

III-1- Introduction

Pour illustrer l'effet du système d'isolation parasismique sur les réponses des structures isolées, deux études comparatives ont été faites. La première est la comparaison des réponses d'une structure avec le système d'isolation et sans le système d'isolation et la deuxième est l'étude de l'influence de la hauteur sur l'efficacité du système d'isolation.

Dans ces études, il y a plusieurs programmes numériques qui peuvent être utilisés pour la modélisation des systèmes d'isolation et l'analyse des structures isolées. Ces programmes commencent par des approches simples qui admettent la superstructure comme rigide et le comportement non linéaire considéré au niveau du système d'isolation parasismique seulement. Cependant, avec l'amélioration des technologies et la diminution du temps de traitement d'ordinateur, des programmes de calcul puissants ont été développés pour l'analyse et la conception des structures compliquées avec une prise en considération du comportement non linéaire pour le système d'isolation et la superstructure [13],[24].

N-PAD est le premier programme de calcul développé spécifiquement pour l'analyse des structures isolées. Ce programme est basé sur une modélisation explicite pour les éléments du système d'isolation, mais il adopte une modélisation simplifiée pour la superstructure. Cette approche repose sur l'effet du système d'isolation à la base qui réduit considérablement les forces du séisme transmises à la superstructure.

Le 3D-BASIS est le programme de calcul le plus utilisé dans l'analyse des structures isolées. Il représente la superstructure avec un modèle élastique linéaire semblable au N-PAD. Ce programme contient les différents modèles du système d'isolation parasismique pour capturer le comportement bilinéaire, frictionnel et linéaire visqueux de ces modèles.

D'autres programmes de calcul « SAP2000 » et « ETABS » sont plus sophistiqués et fiables pour l'analyse des structures isolées. Les deux programmes ont des capacités d'exécution de l'analyse statique équivalente, l'analyse modale spectrale et l'analyse dynamique linéaire et non linéaire par accélérogramme avec une interface graphique puissante et une facilité d'utilisation, mais aussi chaque programme a également ses propres caractéristiques.

SAP2000 : Capable d'analyser n'importe quel type de structure isolée telle que les structures des bâtiments et des ponts.

ETABS : Développé principalement pour l'analyse des structures avec système d'isolation à la base des bâtiments.

Dans le cadre de ce travail, nous utiliserons le programme ETABS pour les structures isolées et encastrees.

III-2- Comparaison des réponses d'une structure isolée avec et sans le système d'isolation

Nous montrons l'effet du système d'isolation parasismique sur les réponses des structures isolées par une analyse numérique faite sur une structure à huit niveaux à l'aide d'un programme numérique d'analyse dynamique des structures (ETABS). Cette analyse consiste à comparer les réponses de la structure isolée et celles de la même structure sans le système d'isolement.

III-2-1- Description de la structure

La structure utilisée dans l'étude comparative est un bâtiment à huit niveaux en béton armé de forme rectangulaire en plan de 12×24 m² comportant quatre travées dans le sens longitudinal et deux travées dans le sens transversal avec une longueur de 6 m chacune. Les poutres sont de section 30×60 cm², les poteaux sont de section 50×50 cm² et la hauteur d'étage est de 3 m avec des dalles pleines de 18 cm d'épaisseur. Cette structure est analysée avec et sans le système d'isolation comme elle est représentée respectivement sur les figures 42 et 43.

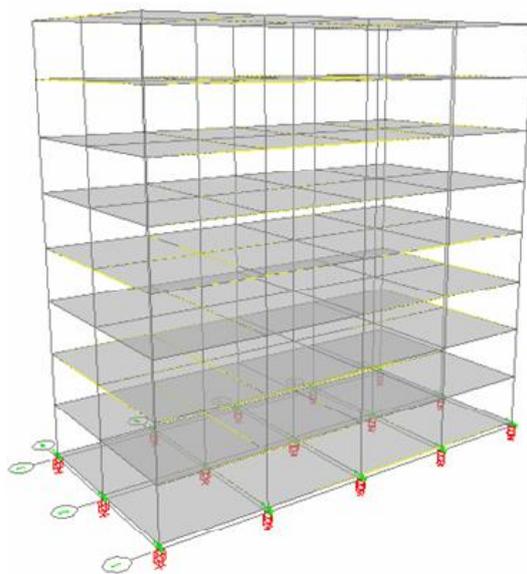


Fig 42 : Vue en 3D de la structure avec système d'isolation parasismique (Structure isolée)

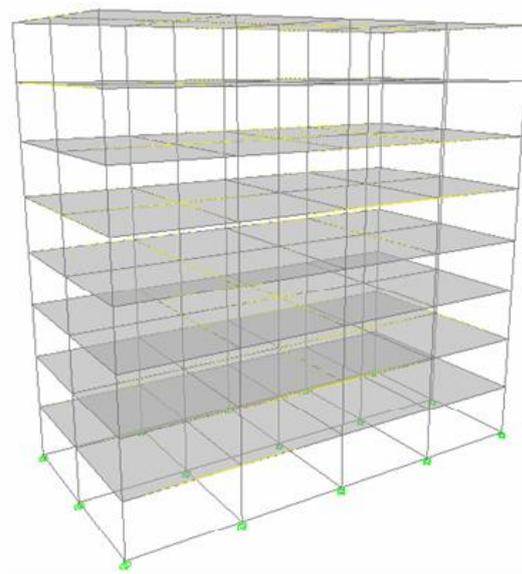


Fig 43 : Vue en 3D de la structure sans système d'isolation parasismique (Structure encastree)

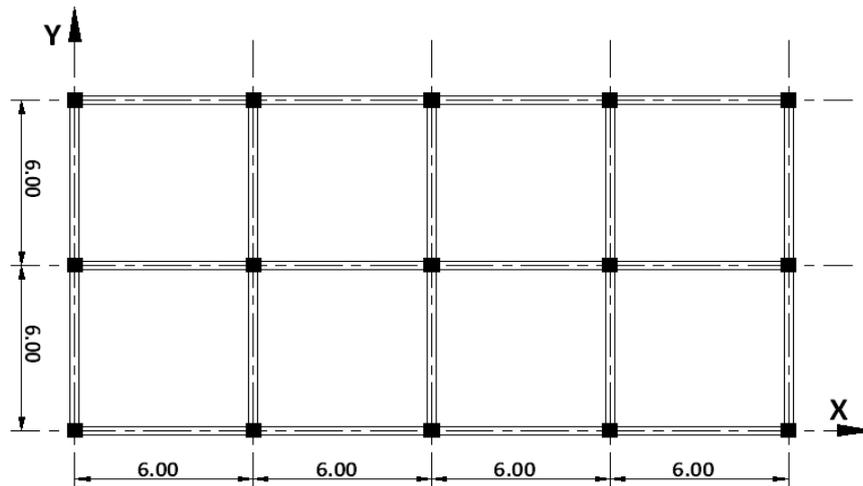


Figure 44 : Vue en plan de la structure

III-2-2- Description du système d'isolation et de l'excitation sismique

Parmi les appuis passés en revue, notre choix est porté sur les appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb (Lead Rubber Bearings-LRB), ils se composent de couches alternées de caoutchouc et d'acier liées les unes aux autres autour d'un cylindre de plomb pur, inséré au centre des ces couches d'acier et de caoutchouc.

