

V.1-Généralités sur les séismes

Le mot séisme vient du grec séisme 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, ou tremblement de terre, 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.

V.2-Introduction :

Il est nécessaire d'étudier le comportement ou bien la réponse de la structure sous l'action sismique pour garantir un degré de protection acceptable à la construction en cas de séisme ou tremblement de terre, et éviter au maximum les dégâts qui pourraient être provoqués par ce phénomène.

V.3-Calcul sismique :

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:

V.3.1-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.

V.3.2-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.

V.3.3-Méthode de calcul :

Pour l'évaluation des forces sismiques, on utilise le logiciel « ETABS » qui contient différentes méthodes de calcul sismique (Response Spectrum Function; Time History Fonction...) Pour notre cas, on a choisie « Response Spectrum Fonction » qui est basée sur la méthode dynamique modale spectrale, la méthode prend en compte la réponse de la structure suivant les modes déterminés en se basant sur les hypothèses suivantes:

- 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 massique soit au moins égale à 90%.

V.3.4-Conditions à vérifier :

Dans cette étude dynamique on doit s'assurer que :

- la période dynamique T_{dyn} ne doit pas être supérieure à la majoration de 30% de la période statique fondamentale T_{sta} :

$$T_{dyn} < 1,3 T_{sta}$$

- 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 résultante de la force sismique déterminée par la méthode statique équivalente :

$$V_{dx} > 80\% V_{st}$$

$$V_{dy} > 80\% V_{st}$$

- les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents ne doivent pas dépasser 1% de la hauteur de l'étage :

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1} \leq \overline{\delta}_k \text{ avec : } \delta_k = R \delta_{ek}$$

- **R** : Coefficient de comportement
- δ_{ek} : Déplacement du aux forces sismiques F_i (y compris l'effort de torsion)
- $\overline{\delta}_k$: Déplacement admissible (égale à 1% h_e)

- Justification vis-à-vis de l'effet P- Δ :

$$\theta = \frac{P_k \times \Delta_k}{V_k \times h_k} \leq 0,10$$

P_k : Poids total de la structure et des charges d'exploitation associées au dessus du niveau « K » :

V_k : Effort tranchant d'étage au niveau « K »

Δ_k : Déplacement relatif du niveau « K » par rapport à « K-1 ».

h_k : Hauteur de l'étage « K » :

- Si $0,10 < \theta_k \leq 0,20$, les effets P- Δ peuvent être pris en compte de manière approximative en amplifiant les effets de l'action calculés au moyen d'une analyse élastique du 1^o ordre par le facteur : $1/(1 - \theta_k)$;
- Si $\theta_k > 0,20$, la structure est partiellement instable et doit être redimensionnée.

- le facteur de participation massique dépasse 90 % : $\sum \overline{\alpha}_i \geq 90\%$:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\left(\sum_{K=1}^n W_K \Phi_{Ki} \right)^2}{\sum_{K=1}^n W_K \Phi_{Ki}^2} \times \frac{1}{\sum_{K=1}^n W_K}$$

Le logiciel Etabs peut déterminer directement les valeurs des coefficients de participation massiques.

- la distance entre le centre de masse et le centre de rigidité ; cette distance doit être très petite afin d'éviter des efforts de torsion élevés.

V.4-Méthode d'analyse modale spectrale :

V.4.1-Principe de la méthode :

Le principe de cette méthode est de rechercher, pour chaque mode de vibration, le maximum des effets qu'engendrent les forces sismiques dans la structure, représentées par un spectre de réponse de calcul. Ces effets seront combinés pour avoir la réponse de la structure.

La méthode la plus couramment employée pour le calcul dynamique des structures sont basées sur l'utilisation de spectre de réponse.

La méthode d'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.

