

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale des Travaux Publics

MEMOIRE

Présenté par : **ACHOUR Farida**

Ingénieur d'Etat en Génie Civil (C.C.I Université de Tizi Ouzou)

En vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER en Génie Civil**

Spécialité : Matériaux et Structures

THEME

**INFLUENCE DES ISOLATEURS SISMIQUES SUR
LA REPOSE DYNAMIQUE DES BATIMENTS**

Soutenu publiquement **le Mardi 01 Juin 2004 à 9h 00** à l'Ecole Nationale
des Travaux Publics Devant le jury composé de :

Président :	Mr M.K.BERRAH	Professeur, ENP
Rapporteur :	Mr H.AFRA	Maître de recherche, CNERIB
Examineurs :	Mr B.TILIOUINE	Professeur, ENP
	Mr M.AMIEUR	Maître de conférence, ENTP
	Mr M.HADDID	Chargé de recherche, CGS
Invité :	Mr H.AZZOUZ	Directeur du CTC Chlef

Résumé

Le mouvement du sol est communiqué aux constructions par l'intermédiaire de leurs fondations, donc si le sol pouvait se déplacer librement sous les ouvrages, ce mouvement ne pourrait leur être transmis. Dans ce contexte l'idée de disposer entre le sol et les bâtiments un filtre permettant de dissiper le maximum d'énergie, s'est développée ces dernières décennies sous l'appellation d'isolation parasismique (seismic base isolation).

Ce travail, qui se veut une introduction pour la méthode de l'isolation parasismique en Algérie, consiste en deux parties :

La première partie est une recherche bibliographique concernant les différents types d'appuis parasismiques, leurs modélisations mathématiques et la formulation des équations permettant l'analyse dynamique des structures isolées. Un exemple d'application comparatif des réponses des structures classiques et isolées, est présenté pour mettre en valeur l'effet des systèmes d'isolation.

La deuxième partie du travail présente une étude paramétrique effectuée pour déterminer les principaux paramètres ayant une influence sur les réponses et le comportement des structures isolées, à savoir : type d'appuis parasismiques, type d'accélérogramme, nombre de niveaux de la structure, période du système d'isolation, nombre d'appuis parasismiques utilisés pour l'isolation de la structure et enfin le fait que la structure comporte ou non des palées de stabilité.

Abstract

An earthquake ground motion is transmitted to a structure through foundations, therefore if the ground moves freely beneath the structures, the ground shaking motion might not be transmitted to the superstructure. In this context, the idea of placing a filter between the ground and the buildings for the purpose to dissipate a maximum of the seismic energy has been developed during the last decades and its name is seismic base isolation.

The aim of the proposed work is to provide an introduction to seismic isolation in Algeria. For this, firstly the mathematical models, formulation for different isolation systems, the dynamic analysis, the global system, as well as assembly of the combined superstructure and the bearings isolation is presented. A comparative study of seismic responses of classical and isolated structures has been carried out to demonstrate the effectiveness of seismic isolation systems.

Secondly, parametric studies have been carried out to examine the behavior of isolated structures under various factors, these include: type of isolators, type of accelerograms, stories number of the structure, system isolation period, bearings number of isolation system, with and without bracing elements.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Concepts de l'isolation parasismique	
1- Aperçu historique	3
2- Appuis parasismiques	5
3- Amortisseurs parasismiques.....	8
4- Principe de l'isolation et composantes des systèmes d'isolation	9
5- Méthodes de calcul des constructions isolées	11
6- Conclusion.....	19
Chapitre 2 : Modélisation mathématique des appuis parasismiques	
1- Introduction.....	20
2- Modélisation mathématique des appuis parasismiques	20
2-1- Appuis en caoutchouc fretté	20
2-2- Appuis en Caoutchouc avec Amortisseur	21
2-3- Appuis à Frottement Pur	22
2-4- Système d'isolation résistant par frottement	23
2-5- Appuis Glissants utilisés par l'EDF.....	25
2-6- Appuis à frottement résistant par glissement	26
2-7- Appuis en Pendules glissants	28
Chapitre 3 : Analyse dynamique des structures isolées	
1- Introduction	30
2- Analyse dynamique des structures isolées	30
2-1- Structure à deux degrés de liberté	30
2-2- Structures à n degrés de liberté	34
3-Exemple d'application	40
3-1- Description de la structure	40
3-2- Description du système d'isolation et l'excitation sismique	40
3-3- Comparaison des résultats	42
3-4- Conclusion	48

Chapitre 4 : Etude paramétrique

1- Introduction	49
2-Méthodologie	50
2-1- Description des structures	50
2 -2- Description des systèmes d'isolation et les excitations sismiques	52
3- Formulation théorique	57
3-1- Equation de la superstructure	57
3-2-Equation de la base	58
4 - Présentation et comparaison des résultats	61
4 -1 - Type d'appuis parasismiques	61
4 -2- Type d'accélérogrammes	69
4-3- Nombre de niveaux de la structure	83
4 -4- Période du système d'isolation	83
4 -5- Nombre d'appuis parasismiques	87
4 -6- Avec ou sans palées de stabilité	88
5- Conclusion	89
Conclusion générale	91

Références bibliographiques

Introduction générale

Parmi les catastrophes naturelles qui affectent la surface de la terre, les séismes ont représenté depuis toujours un des plus graves désastres de l'humanité, leur apparition brutale et imprévue, l'énormité des pertes humaines et matérielles ont marqué la mémoire des générations et la seule prévention valable en zone à risque sismique reste la construction parasismique.

L'évolution actuelle du génie parasismique a permis le développement et le perfectionnement des méthodes d'analyse et de calcul des structures soumises à des sollicitations sismiques ainsi que des moyens et des conceptions plus efficaces pour atténuer les effets destructeurs des grands mouvements du sol.

Le mouvement du sol est communiqué aux constructions par l'intermédiaire de leurs fondations, donc si le sol pouvait se déplacer librement sous les ouvrages, ce mouvement ne pourrait leur être transmis. Dans ce contexte l'idée de disposer entre le sol et les bâtiments un filtre, permettant de dissiper le maximum d'énergie, s'est développée ces dernières décennies sous l'appellation d'isolation parasismique (seismic base isolation).

Les secousses du sol provoquent des oscillations forcées des constructions. Pendant leurs oscillations les constructions tendent à résister au déplacement de leur base, ce qui donne naissance à des forces d'inertie qui agissent dans le sens opposé au mouvement ; plus une construction est lourde plus sa résistance au mouvement est grande et plus grandes sont les forces d'inertie qu'elle subit. Ces forces déforment la superstructure, donc elles constituent les charges auxquelles la construction doit résister, de là il en résulte que la tenue des structures au séisme est favorisée en minimisant les forces d'inertie et l'énergie qui leur sera transmise, cela est possible en réduisant les accélérations transmises par le sol à la superstructure en assouplissant horizontalement les constructions ce qui est du ressort de l'isolation parasismique.

L'isolation parasismique est une méthode d'isolation partielle des structures du sol qui s'effectue par l'introduction des appuis dont la souplesse horizontale est beaucoup plus grande que celle de la structure [36]. Ces appuis appelés appuis parasismiques ou isolateurs sont généralement placés entre les fondations et la superstructure [41], [43].

Les déplacements imposés à la construction par les secousses du sol se localisent principalement au niveau des appuis et grâce à leur faible rigidité horizontale, la période propre de la construction s'allonge et la superstructure se comporte comme étant un corps rigide. Ces déplacements peuvent être réduits en associant des amortisseurs aux isolateurs.

La littérature nous révèle que l'idée d'ériger une structure sur des supports pouvant l'isoler des composantes horizontales du sol n'est pas vraiment nouvelle [19]. Par ailleurs beaucoup de mécanismes ont été proposés pour les systèmes d'isolation tout au début du siècle mais ils n'ont pas été mis en pratique jusqu'au 1950 quand les appuis élastomères ont été développés [26].

L'objectif principal de ce travail est de mettre en valeur l'influence des appuis parasismiques sur le comportement de la superstructure et de déduire par la suite les paramètres qui peuvent influencer sur le comportement de l'ensemble (la base et la superstructure).

Le travail est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre, après un bref aperçu historique sur le développement et l'application de l'isolation parasismique à travers le monde, se propose de présenter les différents types d'appuis et amortisseurs parasismiques ainsi que les méthodes de calcul des constructions isolées.

Le deuxième chapitre décrit les modèles mathématiques des principaux appuis parasismiques.

Le troisième chapitre a fait l'objet de formulation des équations permettant l'analyse dynamique des structures isolées et il se clôture par une étude comparative des réponses d'une même structure avec et sans le système d'isolation [1].

Le dernier chapitre présente quelques facteurs ayant une influence sur la réponse dynamique des structures isolées.

Enfin une conclusion générale qui synthétise le travail et définit d'autres perspectives.

1- Aperçu historique

Les séismes sont inévitables. Ils se sont produits dans le passé, ils se produiront à l'avenir et peuvent être tout aussi violents. Faute de pouvoir les éviter, on devient circonspect en ce qui concerne l'acte de construire, aussi on doit s'efforcer de prévenir ou du moins de limiter les dommages qu'ils occasionnent, autrement dit réduire le risque sismique, ce qui est du ressort du génie parasismique (Earthquake engineering).

Le génie parasismique est une discipline des sciences de l'ingénieur d'origine relativement récente, on a coutume de dater sa naissance des années soixante, décennie au cours de laquelle de vastes programmes de recherche furent initiés tant aux Etats Unis qu'au Japon [41].

De nos jours les méthodes de conception parasismique pour la protection des structures ont connu un grand essor dans la plupart des pays et l'isolation parasismique est certainement l'innovation la plus importante dans le domaine du génie parasismique.

Comme il a été déjà mentionné, l'idée d'isoler les structures à la base est ancienne puisque après le séisme de TOKYO en 1923 des études dans ce sens ont été entreprises mais elles ont trouvé leur mort faute de manque de renseignements concernant le mouvement sismique ainsi que le non développement des méthodes d'analyse dynamique [40]. Plus tard les recherches connaissent à nouveau un épanouissement à la Nouvelle Zélande au début des années 1970 [36], [8].

Les premières applications pratiques de l'isolation parasismique au Japon et aux Etats Unis furent commencées au début des années 1980 [36], par ailleurs, les premières démonstrations de la construction isolée au Japon et aux USA, furent réalisées respectivement en 1982 [8] et en 1985 [20], [8].

En France, des recherches dans ce domaine n'ont pas été vaines car des appuis qui portent même le nom de l'EDF (Electricité de France), qui seront définis au chapitre deux, ont été employés pour la centrale nucléaire de Koeberg en Afrique du sud [41]. Récemment un lycée sur appuis parasismiques a été réalisé à la Martinique.

En Italie, les études détaillées pour le développement de ce concept, ont commencé en 1988, dans le but de permettre l'utilisation sûre de cette technique pour les constructions civiles ainsi que son adoption pour les constructions industrielles et prendre en considération le risque nucléaire et chimique [4].

Aussi beaucoup de recherches théoriques et expérimentales ont été menées ces dernières années en chine, par ailleurs jusqu'à l'an 2000, 400 bâtiments et 18 ponts ont été construits et 80 autres structures étaient en cours de construction [43].

Les appuis parasismiques sont aussi utilisés pour la réhabilitation du parc immobilier existant.

Les systèmes de contrôle structural peuvent être divisés en trois catégories [13] :

- Les systèmes de contrôle passif.
- Les systèmes de contrôle actif.
- Les systèmes de contrôle semi actif.

A la différence du contrôle passif, le contrôle actif est basé sur l'utilisation des systèmes adaptatifs au chargement extérieur avec changement de caractéristiques. Ce sont des systèmes dont le comportement peut être modifié en utilisant des mécanismes de contrôle automatique. [13]

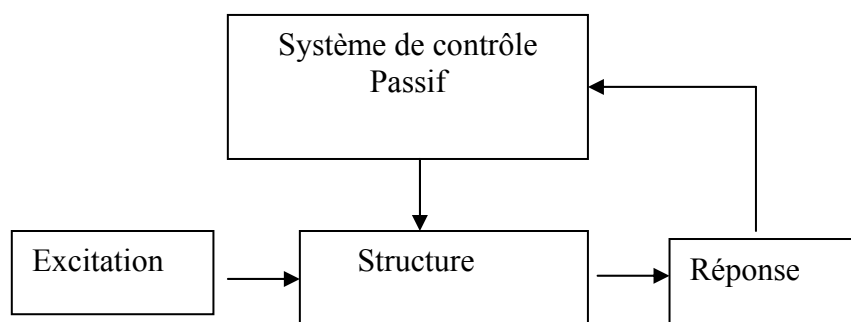


Fig.1 Eléments du système de contrôle passif

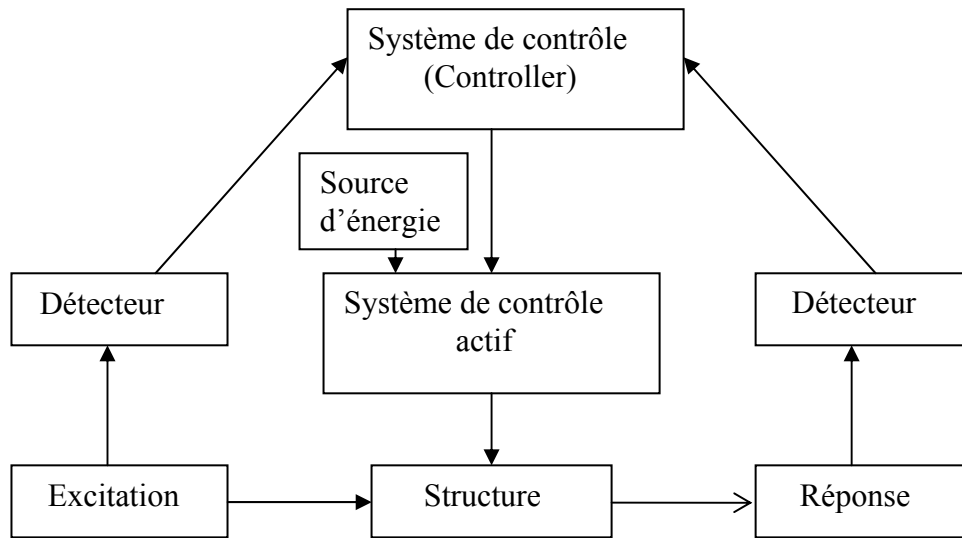


Fig.2 Eléments du système de contrôle actif

2- Appuis Parasismiques

Il existe plusieurs types d'isolateurs sismiques et selon leur mode de fonctionnement, ils peuvent être répertoriés comme suit :

- Appuis élastomères (Elastomeric bearings).
- Appuis glissants (Sliding bearings).
- Appuis élastomères et glissants.

2-1-Appuis Elastomères

Ce sont des appuis à déformation composés de couches alternées d'élastomère et de plaques d'acier appelées frettes, l'élastomère peut être naturel (caoutchouc) ou synthétique (Néoprène). La souplesse horizontale est assurée par les couches d'élastomère et la rigidité verticale par la présence des frettes.

On distingue différents types d'appuis à déformation tels que les appuis en caoutchouc fretté (Laminated rubber bearings) et les appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb (Lead rubber bearings).

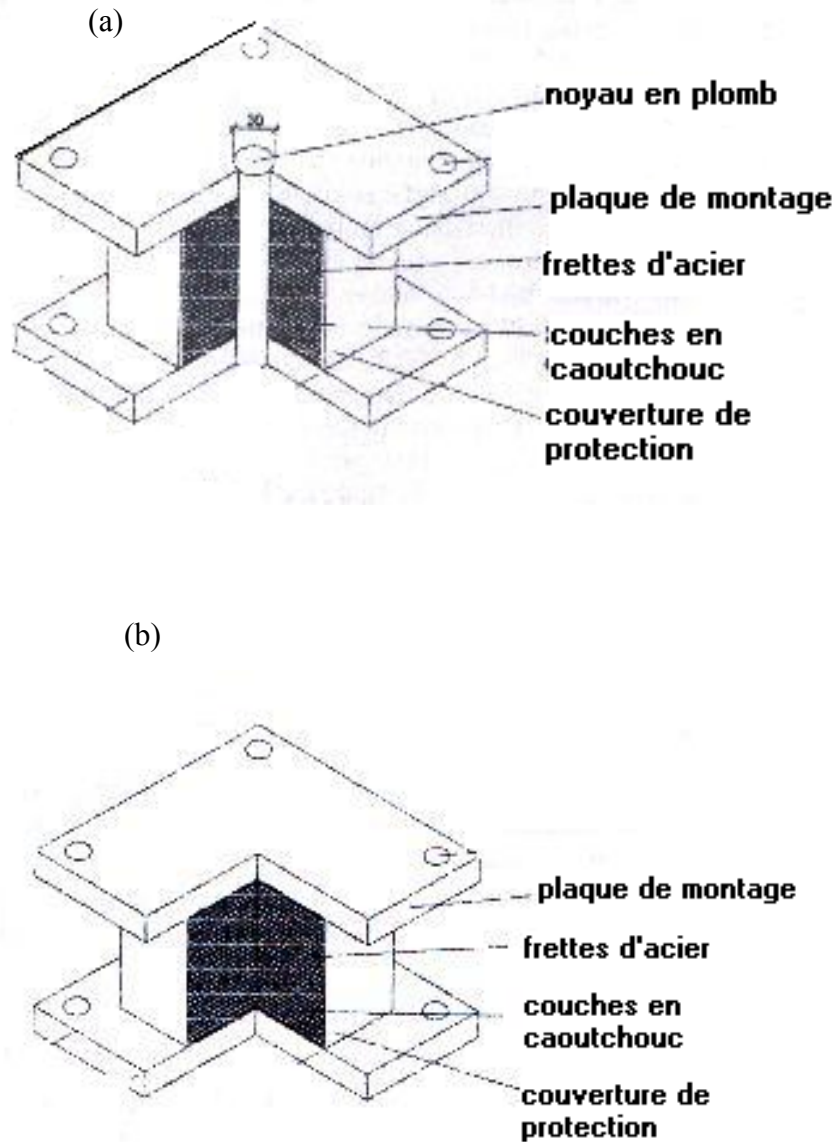


Fig.3 (a) Appuis élastomères frettés avec amortisseur en barreau de plomb
(b) Appuis élastomères frettés

2-2-Appuis Glissants

Le système le plus simple est composé d'une part de plaques solidaires de la superstructure et d'autre part de plaques fixées aux fondations et leur interface constitue le plan de glissement [41]. Parmi ces appuis on peut citer les appuis en pendules glissants qui consiste en une rotule se déplaçant sur une surface sphérique concave [30], [11].

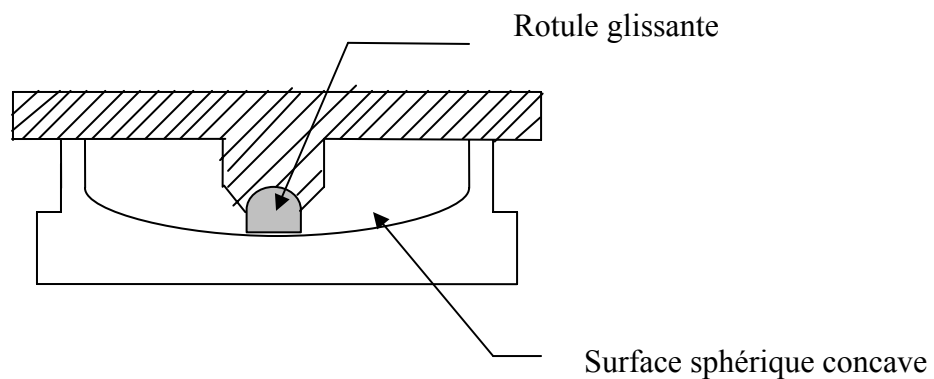


Fig4. Appui en pendule glissant

2-3-Appuis Elastomères et Glissants

Ce sont des appuis résultant de l'association de plaques de glissement et des appuis élastomères ; un type de ces appuis a été utilisé par l'EDF (Electricité de France) [41], il est constitué de plaques en acier inoxydable fixées à la superstructure et des plaques en bronze au plomb solidaires des isolateurs élastomères. Un autre type très utilisé est composé de disques en acier inoxydable recouverts de Téflon sur lequel des essais ont été effectués pour déterminer les propriétés de frottement des interfaces Téflon-acier [26],[27]. La plus importante des caractéristiques de ces appuis (Téflon bearings) est le coefficient de frottement qui dépend de la vitesse de glissement et de la pression exercée sur l'appui.

D'après les résultats des essais le coefficient de frottement au glissement est estimé par la relation suivante [26] :

$$\mu_s = f_{\max} - D_f \exp(-a|\dot{u}|) \quad \text{et} \quad D_f = f_{\max} - f_{\min}$$

f_{\max} : Coefficient de frottement à la plus grande vitesse de glissement

f_{\min} : Coefficient de frottement à la plus petite vitesse de glissement

\dot{u} : Vitesse de glissement

a : Constante qui dépend de la pression exercée et des conditions de l'interface.

3 - Amortisseurs Parasismiques

Les amortisseurs parasismiques ou dissipateurs d'énergie sont très efficaces pour atténuer et absorber l'énergie des vibrations sismiques [24]. Ils sont utilisés soit en association avec les isolateurs et permettent ainsi de réduire les déplacements imposés au système d'isolation, soit en superstructure des bâtiments non isolés. Les amortisseurs n'ont aucune fonction porteuse et ils peuvent être hystérétiques, visqueux ou à frottement.

3-1-Amortisseurs Hystérétiques

Ce sont des pièces réalisées en matériaux très ductiles tels que l'acier, le plomb etc. La dissipation d'énergie est obtenue à travers les déformations plastiques auxquelles ils sont soumis.

