

Les différents types de contreventements

Le contreventement d'une construction est constitué de l'ensemble des éléments structuraux qui participent à sa résistance aux actions horizontales (vent, séismes).

Le contreventement des constructions est assuré généralement par un ou plusieurs des dispositifs suivants :

- **Portique : "système poutres- poteaux"**
- **Voiles rigides simples ou composés**
- **Structures mixtes : combinaison de portiques et de voiles**

Le contreventement peut être interne (voiles de refends internes, noyau central) ou externe (voiles de pignons, façades en X).

Les méthodes de calcul permettent de déterminer les forces horizontales réparties au niveau de chaque élément de contreventement et les sollicitations correspondantes tels que le Moment fléchissant (**M**), l'effort tranchant (**V**) et l'effort normal (**N**).

A- CONTREVENTEMENT PAR PORTIQUE (Méthode de K. Muto)

1- Principe de la méthode :

La méthode de Muto est une méthode approchée utilisée pour le calcul des portiques sous les charges horizontales. Cette méthode nous permet d'abord de distribuer les efforts tranchants dans les niveaux correspondants des différents portiques et puis d'en déduire les moments fléchissants.

Elle est basée sur la rigidité relative de niveau d'un portique plan définie par K.Muto comme suit :

$$R_j = R_{j\infty} \cdot a_j$$

Où R_j : rigidité relative de niveau d'un portique suggérée par Muto.

$R_{j\infty}$: rigidité relative de niveau en considérant que les poutres sont infiniment rigides et que les poteaux sont parfaitement encastres aux extrémités.

a_j : coefficient correcteur tenant compte de la flexibilité des poutres formant le nœud.

2- Rigidité relative de niveau :

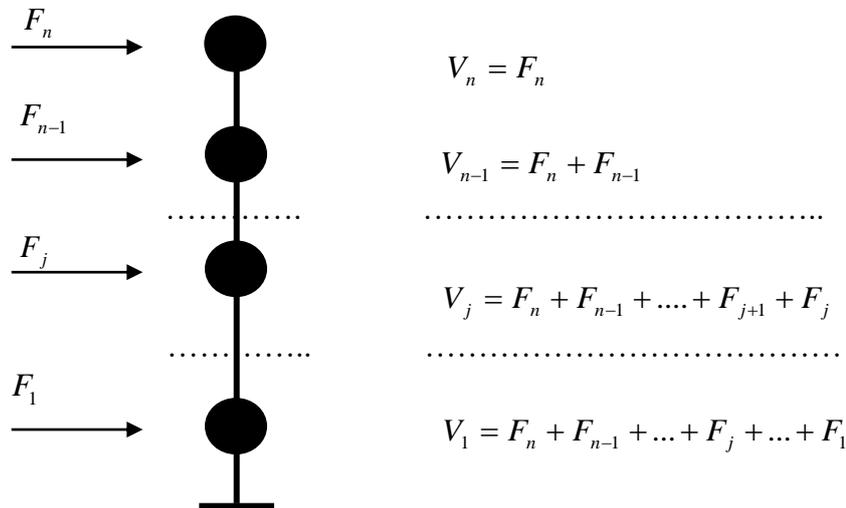
Les notions de déplacement relatif de niveau δ_j et d'effort tranchant de niveau V_j nous permettent de définir la rigidité relative de niveau par le rapport :

$$R_j = \frac{V_j}{\delta_j} \quad (\text{elle représente l'effort tranchant de niveau qui produit un déplacement relatif égal à l'unité}).$$

où : - δ_j représente le déplacement d'un plancher « j » par rapport au plancher immédiatement inférieur « j-1 ».

- V_j est égal à la somme des forces agissant au dessus du niveau considéré : $V_j = \sum_{j=1}^n F_j$

Les forces F_1, F_2, \dots, F_n sont soit des forces sismiques calculées par le RPA2003, soit des forces dues au vent calculées par le règlement NV65.



L'effort tranchant d'étage est la somme des forces agissantes au-dessus de l'étage "j" considéré.

3- Calcul de la rigidité relative de niveau des portiques plans :

a- Rigidité linéaire :

Pour une barre quelconque nous définissons la rigidité linéaire ou raideur « K » comme le rapport entre le moment d'inertie « I » et la longueur de calcul de la barre.

- poteaux : $K_{poteau} = \frac{I_{poteau}}{h_{calcul}}$ avec $h_{calcul} = h + \frac{1}{2} h_{poteau}$

- poutres : $K_{poutre} = \frac{I_{poutre}}{L_{calcul}}$ avec $L_{calcul} = L + \frac{1}{2} h_{poutre}$ (cas des poutres encastrees)

$K_{poutre} = 0,75 \frac{I_{poutre}}{L_{calcul}}$ (cas des poutres ayant une extrémité simplement appuyée et l'autre encastree élastiquement).

où L et h sont des distances entre nus d'appuis.

b- Comportement des portiques à plusieurs niveaux sous l'action des forces latérales :

La déformation d'ensemble d'un portique soumis à un système quelconque de forces horizontales dépend :

- de l'**intensité** de la répartition des forces sur la hauteur du bâtiment.
- des caractéristiques **géométriques** et **mécaniques** du portique.

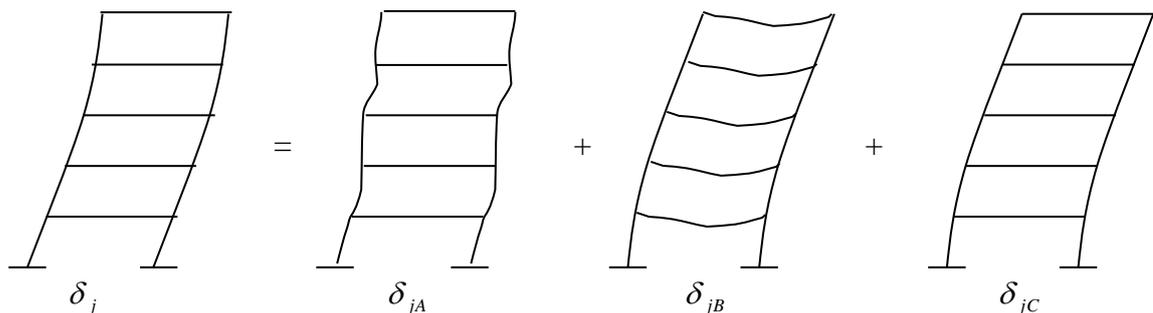
Cette déformation a trois composantes :

A : déplacement de translation dû essentiellement à la déformation de flexion des poteaux en supposant la rigidité des poutres indéfinies (rotation des nœuds bloquée)

B : déplacement dû à la rotation des nœuds en fonction de la rigidité réelle des poutres.

C : déplacement de « courbe » (console) dû aux déformations axiales relatives des poteaux tendus.

