

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 :

Pour l'évaluation des forces sismiques, on utilise le logiciel « **ETABS V9.7.0** » qui contient différentes méthodes de calcul sismique (Response Spectrum Function; Time History Function...)

Pour notre cas, on a choisie « Response Spectrum Function » qui est basée sur la méthode dynamique modale spectrale qui 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 modale soit au moins égale à 90%.

V.3. Modélisation mathématique :

La modélisation est la recherche d'un modèle simplifié qui nous rapproche le plus possible du comportement réelle de la structure, on est confronté à un problème physique, possédant un nombre de degré de liberté (DDL) infini, qui doit être remplacé par un modèle ayant un nombre de DDL fini, et qui reflète avec une bonne précision les paramètres du système d'origine (la masse, la rigidité et l'amortissement). Vu que le calcul est très laborieux, et étant donné la difficulté et la complexité d'un calcul manuel des efforts internes

(Moments, efforts normaux, etc.) dans les éléments structuraux qui prend énormément de temps sans compter le retard et l'abattement en cas d'erreur de calcul, pour cette raison et vu le développement technologique en matière d'informatique et des différents logiciels on a utilisé le logiciel de calcul « ETABS » pour la modélisation de notre structure

V.4. Présentation du logiciel ETABS :

ETABS: (Extended Three Dimensional Analyses of Building Systems)

Est un logiciel de calcul conçu exclusivement pour le calcul des bâtiments basée sur la méthode des éléments finis, offre les performances de technologies d'aujourd'hui, il permet de modéliser facilement et rapidement tous types de bâtiments grâce à une interface graphique unique ce dernier offre la possibilité 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.

De plus pour le calcul des bâtiments, ETABS offre un certain avantage 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

ETABS permet également le transfert de donnée avec d'autres logiciels (*AUTOCAD, SAP2000*).

V.5. Utilisation de ce programme :

Le programme ETABS est un logiciel d'analyse statique et dynamique des structures Par la méthode des éléments finis, il offre les performances de technologie d'aujourd'hui, capacité de calcul et vitesse d'exécution. Cette étape consiste à construire un modèle équivalant au projet réel (conception géométrie et les liaisons entre les éléments de modèle).

Pour l'utilisation de ce programme on doit suivre les démarches suivantes : Il y a lieu de choisir une unité avant d'entamer une session ETABS, adoptant (KN.m)

- **Menu file /new model :**

- **Edit Grid Data :** nous permet de définir les grille à suivre prochainement
- **Define/ matériel :** permet de définir le matériau utilisé
- CONC (béton)
- STEEL (acier)

- OTHER (autre)
 - **Définir/Frame Section** : permet de définir le type d'élément : poutre (Beam), poteaux (Column), plancher (Slabs), voile (Walle) et le matériel utilisé, la dimension des sections, la disposition des armatures (enrobage nombre des barres)

- **Definir/static load case** : pour définir les cas des charges statiques (G, Q.....)

G : Charge permanente ou morte → DEAD

Q : Surcharge d'exploitation ou vivante → LIVE

- **Assign /joint /restreint** : pour définir le nombre de degrés de liberté de nœud maître (translation linéaire suivant X, Y et en rotation suivant Z)

- **Assign /joint /contraint** : pour l'affectation d'un diaphragme rigide

- **Assign/frame statique load /point and uniform** : Permet d'appliquer les charges réparties ou concentrées sur l'élément frame sélectionné

- **Définir/LoadCombinaison** : permet de définir les différentes combinaisons et leurs coefficients de pondération.

- E.L.U $1.35G + 1.5Q$

- E.L.S $G + Q$

- $0.8G + E$ $G + Q + E$ $G + Q + 1.2E$

- $0.8G - E$ $G + Q - E$ $G + Q - 1.2E$

- **Réponse Spectrum Function** : pour introduire la fonction de la réponse spectrale de la structure d'après un fichier texte.