De nombreux types d'amortisseurs hystérétiques existent : barreaux de plomb qui sont placés comme des noyaux dans les appuis élastomères (Lead rubber bearings), barres courbes en acier ainsi que les poutres de torsion (a torsional-beam damper) [36]

3-2-Amortisseurs Visqueux

Ils sont également très efficaces et on peut citer à titre d'exemples : les amortisseurs à extrusion de plomb [36] dont la dissipation d'énergie est obtenue par le travail dépensé pour extruder du plomb à travers un orifice, les amortisseurs à fluides visqueux qui consistent en des boîtes fixées aux fondations et contenant un fluide de grande viscosité, enfin les amortisseurs à huile (oil damper).

3-3-Amortisseurs à Frottement

Pour ce type d'amortisseurs, la dissipation d'énergie est obtenue par frottement à sec.

4- Principe de l'isolation et composantes des systèmes d'isolation

Contrairement à la méthode classique qui a pour principe d'augmenter la rigidité de la structure et d'accepter ainsi des dégâts de manière contrôlée, l'isolation parasismique est basée sur le concept de la grande flexibilité horizontale, ce qui permet la réduction des accélérations transmises à la superstructure, par conséquent la réduction des charges sismiques agissant sur la structure, de plus la superstructure oscille pratiquement comme un bloc rigide [4].

Si d'un côté, les déplacements inter étages et les accélérations transmises sont réduits, d'un autre côté les déplacements des isolateurs peuvent être considérables surtout dans le cas de forts séismes. Il importe donc, pour limiter ces déplacements, d'associer aux isolateurs des amortisseurs ou des dissipateurs d'énergie [4], [41].

La figure 5 montre un modèle d'une construction isolée et les composantes du système d'isolation [40]. Ces composantes sont soit des parties intégrantes de l'isolateur, soit des parties séparées, tout dépend du type d'isolateur.

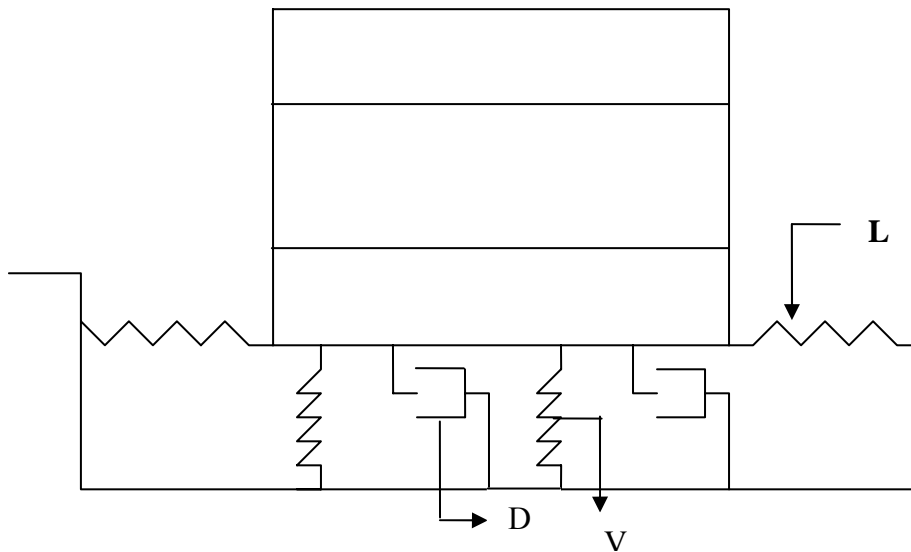


Fig.5 Modèle de construction isolée

Avec :

V : support vertical (isolateur).

L : support latéral (isolateur).

D : dissipateur

Dans les appuis élastomères frettés (rubber bearings), on trouve les deux composantes verticale V et latérale L

Dans les appuis élastomères avec amortisseur en barreau de plomb (lead rubber bearings) on trouve les trois composantes V, L, D.

Dans les appuis glissants (sliding bearings) on trouve les composantes V et D.

En plus de ces composantes, les appuis parasismiques comportent des dispositifs de recentrage [10], [4]. Ce sont des systèmes conçus pour ramener la structure à sa position initiale après chaque mouvement sismique.

Pour permettre aux systèmes d'isolation de se déplacer librement, un espace suffisant (seismic gap) doit être prévu au niveau des appuis [36], cet espace peut servir aussi pour leur inspection, maintenance et leur remplacement éventuel.

5 - Méthodes de calcul des constructions isolées

A l'instar des méthodes de conception conventionnelle, l'isolation parasismique est régie par des règlements de calcul ; selon le code américain UBC 97 (Uniform Building Code) et le code international IBC (International Building Code), les constructions isolées peuvent être analysées et calculées suivant trois méthodes [16], [17] à savoir :

- La méthode statique équivalente ou méthode de la force latérale équivalente.
- La méthode d'analyse dynamique par spectre de réponse (response spectrum analysis)
- La méthode d'analyse dynamique par accélérogramme (Time History Analysis)

5-1- Méthode statique

Cette méthode est applicable pour les structures satisfaisant aux conditions suivantes :

- Les structures sont situées à plus de 10 Km d'une faille active.
- Le sol est de type S_1 (sol ferme), S_2 (sol moyen), S_3 (sol meuble) ou S_4 (sol très meuble).
- La hauteur de la superstructure ne doit pas dépasser 20 m (4 niveaux).
- La période maximale de la structure isolée est inférieure ou égale à 3.0 secondes.
- La structure au dessus du système d'isolation est de forme régulière.

a) Calcul des déplacements

Le déplacement minimal de conception (design displacement) est défini comme étant le déplacement au centre de rigidité du système d'isolation correspondant au cas d'un séisme modéré DBE (Design Basis Earthquake).

Le déplacement maximal est le déplacement au centre de rigidité du système d'isolation correspondant au cas d'un séisme majeur MCE (Maximum Capable Earthquake).

Ces déplacements minimal et maximal sont donnés par les formules suivantes [27] :

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \frac{ZNS_I T_D}{B_D} \quad (1)$$

$$D_M = \frac{g}{4\pi^2} \frac{ZNS_I T_M}{B_M} \quad (2)$$

Avec :

g : Accélération de la pesanteur

Z : Coefficient de zone sismique (0.3 pour la zone 3 et 0.4 pour la zone 4)

N : Coefficient dépendant de la proximité de la faille active, donné dans le tableau 1.

S_I : Coefficient caractérisant le type de sol donné dans le tableau 2.

T_D : Période en seconde de la structure isolée correspondant au déplacement minimum.

T_M : Période en seconde de la structure isolée correspondant au déplacement maximal.

T_D, T_M Sont déterminées par les formules suivantes :

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{D \min} g}} \quad (3)$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M \min} g}} \quad (4)$$

Avec :

$K_{D \min}$: Rigidité minimale (kn/mm) du système d'isolation correspondant au déplacement minimal

$K_{M \min}$: Rigidité minimale (kn/mm) du système d'isolation correspondant au déplacement maximal.

W : Poids total de la structure.

B_D, B_M : Coefficients liés à l'amortissement β du système d'isolation. (Facteurs d'amortissement réduit). Ils sont donnés dans le tableau 3.

Distance à la faille	Magnitude MCE		
	≥ 8.0	$= 7.0$	≤ 6.0
≥ 15 Km	1.0	1.0	1.0
$= 10$ Km	1.2	1.0	1.0
≤ 5 Km	1.5	1.3	1.1

Tableau 1. Coefficient de proximité de la faille N

Type de sol	S_f
S_1 : sol ferme (rock/stiff)	1.0
S_2 : sol moyen (medium)	1.4
S_3 : sol meuble (soft)	2.3
S_4 : sol très meuble (very soft)	2.7

Tableau 2. Coefficient caractérisant le type de sol.

Amortissement effectif β (% de l'amortissement critique)	Facteur B_D ou B_M
$\leq 2 \%$	0.8
5 %	1.0
10 %	1.2
20 %	1.5
30 %	1.7
40 %	1.9
50 %	2.0

Tableau 3. Coefficient d'amortissement B_D ou B_M

b) Calcul du déplacement total

Le déplacement total est le déplacement de l'appui placé sous un poteau d'angle.

Pour déterminer le déplacement total minimal D_{TD} et le déplacement total maximal D_{TM} , le déplacement dû à l'excentricité réelle ou accidentelle doit être pris en considération.

D_{TD} et D_{TM} ne doivent pas être pris inférieurs aux déplacements donnés par les formules suivantes :

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (5)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (6)$$

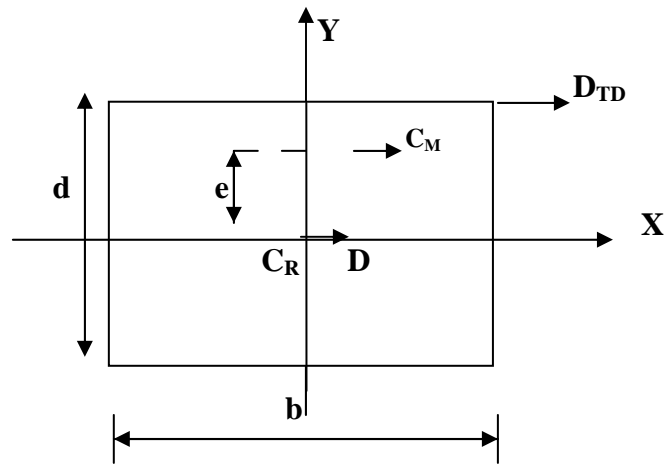


Fig.6 Dimensions en plan pour la détermination du déplacement total

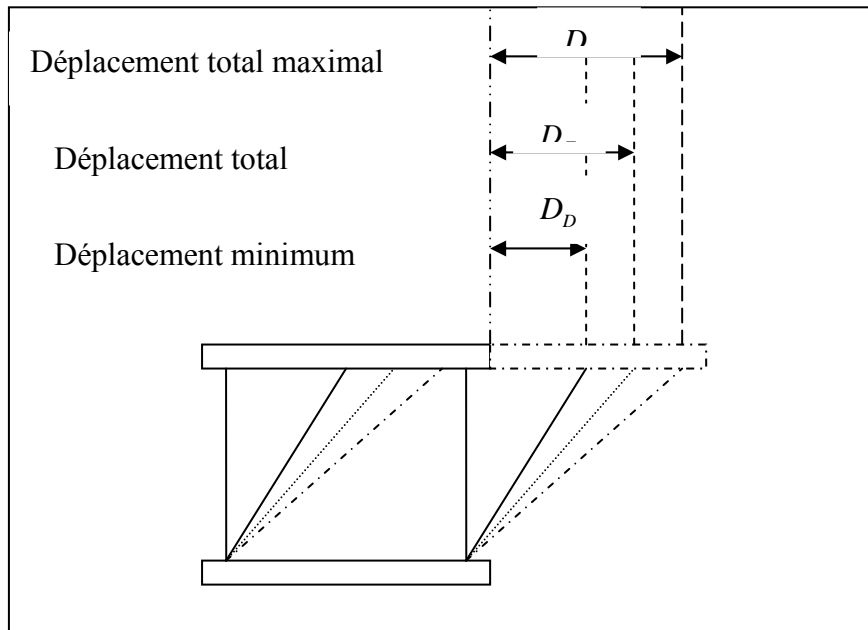


Fig.7 Déplacements du système d'isolation

c) Calcul des forces sismiques

Le système d'isolation ainsi que les éléments au dessous de l'interface d'isolation sont conçus pour résister à la force sismique minimale donnée comme suit :

$$V_b = K_{D_{\max}} D_D \quad (7)$$

Dans tous les cas V_b ne doit pas être prise inférieure à la force maximale du système d'isolation.

La force minimale pour les éléments de la superstructure est :

$$V_s = \frac{K_{D_{\max}} D_D}{R_f} \quad (8)$$

Avec :

$K_{D_{\max}}$: Rigidité maximale (kn/mm) du système d'isolation correspondant au déplacement minimal.

R_f : Facteur de comportement qui dépend du système de contreventement.

d) Distribution verticale de la force sismique.

La force latérale totale V_s doit être distribuée sur la hauteur de la superstructure selon la formule suivante :

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (9)$$

Avec :

w_x : Poids du niveau x

h_x : Hauteur du niveau x

w_i : Poids du niveau i

h_i : Hauteur du niveau i

e) Déplacements inter étages.

Les déplacements inter étages ne doivent pas dépasser $0.015h_x$

5 -2-Méthode dynamique :

L'analyse dynamique est applicable dans tous les cas, en particulier dans le cas où la méthode statique n'est pas permise. Elle consiste en une analyse par spectre de réponse ou une analyse par accélérogramme.

a) calcul des déplacements.

Selon l'IBC, le déplacement minimum total et le déplacement maximum total du système d'isolation dans ce cas ne doivent pas être pris inférieurs à 90% de D_{TD} et inférieurs à 80% de D_{TM} respectivement

b) calcul des forces latérales (selon l'IBC)

Pour le système d'isolation la force sismique ne doit pas être prise inférieure à 90% de V_b

Pour la superstructure :

Pour une forme régulière de la superstructure, la force sismique ne doit pas être prise inférieure à 80% de V_s et pas inférieure à 60% de V_s dans le cas d'une analyse par accélérogramme.

Pour une forme irrégulière, la force ne doit pas être prise inférieure à V_s et pas inférieure à 80% de V_s dans le cas d'une analyse par accélérogramme.

c) Déplacements inter étages

Les déplacements inter étages correspondants à la force latérale, en tenant compte du déplacement dû à la déformation verticale du système d'isolation, sont donnés comme suit :

- Les déplacements inter étages d'une structure isolée calculée par la méthode spectrale ne doivent pas dépasser $0.015h_x$

- Les déplacements inter étages d'une structure isolée calculée par accélérogramme, en considérant les caractéristiques de la courbe force- déplacement des éléments non linéaires du système, ne doivent pas dépasser $0.020h_x$

Paramètre de calcul	Analyse statique	Analyse dynamique	
Déplacement minimal	$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \frac{S_{D1} T_D}{B_D}$	-	-
Déplacement minimal Total	$D_{TD} = D_D \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] \approx 1.1 D_D$	$\geq 0.9 D_{TD}$	$\geq 0.9 D_{TD}$
Déplacement maximal	$D_M = \frac{g}{4\pi} \frac{S_{M1} T_M}{B_M}$	-	-
Déplacement maximal Total	$D_{TM} = D_M \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] \approx 1.1 D_M$	$\geq 0.8 D_{TM}$	$\geq 0.8 D_{TM}$
Force sismique pour le Système d'isolation	$V_b = K_{D \max} D_D$	$\geq 0.9 V_b$	$\geq 0.9 V_b$
Force sismique pour une Superstructure régulière	$V_s = \frac{K_{D \max} D_D}{R_I}$	$\geq 0.8 V_s$	$\geq 0.6 V_s$
Force sismique pour une Superstructure irrégulière	$V_s = \frac{K_{D \max} D_D}{R_I}$	$\geq 1 V_s$	$\geq 0.8 V_s$
Déplacements inter étages	$\leq 0.015 h_x$	$\leq 0.015 h_x$	$\leq 0.020 h_x$

Tableau 4. Valeurs minimales de l'analyse dynamique données en fonction des valeurs de l'analyse statique.

6- Conclusion

Avant son utilisation, tout système d'appuis parasismiques doit faire l'objet d'une procédure de validation technique destinée à déterminer ses caractéristiques de calcul ainsi qu'à prouver sa fiabilité et sa durabilité. Un contrôle de conformité doit être également effectué avant la mise en place des appuis [41], [8], [43].

1-Introduction

L'une des étapes essentielles en vue d'une étude dynamique des structures est le choix du modèle mathématique, par conséquent la schématisation des systèmes d'appuis parasismiques par des modèles mathématiques qui permettent l'établissement des relations théoriques décrivant leur comportement est très importante pour l'analyse du comportement du système combiné (le système d'isolation et la superstructure). Dans ce chapitre, nous allons décrire brièvement quelques modèles mathématiques simples des principaux systèmes d'isolation [37], [36]. à savoir : les appuis frettés avec et sans amortisseur en barreau de plomb, appuis à frottement pur, appuis résistant par frottement, appuis glissants utilisés par EDF (Electricité De France), appuis à frottement résistant par glissement et enfin les appuis en pendules glissants.

2 -Modélisation Mathématique des Appuis Parasismiques.

2-1-Appuis en caoutchouc fretté. (Laminated Rubber Bearings)

Ils ont été beaucoup testés à l'université de Californie, ils sont composés de couches alternées de caoutchouc et d'acier laminé. En raison du frottement interne d'élastomère, l'appui agit également comme un amortisseur visqueux.

Le modèle mathématique est donné par la fig.8.

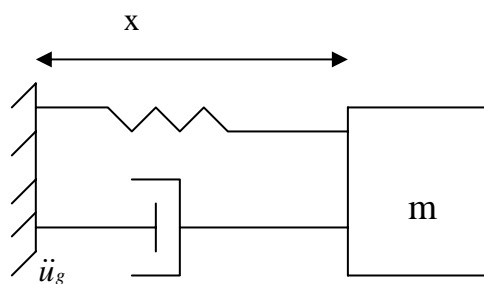


Fig.8.Modèle mathématique

Le système est soumis à l'accélération du sol \ddot{u}_g , l'équation du mouvement est comme suit :

$$m(\ddot{x} + \ddot{u}_g) + c\dot{x} + kx = 0$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{u}_g$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega^2\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{u}_g \quad (1)$$

Avec $\omega^2 = \frac{k}{m}$ et $2\zeta\omega = \frac{c}{m}$

ζ : Coefficient d'amortissement

2-2-Appuis en Caoutchouc avec Amortisseur en Barreau de Plomb

Ce type d'isolateurs a été beaucoup utilisé à la Nouvelle Zélande, en Italie et au Japon. En plus des couches alternées d'élastomère naturel et de plaques d'acier, il comporte un noyau central en barreau de plomb dont la fonction est de dissiper de l'énergie. Le système se comporte comme un amortisseur hystérétique. Le risque pour ce type d'appuis est la détérioration du noyau en plomb. Le modèle mathématique est donné par la figure 9.

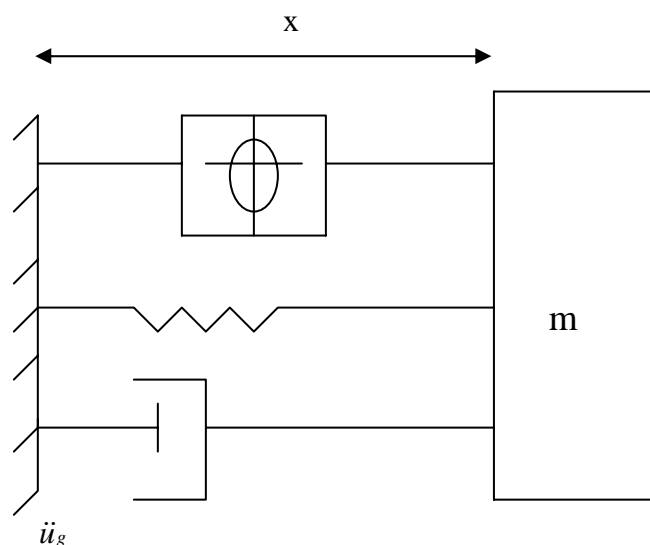


Fig.9. Modèle mathématique

La force latérale dans l'amortisseur est donnée par la relation suivante :

$$F(x) = \alpha \left(\frac{F_y}{Y} \right) x + (1 - \alpha) F_y Z \quad (2)$$

La composante hystérétique Z est définie par :

$$Y\dot{Z} + \gamma |\dot{x}| Z |Z|^{\eta-1} + \beta \dot{x} |Z|^{\eta} - A\dot{x} = 0 \quad (3)$$

A, γ, β, η sont des constantes adimensionnelles

F_y : Force d'écoulement

Y : déplacement à l'écoulement (yield displacement)

α : Rapport des rigidités des phases plastique et élastique.

Equation du mouvement :

L'équation du mouvement est donnée comme suit :

$$m(\ddot{x} + \ddot{u}_g) + c \dot{x} + k x + N \left[\alpha \left(\frac{F_y}{Y} \right) x + (1 - \alpha) F_y Z \right] = 0$$

$$\Rightarrow \ddot{x} + 2\zeta \omega \dot{x} + \omega^2 x + \left(\frac{N}{m} \right) \left[\alpha \left(\frac{F_y}{Y} \right) x + (1 - \alpha) F_y Z \right] = -\ddot{u}_g \quad (4)$$

N : nombre d'amortisseurs hystérétiques.

2-3- Appuis à Frottement Pur (Pur-friction base isolation)

Dans ce cas l'isolation est assurée par un frottement au glissement.

Ce type d'appuis est le plus simple système d'isolation par frottement, aussi il est considéré comme le système de base pour les appuis à glissement proposés par la suite. [37].

Le modèle mathématique est illustré sur la figure 10.

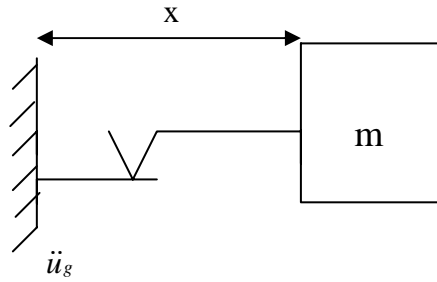


Fig.10. Modèle mathématique

La force de frottement dans les plaques est donnée par [26], [27] :

$$F_f = \mu mg \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (5)$$

Pour la phase de glissement le mouvement est décrit par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} m(\ddot{x} + \ddot{u}_g) + \mu mg \operatorname{sgn}(\dot{x}) &= 0 \\ \ddot{x} + \mu g \operatorname{sgn}(\dot{x}) &= -\ddot{u}_g \end{aligned} \quad (6)$$

μ : Coefficient de frottement

g : accélération de la pesanteur.

