

6. EXEMPLE DE CALCUL : MUR DE REFEND D'UN BÂTIMENT D'HABITATION

6.1. DESCRIPTION

Il s'agit d'un bâtiment comportant 8 niveaux (7 étages au-dessus du rez-de-chaussée, fig. 4.58).

Ce bâtiment possède une surface au sol de 22 m x 10,55 m. Sa hauteur au-dessus du sol est de 25m. Il est situé en région II, site normal. La résistance caractéristique du béton est $f_{c28} = 30$ MPa.

On suppose que plus de la moitié des charges est appliquée après 90 jours ($k = 1$ voir 5.3,3,3).

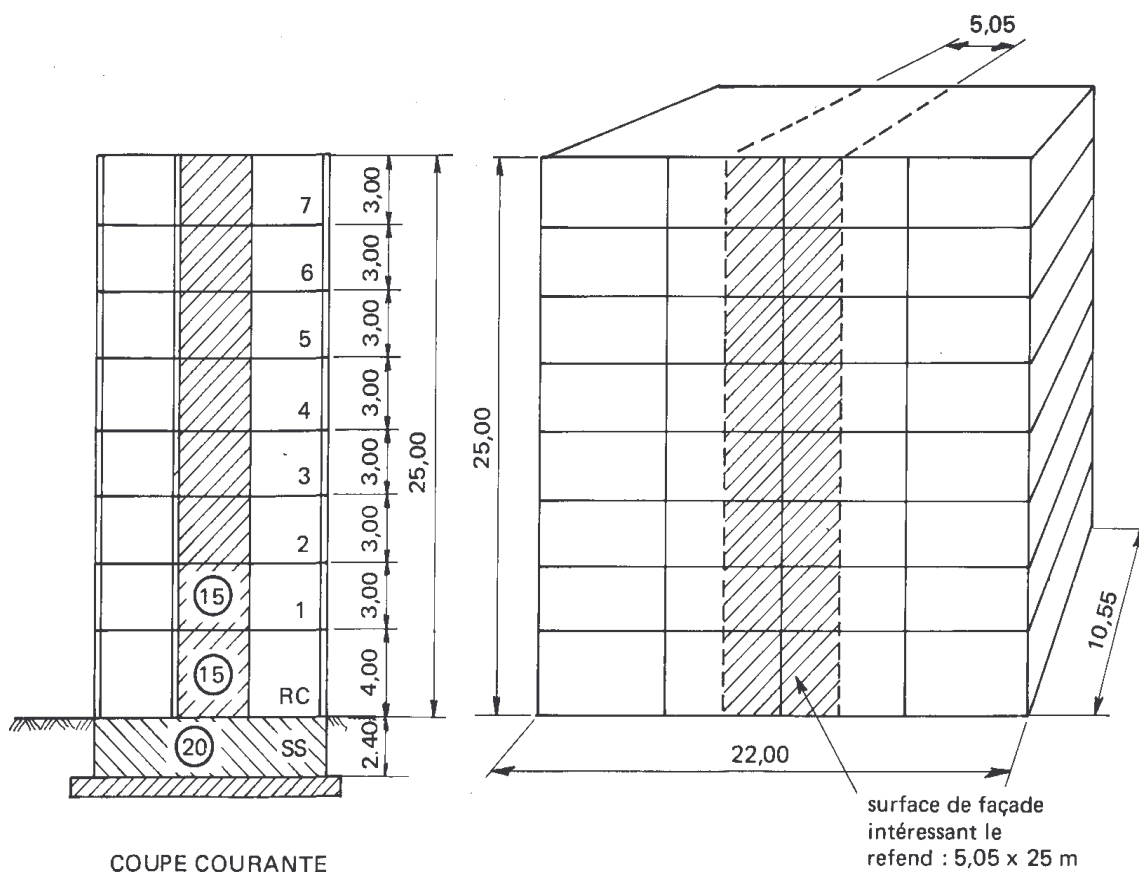
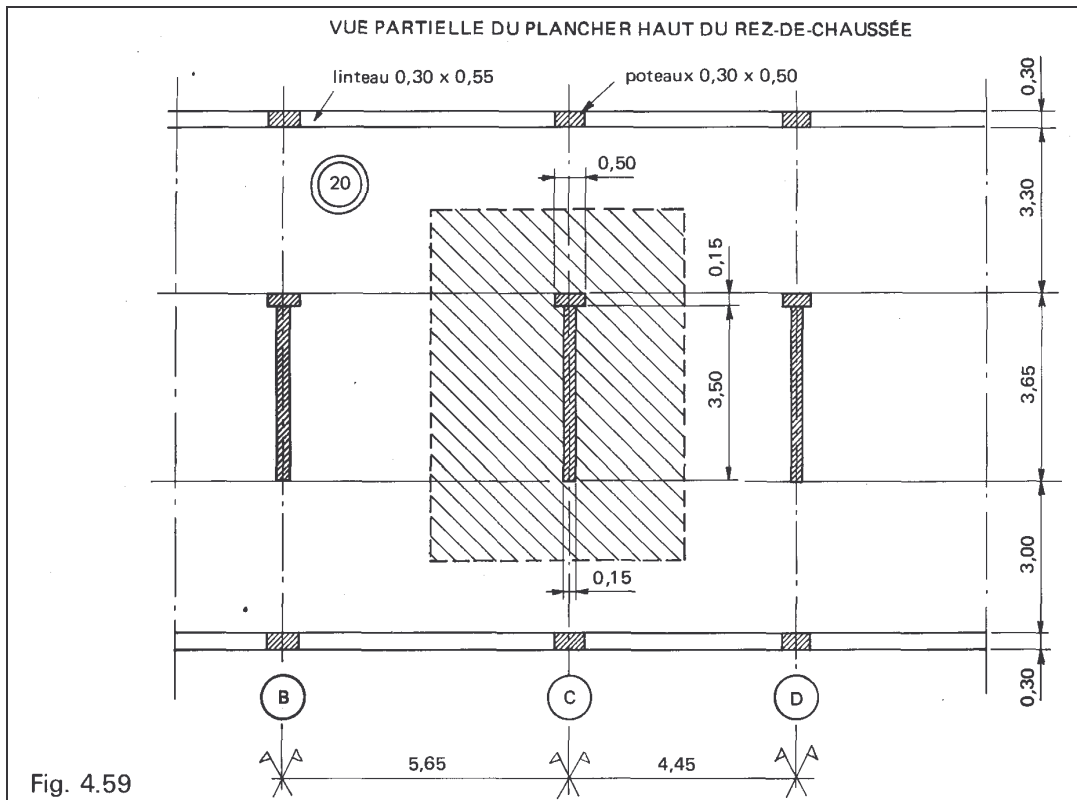


