

- Généralités sur les séismes :

Le mot séisme vient du grec seismos qui signifie « secousse ». C'est une série de secousses du sol, plus ou moins violentes, soudaines, imprévisibles et localisées. On parle également de tremblement de terre. Les séismes mettent en évidence l'activité interne de la planète Terre. Souvent, un séisme se compose d'une ou de plusieurs secousses principales, brèves (quelques dizaines de secondes) suivies par d'autres secousses (répliques) au cours des heures et jours suivants.

La terre n'est pas un astre mort mais une planète vivante : les séismes et les éruptions volcaniques sont l'expression de l'instabilité de l'écorce terrestre.

Un séisme, est provoqué par un brusque déplacement de matière en profondeur (foyer du séisme), il se produit lors d'un relâchement brutal des tensions (de part et d'autre d'une faille, par exemple) à l'intérieur de la croûte terrestre ; la rupture qui s'ensuit provoque des vibrations, légères ou fortes, de la surface du sol. Le foyer du séisme est le point initial de la rupture. Immédiatement au-dessus, l'épicentre est le lieu d'intensité maximale du choc en surface, les destructions sont les plus importantes : éboulements, ouverture de larges fissures dans le sol, effondrements de bâtiments.

Ces ondes de choc se propagent en cercles concentriques à partir du foyer et de l'épicentre, diminuant d'intensité à mesure qu'elles s'en éloignent.

La principale cause des tremblements de terre est liée à la tectonique des plaques et aux contraintes engendrées par les mouvements d'une douzaine de plaques majeures et mineures qui constituent la croûte terrestre. La plupart des séismes tectoniques se produisent aux limites des plaques, dans les zones où une plaque glisse le long d'une autre, il est difficile de les prévoir mais on peut diminuer les risques humains en évitant de construire dans les régions réputées dangereuses. Des règles de construction ont été mises au point, préconisant l'usage de matériaux dotés d'une certaine élasticité : béton armé et acier. Cependant ces normes antisismiques ne sont pas adoptées partout (souvent pour des raisons économiques), d'où les récents séismes meurtriers, comme celui de Boumerdes le 21 mai 2003.

5.1- Introduction:

L'étude sismique consiste à évaluer les efforts de l'action sismique sur notre structure. Pour cela, plusieurs méthodes approchées ont été proposées à fin d'évaluer les efforts internes engendrés à l'intérieur de la structure sollicitée.

-Calculs sismiques: c'est le calcul de la réponse sismique et la répartition des efforts dans les différents éléments de la structure

On distingue essentiellement deux méthodes d'analyse:

- **Analyse statique équivalente** : pour les bâtiments réguliers et moyennement réguliers, on peut simplifier les calculs en ne considérant que le premier mode de la structure (mode fondamental). Le calcul statique a pour but de se substituer au calcul dynamique plus compliqué en ne s'intéressant qu'à produire des effets identiques.
- **Analyse modale spectrale** : peut être utilisée dans tous les cas, et en particulier, dans le cas où la méthode statique équivalente n'est pas permise. On utilise directement les spectres de dimensionnement puisque ce sont surtout les maxima des réponses qui intéressent le concepteur et non la variation temporelle. Elle permet de simplifier les calculs. On procède alors à une analyse modale en étudiant un certain nombre de modes propres de la structure.

5.2- Méthode de calcul :

Le calcul de la réponse sismique et la répartition des efforts dans les différents éléments de la structure, on distingue principalement deux méthodes d'analyse :

1. Méthode d'analyse statique équivalente ;
2. Méthode d'analyse modale spectrale.

Pour l'évaluation des forces sismiques, on utilise le logiciel «**ETABS V9.7.4**» qui peut les calculer suivant différentes méthodes :(Réponse Spectrum Function, Time History Function, ...) « Réponse Spectrum Function» a été choisi parce qu'elle est basée sur la méthode dynamique modale spectrale et qui prend en compte la réponse de la structure suivant les modes déterminés en se basant sur les hypothèses suivantes **équivalente** et **la méthode dynamique modale spectrale**

- Masse supposée concentrée au niveau des nœuds principaux (nœud maître) ;
- Seul les déplacements horizontaux sont pris en compte ;
- Les planchers et les fondations sont considérés rigides dans leur plan ;

- Le nombre de mode à prendre en compte est tel que la somme des coefficients de participation modale soit au moins égale à 90%.