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

V.4.2-Spectre de réponse de calcul :

L'action sismique est représenté par le spectre de calcul suivant :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1,25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \right) \left(2,5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta(1,25A) \times \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta(1,25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0 \text{ s} \\ 2,5\eta(1,25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3.0 \text{ s} \end{cases}$$

V.4.3-Calcul de la force sismique totale :

La force sismique totale V , appliquée à la base de la structure, doit être calculée Successivement dans deux directions horizontales orthogonales selon la formule 4.1 des

$$\text{RPA99/Version 2003 : } V = \frac{A \times D \times Q \times W}{R}$$

Avec :

A: Le coefficient d'accélération de zone A est donné par le tableau (4.1) du RPA en fonction de la zone sismique et le groupe d'usage du bâtiment. Dans notre cas nous avons une structure située en Zone (I) avec un groupe d'usage 2

Donc $A = 0,10$

D : Le Facteur d'amplification dynamique moyenne D est fonction de la catégorie de site, du facteur de correction d'amortissement (η) et de la période fondamentale de la structure (T) selon formule :

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

η : Le facteur de correction d'amortissement « η » est donnée par la formule suivante :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi}} \geq 0,7$$

ξ : Pourcentage d'amortissement critique en fonction du matériau constitutif du type de structure et de l'importance des remplissages, il est donné par le tableau(4.2)du RPA 2003.

$\xi = 10 \%$

Donc

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi}} = 0,76$$

T : La valeur de la période fondamentale « T » de la structure peut être estimée à partir de formules empiriques ou calculée par des méthodes analytiques ou numériques.

La formule empirique à utiliser selon les cas est la suivante :

$$T = C_T \cdot h_n^{3/4} \quad \text{d'ou : } \begin{cases} h_n = 25,03\text{m} \\ C_T = 0,050. \end{cases}$$

$$T = C_t h_N^{3/4}$$

h_N : Hauteur mesurée en mètres à partir de la base la structure jusqu'au dernier niveau

$$h_N = 25.03 \text{ m}$$

C_t : Coefficient en fonction du système de contreventement et du type de remplissage, il est donné par le tableau (4.6) du RPA 2003.

$$C_t = 0.05$$

$$T = C_t h_N^{3/4} = 0.050 \times 25.03^{3/4} = 0.56 \text{ sec}$$

(T₁, T₂) : Période caractéristique associé la catégorie du sol : (Tableau 4.7)

On a un sol meuble ⇒ site 3 donc : T₁ = 0,15 sec et T₂ = 0,5 sec

On a: T₂ ≤ T ≤ 3 s → 0.5 ≤ 0.56 ≤ 3

$$D = 2,5\eta \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = 2,5 \times 0.76 \times \left(\frac{0.5}{0.56}\right)^{\frac{2}{3}} = 1.76$$

Q : Facteur de qualité : $Q = 1 + \sum_1^5 P_q$

Critère q	Observé	Non observé
1. Condition minimales sur les filles de contreventement	0	0,05
2. Redondance en plan	0	0,05
3. Régularité en plan	0	0,05
4. Régularité en élévation	0	0,05
5. Contrôle de la qualité des matériaux	0	0,05
6. Contrôle de la qualité de l'exécution	0	0,10

Tableau V.1- Facteur de qualité

$$Q = 1 + (0,05 + 0,00 + 0,00 + 0,05 + 0,00 + 0,10) = 1,20$$

R : coefficient de comportement global de la structure, sa valeur unique est donnée par le (tableau 4.3) des RPA99/Version 2003 en fonction du système de contreventement.

$$R = 4$$

4.4-Le poids total de la structure :

Niveau	W(t)
Terrasse	323,6336
5	329,8572
4	307,9353
3	307,9353
2	303,8789
1	300,6331
RDC	300,6331
S-SOL	291,5916
TOTAL	2466 ,0981

Tableau V.2-Poids de la structure

V.5-Vérification des forces sismiques :($V_{dy} > 80\% V_{st}$) :

V.5.1-Le calcul de la force sismique totale :

$$V_{st} = \frac{A \times D \times Q \times W}{R} = \frac{0.10 \times 1.76 \times 1.20 \times 2466,0981}{4} = 130,21 \text{ t}$$

Les valeurs de la force sismique obtenue après l’analyse dynamique de l’ETABS :

