République Algérienne Démocratique Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abde Alhafid Boussouf Mila

Structures en Béton armé 2

Master 1 en Génie Civil (structure)

Mr. Taleb Hosni Abderrahmane

Année universitaire 2022-2023

Chapitre : Voiles

Structures en voiles :

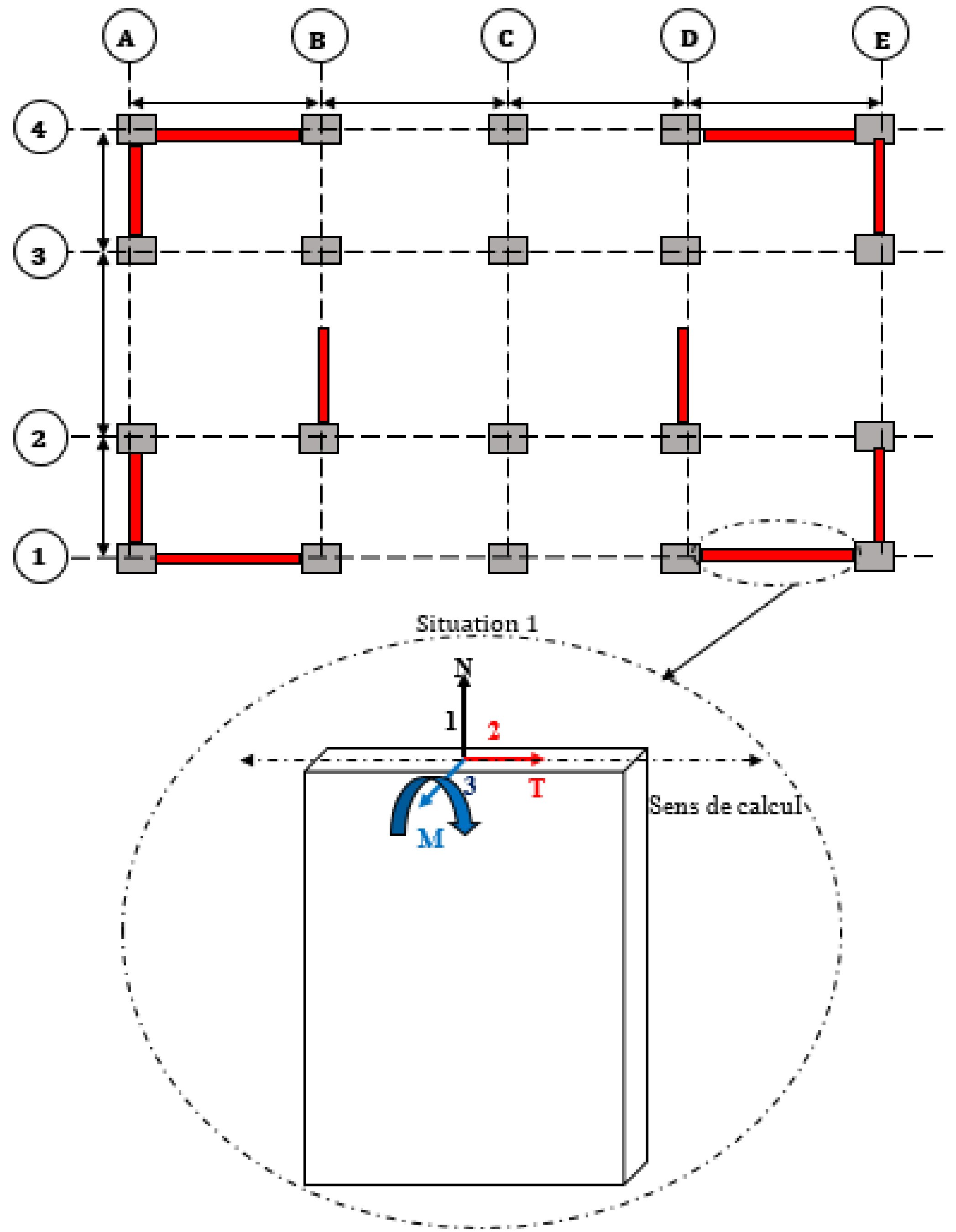
C'est une ossature constituée d'une série de murs porteurs, linéaires ou non, pleins ou comportant des ouvertures, liés entre eux par des planchers, capable de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales. Ces voiles assurent donc, d'une part le transfert des charges verticales (fonction « porteuse »), et d'autre part la stabilité sous l'action des charges horizontales (fonction « contreventement »).

Pour calculer le ferraillage des voiles il y a deux méthodes (Ferraillages des trumeaux)

1. Flexion composée

Les trumeaux seront calculés en **flexion composée** avec effort tranchant. Moyennant la satisfaction des conditions de **dimensionnement fixées** en **7.7.1 et la disposition de contreventement** en voiles dans deux directions orthogonales, le calcul des trumeaux se fera exclusivement dans la direction de leur plan moyen en appliquant les règles classiques de béton armé (**cf. DTR-B.C.-2.41 "CBA 93").**

Comme vous voyez avec même manière dans le cours de béton armé (les éléments ferrailler en flexion composée) cette méthode est très complexe et prend plus de temps manuellement


A
B
C
D
E
4
3
2
1
Situation 1
N
1
2
3
T
M
Sens de calcul

2. Méthode Simplifiée

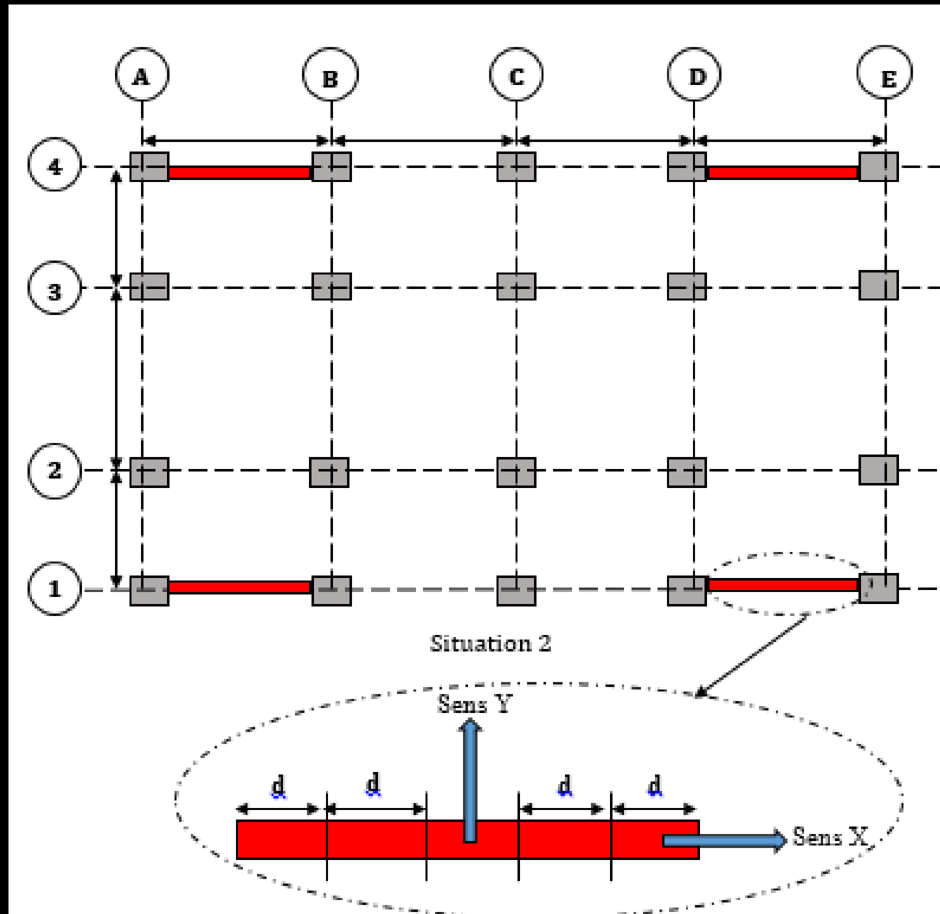
Si la deuxième condition n'est pas respectée, il y a lieu de faire le calcul de vérification dans les deux directions; Le calcul dans la deuxième direction (direction orthogonale à la direction du plan moyen) doit alors se faire en suivant les règles du DTR-B.C. 2.42 "**Règles de conception des parois et murs en béton**". Le calcul se fera dans ce cas pour des **bandes verticales** de largeur d: **d ≤min (h_e/2, 2l'/3)**

l' : étant la longueur de la zone comprimée.

h_e : étant la hauteur entre nus de planchers du trumeau considéré.