-Présentation du logiciel ETABS :

ETABS est un logiciel de calcul conçu exclusivement pour le calcul des bâtiments. Il permet de modéliser facilement et rapidement tous types de bâtiments grâce à une interface graphique unique. Il offre de nombreuses possibilités pour l'analyse statique et dynamique. Ce logiciel permet la prise en compte des propriétés non-linéaires des matériaux, ainsi que le calcul et le dimensionnement des éléments structuraux suivant différentes réglementations en vigueur à travers le monde (**Euro code**, UBC, ACI...Etc.).

De plus de par sa spécificité pour le calcul des bâtiments, ETABS offre un avantage certain par rapport aux codes de calcul à utilisation plus étendue. En effet, grâce à ces diverses fonctions il permet une descente de charge automatique et rapide, un calcul automatique du centre des masses et des rigidités, ainsi que la prise en compte implicite d'une éventuelle excentricité accidentelle. De plus, ce logiciel utilise une terminologie propre au domaine du bâtiment (plancher, dalle, trumeau, linteau etc.).

La modélisation des éléments structuraux est effectuée comme suit :

- Les voiles ont été modélisés par des éléments « SHELL » à quatre nœuds.
- Les dalles ont été modélisées par des éléments « SHELL » (dalles pleines).

La masse des planchers est calculée de manière à inclure la quantité βQ selon RPA99/version 2003 (dans notre cas β=0,2) correspondant à la surcharge d'exploitation.

La masse des éléments modélisés est introduite de façon implicite, par la prise en compte du poids volumique correspondant à celui du béton armé à savoir 2,5 t/m³.

5.2.1- Evaluation des efforts sismiques :

Pour la détermination de la fonction du spectre de réponse on utilise le programme « spectre » qui permet de donner les valeurs du spectre de réponse en fonction des périodes.

L'action sismique est représentée par le spectre de calcul suivant

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1,25A \left[1 + \frac{T}{T_1} \left(2,5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right] & \text{si } 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta(1,25A) \left(\frac{Q}{R} \right) & \text{si } T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta(1,25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & \text{si } T_2 \leq T \leq 3,0\text{sec} \\ 2,5\eta(1,25A) \left(\frac{T_2}{3,0} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & \text{si } T > 3,0\text{sec} \end{cases}$$

Avec : $\frac{\delta_a}{g}$: Spectre de Réponse de calcul.

et :

A : Coefficient d'accélération de zone.

η : Facteur de correction d'amortissement (quant l'amortissement est différent de 5%)

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0,7$$

ξ : pourcentage d'amortissement critique

Q : Facteur de qualité.

T_1, T_2 : périodes caractéristiques associées à la catégorie du site.

-Sol ferme \Rightarrow site 2 donc $T_1 = 0,15$ sec et $T_2 = 0,4$ sec.

D'après le R.P.A 99 (version 2003) , on a :

-Zone sismique IIa } $\Rightarrow (A = 0,15)$
 -Groupe d'usage 2 }

$\xi = 10\%$ - $\left\{ \begin{array}{l} \text{- voiles et murs en béton armé /maçonnerie.} \\ \text{-Remplissage léger.} \end{array} \right.$

$$\eta = \sqrt{7/(2 + 6)} = 0,9354 \geq 0,7$$

R : Coefficient de comportement de la structure.

-Mixte portiques/voiles : R = 5.

Q :le facteur de qualité de la structure est fonction de :

1-Conditions minimales sur les files de contreventement.

2-redondance en plan.

3-régularité en élévation.

4-régularité en plan

5-contrôle de qualité de matériaux.

6-contrôle de qualité de l'exécution.

$$Q = 1 + \sum Pq = 1 + (0,00 + 0,05 + 0,05 + 0,00 + 0,00 + 0,10) = 1,20.$$

5.3- Calcul des masses de la structure :

La valeur w à prendre en compte est égale à la somme des poids w_i calculés à chaque niveau i de la structure

$$w = \sum w_i \text{ avec } w_i = G_i + \beta P_i$$

G_i : poids du aux charges permanente et à celle des équipements fixés éventuelles solidaires de la structure.

P_i : charge d'exploitation.

β : Coefficient de pondération fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation

Pour notre projet $\beta = 0,2$

5.3.1- Détermination des poids (Wt) de la structure :

Prenons comme exemple :

Le niveau 1 (RDC):

La surface du plancher : $S = 429,38 \text{ m}^2$.