Le système d'isolation dans la structure isolée consiste en 15 appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb (LRB) placés sous chaque poteau, les caractéristiques de cet appui sont représentées dans le tableau 03 comme suit :

Période (sec)	β_{eff} (%)	K_{eff} (KN)	K_1 (KN)	K_v (KN)	F_y (KN)	\varnothing_{bp} (cm)	$\varnothing_{\text{isol}}$ (cm)	H (cm)
2.60	20	1701.10	11666.84	2837175.94	133.48	13.2	90	58

Tableau 03 : les caractéristiques du système d'isolation LRB

Avec :

β_{eff} : Pourcentage d'amortissement effectif du système d'isolation.

K_{eff} : La rigidité effective horizontale de l'isolateur.

K_1 : La rigidité initiale de l'isolateur.

K_v : La rigidité verticale de l'isolateur.

F_y : La force d'écoulement de l'isolateur.

\varnothing_{bp} : Le diamètre de barreau de plomb.

$\varnothing_{\text{isol}}$: Le diamètre de l'isolateur.

H : La hauteur de l'isolateur.

Une analyse dynamique des réponses par accélérogramme est utilisée pour les deux types de structure encastrée et isolée, les excitations sismiques considérées sont les deux composantes 0 et 90 degrés du séisme de Loma Prieta (17 Octobre 1989) enregistrées par la station de Lexington Dam avec des accélérations maximales du sol de 0.442 g et 0.409 g respectivement. Ces deux composantes sont appliquées dans le sens longitudinal et le sens transversal respectivement pour les deux structures. Les accélérogrammes et le contenu fréquentiel de ces excitations sont représentés sur les figures 45, 46, 47 et 48.

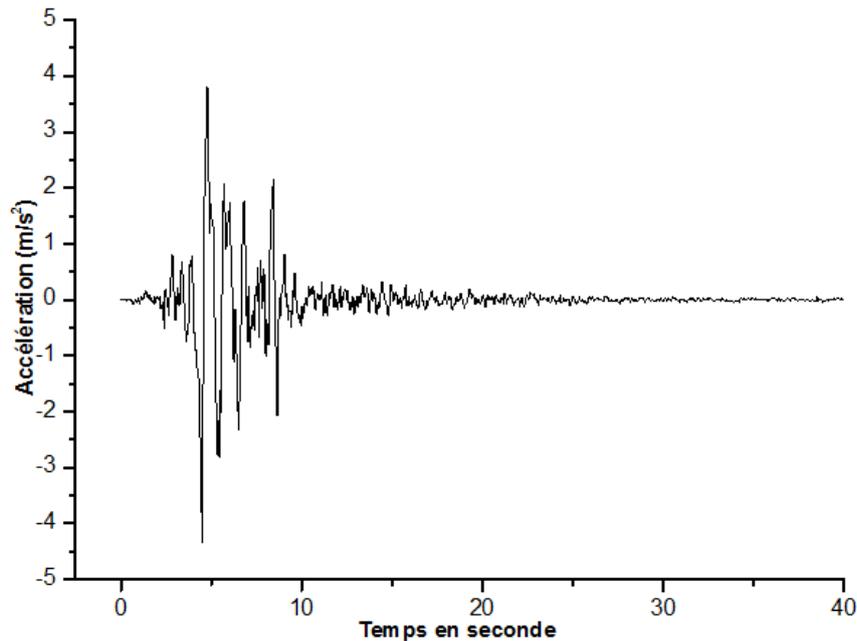


Figure 45 : Accélérogramme de la composante 0 degré de Lexington Dam du séisme de Loma Prieta.

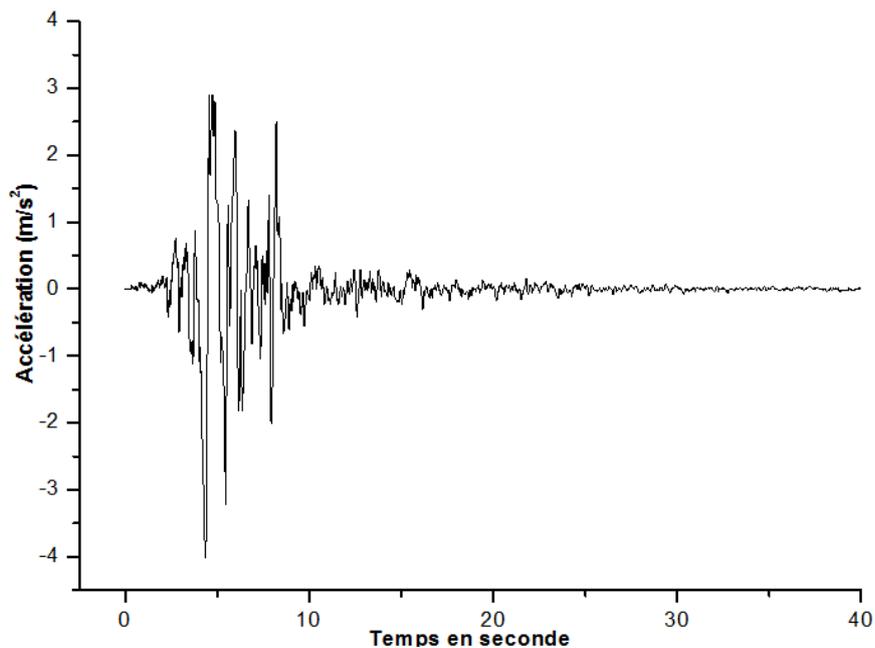


Figure 46 : Accélérogramme de la composante 90 degrés de Lexington Dam du séisme de Loma Prieta.

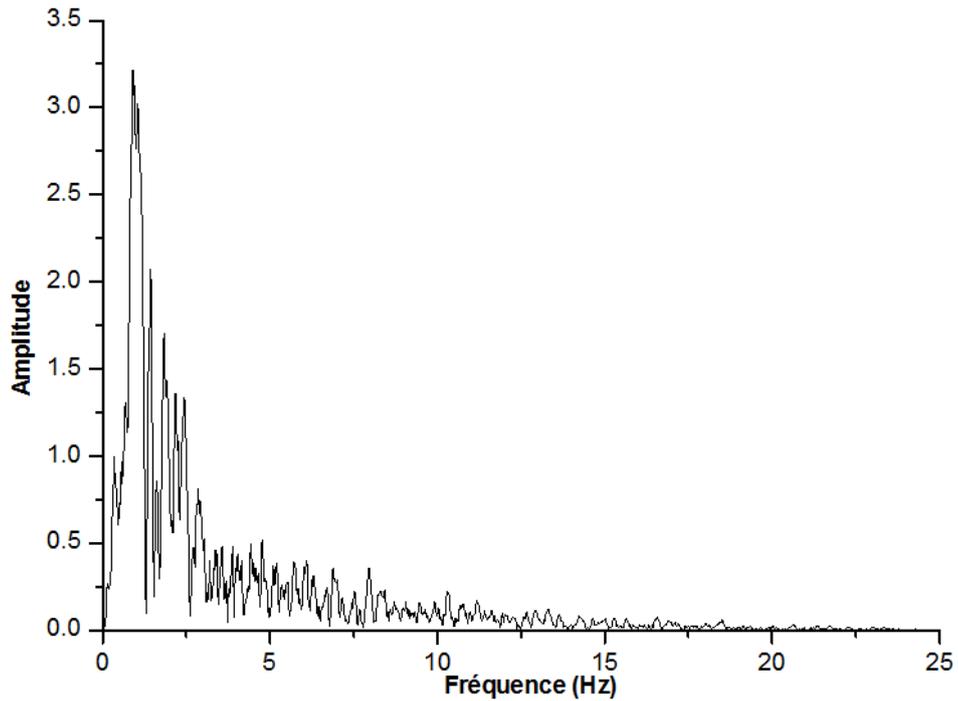


Figure 47 : Contenu fréquentiel de La composante 0 degré de Lexington Dam du séisme de Loma Prieta.