Le déplacement relatif de niveau total est égal à la somme de ces trois composantes $\delta_j = \delta_{jA} + \delta_{jB} + \delta_{jC}$



Pour les bâtiments avec $n \leq 15$ étages δ_{jC} peut être négligée car elle n'est pas supérieure à 2 à 4% de δ_j d'où le déplacement relatif du niveau total :

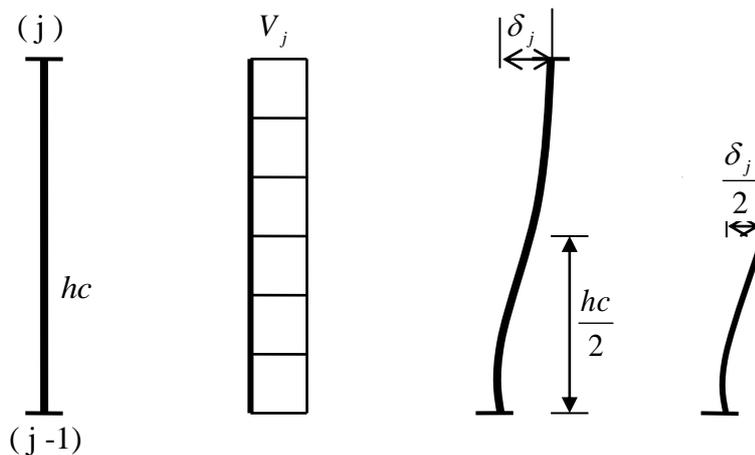
$$\delta_j = \delta_{jA} + \delta_{jB} = \left(1 + \frac{\delta_{jB}}{\delta_{jA}}\right) \delta_{jA} = \rho_j \cdot \delta_{jA} = \rho_j \cdot \delta_{j\infty}$$

Le coefficient ρ_j exprime l'influence de la rotation des nœuds sur la valeur des déplacements relatifs de niveau ; d'où la rigidité relative de niveau d'un portique :

$$R_j = \frac{V_j}{\delta_j} = \frac{V_j}{\rho_j \cdot \delta_{j\infty}} = R_{j\infty} \frac{1}{\rho_j} = R_{j\infty} \cdot a_j \quad (\text{d'après Muto})$$

$\delta_{j\infty}$ - déplacement relatif du niveau en considérant la rotation des nœuds bloquée.

Nous étudierons un poteau situé au niveau « j » parfaitement encastré aux extrémités, poutres de rigidité infinie :



V_j produit un déplacement δ_j des extrémités du poteau. A $hc/2$, la courbure de la ligne élastique du poteau est nulle donc $M=0$. Pour une courbe sollicitée par une force concentrée à l'extrémité on trouve d'après la RDM :

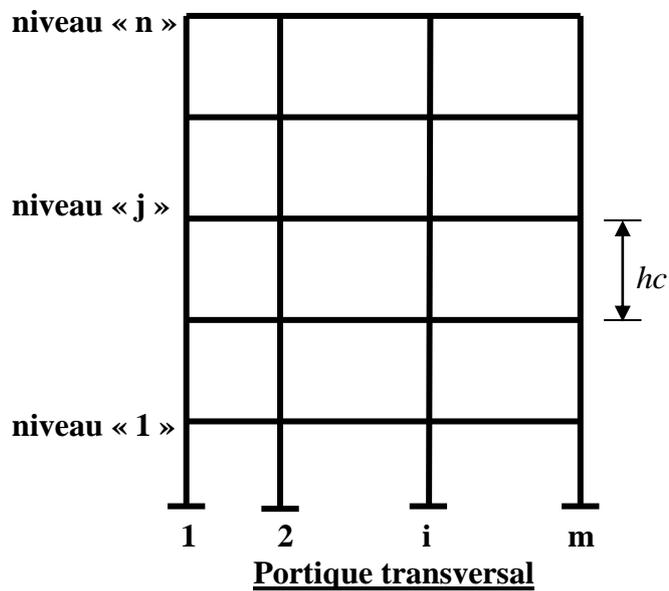
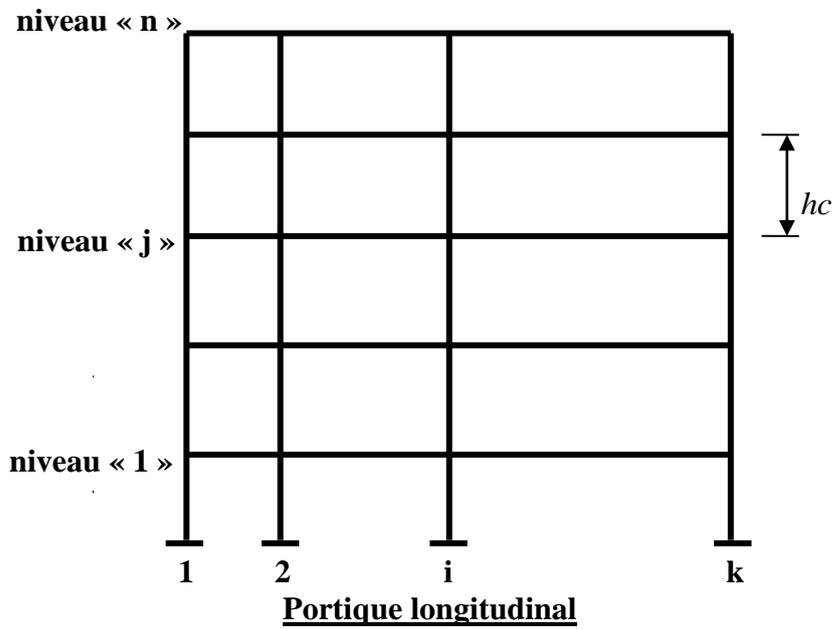
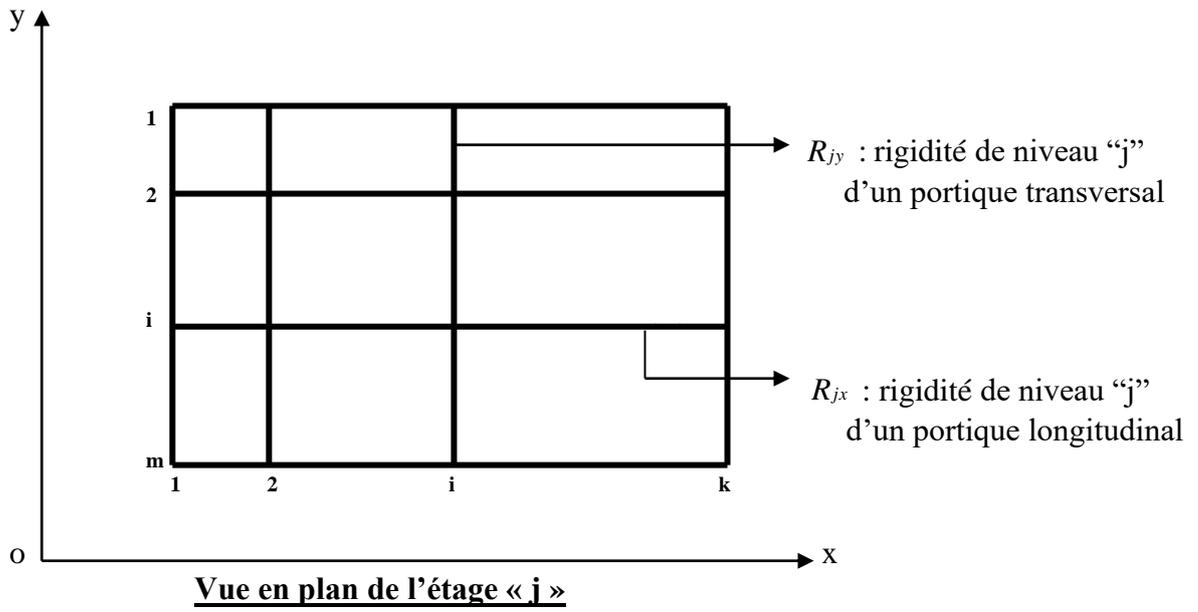
$$\frac{\delta_j}{2} = \frac{V_j \left(\frac{hc}{2}\right)^3}{3EI} \Rightarrow \delta_j = \frac{V_j \cdot hc^3}{12EI}$$