Poids de :

- Plancher $G \times S = 0,504 \times 404,066 + 25,32 \times 0,628 = 219,55 \text{ t}$
- Poteaux $n \times b \times h \times \gamma_b \times ht/2 = 56 \times 0,50^2 \times 2,5 \times 3,4 = 119 \text{ t}$
- poutre principale $b \times h \times \gamma_b \times \sum L = 0,35 \times 0,45 \times 2,5 \times 125,15 = 49,28 \text{ t}$.
- poutre secondaire..... $b \times h \times \gamma_b \times \sum L = 0,30 \times 0,35 \times 2,5 \times 125,6 = 32,97 \text{ t}$.
- les murs extérieurs..... $0,8 \times G_m \times h_t \times \sum L = 0,8 \times 0,262 \times 3,74 \times 124,34 = 97,47 \text{ t}$
- les murs voile..... $e_p \times h \times \gamma_b \times \sum L : 0,20 \times 3,74 \times 2,5 \times 44,52 = 83,25 \text{ t}$.
- les escaliers $p = G \times S = 6,24 \text{ t}$
- l'acrotère $G \times S = 0,171 \times 17,00 = 2,90 \text{ t}$
- les balcons..... $G \times S = 0,536 \times 10,8 = 5,78 \text{ t}$

G=616,44 t

La surcharge : $p=Q \times St$ (St : la surface totale du plancher)

$$p=0,15 \times 404,066+0,25 \times 6,24+0,35 \times 10,8+25,32 \times 0,1=68,48 \text{ t}$$

Le poids $W_t=G+\beta P = 616,44+0,2 \times 68,48=630,14 \text{ t}$

Wt = 630,14t

Les niveaux 2,3, :S =404,066 m²

- Plancher $G \times S = 0,504 \times 404,066=203,65 \text{ t}$
- Poteaux $n \times b \times h \times \gamma_b \times ht=107,10 \text{ t}$
- poutre principale $b \times h \times \gamma_b \times \sum L= 0,35 \times 0,45 \times 2,5 \times 125,15=49,28 \text{ t}$
- poutre secondaire..... $bx h \times \gamma_b \times \sum L= 32,97 \text{ t}$
- les murs extérieurs.....79,75 t
- les murs voile.....68,11 t
- les escaliers 6,24 t
- la balcons 15,91 t

G= 563,01 t

La surcharge : $p=Q \times St$ (St : la surface totale du plancher)

$$p=0,15 \times 404,066+0,25 \times 6,24+0,35 \times 15,91=67,73 \text{ t}$$

Le poids $W_t=G+\beta P = 563,01+0,2 \times 67,33$

Wt=576,55t

Les niveaux :4,5,6 :S=404,066m²

- Plancher 203,65 t
- Poteaux $56 \times 0,45^2 \times 2,5 \times 3,06=86,75 \text{ t}$.
- poutre principale 49,28 t
- poutre secondaire..... 32,97t
- les murs extérieurs..... 79,75 t
- les murs voile.....68,11 t
- les escaliers 6,24 t
- Les balcons..... 15,91 t

G=542,66 t

La surcharge : $p=Q \times St$ (St : la surface totale du plancher)

$$p=0,15 \times 404,066+0,25 \times 6,24+0,35 \times 15,91=67,73 \text{ t}$$

Le poids $W_t=G+\beta P = 542,66 + 0,2 \times 67,73$

Wt=556,20 t

Les niveaux :7,8,9 :S=404,066m²

- Plancher 203,65 t
- Poteaux 56 x0,40²x2,5x3,06=68,54 t.
- poutre principale 49,28 t
- poutre secondaire..... 32,97t
- les murs extérieurs..... 79,75 t
- les murs voile.....68,11 t
- les escaliers 6,24 t
- Les balcons..... 15,91 t

G=524,45t

La surcharge : p=Q x St (St : la surface totale du plancher)

$p=0,15 \times 404,066+0,25 \times 6,24+0,35 \times 15,91=67,73 \text{ t}$

Le poids $W_t=G+ \beta P =524,45 + 0,2 \times 67,73$

W_t=537,99t

Le niveau 10:

La surface du plancher : S=404,066 m².