Fig 4.58

(les cotes se rapportent aux plans moyens des planchers ou des murs)



L'exemple concerne le mur de refend file C dans la hauteur du rez-de-chaussée (fig. 4.59).

6.2. ACTIONS PERMANENTES

a. Charges au m²

• Plancher-terrasse	kN/m ²
Étanchéité plus revêtement	1,50
Dalle B.A. 25 x 0,20	<u>5,00</u>
	6,50
• Plancher courant	
Revêtement	0,50
Dalle B.A. 25 x 0,20	<u>5,00</u>
	5,50

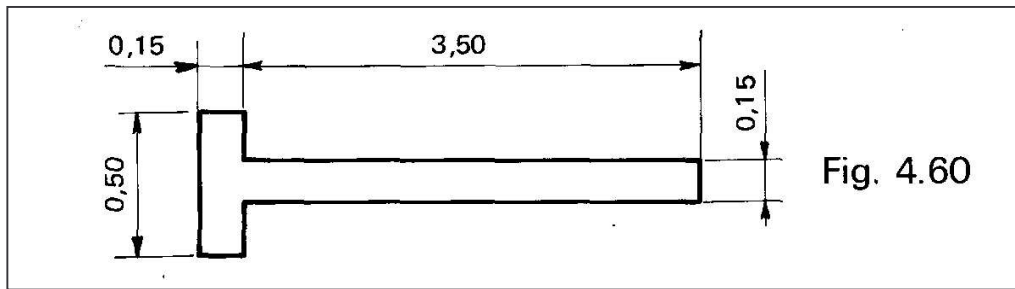
b. Charges totales dans la section I à mi-hauteur du rez-de-chaussée :

- Surface de plancher intéressée (zone hachurée, fig. 4.59):

$$\left(\frac{3,00}{2} + 3,65 + \frac{3,30}{2} \right) \times \frac{5,50 + 4,30}{2} = 33,32 \text{ m}^2$$

• Plancher-terrasse :	6,50 x 33,32 = 216,6 kN
• Plancher haut RC à plancher haut 6ème étage soit 7 niveaux	7 x 5,50 x 33,32 = <u>1 282,8 kN</u>
	Total = 1 499,5
	arrondi à 1 500 kN

- Mur B.A. (depuis la terrasse, jusqu'à la section I à mi-hauteur du rez-de-chaussée, soit sur une hauteur $25 - \frac{4}{2} = 23\text{m}$)



$$25 \times 0,15 (3,50 + 0,50) \times 23 = 345 \text{ kN}$$

Total des charges permanentes pour la section I considérée : $G = 1500 + 345 = 1\ 845 \text{ kN} = 1,845 \text{ MN}$

6.3. ACTIONS VARIABLES

a. Charges d'exploitation

Pour cumuler les charges d'exploitation, nous appliquons la loi de dégression verticale (voir chapitre 1. titre 3.3,2,2.) d'où les charges d'exploitation en kN/m^2 :