On devra disposer les ferraillages suivants:

- des aciers verticaux
- des aciers horizontaux



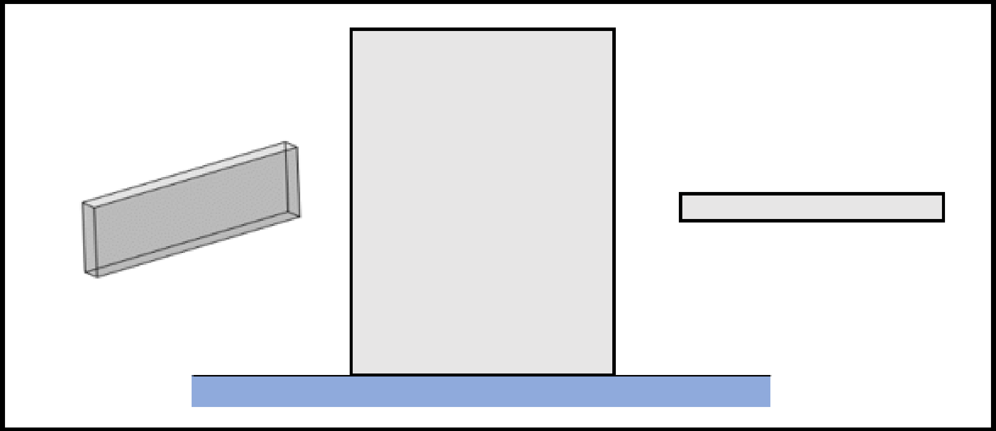
Cette méthode est basée sur l'hypothèse simplifiée de la théorie d'élasticité qui suppose les diagrammes des contraintes linéaires. On définit un voile par ces cordonnées ϑ et ϑ' du centre de gravité G, sa section (aire) *s*, son moment d'inertie (I) par rapport à son centre de gravité G.

Le voile est soumis à un effort normal ultime N_u et un moment fléchissent M_u avec un effort de tranchant V_u.

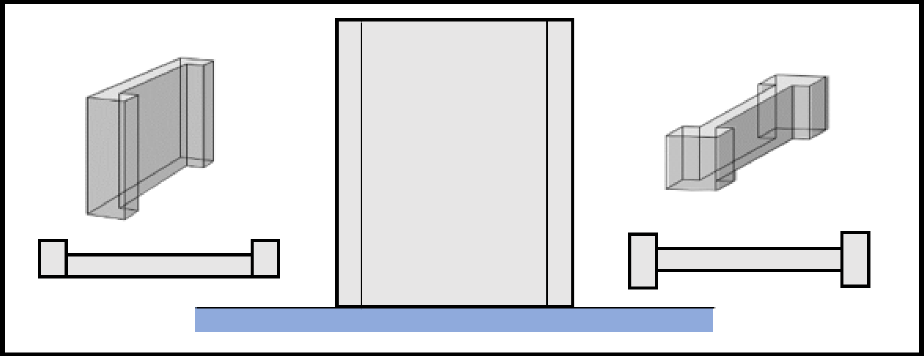
Types des Voiles

Il existe plusieurs types de voile : parmi eux nous avons en U en L, rectangulaire, en H …etc ; de toute façon ils sont schématisés comme suit :