Poids de :

- Plancher $G \times S = 0,628 \times 404,066 = 253,75 \text{ t}$
- Poteaux $n \times b \times h \times \gamma_b \times ht = 56 \times 0,40^2 \times 2,5 \times 3,06 / 2 = 34,27 \text{ t}$
- poutre principale 49,28 t.
- poutre secondaire.....32,97t.
- les murs extérieurs..... $0,8 \times G \times ht / 2 \times \sum L = 0,8 \times 0,262 \times (124,34 \times 3,06 / 2) = 39,87 \text{ t}$
- les murs voile..... $e_p \times h / 2 \times \gamma_b \times \sum L : 0,20 \times 2,5 \times 46,3 \times 3,06 / 2 = 34,05 \text{ t}$.
- l'acrotère $G \times S = 0,068 \times 124,34 \times 2,5 = 21,14 \text{ t}$
- les portes- à- faux..... $G \times S = 0,588 \times 29,7 = 17,46 \text{ t}$

G=482,79 t

La surcharge : $p=Q \times St$ (St : la surface totale du plancher)

$$p=0,1 \times (404,066+29,7)=43,37 \text{ t}$$

Le poids $W_t=G+ \beta P =482,79+0,2 \times 43,37=484,67 \text{ t}$

$$W_t = 491,46 \text{ t}$$

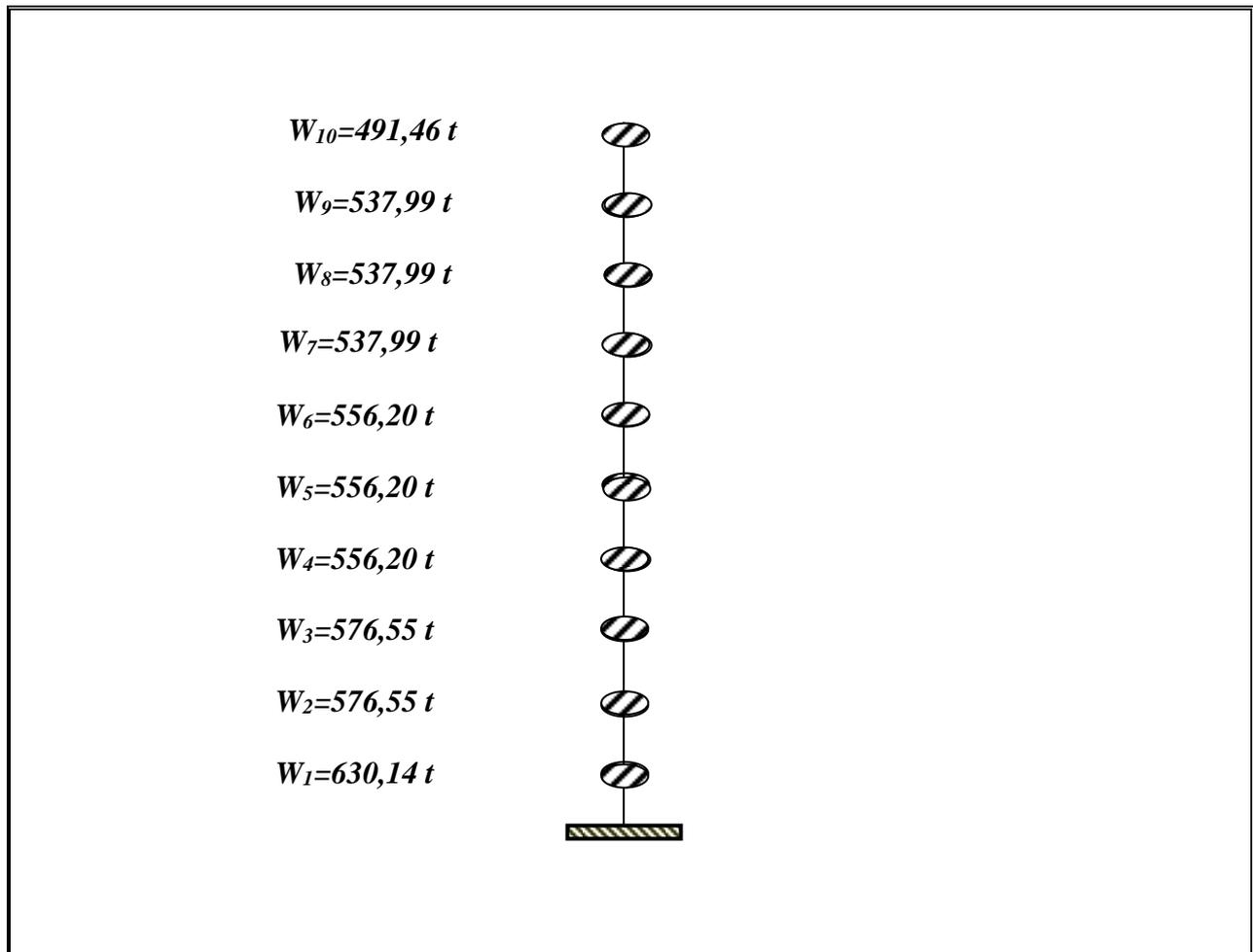


Figure 5.1- Poids de chaque étage.