- **Definir Response Spectrum Cases** : pour la nomination de l'effort sismique, et la détermination de leur sens d'application, l'amortissement, l'angle d'excitation et la portion d'excentricité

- **Analyse /Set option** : Pour pouvoir lancer le calcul des modes, il est essentiel de cocher l'option « Dynamic Analysis » pour spécifier le nombre des modes propres de vibration à calculer

- **Analyse /Run** : c'est la commande qui permet de lancer le calcul

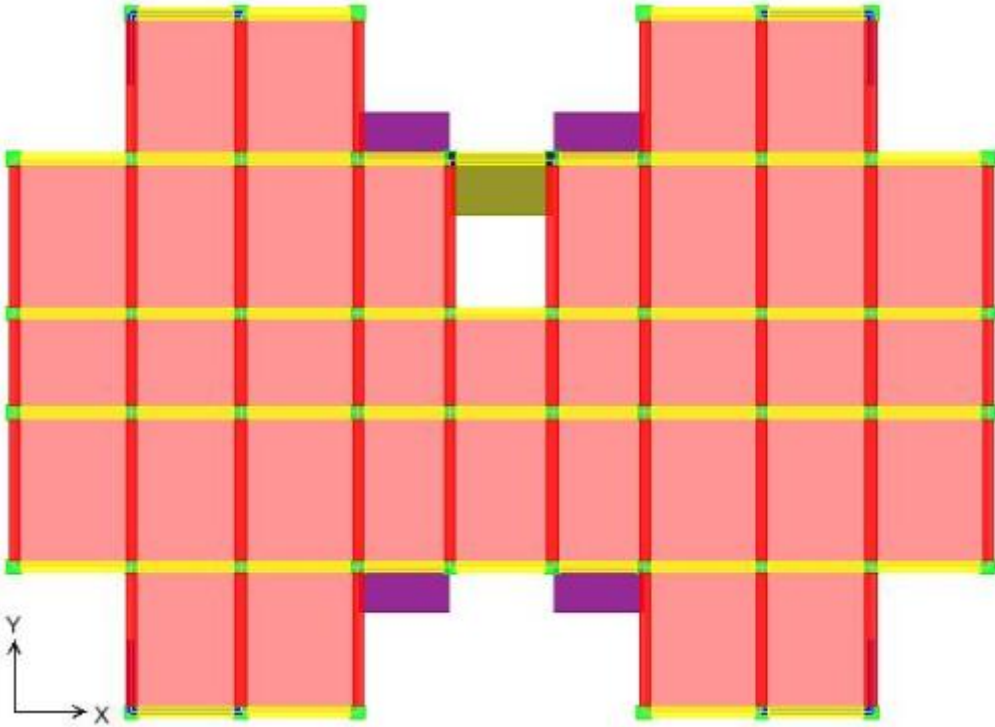


Figure.V.1 : Vue en plan de la structure.