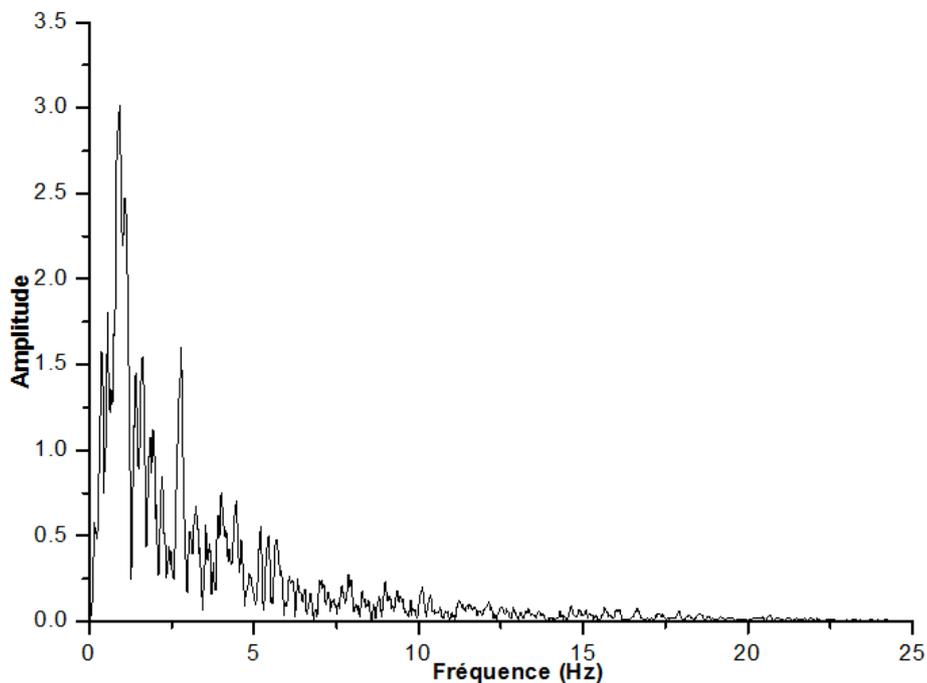


Figure 48 : Contenu fréquentiel de La composante 90 degrés de Lexington Dam du séisme de Loma Prieta.

III-2-3- Comparaison des résultats**III-2-3-1- Périodes et pulsations**

Les résultats des périodes et des pulsations pour les deux structures encastree et isolée sont représentés dans le tableau 04 suivant :

Mode	Structure encastree		Structure isolée	
	Période (sec)	Pulsation (rad/sec)	Période (sec)	Pulsation (rad/sec)
1	0.8585	7.3189	1.9326	3.2512
2	0.7964	7.8891	1.9063	3.2959
3	0.7366	8.5304	1.7226	3.6475
4	0.2756	22.8018	0.4525	13.8851
5	0.2577	24.3848	0.4186	15.0105
6	0.2380	26.3981	0.3847	16.3344
7	0.1543	40.7187	0.2226	28.2222
8	0.1464	42.9235	0.2086	30.1161
9	0.1351	46.5204	0.1931	32.5456
10	0.1027	61.2026	0.1411	44.5247
11	0.0985	63.8088	0.1334	47.1088
12	0.0904	69.4804	0.1232	51.0160
13	0.0744	84.5048	0.0989	63.5185
14	0.0722	87.0778	0.0945	66.4873
15	0.0659	95.3182	0.0869	72.2770
16	0.0575	109.2861	0.0737	85.2084
17	0.0564	111.3862	0.0713	88.1838
18	0.0512	122.6179	0.0652	96.3945
19	0.0474	132.5818	0.0578	108.7941
20	0.0469	133.8585	0.0565	111.2895
21	0.0424	148.1185	0.0477	131.6871
22	0.0420	149.6923	0.0471	133.2765
23	0.0418	150.1574	0.0421	149.2762
24	0.0377	166.7733	0.0419	149.8637

Tableau 04 : Les périodes et les pulsations pour les deux structures encastree et isolée.

D'après ces résultats les périodes sont augmentées et les pulsations sont réduites pour les modes de la structure isolée par rapport à la structure encastree à la base, Ceux-ci montrent que l'effet du système d'isolation est d'assouplir la structure isolée.

III-2-3-2- Déplacements et accélérations

L'analyse dynamique effectuée pour les deux structures encastree et isolée nous a permis de comparer les résultats des déplacements et des accélérations entre les trois niveaux (niveau 08, 04 et 01) et pour les deux directions d'excitation X et Y de chaque structure. Ces résultats sont représentés dans les figures ci-dessous.

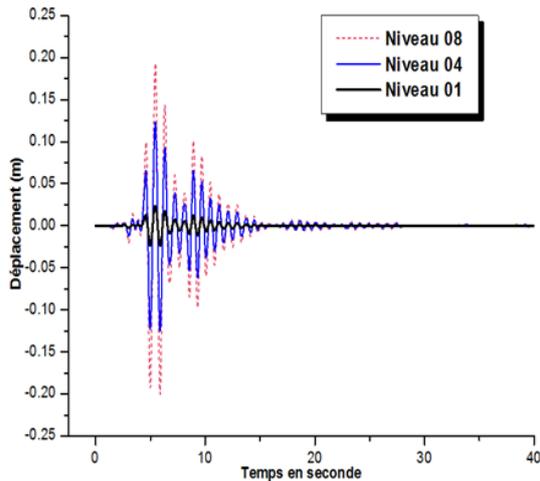


Figure 49 : Comparaison des déplacements relatifs de la structure encastree pour les niveaux 08, 04 et 01 dans la direction X

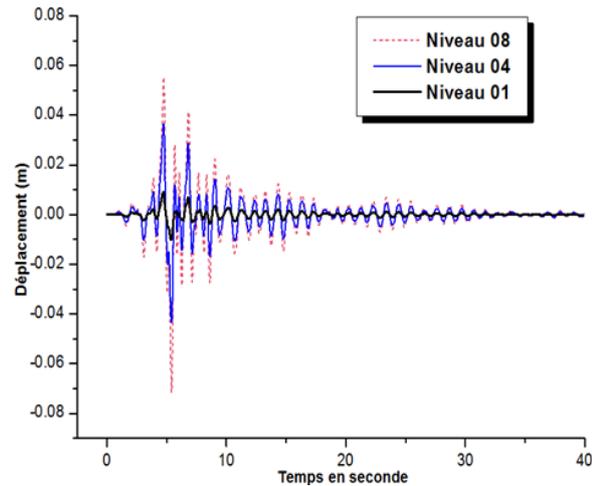


Figure 50 : Comparaison des déplacements relatifs de la structure isolée pour les niveaux 08, 04 et 01 dans la direction X

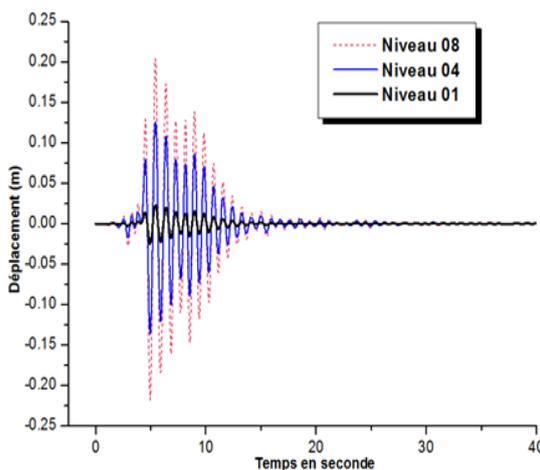


Figure 51 : Comparaison des déplacements relatifs de la structure encastree pour les niveaux 08, 04 et 01 dans la direction Y