$\dot{x}=0$ exprime la condition de non glissement.

$\mu g - |\ddot{u}_g| \geq 0$: Cette relation exprime la condition d'attachement (Stick condition).

Si cette condition n'est pas vérifiée, il y aura glissement.

L'inconvénient que présente ce type d'appuis est l'absence des forces de rappel.

2-4-Système d'isolation résistant par frottement

(Resilient-friction base isolation system)

Ces isolateurs sont constitués de plaques concentriques qui sont en contact de frottement l'une par rapport à l'autre et reliées par un ou plusieurs noyaux en caoutchouc dont le rôle est de distribuer le glissement sur la hauteur de l'isolateur.

Les actions de frottement, d'amortissement et des forces résistantes sont parallèles, ce qui est représenté sur le modèle mathématique de la fig. 11.

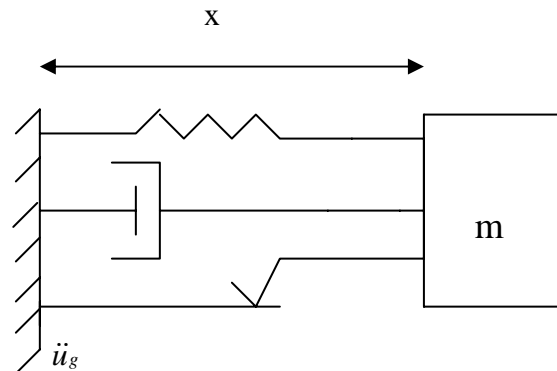


Fig.11. Modèle mathématique

Equation du mouvement :

Pour ce type d'appuis le mouvement est régi par l'équation suivante :

$$m(\ddot{x} + \ddot{u}_g) + c\dot{x} + \kappa x + \mu g m \operatorname{sgn}(\dot{x}) = 0$$

$$\Rightarrow \ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2 x + \mu g \operatorname{sgn}(\dot{x}) = -\ddot{u}_g \quad (7)$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} : \text{Fréquence du système}$$

ζ : Coefficient d'amortissement

μ : Coefficient de frottement

La condition d'attachement (stick condition) est exprimée par :

$$\mu g - |\ddot{u}_g + \omega^2 x| \geq 0$$

Aussi longtemps que cette condition est vérifiée, la condition de non glissement est vérifiée.

2-5- Appuis Glissants utilisés par l'EDF (Electricité de France)

Ils sont constitués de plaques fixées à la superstructure et de plaques solidaires des isolateurs élastomères qui se déforment latéralement grâce à la distorsion de l'élastomère. Lorsque la force nécessaire à l'accroissement de la distorsion est supérieure à la force de frottement entre les plaques, le glissement commence, ce qui signifie que les actions des plaques et des isolateurs sont en série, comme le représente schématiquement la figure 12.

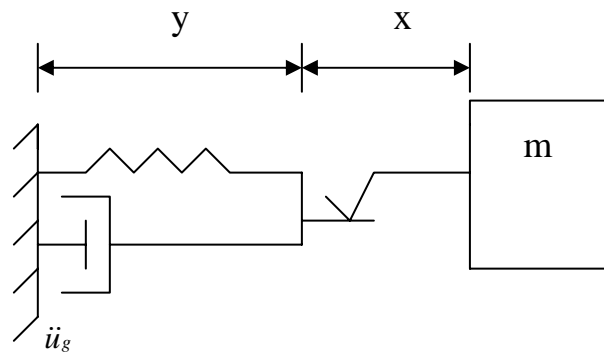


Fig.12. Modèle mathématique

Equation du mouvement :

Les équations qui régissent le mouvement pendant le glissement sont :

$$m(\ddot{x} + \ddot{y}) + \mu mg \operatorname{sgn}(\dot{x}) = -m\ddot{u}_g \quad (8)$$

$$c\dot{y} + ky - \mu mg \operatorname{sgn}(\dot{x}) = 0 \quad (9)$$

Avec :

y : déplacement relatif

x : glissement

Les deux équations deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} + \mu g \operatorname{sgn}(\dot{x}) = -\ddot{u}_g - \ddot{y} \quad (10) \\ 2\zeta\omega\dot{y} + \omega^2 y = \mu g \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (11) \end{array} \right.$$

L'équation (10) nous donne :

$$\mu g \operatorname{sgn}(\dot{x}) = -\ddot{x} - \ddot{y} - \ddot{u}_g \quad (12)$$

En injectant l'équation (12) dans l'équation (11) on aura :

$$\ddot{y} + 2\zeta\omega\dot{y} + \omega^2 y = -\ddot{x} - \ddot{u}_g \quad (13)$$

$$\mu g = -\ddot{y} - \ddot{u}_g \quad (14)$$

$$\dot{x}=0 \quad \Rightarrow \quad \ddot{y} + 2\zeta\omega\dot{y} + \omega^2 y = -\ddot{u}_g \quad (15)$$

Il ressort de ces équations que pendant la phase élastique (non glissement) le système se comporte comme un isolateur en caoutchouc laminé et la condition d'attachement (stick condition) est :

$$\mu g - |\ddot{u}_g + \ddot{y}| \geq 0 \quad (16)$$

2-6-Appuis à frottement résistant par glissement (SR-F base isolator)

Ce type d'isolateur est une conception qui résulte d'une combinaison de quelques composantes des systèmes EDF et R-FBI. Les plaques de frottement du système EDF sont solidaires du système de plaques où sont insérés des noyaux en caoutchouc. Dans ce cas le modèle mathématique est représenté par la figure 13.

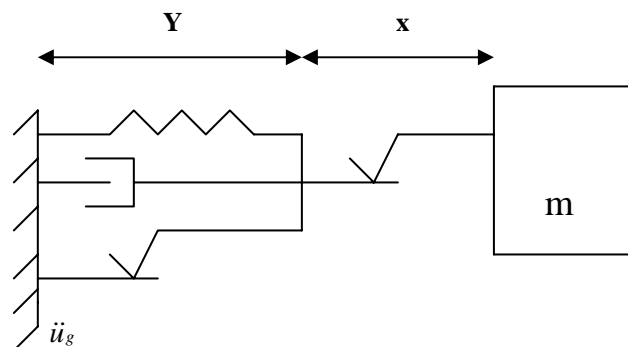


Fig.13. Modèle mathématique

Equations du mouvement :

Le mouvement est régi par les deux équations suivantes :

$$m\ddot{x} + \mu g m \operatorname{sgn}(\dot{x}) = -m(\ddot{u}_g + \ddot{y}) \quad (17)$$

$$c\dot{y} + ky + \mu_1 g m \operatorname{sgn}(\dot{y}) - \mu mg \operatorname{sgn}(\dot{x}) = 0 \quad (18)$$

$$\ddot{x} + \mu g \operatorname{sgn}(\dot{x}) = -\ddot{u}_g - \ddot{y} \quad (19)$$

$$\Rightarrow 2\zeta\omega\dot{y} + \omega^2 y + \mu_1 g \operatorname{sgn}(\dot{y}) = \mu g \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (20)$$

En remplaçant $\mu g \operatorname{sgn}(\dot{x})$ par sa valeur on aura :

$$\ddot{y} + 2\zeta\omega\dot{y} + \omega^2 y + \mu_1 g \operatorname{sgn}(\dot{y}) = -\ddot{u}_g - \ddot{x} \quad (21)$$

μ_1 : Coefficient de frottement des plaques de l'isolateur.

μ : Coefficient de frottement des plaques supérieures.

$$\dot{x}=0 \quad \Rightarrow \quad \ddot{y} + 2\zeta\omega\dot{y} + \omega^2 y + \mu_1 g \operatorname{sgn}(\dot{y}) = -\ddot{u}_g \quad (22)$$

Dans ce cas ($\dot{x}=0$) le comportement du système est similaire à celui d'un R-FBI

$\dot{x}=0$ est maintenue tant que la condition $\mu g - |\ddot{u}_g + \ddot{y}| \geq 0$ est vérifiée. Si on enregistre seulement le glissement des plaques supérieures, les équations du mouvement deviennent :

$$\dot{y}=0$$

$$\ddot{x} + \mu g \operatorname{sgn}(\dot{x}) = -\ddot{u}_g \quad (23)$$

Dans ce cas ($\dot{y}=0$) le système se comporte comme un isolateur à frottement pur.

$\dot{y}=0$ est vérifiée tant que $\mu_1 g - |\ddot{u}_g + \omega^2 y + \ddot{x}| \geq 0$ est vérifiée.

Pour que le système fonctionne efficacement, il faut que μ soit supérieur à μ_1 .

2-7 - Appuis en Pendules glissants

Ils sont des appuis glissants constitués de plaques sphériques concaves en acier inoxydable et des rotules. Pendant le mouvement du sol, la rotule glisse à l'intérieur de la surface concave permettant ainsi à la structure d'effectuer un mouvement de pendule (figure 14), d'où l'appellation des appuis en pendules glissants. Le modèle mathématique est donné par la figure 15

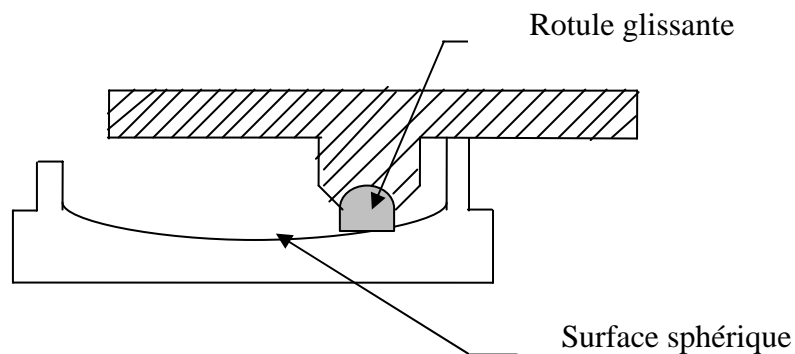


Fig.14. Déplacement d'un appui en pendule glissant

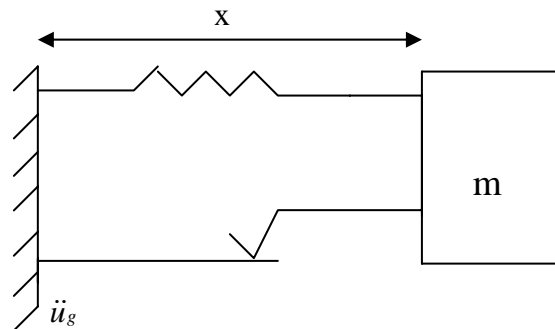


Fig.15. Modèle mathématique

La force latérale développée dans le système est donnée comme suit :

$$F = \frac{W}{R} x_b + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (24)$$

Avec :

μ : Coefficient de frottement

R : Rayon de courbure de la surface sphérique.

W : Poids de la structure

Equation du mouvement :

$$m(\ddot{x} + \ddot{u}_g) + F = 0$$

$$\Rightarrow m\ddot{u}_g + m\ddot{x} + \frac{W}{R}x + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{x}) = 0$$

On remarque dans cette équation que la rigidité du système est donnée par le rapport du poids sur le rayon de courbure.

$$\Rightarrow \ddot{x} + \omega_0^2 x + \mu g \operatorname{sgn}(\dot{x}) = -\ddot{u}_g \quad (25)$$

$$\text{Avec } \omega_0^2 = \frac{g}{R}$$

1-Introduction

Certaines des actions qui s'exercent sur une structure, telles que les charges sismiques, sont à l'origine des sollicitations variables dans le temps, ce qui fait la différence entre un problème dynamique et un problème statique, aussi la réponse de la structure se trouve conditionnée par les forces d'inertie.

Le calcul dynamique est basé sur la détermination de la réponse des structures, à la sollicitation sismique, par la prise en compte des forces d'inertie. Il reste tout de même que les données requises pour une analyse quelconque (statique ou dynamique) sont les caractéristiques intrinsèques de la structure à savoir les fréquences naturelles et les modes propre de vibration.

L'objectif de ce chapitre en premier lieu est de formuler les équations du mouvement d'une structure isolée, et de développer les matrices masse $[M]$, rigidité $[K]$ et amortissement $[C]$, puis l'équation caractéristique permettant la détermination des fréquences en résultera.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, on présentera un exemple d'application comparatif des réponses des structures encastrees et isolées [1].

2- Formulation des Equations du Mouvement et Analyse des structures isolées

2-1-Analyse d'une structure à deux degrés de liberté

Pour comprendre le comportement des structures isolées à n degrés de liberté, il est utile de considérer d'abord une analyse d'une construction à un seul niveau avec un isolateur linéaire [20] ce qui fait un modèle à deux degrés de liberté (figure16). Le modèle mathématique est illustré par la figure17.

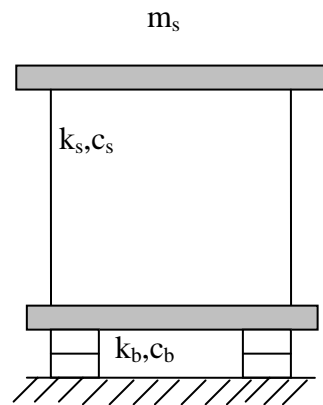


Fig.16. structure à deux degrés de liberté

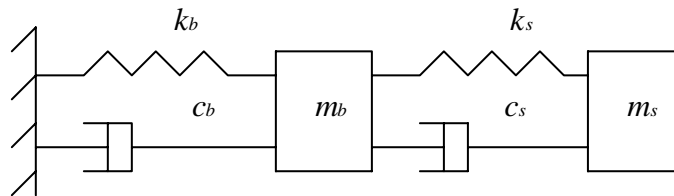


Fig.17. Modèle mathématique d'une structure à deux ddl

u_s, u_b sont les déplacements absolus de m_s et de m_b

v_s, v_b sont les déplacements relatifs de m_s et de m_b

On a : $u_s = u_b + v_s$

$u_b = u_g + v_b$

a) Equations du mouvement

$$m_s \ddot{u}_s + c_s (\dot{u}_s - \dot{u}_b) + k_s (u_s - u_b) = 0$$

$$m_s (\ddot{u}_b + \ddot{v}_s) + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = 0$$

$$m_s \ddot{v}_s + m_s \ddot{v}_b + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m_s \ddot{u}_g \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
(m_s + m_b) \ddot{u}_b + m_s \ddot{v}_s + c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b (u_b - u_g) &= 0 \\
(m_s + m_b) (\ddot{u}_g + \ddot{v}_b) + m_s \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b &= 0 \\
(m_s + m_b) \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b &= -(m_s + m_b) \ddot{u}_g
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (m_s + m_b) \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m_s + m_b) \ddot{u}_g \\ m_s \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m_s \ddot{u}_g \end{array} \right\} \tag{3}$$

b) Construction des matrices

$$[M] = \begin{bmatrix} m & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \quad \text{avec } m = m_s + m_b \quad [C] = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}$$

L'équation du mouvement sous forme matricielle est donnée par :

$$[M] \{\ddot{v}\} + [C] \{\dot{v}\} + [K] \{v\} = -[M] \{r\} \ddot{u}_g \tag{4}$$

$$\text{Avec } \{r\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \{v\} = \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix}$$

c) Calcul des pulsations

Les pulsations ω_n sont déterminées par la relation suivante :

$$\text{Det} \left([K] - \omega_n^2 [M] \right) = 0 \tag{5}$$

$$\text{Det} \left(\begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} - \omega_n^2 \begin{bmatrix} m & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \right) = 0$$

$$\text{Det} \begin{pmatrix} k_b - \omega_n^2 & -\omega_n^2 m_s \\ -\omega_n^2 m_s & k_s - \omega_n^2 m_s \end{pmatrix} = 0$$

$$\Rightarrow (k_b - \omega_n^2 m) (k_s - \omega_n^2 m_s) - \omega_n^4 m_s^2 = 0 \quad (6)$$

L'équation caractéristique pour la détermination de ω_n est donnée comme suit :

$$(1 - \gamma) \omega_n^4 - (\omega_s^2 + \omega_b^2) \omega_n^2 + \omega_s^2 \omega_b^2 = 0 \quad (7)$$

$$\text{avec } \frac{m_s}{m} = \gamma, \quad \frac{k_s}{m_s} = \omega_s^2, \quad \frac{k_b}{m} = \omega_b^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \end{array} \right\} = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ (\omega_s^2 + \omega_b^2) \pm [(\omega_s^2 + \omega_b^2)^2 - 4(1-\gamma)\omega_s^2 \omega_b^2]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

La plus petite valeur de ω_1 et ω_2 notée ω_b^* représente la fréquence d'isolation translattée (The shifted isolation frequency) l'autre valeur notée ω_s^* représente la fréquence de la structure.

d) Détermination des modes propres:

Les modes propres de vibration de la structure sont déterminés par l'équation suivante :

$$([K] - \omega_n^2 [M]) \{\Phi^n\} = \{0\} \quad (8)$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} k_b - \omega_n^2 m & -\omega_n^2 m_s \\ -\omega_n^2 m_s & k_s - \omega_n^2 m_s \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_b^n \\ \Phi_s^n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} (\omega_b^2 - \omega_n^2) \Phi_b^n - \omega_n^2 \gamma \Phi_s^n = 0 \\ -\omega_n^2 \Phi_b^n + (\omega_s^2 - \omega_n^2) \Phi_s^n = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Le premier mode $\Phi_1 = \begin{Bmatrix} \Phi_b^1 \\ \Phi_s^1 \end{Bmatrix}$, correspond à la pulsation ω_1

Le deuxième mode $\Phi_2 = \begin{Bmatrix} \Phi_b^2 \\ \Phi_s^2 \end{Bmatrix}$, correspond à la pulsation ω_2

2-2 - Structures à n degrés de liberté

L'analyse qui a été faite pour la structure à deux degrés de liberté peut être étendue à des structures à n degrés de liberté. (Figure 18)

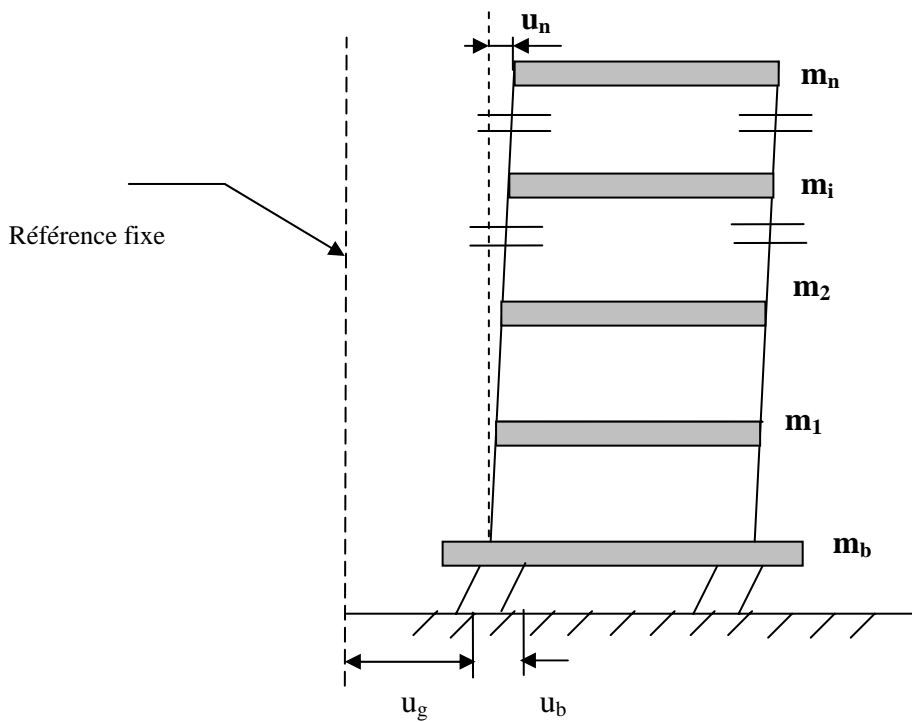


Fig.18. Déplacements d'une structure isolée à n ddl

Pour une structure classique (encastrée) à n degrés de liberté soumise à l'accélération du sol \ddot{u}_g , l'équation du mouvement sous forme matricielle est donnée comme suit :

$$[M_0]\ddot{u} + [C_0]\dot{u} + [K_0]u = -[M_0]r\ddot{u}_g \quad (10)$$

Avec u : vecteur déplacement par rapport au sol

r : vecteur d'influence

$[M_0]$, $[C_0]$ et $[K_0]$ désignent respectivement les matrices masse, amortissement et rigidité d'ordre $(n \times n)$.

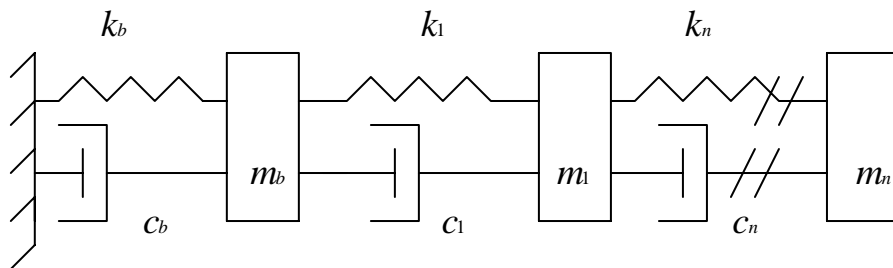


Fig.19. Modèle mathématique d'une structure à n ddl

a) Equations du mouvement

Le modèle mathématique pour la structure à n ddl est donné par la figure 19.

