

V.1-Généralités sur les séismes

Un séisme ou un tremblement de terre se traduit en surface par des vibrations du sol .Il provient de la fracturation des roches en profondeur. Cette fracturation est due à une grande accumulation d'énergie qui se libère, en créant ou en faisant rejouer des failles, au moment où le seuil de rupture mécanique des roches est atteint.

La croûte terrestre est constituée de plusieurs grandes plaques qui évoluent les unes par rapport aux autres: certaines s'écartent, d'autres convergent, et d'autres coulissent. Environ 90% des séismes sont localisés au voisinage des limites de ces plaques.

Lorsque les contraintes dépassent un certain seuil, une rupture d'équilibre se produit et donne naissance aux ondes sismiques qui se propagent dans toutes les directions et atteignent la surface du sol. Ces mouvements du sol excitent les ouvrages par déplacement de leurs appuis et sont plus ou moins amplifiés dans la structure. Le niveau d'amplification dépend essentiellement de la période de la structure et de la nature du sol. Ce qui implique de bien faire toute une étude pour essayer de mettre en exergue le comportement dynamique de l'ouvrage.

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 du calcul:

Pour l'évaluation des forces sismiques, on utilise le logiciel « ETABS 9.7.4 » qui contient différentes méthodes de calcul sismique (Réponse Spectrum Fonction; Time Historie 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%.

V.3.4-Conditions à vérifier :

Dans cette étude dynamique on doit s'assurer que :

1) la période dynamique T_{dyn} ne doit pas être supérieur 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 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 :

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 RPA99/Version 2003 :

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

Avec :

- **A** : Le coefficient d'accélération de zone A est donne 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 (IIa) avec un groupe d'usage 2

Donc **A = 0,15**

- **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 :

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

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

$$h_N = 33,66 \text{ m}$$

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.

$$C_t = 0.05$$

$$\rightarrow T = C_t h_N^{3/4} = 0.05 \times 33,66^{3/4} = 0,70 \text{ sec}$$

(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 $T_2 = 0,5 \text{ sec}$

On a: $T_2 \leq T \leq 3 \text{ s} \rightarrow 0.5 \leq 0,70 \leq 3 \text{ s}$

$$\rightarrow D = 2,5\eta \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = 2,5 \times 0,76 \times \left(\frac{0,5}{0,7}\right)^{\frac{2}{3}} = 1,51$$

Q : 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.

$$R = 5$$

V.4.4-Le poids total de la structure :

Tableau V. 2 : Poids de la structure

Niveau	W(t)
10	345.984
9	347.905
8	347.905
7	354.746
6	362.704
5	362.704
4	362.704
3	362.704
2	366.871
1	371.596
RDC	371.596
TOTAL	3957.419

V.5-Vérification

V.5.1-Vérification des forces sismiques :($V_{dy} > 80\% V_{st}$) :

-Le calcul de la force sismique totale :

$$V_{st} = \frac{A \times D \times Q \times W}{R} = \frac{0,15 \times 1,51 \times 1,20 \times 3957,419}{5} = 215,12$$

Les valeurs de la force sismique obtenue après l'analyse dynamique de l'ETABS9.7.4 :

Tableau V.3 : Valeurs de la force sismique totale

	(t)	(t)
Forces sismiques	201,83	243,92

$$V_{dx} = 201,83 \text{ t} > 80 \% V_{st} = 172,10 \text{ t} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée}$$

$$V_{dy} = 243,92 \text{ t} > 80 \% V_{st} = 172,10 \text{ t} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée}$$

V.5.2-Vérification de la période fondamentale :

La valeur de la période du premier mode obtenu après l'analyse dynamique : $T_{dyn} = 0.89s$

$$T_{dyn} = 0,89 < 1,3 T_{sta} = 1,3 \times 0,7 = 0,91 \text{ sec} \dots\dots\dots \text{condition vérifiée}$$

V.5.3-Vérification des facteurs de participation massique :**Tableau V.4 : facteur de participation massique**

Mode	Période	Facteur de participation massique (%)					
		U _x	U _y	U _z	ΣUX	ΣUY	ΣUZ
1	0.89	70.958	0.0024	0	70.958	0.0024	0
2	0.63	0.0008	67.1267	0	70.9588	67.1291	0
3	0.51	0.0211	0.0001	0	70.9798	67.1292	0
4	0.24	14.7805	0.0023	0	85.7604	67.1315	0
5	0.14	0.0044	19.4064	0	85.7648	86.538	0
6	0.11	0.2404	0.0006	0	86.0052	86.5386	0
7	0.11	5.924	0.0009	0	91.9292	86.5395	0
8	0.064	3.2481	0.01	0	95.1773	86.5495	0
9	0.062	0.0108	6.7137	0	95.1881	93.2631	0

Sens transversal :

$\Sigma\alpha_y = 95,18\% > 90\%$ condition vérifiée.

Sens longitudinal :

$\Sigma\alpha_x = 93,26\% > 90\%$ condition vérifiée.