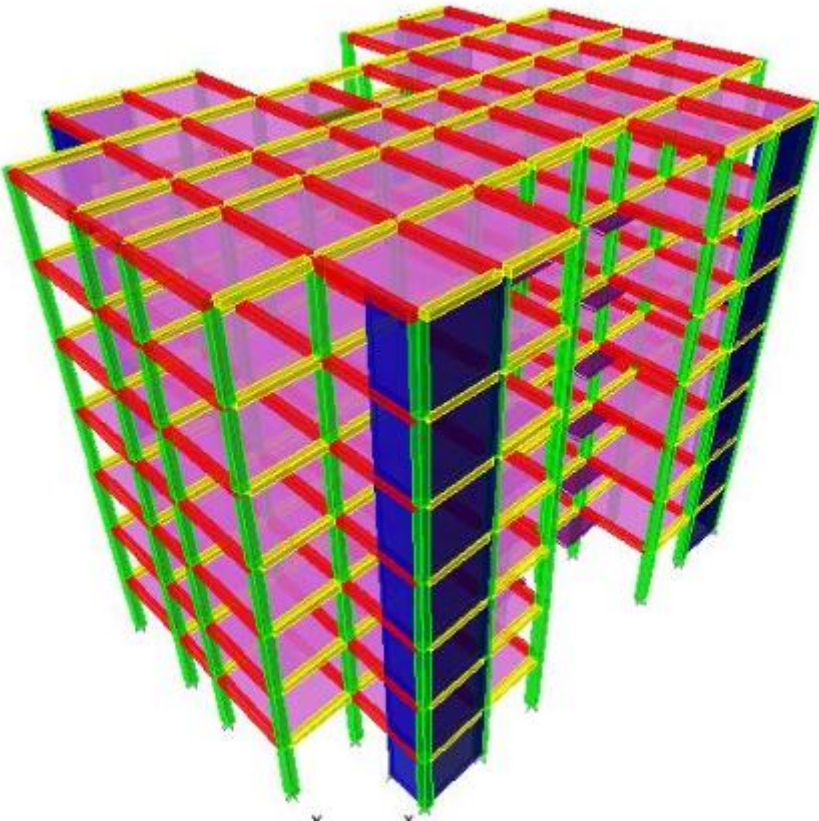


Figure.V.2 : Vue en 3D de la structure.

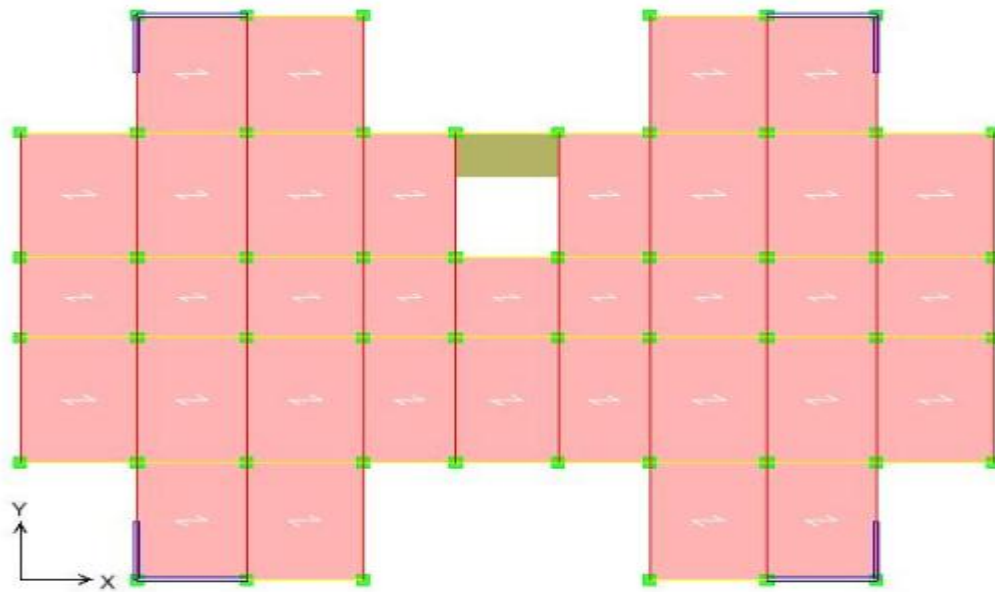


Figure.V.3 : Disposition des voiles dans la structure

V.6. 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.

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 meuble \Rightarrow site 3 donc $T_1 = 0,15$ sec et $T_2 = 0,5$ sec.

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

- Zone sismique I } $\Rightarrow (A = 0,10)$
 - Groupe d'usage 2 }

$\xi = 6\%$ - { -Portique en béton armé.
 -Remplissage léger.

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

R : Coefficient de comportement de la structure.

-Portique auto stable avec remplissage en maçonnerie rigide $R = 5$.

-Pour avoir la valeur de P_q tout dépend des six critères de Q.