L'équation de la base m_b est comme suit :

$$m_b\ddot{u}_b + m_1\ddot{u}_1 + m_2\ddot{u}_2 + \dots + m_n\ddot{u}_n + c_b(\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b(u_b - u_g) = 0$$

$$m_b(\ddot{u}_g + \ddot{v}_b) + m_1\ddot{u}_b + m_1\ddot{v}_1 + m_2\ddot{u}_2 + m_2\ddot{v}_2 + \dots + m_n\ddot{u}_b + m_n\ddot{v}_n + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = 0$$

u_b, u_1, \dots, u_n sont les déplacements absolus et v_b, v_1, \dots, v_n sont les déplacements relatifs

Nous avons :

$$u_b = u_g + v_b, \quad u_1 = u_b + v_1, \quad u_n = u_b + v_n$$

L'équation de la base m_b devient :

$$m_b \ddot{u}_b + m_1 \ddot{u}_1 + m_2 \ddot{u}_2 + \dots + m_n \ddot{u}_n + c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b (u_b - u_g) = 0 \quad (11)$$

$$\Rightarrow (m_b + m_1 + m_2 + \dots + m_n) \ddot{v}_b + m_1 \ddot{v}_1 + m_2 \ddot{v}_2 + \dots + m_n \ddot{v}_n + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m_b + m_1 + \dots + m_n) \ddot{u}_g$$

Equation de la masse m_i

$$m_i \ddot{u}_i + c_i (\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) - c_{i+1} (\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i) + k_i (u_i - u_{i-1}) - k_{i+1} (u_{i+1} - u_i) = 0$$

$$\Rightarrow m_i \ddot{v}_b + m_i \ddot{v}_i - c_i \dot{v}_{i-1} + (c_i + c_{i+1}) \dot{v}_i - c_{i+1} \dot{v}_{i+1} - k_i v_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) v_i - k_{i+1} v_{i+1} = -m_i \ddot{u}_g \quad (12)$$

Equation de la masse m_n

$$m_n \ddot{u}_n + c_n (\dot{u}_n - \dot{u}_{n-1}) + k_n (u_n - u_{n-1}) = 0$$

$$\Rightarrow m_n \ddot{v}_b + m_n \ddot{v}_n - c_n \dot{v}_{n-1} + c_n \dot{v}_n - k_n v_{n-1} + k_n v_n = -m_n \ddot{u}_g \quad (13)$$

b) Construction des matrices

Les matrices $[M]$, $[C]$ et $[K]$ sont données comme suit :

$$[M] = \begin{bmatrix} m_b + m & m_1 & m_i & m_n \\ m_1 & m_1 & 0 & 0 \\ m_i & 0 & m_i & 0 \\ m_n & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} \Rightarrow [M] = \begin{bmatrix} m + m_b & r^t [M_0] \\ [M_0] r & [M_0] \end{bmatrix}$$

Avec $m = m_1 + m_2 + \dots + m_n$ et $r^t = \{1, 1, 1, \dots, 1\}$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & [C_0] \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & [K_0] \end{bmatrix} \quad \{V\} = \begin{Bmatrix} v_b \\ v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{Bmatrix}$$

L'équation du mouvement du système combiné (système d'isolation plus la superstructure) sous forme matricielle est donnée par :

$$[M]\{\ddot{V}\} + [C]\{\dot{V}\} + [K]\{V\} = -[M]r^t\ddot{u}_g \quad (14)$$

On pose : $\{V\} = \begin{Bmatrix} v_b \\ v_i \end{Bmatrix} \quad i = 1, n$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} m + m_b & r^t[M_0] \\ [M_0]r^t & [M_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & [C_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & [K_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_i \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m + m_b & r^t[M_0] \\ [M_0]r & [M_0] \end{bmatrix} \ddot{u}_g$$

$$(m + m_b) \ddot{v}_b + r^t[M_0]\ddot{v}_i + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (15)$$

$$\Rightarrow [M_0]r\ddot{v}_b + [M_0]\ddot{v}_i + [C_0]\dot{v}_i + [K_0]v_i = -[M_0]r\ddot{u}_g \quad (16)$$

c) Détermination des pulsations

Les modes naturels d'une structure encastree sont supposés connus et ils sont notés ϕ_i , $i = 1, n$.

Le déplacement de chaque degré de liberté de la structure peut être représenté en fonction de ces modes propres :

$$v = \sum_{i=1}^n y_i \phi_i$$

Les fréquences naturelles ω_n d'une structure encastree sont déterminées par :

$$\det([K_0] - \omega_n^2 [M_0]) = 0$$

En remplaçant v par sa valeur dans l'équation (15) on aura :

$$\sum_{i=1}^n r^t [M_0] \phi_i \ddot{y}_i + (m + m_b) \ddot{v}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b) \ddot{u}_g \quad (17)$$

En remplaçant aussi v par sa valeur dans l'équation (16) on aura :

$$[M_0]\phi_i \ddot{y}_i + [C_0]\phi_i \dot{y}_i + [K_0]\phi_i y_i = -[M_0]r(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) \quad (18)$$

En multipliant les deux membres de cette équation par ϕ_i^t et en simplifiant on aura :

$$\ddot{y}_i + \frac{\phi_i^t [C_0] \phi_i}{\phi_i^t [M_0] \phi_i} \dot{y}_i + \frac{\phi_i^t [K_0] \phi_i}{\phi_i^t [M_0] \phi_i} y_i = -\frac{\phi_i^t [M_0] r}{\phi_i^t [M_0] \phi_i} (\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) \quad (19)$$

$$\text{Posons : } \quad \frac{\phi_i^t [K_0] \phi_i}{\phi_i^t [M_0] \phi_i} = \omega_i^2, \quad \frac{\phi_i^t [C_0] \phi_i}{\phi_i^t [M_0] \phi_i} = 2\xi_i \omega_i, \quad \frac{\phi_i^t [M_0] r}{\phi_i^t [M_0] \phi_i} = L_i$$

$$L_i \ddot{v}_b + \ddot{y}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = -L_i \ddot{u}_g \quad (20)$$

Les masses modales pour une structure encastree sont donnees par :

$$M_i = \phi_i^t [M_0] \phi_i$$

L'équation (19) devient :

$$\sum_{i=1}^n \frac{L_i \phi_i^t [M_0] \phi_i}{m + m_b} \ddot{y}_i + \ddot{v}_b + \frac{c_b}{m + m_b} \dot{v}_b + \frac{k_b}{m + m_b} v_b = -\ddot{u}_g$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^n \frac{L_i M_i}{m + m_b} \ddot{y}_i + \ddot{v}_b + 2\xi_b \omega_b \dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (21)$$

$$\text{Avec } \frac{c_b}{m + m_b} = 2\xi_b \omega_b \quad \text{et} \quad \frac{k_b}{m + m_b} = \omega_b^2$$

Si le système combiné oscille avec l'un de ses modes naturels (avec la fréquence ω), alors v_b et chaque coordonnée généralisée de la structure encastree vont osciller avec la même pulsation.

$$v_b = \bar{v}_b e^{i\omega t} \quad \text{et} \quad y_i = \bar{y}_i e^{i\omega t}$$

Les modes naturels classiques sont déterminés par les équations du système libre non amorti à savoir :

$$\ddot{y}_i + \omega_i^2 \dot{y}_i + L_i \ddot{v}_b = 0 \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{L_i M_i}{m + m_b} \ddot{y}_i + \ddot{v}_b + \omega_b^2 v_b = 0 \quad (23)$$

Injectant y_i et v_b dans les équations (22) et (23) :

$$\left(\omega_i^2 - \omega^2\right) \bar{y}_i - \omega^2 L_i \bar{v}_b = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{y}_i = \frac{L_i \omega^2}{\left(\omega_i^2 - \omega^2\right)} \bar{v}_b \quad (24)$$

$$-\omega^2 \sum_{i=1}^n \frac{L_i M_i}{m + m_b} \bar{y}_i + \left(\omega_b^2 - \omega^2\right) \bar{v}_b = 0 \quad (25)$$

En injectant \bar{y}_i dans (25) on aura :

$$-\omega^2 \sum_{i=1}^n \frac{L_i M_i}{m + m_b} \frac{\omega^2 L_i}{\left(\omega_i^2 - \omega^2\right)} \bar{v}_b + \left(\omega_b^2 - \omega^2\right) \bar{v}_b = 0$$

$$\text{Pour } \bar{v}_b \neq 0 : \quad \Rightarrow \quad \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2 M_i}{m + m_b} \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega_i^2}{\omega^2}\right)} = \left(1 - \frac{\omega_b^2}{\omega^2}\right) \quad (26)$$

Si on reconnaît $L_i^2 M_i$ comme étant la masse effective au i^{eme} mode de la structure encastrée et par analogie avec le modèle à deux degrés de liberté on a :

$$\gamma_i = \frac{L_i^2 M_i}{m + m_b} \quad \Rightarrow \quad \sum_{i=1}^n \gamma_i = \frac{m}{m + m_b}$$

L'équation (26) est l'équation caractéristique permettant la détermination des pulsations $\omega_0^*, \omega_1^*, \dots, \omega_n^*$ du système combiné.

3- Exemple d'application

Pour illustrer l'effet des systèmes d'isolation parasismique sur les structures, une analyse numérique a été faite sur une structure à trois niveaux [30]. Cette analyse consiste à comparer les réponses en déplacements, accélérations et déplacements inter étage de la structure isolée et celles de la même structure sans le système d'isolation.

Pour cette comparaison deux programmes numériques d'analyse des structures sont utilisés à savoir 3D-BASIS-TABS [30] pour les structures isolées et SAP90 [39] pour les structures encastrees.

3-1-Description de la structure

La structure est un bâtiment à trois niveaux en béton armé de forme en plan carrée de $12 \times 12 \text{ m}^2$ comportant trois travées de 4 m chacune suivant chaque côté. Les poutres sont de $30 \times 40 \text{ cm}^2$, les poteaux intérieurs sont de $30 \times 40 \text{ cm}^2$, les poteaux de rive sont de $30 \times 30 \text{ cm}^2$ et la hauteur d'étage est de 3.50 m.

3-2- Description du système d'isolation et l'excitation sismique

Le système d'isolation consiste en 16 appuis à glissement, (sliding bearings) placés d'une façon concentrique sous chaque poteau, ainsi que 4 ressorts utilisés comme système de recentrage, placés aux quatre angles du bâtiment.

Les valeurs maximale et minimale du coefficient de frottement des appuis sont :

$$f_{\max} = 0.1 \quad \text{et} \quad f_{\min} = 0.07$$

La période du système d'isolation $T_b = 2\pi \sqrt{\frac{m + m_b}{k_b}} = 3 \text{ sec.}$

L'excitation sismique considérée, pour les deux types de structure encastree et isolée, est la composante NS du séisme d'El Centro avec une accélération maximale du sol de 0.3417g. L'accélérogramme et le contenu fréquentiel de l'excitation sont représentés sur les figures 20 et 21.

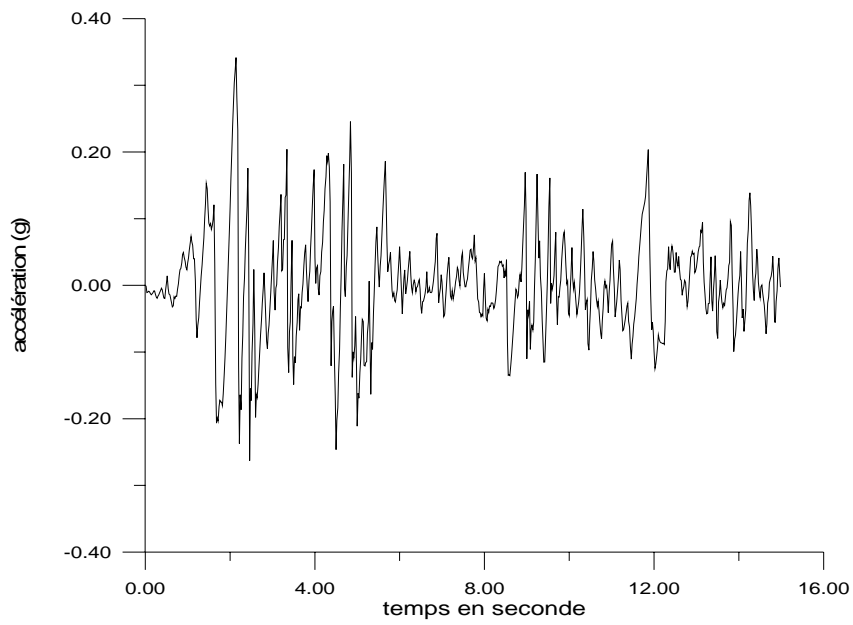


Fig.20. Accélérogramme à la base

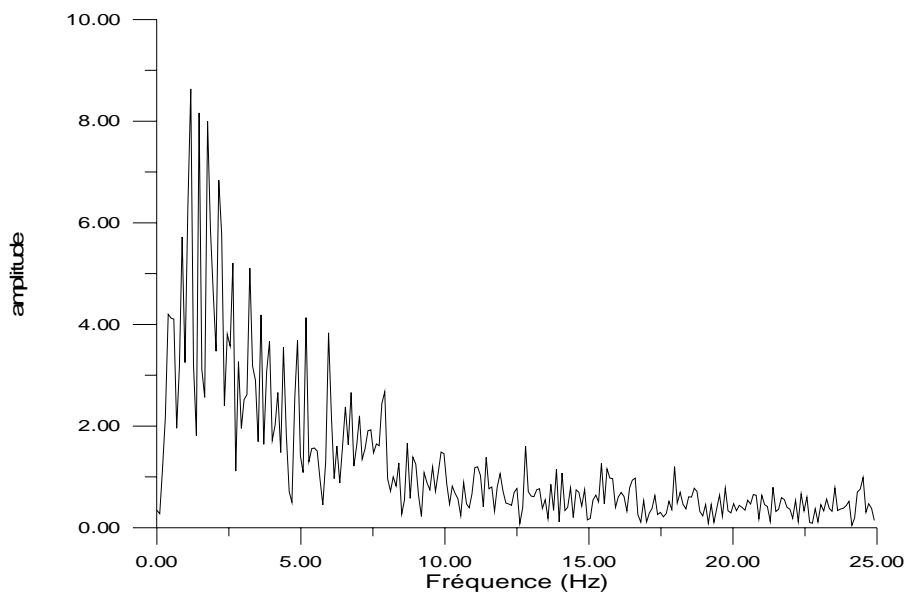


Fig.21. Contenu fréquentiel de l'excitation

3-3- Comparaison des résultats

a) Périodes et pulsations

Dans le tableau 5 sont données les pulsations et les périodes obtenues pour les deux types de structure, d'après ces résultats les pulsations correspondant aux modes isolés sont réduites en moyenne de 37%, ce qui montre que l'isolation par la base est d'assouplir le bâtiment.

	Structure encastree		Structure isolée	
	période	pulsation	Période	pulsation
1	0.201040	31.2534	0.269144	23.3450
2	0.169939	36.9731	0.267683	23.4724
3	0.124448	50.4886	0.205015	30.6474
4	0.065944	95.2809	0.090896	69.1249
5	0.056589	111.031	0.090022	69.7961
6	0.041601	151.033	0.062462	100.592
7	0.041052	153.054	0.058352	107.677
8	0.035767	175.672	0.057300	109.654
9	0.026429	237.742	0.037163	169.071

**Tableau.5. Périodes et pulsations de la structure
avec et sans le système d'isolation**

b) Accélérations et déplacements

Niveau	Structure encastrée		Structure isolée	
	Accélération maximale (m/s^2)	Déplacement maximal (cm)	Accélération maximale (m/s^2)	Déplacement maximal (cm)
3	8.450	0.8017	3.632	0.460
2	5.635	0.6058	2.292	0.300
1	2.986	0.2890	2.3422	0.140
base				3.40

Tableau.6 Accélérations et déplacements maximaux de la structure avec et sans le système d'isolation

Le tableau 6 présente les réponses maximales en accélération et en déplacement des structures encastrée et isolée.

La comparaison de ces résultats nous montre que le système d'isolation a fait diminuer l'accélération et le déplacement du dernier niveau, respectivement de 57.02% et de 42.62%.

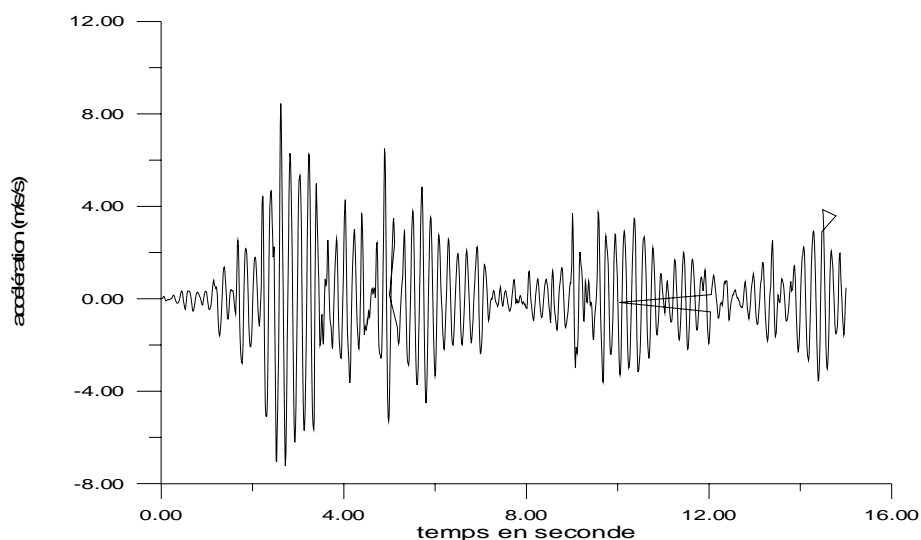


Fig.22 Réponse en accélérations du dernier niveau de la structure encastrée

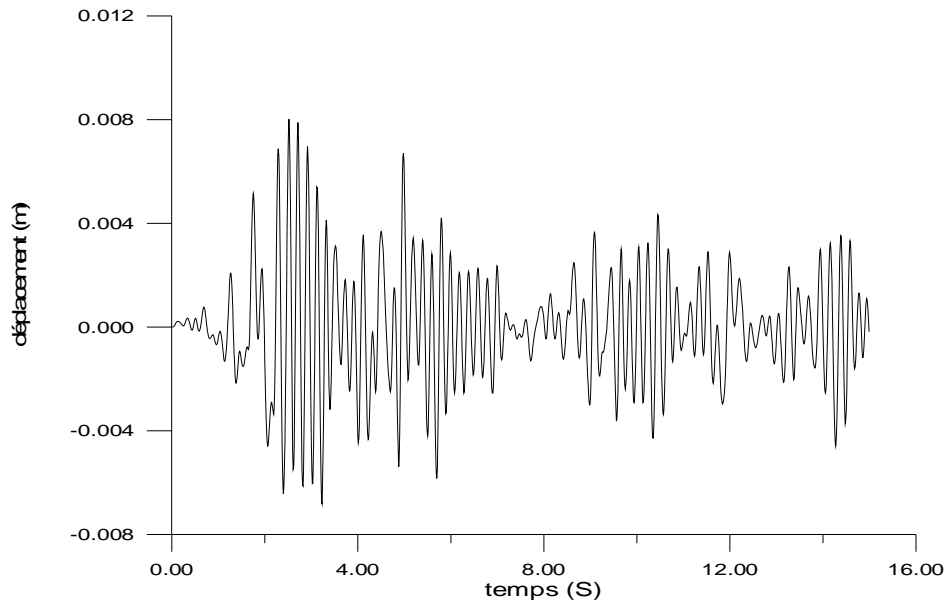


Fig.23 Réponse en déplacements du dernier niveau de la structure encastrée.