Plancher – terrasse	: 1,0
P.H. du 6ème étage	: 1,5
P.H. du 5ème étage	: 1,35
P.H. du 4ème étage	: 1,20
P.H. du 3ème étage	: 1,05
P.H. du 2ème étage	: 0,90
P.H. du 1er étage	: 0,75
P.H. du rez-de-chaussée	: 0,75

Total : 8,5 kN/m^2

Total des charges d'exploitation pour la section I considérée :
 $8,50 \times 33,32 = 283,22 \text{ kN}$
 soit $Q = 0,285 \text{ MN}$

b. Charges climatiques (vent)

Le bâtiment étant situé en région II, site normal, d'après les Règles Neige et Vent NV 65, pour ce cas :

- la pression dynamique de base q_{10} (s'exerçant sur une hauteur $H \leq 10 \text{ m}$) vaut $0,70 \text{ kN/m}^2$. A une hauteur H supérieure à 10 m on a :

$$q_H = q_{10} \times 2,5 \frac{H+18}{H+60} \quad \text{soit pour } H=25\text{m} : \quad q_{25} = 0,885 \text{ kN/m}^2$$

- le coefficient de site k_s est égal à 1,
- le coefficient dynamique β est égal à 1,
- le coefficient de traînée globale c_t est égal à 1,3,
- le coefficient de réduction δ correspondant à une surface exposée de $5,05 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ est égal à 0,78.

L'action résultante unitaire est donc égale à :

$$q_H \times k_s \times \beta \times \delta \times c_t$$

c'est-à-dire à :
 $0,88 \times 0,78 \times 1,3 = 0,90 \text{ kN/m}^2$ à $H = 25 \text{ m}$
 $0,70 \times 0,78 \times 1,3 = 0,71 \text{ kN/m}^2$ pour $H \leq 10 \text{ m}$

Par simplification nous admettons une valeur moyenne pondérée de $0,80 \text{ kN/m}^2$ (vent « normal »).

Conformément à l'annexe D des Règles BAEL pour les calculs d'état-limite ultime, la valeur caractéristique de la charge du vent doit être prise égale à 1,2 fois celle résultant de l'application des Règles NV65, c'est-à-dire :

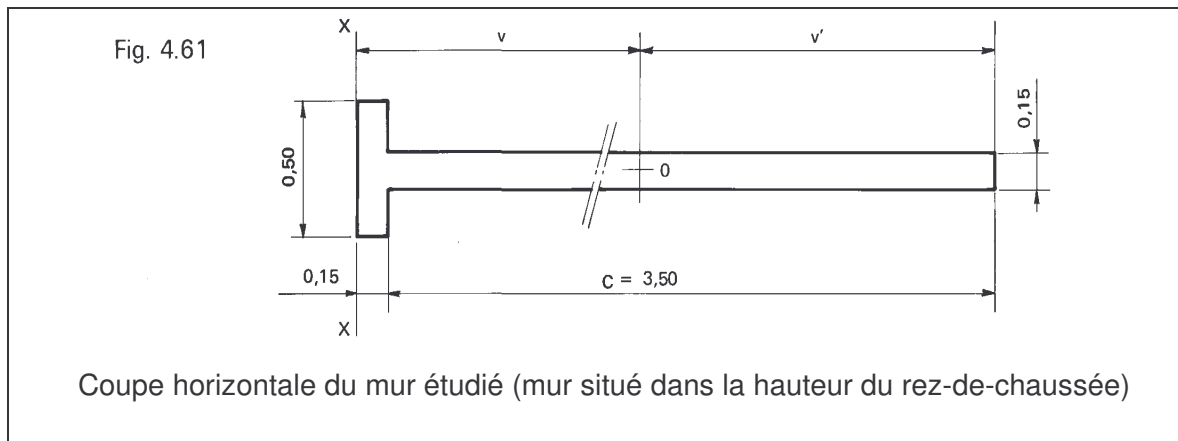
$$w = 0,80 \times 1,2 = 0,96 \text{ kN/m}^2$$

soit une charge uniforme le long du mur (fig. 4.58) :

$$w = 0,96 \times 5,05 \approx 5 \text{ kN/m.}$$

6.4. CARACTÈRES GÉOMÉTRIQUES ET MÉCANIQUES DU MUR

Comme la largeur du raidisseur dans le sens transversal est de 0,50 m, c'est-à-dire supérieure à trois fois l'épaisseur du mur, ce raidisseur peut être pris en compte dans les calculs de résistance.



a. Calcul de la surface B, du moment d'inertie I_0 et de la position du centre de gravité v, v'