	V_{dx} (t)	V_{dy} (t)
Forces sismiques	106,05	125,80

Tableau V.3-Valeurs de la force sismique totale

$V_{dx} = 106,05 \text{ t} > 80 \% V_{st} = 104,168 \text{ t} \dots\dots\dots$ condition vérifiée

$V_{dy} = 125,80 \text{ t} > 80 \% V_{st} = 104,168 \text{ t} \dots\dots\dots$ condition vérifiée

V.5.2-Vérification de la période fondamentale :

La valeur de la période du premier mode obtenu après l’analyse dynamique :

$T_{dyn} = 0,628 \text{ s}$

$T_{dyn} = 0,628 < 1,3 T_{sta} = 1,3 \times 0,56 = 0,728 \text{ sec} \dots\dots\dots$ condition vérifiée

V.5.3-Vérification des facteurs de participation massique :

Sens transversal :

$\Sigma\alpha_y = 93,6675\% > 90\%$ condition vérifiée.

Sens longitudinal :

$\Sigma\alpha_x = 95,1991\% > 90\%$ condition vérifiée.

Facteur de participation massique (%)							
Mode	Période	U _x	U _y	U _z	ΣUX	ΣUY	ΣUZ
1	0,626892	64,144	0,0014	0	64,144	0,0014	0
2	0,478501	0,0014	64,0696	0	64,1454	64,071	0
3	0,409977	0,3409	0,0006	0	64,4863	64,0717	0
4	0,143478	17,8638	0	0	82,3501	64,0717	0
5	0,110869	0	20,4303	0	82,3501	84,502	0
6	0,093113	0,261	0,0022	0	82,6111	84,5041	0
7	0,062892	5,9005	0	0	88,5115	84,5041	0
8	0,050564	0,0002	7,0993	0	88,5117	91,6034	0
9	0,042129	1,1455	0,0012	0	89,6572	91,6046	0
10	0,037903	1,8762	0,0001	0	91,5334	91,6047	0
11	0,031866	0,0003	3,5941	0	91,5337	95,1988	0
12	0,027753	2,1337	0,0003	0	93,6675	95,1991	0

Tableau V.4-facteur de participation massique

V.5.4-Les déplacements latéraux inter- étage :

Niveau	Déplacement maximum (m)	
	Sens x	Sens y
6	0,008990	0,000624
5	0,007545	0,000532
4	0,006067	0,000439
3	0,004598	0,000347
2	0,003206	0,000259
1	0,001955	0,000179
RDC	0,000941	0,000112
S-SOL	0,000169	0,000055

Tableau V.5-les déplacements latéraux inter-étage

Selon le RPA99/2003 (l'article 5.10), concernant les déplacements latéraux inter étages. La formule ci-dessous doit être vérifiée :

$$\Delta_x^k \leq \bar{\Delta}$$

$$\Delta_y^k \leq \bar{\Delta}$$

Avec :

$\bar{\Delta} = 0.01 h_e$, et h_e : la hauteur de l'étage.

$$\rightarrow \Delta_x^k = R \Delta_{ex}^k \text{ et } \Delta_y^k = R \Delta_{ey}^k$$

$$\Delta_{ex}^k = \delta_{ex}^k - \delta_{ex}^{k-1} \text{ et } \Delta_{ey}^k = \delta_{ey}^k - \delta_{ey}^{k-1}$$

Δ_{ex}^k : correspond au déplacement relatif au niveau k par rapport au niveau k-1 dans le sens x

δ_{ex}^k : le déplacement horizontal dû aux forces sismiques au niveau k dans le sens x (idem dans le sens y, δ_{ey}^k).