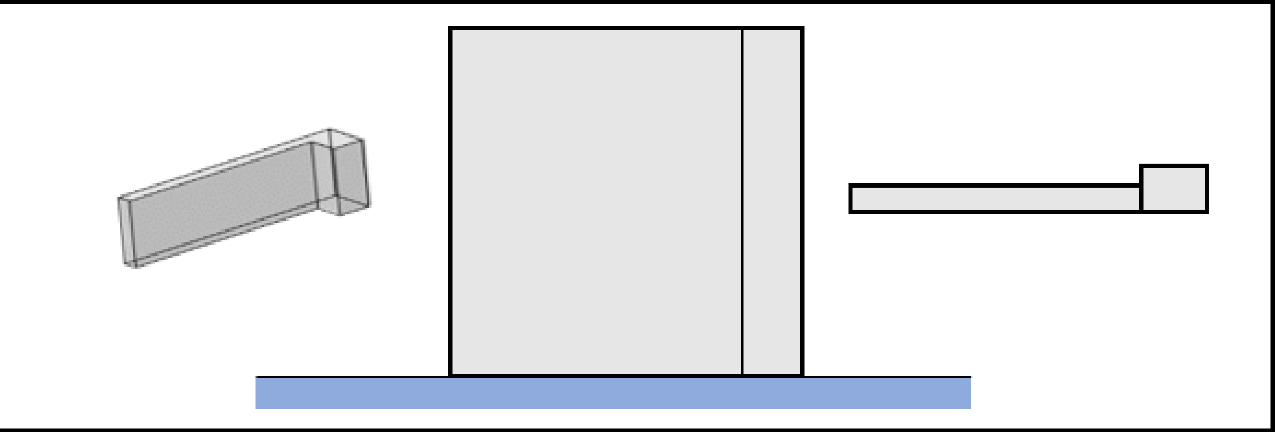
Rectangulaire



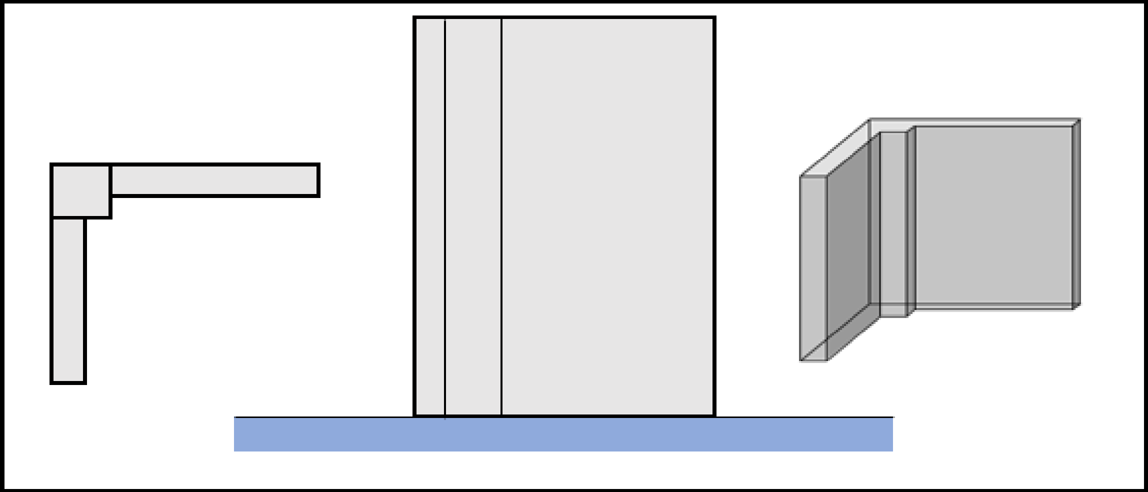
En U



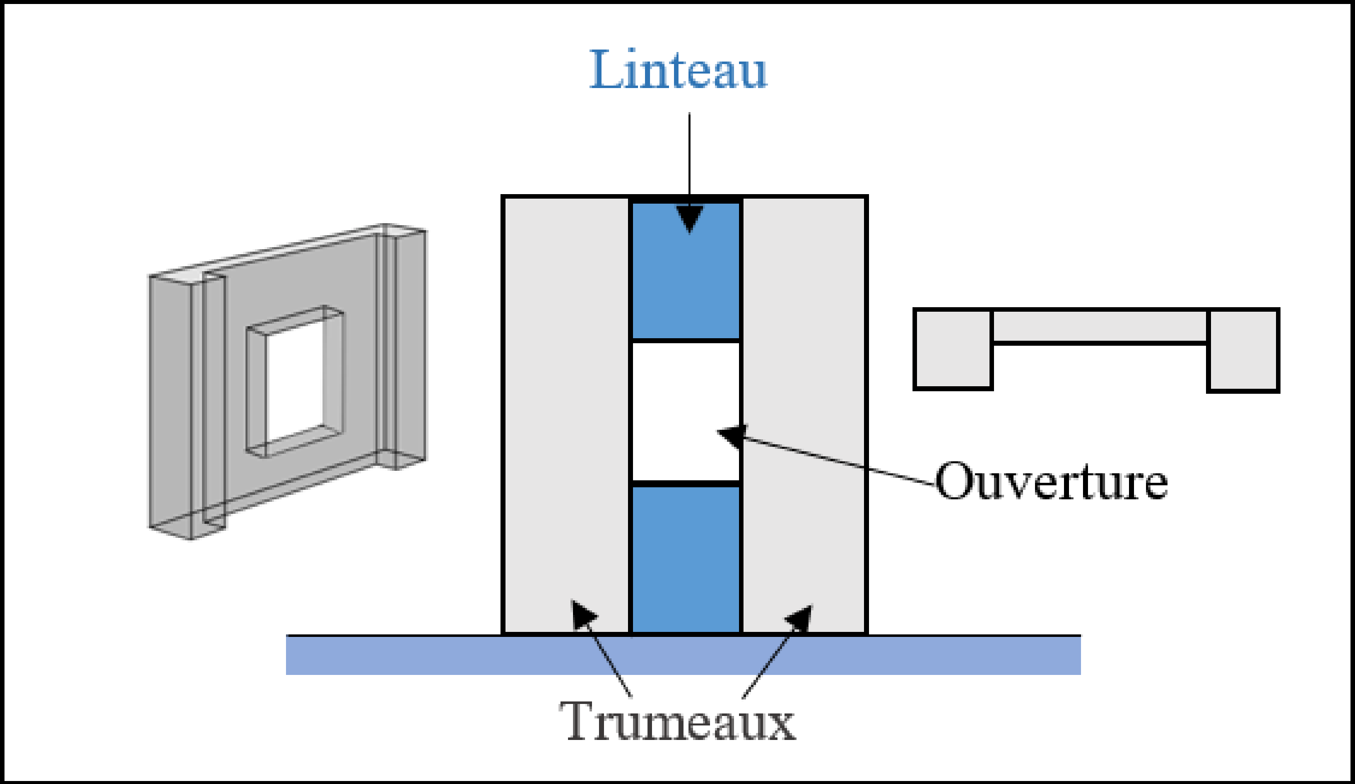
En H



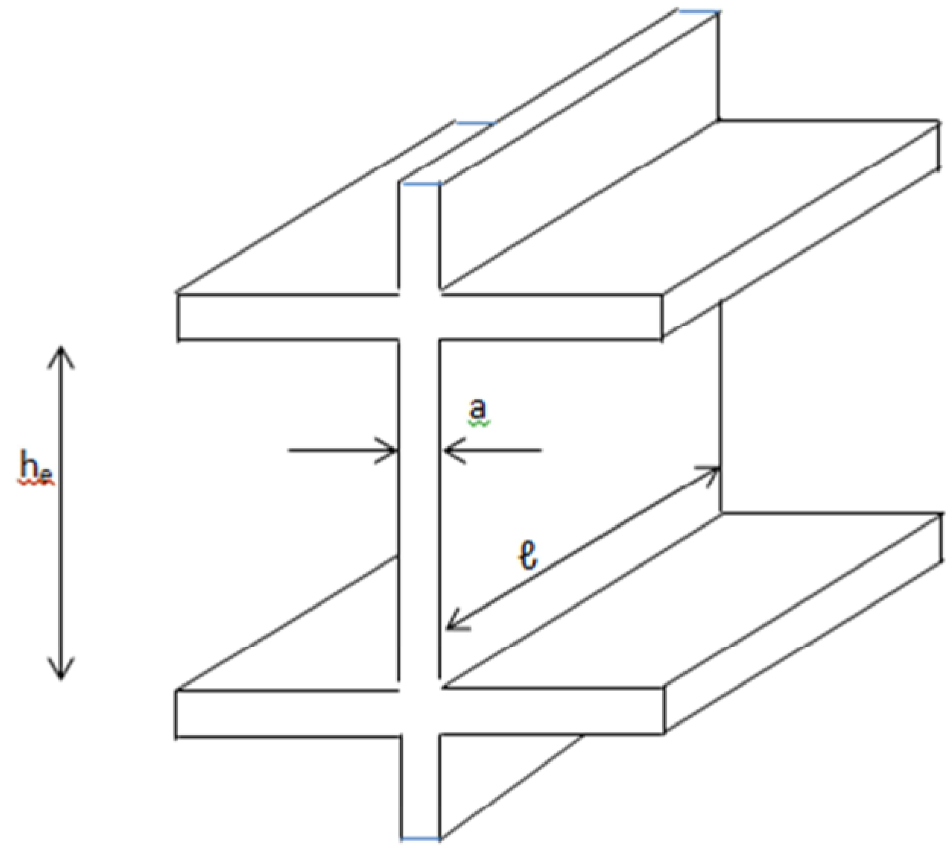
En L



Comme il existe des voiles pleins ; il existe aussi des voiles avec ouvertures que ce soit ces ouvertures sont circulaires ou rectangulaires qui nous donne la définition des trumeaux et des linteaux qui seront schématisées comme suit :



Dimensionnement



coupe schématique d’un voile

Longueur d'un voile

La longueur d'un voile de contreventement doit être au moins égale à quatre (04) fois son épaisseur :

$$\ell \geq 4a$$

Epaisseur d'un voile.

L'épaisseur d'un voile dépend de la hauteur d'étage et des conditions de rigidité aux extrémités. Il est à noter que l'épaisseur minimale est de 15 [cm]. On distingue trois (03) cas :

1° cas : voile rigidifié aux deux extrémités

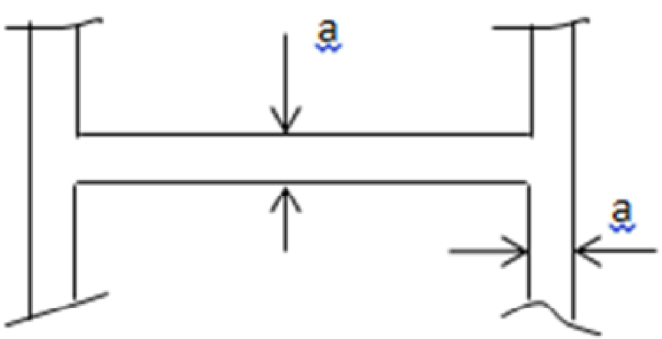


Figure 1.2 : voiles concourants

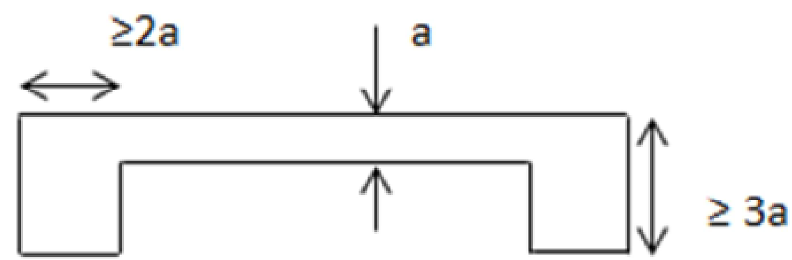


Figure 1.3 : Type profilé

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

2° cas : voile rigidifié d'un côté uniquement

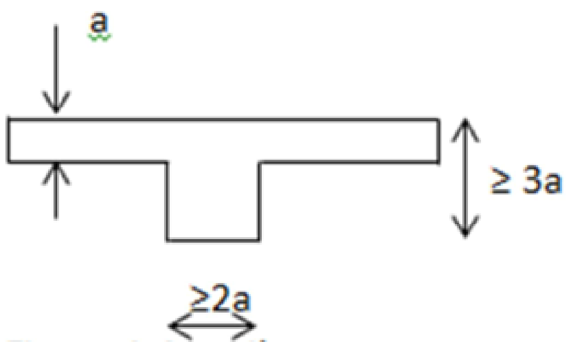


Figure 1.4 : voile avec un raidisseur d'un côté.

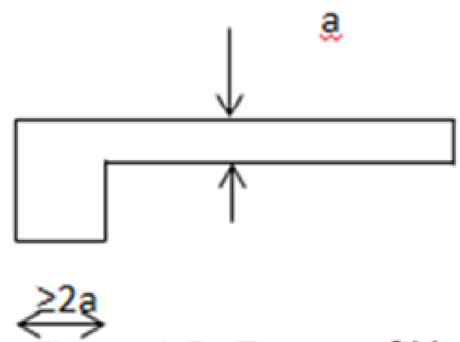


Figure 1.5 : Type profilé

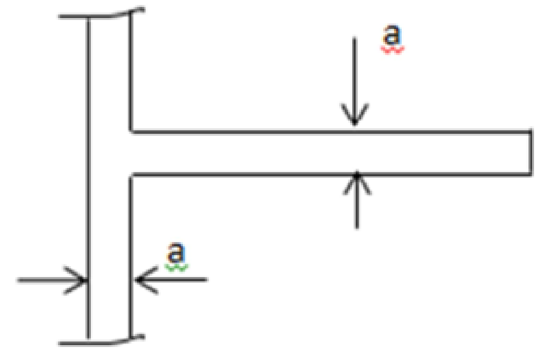


Figure 1.6 : voiles concourants

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

3° cas : voile linéaire (sans raidisseur)