Conformément à la définition de R_j on a : $V_j (\delta_j = 1) = \frac{12EI}{hc^3} = \frac{12E}{hc^2} K_{pot} = R_{j\infty}$

et $R_j^{(i)} = \frac{12E}{[hc^{(i)}]^2} K_j^{(i)} a_j^{(i)}$ (R_j pour le poteau i).

$K_j^{(i)}$ est la rigidité linéaire du poteau en question.

Pour « m » poteaux ; on obtient R_j de niveau du portique : $R_j = \frac{12E}{[hc]^2} \sum_{i=1}^m K_j^{(i)} a_j^{(i)}$ cas où les hc sont approximativement égales.

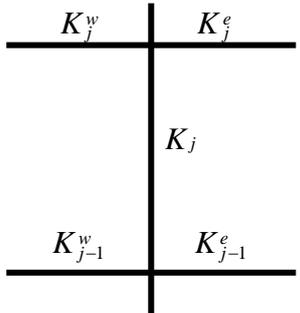


c- Formule de Muto pour le calcul des coefficients de correction $a_j^{(i)}$:

Cette formule est basée en principe sur quelques hypothèses simplificatrices comme par exemple : distribution régulière des poteaux, hc constante ou varie peu, distribution de rigidité relativement uniforme sur la hauteur du bâtiment.

c-1 Pour un étage courant :

On calcule un coefficient \bar{k}_j qui représente le degré d'encastrement du poteau.

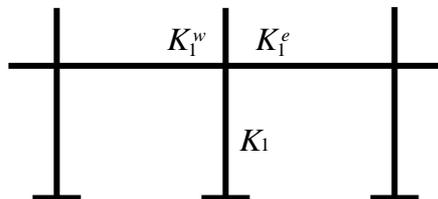


$$\bar{k}_j = \frac{K_j^w + K_j^e + K_{j-1}^w + K_{j-1}^e}{2K_j} \quad \text{d'où} \quad \bar{k}_j = \frac{\sum K_{poutres(inft-sup)}}{2K_{poteau}}$$

et $a_j = \frac{\bar{k}_j}{2 + \bar{k}_j} \leq 1$

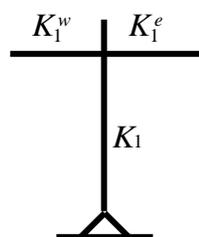
c-2 Pour le premier niveau (RDC)

- Cas d'un poteau encasté dans la fondation :



$$\bar{k}_j = \frac{K_1^w + K_1^e}{K_1} \quad \text{et} \quad a_j = \frac{0,5 + \bar{k}_j}{2 + \bar{k}_j} \leq 1$$

- Cas d'un poteau articulé dans la fondation



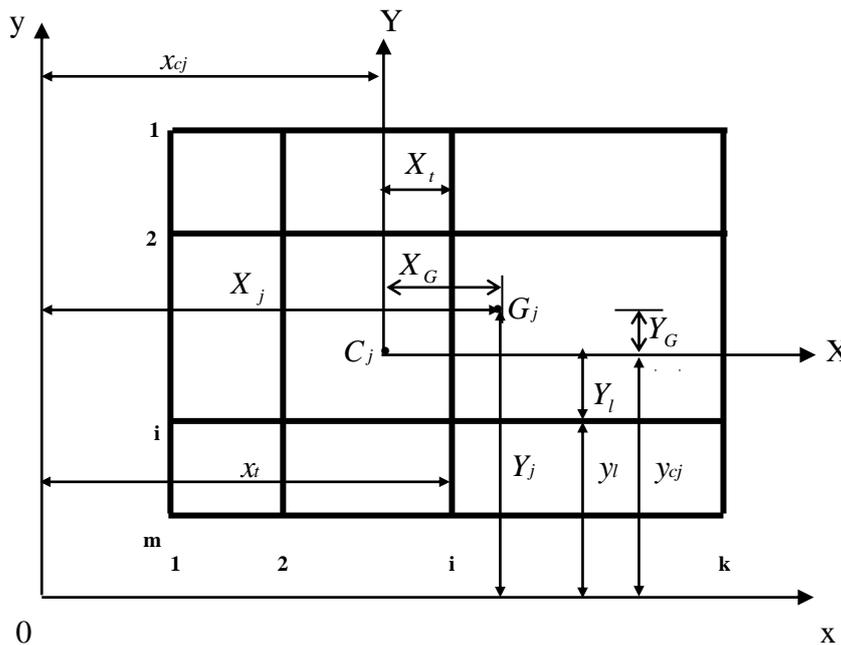
$$\bar{k}_j = \frac{K_1^w + K_1^e}{K_1} ; \quad a_j = \frac{0,5 \bar{k}_j}{1 + 2 \bar{k}_j} \leq 0,25 ; \quad R_j = \frac{3E}{hc^2} \sum_{i=1}^m K_j^{(i)} a_j^{(i)}$$

La méthode donne une précision satisfaisante pour $\bar{k}_j < 0,2$.

4- Calcul du centre de masse et du centre de torsion :

Le but du calcul de ces deux centres consiste à ce que les efforts horizontaux (séisme ou vent) soient appliqués au niveau du centre de masse de chaque plancher et que les efforts ont tendance à faire

tourner le plancher par rapport au centre de torsion. Les deux centres sont déterminés suivant un repère convenablement choisi.



G_j : centre de masse ou centre de gravité du plancher « j ».

C_j : centre de torsion à l'étage « j ».

$X_G = e_x$ et $Y_G = e_y$ sont les coordonnées de G_j par rapport au nouveau repère (XC_jY) .

x_{cj} et y_{cj} sont les coordonnées de C_j par rapport à (Oxy) .

$x_i = x_i$: distance d'un portique transversal à l'axe Oy.

$y_l = y_i$: distance d'un portique longitudinal à l'axe Ox.

4.1 Centre de masse : est par définition le point d'application de la résultante des efforts extérieurs. Les coordonnées X_j et Y_j du centre de gravité par rapport au système d'axe Oxy sont données par :

$$X_j = \frac{\sum_{i=1}^k m_i x_i}{\sum_{i=1}^k m_i} \quad ; \quad Y_j = \frac{\sum_{i=1}^m m_i y_i}{\sum_{i=1}^m m_i}$$

avec m_i : représente les masses reprises par chaque portique (G et Q)

4-2 Centre de torsion : (centre élastique ou centre de rigidité) est le centre de gravité de l'ensemble des portiques constituant le contreventement de la structure. Il représente ainsi le point par lequel passent les réactions R_x et R_y de l'ensemble des portiques.