Les figures 22 et 23 présentent la réponse en accélération et en déplacement du dernier niveau de la structure encastrée, les réponses du même niveau de la structure isolée sont données par les figures 24 et 25 ci-dessous

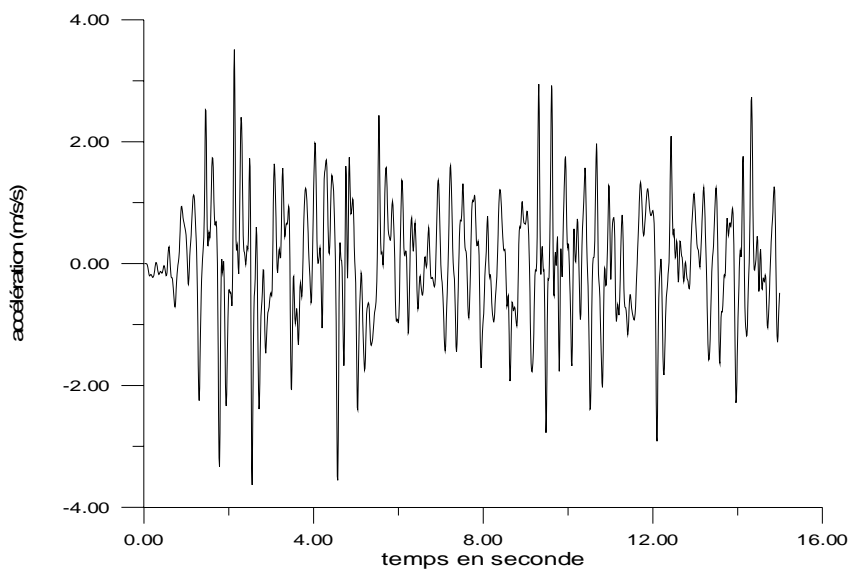


Fig.24 Réponse en accélérations du dernier niveau de la structure isolée

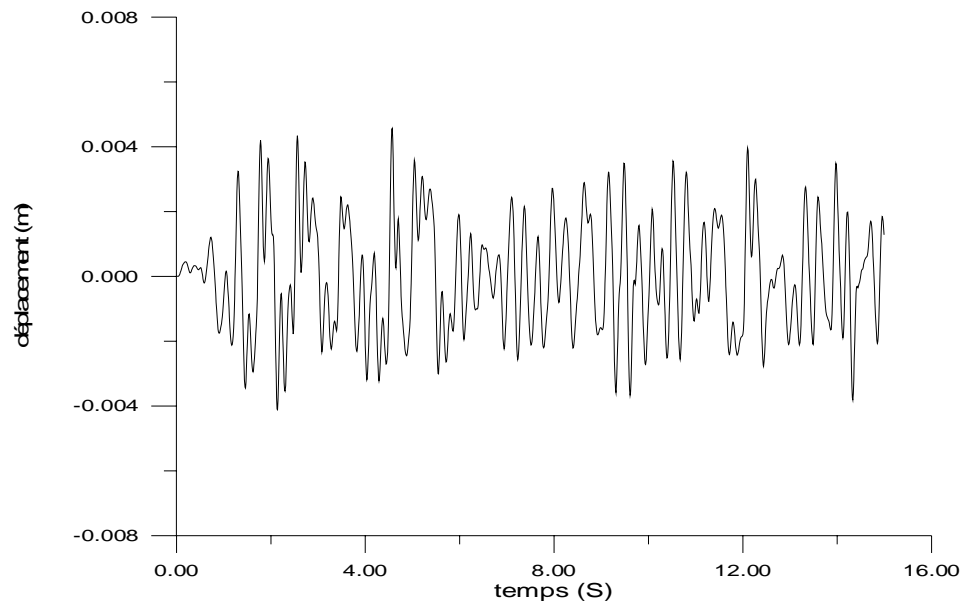


Fig.25 Réponse en déplacement du dernier niveau de la structure isolée

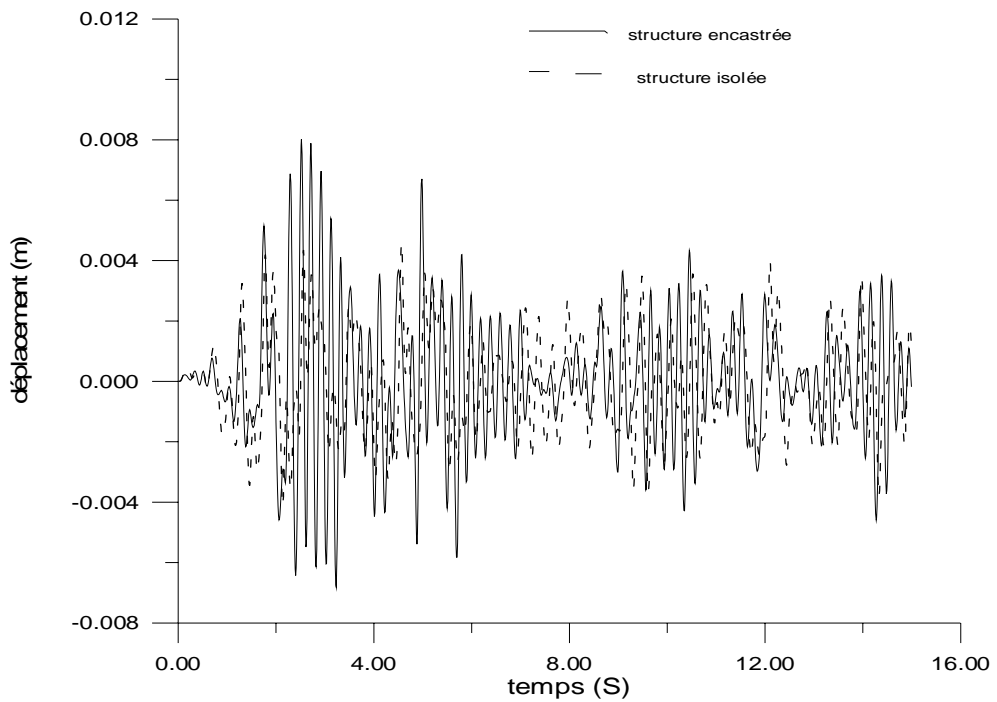


Fig.26 déplacements du dernier niveau de la structure avec et sans le système d'isolation.

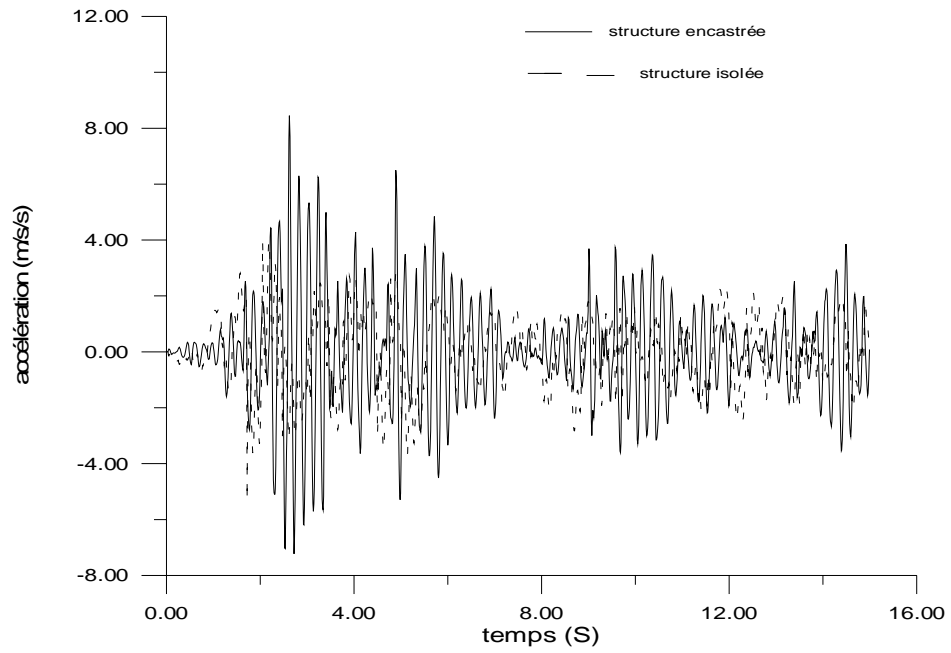


Fig.27 Accélérations du dernier niveau de la structure avec et sans le système d'isolation.

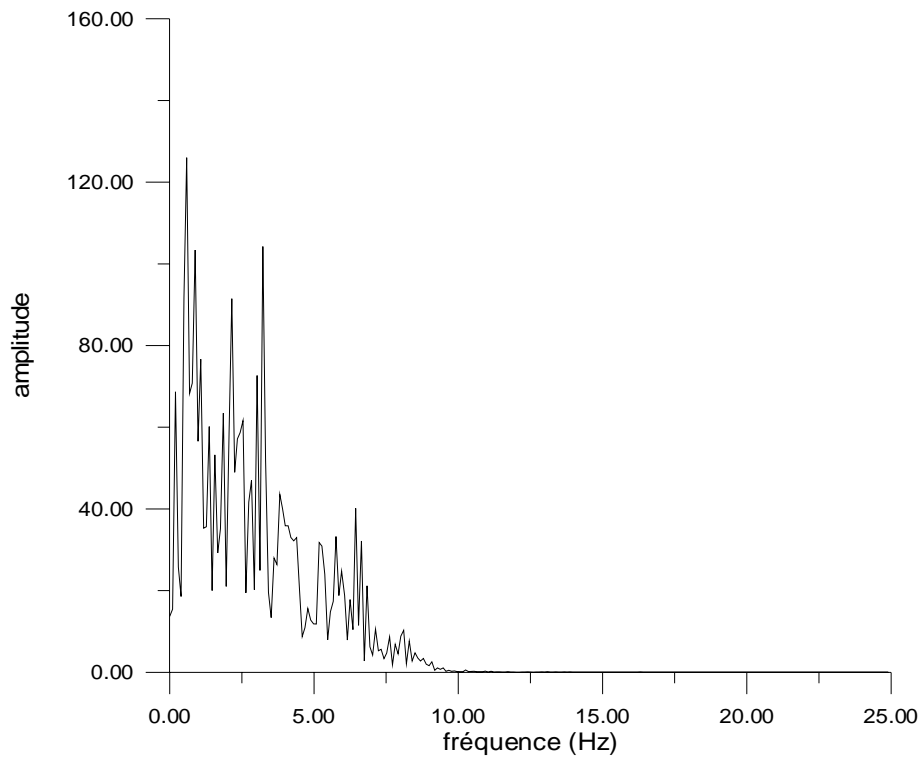


Fig.28 Spectre de Fourier des accélérations du dernier niveau de la structure isolée

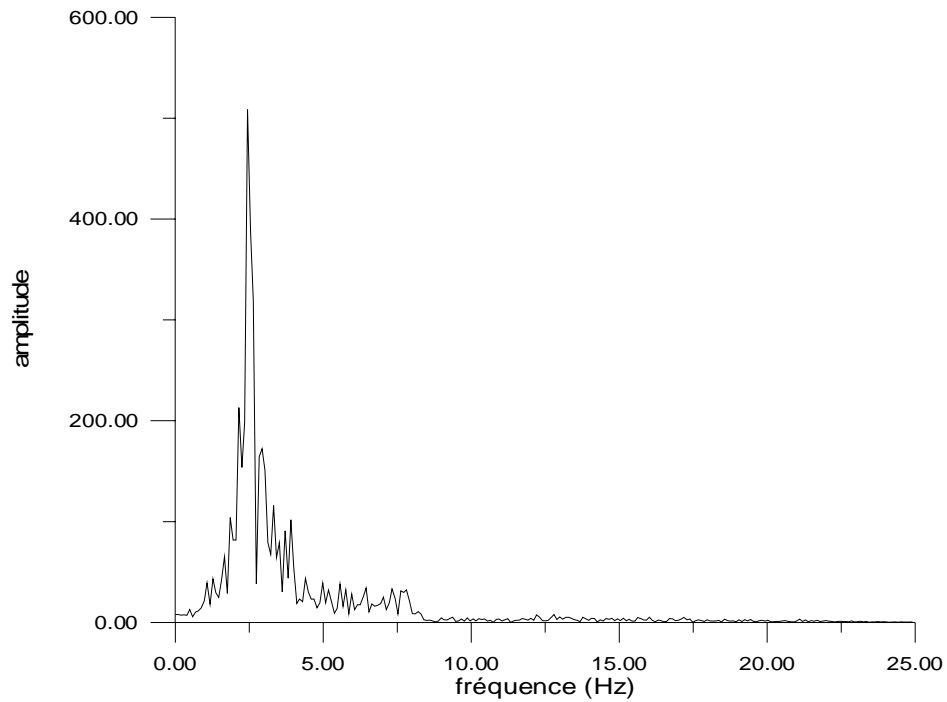


Fig.29 Spectre de Fourier des accélérations du dernier Niveau de la structure encastrée

c) Déplacements inter étages

Un déplacement inter étage x est un déplacement relatif d'un niveau par rapport à un autre.

Les déplacements inter étages pour les deux structures, encastrée et isolée sont donnés dans le tableau 7. Les rapports des déplacements inter étages et la hauteur d'étage (x/h %) du dernier niveau de la structure isolée sont donnés sur la figure 30.

Niveau	Structure encastrée		Structure isolée	
	x (cm)	x/h %	x (cm)	x/h %
3	0.196	0.056	0.16	0.04
2	0.3168	0.09	0.16	0.04
1	0.289	0.082	0.14	0.04

Tableau.7 Déplacements inter étages de la structure avec et sans le système d'isolation

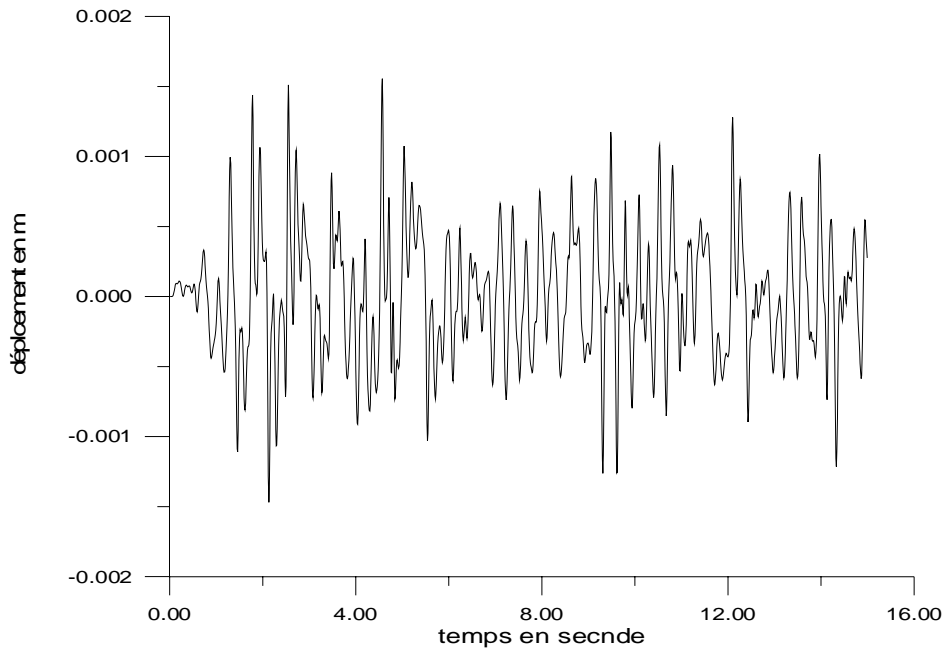


Fig.30 déplacements inter étages du dernier niveau de la structure isolée

3-4-Conclusion

L'analyse numérique effectuée nous a permis de déduire ce qui suit :

- Les accélérations maximales et les déplacements maximaux de la structure isolée sont réduits en moyenne de 55% en comparaison avec ceux obtenus pour la structure non isolée.
- Le déplacement maximal de la structure isolée est localisé au niveau des appuis parasismiques (le déplacement de la base est de 3.4 cm).
- Les déplacements inter étages sont très réduits pour la structure isolée.
- Les accélérations transmises à la superstructure ne sont pas amplifiées et cela peut s'expliquer par l'allongement de la période de vibration de la structure.

D'après cette comparaison (figures 28 et 29) on peut dire que le système d'isolation a une influence sur le contenu fréquentiel de la structure car il joue un rôle dans le filtrage vers les basses fréquences.

1-Introduction

De nos jours l'isolation parasismique est répandue à travers le monde, elle a atteint un certain degré de maturité, notamment dans les pays à forte sismicité tels que le Japon, les Etats-Unis et la Nouvelle Zélande, et elle continue encore à faire l'objet de développements techniques et d'applications pratiques.

Comme il a été déjà mentionné précédemment, l'idée de l'isolation parasismique est de disposer une interface souple entre la structure et le sol pour dissiper le maximum d'énergie et minimiser ainsi les charges latérales dans la superstructure. Pour cela et pour étudier le comportement dynamique des structures isolées, un grand nombre de programmes de recherche ont été entrepris, toutefois l'efficacité des différents systèmes d'isolation a été mise en évidence expérimentalement et analytiquement [32],[38]. Aussi cette efficacité a été prouvée pratiquement par plusieurs structures isolées qui ont pu résister pendant le séisme de Northridge en 1994 et celui de Kobe en 1995.

Il en résulte que tous les systèmes d'isolation ont certaines caractéristiques en commun, la plus importante est la souplesse horizontale [26].

En effet beaucoup d'articles, qui traitent les effets bénéfiques de chaque système séparément, ont été publiés, mais à peine quelques études comparatives ont été effectuées pour évaluer la performance de ces systèmes, l'un par rapport à l'autre, pour une structure donnée soumise à une excitation du sol donnée.

Il convient de signaler que pour ce genre d'études, on est confronté à une difficulté particulière qui est l'absence de définition normalisée pour les critères de performance, mais le critère le plus pratiqué en général est celui de la réduction des accélérations transmises à la superstructure ainsi que les déplacements inter étages [5].

Pour une structure isolée, la conception de la superstructure ne peut être dissociée de celle du système d'isolation. La réponse sismique du système combiné peut être influencée par de nombreux facteurs et paramètres tels que le type d'appuis et l'excitation sismique. Pour élucider l'influence de ces facteurs et illustrer la réponse et le comportement dynamique d'une structure avec chaque type d'appuis, une étude paramétrique s'avère nécessaire.

2-Méthodologie

Cette partie consiste en une analyse numérique des bâtiments isolés dans le but de présenter leurs réponses, avec les différents systèmes d'isolation sous différents types de chargements sismiques.

Cette étude qui se veut comparative, vise aussi à déterminer les paramètres qui influencent le comportement et la réponse d'une structure isolée.

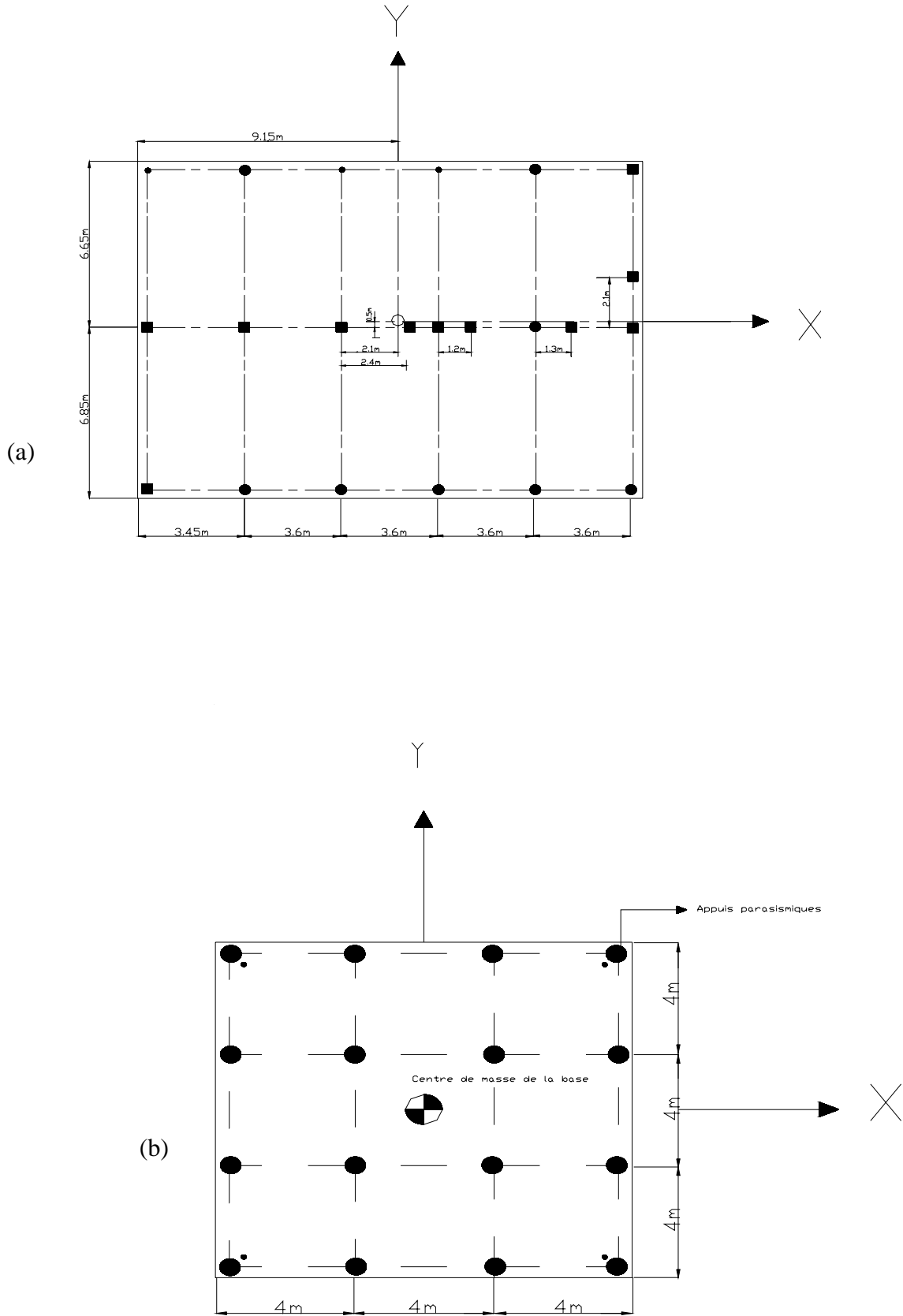
Les principaux paramètres sur lesquels l'étude a porté sont :

- Types d'appuis parasismiques
- Types d'accélérogrammes
- Nombre de niveaux de la structure
- Période du système d'isolation
- Nombre d'appuis parasismiques utilisés pour isoler la structure
- Avec ou sans palées de stabilité (palées triangulées)

2-1- Description des structures

Les structures objet de cette étude paramétrique sont deux bâtiments isolés, l'un à trois niveaux et l'autre à six niveaux [16]. Les vues en plans des deux bâtiments sont données par la figure 31.

Le bâtiment à trois niveaux est contreventé par des palées triangulées et le bâtiment à six niveaux est contreventé par des voiles.



