

Les Voiles

1. Introduction :

Les voiles sont des murs armés destinés à recevoir les charges ~~verticales~~ ^{horizontales} ainsi qu'une partie des charges ~~horizontales~~ ^{verticales}.

Les voiles peuvent être conçus avec ou sans ouvertures, ces dernières, selon leurs grandeurs, peuvent avoir de l'importance ou non.

Dans le système d'ossatures en voile et dalles pleines, les voiles constituent les éléments verticaux porteurs, ils doivent reprendre la totalité des charges verticales et la totalité des charges horizontales.

Pour le système d'ossature à portiques, les voiles sont implantés dans le but de contreventement, l'article 3.4 du RPA99 Version 2003 (paragraphe A) classe les structures en portiques contreventés par des voiles en 3 catégories

a) Système de contreventement constitué par des voiles porteurs en béton armé

Ce système est constitué de voiles uniquement ou de voiles et de portiques. Dans ce dernier cas les voiles reprennent plus de 20% des sollicitations dues aux charges verticales. On considère que la sollicitation horizontale est reprise uniquement par les voiles.

b) Système de contreventement mixte assuré par des voiles et des portiques avec justification d'interaction portiques-voiles.
Les voiles de contreventement doivent reprendre au plus 20% des sollicitations dues aux charges verticales.

Les charges horizontales sont reprises conjointement par les voiles et les portiques proportionnellement à leurs rigidités relatives ainsi que les sollicitations résultant de leurs interactions à tous les niveaux.

Les portiques doivent reprendre, outre les sollicitations dues aux charges verticales, au moins 25% de l'effort tranchant d'étage.

4/ Système de contreventement de structures en portiques par des voiles en béton armé.

Dans ce cas les voiles reprennent au plus 20% des sollicitations dues aux charges verticales et la totalité des sollicitations dues aux charges horizontales.

On considère que les portiques ne reprennent que les charges verticales. Toutefois, en zone sismique III, il y a lieu de vérifier les portiques sous un effort horizontal représentant 25% de l'effort horizontal global.

Avec ce système de contreventement les bâtiments sont limités en hauteur à 10 niveaux ou 33m au maximum.

1.1. Positionnement des voiles dans la superstructure

Les voiles sont positionnés dans la superstructure de manière à assurer un bon contreventement et mais sans provoquer la torsion. Pour cela il faut bien choisir leur nombre, leur longueur ainsi que leurs positions par rapport au centre de gravité en plan.

Afin d'éviter la torsion, il y a lieu de déterminer le centre de masse et le centre de torsion.

Pour toutes les structures comportant des planchers ou diaphragmes horizontaux rigides dans leur plan, on suppose que, à chaque niveau et dans chaque direction, la résultante des forces horizontales a une excentricité par rapport au centre de torsion égale à la plus grande des deux valeurs :

- * 5% de la plus grande dimension du bâtiment à ce niveau (cette excentricité doit être prise en considération de part et d'autre du centre de torsion).
- * Excentricité théorique résultant des plans.

$$\begin{cases} e_x = X_G - X_T \\ e_y = Y_G - Y_T \end{cases}$$

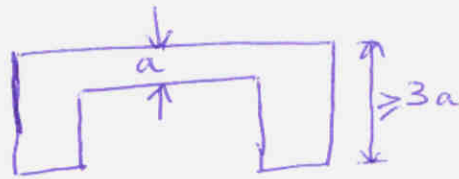
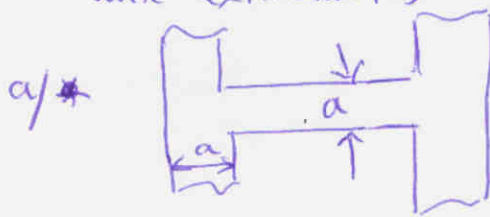
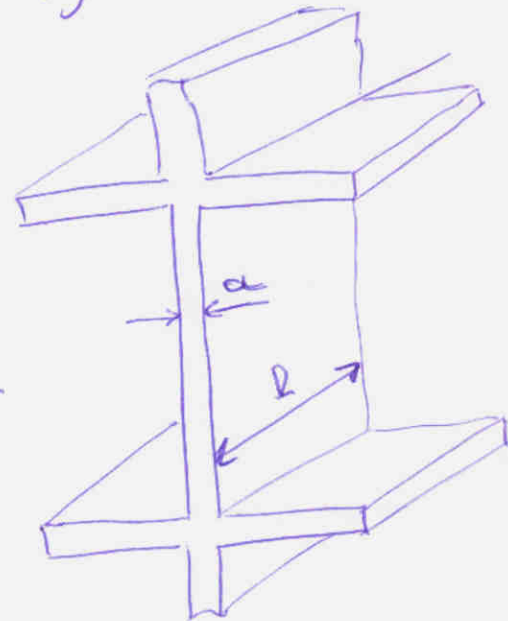
2. Coffrage des voiles (prédimensionnement)

sont considérés comme voiles les éléments satisfaisant à la condition :