Ce centre de torsion peut être aussi défini comme suit :

- si le centre de torsion est confondu avec le centre de masse de la structure, la résultante des forces horizontales ne provoque qu'une translation des portiques.
- si le centre de torsion est excentré par rapport au centre de masse, la résultante des forces horizontales provoque une translation et une rotation des portiques dues à cette excentricité c'est-à-dire qu'on peut tenir compte dans le calcul des portiques d'un effort tranchant supplémentaire dû à la rotation.

Les coordonnées x_{cj} et y_{cj} du centre de torsion C_j par rapport au système d'axe oxy sont données par :

$$x_{cj} = \frac{\sum_{t=1}^k R_{j(t)} x_t}{\sum_{t=1}^k R_{j(t)}} \quad y_{cj} = \frac{\sum_{l=1}^m R_{j(l)} y_l}{\sum_{l=1}^m R_{j(l)}}$$

$R_{j(t)}$ et $R_{j(l)}$ sont les rigidités des portiques transversaux et longitudinaux.

4-3 Détermination de la rigidité à la torsion à l'étage « j » :

Le calcul de cette rigidité nous permettra d'effectuer la distribution des efforts horizontaux dûs à une excentricité entre le CDM et le CDT au niveau de chaque étage. Elle est donnée par la relation :

$$R_{j\theta} = \sum_{t=1}^k R_{j(t)} X_t^2 + \sum_{l=1}^m R_{j(l)} Y_l^2$$

$R_{j\theta}$: Rigidité à la torsion à l'étage « j ».

X_t : Distance d'un portique transversal à l'axe $C_j Y$

Y_l : Distance d'un portique longitudinal à l'axe $C_j X$

4-4 Distribution des effort tranchants par étage aux différents portiques :

V_{jx} : Effort tranchant engendré par le séisme ou le vent dans le sens X à l'étage « j »

V_{jy} : Effort tranchant engendré par le séisme ou le vent dans le sens Y à l'étage « j »

En supposant que les rigidités de niveau des portiques R_x et R_y ne varient pas ou varient progressivement de la même façon suivant la hauteur du bâtiment on peut dans ce cas considérer que le centre de torsion C et le centre de gravité G varient peu d'un étage à l'autre. (Les coordonnées X_G et Y_G sont \approx constantes). Les centres de torsion C_j sont sensiblement sur la même verticale.

Alors on aura :

$$V_{jx}^{(t)} = V_{jx} \frac{R_{j(t)}}{\sum_{l=1}^m R_{j(l)}} + V_{jx} \frac{R_{j(t)} \cdot Y_l}{R_{j\theta}} \cdot Y_G ; \quad V_{jy}^{(t)} = V_{jy} \frac{R_{j(t)}}{\sum_{t=1}^k R_{j(t)}} + V_{jy} \frac{R_{j(t)} \cdot X_t}{R_{j\theta}} \cdot X_G$$

$V_{jx}^{(t)}$: Effort tranchant de niveau "j" revenant au portique longitudinal "l"

$V_{jy}^{(t)}$: Effort tranchant de niveau "j" revenant au portique transversal "t".

5- Calcul des sollicitations dans les différents éléments de contreventement :

5-1 Calcul des moments fléchissants :(Méthode de Muto)

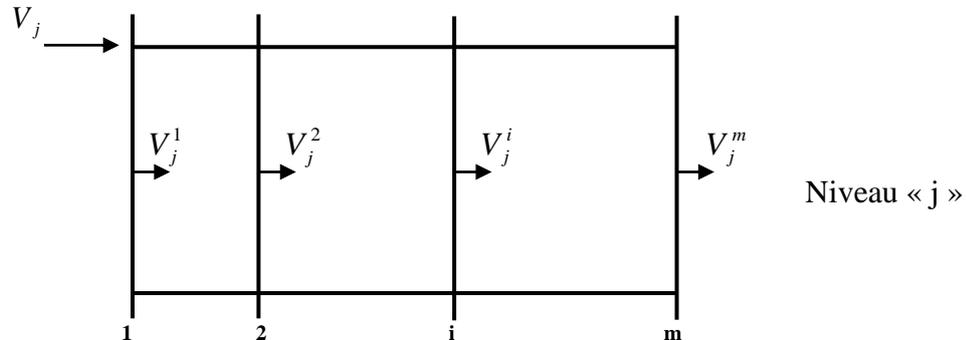
5-1-1 Cas des poteaux :

Pour établir le diagramme des moments fléchissants d'un portique sollicité par un système de forces horizontales, il faut connaître :

- La distribution de V_j de niveau entre les poteaux de l'étage.
- Les positions des points de $M_f = 0$ sur la hauteur d'étage.
- La distribution du moment fléchissant entre les poutres à chaque nœud.

Pour les portiques qui représentent une certaine régularité (distribution uniforme ou peu variable des forces et de la rigidité sur toute la hauteur du bâtiment), la position du point d'inflexion et la distribution de V_j peuvent être déterminées approximativement par la méthode T.Y. LIN, Méthode de Muto.

Soit l'étage (j) ayant (m) poteaux dont on connaît Rigidité relative $R_j^{(i)}$.



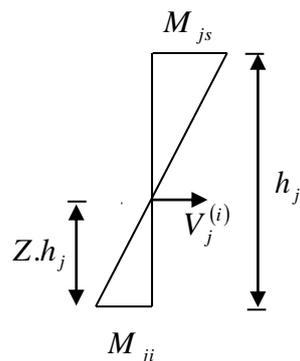
L'effort tranchant V_j de niveau est distribué dans les poteaux proportionnellement aux rigidités relatives de niveau. En effet, sous l'action d'un système (∇) de forces horizontales, le déplacement relatif $\delta_j = \frac{V_j}{R_j}$.

Comme tous les poteaux doivent avoir le même déplacement on peut donc écrire que :

$$\delta_j^{(1)} = \delta_j^{(2)} = \dots = \delta_j^{(i)} = \dots = \delta_j^{(m)} = \delta_j; \frac{V_j^{(1)}}{R_j^{(1)}} = \frac{V_j^{(2)}}{R_j^{(2)}} = \dots = \frac{V_j^{(i)}}{R_j^{(i)}} = \frac{V_j^{(m)}}{R_j^{(m)}} = \frac{V_j}{R_j}$$

d'où on obtient :
$$V_j^{(i)} = \frac{R_j^{(i)}}{R_j} \cdot V_j \quad ; \quad i = 1 \dots m$$

5-1-2 Position du point d'inflexion y :



y : position du point de moment nul.
 $y = Z.h_j$

$$\begin{aligned} M_{js} &= V_j^{(i)}(h_j - Z.h_j) \\ M_{ji} &= V_j^{(i)}(Z.h_j) \end{aligned}$$

La position du point d'inflexion « y » est calculée en fonction des caractéristiques du portique.