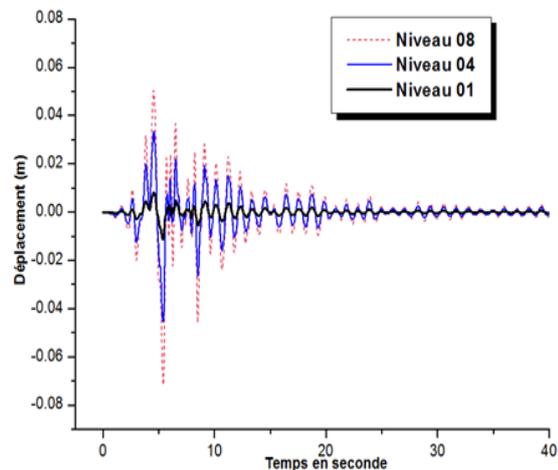


Figure 52 : Comparaison des déplacements relatifs de la structure isolée pour les niveaux 08, 04 et 01 dans la direction Y

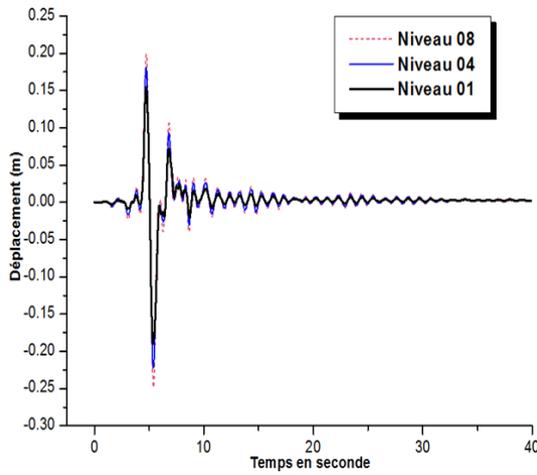


Figure 53 : Comparaison des déplacements absolus de la structure isolée pour les niveaux 08, 04 et 01 dans la direction X

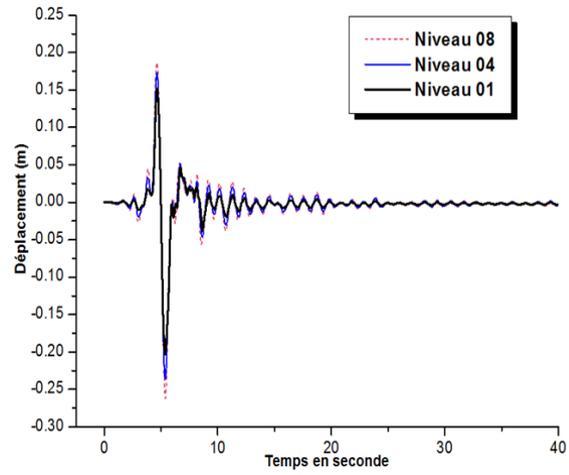


Figure 54 : Comparaison des déplacements absolus de la structure isolée pour les niveaux 08, 04 et 01 dans la direction Y

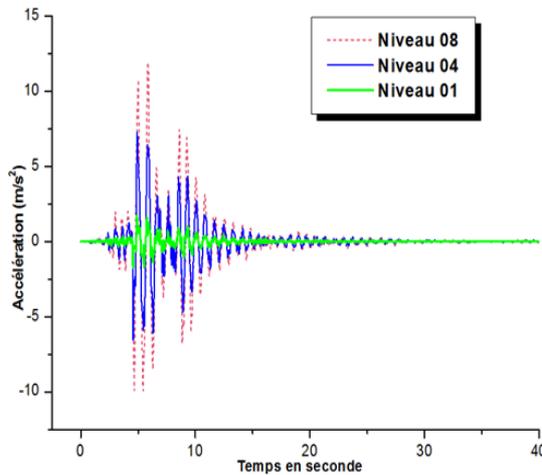


Figure 55 : Comparaison des accélérations de la structure encastree pour les niveaux 08, 04 et 01 dans la direction X

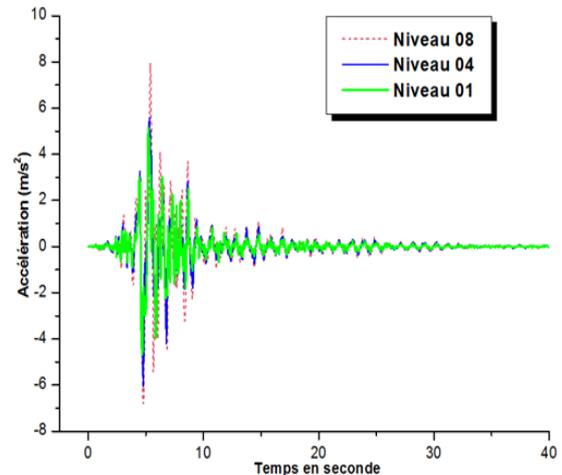


Figure 56 : Comparaison des accélérations de la structure isolée pour les niveaux 08, 04 et 01 dans la direction Y

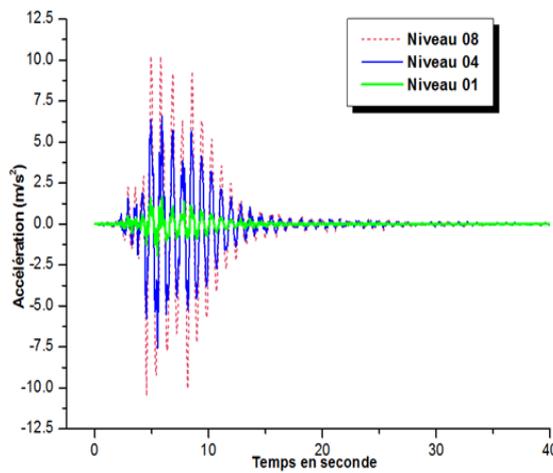


Figure 57 : Comparaison des accélérations de la structure encastree pour les niveaux 08, 04 et 01 dans la direction Y

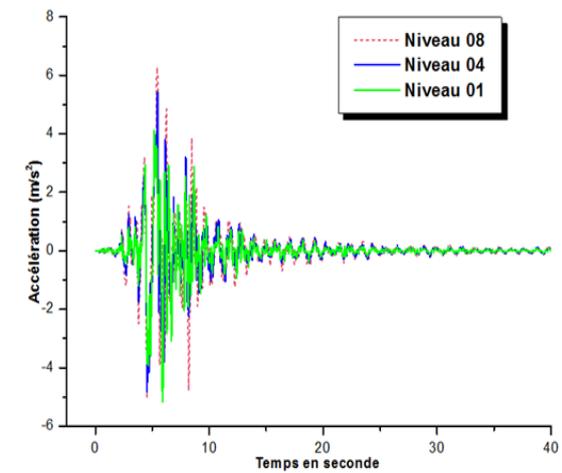


Figure 58 : Comparaison des accélérations de la structure isolée pour les niveaux 08, 04 et 01 dans la direction Y