5.3.2-Définition des masses:

On définit chaque masse ou moment d'inertie massique affectée aux nœuds de chaque niveau (Voir tableau V-I ci-après).

$$D'où: I_M = \frac{M}{S} (I_{x_g} + I_{y_g})$$

I_M : inertie massique (t.m²)

M:masse sismique qui égale au rapport W/g

W, le poids de chaque niveau i.

g : l'accélération de pesanteur 9,81.

S : surface du plancher.

I_{x_g} : inertie du plancher suivant l'axe X.

I_{y_g} : inertie du plancher suivant l'axe Y.

$$\begin{cases} X_G = x_g + 0,05L_{\max} \\ Y_G = y_g + 0,05L_{\max} \end{cases}$$

X_G et Y_G : coordonnées de l'excentricité fictive de 5% de la longueur max.

x_g et y_g : coordonnées du centre de gravité.

Tableau 5.1- Masse et moment d'inertie massique affectée aux nœuds de chaque niveau :

Im(t.m ²)	masse sismi M(t)	lyg(m ⁴)	lxg (m ⁴)	Yg (m)	Xg(m)	0,05Lx (m)	yg (m)	xg (m)	Superficie	poids W (t)	Niveaux
5286,70	64,23	25031,10	10310,73	10,45	14,96	1,37	9,08	13,59	429,38	630,14	1 ^{er}
5141,66	58,77	25033,16	10317,75	10,45	14,96	1,37	9,08	13,59	404,066	576,55	2 ^{ème}
5141,66	58,77	25033,16	10317,75	10,45	14,96	1,37	9,08	13,59	404,066	576,55	3 ^{ème}
4959,69	56,69	25033,16	10317,75	10,45	14,96	1,37	9,08	13,59	404,066	556,20	4 ^{ème}
4959,69	56,69	25033,16	10317,75	10,45	14,96	1,37	9,08	13,59	404,066	556,20	5 ^{ème}
4959,69	56,69	25033,16	10317,75	10,45	14,96	1,37	9,08	13,59	404,066	556,20	6 ^{ème}
4797,84	54,84	25033,16	10317,75	10,45	14,96	1,37	9,08	13,59	404,066	537,99	7 ^{ème}
4797,84	54,84	25033,16	10317,75	10,45	14,96	1,37	9,08	13,59	404,066	537,99	8 ^{ème}
4797,84	54,84	25033,16	10317,75	10,45	14,96	1,37	9,08	13,59	404,066	537,99	9 ^{ème}
4382,27	50,09	25033,16	10317,75	10,45	14,96	1,37	9,08	13,59	404,066	491,46	10 ^{ème}

5.4- Calcul de l'effort tranchant pour la méthode statique équivalent :

La force sismique totale V_t appliquée à la base de la structure, doit être calculée Successivement dans deux directions horizontales orthogonales selon la formule :

$$V = \frac{A.D.Q}{R}.W$$

A : coefficient d'accélération de zone.

D : facteur d'amplification dynamique moyen en fonction de la catégorie de site, du facteur de correction d'amortissement (η) et de la période fondamentale de la structure.

$$D = \begin{cases} 2,5\eta & \text{Si } 0 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & \text{Si } T_2 \leq T \leq 3,0 \text{ sec} \\ 2,5\eta \left(\frac{T_2}{3,0}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{3,0}{T}\right)^{5/3} & \text{Si } T > 3,0 \text{ sec} \end{cases}$$

W : le poids total de la structure :

R : coefficient de comportement global de la structure, il exprime la capacité de la structure à entrer dans le domaine plastique .Il dépend du type de la structure et de cas contreventement.

$$\text{Ou : } \begin{cases} A = 0,15. \\ Q = 1,20. \\ R = 5,0. \\ W = 4827,45 \text{ t} \end{cases} .$$

T_1, T_2 : période caractéristique associée à la catégorie du site.