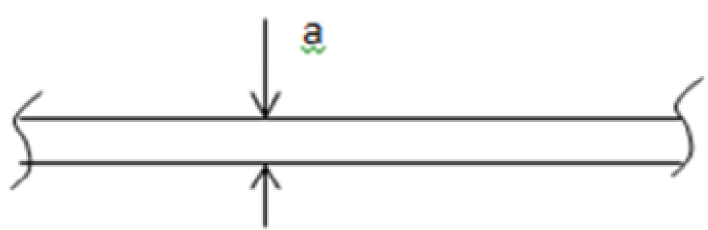
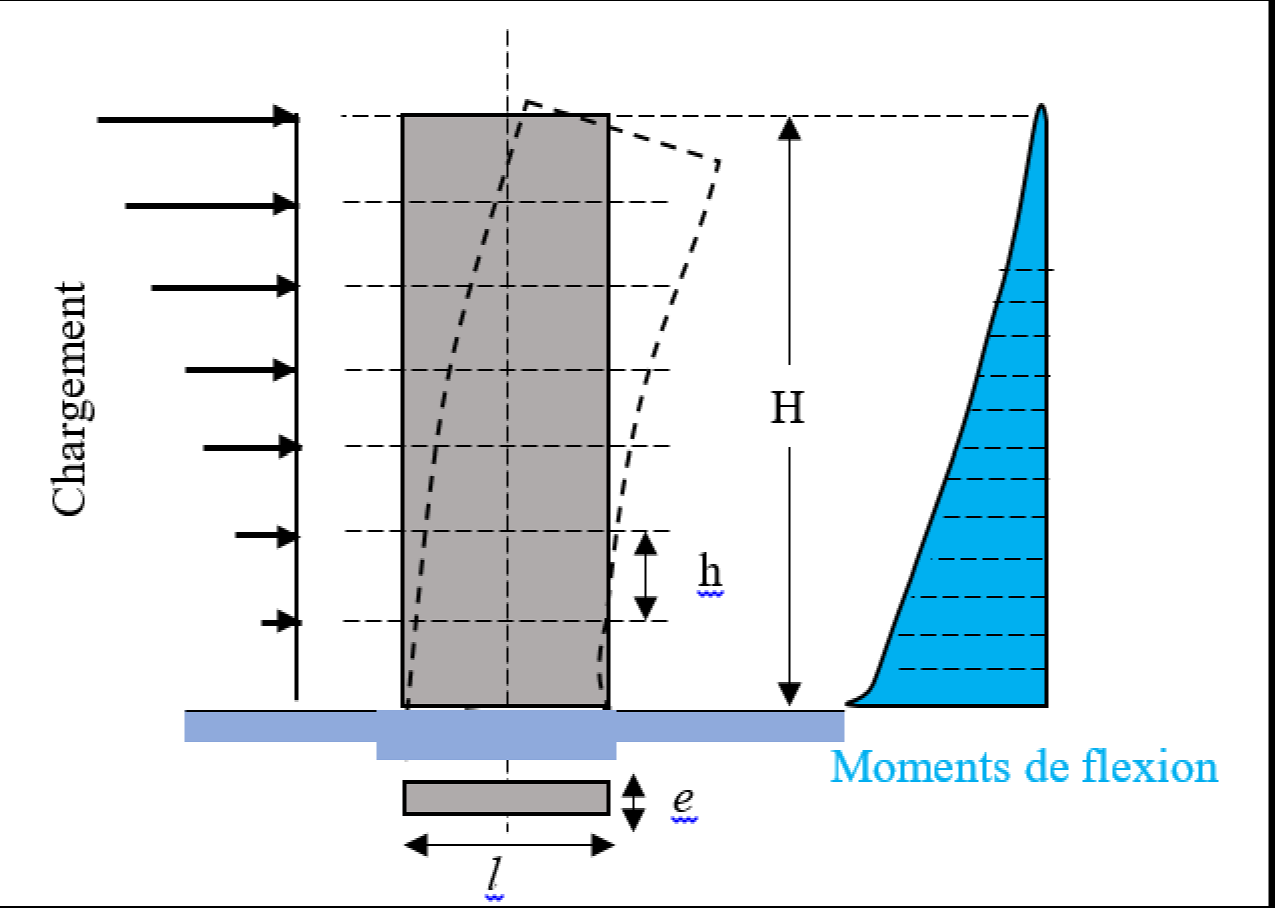
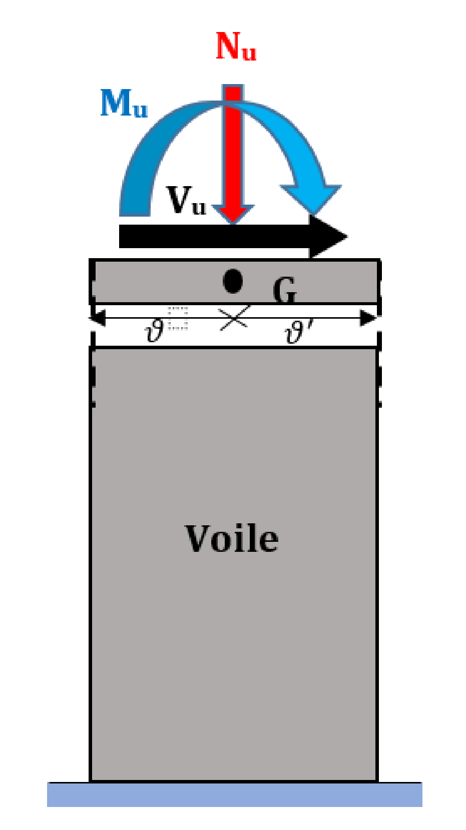


Figure 1.7 : voile linéaire

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

Le modèle le plus simple d'un voile est celui d'une console encastrée à sa base; soumise à un effort normal Nu effort tranchant Vu et un moment fléchissant Mu qui est maximal dans la section d'encastrement.





Le voile en béton armé doit faire l’objet des vérifications suivantes :

- Justification de la stabilité de forme (résistance au flambement).
- Résistance a l’effort tranchant.
- Résistance en flexion composée

Résistance des voiles au flambement :

Longueur de flambement :

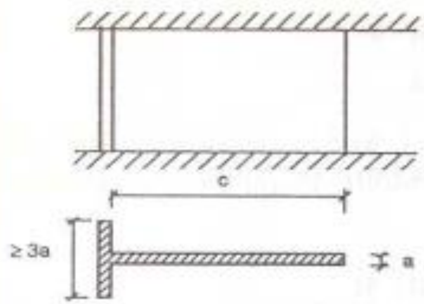
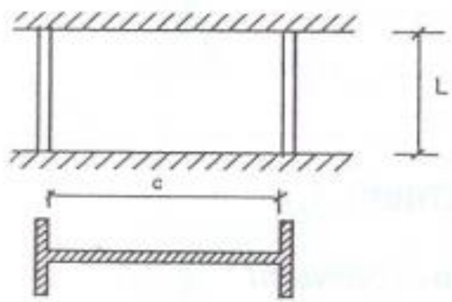
a- Voiles non raidis latéralement : La longueur de flambement est fonction de la hauteur libre du voile entre nus de plancher.

$l_f = 0,8.l$: voiles encastrés en tête et en pied avec un plancher de part et d'autre ;

$l_f = 0,85.l$: voiles encastrés en tête et en pied avec un plancher d'un seul coté ;

$l_f = l$: voiles articulés en tête et en pied.

Voiles raidis latéralement

Raidisseurs aux extrémités du voile		Longueur de flambement L_f (L'_f = valeur L_f calculée en 4.2.1 ci-dessus)	
		Voiles non armés horizontalement	Voiles armés horizontalement
1		*Si* $L'_f \leqslant 2{,}5\,c$ $L_f = \dfrac{L'_f}{1 + 0{,}08\left(\dfrac{L'_f}{c}\right)^2}$ *Si* $L'_f > 2{,}5\,c$ $L_f = \dfrac{5\,c}{3}$	*Si* $L'_f \leqslant 2{,}5\,c$ $L_f = \dfrac{L'_f}{1 + 0{,}16\left(\dfrac{L'_f}{c}\right)^2}$ *Si* $L'_f > 2{,}5\,c$ $L_f = \dfrac{5c}{4}$
2		*Si* $L'_f \leqslant c$ $L_f = \dfrac{L'_f}{1 + 0{,}5\left(\dfrac{L'_f}{c}\right)^2}$ *Si* $L'_f > c$ $L_f = \dfrac{2\,c}{3}$	*Si* $L'_f \leqslant c$ $L_f = \dfrac{L'_f}{1 + \left(\dfrac{L'_f}{c}\right)^2}$ *Si* $L'_f > c$ $L_f = \dfrac{c}{2}$

Effort de compression à l'état limite ultime (E.L.U) :

L'effort limite ultime $N_{u,lim}$ est donné par les formules suivantes :

- *<u>Dans le cas d'un mur non armé</u>* (A=0) ; $N_{u,lim} = \alpha.\frac{B_r}{0,9.\gamma_b}.f_{c28}$

Avec : B_r= d.(a – 2cm), $\alpha = 0,65/(1+0,2(\lambda/30)^2)$ et $\lambda = \frac{l_f}{\alpha}.\sqrt{12}$

d : longueur du mur ;

a : épaisseur du mur ;

f_{c28} : Résistance caractéristique du béton à 28 jours ;

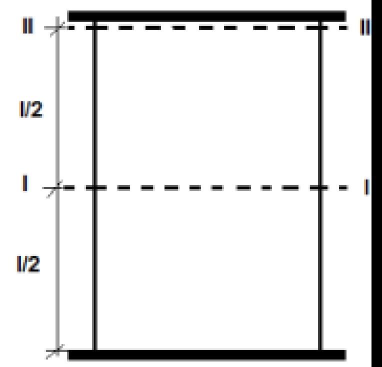
f_e : Limite élastique de l'acier.

- *Dans le cas d'un mur armé* (A # 0) ; $N_{u,lim} = \alpha.[\frac{B_r}{0,9.\gamma_b}.f_{c28} + A_s.\frac{f_e}{\gamma_s}]$

$\alpha = 0{,}85/(1 + 0{,}2(\lambda/35)^2)$ si $\lambda \leq 50$ et $\alpha = 0{,}60/(50/\lambda)^2$ si $50 \leq \lambda \leq 80$

Les valeurs de α sont à diviser par 1,10, si plus de la moitié des charges sont appliquée avant 90 jours. Si la majeure partie des charges est appliquée à un âge inférieur à 28 jours, on remplace f_{c28} par f_{cj} et α par α/1,20.