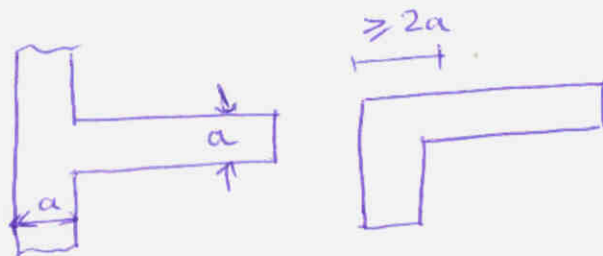
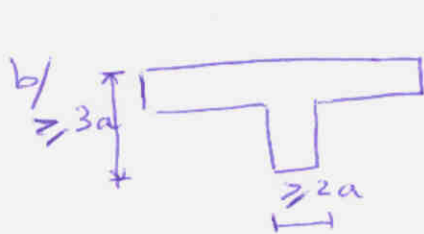
$$l \geq 4 \cdot a$$

L'épaisseur minimale est de 15cm.

L'épaisseur doit être déterminée en fonction de la hauteur libre d'étage h_e et des conditions de rigidité aux extrémités :



$$a \geq \frac{h_e}{25}$$



$$a \geq \frac{h_e}{22}$$



$$a \geq \frac{h_e}{20}$$

1.2 Calcul du Centre de Masse et du Centre de Torsion

Les 2 centres sont calculés à partir des formules du Centre de Gravité.

$$X_G = \frac{\sum x_i M_i}{\sum M_i} \quad \text{et} \quad Y_G = \frac{\sum y_i M_i}{\sum M_i}$$

a) Centre de Masse:

Pour chaque étage à part, on détermine le Centre de masse du plancher, en tenant compte de tous les éléments constituant le plancher chacun avec sa masse volumique.

b) Centre de Torsion:

Pour chaque étage à part, on détermine le Centre de torsion du plancher, en ne tenant compte que des éléments porteurs (poteaux et voiles) avec la prise des moments d'inertie à la place des masses dans les formules du Calcul du Centre de Gravité.

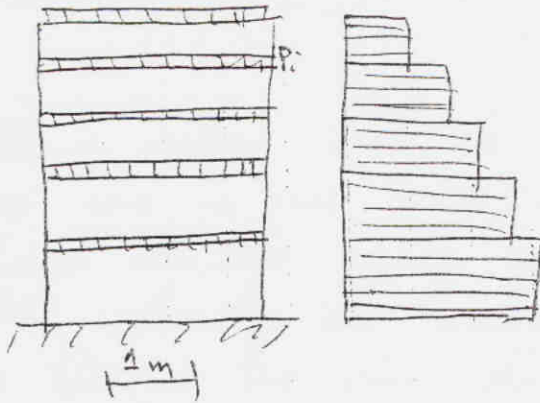
$$X_T = \frac{\sum x_i I_{y_i}}{\sum I_{y_i}} \quad \text{et} \quad Y_T = \frac{\sum y_i I_{x_i}}{\sum I_{x_i}}$$

1.3 Effet de la torsion d'axe vertical

L'augmentation de l'effort tranchant provoqué par la torsion d'axe vertical due à l'excentricité entre le centre de gravité et le centre de rigidité (Torsion) doit être prise en compte.

3 Efforts dus aux charges verticales.

3.1 Voile plein :



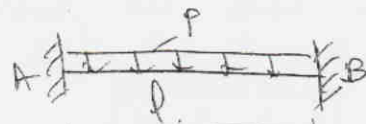
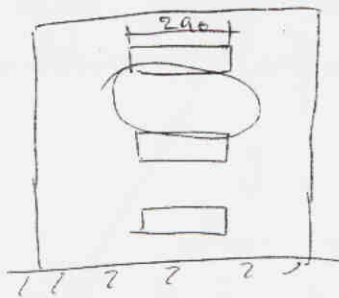
P_i = charge du plancher i
 Effort $N = \sum P_i$
 L'effort N est calculé par bande de 4m. de largeur.

3.2 Voiles avec ouvertures

a) Calcul des Linteaux :

La partie du voile située au dessus ou au dessous des ouvertures s'appelle "Linteau".

Les linteaux sont considérés comme des poutres courtes encastrées sur les appuis.



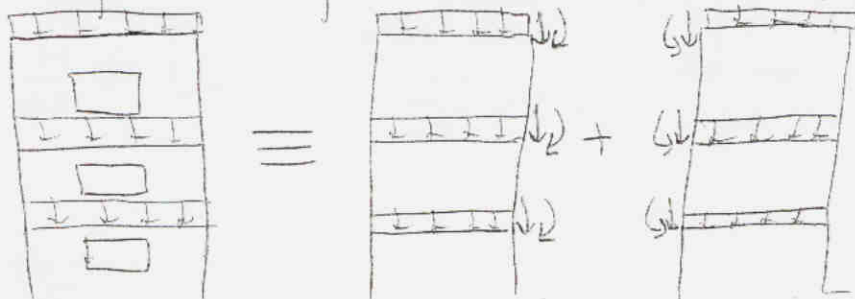
$$M_A = M_B = \frac{Pl^2}{12}$$

$$R_A = R_B = \frac{Pl}{2}$$

$$M_{max} = M_t = \frac{Pl^2}{24}$$

b) Calcul des trumeaux :

La partie du voile entre les ouvertures s'appelle "Trumeaux".
 Les charges des linteaux sont transmises aux trumeaux sous forme de forces et moments concentrés.