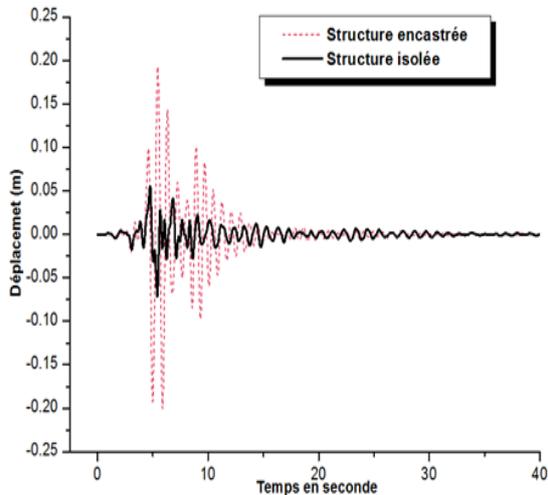


Figure 59 : Déplacements du dernier niveau pour les deux structures encastrée et isolée dans la direction X

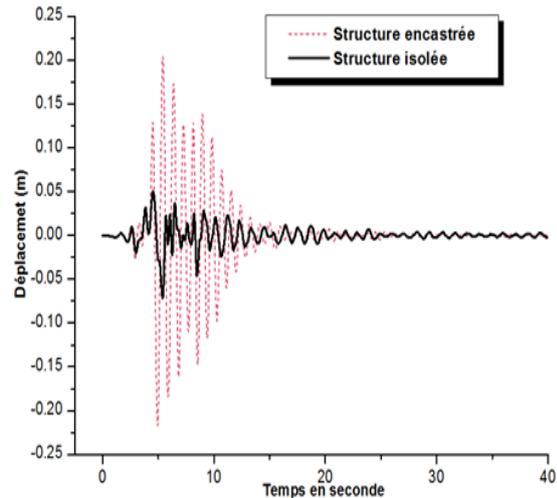


Figure 60 : Déplacements du dernier niveau pour les deux structures encastrée et isolée dans la direction Y

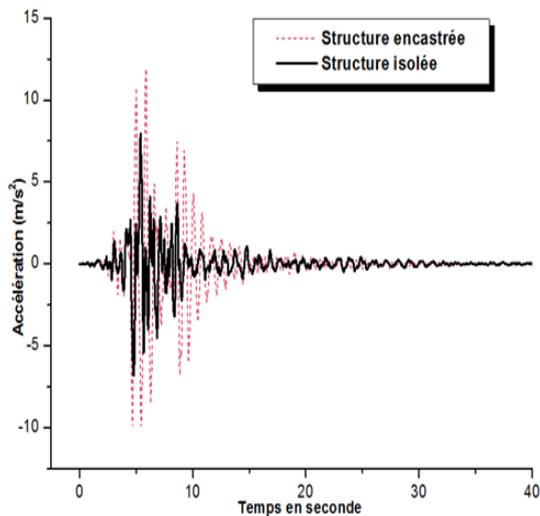


Figure 61 : Accélérations du dernier niveau pour les deux structures encastrée et isolée dans la direction X

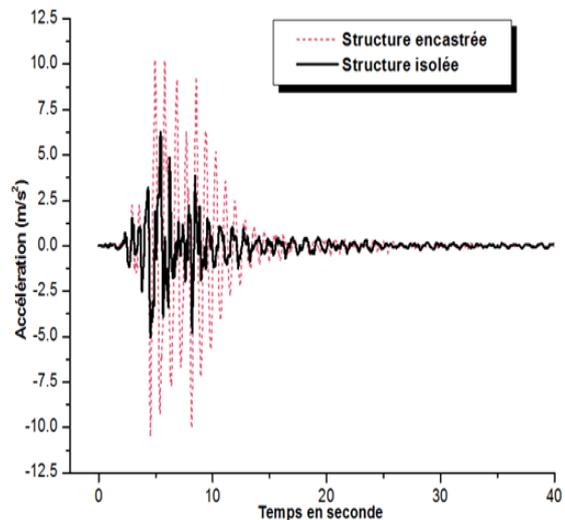


Figure 62 : Accélérations du dernier niveau pour les deux structures encastrée et isolée dans la direction Y

Les résultats représentés dans les figures 49, 51, 55 et 57 montrent que la structure encastrée vibre avec une amplification des déplacements relatifs et des accélérations importantes entre les niveaux de cette structure. Par contre, les figures 50, 52, 53, 54, 56 et 58 montrent que la structure isolée se déplace sur les appuis comme un bloc presque indéformable ou selon un corps rigide. Par conséquent, les déplacements relatifs et les accélérations sont réduits pour tous les niveaux de la structure, les forces d'inertie transmises aux éléments de fondations sont limitées. Ce comportement est traduit par la

limitation des dommages subis par la superstructure et les éléments de fondation et par la préservation du fonctionnement de la structure après le séisme.

La remarque notée par les résultats de comparaison entre les deux structures encastree et isolée qui sont représentées dans les figures 59, 60, 61 et 62 montre que les déplacements relatifs et les accélérations de la structure isolée sont réduits par rapport à la structure encastree, ceci est traduit par un décalage en fréquence vers la zone à moindre excitation sismique et le bâtiment se comporte dans les directions horizontales comme un oscillateur simple à fréquences relativement basses (1.1648 à 0,5174 Hz en fréquence correspondent 0.8585 à 1.9326 secondes en période). Ceci est expliqué par les figures 47 et 48.

III-2-3-3- Les efforts tranchants

La comparaison des efforts tranchants à la base pour les deux structures encastree et isolée dans les deux directions X et Y est représentée ci-dessous par les figures 63 et 64. Cette comparaison montre que le système d'isolation réduit les efforts tranchants à la base à cause de l'augmentation de la période fondamentale et le décalage de la fréquence vers la zone à moindre excitation sismique.

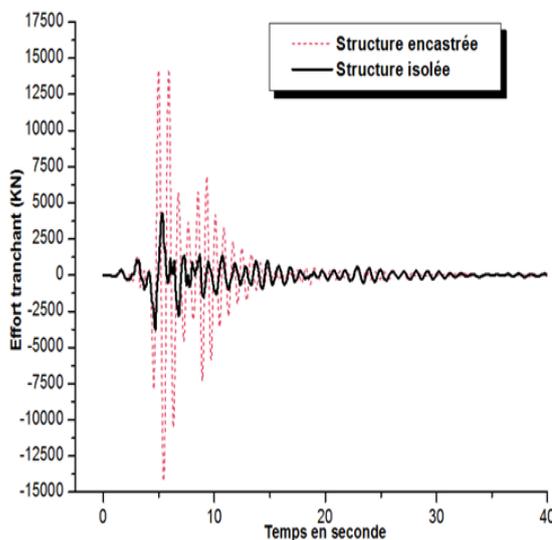


Figure 63 : Les efforts tranchants pour les deux structures encastree et isolée dans la direction X

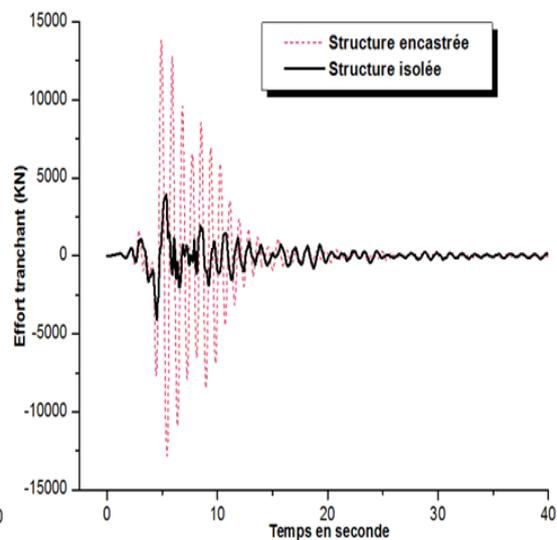


Figure 64 : Les efforts tranchants pour les deux structures encastree et isolée dans la direction Y