On déduit la contrainte limite ultime qui vaut : $\sigma_{u,lim} = \frac{N_{u,lim}}{a.d}$



Niveaux de vérification des contraintes dans le voile

Deux vérifications doivent être faites aux niveaux I et II du mur :

- Section I-I à mi-hauteur d'étage : $\sigma_n \leq \sigma_{u,lim}$
- Section II-II sous le plancher haut : $\sigma_n \leq \frac{\sigma_{u,lim}}{\alpha}$

En prenant en compte les contraintes dus aux charges venant des étages supérieurs. Il s'agit de vérifier pour chaque bande que la contrainte σ_u dans le mur à l'état limite ultime est inférieure ou égale à $\sigma_{u,lim}$ ou bien $N_u \leq N_{u,lim}$.

Dans la détermination de l'effortN_u, les charges verticales sont évaluées par l'application des lois de dégression des charges variables. En l'absence des charges concentrées, la contrainte normale ultime σ_u agissant sur une bande du mur de longueur d et d'épaisseur a, vaut :

$$\sigma_u = \frac{Nu}{a.d}$$

Il y a des méthodes pour calculer le ferraillage des voiles en Béton armé:

Méthode simplifie (méthode des contraintes), méthode de l'ACI 318 ; et la méthode par la flexion composée.

Dans ce qui suit nous présentant la méthode la plus simple pour le calcul des voiles en béton armé : la méthode des contraintes

Méthode simplifie :

Cette méthode est basée sur l'hypothèse simplifiée de la théorie d'élasticité qui suppose les diagrammes des contraintes linéaires. On définit un voile par ces cordonnées ϑ et ϑ' du centre de gravité **G,** sa section (aire) ***S,*** son moment d'inertie (I) par rapport à son centre de gravité G.
Le voile est soumis à un effort normal ultime N_u et un moment fléchissent M_u avec un effort de tranchant V_u.

On utilise ***l'équation de NAVIER*** on trouve :

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{A} \pm \frac{MV}{I}$$

En prenant en compte que :

N : Effort normal appliqué

M : Moment fléchissant exercé.

A : Section plane du voile.

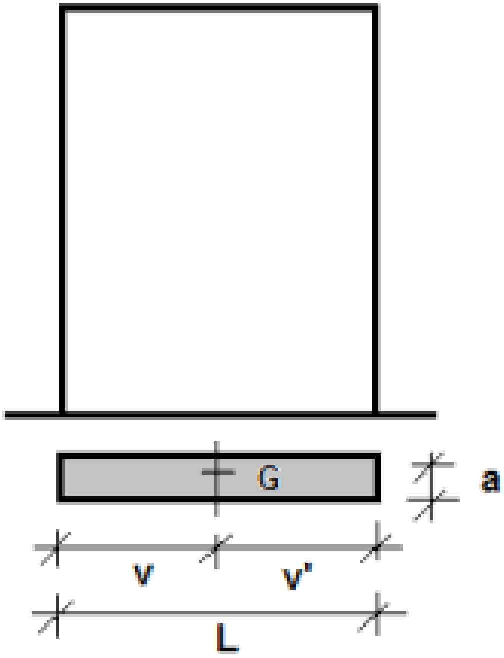
V : La distance entre le centre de gravité du voile et la fibre la plus éloignée.

I : Moment d'inertie de la section.

Il existe 3cas

Le voile est définie par :

- les coordonnées du centre de gravité G qui sont : v et v'
- la section (aire) : S
- le moment d'inertie : I
- la longueur : L



Le voile est soumis à un effort normal ultime N_u et un moment fléchissant M_u.

On définit le noyau central par les distances suivantes :

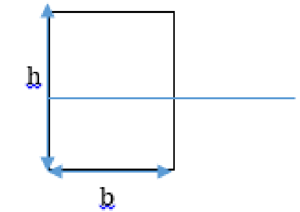
$$c = \frac{I}{S.v} \quad \text{et} \quad c' = \frac{I}{S.v'}$$

Dans le cas d'un voile de section rectangulaire de longueur L et d'épaisseur a, on aura :

$$S = a.L\,,\ I = \frac{a.L^3}{12}\,,\ v = v' = \frac{L}{2} \ \text{ et } \ c = c' = \frac{L}{6}$$

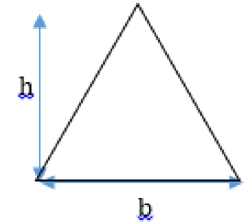
Moment d'Inertie I [cm^4] :

- **Rectangle ou carré**



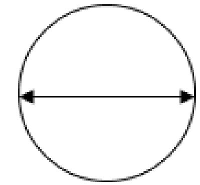
$$I = \frac{bh^3}{12}$$

- **Triangle**



$$I = \frac{bh^3}{36}$$

- **Cercle**



$$I = \frac{\pi D^4}{64}$$

Théorème de Huygens

Le moment d'inertie **I** de formes composées par des formes simple (rectangle, carré, et triangle)

$$I = \sum I_i + B_i\,\Delta_i^2$$

Δ_i^2: La différence entre la distance du centre de gravité de la forme (élément) totale et la distance de centre de gravité pour chaque élément simple ;

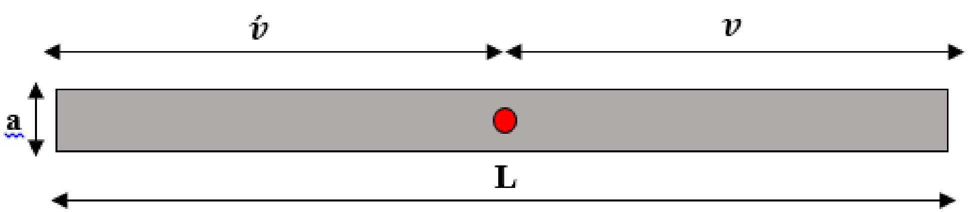
$\mathbf{B_i}$: section de chaque élément ;

$\mathbf{I_i}$: section de chaque élément.

Contraintes aux extrémités :

Selon les hypothèses de R.D.M, elles sont données par :

- Extrémité gauche : $\sigma_g = \frac{N_u}{S} + \frac{M_u}{I}.v'$
- Extrémité droite : $\sigma_d = \frac{N_u}{S} - \frac{M_u}{I}.v$

