

Aciers horizontaux

- ✓ 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)

- ✓ 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 :  $\frac{A_h}{s} \geq \frac{\bar{V}}{z.f_e}$ . ( $\bar{V} = 1,4 Vu$ )



**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 ( $s \leq 1,5 b_w$  ;  $s \leq 30$  **25cm**)
- ✓ Les 02 nappes doivent être reliées avec au moins 04 épingles/m<sup>2</sup>
- ✓ 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**

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

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

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

**Merci. Fin du chapitre 03B**

***[www.abdellatif-megnounif.com/?action=cours](http://www.abdellatif-megnounif.com/?action=cours)***



# *Dynamique des structures*

**Abdellatif MEGNOUNIF**

**Prochain Cours**

**Chap. 03C**

**Modélisation des voiles par ROBOT**