Théorème :

Section B_1 et B_2 avec C.d.g. G_1 et G_2

$$B_1 = a \cdot b_1$$

$$B_2 = a \cdot b_2$$

I_1, I_2 = Moment d'inertie par rapport aux C.d.g. G_1 et G_2

$$I_1 = \frac{a b_1^3}{12} \quad ; \quad I_2 = \frac{a b_2^3}{12}$$

G = C.d.g. de la section composée de $B_1 + B_2$

$I_0 = I_1 + I_2$ = Somme des inerties.

$$I = I_0 + B_1 C_1^2 + B_2 C_2^2$$

I = Moment d'inertie de la section composée de $B_1 + B_2$ par rapport à G .

4.2.2 Etapes de Calcul.

La valeur de $\alpha = w \cdot H_0$

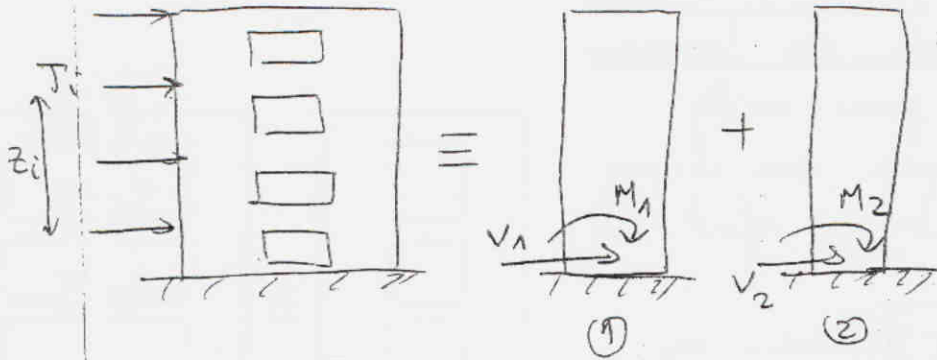
avec H_0 = hauteur totale du voile (refend).

$$\text{et } w^2 = \frac{3 \cdot i \cdot I \cdot c}{I_0 \cdot m \cdot a_0^3 \cdot H} \quad \text{et } m = \frac{2c}{\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2}} = \frac{2c \cdot B_1 \cdot B_2}{B_1 + B_2}$$

Trois cas sont possibles.

- a) $\alpha > 10$ Le linteau est très rigide, l'ouverture est très petite.
le voile est considéré comme étant plein.
on déterminera M_0 et V_0 à la base du voile

b) $\alpha < 1$ Le linteau est faible et l'ouverture est grande
 Dans ce cas on négligera la rigidité des linteaux.



$$V_0 = \sum T_i$$

$$M_0 = \sum T_i z_i$$

$$M_1 = M_0 \frac{I_1}{I_0}$$

$$V_1 = V_0 \frac{I_1}{I_0}$$

$$M_2 = M_0 \frac{I_2}{I_0}$$

$$V_2 = V_0 \frac{I_2}{I_0}$$

c) $1 < \alpha < 10$ cas moyen.

Dans ce cas on considère que le linteau travaille comme la poutre dans la patique

e1) Etude des linteaux

Les efforts tranchants aux sections d'encastrement (les différents niveaux z) dans les linteaux sont données par :

$$T = V_0 \cdot m \cdot H \frac{\phi(\alpha, \xi)}{I}$$

Avec V_0 = Effort tranchant à la base du référent

ϕ est donné par les abaque en fonction α et $\xi = z/H_0$ (Fig B49 - Abaque utilisée dans le calcul des linteaux).

- c = demi-distance entre les centres de gravité des deux éléments de refend,
- a = demi-portée de l'ouverture,
- Π = effort tranchant dans le linteau (sous l'action du vent),
- N = effort normal dans chaque élément de refend (sous l'action du vent).