(a) Vue en plan de la structure à 6 niveaux
Fig.31 (b) Vue en plan de la structure à 3 niveaux

2-2-Description des systèmes d'isolation et les excitations sismiques

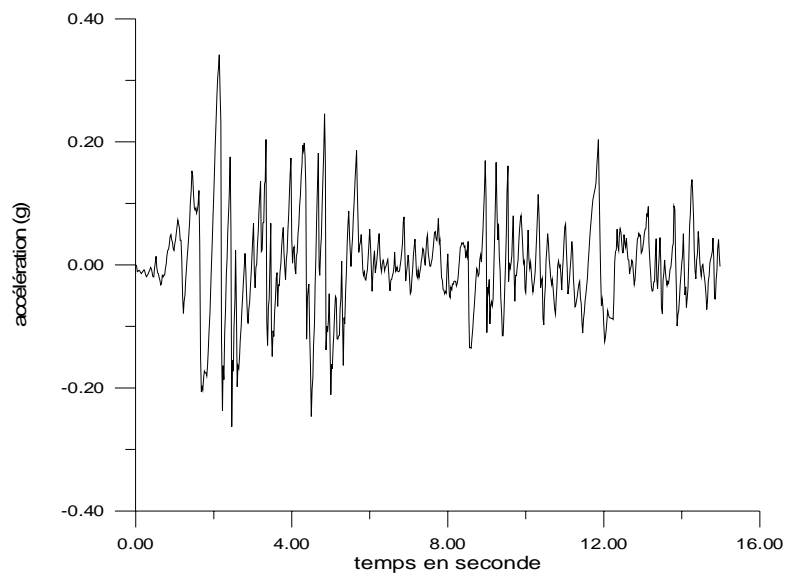
Vu leur disponibilité dans la bibliothèque du programme numérique utilisé [16], les types d'isolateur considérés sont :

- Appuis en caoutchouc fretté
- Appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb
- Appuis glissants en Téflon
- Appuis résistant par frottement (Resilient friction base isolation)
- Appuis en pendules glissants (Friction pendulum sliding bearing)

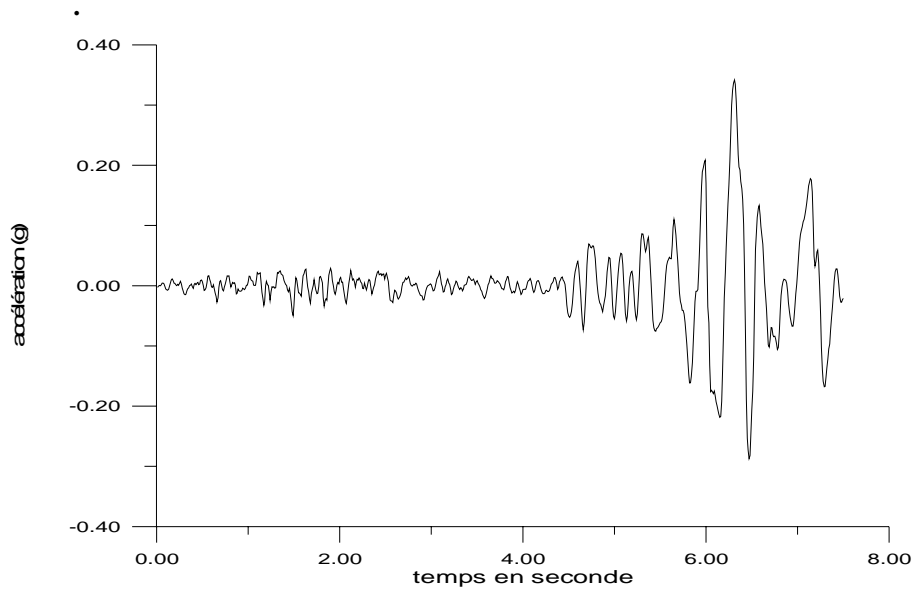
Les différentes excitations utilisées sont les composantes suivantes :

- El Centro NS.
- Northridge Sylmar County.
- Northridge Santa Monica.
- Loma Prieta Oakland Outer Harbor Wharf.
- Mexico EW

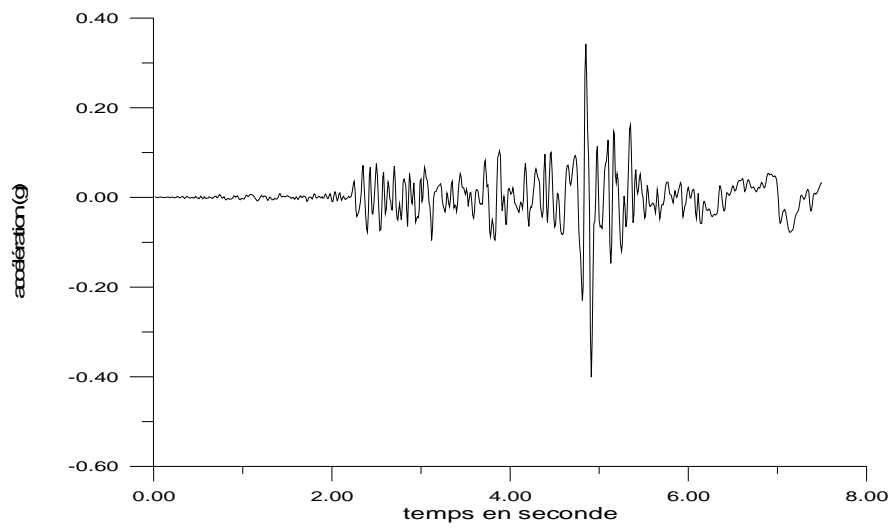
Les accélérogrammes et les spectres de réponse des accélérations de ces composantes sont représentés sur les figures 32 et 33.



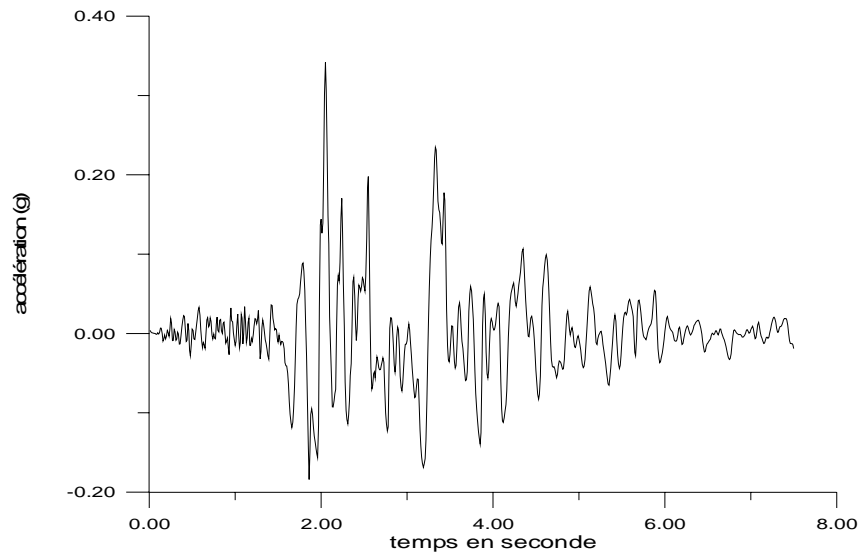
**Fig32 (a) Accélérogramme de la Composante NS
du séisme d'El Centro**



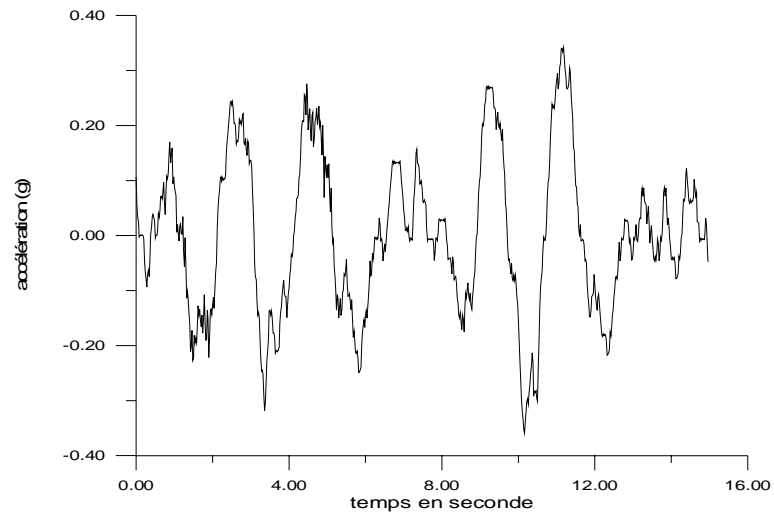
**Fig32 (b) Composante Oakland Outer
du séisme de Loma Prieta**



**Fig32 (c) Composante de Santa Monica
du séisme de Northridge**



**Fig32 (d) Composante de Sylmar County
du séisme de Northridge.**



**Fig32 (e) Accélérogramme composantes EW
du séisme de Mexico.**

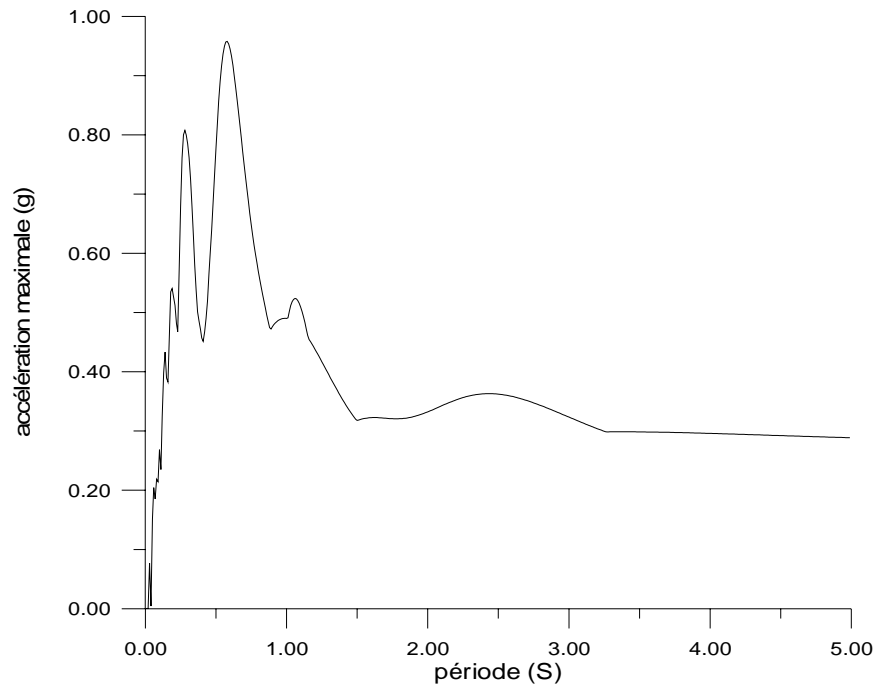


Fig.33 (a) Spectre de réponse de l'excitation d'ElCentro

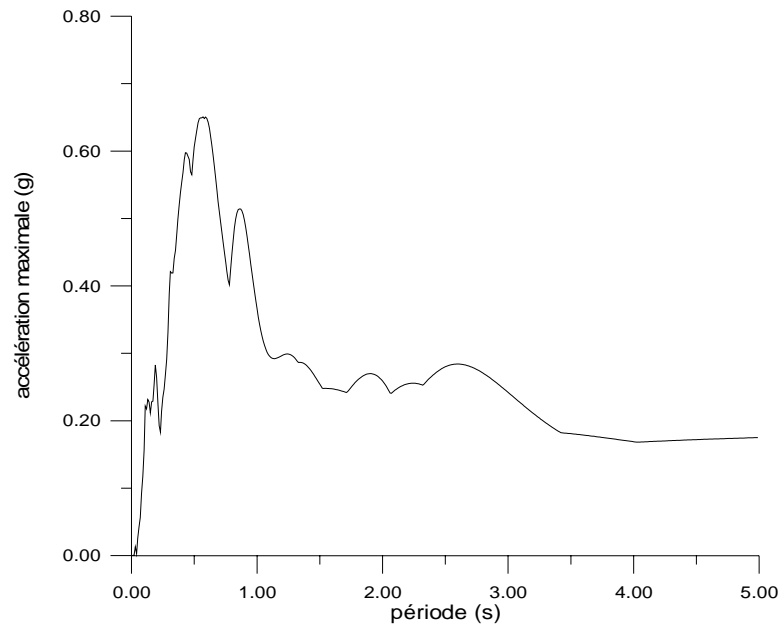


Fig.33 (b) Spectre de réponse de l'excitation de Sylmar County

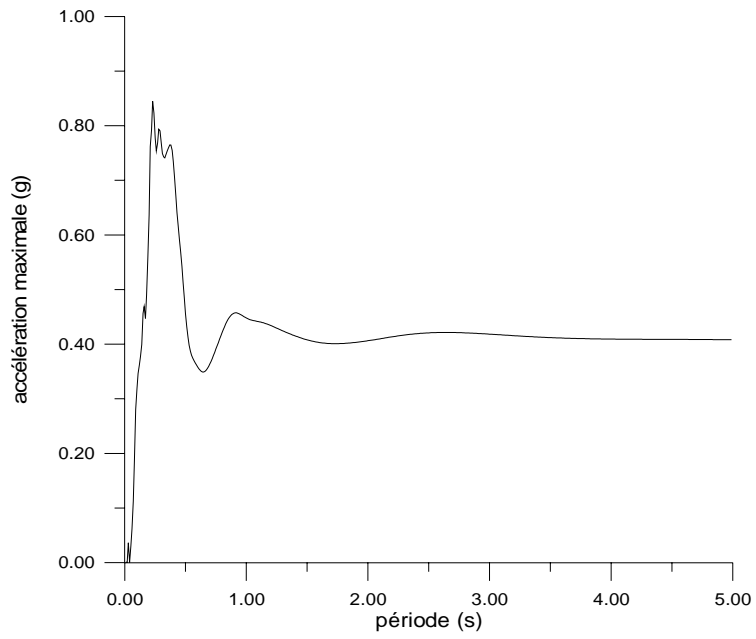


Fig.33 (c) Spectre de réponse de l'excitation de Santa Monica

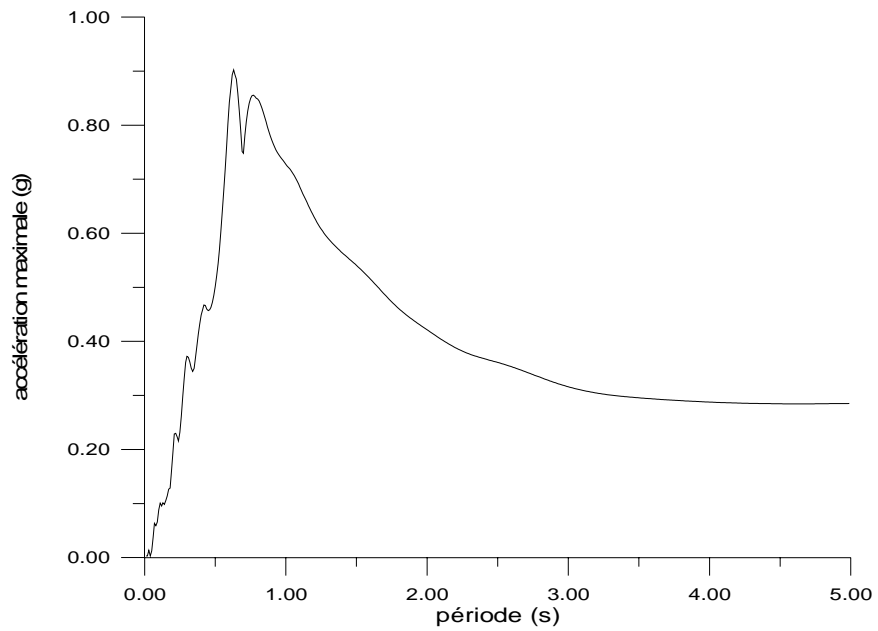


Fig.33 (d) Spectre de réponse de l'excitation de Loma prieta

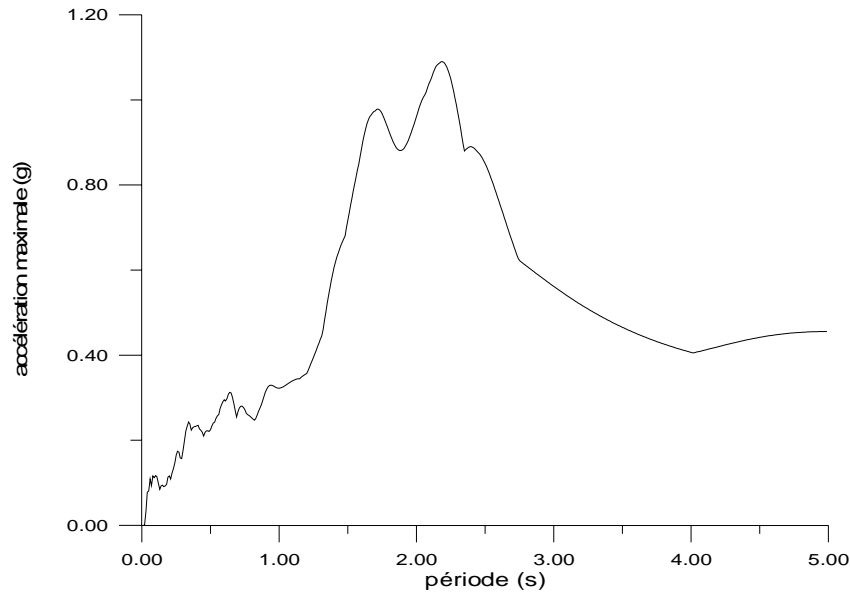


Fig.33 (e) Spectre de réponse de l'excitation de Mexico.

3-Formulation théorique

L'équation du mouvement de la structure est une combinaison de deux équations, l'équation de la superstructure et l'équation de la base. Cette formulation consiste à donner l'équation du mouvement de la superstructure et l'équation du mouvement de la base pour chaque type d'appuis pour la structure à trois niveaux.

3-1- Equation de la superstructure.

x_b, x_1, x_2, x_3 Sont les déplacements relatifs.

u_b, u_1, u_2, u_3 Sont les déplacements absolus.

Equation de la masse m_1

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 (\dot{u}_1 - \dot{u}_b) + c_2 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + k_1 (u_1 - u_2) + k_2 (u_1 - u_2) = 0$$

$$\Rightarrow m_1 \ddot{x}_b + m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = -m_1 \ddot{u}_g \quad (1)$$

Equation de la masse m_2

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + c_3 (\dot{u}_2 - \dot{u}_3) + k_2 (u_2 - u_1) + k_3 (u_2 - u_3) = 0$$

$$\Rightarrow m_2 \ddot{x}_b + m_2 \ddot{x}_2 + (c_2 + c_3) \dot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 - c_3 \dot{x}_3 - k_2 x_1 + (k_2 + k_3) x_2 - k_3 x_3 = -m_2 \ddot{u}_g \quad (2)$$

Equation de la masse m_3

$$m_3 \ddot{u}_3 + c_3 (\dot{u}_3 - \dot{u}_2) + k_3 (u_3 - u_2) = 0$$

$$\Rightarrow m_3 \ddot{x}_b + m_3 \ddot{x}_3 - c_3 \dot{x}_2 + c_3 \dot{x}_3 - k_3 x_2 + k_3 x_3 = -m_3 \ddot{u}_g \quad (3)$$

L'équation de la superstructure est donnée par :

$$[M_0] \{\ddot{x}\} + [C_0] \{\dot{x}\} + [K_0] \{x\} = -[M_0] r (\ddot{u}_g + \ddot{x}_b) \quad (4)$$

3-2- Equation de la base.

3-2-1-Appuis en caoutchouc fretté.

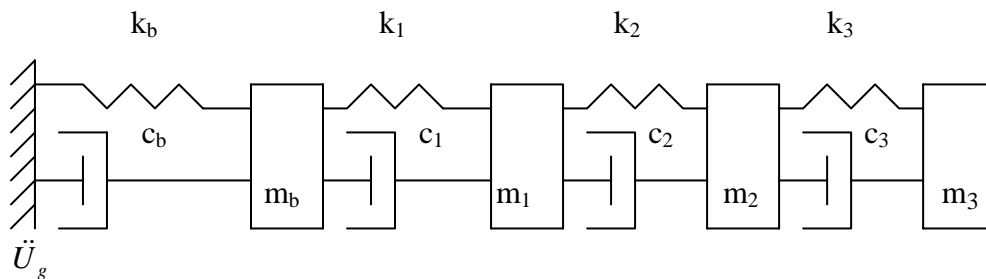


Fig.34 Modèle mathématique de la structure avec les appuis en caoutchouc fretté

$$m_b \ddot{u}_b + m_1 \ddot{u}_1 + m_2 \ddot{u}_2 + m_3 \ddot{u}_3 + c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b (u_b - u_g) = 0$$

$$\Rightarrow (m_b + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{x}_b + m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + m_3 \ddot{x}_3 + c_b \dot{x}_b + k_b x_b = -(m_b + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{u}_g \quad (5)$$

3-2-2- Appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb en barreau de plomb

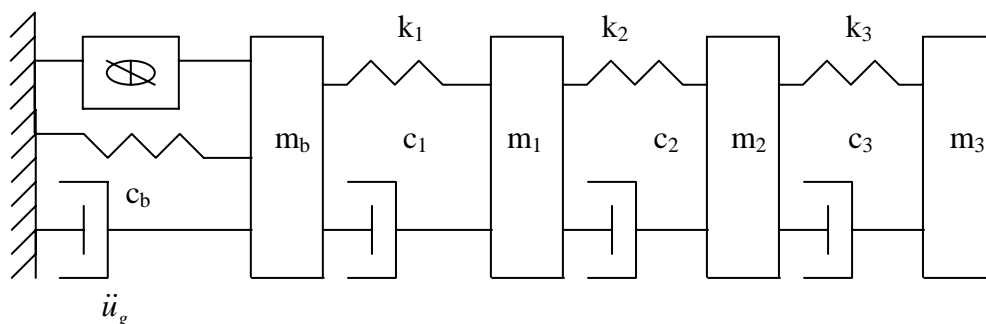


Fig.35 Modèle mathématique de la structure avec les appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb

La force latérale dans le système est donnée comme suit :

$$F = N \left(\alpha \frac{F_y}{Y} x_b + (1-\alpha) F_y Z \right) \quad (6)$$

N : Nombre d'amortisseurs.