	Surfaces		Moments statiques par rapport à l'axe XX		Moments d'inertie par rapport à l'axe XX	
	$0,15 \times (0,15 + 3,50)$	$= 0,5475$	$\times \frac{3,65}{2}$	$= 0,9992$	$\times \frac{2}{3} \times 3,65$	$= 2,4134$
	$(0,50 - 0,15) \times 0,15$	$= 0,0525$	$\times \frac{0,15}{2}$	$= 0,0039$	$\times \frac{2}{3} \times 0,15$	$= 0,0004$
	B =	0,600 m²	S =	1,0031 m³	J =	2,4138 m⁴

$$v = \frac{S}{B} = \frac{1,0031}{0,600} = 1,67 \text{ m}$$

$$v' = 3,65 - 1,67 = 1,98 \text{ m}$$

(il est rappelé que d'après le théorème de Huyghens $J = I_0 + Sv = I_0 + Bv^2$)

$$-v \times S = \frac{1,0031^2}{0,600} = -1,6770$$

$$I_0 = 0,7368$$

b. Calcul de la longueur de flambement « ℓ_f » dans l'hypothèse d'un mur armé :

• Calcul de ℓ'_f

Nous allons utiliser l'abaque de Jackson et Moreland (fig. 4.48) car du fait des hauteurs libres différentes de plancher à plancher, cette méthode est préférable à la méthode simpliste.

Les hauteurs libres valent :

- en sous-sol, de la face supérieure de la semelle à la sous-face du plancher : $2,40 - 0,10 = 2,30$ m
- au rez-de-chaussée : $4,00 - 2 \times 0,10 = 3,80$ m
- à l'étage courant : $3,00 - 2 \times 0,10 = 2,80$ m

Pour le mur étudié, la hauteur libre est donc : $\ell = 3,80$ m.

Nous avons :

- pour le mur au-dessus du mur considéré : $k_n = \frac{0,15^3}{2,80} = 1,205 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

- pour le mur considéré : $k = \frac{0,15^3}{3,80} = 0,888 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

- pour le mur au-dessous du mur considéré : $k_s = \frac{0,20^3}{2,30} = 3,478 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

- pour les planchers (voir fig. 4.58).

- à droite du refend considéré : portées $\ell_{en} = \ell_{es} = 4,45 - 0,15 = 4,30$ m

$$k_{en} = k_{es} = \frac{0,20^3}{4,30} = 1,860 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

- à gauche du refend considéré : portées $\ell_{wn} = \ell_{ws} = 5,65 - 0,15 = 5,50$ m

$$k_{wn} = k_{ws} = \frac{0,20^3}{5,50} = 1,455 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

d'où

- au sommet du mur : $K_N = \frac{k + k_n}{k_{en} + k_{wn}} = \frac{0,888 + 1,205}{1,860 + 1,455} = 0,631$

- à la base du mur : $K_S = \frac{k + k_s}{k_{es} + k_{ws}} = \frac{0,888 + 3,478}{1,860 + 1,455} = 1,317$

Pour ces valeurs, l'abaque de la fig. 4.48 donne $\frac{\ell'_f}{\ell} = 0,76$

d'où

$$\ell'_f = 0,76 \times 3,80 = 2,89 \approx 2,90 \text{ m}$$

• Calcul de ℓ_f

Le mur étant raidi à une extrémité, on a :

$$c = 3,50 \text{ m}, \quad b = 2,5 c = 8,75 \text{ m} \quad \text{et} \quad \frac{\ell'_f}{b} = 0,33$$

La courbe A de la fig. 4.51 donne :

$$\frac{\ell_f}{b} = 0,30 \quad \text{soit} \quad \ell_f = 0,30 \times 8,75 = 2,63 \text{ m}$$

ce qui correspond à une excentricité initiale admissible (voir 5.1.) de :

$$e = \text{Max} \left[0,01; \frac{2,63}{300} \right] = 0,01 \text{ m}$$

c. Calcul de la longueur de flambement ℓ_f dans l'hypothèse d'un mur non armé

Dans ce cas, comme nous l'avons dit en 5.3,1,1.b, il est prudent déterminer ℓ'_f en majorant les valeurs de K_N et K_S de 50 % d'où

$$K'_N = 1,5 K_N = 1,5 \times 0,6314 = 0,947 \\ \text{et } K'_S = 1,5 K_S = 1,5 \times 1,317 = 1,976$$

Pour ces valeurs, l'abaque de la fig. 4.48 donne $\frac{\ell'_f}{\ell} = 0,81$

On trouve alors successivement :

$$\ell'_f = 0,81 \times 3,80 = 3,08 \text{ m}$$

$$\frac{\ell'_f}{b} = \frac{3,08}{8,75} = 0,352$$

La courbe B de la fig. 4.51 donne alors $\frac{\ell_f}{b} = 0,33$ soit $\ell_f = 0,33 \times 8,75 = 2,89 \text{ m}$

L'excentricité initiale admissible conserve la valeur $e = 0,01 \text{ m}$.

En définitive, nous retenons, avec $a = 0,15 \text{ m}$:

- dans l'hypothèse d'un mur non armé : $\ell_f = 2,89 \text{ m} \left(\frac{\ell_f}{a} = 19,3 \right)$

- dans l'hypothèse d'un mur armé : $\ell_f = 2,63 \text{ m} \left(\frac{\ell_f}{a} = 17,5 \right)$

6.5. CALCUL DE N_u

Dans cet exemple, comme il n'y a pas de charges concentrées en tête du mur, on ne vérifie que la section I à mi-hauteur.