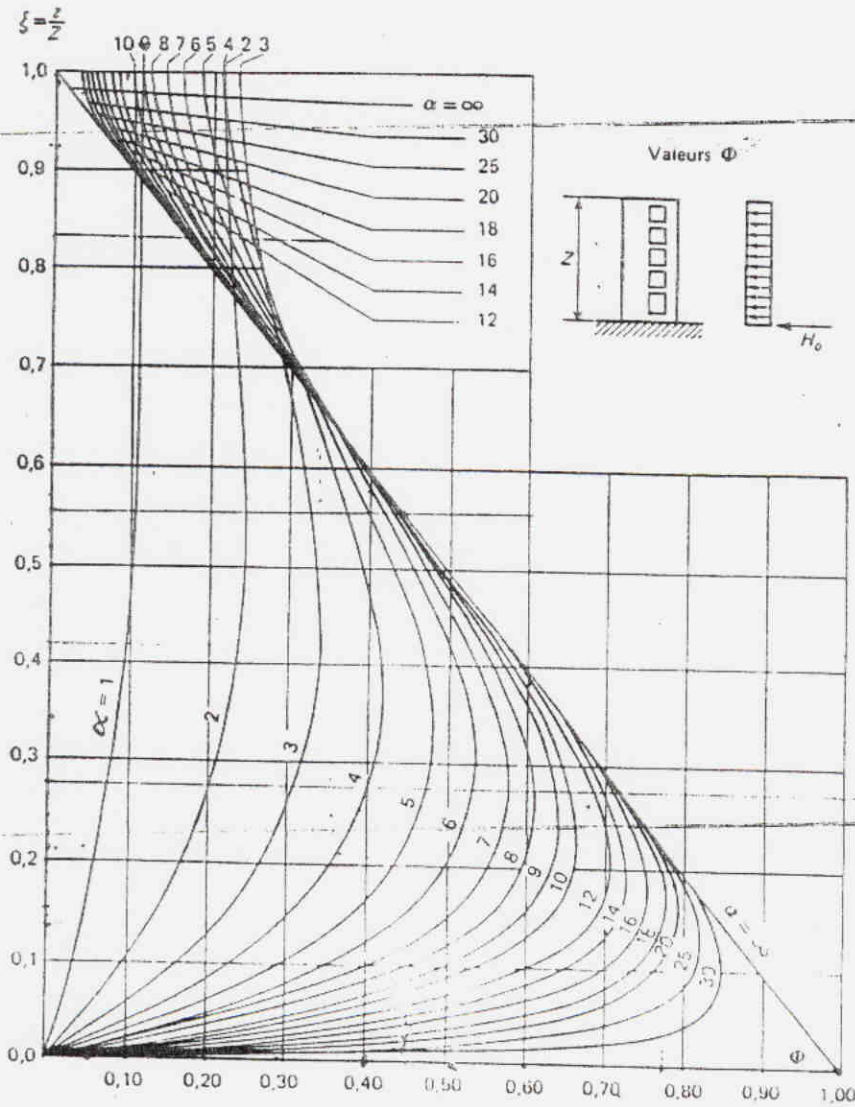


FIG. B.19 — Abaque utilisé dans le calcul des linteaux.

V 10/20

Exposé théorique

Le lecteur désireux de connaître les démonstrations des formules utilisées dans le calcul pratique est prié de consulter l'article mentionné ci-dessus [12]. L'objet de cet article est l'évaluation de deux coefficients, désignés par ϕ et Ψ , facilitant les études pratiques. Les abaques fournissant les valeurs de ϕ et Ψ sont présentées sur les figures B.19 et B.20. Un coefficient auxiliaire désigné par α peut être calculé directement.