R : coefficient de comportement global de la structure, R= 4

NIVEAU	Δ_{ex} (m)	Δ_{ey} (m)	Δ_x (m)	Δ_y (m)	$\bar{\Delta}$ (m)	
6	0,001444	0,000091	0.005779	0.000367	0.0306	Vérifiée
5	0,001477	0,000092	0.005911	0.000371	0.0306	Vérifiée
4	0,001469	0,000091	0.005878	0.000367	0.0306	Vérifiée
3	0,00139	0,000087	0.005567	0.00035	0.0306	Vérifiée
2	0,001251	0,000080	0.005005	0.000321	0.0306	Vérifiée
1	0,001013	0,000066	0.004053	0.000267	0.0306	Vérifiée
RDC	0.000771	0,000056	0.003086	0.000227	0.0361	Vérifiée
S-SOL	0,000169	0,000055	0.000679	0.000223	0.0306	Vérifiée

Tableau V.6-vérifications des déplacements latéraux inter-étage

V.5.5-Justification Vis A Vis De l'effet P-Δ :

Selon le Rpa99/2003 (l'article 5.9), Les effet de deuxième ordre (ou l'effet de P-Δ) peuvent être négligés si la condition suivante est satisfaite à tous les niveaux :

$$\theta = \frac{P_k \cdot \Delta_k}{V_k \cdot h_k} \leq 0,10$$

Sens x :

NIVEAU	W_I (t)	P_K	Δ_k	V_K	h_i (m)	Θ
6	323,6336	323,6336	0.005779	299,36	3,06	0.002041
5	329,8572	653,4908	0.005911	503,88	3,06	0.002505
4	307,9353	961,4261	0.005878	661,05	3,06	0.002793
3	307,9353	1269,3614	0.005567	787,81	3,06	0.002957
2	303,8789	1573,2403	0.005005	887,4	3,06	0.002899
1	300,6331	1873,8734	0.004053	962,93	3,06	0.002577
RDC	300,6331	2174,5065	0.003086	1021,23	3,61	0.001820
S-SOL	291,5916	2466,0981	0.000679	1039,98	3,06	0.000526

Tableau V.7-Justification Vis A Vis De l'effet P-Δ(sens x)

Sens y :

NIVEAU	$W_I(t)$	P_K	Δ_k	V_K	h_i (m)	Θ
6	323,6336	323,6336	0.00036756	349,18	3,06	0.000011
5	329,8572	653,4908	0.00037144	593,46	3,06	0.000133
4	307,9353	961,4261	0.00036776	777,73	3,06	0.000148
3	307,9353	1269,3614	0.0003516	924,17	3,06	0.000053
2	303,8789	1573,2403	0.00032128	1042,88	3,06	0.000157
1	300,6331	1873,8734	0.00026776	1133,39	3,06	0.000144
RDC	300,6331	2174,5065	0.00022756	1205,14	3,61	0.000113
S-SOL	291,5916	2466,0981	0.00022316	1233,64	3,06	0.000145

Tableau V.8-Justification Vis A Vis De l'effet P- Δ (sens y)

$\Theta \leq 0,10 \Rightarrow$ Donc l'effet P- Δ est négligeable pour les deux directions transversale et longitudinale.

V.5.6-Vérification de la distance entre le centre de masse et le centre de rigidité :

L'excentricité accidentelle :

Dans l'analyse tridimensionnelle, une excentricité accidentelle (additionnelle) égale à $+0.05 L$, (L étant la dimension du plancher perpendiculaire à la direction de l'action sismique) doit être Appliquée au niveau du plancher considéré suivant chaque direction.

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

On peut directement introduire cette excentricité dans le logiciel Etabs

[Define \rightarrow Define response spectra \rightarrow Add new spectra \rightarrow Ecc. Ratio (All Diaph)]

plancher	W étage (t)	Centre de masse		Centre de torsion		Excentricité	
		x_G	y_G	x_{CR}	y_{CR}	e_x	e_y
Terrasse	323,6336	9,813	6,148	9,825	7,148	0,012	1,00
5	329,8572	9,733	5,994	9,825	6,827	0,092	0,833
4	307,9353	9,825	5,922	9,825	6,664	0	0,672
3	307,9353	9,825	5,922	9,825	6,316	0	0,394
2	303,8789	9,825	5,923	9,825	6,138	0	0,215
1	300,6331	9,825	5,924	9,825	6,038	0	0,114
RDC	300,6331	9,825	5,924	9,825	5,978	0	0,054
S-SOL	291,5916	9,825	5,924	9,825	5,978	0	0,054
TOTAL	2466,0981						

Tableau V.9-l'excentricité accidentelle