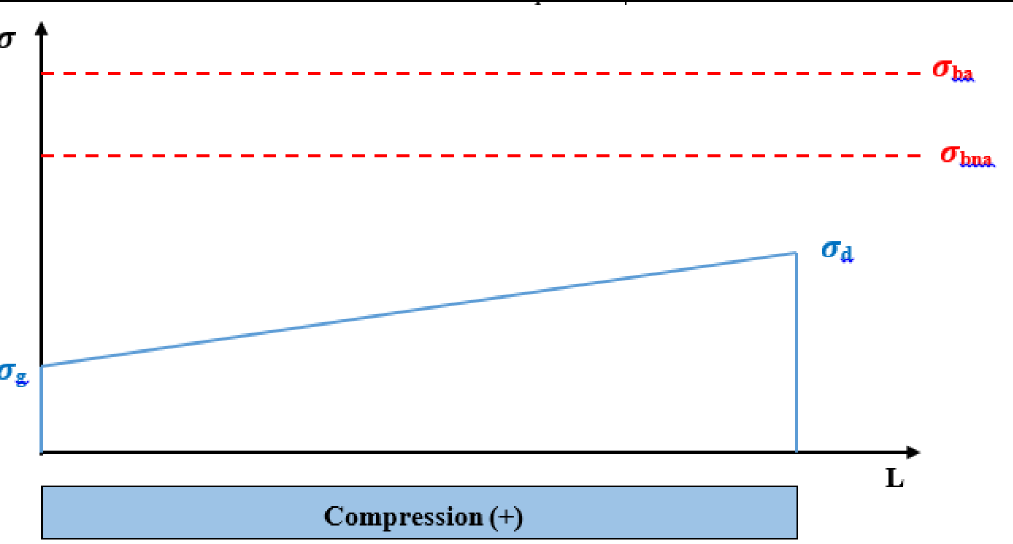


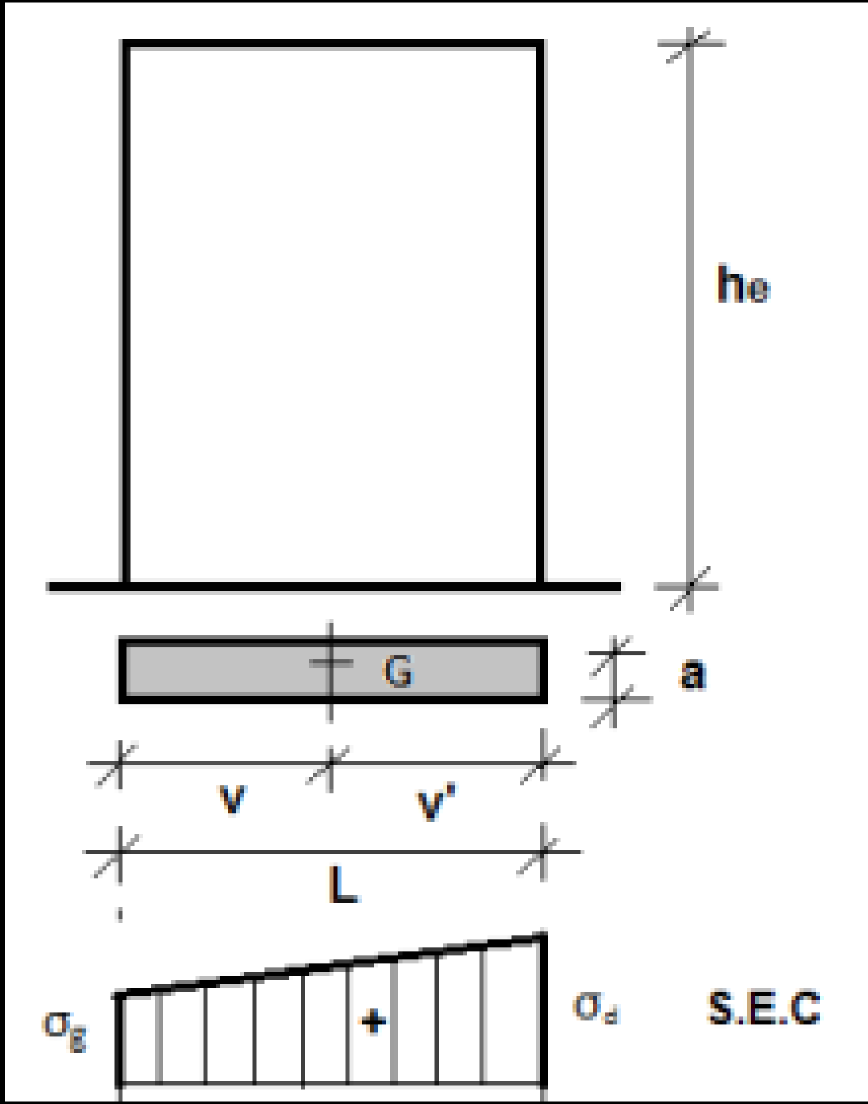
Contraintes extrêmes

On se trouve devant trois cas :

- *section entièrement comprimée, avec :*

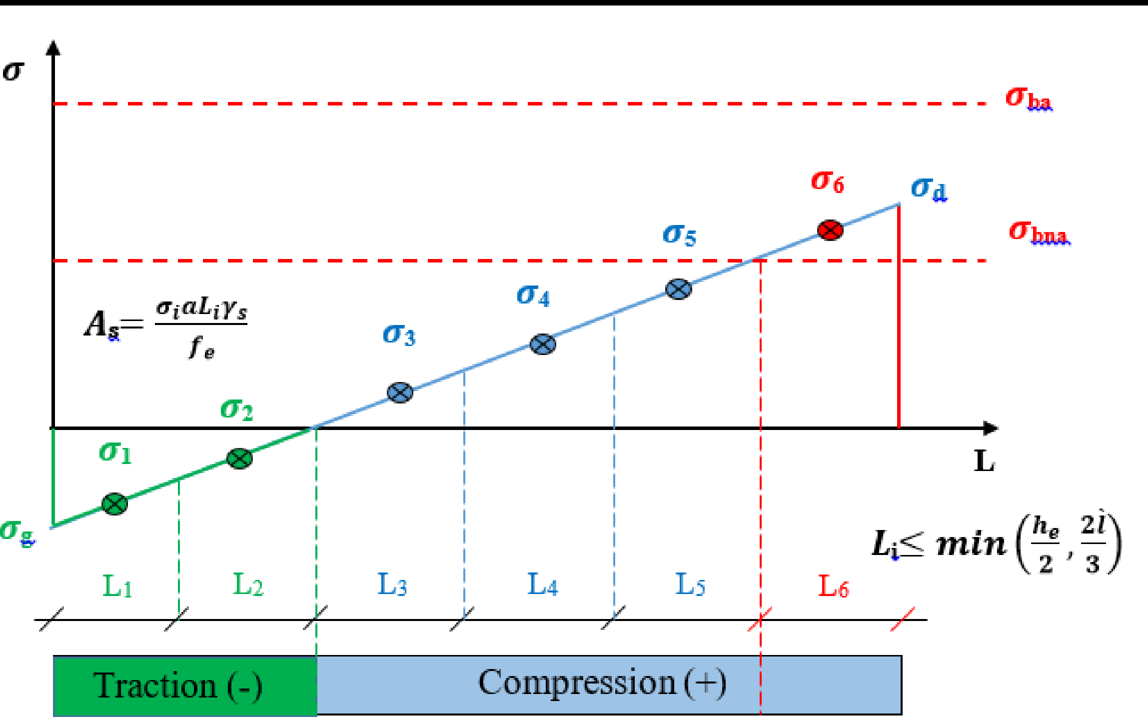
$$\sigma_g > 0 \quad \text{et} \quad \sigma_d > 0$$