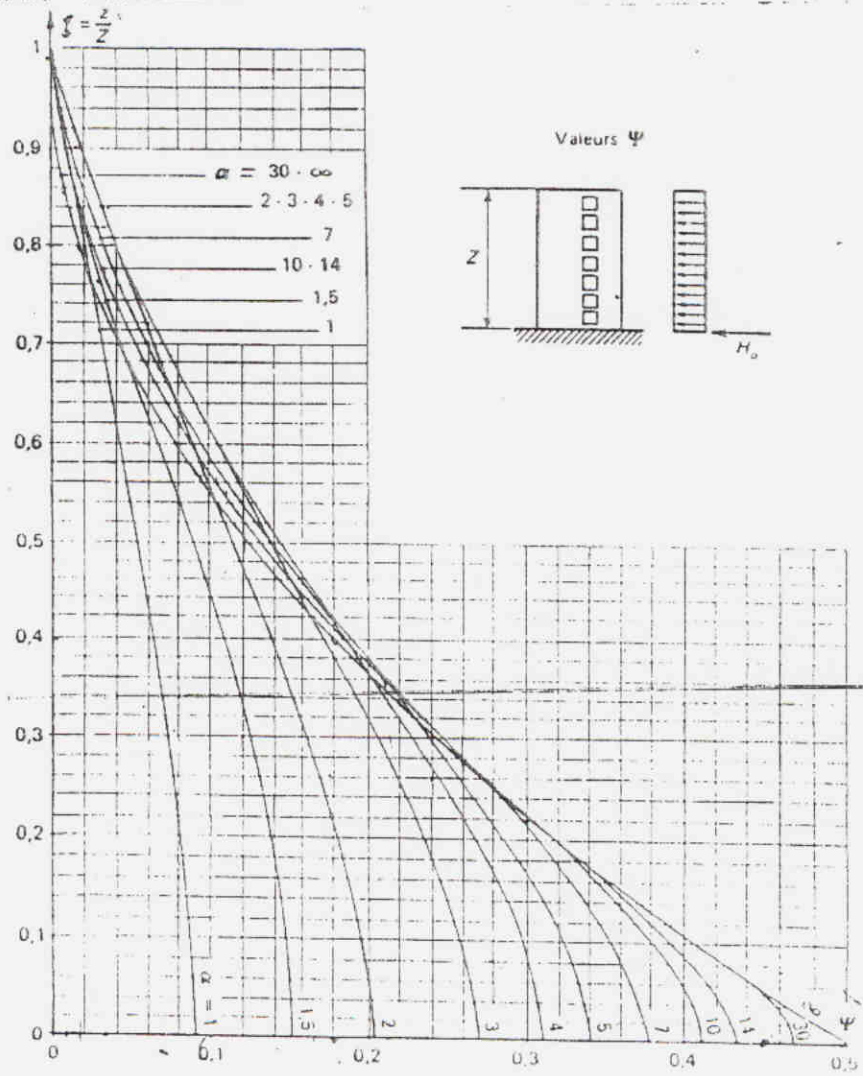


FIG. B.20 — Abaque utilisé dans le calcul des éléments de refend.

V 51/20

5 Voile à plusieurs files d'ouvertures.

La méthode utilisée pour le calcul des refends à une file d'ouvertures peut être généralisée dans le cas des refends à plusieurs files d'ouvertures. (voir Fig. B.25 - Refend à plusieurs files d'ouvertures).

La valeur $\alpha = w \cdot H_0$ est évaluée à partir de :

$$w^2 = \frac{6}{\sum I_i \cdot H} \cdot \sum \left(\frac{i_i \cdot C_i^2}{a_i^3} \right) = \frac{6}{(I_1 + I_2 + I_3 + I_4)H} \left[\frac{i_1 \cdot C_1^2}{a_1^3} + \dots + \frac{i_3 \cdot C_3^2}{a_3^3} \right]$$

On calcule ensuite pour la 1^{ère} série de linteau.

$$\pi_1 = V_0 \cdot H \cdot \frac{i_1 \cdot C_1}{2 a_1^3 \sum \left(\frac{i_i \cdot C_i^2}{a_i^3} \right)} \cdot \phi(\alpha, \beta)$$

de la même façon on calculera π_2 et $\pi_3 \dots \pi_i$

$$\pi_i = V_0 \cdot H \cdot \frac{i_i \cdot C_i}{2 a_i^3 \sum \left(\frac{i_i \cdot C_i^2}{a_i^3} \right)} \cdot \phi(\alpha, \beta)$$

Les forces axiales deviennent :

$$N_1 = \sum \pi_1$$

$$N_2 = \sum \pi_2 - \sum \pi_1$$

$$N_3 = \sum \pi_3 - \sum \pi_2$$

$$N_4 = \sum \pi_4$$

Les moments dans les éléments de refend sont évalués par la formule :

$$M_i = \frac{I_i}{\sum I} \cdot V_0 \cdot H_0 \cdot \left[\frac{(1-\beta)^2}{2} - \gamma(\alpha, \beta) \right]$$