Z : Composante hystérétique.

$$m_b \ddot{u}_b + m_1 \ddot{u}_1 + m_2 \ddot{u}_2 + m_3 \ddot{u}_3 + c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b (u_b - u_g) + N \left(\alpha \frac{F_y}{Y} x_b + (1-\alpha) F_y Z \right) = 0$$

$$\Rightarrow (m_b + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{x}_b + m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + m_3 \ddot{x}_3 + c_b \dot{x}_b + k_b x_b + N \left(\alpha \frac{F_y}{Y} x_b + (1-\alpha) F_y Z \right) = -(m_b + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{u}_g \quad (7)$$

3-2-3- Appuis résistant par frottement

(Resilient friction base isolation)

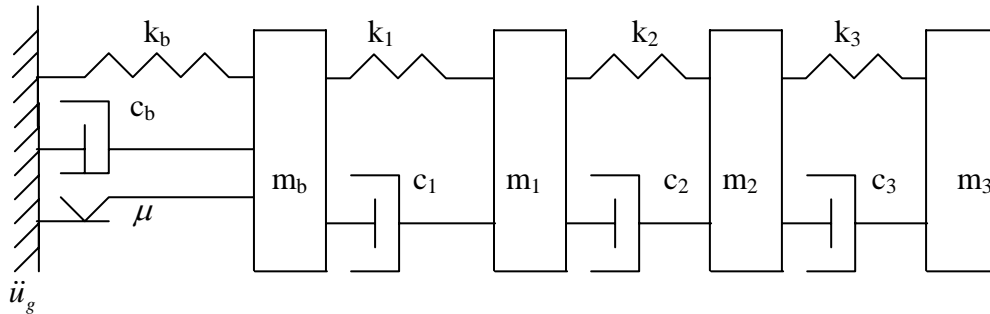


Fig.36 Modèle mathématique de la structure avec les appuis résistant par frottement

$$m_b \ddot{u}_b + m_1 \ddot{u}_1 + m_2 \ddot{u}_2 + m_3 \ddot{u}_3 + c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b (u_b - u_g) + \mu (m_b + m_1 + m_2 + m_3) g \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) = 0$$

$$(m_b + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{x}_b + m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + m_3 \ddot{x}_3 + c_b \dot{x}_b + k_b x_b + \mu (m_b + m_1 + m_2 + m_3) g \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) = -(m_b + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{u}_g \quad (8)$$

3-2-4- Appuis glissants en Téflon.

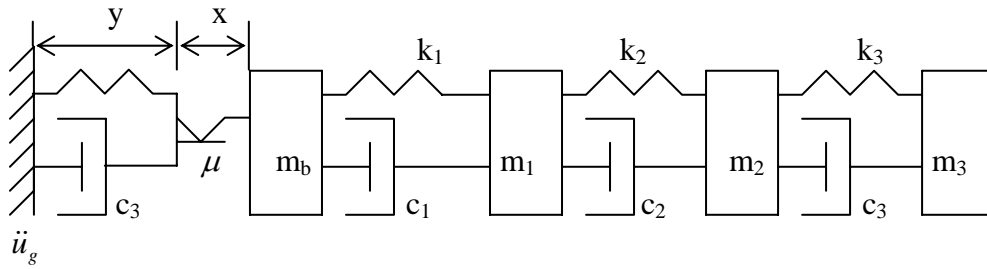


Fig.37 Modèle mathématique de la structure avec les appuis glissants en Téflon

On a :

$$\begin{aligned}
 u_b &= x_a + y_a & x_b &= x + y \\
 x_a &= x + u_g & y_a &= y + u_g
 \end{aligned}$$

La force de frottement est donnée comme suit:

$$F_f = \mu(m_b + m_1 + m_2 + m_3)g \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (9)$$

$$m_b \ddot{u}_b + m_1 \ddot{u}_1 + m_2 \ddot{u}_2 + m_3 \ddot{u}_3 + c_b (\dot{y}_a - \dot{u}_g) + k_b (y_a - u_g) + \mu(m_b + m_1 + m_2 + m_3)g \operatorname{sgn}(\dot{x}) = 0$$

$$(m_b + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{x}_b + m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + m_3 \ddot{x}_3 + c_b \dot{y} + k_b y + \mu(m_b + m_1 + m_2 + m_3)g \operatorname{sgn}(\dot{x}) = -(m_b + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{u}_g \quad (10)$$

3-3 -5-Appuis en pendules glissants

(Friction pendulum sliding bearing)

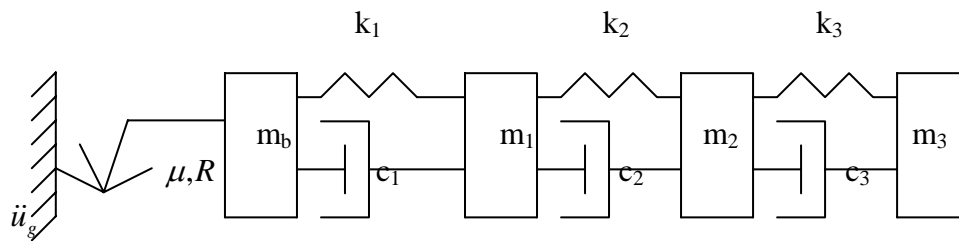


Fig.38 Modèle mathématique de la structure avec les appuis en pendules glissants

La force latérale développée dans le système est donnée par :

$$F = \frac{N}{R} x_b + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) \quad (11)$$

Avec $N = (m_b + m_1 + m_2 + m_3)g$ et R : rayon de la surface sphérique.

$$m_b \ddot{u}_b + m_1 \ddot{u}_1 + m_2 \ddot{u}_2 + m_3 \ddot{u}_3 + \frac{N}{R} x_b + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) = 0$$

$$\Rightarrow (m_b + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{x}_b + m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + m_3 \ddot{x}_3 + \frac{N}{R} x_b + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) = -(m_b + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{u}_g \quad (12)$$

4-Présentation et comparaison des résultats.

4-1-Type d'appuis parasismiques

Afin d'estimer l'efficacité des systèmes l'un par rapport à l'autre, nous avons considéré la même période de vibration pour tous les types d'appuis qui sont soumis à la même excitation du sol (El Centro NS) avec un PGA de 0.3417g. Les réponses en déplacement, accélération et efforts tranchants de la structure avec les différents systèmes d'isolation sont rapportées dans le tableau 8.

D'après les résultats du tableau, remarquons que le déplacement de la base varie d'un système d'appuis à un autre, il est dans l'intervalle [3.4, 58.6] (en cm), 3.4 cm pour les appuis glissants en Téflon et 58.6 cm pour les appuis en pendules glissants, en effet les figures 39 montrent bien le comportement de ce socle.

A la différence de tous les autres systèmes, les appuis en pendules glissants n'ont enregistré aucun déplacement relatif des planchers mais toujours est-il qu'ils sont aussi négligeables dans le cas des autres types.

Les accélérations transmises à la superstructure sont réduites et le taux de réduction diffère d'un système à un autre, ces accélérations sont réparties comme suit :

0.23g pour les appuis en caoutchouc fretté, 0.08g pour les appuis avec amortisseur en barreau de plomb, 0.21g pour les appuis résistant par frottement, 0.00001g dans le cas des appuis en pendules glissants ce qui traduit un taux de réduction de 99.9 % de l'accélération du sol.

Cependant, une accélération de 0.36g au dernier niveau de la structure sur appuis glissants en Téflon est enregistrée, ce qui fait une amplification de 5% de l'accélération du sol.

Les figures 40 présentent les accélérations de la structure avec les différents systèmes d'isolation.

Pour les efforts tranchants, la distribution est pratiquement triangulaire. Ces efforts sont proportionnels aux accélérations des planchers.

Les efforts tranchants à la base dans le cas des différents types d'appuis sont illustrés sur les figures 41.

Type d'appuis	Niveau	Déplacement Relatif (m)	Déplacement inter étage (x/h %)	Accélération totale (m/s/s)	Effort tranchant (Kn)
Appuis en caoutchouc fretté	3	-0.0051	0.03	2.3195	276.952
	2	-0.0040	0.05	2.3171	551.307
	1	-0.0021	0.06	2.3100	826.398
	Base	-0.5100	-	-	826.398 -1100.862
Appuis avec amortisseur en barreau de plomb	3	0.0019	0.01	-0.8623	-102.961
	2	0.0014	0.02	-0.8299	-201.434
	1	0.0008	0.02	-0.8377	-296.501
	Base	0.103	-	-	-296.501 393.655
Appuis glissants en Téflon	3	0.0046	0.04	-3.6323	-433.705
	2	0.0030	0.05	-2.2926	-540.763
	1	0.0014	0.04	2.3422	-525.499
	Base	0.034	-	-	-525.499 511.885
Appuis résistants par frottement	3	-0.0048	0.03	2.1518	256.932
	2	-0.0037	0.05	2.1449	513.034
	1	-0.0020	0.06	2.1356	767.959
	Base	-0.488	-	-	767.959 -1021.66
Appuis en pendules Glissants	3	0.00	0.00	0.000103	0.012
	2	0.00	0.00	0.000091	0.023
	1	0.00	0.00	0.000075	0.032
	Base	-0.586	-	-	0.032 -0.038

Tableau 8. Réponses maximales de la structure à 3 niveaux avec les différents types d'appuis soumis à la composante NS d'El Centro.

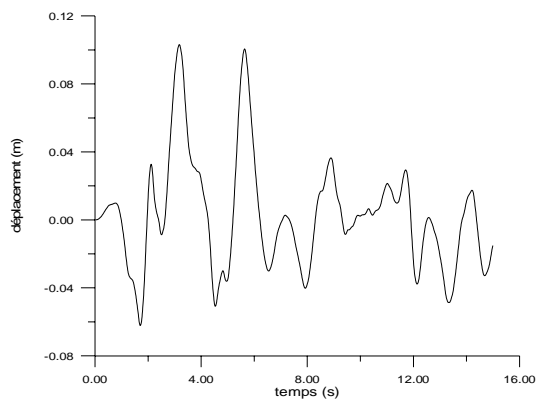


fig.39 (a) Déplacement de la base dans le cas des appuis avec amortisseur en barreau de plomb.

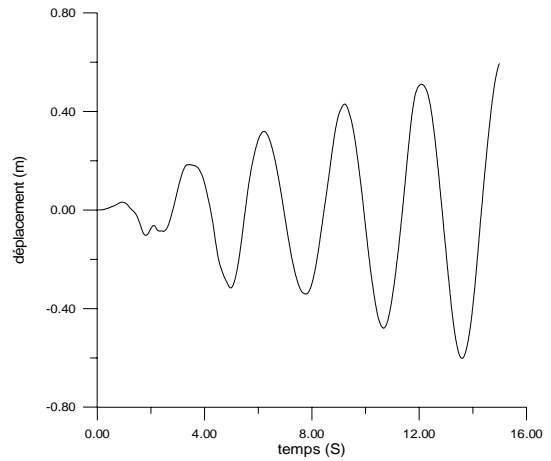


fig.39(b) Déplacement de la base dans le Cas des appuis en caoutchouc fretté.

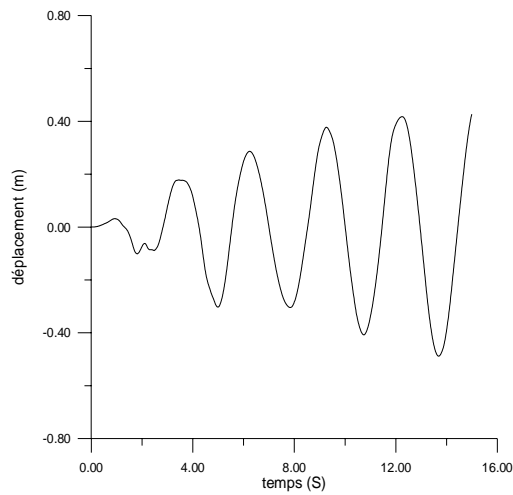


fig.39(c) Déplacement de la base dans le cas des appuis résistant par frottement

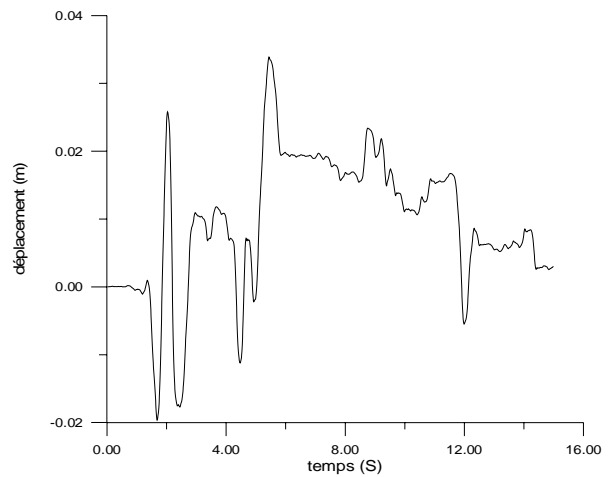


fig.39(d) Déplacement de la base dans le cas des appuis glissants en Téflon

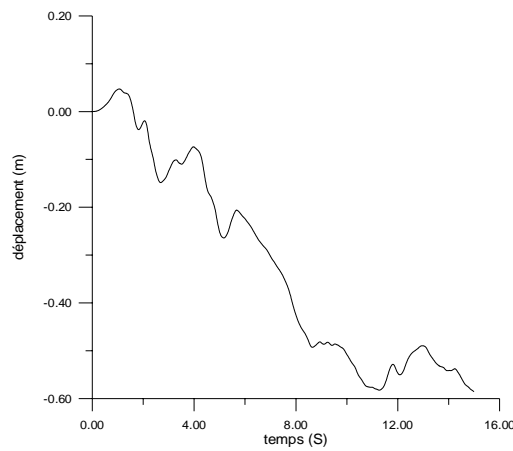


fig.39(e) Déplacement de la base dans le cas des appuis en pendules glissants

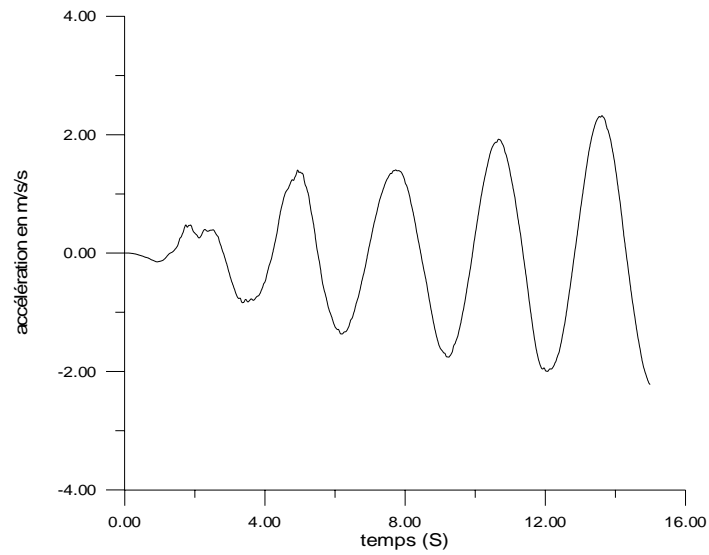


fig.40 (a) Accélération du dernier niveau de la structure sur les appuis en caoutchouc fretté

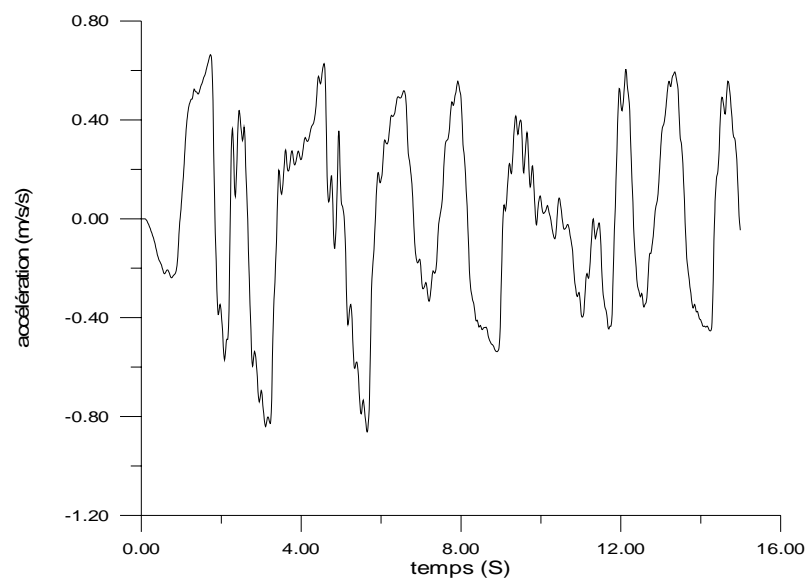


fig.40 (b) Accélération du dernier niveau de la structure sur les appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb

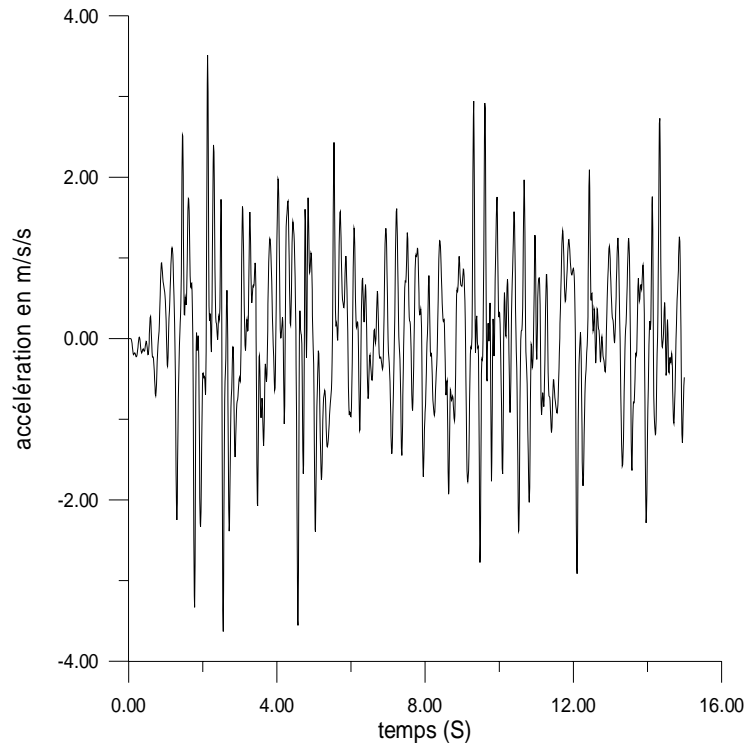


fig.40(c) Accélération du dernier niveau de la structure sur les appuis glissants en Téflon

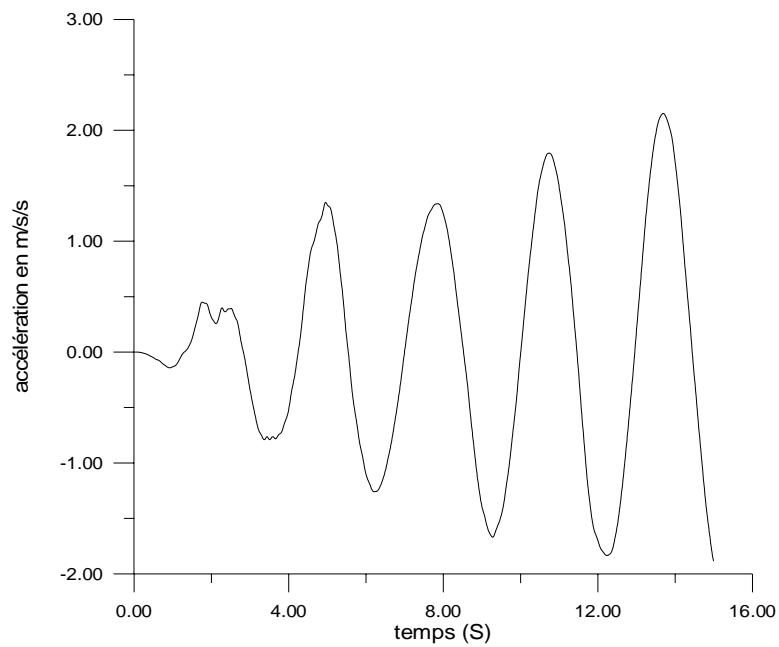


fig.40(d) Accélération du dernier niveau de la structure sur les appuis résistant par frottement.

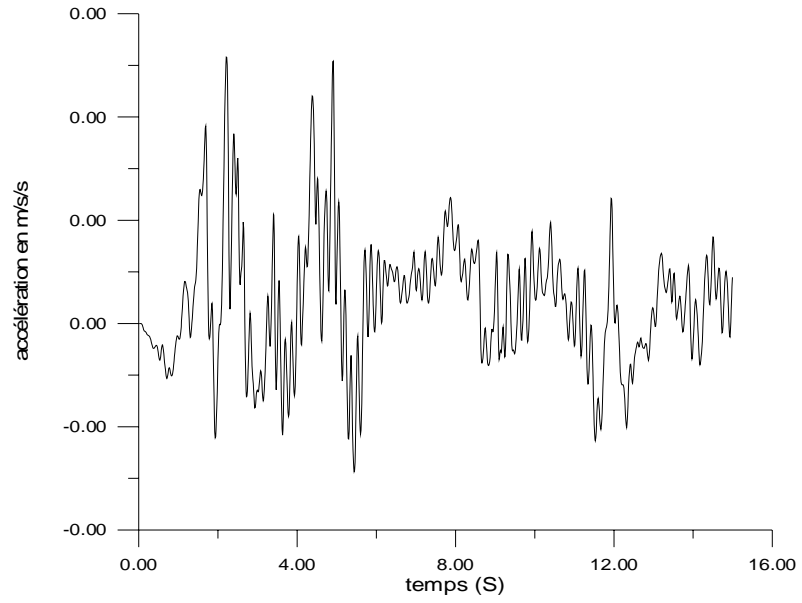


fig.40(e) Accélération du dernier niveau de la structure sur les appuis en pendules glissants.