On a : $Z = Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3$

- Z_0 coefficient fonction (rigidité moyenne « \bar{k}_j » ; du nombre de niveaux et de la position de l'étage dans le portique). (Voir tableaux I-a et I-b)

- Z_1 coefficient fonction de C_1 et de \bar{k}_j (Voir tableau II). ; $Z_1 = 0$ (1^{er} étage)

$$C_1 = \frac{K_j^w + K_j^e}{K_{j-1}^w + K_{j-1}^e} = \frac{K_{\text{sup}}}{K_{\text{inf}}} \quad (\text{Rapport entre la somme des rigidités des poutres supérieures et inférieures}).$$

Si $K_{\text{sup}} > K_{\text{inf}}$; on prend alors $C_1 = \frac{K_{\text{inf}}}{K_{\text{sup}}}$ et on affecte la valeur lue par le signe (-).

Pour $C_1 = 1$ on trouve $Z_1 = 0$

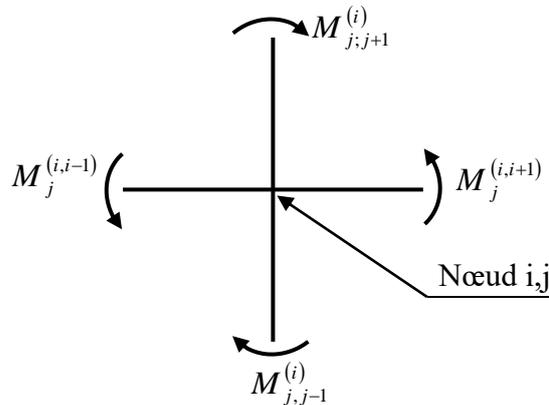
- Z_2 et Z_3 interviennent pour les cas où les étages supérieurs et/ou inférieurs à l'étage considéré ont une h_{calcul} différente. Donc $Z_2 = f(C_2; \bar{k})$ et $Z_3 = f(C_3; \bar{k})$ (Voir tableau III)

$$\text{avec : } C_2 = \frac{h_{j+1}}{h_j} - 1 \quad C_3 = \frac{h_{j-1}}{h_j} - 1 \quad Z_3 = 0 \text{ (dernier niveau)} \quad ; Z_3 = 0 \text{ (1er niveau)}$$

5-1-3 Cas des poutres :

Chaque nœud doit être en **équilibre** sous l'action des moments dans les poteaux et dans les poutres. On peut écrire alors :

$$M_{j,j+1}^{(i)} + M_{j,j-1}^{(i)} = M_j^{(i,i-1)} + M_j^{(i,i+1)} = M_j^{(i)} \quad (\text{Moment du nœud } i, j)$$



Compte tenu de l'hypothèse suivante : « Les moments de nœud sont distribués aux poutres respectives proportionnellement aux rigidités linéaires de celle-ci ». Nous avons :

$$\frac{M_j^{(i,i-1)}}{K_j^{(i,i-1)}} = \frac{M_j^{(i,i+1)}}{K_j^{(i,i+1)}} = \frac{M_j^{(i)}}{K_j^{(i,i-1)} + K_j^{(i,i+1)}}$$

Les moments aux extrémités des poutres seront alors :

$$M_j^{(i,i-1)} = \frac{K_j^{(i,i-1)}}{K_j^{(i,i-1)} + K_j^{(i,i+1)}} M_j^{(i)} \quad ; \quad M_j^{(i,i+1)} = \frac{K_j^{(i,i+1)}}{K_j^{(i,i-1)} + K_j^{(i,i+1)}} M_j^{(i)}$$

5-2 Effort tranchant dans les poutres : (dû aux forces horizontales)

$$V_w l + M_w + M_e = 0 \quad ; \quad V_w = -\frac{(M_w + M_e)}{l}$$

$$V_e = \frac{(M_w + M_e)}{l}$$

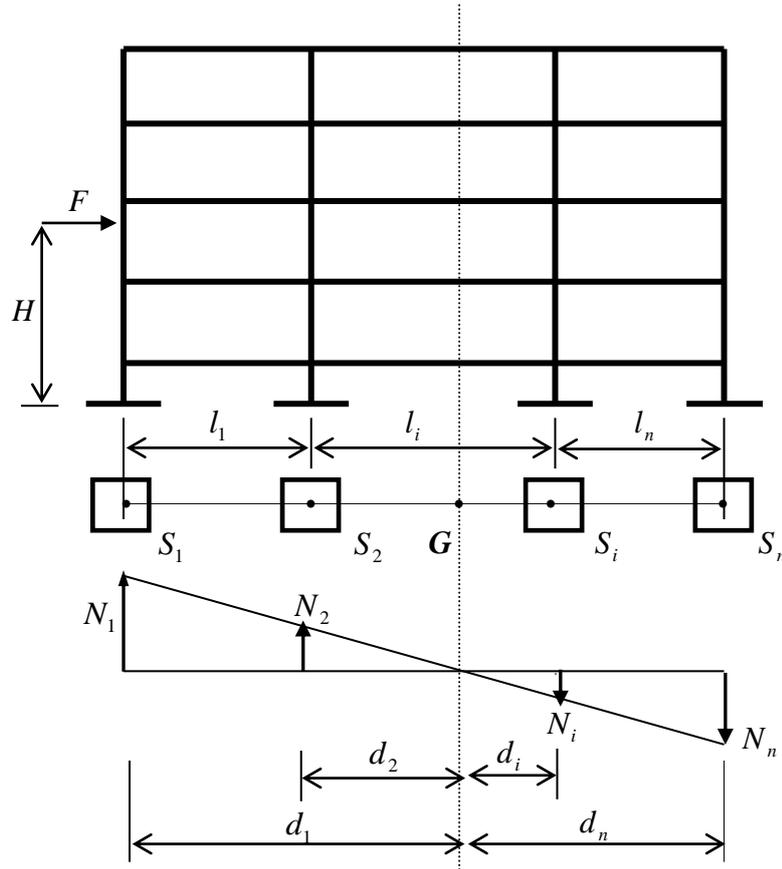
5-3 Efforts normaux dans les poteaux :

- **1^{ère} Méthode :**

L'effort normal est fonction de l'effort tranchant dans les poutres et vaut :

$$N_j = V_j^{(i,i+1)} - V_j^{(i,i-1)} + N_{(j+1)} \quad N_{(j+1)} - \text{effort normal dû aux charges verticales.}$$

- **2^{ème} Méthode :** (Méthode plus simple et plus rapide)



F est la résultante des efforts horizontaux dûe au séisme ou au vent.

Sous l'action du moment de renversement total $M_r = F.H = F_j h_j$, des efforts de traction ou de compression se produisent dans les poteaux.

Soient S_1, S_2, S_3 , et S_4 les sections des poteaux, au niveau des fondations déterminées en fonction de la descente de charges.

d_1, d_2, d_3 et d_4 les distances des poteaux au centre de gravité de l'ensemble de ces poteaux.