V_0 = Effort tranchant à la base du refend

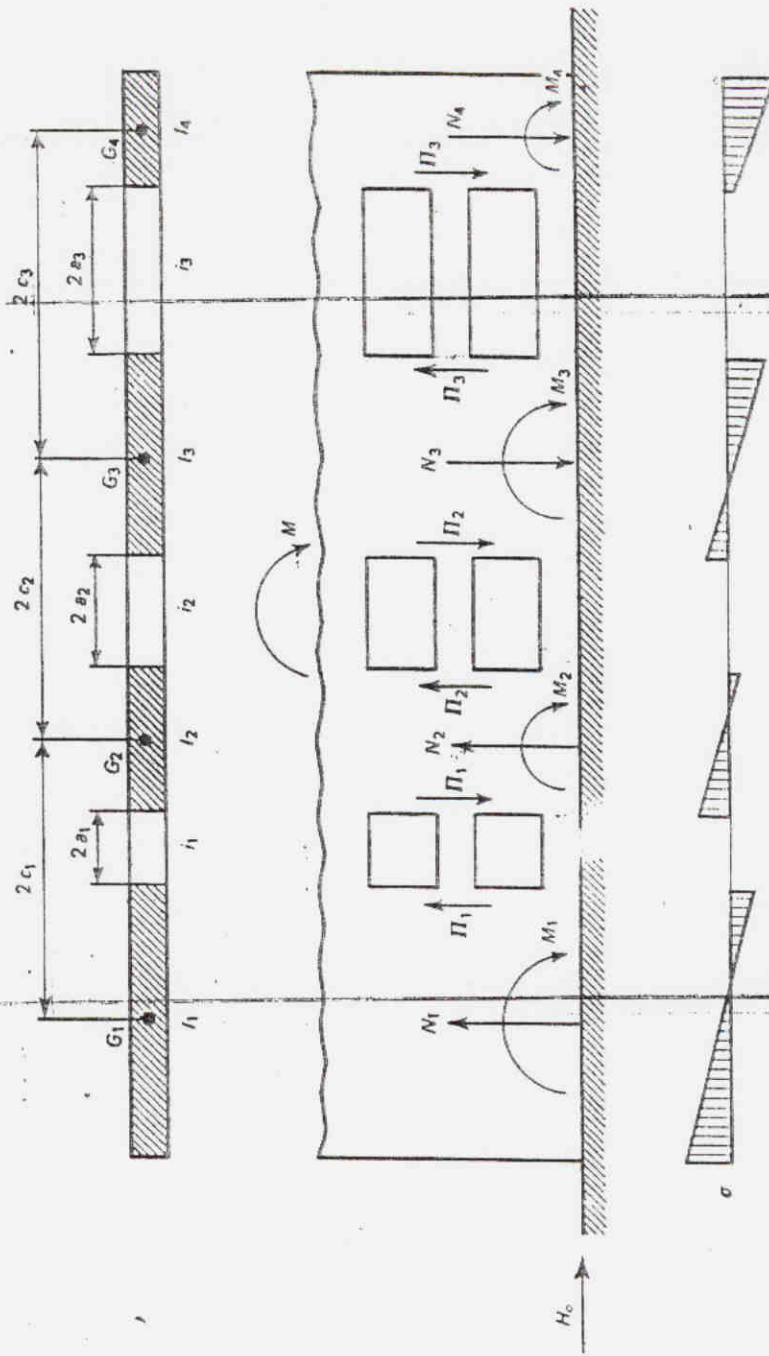


FIG. B.25 — Refend à plusieurs files d'ouvertures.

6. Conception et Vérifications.

6.1. Combinaisons d'action:

L'action sismique est considérée comme une action accidentelle. Les combinaisons d'actions à considérer pour la détermination des sollicitations et des déformations de calcul sont:

$$\begin{aligned} * & G + Q + E \\ * & 0,8 G \pm E \end{aligned}$$

6.2. Diagrammes contraintes - Déformations:

Les diagrammes contraintes - déformations à considérer sont ceux des règles Algériennes de Béton Armé CBA 93.

On vérifie que les sollicitations accidentelles agissantes sont inférieures ou égales aux sollicitations résistantes en prenant en compte les coefficients de sécurité partiels du béton et de l'acier les valeurs suivantes:

$$\begin{cases} \gamma_b = 1,15 \\ \gamma_s = 1 \end{cases}$$

sans oublier la ~~force~~ résistance de calcul $\sigma_b = \frac{0,85 f_{crs}}{\alpha \cdot \gamma_b}$

6.3. Contraintes limites de cisaillement dans les linteaux et les trumeaux.

La contrainte de cisaillement dans le béton est limitée à:

$$\tau_b \leq \bar{\tau}_b = 0,2 f_{crs}$$

$$\bar{\tau}_b = \frac{\bar{V}}{b_0 d} \text{ avec } \bar{V} = 1,4 \cdot V_{\text{calcul}}$$

avec aussi: b_0 = épaisseur du linteau ou du voile.
 d = hauteur utile = $0,9 \cdot h$
 h = hauteur totale de la section brute.

7. Ferraillage des Voiles.

7.1. Ferraillage des linteaux :

Les linteaux sont calculés en flexion simple comme les poutres (avec les efforts M et V). Ils comportent :

- * des aciers longitudinaux (A_t et A'_t)
- * des aciers transversaux \perp (A_t) et en diagonal (A_d)
- * des aciers de peau (A_c).

Pour le calcul de ferraillage des linteaux deux cas se présentent :

7.1.1. Premier cas : $\overline{\sigma}_b \leq 0,06 f_{c28}$

a) Aciers longitudinaux

Les aciers longitudinaux inférieurs A_t et supérieurs A'_t sont calculés par la formule :

$$A_t = A'_t \geq \frac{M}{z \cdot f_e}$$

avec $z = h - 2c'$ où h = hauteur totale du linteau
 c' = enrobage jusqu'au cdg des armatures.
 M = moment dû à l'effort tranchant ($\overline{V} = 1,4 V_{\text{calcul}}$).

b) Aciers transversaux :

Pour le calcul de la section d'armatures transversales A_t ainsi que leurs espacements s deux sous cas se présentent :

b1) Linteaux longs :

Les linteaux sont considérés comme de longues poutres dans le cas où $\overline{d}_g = \frac{l}{h} > 1$ où l = portée du linteau

Dans ce cas, l'espacement s devra rester inférieur ou égale à :

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

b2/ Linteaux courts :

Les linteaux sont considérés comme de courtes poutres dans le cas où

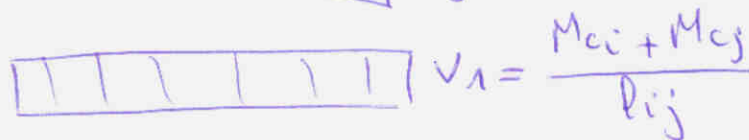
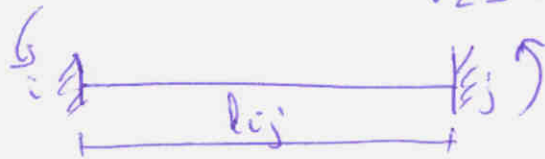
$$\lambda_y = \frac{l}{h} \leq 1$$

dans ce cas :