- Critères :

- 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.

$$Q = 1 + \sum P_q = 1 + (0,00 + 0,00 + 0,05 + 0,00 + 0,00 + 0,10) = 1,15.$$

Calcul de D :

$$T = C_T \cdot h_n^{3/4} \quad \text{d'ou : } \begin{cases} h_n = 23,21\text{m} \\ C_T = 0,050. \end{cases}$$

$$\text{Donc : } T = 0,05 \times (23,21)^{3/4} = 0,53 \text{ sec} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\begin{cases} T_x = 0,09 \cdot (23,21) / \sqrt{27,85} = 0,40\text{s} \\ T_y = 0,09 \cdot (23,21) / \sqrt{20} = 0,47\text{s} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(2)$$

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

$$\Rightarrow D_x = 2,5\eta \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} = 2,5(0,94) \left(\frac{0,50}{0,40} \right)^{\frac{2}{3}} = 2,73$$

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

$$\Rightarrow D_Y = 2,5 \eta \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} = 2,5(0,94) \left(\frac{0,50}{0,47} \right)^{\frac{2}{3}} = 2,45$$

$$V_X = \frac{A.D.Q}{R} . W = \frac{0,10 \times 2,73 \times 1,15}{5} \times 27834,98 = 1747,76 \text{ KN}$$

$$V_Y = \frac{A.D.Q}{R} . W = \frac{0,10 \times 2,45 \times 1,15}{5} \times 27834,96 = 1568,50 \text{ KN}$$

V.7. 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 $\beta = 0,2$

V-7-1. Détermination des poids (Wt) de la structure :

Prenons comme exemple :

La terrasse :

S_t : la surface totale du plancher = 360,06 m²

Plancher..... $G \times S = (360,06)5,48 = 1973,13 \text{ KN}$

Acrotère..... $P = G \times \Sigma L_i = 1,73 \times 95,7 = 165,56 \text{ KN}$

Poutre principale $b \times h \times \gamma_b \times \sum L = 0,30 \times 0,35 \times 25 \times 167,7 = 440,21 \text{ KN}$

Poutre secondaire..... $b \times h \times \gamma_b \times \sum L = 0,30 \times 0,30 \times 25 \times 138,4 = 311,4 \text{ KN}$

$$\sum G = 2890,3 \text{ KN}$$

$$P = Q \times S_t = 1 \times 360,06 = 360,06 \text{ KN}$$

$$w = G + \beta P = 2890,3 + (0,2 \times 360,06) = 2962,31 \text{ KN}$$

le niveau 4 au 6 ème étages :

Plancher.....	$G \times S = 5,16 \times 354,59 = 1829,68 \text{ KN}$
Poteaux	$n \times b \times h \times \gamma_b \times ht/2 = 52 \times 0,35^2 \times 25 \times 1,615 = 257,19 \text{ KN}$
Poutre principale	$b \times h \times \gamma_b \times \sum L = 0,30 \times 0,35 \times 25 \times 167,7 = 440,21 \text{ KN}$
Poutre secondaire.....	$b \times h \times \gamma_b \times \sum L = 0,30 \times 0,30 \times 25 \times 138,4 = 311,4 \text{ KN}$
Les murs extérieurs.....	$0,8 \times G_m \times (h_t/2) \times \sum L = 0,8 \times 2,83 \times 1,615 \times 95,7 = 349,91 \text{ KN}$
Les murs voile.....	$e_p \times (h_t/2) \times \gamma_b \times \sum L = 0,15 \times 1,615 \times 25 \times 18,4 = 111,44 \text{ KN}$
Escalier.....	$(G_v \times S_v) + (G_p \times S_v) = (7,36 \times 3,5) + (4,87 \times 3,38) = 42,22 \text{ KN}$
Les balcons.....	$G \times S = 6,17 \times 9,7 = 59,85 \text{ KN}$

$$\sum G = 3401,9 \text{ KN}$$

$$P = Q \times St = 1,5 \times 354,49 = 531,74 \text{ KN}$$

$$w = G + \beta P = 3401,9 + (0,2 \times 531,74) = 3508,25 \text{ KN}$$

le niveau RDC au 3 ème étages :

