

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.

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.

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(v9.7.0)» 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 .
- 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 : $1/(1 - \theta_k)$;
- 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.

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

$$h_N = 31,28 \text{ m}$$

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.

$$C_t = 0.05$$

$$\rightarrow T = C_t h_N^{3/4} = 0.050 \times 31,28^{3/4} = 0,65 \text{ sec}$$

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

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

$$\text{On a : } T_2 \leq T \leq 3 \text{ s} \rightarrow 0.5 \leq 0,65 \leq 3$$

$$\rightarrow D = 2.5\eta \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = 2.5 \times 0.76 \times \left(\frac{0.5}{0,65}\right)^{\frac{2}{3}} = 1.59$$

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

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	163,269
8	230,898
7	230,898
6	230,898
5	239,763
4	250,437
3	250,437
2	260,557
1	272,486
RDC	277,461
TOTAL	2407,104

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

$$V_{st} = \frac{A \times D \times Q \times W}{R} = \frac{0,08 \times 1,59 \times 1,20 \times 2407,104}{4} = 91,85 \text{ t}$$

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	190,63	180,32

$$V_{dx} = 190,63 \text{ t} > 80 \% V_{st} = 73,48 \text{ t} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée}$$

$$V_{dy} = 180,32 \text{ t} > 80 \% V_{st} = 73,48 \text{ t} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée}$$

5.2.Vérification de la période fondamentale :

La valeur de la période du premier mode obtenu après l'analyse dynamique : $T_{dyn} = 0.57s$

$T_{dyn} = 0,57 < 1.3 T_{sta} = 1.3 \times 0,65 = 0,862 \text{ sec} \dots \dots \dots$ condition vérifiée

5.3.Vérification des facteurs de participation massique :

Sens transversal :

$\Sigma\alpha_y = 93,651 \% > 90\% \dots \dots \dots$ condition vérifiée.

Sens longitudinal :

$\Sigma\alpha_x = 94,6538\% > 90 \% \dots \dots \dots$ 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	0,560349	74,7579	0,0948	0	74,7579	0,0948	0
2	0,541179	0,2073	67,6337	0	74,9652	67,7285	0
3	0,490473	1,6651	0,7098	0	76,6302	68,4383	0
4	0,183954	12,7861	0,0001	0	89,4163	68,4384	0
5	0,143491	0,0173	1,3551	0	89,4336	69,7935	0
6	0,135803	0,0013	16,7449	0	89,4349	86,5384	0
7	0,098323	5,0905	0	0	94,5254	86,5385	0
8	0,068097	0,0054	0,1273	0	94,5308	86,6658	0
9	0,063301	2,459	0,0005	0	96,9898	86,6663	0
10	0,059738	0,0009	6,9862	0	96,9907	93,6525	0
11	0,044575	1,4199	0,0003	0	98,4106	93,6528	0
12	0,041132	0,0025	0,0453	0	98,413	93,6981	0

Tableau V.5 : les déplacements latéraux inter-étage

Niveau	Déplacement maximum (m)	
	Sens x	Sens y
9	0,0095	0,0109
8	0,0091	0,0098
7	0,0084	0,0085
6	0,0076	0,0072
5	0,0066	0,0059
4	0,0055	0,0046
3	0,0043	0,0033
2	0,0031	0,0021
1	0,0019	0,0011
RDC	0,0008	0,0004

5.4. 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 :

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

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

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

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

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)	
9	0,0004	0,0011	0,016	0,0044	0,0306	Vérifiée
8	0,0007	0,0013	0,0028	0,0052	0,0306	Vérifiée
7	0,0008	0,0013	0,0032	0,0052	0,0306	Vérifiée
6	0,001	0,0013	0,004	0,0052	0,0306	Vérifiée
5	0,0011	0,0013	0,0044	0,0052	0,0306	Vérifiée
4	0,0012	0,0013	0,0048	0,0052	0,0306	Vérifiée
3	0,0012	0,0012	0,0048	0,0048	0,0306	Vérifiée
2	0,0012	0,0010	0,0048	0,0040	0,0306	Vérifiée
1	0,0011	0,0007	0,0044	0,0028	0,0306	Vérifiée
RDC	0,0008	0,0004	0,0032	0,0016	0,0374	Vérifiée