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

où $V = \text{Min}(V_1 \text{ et } V_2)$; $V_1 = \frac{M_{ci} + M_{cj}}{l_{ij}}$

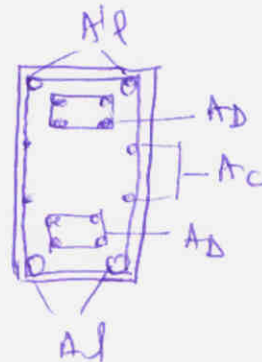
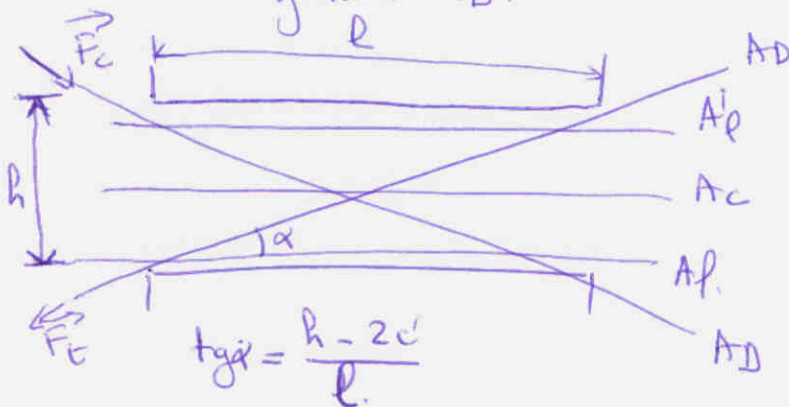
$V_2 = 2 \cdot V_{u \text{ calcul}}$



7.1.2 Deuxième cas : $\zeta_b \geq 0,06 f_{cr}$

Dans ce cas, il y a lieu de disposer les ferrillages longitudinaux (supérieurs et inférieurs), transversaux et de peau suivant les minimum réglementaires.

Les efforts (M, V) sont repris suivant des bielles diagonales (de compression et de traction) suivant l'axe moyen des armatures diagonales AD.



$$A_D = \frac{V}{2 \cdot f_e \cdot \sin \alpha} \quad \text{avec } V = V_{\text{calcul}} \text{ (sans majoration)}$$

7.1.3. Ferrailage minimal des linteaux:

a) Armatures longitudinales:

$$(A_t \text{ et } A'_t) \geq 0,0015 \cdot b \cdot h \quad (0,15\%)$$

b) Armatures transversales:

- pour $\bar{\sigma}_b \leq 0,025 f_{ctk} \rightarrow A_t \geq 0,0015 \cdot b \cdot s \quad (0,15\%)$

- pour $\bar{\sigma}_b > 0,025 f_{ctk} \rightarrow A_t \geq 0,0025 \cdot b \cdot s \quad (0,25\%)$

c) Armatures diagonales:

- pour $\bar{\sigma}_b \leq 0,06 f_{ctk} \rightarrow A_D = 0$

- pour $\bar{\sigma}_b > 0,06 f_{ctk} \rightarrow A_D \geq 0,0015 \cdot b \cdot h \quad (0,15\%)$

d) Armatures de peau:

$$A_c \geq 0,002 \cdot b \cdot h \quad (0,20\%)$$

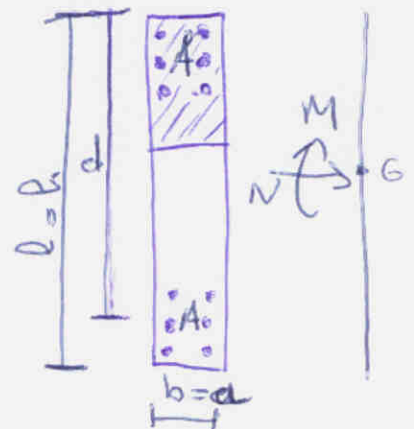
7.2. Ferrailage des Trumeaux:

Les trumeaux seront calculés en Flexion Composée avec Effort Tranchant.

Le calcul des trumeaux se fera exclusivement dans la direction de leur plan moyen en appliquant les règles classiques de Béton Armé (DTR-B.C.-2.41 "CBA93").

- Le calcul en Flexion Composée avec M et N permet de déterminer les Aciers verticaux.

- Le calcul en Effort Tranchant V permet de déterminer les aciers horizontaux.



7.2.1. Calcul et disposition des aciers verticaux

a/ Calcul:

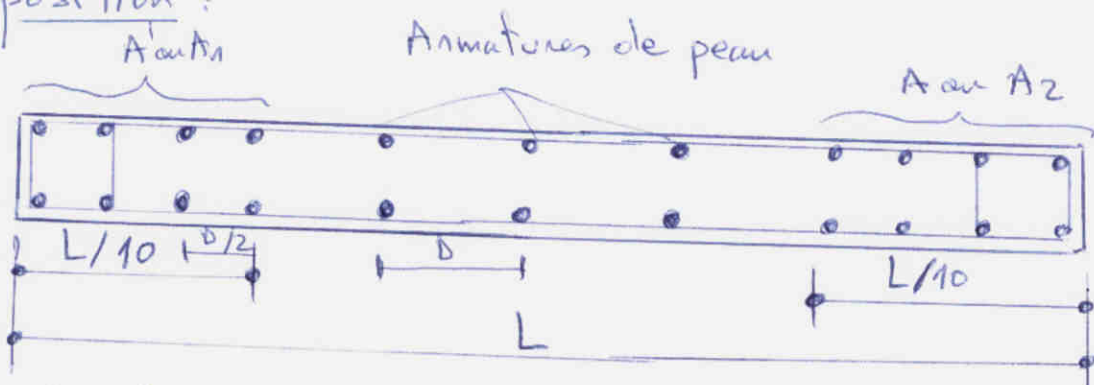
Le calcul de détermination des aciers verticaux se fera en flexion composée de la même manière que les poteaux, on pourra avoir donc, soit:

- * Une section entièrement tendue (peu probable).
- * Une section partiellement comprimée (probable)
- * Une section entièrement comprimée (très probable).

Si on admet la concentration des armatures comprimées dans la zone limitée à $L/10$ et la concentration des armatures tendues dans la zone limitée à $L/10$, on prendra dans ce cas, la hauteur utile d égale à $d = \frac{19L}{20}$.

Dans le cas de section partiellement comprimée, les armatures tendues A doivent rester au moins égale à 20% de la section tendue du béton.

b/ Disposition:



Une fois les nombres et diamètres des barres comprimées et tendues déterminées, on pourra connaître la valeur de la distance $D/2$ qui ne doit en aucun cas dépasser 15 cm ($\frac{D}{2} \leq 15 \text{ cm} \Rightarrow D \leq 30 \text{ cm}$).

Les barres verticales des zones extrêmes devraient être ligaturées avec des cadres horizontaux dont l'espacement ne doit pas être supérieur à l'épaisseur du voile.

7.2.2. Calcul et Disposition des aciers horizontaux :

a/ Calcul :

Des aciers horizontaux seront calculés et disposés dans le voile afin d'équilibrer l'effort tranchant.

Pour cela si on considère que A_t est connue :

$$A_t = 2 \cdot a_t = 2 \cdot \frac{\pi \phi_t^2}{4} \quad \text{avec } \phi_t = \text{diamètres des bords horizontaux}$$

on calcule alors l'espacement s_t des aciers horizontaux qui ne doit en aucun cas être supérieure à :

$$\frac{A_t}{b_0 \cdot s_t} \geq \frac{\gamma_s (\bar{\sigma}_u - 0,3 f_{tj} \cdot K)}{0,9 \cdot f_{et} (\cos \alpha + \sin \alpha)}$$

et avec $\alpha = 90^\circ$ on aura :
et $b_0 = a = \text{ép du voile}$.

$$\frac{A_t}{a \cdot s_t} \geq \frac{\gamma_s (\bar{\sigma}_u - 0,3 f_{tj} \cdot K)}{0,9 \cdot f_{et}} \Rightarrow$$

$$s_t \leq \frac{0,9 \cdot f_{et} \cdot A_t}{\gamma_s (\bar{\sigma}_u - 0,3 f_{tj} \cdot K)}$$

où f_{tj} = Contrainte de traction du béton

et $K = 1 + 3 \frac{\sigma_{cm}}{f_{tj}}$: en Flexion Composée avec compression avec
 $\sigma_{cm} = \frac{N}{B}$ (N = Effort Normal de Compression)

ou bien $K = 1 - 10 \frac{\sigma_{tm}}{f_{tj}}$: en Flexion Composée avec traction avec
 $\sigma_{tm} = \frac{N}{B}$ (N = Effort Normal de Traction),
et B = section totale du béton.

$$B = L \times a$$

b/ Disposition :

Les bords horizontaux doivent être munies de crochets à 135° ayant une longueur de 10ϕ . Dans le cas où il existe des talons de rigidité, les bords horizontaux devront être ancrés sans crochets si les dimensions des talons permettent la réalisation d'un ancrage droit.

7.2.3 Dispositions communes aux aciers verticaux et horizontaux du voile (trumeau):

- * Le % minimum d'armatures verticales et horizontales de trumeaux est donné comme suit:
 - Globalement dans la section du voile: 0,15%
 - En zone courante: 0,10%
- * L'espacement des bandes horizontales et verticales doit être inférieure à la plus petite des deux valeurs suivantes
$$s_h \text{ et } s_v \leq \text{Min} [1,5.a \text{ et } 30\text{cm}]$$
- * Les deux nappes d'armatures doivent être reliées avec au moins 4 épingles au mètre carré.
- * Dans chaque nappe, les bandes horizontales doivent être disposées vers l'extérieur.
- * Le diamètre des bandes verticales et horizontales des voiles (à l'exception des zones d'about) ne devrait pas dépasser $1/10$ de l'épaisseur du voile.
$$\phi_h \text{ et } \phi_v \leq \frac{a}{10}$$
- * Les longueurs de recouvrement doivent être égales à:
 - 40ϕ pour les bandes situées dans les zones où le renversement du signe des efforts est possible.
 - 20ϕ pour les bandes situées dans les zones comprimées sous l'action de toutes les combinaisons possibles de charges.