Plancher.....	$G \times S = 5,16 \times 354,59 = 1829,68 \text{ KN}$
Poteaux	$n \times b \times h \times \gamma_b \times ht/2 = 52 \times 0,40^2 \times 25 \times 1,615 = 335,92 \text{ KN}$
Poutre principale	$b \times h \times \gamma_b \times \sum L = 0,30 \times 0,35 \times 25 \times 167,7 = 440,21 \text{ KN}$
Poutre secondaire.....	$b \times h \times \gamma_b \times \sum L = 0,30 \times 0,30 \times 25 \times 138,4 = 311,4 \text{ KN}$
Les murs extérieurs.....	$0,8 \times G_m \times (h_t/2) \times \sum L = 0,8 \times 2,83 \times 1,615 \times 95,7 = 349,91 \text{ KN}$
Les murs voile.....	$e_p \times (h_t/2) \times \gamma_b \times \sum L = 0,15 \times 1,615 \times 25 \times 18,4 = 111,44 \text{ KN}$
Escalier.....	$(G_v \times S_v) + (G_p \times S_v) = (7,36 \times 3,5) + (4,87 \times 3,38) = 42,22 \text{ KN}$
Les balcons.....	$G \times S = 6,17 \times 9,7 = 59,85 \text{ KN}$

$$\sum G = 3480,63 \text{ KN}$$

$$P = Q \times St = 1,5 \times 354,49 = 531,74 \text{ KN}$$

$$w = G + \beta P = 3480,63 + (0,2 \times 531,74) = 3586,98 \text{ KN}$$

Le poids total de la structure est de :

$$W_t = 27834,98 \text{ KN}$$

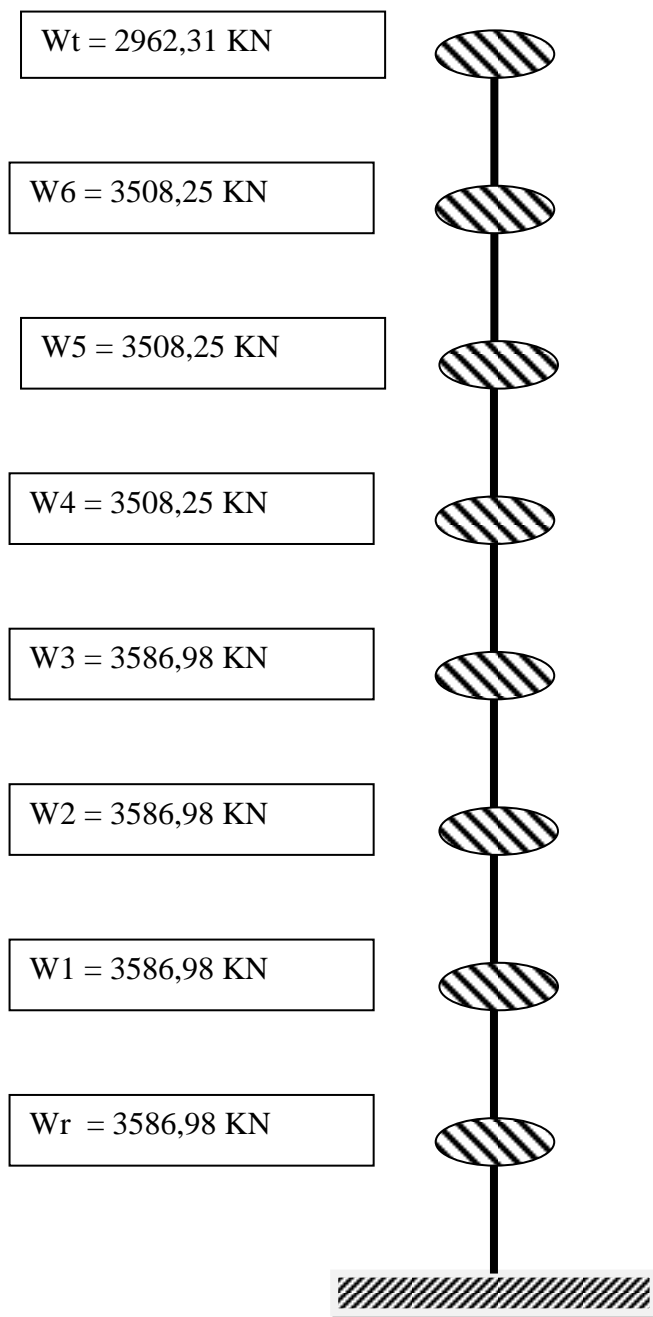


Figure V. 4 : Système ponctuelle de la structure

V.8. Calcul des forces sismiques :