-Sol meuble \Rightarrow site 2 donc $T_1 = 0,15 \text{ sec}$ et $T_2 = 0,5 \text{ sec}$.

5.4.1- Estimation de la période fondamentale de la structure :

La valeur de la période fondamentale (T) de la structure peut être estimée à partir de formules empirique en calculée par des méthodes analytiques ou numériques.

$$T = C_t \cdot h_n^{3/4} .$$

h_n : hauteur mesurée en mètres à partir de la base de la structure jusqu'à dernier niveau.

C_t : coefficient fonction du système de contreventement du type de remplissage.

$$T = C_T \cdot h_n^{3/4} \quad \text{Ou : } \begin{cases} h_n = 33,28 \text{ m} \\ C_T = 0,050. \end{cases}$$

$$\text{Donc : } T = 0,050 \cdot (33,28)^{3/4} = 0,69 \text{ sec} .$$

$$T_2 \leq T \leq 3,0 \text{sec.}$$

$$\Rightarrow D = 2,5 \eta_1 \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} = 2,5 \cdot 0,76 \cdot \left(\frac{0,5}{0,69} \right)^{2/3} = 1,53.$$

$$\text{Donc : } V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} \cdot W = \frac{0,15 \cdot 1,53 \cdot 1,20}{5} \times 4827,45 = 265,89 \text{t}$$

On doit vérifier que la résultante des forces sismiques à la base « V_t » obtenue par combinaison des valeurs modales ne doit pas être inférieure à 80% de la résultant de la force sismique déterminée par la méthode statique équivalente.

5.4.2- Sens longitudinal :

$$V_{dx} = 305,39 \text{ t} > 80\% V_{st} = 80\% \cdot 265,89 = 212,71 \text{ t} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée.}$$

5.4.3- Sens transversal :

$$V_{dy} = 372,98 \text{ t} > 80\% V_{st} = 80\% \cdot 265,89 = 212,71 \text{ t} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée.}$$

$$T_{dyn} = 0,82 < 30\% \cdot T = 1,3 \times 0,69 = 0,89 \text{sec} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée.}$$

5.5- Calcul des déplacements :

Sous l'action des forces horizontales ; la structure subira des déformations horizontales.

Pour éviter l'augmentation des contraintes dans les systèmes de contreventement, les déplacements doivent être calculés pour chaque élément de contreventement, les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents ne doivent pas dépasser 1,0% de la hauteur de l'étage.

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1} \leq \bar{\delta}_k \quad \text{avec } \delta_k = R \cdot \delta_{ek}$$

R : coefficient de comportement ; R= 5.

δ_{ek} : Déplacement du aux forces sismiques F_i (y compris l'effort de torsion).

Les deux tableaux (5.2 et 5.3) suivants résument les déplacements relatifs aux différents niveaux dans les deux sens longitudinal et transversal.

Tableau 5.2- les déplacements relatifs aux différents niveaux dans le sens longitudinal

Sens longitudinal			
Niveaux	δ_{ek} (m)	$\delta_k=R \cdot \delta_{ek}$	$\Delta_k=\delta_k -\delta_{k-1}$
terrasse	0,0183	0,0915	---
9	0,0163	0,0815	0,0105
8	0,0142	0,071	0,0105
7	0,0121	0,0605	0,0105
6	0,0099	0,0495	0,011
5	0,0077	0,0385	0,011
4	0,0056	0,028	0,0075
3	0,0036	0,018	0,006
2	0,002	0,01	0,0185
1	0,0007	0,0035	0,0035

Tableau 5.3- les déplacements relatifs aux différents niveaux dans le sens transversal

Sens transversal			
Niveaux	δ_{ek} (m)	$\delta_k=R \cdot \delta_{ek}$	$\Delta_k=\delta_k -\delta_{k-1}$
terrasse	0,0136	0,068	---
9	0,012	0,06	0,008
8	0,0103	0,0515	0,0085
7	0,0086	0,043	0,0085
6	0,0069	0,0345	0,008
5	0,0053	0,0265	0,0075
4	0,0038	0,019	0,002
3	0,0025	0,0125	0,0065
2	0,0013	0,0065	0,003
1	0,005	0,025	0,0035

On remarque que tous les déplacements relatifs ne dépassent pas les 1,0% de la hauteur d'étage $1,0\% h_e=0,0306$; donc la condition est vérifiée.