III-2-3-4- Les énergies

Pour une structure encastrée, une partie de l'énergie sismique entrée (Input Energy) est dissipée par l'amortissement interne ou structural. Cette énergie sismique étant stockée en énergie potentielle de déformation élastique et en énergie cinétique, la dissipation par cet amortissement diminue l'énergie mécanique stockée.

$$E_{\text{sismique}} = E_{\text{potentielle}} + E_{\text{cinétique}} + E_{\text{dissipée}}$$

Pour une structure isolée, une partie de l'énergie induite lors du séisme (Input Energy) est absorbée par les déformations plastiques correspondant au comportement hystérésis du système d'isolation (Non-linear Link Energy) et la partie restante de cette énergie transmise à la superstructure est connue sous le nom d'énergie transférée, qui est à son tour une partie de cette dernière est dissipé par l'amortissement structural correspondant au comportement visqueux de la structure qui s'appelle l'énergie de l'amortissement modal (Modal Damping Energy) et l'autre partie restante se compose de l'énergie cinétique (Kinetic Energy) de la masse et l'énergie potentielle (Potential Energy) pour les déformations élastiques structurales.

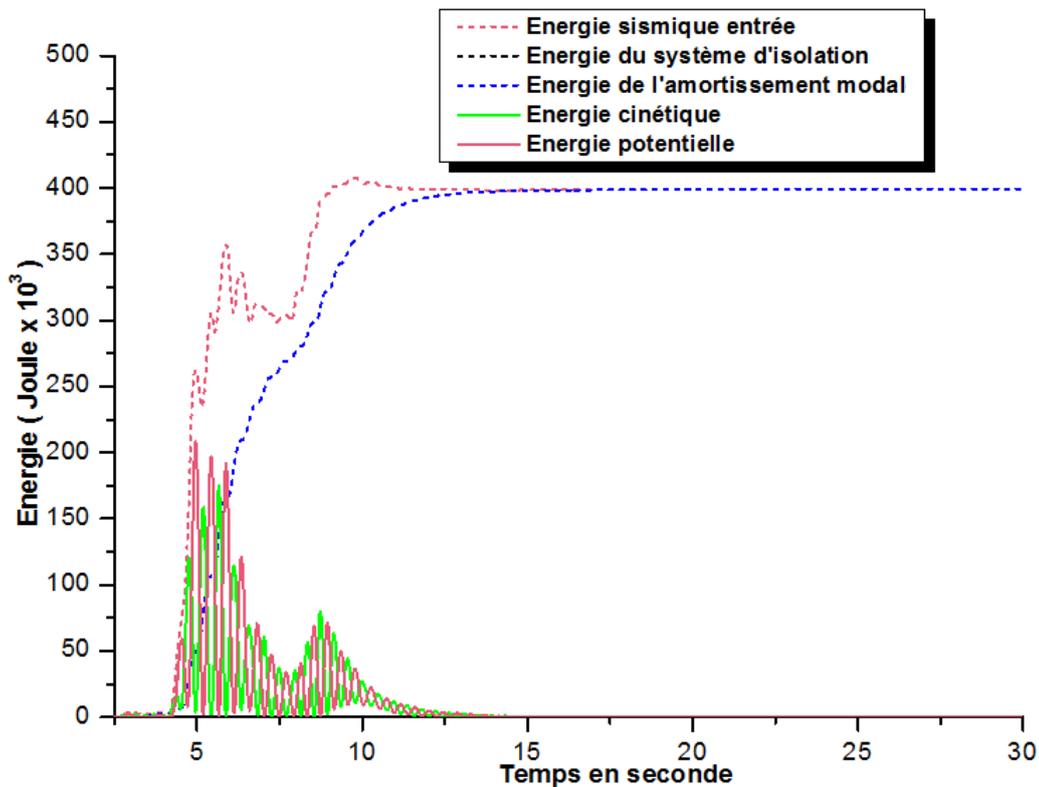


Figure 65 : Diagrammes des énergies absorbées par la structure encastrée sous l'excitation de la composante de Lexington Dam du Loma Prieta.

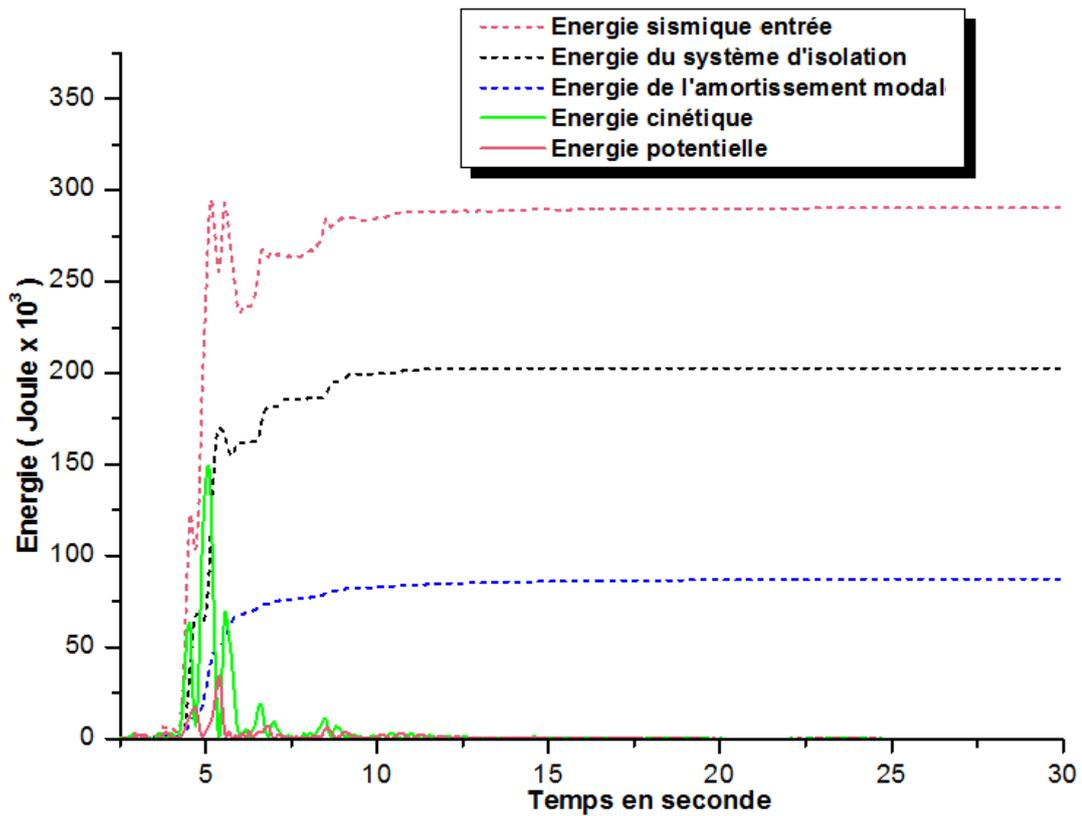


Figure 66 : Diagrammes des énergies absorbées par une structure isolée avec un système d'isolation sous l'excitation de la composante de Lexington Dam du Loma Prieta.

Les figures 65, 66 illustrent respectivement les diagrammes des énergies absorbées par les deux structures encastree et isolée, la comparaison de ces figures montre l'efficacité du système d'isolation qui a dissipé l'énergie sismique entrée et l'a empêchée de se transférer à la superstructure.