Le paragraphe 5.3.2. a indique les différentes combinaisons d'actions à considérer (formules 4.6, 4.7 et 4.8) :

Combinaison ① : $1,35 G + 1,5 Q$

Combinaison ② : $1,35 G + 1,5 Q + W$

Combinaison ③ : $1,35 G + 1,5 W + Q$

Dans ce qui suit, on suppose que la résultante des charges G et Q passe par le centre de gravité G_o de la section horizontale du mur.

a. Sollicitations résultant de la combinaison ①

$$1,35 G = 1,35 \times 1,845 = 2,49$$

$$1,5 Q = 1,5 \times 0,285 = 0,43$$

La charge verticale totale vaut donc $P_{u1} = 2,92 \text{ MN}$

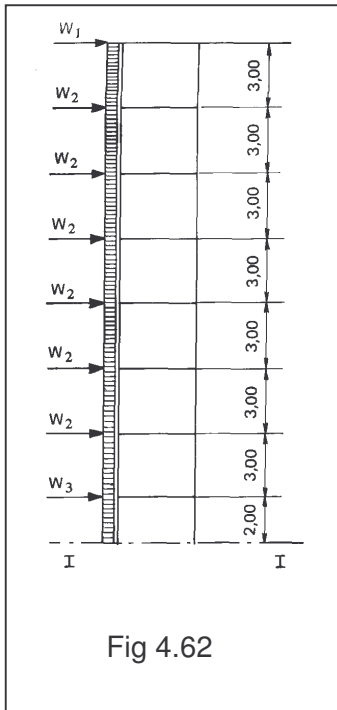
c'est-à-dire que par mètre de mur on a (calcul de B en 6.4.a) :

$$N_{u1} = \frac{P_{u1} \times a}{B} = \frac{2,92 \times 0,15}{0,60} = 0,730 \text{ MN/m}$$

b. Sollicitations résultant de la combinaison ②:

La charge verticale a la même valeur que pour la combinaison ① : $P_{u2} = P_{u1}$

L'action répartie du vent est de 5 kN/m appliqués uniformément sur toute la hauteur du bâtiment (voir 6.3.b) ; cette charge est transmise au mur de refend par les planchers d'où la répartition des efforts :



- au niveau de la terrasse

$$W_1 = 5 \times \frac{3}{2} = 7,5 \text{ kN}$$

- au niveau des planchers des étages courants

$$W_2 = 5 \times \frac{3+3}{2} = 15 \text{ kN}$$

- au niveau du plancher haut du rez-de-chaussée

$$W_3 = 5 (1,5 + 2) = 17,5 \text{ kN}$$

Le moment dans la section I à mi-hauteur du mur du rez-de-chaussée a donc pour valeur non pondérée :

$$M_G = 7,5 \times 23 + 15 (20 + 17 + 14 + 11 + 8 + 5) + 17,5 \times 2 = 1332,5 \text{ kNm}$$

Fig 4.62

Pour la combinaison d'actions ② on a donc :

$$P_{u2} = P_{u1} = 2,92 \text{ MN}$$

et

$$M_{u2G_0} = M_G = 1332,5 \text{ kNm} = 1,33 \text{ MNm}$$

En admettant que les contraintes puissent être calculées à l'état-limite ultime par les formules de Résistance des Matériaux la distribution des charges sur la largeur du mur est une distribution plane passant par les deux points correspondant aux valeurs des contraintes aux extrémités A et B de cette largeur (fig. 4.63), à savoir :

$$\text{- au point A : } N_{uA} = \left(\frac{P}{B} \pm \frac{M_G v'}{I_0} \right) a$$

$$\text{- au point B : } N_{uB} = \left(\frac{P}{B} \mp \frac{M_G v'}{I_0} \right) a$$

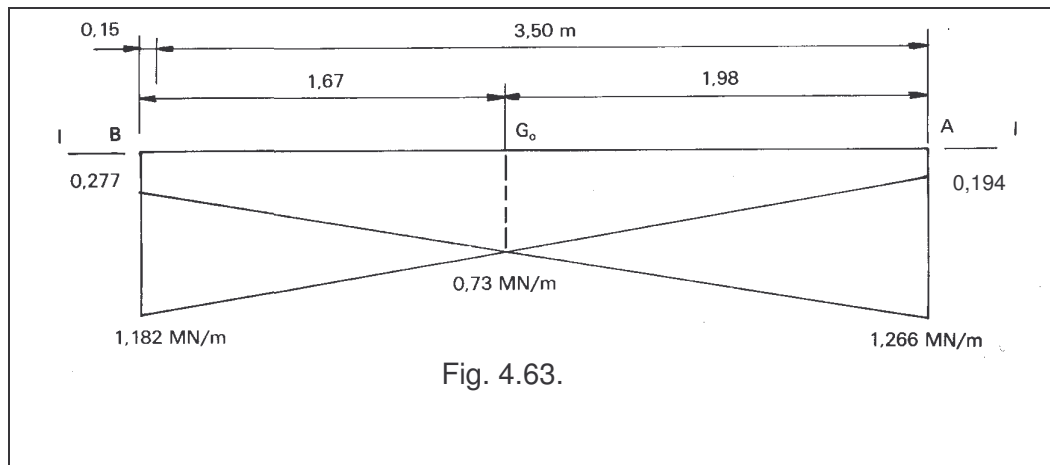
les signes se correspondant comme indiqué.