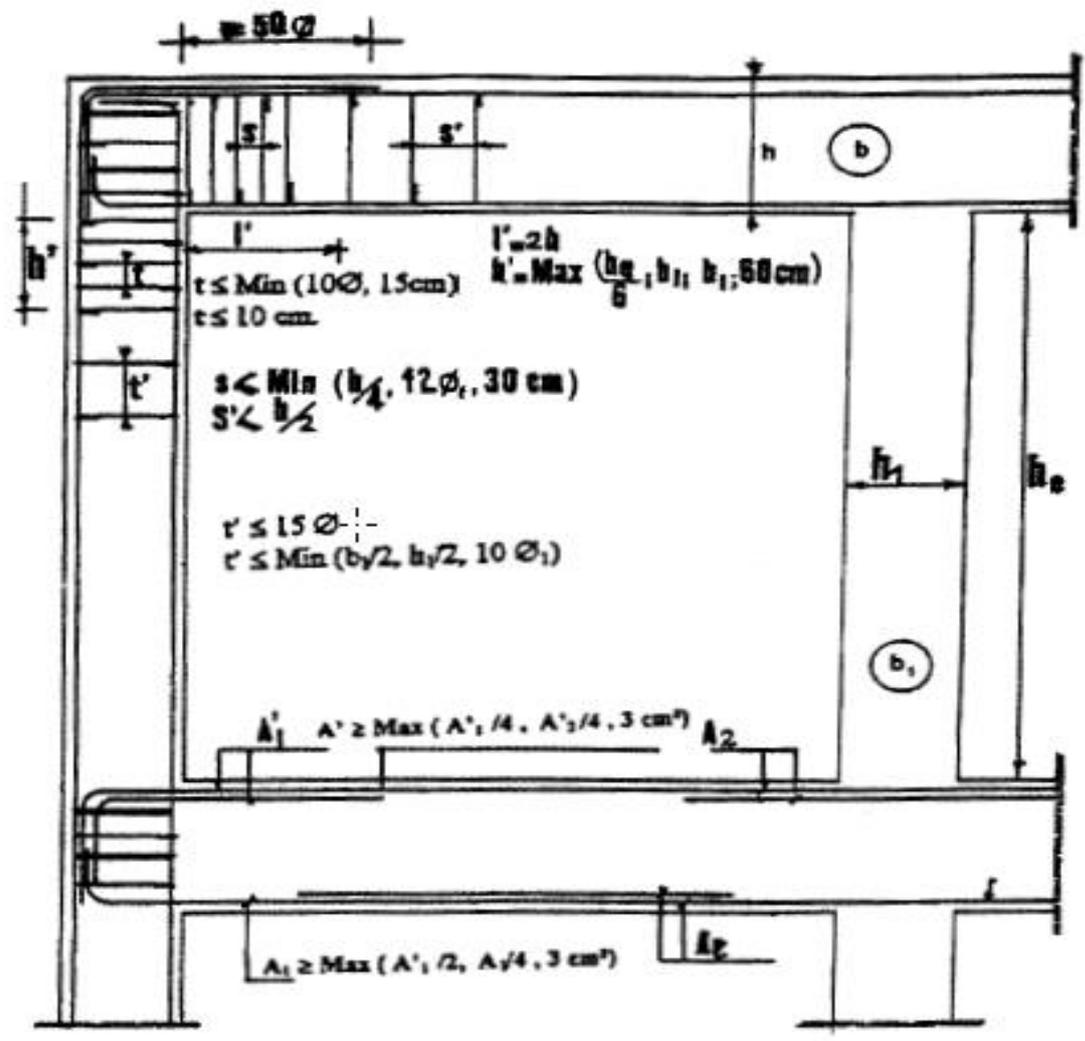
Le moment d'inertie de la section fictive regroupant les poteaux (i) est : $I_{iG} = \sum_1^n I_i + \sum_1^n S_i d_i^2$

D'après la loi de HOOKE on a : $\sigma_i = \frac{M_r}{I_{iG}} d_i$ et $N_i = \sigma_i \cdot S_i$

alors on peut écrire que : $N_i = \frac{M_r}{I_{iG}} S_i d_i$

NB : Voir applications au niveau des séances de TD.

6. Ferrailage :



Détail d'un cours d'armatures transversales de la zone nodale



2U superposés (avec alternance dans l'orientation)

Figure 6.1 : Dispositions constructives des portiques

Tableau I-a
Valeurs de Z_0 pour une charge triangulaire (séisme)

Nombre de niveaux	Rang du niveau	Z_0																		
		\bar{k}																		
		0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	2,00	3,00	4,00						
1	1	0,80	0,75	0,70	0,65	0,65	0,60	0,60	0,60	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55						
2	2	0,50	0,45	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45						
		1	1,00	0,85	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55					
3	3	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45						
		2	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50					
			1	1,15	0,90	0,80	0,75	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55				
4	4	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45						
		3	0,35	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50					
			2	0,70	0,60	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50				
		1	1,20	0,95	0,85	0,80	0,70	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55					
5	5	-0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45						
		4	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50	0,50					
			3	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50				
				2	0,75	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50			
					1	1,30	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55		
6	6	-0,15	0,05	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45						
		5	0,10	0,25	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50					
			4	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50				
				3	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50			
					2	0,80	0,65	0,55	0,55	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50		
						1	1,30	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	
7	7	-0,20	0,05	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,45	0,45	0,45						
		6	0,05	0,20	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45					
			5	0,20	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50				
				4	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50			
					3	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50		
						2	0,80	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
							1	1,30	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55
8	8	-0,20	0,05	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45						
		7	0,00	0,20	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45					
			6	0,15	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50				
				5	0,30	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50			
					4	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50		
						3	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
							2	0,85	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
								1	1,30	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,60	0,55

Suite

9	9	-,25	0,00	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45
	8	0,00	0,20	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50	0,50
	7	0,15	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	6	0,25	0,25	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50
	5	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	4	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	3	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	2	0,85	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	1	1,30	1,00	0,90	0,80	0,75	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55
10	10	-,25	0,00	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45
	9	-,05	0,20	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50	0,50
	8	0,10	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	7	0,20	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50
	6	0,30	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50
	5	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	4	0,50	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	3	0,60	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	2	0,85	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
	1	1,35	1,00	0,90	0,80	0,75	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55
11	11	-,25	0,00	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45
	10	-,05	0,20	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50	0,50
	9	0,10	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	8	0,20	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	7	0,25	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50
	6	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	5	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	4	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	3	0,65	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	2	0,85	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
	1	1,35	1,05	0,90	0,80	0,75	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55
≥ 12	n	-,30	0,00	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45
	n-1	-,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45
	n-2	0,05	0,25	0,30	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
	n-3	0,15	0,30	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
	n-4	0,25	0,35	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
	n-5	0,30	0,40	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	n-6	0,35	0,40	0,55	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	n-7	0,40	0,45	0,55	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	$5 \leq i \leq n-8$	0,45	0,45	0,55	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	4	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	3	0,65	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
2	0,85	0,70	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
1	1,35	1,05	0,90	0,80	0,75	0,70	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,60	0,55	

