

V.1.Généralités sur les séismes :

Les tremblements de terre, sont très fréquents: chaque année sur la terre, il se produit en moyenne un million de séismes soit environ deux par minute. Certains sont violents et peuvent avoir des conséquences dramatiques. Beaucoup sont bénins et seulement perçu par des appareils d'enregistrement très perfectionnés. Tous sont des manifestations brutales de l'activité du globe.

Un tremblement de terre est caractérisé par des secousses plus ou moins violentes dont la durée ne dépasse pas quelques secondes ou quelques minutes. Les secousses violentes peuvent avoir pour conséquence non seulement la destruction ; mais aussi la déformation de voie de chemins de fer, l'apparition de fractures de sol...en quelques secondes des paysages peuvent être modifiés.

Lorsque les secousses se produisent sous la mer le long des côtes, elles propagent dans l'eau et provoquent des raz de marée. Les vagues peuvent atteindre une hauteur de plusieurs dizaines de mètres.

Tous les séismes ont pour origine une rupture brutale de roches se produisant dans un endroit situé entre 01 et 700 Km de profondeur appelé foyer du séisme (donc assez superficiellement par rapport au rayon de la terre). La rupture brutale donne naissance à des vibrations, autrement dit, à des ondes sismiques, celles-ci se propagent sous forme de sphère concentriques comparables aux rides qui naissent à la surface de l'eau de la terre est d'autant plus court que la distance parcourue est plus petite.

On peut mesurer l'intensité d'un séisme en évaluant les dégâts causés aux habitations humaines. L'échelle la plus récente dite M.S.K comporté 12 degrés.

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 :

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.

3.1.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.

3.2.Méthode du calcul:

Pour l'évaluation des forces sismiques, on utilise le logiciel « ETABS(v16.0.2)» qui contient différentes méthodes de calcul sismique (Réponse Spectrum Fonction; Time History Fonction...) Pour notre cas, on a choisie « Réponse 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%.

3.4.Conditions à vérifier :

Dans cette étude dynamique on doit s'assurer que :

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

$$T_{dyn} < 1.3 T_{sta}$$

2) 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 :

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

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

3) 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)

4) 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 : $\frac{1}{1 - \theta_k}$;
- Si $\theta_k > 0.20$, la structure est partiellement instable et doit être redimensionnée.

5) le facteur de participation massique dépasse 90 % : $\sum \bar{\alpha}_i \geq 90\%$:

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

Le logiciel Etabs(v16.0.2) peut déterminer directement les valeurs des coefficients de participation massiques.

6) 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 :

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.

4.2.Spectre de réponse de calcul :

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

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \right) \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A) \times \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0 \text{ s} \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3.0 \text{ s} \end{cases}$$

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 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 $A = 0.08$

- 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 :

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

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

$$h_N = 34,34 \text{ m}$$

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.

$$C_t = 0.05$$

$$\rightarrow T = C_t h_N^{3/4} = 0.050 \times 34,34^{3/4} = 0,709 \text{ sec}$$

(T_1, T_2) : Période caractéristique associé la catégorie du sol :(Tableau 4.7)

On a un sol meuble \Rightarrow site 3 donc : $T_1 = 0.15 \text{ sec}$ et $T_2 = 0.5 \text{ sec}$

$$\text{On a : } T_2 \leq T \leq 3 \text{ s} \rightarrow 0.5 \leq 0,709 \leq 3$$

$$\rightarrow D = 2.5\eta \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = 2.5 \times 0.76 \times \left(\frac{0.5}{0,709}\right)^{\frac{2}{3}} = 1.5$$

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

Tableau V. 1 : Facteur de qualité

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

$$Q = 1 + (0.00 + 0.05 + 0.00 + 0.05 + 0.00 + 0.10) = 1.20$$

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 :**Tableau V. 2 : Poids de la structure**

Niveau	W(t)
Terrasse	252,812
9	233,719
8	233,719
7	233,719
6	234,241
5	234,85
4	234,85
3	234,85
2	235,444
1	236,124
RDC	243,255
TOTAL	2607,583

4.5. Vérification des forces sismiques : ($V_d > 80\% V_{st}$) :**5.1. Le calcul de la force sismique totale :**

$$V_{st} = \frac{A \times D \times Q \times W}{R} = \frac{0,08 \times 1,5 \times 1,20 \times 2607,583}{4} = 93,87 \text{ t}$$

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

Tableau V.3 : Valeurs de la force sismique totale

	V_{dx} (t)	V_{dy} (t)
Forces sismiques	119,88	139,49

$$V_{dx} = 119,88 \text{ t} > 80 \% V_{st} = 75,09 \text{ t} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée}$$

$$V_{dy} = 139,49 \text{ t} > 80 \% V_{st} = 75,09 \text{ t} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée}$$

5.2.Vérification de la période fondamentale :

La valeur de la période du premier mode obtenu après l'analyse dynamique : $T_{dyn} = 0.857s$

$T_{dyn} = 0,857 < 1.3 T_{sta} = 1.3 \times 0,709 = 0,922 \text{ sec}$ condition vérifiée

5.3.Vérification des facteurs de participation massique :

Sens transversal :

$\Sigma\alpha_y = 92,918 \% > 90\%$ condition vérifiée.

Sens longitudinal :

$\Sigma\alpha_x = 93,5738\% > 90\%$ condition vérifiée.