En introduisant dans ces formules à la place de P et M_G les valeurs numériques de P_{u2} et M_{u2G_0} , on trouve :

$$N_{uA2} = \left[\frac{2,92}{0,60} \pm \frac{1,33 \times 1,98}{0,7368} \right] \times 0,15 = \begin{cases} 1,266 \text{ MN/m} \\ 0,194 \text{ MN/m} \end{cases}$$

$$N_{uB2} = \left[\frac{2,92}{0,60} \mp \frac{1,33 \times 1,67}{0,7368} \right] \times 0,15 = \begin{cases} 0,277 \text{ MN/m} \\ 1,182 \text{ MN/m} \end{cases}$$

d'où le diagramme de charge le plus défavorable à l'état-limite ultime pour la combinaison ② (fig. 4.63).



c. Sollicitations résultant de la combinaison ③

$$P_{u3} = 1,35 G + Q = 2,49 + 0,285 = 2,775 \text{ MN}$$

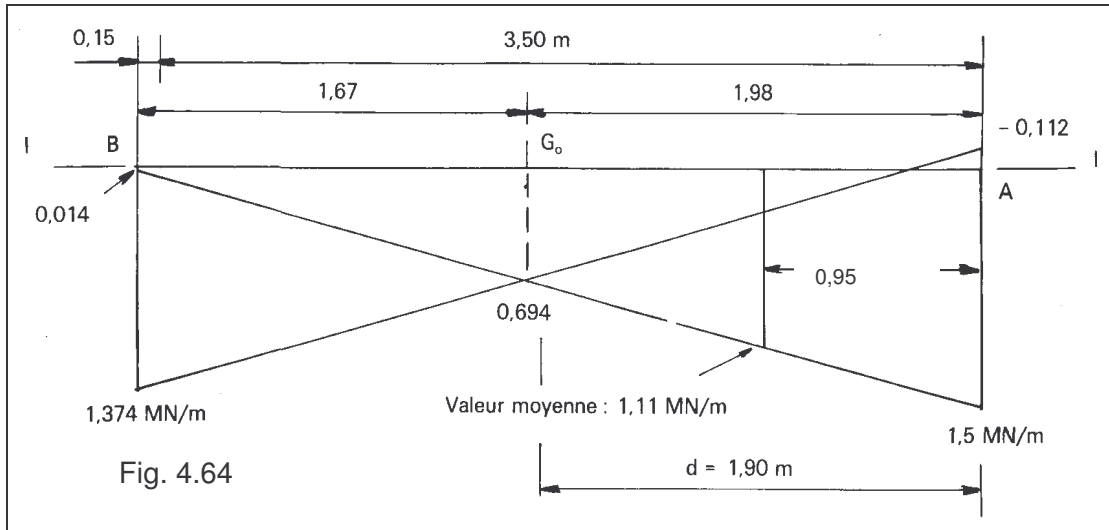
$$M_{u3G_0} = 1,5 M_G = 1,5 \times 1,33 = 2 \text{ MNm}$$

En introduisant dans les formules données ci-avant, à la place de P et M_G , les valeurs numériques de P_{u3} et M_{u3G_0} , on trouve, pour cette combinaison ③ :

$$N_{uA3} = \left[\frac{2,775}{0,60} \pm \frac{2 \times 1,98}{0,7368} \right] \times 0,15 = \begin{cases} 1,5 \text{ MN/m} \\ -0,112 \text{ MN/m} \end{cases}$$

$$N_{uB3} = \left[\frac{2,775}{0,60} \mp \frac{2 \times 1,67}{0,7368} \right] \times 0,15 = \begin{cases} 0,014 \text{ MN/m} \\ 1,374 \text{ MN/m} \end{cases}$$

d'où le diagramme de charge le plus défavorable de cette combinaison (fig. 4.64).