Ils sont distribués horizontalement verticalement sur les éléments proportionnels à leurs rigidités par l'introduction d'un spectre de réponse dans deux directions orthogonale (X et Y)

$$\text{sens longitudinale : } V_x = \frac{A \times D_x \times Q}{R} \times W$$

$$\text{sens transversale : } V_y = \frac{A \times D_y \times Q}{R} \times W$$

V.8.1. Les vérifications :

- On vérifie que la période dynamique T_{dyn} ne doit pas être supérieure à la majoration de 30% de la période statique fondamentale T : $T_{dyn} < 30\%T_{sta}$

- On doit vérifier aussi 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 résultante de la force sismique déterminée par la méthode statique équivalente.

- Sens longitudinale : $V_{dx} > 80\%V_{st}$

- Sens transversal : $V_{dy} > 80\%V_{st}$

Suite à l'application du spectre de calcul dans les deux sens de la structure, les résultats sont comme suit:

Tableaux V.1. Valeurs de V_{sta} et V_{dyn}

Période dynamique	$1,3T_{sta}$	$T_{dyn} < 1,3T_{sta}$	V_{sta} (kN)	V_{dyn} (kN)	$V_{dyn} > 0,8V_{sta}$	Vérification
0,68	0,69	0,68 < 0,69	$V_x = 1747,76$	$V_x = 1968,33$	$1968,33 > 1398,21$	vérifiée
			$V_y = 1568,58$	$V_y = 2075,83$	$2075,83 > 1254,8$	vérifiée

V.8.2. Nombre de modes à considérer :

a) Pour les structures représentées par des modèles plans dans deux directions orthogonales, le nombre de modes de vibration à retenir dans chacune des deux directions d'excitation doit être tel que :

- la somme des masses modales effectives pour les modes retenus soit égale à 90 % au moins de la masse totale de la structure

- ou que tous les modes ayant une masse modale effective supérieure à 5% de la masse totale de la structure soient retenus pour la détermination de la réponse totale de la structure.

Le minimum de modes à retenir est de trois (03) dans chaque direction considérée.

b) Dans le cas où les conditions décrites ci-dessus ne peuvent pas être satisfaites à cause de l'influence importante des modes de torsion, le nombre minimal de modes (K) à retenir doit être tel que : $K \geq 3N$ et $T_k \leq 0.20$ sec

Où : N est le nombre de niveaux au-dessus du sol et T_k la période du mode K.

Tableaux V.2. Nombre de modes à considérer

structure	Avec voile			Sans voile		
	Mode	Période	SumUX	SumUY	Période	SumUX
1	0,68178	0,0112	68,625	1,158478	22,8511	0,0138
2	0,635925	65,515	68,9282	0,870595	69,5044	13,9724
3	0,534279	70,2498	75,3527	0,7412	79,1956	80,0351
4	0,205868	70,2746	88,8812	0,38389	82,4887	80,0354
5	0,158001	88,8302	88,8848	0,299316	89,3727	81,9067
6	0,127836	88,9184	89,364	0,248439	91,1782	92,1914
7	0,103475	88,9256	94,5533	0,218479	92,3922	92,1929
8	0,071983	95,4684	94,5548	0,177623	94,6206	92,8543
9	0,064269	95,4704	97,3439	0,145115	95,1888	92,8916
10	0,057299	95,4786	97,3878	0,142144	95,8993	96,0739
11	0,045715	95,4855	98,9324	0,123901	97,0479	96,4137
12	0,04524	98,2198	98,9386	0,10827	97,5475	96,4219

On va voir qu' il faut seulement 8 modes pour mobiliser plus de 90% de la masse totale de la structure (U_x et $U_y \geq 90\%$).