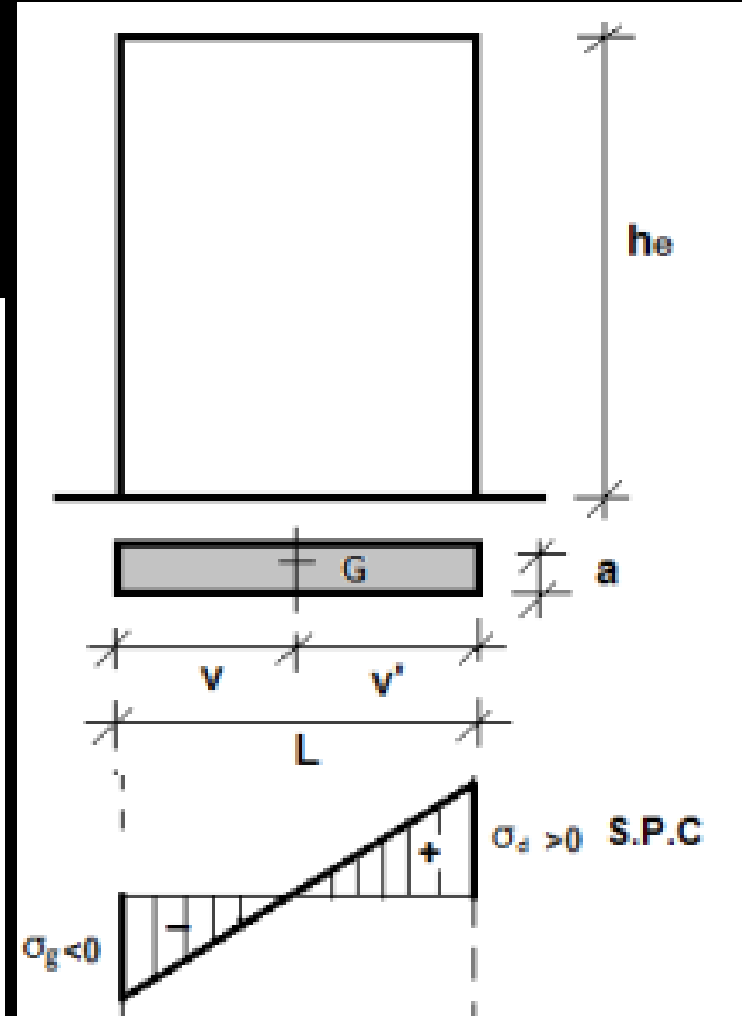




- *section partiellement tendue (comprimée):*

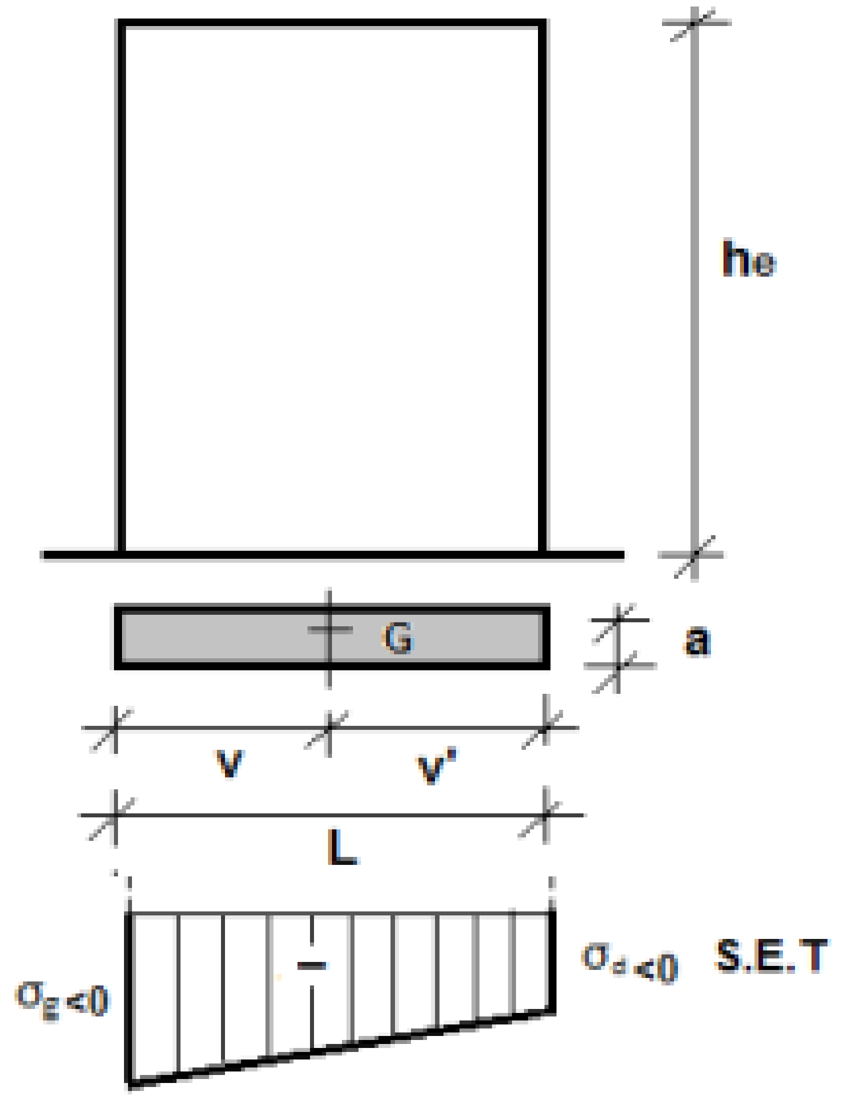
$\sigma_g < 0$ et $\sigma_d > 0$





- *section entièrement tendue :*

$\sigma_g < 0$ et $\sigma_d < 0$



Armatures verticales :

Les trumeaux sont calculés en flexion composé avec effort tranchant en appliquant les règles classiques du béton armé. Le calcul se fait par ***bandes verticales de largeur d***. Cette bande doit satisfaire la condition suivante :

$$d \leq \left(\frac{h_e}{2} ; \frac{2.l_c}{3}\right)$$

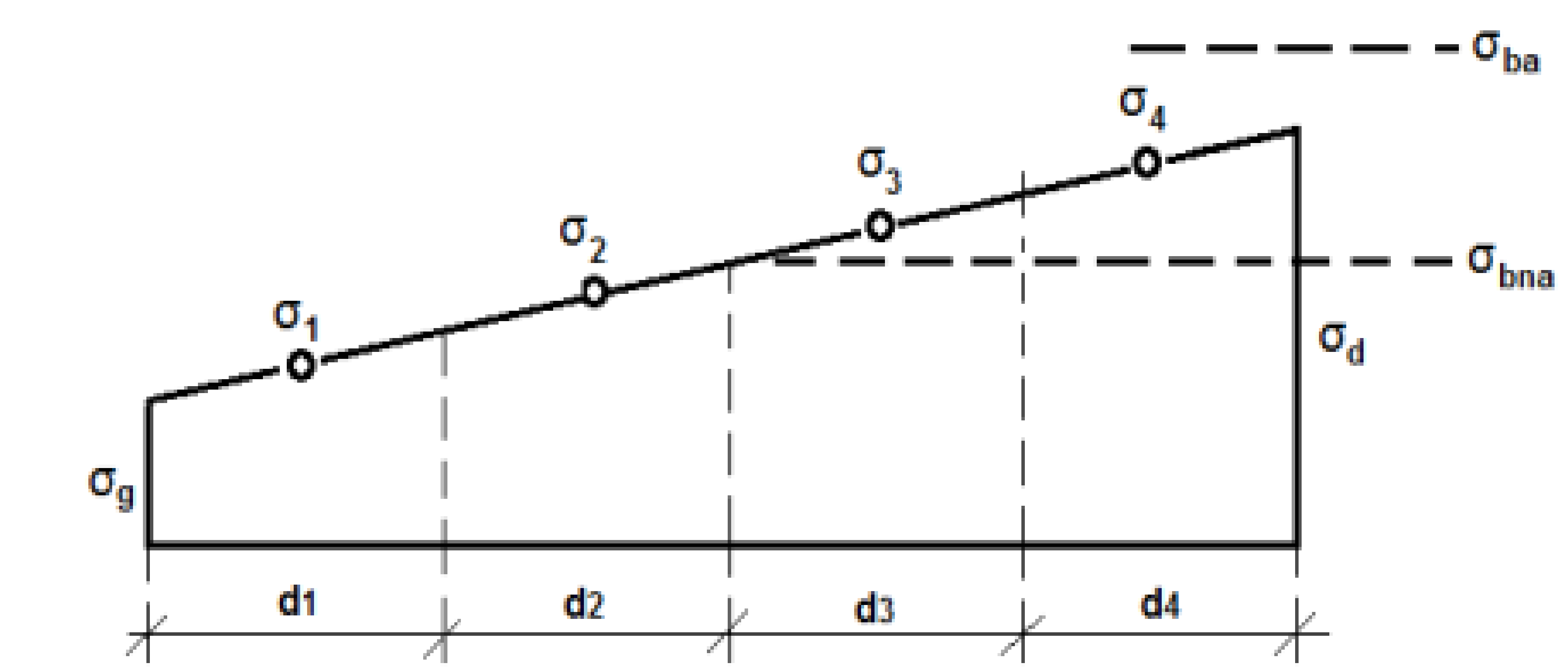
ou : l_c : longueur de la zone comprimée ;

h_e : Hauteur entre nus de planchers du trumeau considéré.

On doit disposer des armatures verticales et horizontales.

Cas d'une section entièrement comprimée :

D'après R.P.A 99/V.2003, on divise la bande comprimée en bandes de largeur d_i comme définie précédemment.



- Si la contrainte moyenne σ_d d'une bande est inférieure à σ_{bna} , on ne dispose pas d'armatures de compression.
- Si $\sigma_d \geq \sigma_{bna}$, soit on détermine les armatures de compression ou on augmente les dimensions du voile.

La section des armatures verticales A_{sv} est déterminée comme étant une section sous compression simple, on utilise la relation donnée précédemment :

$$N_u \leq N_{u,lim}$$

N_u : résultante des efforts de compression définie dans le diagramme précédant sur une bande d_i .

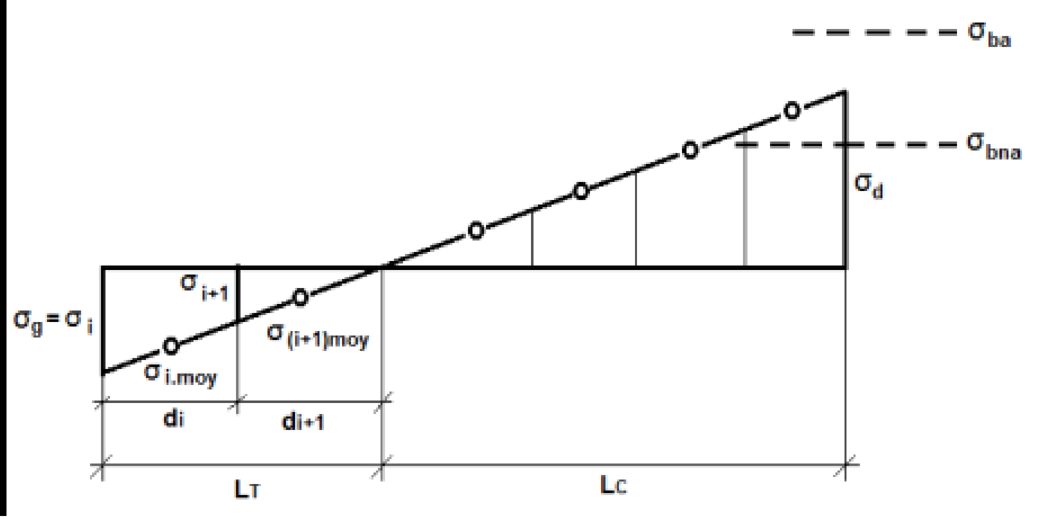
$$N_{u,lim} = \alpha.[\frac{B_r}{0{,}9.\Upsilon_b} \cdot f_{c28} + A_S.\frac{f_e}{\gamma_s}].$$

D'où la section d'armatures comprimées nécessaires :

$$A_{sv} = \alpha.[\frac{N_u}{\alpha} - \frac{B_r}{0{,}9.\Upsilon_b} \cdot f_{c28}].\frac{\Upsilon_s}{f_e}.$$

Cas d'une section partiellement comprimée :

- Pour la partie comprimée, on utilise les mêmes étapes décrites pour une section entièrement comprimée.
- Pour la partie tendue de longueur L_T, on la divise en des bandes d_i comme le montre la figure ci-dessous. Pour chaque bande correspond deux contraintes $\boldsymbol{\sigma_i}$ et $\boldsymbol{\sigma_{i+1}}$ ainsi, on calcule la contrainte moyenne de traction pour chaque bande et qui vaut $(\boldsymbol{\sigma_i} + \boldsymbol{\sigma_{i+1}})/2$.