Ceci est expliqué par déperdition importante d'énergie mécanique "potentielle et cinématique" et la concentration de la majorité de cette dernière au niveau du système d'isolation. Par conséquent, les déplacements relatifs, les accélérations et l'énergie sismique transférée vers la superstructure sont plus importants dans le cas de structure encastree qu'isolée.

Les résultats de l'étude comparative de la structure avec et sans le système d'isolation sont représentés dans le tableau 05.

	Niveau	Direction	Structure encastrée	Structure isolée	Réduction (%)
Déplacement relatif maximal (m)	08	X	0.2010	0.0693	65.52
		Y	0.2174	0.0711	67.30
	04	X	0.1252	0.0426	65.97
		Y	0.1363	0.0453	66.76
	01	X	0.0234	0.0101	56.84
		Y	0.0250	0.0111	55.60
Accélération maximale (m/s^2)	08	X	11.91	7.95	33.25
		Y	10.49	6.27	40.27
	04	X	7.25	6.06	16.53
		Y	7.58	5.43	28.43
	01	X	1.76	5.14	-
		Y	1.94	5.16	-
Effort tranchant maximal (KN)	Base	X	14240	4283	69.92
		Y	13850	4071	70.61
Energie maximale (Joule $\times 10^3$)	Sismique entrée		416.20	300.40	27.82
	Amortissement modal		407.50	89.36	78.07

Tableau 05 : Comparaison des résultats maximaux de la structure avec et sans le système d'isolation.

Le tableau 05 montre que l'influence du système d'isolation sur les réponses dynamiques dans une structure isolée est semblable pour les deux directions horizontales X et Y. Pour cela, on peut étudier l'influence de ce système pour une seule direction horizontale.

III-3- Influence de la hauteur sur l'efficacité du système d'isolation

Pour illustrer l'influence de la hauteur sur l'efficacité du système d'isolation, une analyse a été faite sur les mêmes structures isolée et encastree précédentes avec des différents nombres de niveaux et des sections des poteaux comme il est représenté dans le tableau 06. Pour cette étude, nous utilisons des structures à différents niveaux avec une période de conception de 3.0 secondes et un amortissement effectif de 20%. Le système d'isolation choisi est le même que l'étude précédente (appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb LRB) avec les mêmes excitations sismiques, les deux composantes 0 et 90 degrés du séisme de Loma Prieta (17 Octobre 1989) enregistrées par la station de Lexington Dam.

Niveaux Structures	01 à 04	05 à 08	09 à 12	13 à 16	17 à 20	21 à 24
	Structure à 01 niveau (cmxcm)	30X30	-	-	-	-
Structure à 04 niveaux (cmxcm)	35X35	-	-	-	-	-
Structure à 08 niveaux (cmxcm)	50X50	50X50	-	-	-	-
Structure à 12 niveaux (cmxcm)	60X60	50X50	50X50	-	-	-
Structure à 16 niveaux (cmxcm)	70X70	60X60	50X50	50X50	-	-
Structure à 20 niveaux (cmxcm)	80X80	70X70	60X60	50X50	50X50	-
Structure à 24 niveaux (cmxcm)	90X90	80X80	70X70	60X60	50X50	50X50

Tableau 06 : Les dimensions des poteaux dans chaque structure.

III-3-1- Les périodes des structures

Les résultats des périodes fondamentales pour les structures isolées et encastrees sont représentés dans le tableau 07 suivant :

Structures	Période de la structure encastree en seconde	Période de la structure isolée en seconde	Rapport ($T_{\text{isolée}}/T_{\text{encastree}}$)
Structure à 01 niveau	0.2216	2.0175	9.1042
Structure à 04 niveaux	0.5821	2.0784	3.5705
Structure à 08 niveaux	0.8585	2.1802	2.5395
Structure à 12 niveaux	1.2435	2.3436	1.8847
Structure à 16 niveaux	1.617	2.5598	1.5831
Structure à 20 niveaux	1.9903	2.8211	1.4174
Structure à 24 niveaux	2.3665	3.1212	1.3189

Tableau 07 : Comparaison des périodes des différentes structures encastrees et isolées dans les deux directions X et Y.

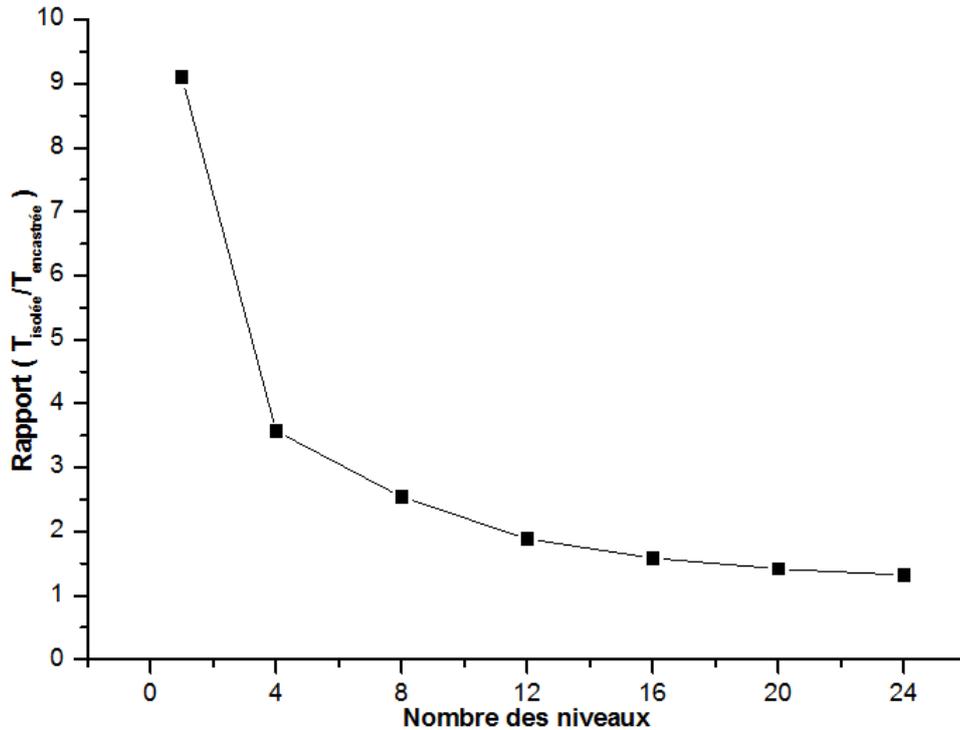


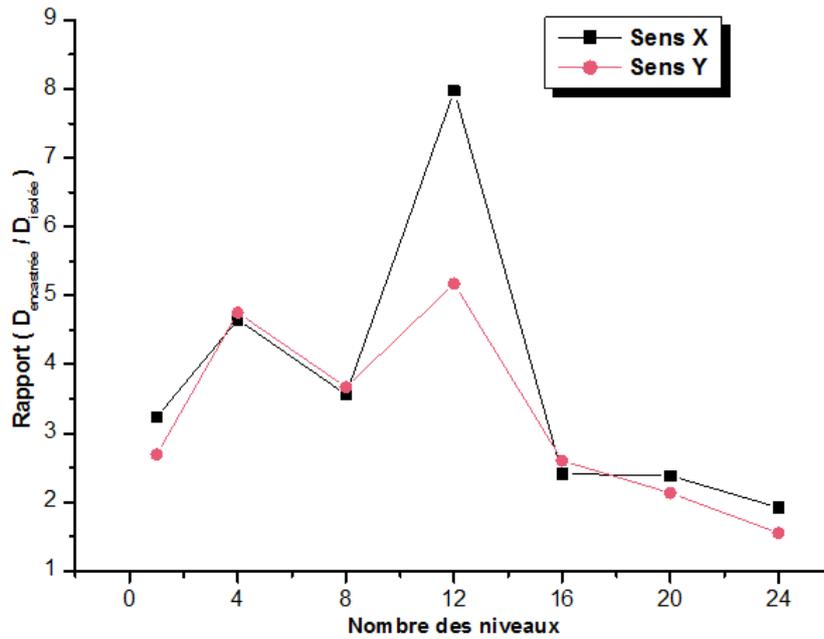
Figure 67 : Variation du rapport ($T_{\text{isolée}}/T_{\text{encastree}}$) pour les différentes structures.