Tableau II

C_1	Z_1													
	\bar{k}													
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	2,00	3,00	4,00	
0,4	0,55	0,40	0,30	0,25	0,20	0,20	0,20	0,15	0,15	0,05	0,05	0,05	0,05	
0,5	0,45	0,30	0,20	0,20	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	
0,6	0,30	0,20	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	
0,7	0,20	0,15	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	
0,8	0,15	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,9	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tableau III

C_2	C_3	Z_2 et Z_3													
		\bar{k}													
		0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	2,00	3,00	4,00	
2,0		0,25	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	
1,8		0,20	0,15	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	
1,6	0,4	0,15	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	
1,4	0,6	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	
1,2	0,8	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1,0	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,8	1,2	-,05	-,05	-,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,6	1,4	-,10	-,05	-,05	-,05	-,05	-,05	-,05	-,05	-,05	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,4	1,6	-,15	-,10	-,10	-,05	-,05	-,05	-,05	-,05	-,05	-,05	0,00	0,00	0,00	
	1,8	-,20	-,15	-,10	-,10	-,10	-,05	-,05	-,05	-,05	-,05	-,05	0,00	0,00	
	2,0	-,25	-,15	-,15	-,10	-,10	-,10	-,10	-,10	-,05	-,05	-,05	-,05	0,00	

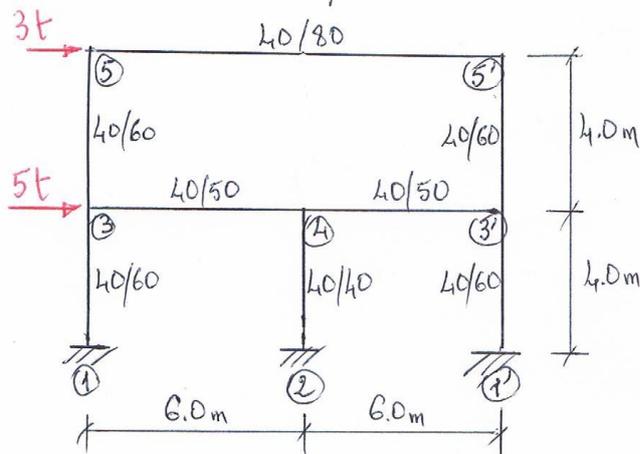
Tableau I-b
Valeurs de Z_0 pour une charge uniformément répartie (vent)

Nombre de niveaux	Rang du niveau	Z_0																		
		\bar{k}																		
		0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	2,00	3,00	4,00						
1	1	0,80	0,75	0,70	0,65	0,65	0,60	0,60	0,60	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55						
2	2	0,45	0,40	0,35	0,35	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45						
		1	0,95	0,80	0,75	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,60	0,60	0,55	0,55	0,55					
3	3	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30	0,35	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45						
		2	0,55	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50					
			1	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55				
4	4	0,05	0,05	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45						
		3	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,50	0,50					
			2	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50				
				1	1,10	0,90	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55			
5	5	-0,20	0,00	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45						
		4	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50					
			3	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50				
				2	0,65	0,65	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50			
					1	1,20	0,95	0,80	0,75	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55		
6	6	-0,30	0,00	0,10	0,20	0,25	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45						
		5	0,00	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,50					
			4	0,20	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50				
				3	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50			
					2	0,70	0,60	0,60	0,50	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50		
						1	1,20	0,95	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55	
7	7	-0,35	-0,05	0,10	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45						
		6	-0,10	0,15	0,25	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50					
			5	0,10	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50				
				4	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50			
					3	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50		
						2	0,75	0,60	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
							1	1,20	0,95	0,95	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55
								1	1,20	0,95	0,95	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55
8	8	-0,35	-0,15	0,10	0,15	0,25	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45						
		7	-0,10	0,15	0,25	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,50	0,50					
			6	0,05	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50				
				5	0,20	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50			
					4	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50		
						3	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	
							2	0,75	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
								1	1,20	1,00	0,85	0,85	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55

Suite

9	9	-,40	-,05	0,10	0,20	0,25	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,45	0,45	0,45
	8	-,15	0,15	0,25	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50
	7	0,05	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
	6	0,15	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	5	0,25	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	4	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	3	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	2	0,80	0,65	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	1	1,20	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55
10	10	-,40	0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45
	9	-,15	0,15	0,25	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50
	8	0,00	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
	7	0,10	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	6	0,20	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	5	0,30	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	4	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	3	0,55	0,50	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	2	0,80	0,65	0,55	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	1	1,30	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55
11	11	-,40	0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45
	10	-,15	0,15	0,25	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50
	9	0,00	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
	8	0,10	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	7	0,20	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	6	0,25	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	5	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	4	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	3	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	2	0,80	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	1	1,30	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55
≥ 12	n	-,40	0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,45	0,45
	n-1	-,15	0,15	0,25	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50
	n-2	0,00	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
	n-3	0,10	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	n-4	0,20	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	n-5	0,25	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	n-6	0,30	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50
	n-7	0,35	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	$5 \leq i \leq n-8$	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	4	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	3	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	2	0,80	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	1	1,30	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55

Solution " Portique soumis à des efforts horizontaux "



Les cotations données sont les entreaxes des poteaux et des poutres.
Portique en BA avec $E_{28} = 34500 \text{ MPa}$.

Calcul des inerties :

$$I_{1-3} = I_{1'-3'} = I_{3-5} = I_{3'-5'} = 40 \cdot \frac{60^3}{12} = 72 \cdot 10^4 \text{ cm}^4 ;$$

$$I_{2-4} = 40 \cdot \frac{40^3}{12} = 213333 \text{ cm}^4 ; \quad I_{3-4} = I_{4-3'} = 416667 \text{ cm}^4 ;$$

$$I_{5-5'} = 40 \cdot \frac{80^3}{12} = 1706667 \text{ cm}^4$$

Longueurs de Calcul :

$$l_{5-5'} = 11,4 + 0,8/2 = 11,80 \text{ m} ; \quad l_{3-4} = 5,5 + 0,5/2 = 5,75 \text{ m} = l_{4-3'}$$

$$h_{5-3} = h_{5'-3'} = 3,65 \text{ m} ; \quad h_{1-3} = h_{1'-3'} = 4,05 \text{ m} ; \quad h_{2-4} = 3,95 \text{ m}$$

Calcul des rigidités linéaires :

$$K_{1-3} = \frac{720000}{405} = 1778 \text{ cm}^3 = K_{1'-3'} = 1,778 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$K_{2-4} = \frac{213333}{395} = 540 \text{ cm}^3 ; \quad K_{3-5} = K_{3'-5'} = 1972,6 \text{ cm}^3 = \frac{720000}{365}$$

$$K_{3-4} = K_{4-3'} = \frac{416667}{575} = 724,6 \text{ cm}^3 ; \quad K_{5-5'} = \frac{1706667}{1180} = 1446,22 \text{ cm}^3$$

(1)