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

Niveau	Déplacement maximum (m)	
	Sens x	Sens y
10	0.0198	0,0133
9	0.0181	0,0118
8	0.0163	0,0103
7	0.0143	0,0088
6	0.0122	0,0072
5	0.0101	0,0058
4	0.0079	0,0043
3	0.0057	0,003
2	0.0036	0,0019
1	0.0019	0,0010
RDC	0.0006	0,0003

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.

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

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

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= 5

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	0.0017	0.0015	0.008	0.0075	0.0306	Vérifiée
9	0.0018	0.0015	0.009	0.0075	0.0306	Vérifiée
8	0.002	0.0015	0.01	0.0075	0.0306	Vérifiée
7	0.0021	0.0016	0.0105	0.008	0.0306	Vérifiée
6	0.0021	0.0014	0.0105	0.007	0.0306	Vérifiée
5	0.0022	0.0015	0.011	0.0075	0.0306	Vérifiée
4	0.0022	0.0013	0.011	0.0065	0.0306	Vérifiée
3	0.0021	0.0011	0.0105	0.0055	0.0306	Vérifiée
2	0.0017	0.0009	0.0085	0.0045	0.0306	Vérifiée
1	0.0013	0.0007	0.0065	0.0035	0.0306	Vérifiée
RDC	0.0006	0.0003	0.003	0.0015	0.0306	Vérifiée

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

Selon le RPA 99/2003 (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 :Sens-x :Tableau V.7 : Justification Vis A Vis De l'effet P- Δ (sens x)

NIVEAU	$W_I(t)$	P_K	Δ_K	$V_K(t)$	$h_i(m)$	θ
10	345.984	345.984	0.008	43.575	3.06	0.022
9	347.905	693.88	0.009	73.911	3.06	0.027611
8	347.905	1041.794	0.01	98.686	3.06	0.0344
7	354.746	1396.54	0.0105	120.326	3.06	0.0398
6	362.704	1759.24	0.0105	139.312	3.06	0.0433
5	362.704	2121.94	0.011	155.862	3.06	0.048
4	362.704	2484.65	0.011	169.9	3.06	0.0525
3	362.704	2847.356	0.0105	181.751	3.06	0.0537
2	366.871	3214.227	0.0085	190.971	3.06	0.0467
1	371.596	3585.82	0.0065	198.074	3.06	0.0384
RDC	371.596	3957.419	0.003	201.831	3.06	0.0192

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

NIVEAU	$W_I(t)$	P_K	Δ_K	$V_K(t)$	$h_i(m)$	θ
10	345.984	345.984	0.0075	53.513	3.06	0.0158
9	347.905	693.88	0.0075	92.495	3.06	0.018386
8	347.905	1041.794	0.0075	122.572	3.06	0.02
7	354.746	1396.54	0.008	148.816	3.06	0.0245
6	362.704	1759.24	0.007	171.793	3.06	0.0234
5	362.704	2121.94	0.0075	191.051	3.06	0.0272
4	362.704	2484.65	0.0065	207.244	3.06	0.0254
3	362.704	2847.356	0.0055	220.274	3.06	0.0232
2	366.871	3214.227	0.0045	230.835	3.06	0.0204
1	371.596	3585.82	0.0035	239.427	3.06	0.01713
RDC	371.596	3957.419	0.0015	243.924	3.06	0.00795

$\theta \leq 0,10 \Rightarrow$ 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**

L'excentricité est la distance entre le centre de gravité des masses et le centre de torsion.

Pour toutes les structures comportant des planchers ou diaphragmes rigides dans leur plan, le RPA99/Version2003 (art4.3.7) préconise de prendre en compte à chaque niveau et dans chaque direction une excentricité accidentelle par rapport au centre de torsion égale à la plus grande des deux valeurs suivantes :

5% de la plus grande dimension du bâtiment à chaque niveau (cette excentricité doit être prise de part et d'autre du centre du torsion).

L'excentricité théorique résultant des plans.

- L'excentricité théorique :

$$e_x = |X_G - X_{ct}|$$

$$e_y = |Y_G - Y_{ct}|$$

- l'excentricité accidentelle

$$\begin{cases} X_G = x_g + 0,15L_{max} \\ Y_G = y_g + 0,15L_{max} \end{cases}$$

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}	
10	347.966	14.13	9.03	14.14	8.89	0.01
9	347.905	14.13	9.03	14.17	8.73	0,04
8	347.905	14.13	9.02	14.16	8.65	0,03
7	354.746	14.13	9.02	14.16	8.62	0,03
6	362.704	14.13	9.02	14.15	8.62	0,02
5	362.704	14.13	9.02	14.15	8.63	0,02
4	362.704	14.13	9.02	14.15	8.64	0,02
3	362.704	14.13	9.01	14.14	8.65	0,01
2	366.871	14.13	9.01	14.14	8.66	0,01
1	371.596	14.13	9.01	14.14	8.66	0,01
RDC	371.596	14.13	9.001	14.14	8.66	0,01
Total	3959.401					