III-3-2- Les déplacements relatifs

Les résultats des déplacements relatifs maximaux du dernier niveau pour les structures encastrees et isolées sont résumés dans le tableau suivant :

Structures	Directions	Déplacement relatif maximal du dernier niveau de la structure encastree (m)	Déplacement relatif maximal du dernier niveau de la structure isolée (m)	Rapport ($\frac{D_{encastree}}{D_{isolée}}$)
Structure à 01 niveau	X	0.007870	0.002435	3.23
	Y	0.007980	0.002967	2.69
Structure à 04 niveaux	X	0.072761	0.015641	4.65
	Y	0.084339	0.017743	4.75
Structure à 08 niveaux	X	0.200133	0.054811	3.65
	Y	0.217421	0.059235	3.67
Structure à 12 niveaux	X	0.441480	0.055369	7.97
	Y	0.414064	0.080071	5.17
Structure à 16 niveaux	X	0.370631	0.153874	2.41
	Y	0.464820	0.178989	2.60
Structure à 20 niveaux	X	0.441591	0.185606	2.38
	Y	0.557067	0.261339	2.13
Structure à 24 niveaux	X	0.454066	0.235912	1.92
	Y	0.586983	0.377740	1.55

Tableau 08: Comparaison des déplacements du dernier niveau des différentes structures encastrees et isolées dans les deux directions X et Y.

Figure 68 : Variation du rapport ($D_{\text{encastrée}} / D_{\text{isolée}}$) pour les différentes structures.

III-3-3- Les efforts tranchants

Les résultats des efforts tranchants à la base obtenus pour les structures encastrees et isolées sont résumés dans le tableau suivant :

Structures	Directions	Effort tranchant à la base de la structure encastree (KN)	Effort tranchant à la base de la structure isolée (KN)	Rapport ($\frac{V_{\text{encastree}}}{V_{\text{isolée}}}$)
Structure à 01 niveau	X	1354.00	1071.00	1.26
	Y	1304.00	1540.00	0.85
Structure à 04 niveaux	X	5887.00	1695.00	3.47
	Y	6171.00	2548.00	2.42
Structure à 08 niveaux	X	14240.00	3077.00	4.63
	Y	13850.00	3662.00	3.78
Structure à 12 niveaux	X	20150.00	4728.00	4.26
	Y	15940.00	5302.00	3.01
Structure à 16 niveaux	X	13840.00	5861.00	2.36
	Y	14680.00	7574.00	1.94
Structure à 20 niveaux	X	11780.00	7601.00	1.55
	Y	13840.00	8476.00	1.63
Structure à 24 niveaux	X	13950.00	8231.00	1.69
	Y	14690.00	10800.00	1.36

Tableau 09 : Comparaison des efforts tranchants à la base des différentes structures encastrees et isolées dans les deux directions X et Y.

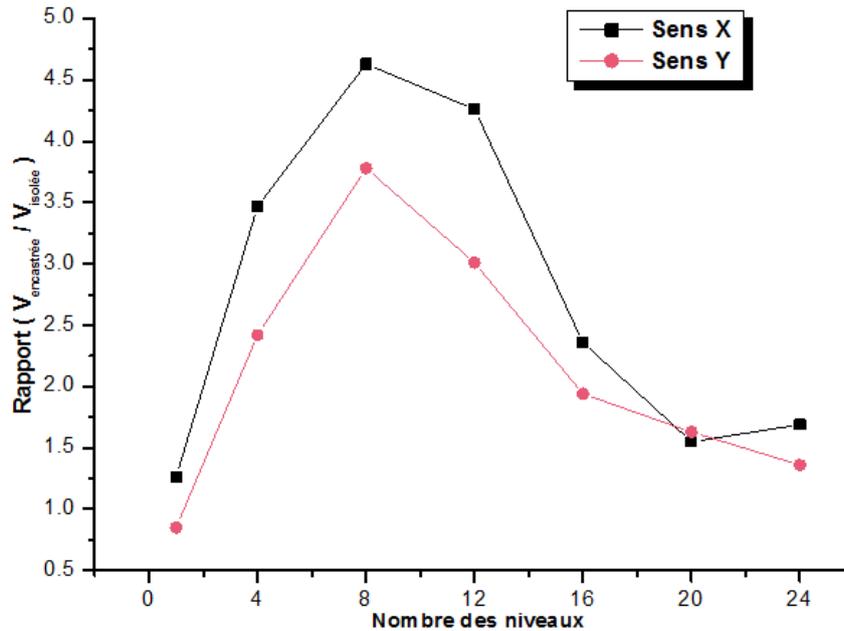


Figure 69 : Variation du rapport ($V_{\text{encastrée}} / V_{\text{isolée}}$) pour les différentes structures.

Les figures 67,68 et 69 montrent que le système d'isolation parasismique est plus efficace pour les structures de faible ou moyenne hauteur et devient moins efficace pour les structures de grande hauteur. Ceci peut être expliqué par l'allongement de la période fondamentale d'une structure avec l'augmentation de la hauteur.

III-4- Conclusion

Les analyses numériques effectuées par l'étude comparative entre les deux structures à base fixe et isolée pour illustrer l'efficacité du système d'isolation et l'influence de la hauteur sur cette efficacité nous ont permis de déduire ce qui suit :

- Les périodes sont augmentées et les pulsations sont réduites pour la structure isolée par rapport à la structure encadrée. Ceci montre que l'effet du système d'isolation est d'assouplir la structure isolée.
- Seulement le premier mode doit être inclus par les structures isolées, car les modes supérieurs n'ont aucun rôle dans la réponse dynamique ou dans la conception de la structure et du système d'isolation.
- La structure isolée se déplace sur les appuis comme un corps rigide. Par conséquent, les accélérations maximales et les déplacements relatifs maximaux pour tous les niveaux sont considérablement réduits pour la structure isolée que pour la structure à base fixe.

- Le système d'isolation a une influence de décaler la fréquence vers la zone à moindre excitation sismique. Par conséquent, la structure isolée se comporte dans les directions horizontales comme un oscillateur simple à basses fréquences.
- Les déplacements maximaux de la structure isolée sont localisés au niveau de la base.
- Le système d'isolation réduit les efforts tranchants à la base à cause de l'augmentation de la période fondamentale.
- Le système d'isolation a une efficacité de dissiper la majorité d'énergie sismique entrée ou captée par la structure et empêcher cette énergie de se transférer vers la superstructure.
- Le rapport des périodes entre les structures isolées et les structures à base fixe diminue avec l'augmentation du nombre de niveaux. Ceci est traduit par la faible efficacité du système d'isolation pour les structures élevées.
- Les rapports de déplacements relatifs et les efforts tranchants à la base entre les structures isolées et les structures encastrées montrent que le système d'isolation parasismique est plus efficace pour les structures de faible ou moyenne hauteur et moins efficace pour les structures élevées.