Tableau V.4 : facteur de participation massique

		Facteur de participation massique (%)					
Mode	Période	U_x	U_y	U_z	ΣU_x	ΣU_y	ΣU_z
1	0,857112	69,5031	0	0	69,5031	0	0
2	0,675184	0	70,0226	0	69,5031	70,0226	0
3	0,559158	0,0042	0,0003	0	69,5072	70,0229	0
4	0,212648	16,7697	0	0	86,2769	70,0229	0
5	0,170853	0	17,1097	0	86,2769	87,1326	0
6	0,133207	0,0009	0	0	86,2778	87,1326	0
7	0,090994	6,6402	0	0	92,918	87,1326	0
8	0,075642	0	6,4412	0	92,918	93,5738	0
9	0,057167	0,0002	0	0	92,9182	93,5738	0
10	0,051427	3,3985	0	0	96,3168	93,5738	0
11	0,04446	0	3,1319	0	96,3168	96,7056	0
12	0,034569	1,8035	0	0	98,1203	96,7056	0

5.4. Les déplacements latéraux inter-étage :**Tableau V.5 :** les déplacements latéraux inter-étage

Niveau	Déplacement maximum (m)	
	Sens x	Sens y
10	0,016	0,011
9	0,014	0,010
8	0,013	0,009
7	0,011	0,008
6	0,009	0,006
5	0,007	0,005
4	0,005	0,004
3	0,004	0,003
2	0,002	0,002
1	0,001	0,001
RDC	0,0005	0,0004

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 :

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

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

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

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

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

NIVEAU	Δ_{ex} (m)	Δ_{ey} (m)	Δ_x (m)	Δ_y (m)	$\bar{\Delta}$ (m)	
10	0,002	0,001	0,008	0,004	0,0306	Vérifiée
9	0,001	0,001	0,004	0,004	0,0306	Vérifiée
8	0,002	0,001	0,008	0,004	0,0306	Vérifiée
7	0,002	0,002	0,008	0,008	0,0306	Vérifiée
6	0,002	0,001	0,008	0,004	0,0306	Vérifiée
5	0,002	0,001	0,008	0,004	0,0306	Vérifiée
4	0,001	0,001	0,004	0,004	0,0306	Vérifiée
3	0,002	0,001	0,008	0,004	0,0306	Vérifiée
2	0,001	0,001	0,004	0,004	0,0306	Vérifiée
1	0,0005	0,0006	0,002	0,0024	0,0306	Vérifiée
RDC	0,0001	0,0001	0,0004	0,0004	0,0374	Vérifiée

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 :

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

NIVEAU	W_I (t)	P_K	Δ_k	V_K	h_i (m)	θ
10	252,812	252,812	0,008	28,82	3,06	0,022
9	233,719	486,531	0,004	47,03	3,06	0,013
8	233,719	720,250	0,008	61,48	3,06	0,030
7	233,719	953,969	0,008	73,78	3,06	0,033
6	234,241	1188,21	0,008	84,33	3,06	0,036

5	234,85	1423,06	0,008	93,51	3,06	0,039
4	234,85	1657,91	0,004	101,32	3,06	0,021
3	234,85	1892,76	0,008	107,96	3,06	0,045
2	235,444	2128,204	0,004	113,27	3,06	0,024
1	236,124	2364,328	0,002	117,36	3,06	0,013
RDC	243,255	2607,583	0,0004	119,88	3,74	0,002

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

NIVEAU	W_i (t)	P_k	Δ_k	V_k	h_i (m)	θ
10	252,812	252,812	0,004	31,73	3,06	0,010
9	233,719	486,531	0,004	53,57	3,06	0,011
8	233,719	720,250	0,004	71,04	3,06	0,013
7	233,719	953,969	0,008	86,22	3,06	0,028
6	234,241	1188,21	0,004	99,24	3,06	0,015
5	234,85	1423,06	0,004	110,23	3,06	0,016
4	234,85	1657,91	0,004	119,48	3,06	0,018
3	234,85	1892,76	0,004	126,9	3,06	0,019
2	235,444	2128,204	0,004	132,69	3,06	0,020
1	236,124	2364,328	0,0024	137,08	3,06	0,013
RDC	243,255	2607,583	0,0004	139,49	3,74	0,0019

$\theta \leq 0.10 \Rightarrow$ Donc l'effet P- Δ est négligeable pour les deux directions transversale et longitudinale.

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 $\pm 0.05 L$, (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

Tableau V.9:l'excentricité accidentelle

plancher	W étage (t)	Centre de masse		Centre de torsion		Excentricité	
		x _G	y _G	x _{CR}	y _{CR}	e _x	e _y
terrasse	252,812	12,35	8,169	12,348	8,285	0,002	0,116
9	233,719	12,335	8,195	12,348	8,283	0,013	0,088
8	233,719	12,335	8,195	12,348	8,281	0,013	0,086
7	233,719	12,335	8,195	12,348	8,279	0,013	0,084
6	234,241	12,335	8,195	12,348	8,277	0,013	0,082
5	234,85	12,335	8,195	12,349	8,275	0,014	0,080
4	234,85	12,335	8,195	12,349	8,272	0,014	0,077
3	234,85	12,335	8,195	12,349	8,268	0,014	0,073
2	235,444	12,335	8,194	12,349	8,263	0,014	0,069
1	236,124	12,335	8,194	12,349	8,256	0,014	0,062
RDC	243,255	12,335	8,193	12,35	8,249	0,015	0,056
Total	2607,583						