On constate aussi que dès le 8^{ème} mode nous avons déjà :

$$U_x = 95,4684 \% ; \quad U_y = 94,5548 \%$$

Ce que veut dire que 98% de l'énergie induite à la structure à été déjà absorbée.

V.8.3. Calcul des coefficients de participation modale :

On doit vérifier que : $\sum \bar{\alpha}_i \geq 90\%$ avec :

$$\bar{\alpha}_i = \frac{(\sum_{k=1}^n W_k \Phi_{Ki})^2}{\sum_{k=1}^n W_k \Phi_{Ki}^2} \times \frac{1}{\sum_{k=1}^n W_k}$$

$$W = \sum W_k : \text{poids totale de la structure en KN}$$

Le logiciel ETABS peut déterminer directement les valeurs des coefficients de participation modale, les valeurs données sont :

Tableaux V.3. Valeur de coefficient de participation modale de la structure

$W_{tot} \text{ KN}$	Sens longitudinal $\sum \alpha_x$	Sens transversal $\sum \alpha_y$	Vérification
27834,98	98,2198 > 90%	98,9386 > 90%	C.V

V.8.4. Excentricité accidentelle :

Tableau V.4 : 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	292,23	13,76	9,937	12,188	10,113	1,572	-0,176
6	350,83	13,76	9,937	11,695	10,294	2,065	-0,357
5	350,83	13,76	9,939	11,763	10,459	1,998	-0,52
4	350,83	13,76	9,941	11,914	10,59	1,847	-0,649
3	358,70	13,76	9,941	12,071	10,698	1,69	-0,757
2	358,70	13,76	9,941	12,202	10,78	1,559	-0,839
1	358,70	13,76	9,878	12,272	10,823	1,487	-0,945
RDC	358,70	13,76	9,878	12,272	10,823	1,487	-0,945
Total	2779,52						

V.8.5. Déplacement relatif admissible :

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, L'article 5.10 du **RPA** exige à ce que les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents, ne doivent pas dépasser 1,0% de la hauteur d'étage.

L'une des vérifications préconisées par le RPA99/version 2003, concerne les déplacements latéraux inter-étages, En effet, selon l'article 5,10 du RPA99/version 2003, l'inégalité ci-dessous doit nécessairement être vérifiée :

$$\Delta_x^k \leq \bar{\Delta} \text{ et } \Delta_y^k \leq \bar{\Delta}$$

Avec:

$\bar{\Delta} = 0,01h_e$ où h_e : Hauteur de l'étage,

Avec : $\Delta_x^k = R\Delta_{ex}^k$ et $\Delta_y^k = R\Delta_{ey}^k$

Où ; $\Delta_{ex}^k = \delta_{ex}^k - \delta_{ex}^{k-1}$ 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 (idem dans le sens y, Δ_{ey}^k),

Avec :

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

Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau V.5: Déplacement relatif admissible suivant le sens x

Niveaux	Diaphragm	Ux	D = 1 rad% . <i>h_e</i>	Condition
Terrasse	D7	0,0002	0,0323	Condition vérifiée
6	D6	0,0002	0,0323	Condition vérifiée
5	D5	0,0001	0,0323	Condition vérifiée
4	D4	0,0001	0,0323	Condition vérifiée
3	D3	0,0001	0,0323	Condition vérifiée
2	D2	0	0,0323	Condition vérifiée
1	D1	0	0,0323	Condition vérifiée

Tableau V.6: Déplacement relatif admissible suivant le sens Y

Niveaux	Diaphragm	UY	$D = 1_{rad} \% \cdot h_e.$	Condition
Terrasse	D7	0,0013	0,0323	Condition vérifiée
6	D6	0,0011	0,0323	Condition vérifiée
5	D5	0,0009	0,0323	Condition vérifiée
4	D4	0,0007	0,0323	Condition vérifiée
3	D3	0,0005	0,0323	Condition vérifiée
2	D2	0,0003	0,0323	Condition vérifiée
1	D1	0,0001	0,0323	Condition vérifiée

La stabilité de la structure est vérifiée