Aciers verticaux :

Soit L_T la longueur de la zone du béton tendu, en supposant un diagramme linéaire des contraintes.

$$L_T + L_C = \mathrm{L} \quad \text{et} \quad \frac{\sigma_g}{L_T} = \frac{\sigma_d}{L_C} \Rightarrow L_C = \frac{\sigma_d}{\sigma_g} . L_T \text{ ; donc :}$$

$$L_T + \frac{\sigma_d}{\sigma_g} . L_T = \mathrm{L} \Rightarrow L_T .(1+\frac{\sigma_d}{\sigma_g}) = \mathrm{L} \Rightarrow L_T .(\sigma_g + \sigma_d)/\sigma_g = \mathrm{L} \Rightarrow \boldsymbol{L_T} = \frac{\boldsymbol{L.\sigma_g}}{(\boldsymbol{\sigma_g} + \boldsymbol{\sigma_d})}$$

<u>D'une façon générale</u>, pour une bande d_i la résultante des forces de traction N_T est donnée par :

$$N_T = (\sigma_{i.} + \sigma_{i+1.})/2.(a.d_i)$$

Et de la condition de non fragilité d'une section tendue, on détermine les armatures tendues pour la bande d_i.

$A_v.\sigma_s = N_T$; ou σ_s est la contrainte des armatures tendues $(=\frac{f_e}{\Upsilon_s})$.

La section d'armatures tendues pour un bande d_i est donnée par :

$$A_v = \frac{N_T}{\sigma_s} = N_T/(\frac{f_e}{\Upsilon_s})$$

⇒ ***Exigences du code R.P.A 99/V.2003 (pour les aciers verticales) :***

- Espacement maximal entre axes des armatures S_v :

$$S_v \leq \text{min.}(\ 30\ \text{cm}\ ;\ 1{,}5.\text{a}\ )$$

- Pourcentage minimal d’aciers ρ_v :

$$\rho_v = \frac{A_{sv}}{a.d} \geq 0{,}2\%$$

Aciers horizontaux :

La section d'aciers horizontaux est donnée par la formule suivante :

$$A_h = \frac{2}{3}.A_v$$; ou A_v est la section des aciers tendus.

On vérifie dans ce cas la contrainte tangentielle :

$$\tau_b = \frac{\bar{V}}{d.b_0} \leq \bar{\tau}_b$$; ou :

b_0 : Épaisseur du trumeau ;

d : hauteur utile qui est prise égale à 0,9.h ; et h : hauteur totale.

⇒ ***Exigences du code R.P.A.99/V.2003 pour les aciers horizontaux :***

- Espacement maximal entre axes des barres S_h :

$$S_h \leq \text{min.}(30 \text{ cm} \; ; \; 1{,}5.\text{a})$$

- Pourcentage minimal d'aciers ρ_h :

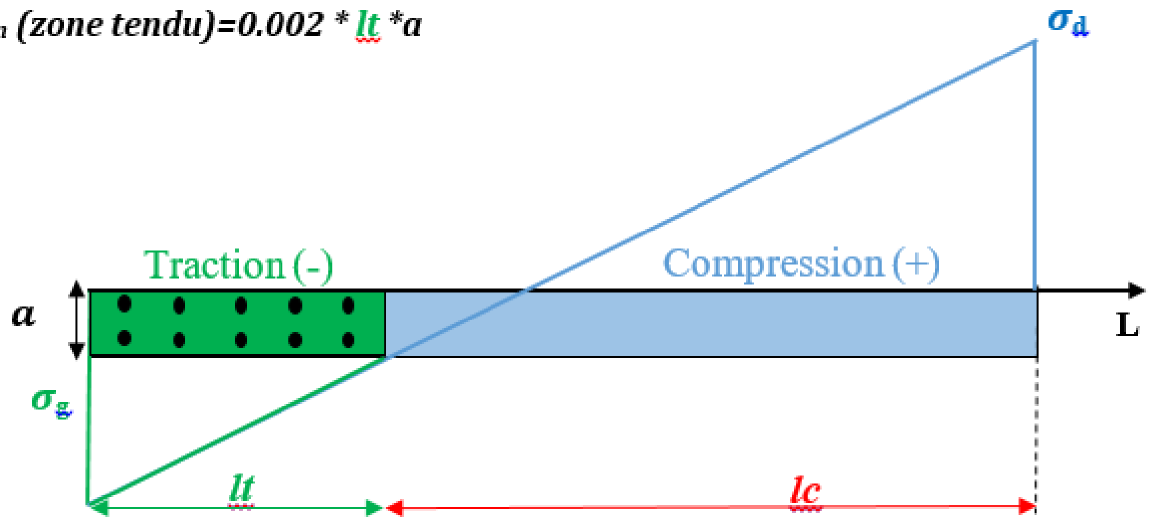
$$\rho_h = \frac{A_h}{100.a} \geq \text{max.}\left(\frac{2.\rho_{v,max.}}{3} \; ; \; 0{,}15\%\right)$$

$\rho_{v,max.}$= le % des armatures verticales de la bande la plus armée.

Aciers verticaux :

Lorsqu'une partie du voile est tendue sous l'action des forces verticales et horizon- tales, l'effort de traction doit être pris en totalité par les armatures, le pourcentage minimum des armatures verticales sur toute la zone tendue est de 0.20%

A_{min} (zone tendu)=0.002 * lt *a



Règles communes:

Le pourcentage minimum d'armatures verticales et horizontales des trumeaux, est donné comme suit:

- Globalement dans la section du voile 0,15%

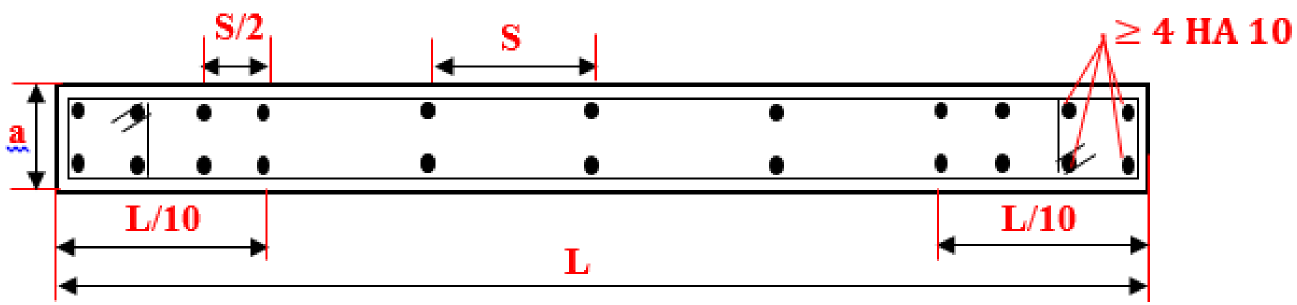
- En zone courante 0,10%

L'espacement des barres horizontales et verticales doit être inférieur à la plus petite des deux (2) valeurs suivantes:

- $s \leq 1{,}5\ a$
- $s \leq 30$ cm

Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles (à l'exception des zones d'about) ne devrait pas dépasser 1/10 de l'épaisseur du voile

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.



XII.2.2.4. Pourcentage minimum d'armatures :

Le pourcentage minimum d'armatures verticales et horizontales des trumeaux est donnée par le **RPA99/ ver 2003 (art7.7.4.3)** et le **BAEL91** comme suit:

- Globalement dans la section du voile : $\boldsymbol{A_g \geq 0,15\ \%\ b_0.h}$
- En zone courante : $\boldsymbol{A_c \geq 0,10\ \%\ b_0.h}$
- Section totale d'armatures verticales de la zone tendue : $\boldsymbol{A_t \geq 0,20\ \%\ b_0.h_t}$

XII.2.2.5. Dispositions constructives :

Les dispositions constructives réglementaires relatives aux choix et à la mise en place des armatures des voiles sont contenues dans **l'article 7.7.4.1 et 7.7.4.3 du RPA99/Ver 2003** et sont données comme suit :

- L'espacement **"S"** des barres horizontales et verticales doit être :

$S \leq \min(1{,}5a\ ;30cm\ )$ Avec: a = épaisseur du voile.

Espacement (DTR B.C 2.42)

La distance maximale entre axes des armatures horizontale et verticale d'une même face ne doit pas dépasser **25 cm**.

RPA99 v.2003

Contraintes limites de cisaillement dans les linteaux et les trumeaux

En addition aux spécifications du paragraphe 7.3, la contrainte de cisaillement dans le béton est limitée comme suit:

$$\tau_b \leq \bar{\tau}_b = 0.2 f_{c28}$$

où :

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

$$\text{Avec } \bar{V} = 1.4\, V_{u\ calcul}$$

b_0: épaisseur du linteau ou du voile

d: hauteur utile = 0,9h

h: hauteur totale de la section brute

Règlements algériens

DTR B-C 2.48: RPA99 v.2003

C.B.A 93: règles de conception et de calcul des Structures en béton armé

DTR B-C. 2.42: Règles de conception et de calcul Des parois et mur en béton banché

Merci de votre attention