La combinaison ③ est donc la plus défavorable La bande la plus sollicitée a une largeur de $d = \frac{\ell}{2} = \frac{3,80}{2} = 1,90 \text{ m}$ (ℓ = hauteur libre du mur, voir fig. 4.52 en 5.3,2. b) et la valeur moyenne de la charge ultime pour cette bande est :

$$N_u = \left[\frac{N_{u3}}{B} + M_{u3G_o} \left(\frac{v'-d/2}{l_o} \right) \right] a \text{ soit :}$$

$$N_u = 0,694 + 2 \frac{(1,98 - 0,95)}{0,7368} \times 0,15 = 1,11 \text{ MN/m}$$

6.6. DÉTERMINATION DES TREILLIS SOUDÉS

Nous suivons la marche indiquée en 5.33 (et celle de l'organigramme page 222)

1. Pour ℓ_f nous avons trouvé dans le cas d'un mur non armé (voir 6.4.b) :

$$\ell_f = 2,89\text{m} \text{ d'où } \frac{\ell_f}{a} = 19,3$$

2. Pour $\frac{\ell_f}{a} = 19,3$, la courbe de la fig. 4.53 donne : $v_{u0} = 0,24$

3. On a pour une bande de mur de 1 m de longueur $B_r = (a - 0,02) = (0,15 - 0,02) = 0,13 \text{ m}^2$

$$\text{et } v_u = \frac{kN_u}{B_r f_{c28}} = \frac{1,11}{0,13 \times 30} = 0,285 > v_{u0} \text{ (} k = 1, \text{ voir pages 220 et 226).}$$

4. On est dans le cas $v_u > v_{u0}$, le mur doit donc être armé.

• Détermination des armatures

Le mur étant maintenant armé, verticalement et horizontalement, la nouvelle longueur de flambement (voir calcul en 6.4.b) est :

$$\ell_f = 2,63 \text{ m d'où } \frac{\ell_f}{a} = 17,5 > 14,4$$

Si l'on utilise la formule 4.10, on a $\beta = 0,0068 \left(\frac{\ell_f}{a}\right)^2 = 2,08$

et $A = 27 \times 2,08 \times 1,11 - 17 \times 0,13 \times 30 < 0$

La valeur de A étant négative, il faut prévoir le pourcentage minimal.

Dans ce cas (voir 5.3,5.) on commence par calculer

$$N_{ulimo} = \frac{0,63B_r f_{c28}}{\beta} = \frac{0,63}{2,08} \times 0,13 \times 30 = 1,181 \text{ MN/m}$$

$$\text{puis } \frac{N_u}{N_{ulimo}} = \frac{1,11}{1,181} = 0,94$$

Pour cette valeur, l'abaque de la fig. 4.57 donne :

$$100 \rho_v = 0,218$$

$$100 \rho_h = 0,146$$

La section minimale des fils verticaux à disposer **sur chacune des faces** serait donc :

$$S = \frac{0,218 \times 15 \times 100}{100 \times 2} = 1,64 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

et la section des fils horizontaux également par face

$$s = \frac{0,146 \times 15 \times 100}{100 \times 2} = 1,1 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

Un panneau ST 20 correspond à $S = 1,89 \text{ cm}^2/\text{m}$, $s = 1,28 \text{ cm}^2/\text{m}$ et à une distance E entre les fils de $15 \text{ cm} < \text{Min} [2a ; 33 \text{ cm}]$ soit $\text{Min} [60 ; 33 \text{ cm}]$

Retenons cette solution. Comme il y aura un panneau sur chaque face :

$$A_r = 2 S = 2 \times 1,89 = 3,78 \text{ cm}^2/\text{m}$$

d'où par la formule 4.11 :

$$N_{ulim} = \frac{3,78 + 17 \times 0,13 \times 30}{27 \times 2,08} = 1,25 \text{ MN/m} > N_u = 1,11$$