Calcul des R_j et des $a_j^{(k)}$:

a. Etage courant :

$$\bar{R}_{3-5} = \bar{R}_{3'-5'} = \frac{1446,3 + 724,6}{2 \cdot 1972,6} = 0,55$$

$$a_{3-5} = a_{3'-5'} = \frac{0,55}{2 + 0,55} = 0,215$$

b. Rez-de-chaussée :

$$R_{1-3} = R_{1'-3'} = \frac{724,6}{1778} = 0,407 \quad ; \quad a_{1-3} = a_{1'-3'} = \frac{0,5 + 0,407}{2 + 0,407} = 0,377$$

$$R_{2-4} = \frac{724,6 + 724,6}{540} = 2,68 \quad ; \quad a_{2-4} = \frac{0,5 + 2,68}{2 + 2,68} = 0,68$$

Calcul des rigidités de niveau :

$$R_{3-5} = R_{3'-5'} = \frac{12E}{h_{3-5}^2} K_{3-5} \cdot a_{3-5} = \frac{12 \cdot 345000}{365^2} \cdot 1972,6 \cdot 0,215 = 13,179 \text{ MN/m}$$

d'où la rigidité du 2^{ème} niveau : $R_2 = 13,179 \times 2 = 26,358 \text{ MN/m}$

$$R_{1-3} = R_{1'-3'} = \frac{12 \cdot 345000}{405^2} \cdot 1778 \cdot 0,377 = 16,918 \text{ MN/m}$$

$$R_{2-4} = \frac{12 \cdot 345000}{395^2} \cdot 540 \cdot 0,68 = 9,743 \text{ MN/m}$$

d'où la rigidité du 1^{er} niveau : $R_1 = 2 \cdot 16,918 + 9,743 = 43,58 \text{ MN/m}$

Calcul des efforts tranchants dans les poteaux :

$$V_j = \sum_1^n F_j \quad \text{donc au 2^{ème} niveau on aura : } V_2 = 3T = 30 \text{ kN}$$

$$V_{3-5} = V_{3'-5'} = V_2 \frac{R_{3-5}}{R_2} = 30 \times \frac{13,179}{26,358} = 15 \text{ kN}$$

Au 1^{er} niveau on aura : $V_1 = 8000 \text{ daN} = 80 \text{ kN}$

$$V_{1-3} = V_{1'-3'} = 80 \cdot \frac{16,918}{43,58} = 31,05 \text{ kN} \quad ; \quad V_{2-4} = 80 \cdot \frac{9,743}{43,58} = 17,88 \text{ kN}$$

(2)

Calcul des Moments fléchissants dans les poteaux:

Poteau 3-5:

- Le point d'inflexion se trouve à $\bar{z} = z_0 + z_1 + z_2 + z_3$
- z_0 est lu en fonction de $\bar{k}_{3-5} = 0,55$ dans l'abaque relatif à la charge linéaire. On trouve $z_0 = 0,40$
 - z_1 est lu en fonction de $\bar{k}_{3-5} = 0,55$ et $C_1 = \frac{K_{5-5'}}{K_{3-4}} = \frac{1446,32}{724,6}$.
comme $K_{5-5'} > K_{3-4}$ on prendra $C_1 = \frac{K_{3-4}}{K_{5-5'}} = \frac{724,6}{1446,32} = 0,5$ et on affectera d'un signe (-) la valeur de z_1 lue dans le tableau soit $z_1 = -0,15$; par ailleurs $z_2 = z_3 = 0$ (voir polycopié cours)
- Donc $\bar{z} = 0,40 - 0,15 = 0,25$

$$M_{3-5} = V_{3-5} \cdot \bar{z} h = 15 \cdot 0,25 \cdot 3,65 = 13,687 \text{ kNm} = M_{3'-5'}$$

$$M_{5-3} = V_{3-5} \cdot (h - \bar{z} h) = 15 (3,65 - 0,25 \cdot 3,65) = 41,062 \text{ kNm} = M_{5'-3'}$$

Poteau 1-3:

$\bar{k}_{1-3} = 0,407$ donc $z_0 = 0,70$ et $\bar{z} = 0,70$ car $z_1 = z_2 = z_3 = 0$

$$M_{1-3} = M_{1'-3'} = 31,05 \cdot 0,7 \cdot 4,05 = 88,02 \text{ kNm}$$

$$M_{3-1} = M_{3'-1'} = 31,05 (4,05 - 0,7 \cdot 4,05) = 37,72 \text{ kNm}$$

Poteau 2-4:

$\bar{k}_{2-4} = 2,68$ donc $z_0 = 0,55 = \bar{z}$ et $z_1 = z_2 = z_3 = 0$

$$M_{2-4} = 17,88 \cdot 0,55 \cdot 3,95 = 38,62 \text{ kNm}$$

$$M_{4-2} = 17,88 (3,95 - 0,55 \cdot 3,95) = 31,60 \text{ kNm}$$

Calcul des Moments fléchissants dans les poutres:

Poutre 5-5':

Nœud 5 = nœud 5': Equilibre du nœud $\Rightarrow \Sigma$ des Moments = 0

$$M_{5\text{est}} = M_{5\text{sud}} = M_{5-3} = 41,062 \text{ kNm} = M_{5'\text{ouest}}$$

(3)

Nœud 3 = Nœud 3' : $M_{3-4} = M_{3-1} + M_{3-5} = 37,72 + 13,68 = 51,41 \text{ kNm}$
 $= M_{3'-4}$

Nœud 4 : $M_{4-3} = M_{4-2} \frac{K_{4-3}}{K_{4-3} + K_{4-3'}} = 31,60 \cdot \frac{7246}{7246 + 7246} = 15,80 \text{ kNm}$

Calcul des efforts tranchants dans les poutres :

Poutre 5-5' : $V_5 = -V_{5'} = -\frac{M_5 + M_{5'}}{l} = -\frac{41,062 + 41,062}{11,80} = -6,96 \text{ kN}$

Poutre 3-4 : $V_3 = -V_4 = -\frac{(M_3 + M_4)}{l} = -\frac{51,41 + 15,80}{5,75} = -11,69 \text{ kN}$

Poutre 3'-4 : $V_{3'} = -V_4 = \frac{M_3 + M_4}{l} = \frac{51,41 + 15,80}{5,75} = 11,69 \text{ kN}$

Calcul des efforts normaux dans les poteaux (A la base du poteau) :

Moment de renversement $M_r = 30 \cdot 8 + 50 \cdot 4 = 440 \text{ kNm}$

- Section des poteaux : $S_1 = S_3 = 0,4 \cdot 0,6 = 0,24 \text{ m}^2$ et $S_2 = 0,4 \cdot 0,4 = 0,16 \text{ m}^2$
- Centre de gravité de la section fictive formée par les 3 poteaux passe par l'axe du poteau central donc on a : $x_1 = -6 \text{ m}$; $x_2 = 0$; $x_3 = 6 \text{ m}$.
- Moment d'inertie de la section fictive est :

$$I_{ig} = \sum I_i + \sum A_i x_i^2 = 2 \cdot 720000 + 213333 + 2 \cdot 0,24 \cdot 10^4 \cdot 600^2 = 172985 \cdot 10^4 \text{ cm}^4 = 17,3 \text{ m}^4$$

$$N_3 = -N_1 = \frac{440}{17,3} \cdot 6 \cdot 0,24 = 36,62 \text{ kN} ; N_2 = 0$$

(4)