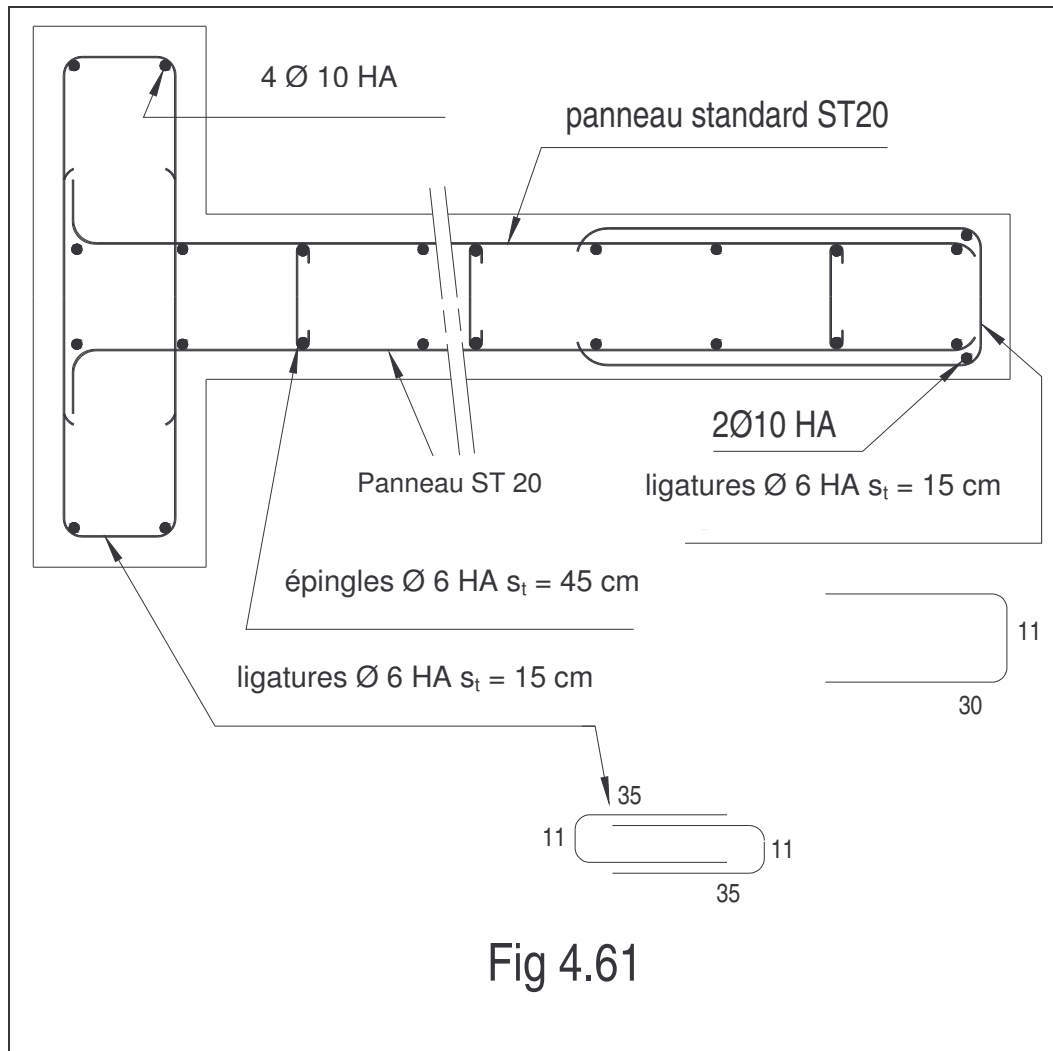
Pour $\frac{N_u}{N_{ulim}} = \frac{1,11}{1,25} = 0,888$ l'abaque de la fig. 4.57 conduit à des pourcentages minimaux requis

$100 \rho_v = 0,204$ et $100 \rho_h = 0,136$ alors que les valeurs réelles sont respectivement de $\frac{3,78}{15} = 0,252$

et $\frac{2 \times 1,28}{15} = 0,171$.

Un panneau ST 20 sur chaque face convient donc parfaitement. La longueur des panneaux (6,00 m) permet de couvrir totalement la hauteur du mur et d'assurer le recouvrement avec les treillis soudés éventuels de l'étage au-dessus, moyennant le respect, à l'exécution, des dispositions réglementaires concernant les barres en attente (voir fascicule 65A [1.2.], art. 63.3 et page 183 du présent texte).

Les panneaux de treillis soudés de chaque face doivent être solidarisés par des armatures horizontales perpendiculaires aux faces du mur (voir 5.3,5,3.). Comme $\varnothing_\ell = 6 < 12$ mm il suffit de disposer des épingles transversales à raison d'au moins 4 par m^2 .



Remarque : Si, au lieu de $f_{c28} = 30$ MPa, on avait eu $f_{c28} = 25$ MPa il aurait fallu une section d'acier (formule 4.10) :

$$A = 27 \times 2,08 \times 1,11 - 17 \times 0,13 \times 25 = 7,09 \text{ cm}^2/\text{m}$$

c'est-à-dire un panneau ST 35 sur chaque face ($2 S = 7,70 \text{ cm}^2/\text{m}$) au lieu d'un panneau ST 20 ($2 S = 3,76 \text{ cm}^2/\text{m}$). Ainsi, une diminution modérée de la résistance du béton entraîne une augmentation considérable de la quantité d'acier nécessaire. Dans l'exemple choisi, cette quantité a doublé alors que la résistance du béton n'a été réduite que de 20%.

De façon générale, les formules 4.10, 4.11 et 4.12 sont très sensibles à des écarts, même faibles, sur les différents paramètres, qu'il s'agisse de N_u , de B_r ou de f_{c28} . Pour s'en convaincre, il suffit de regarder la pente des droites de l'abaque de la figure 4.55, surtout pour les valeurs élevées de l_i/a : suivant la valeur de ce rapport, une variation de + 3% sur v_u peut conduire à une section d'acier supérieur. e de 15 à 20 % à celle qui serait strictement nécessaire. A contrario, une erreur de - 3 % sur v_u peut conduire à sous-estimer de 15 à 20 % la section d'acier qu'il aurait fallu prévoir.

Il faut donc faire les calculs avec beaucoup de soin et de précision.