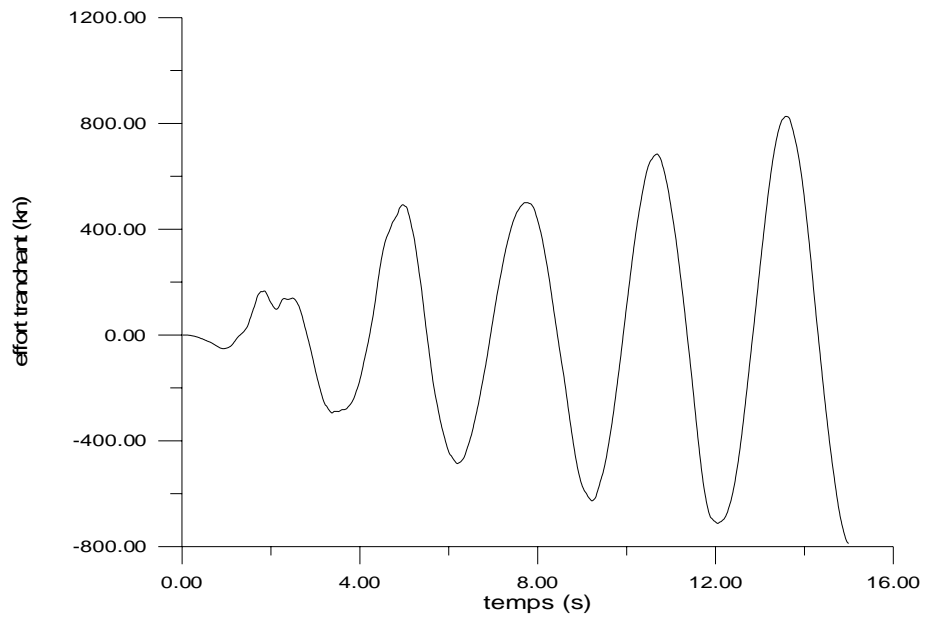


Fig.41(a) Effort tranchant à la base dans le cas des appuis en caoutchouc fretté

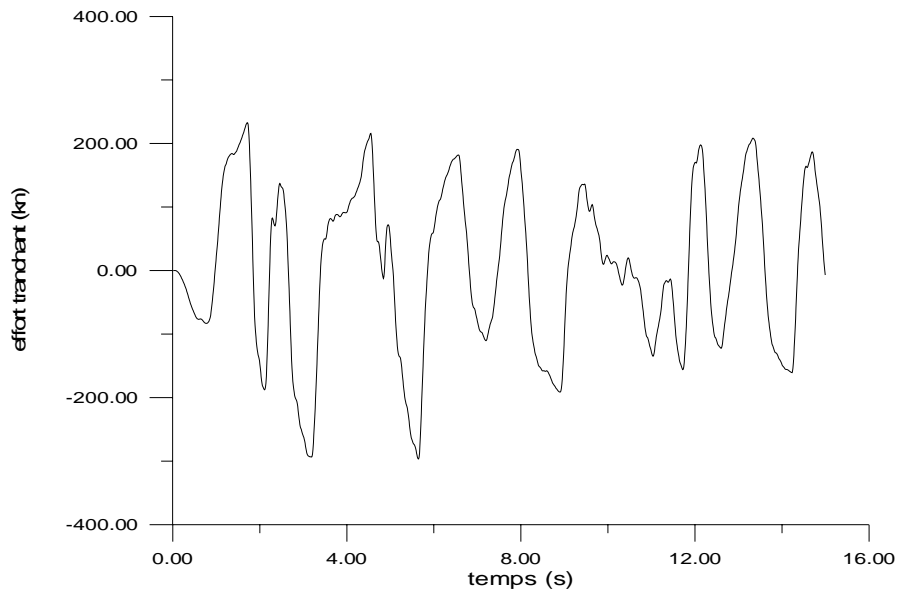


Fig.41 (b) Effort tranchant à la base dans le cas des appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb

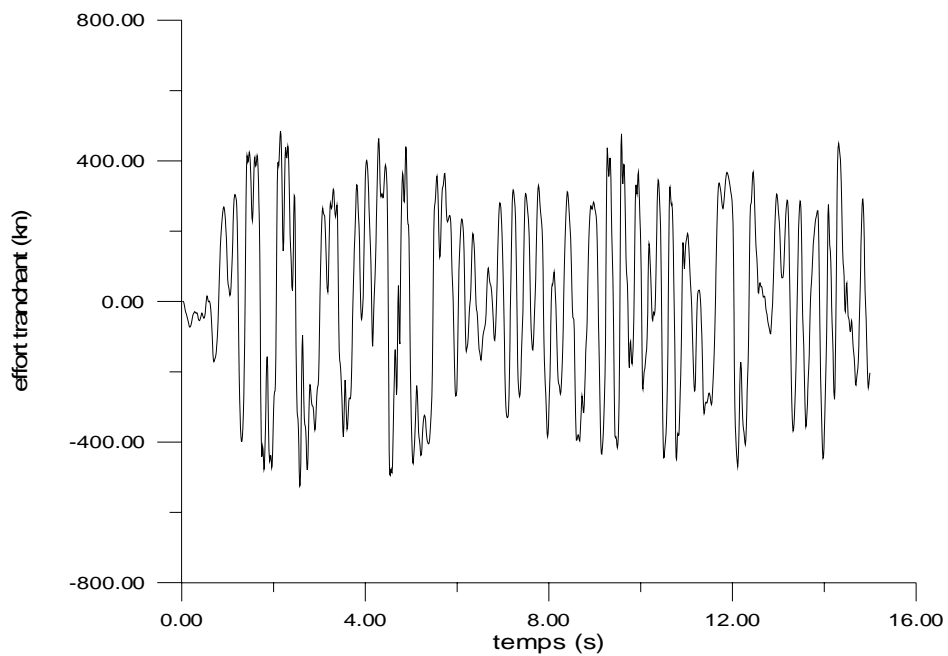


Fig.41(c) Effort tranchant à la base dans le cas des appuis glissants en Téflon

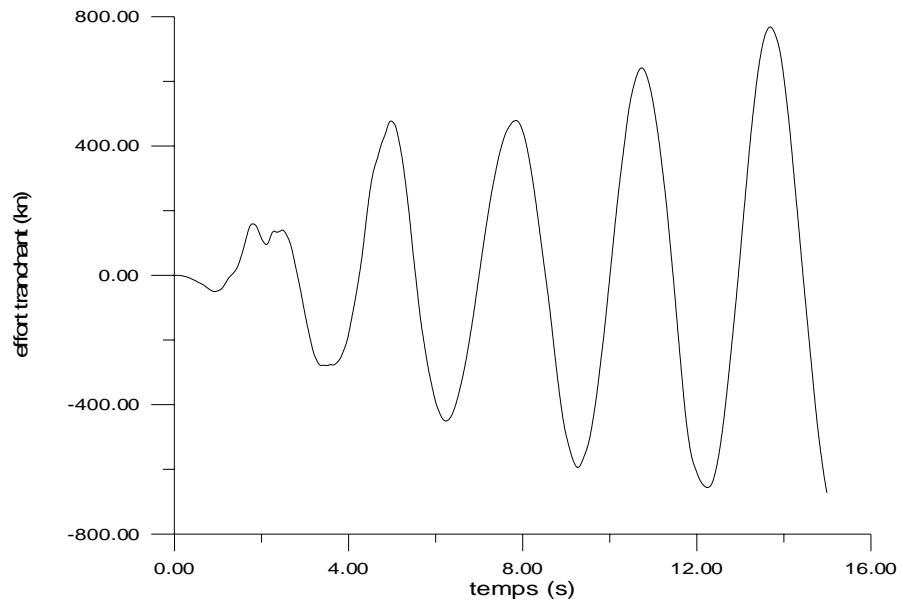


Fig.41(d) Effort tranchant à la base dans le cas des appuis résistant par frottement

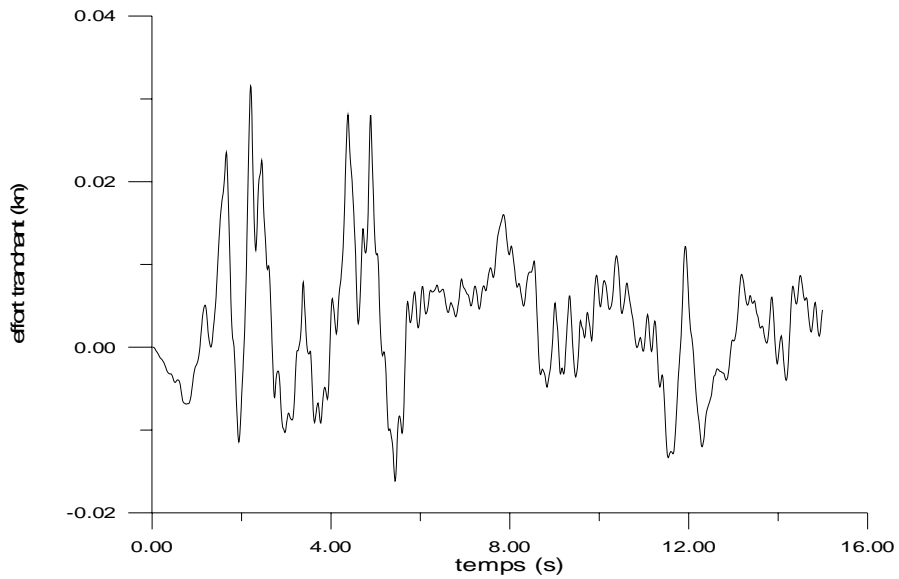


Fig.41(e) Effort tranchant à la base dans le cas des appuis en pendules glissants

4-2-Type d'accélérogrammes

L'analyse fréquentielle des accélérogrammes utilisés a montré que les gammes de fréquences où chaque excitation est énergétique sont réparties comme suit :

- Composante NS d'El Centro : 1 à 4 Hz.
- Composante Sylmar County de Northridge : 0.5 à 3.75 Hz.
- Composante Santa Monica de Northridge : 2.5 à 5 Hz.
- Composante Oakland Outer Harbor Wharf de Loma Prieta : 0.5 à 5 Hz.
- Composante EW de Mexico : 0.1 à 1 Hz.

Les spectres de Fourier de ces excitations sont donnés par les figures 42. Les chargements sont de trois types : les chargements à hautes fréquences, à moyenne fréquences et à basses fréquences.

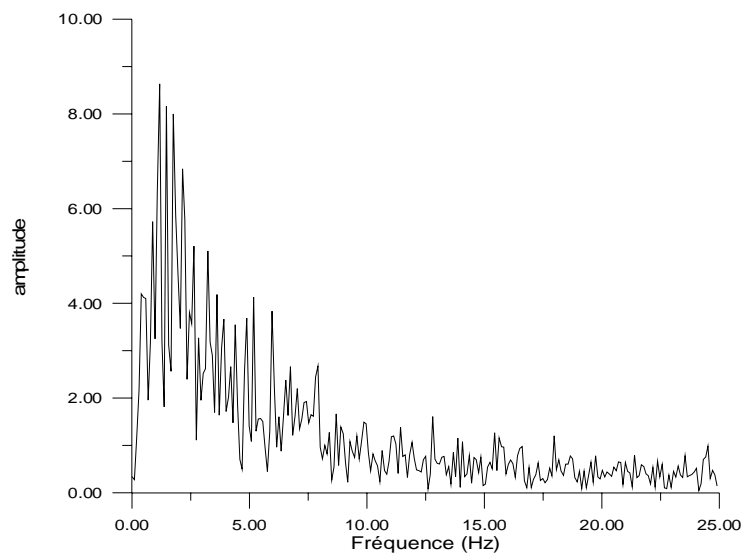


Fig.42 (a) Contenu fréquentiel de la composante NS du séisme d'El Centro

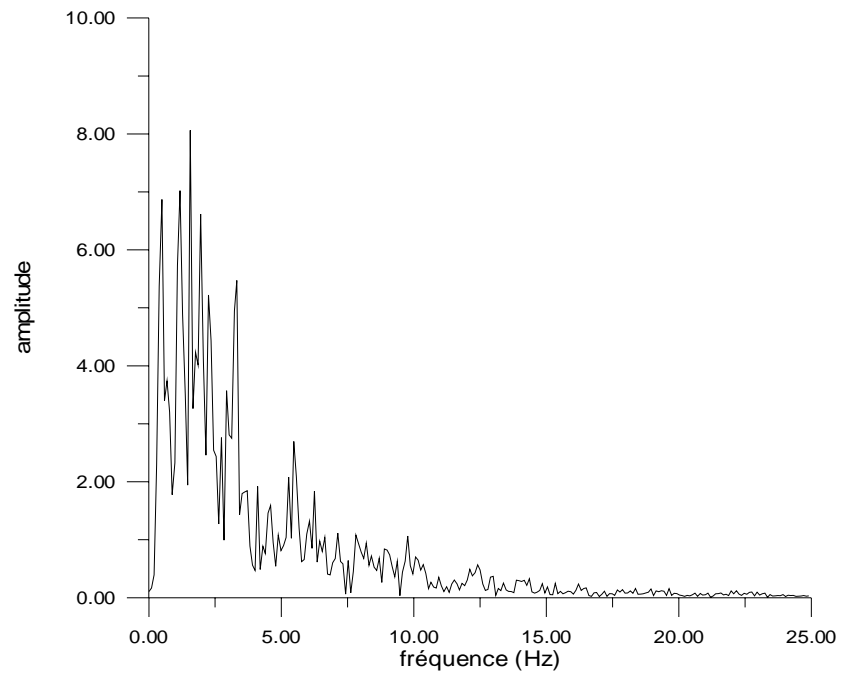


Fig.42 (b) Contenu fréquentiel de la composante Sylmar County du séisme de Northridge

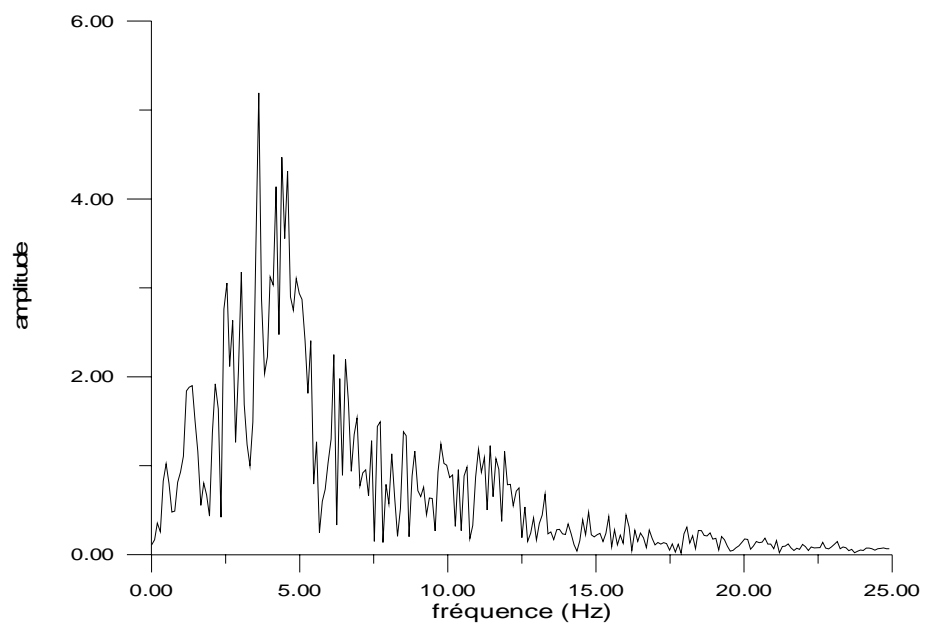
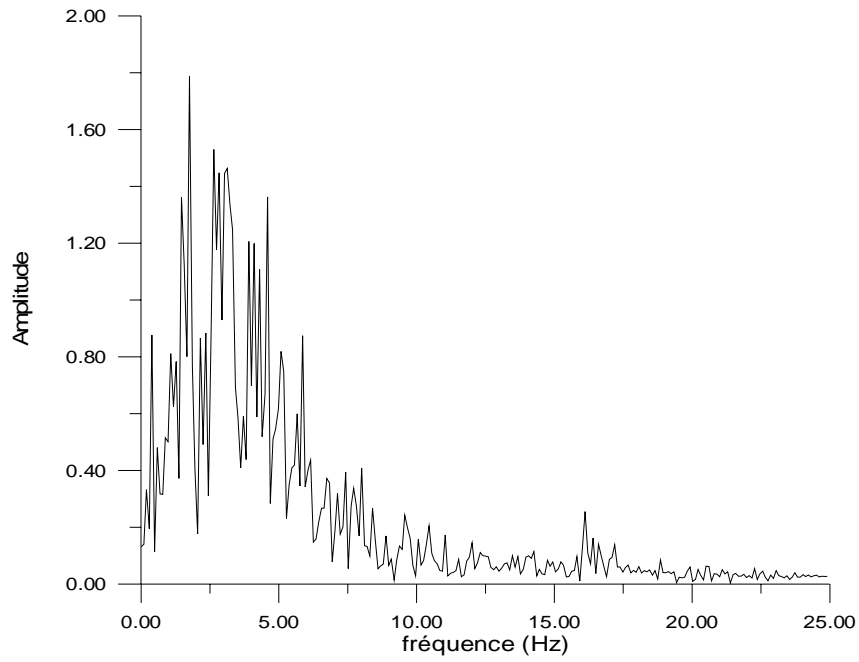
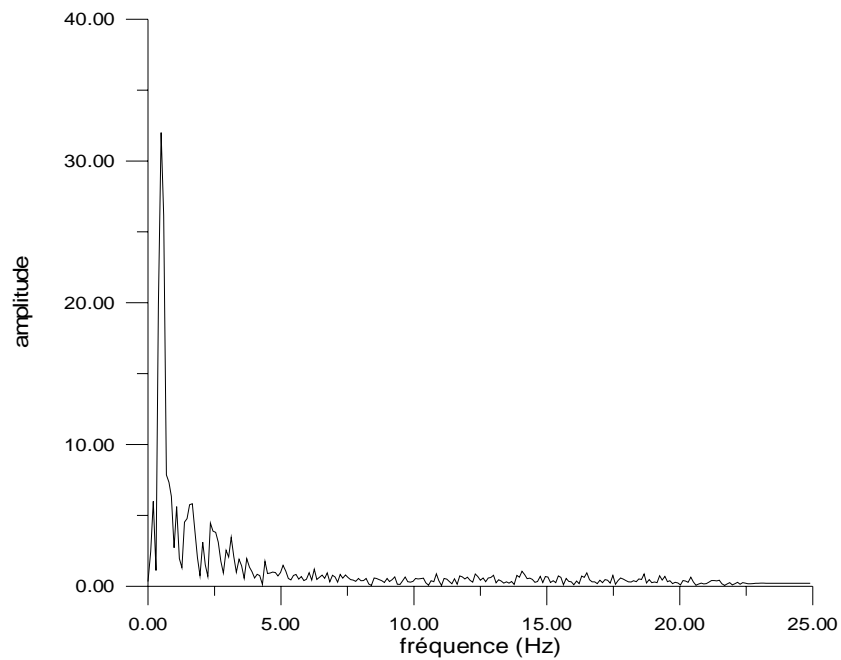


Fig.42 (c) Contenu fréquentiel de la composante Santa Monica du séisme de Northridge



**Fig.42 (d) Contenu fréquentiel de la composante
Oakland Outer du séisme de Loma Prieta**



**Fig.42 (e) Contenu fréquentiel d'une composante
du séisme de Mexico**

Pour comparer le comportement des systèmes d'appuis sous les différents chargements on a procédé comme suit :

Tout d'abord, les excitations ont été normalisées à la même accélération maximale à savoir un PGA de 0.3417g, pour que la différence entre les excitations se situe dans le contenu fréquentiel, ensuite pour chaque type d'appuis, la structure est soumise à tous les chargements. Les résultats de l'analyse sont résumés dans les tableaux (9) à (13).

Type d'accélérogrammes	Niveau	Déplacement Relatif (m)	Déplacement inter étage (x/h %)	Accélération totale (m/s/s)	Effort tranchant (Kn)
El Centro NS	3	0.0046	0.04	-3.6323	-433.705
	2	0.0030	0.05	-2.2926	-540.763
	1	0.0014	0.04	2.3422	-525.499
	base	0.034	-	-	-525.499 511.885
Northridge Sylmar County	3	-0.0043	0.04	3.1923	381.163
	2	-0.0029	0.05	2.1043	492.206
	1	0.0013	0.04	2.1676	510.219
	base	-0.072	-	-	510.219 -601.221
Northridge Santa Monica	3	0.0056	0.06	-4.9985	-596.827
	2	0.0039	0.06	-3.6852	-689.629
	1	0.0018	0.05	-2.6700	-711.750
	base	0.016	-	-	-711.750 587.358
Loma prieta	3	-0.0051	0.05	4.1495	495.458
	2	0.0034	0.06	2.4162	595.832
	1	- 0.0015	0.04	2.8473	578.759
	base	-0.086	-	-	578.759 -678.358
Composante du séisme de Mexico	3	-0.0082	0.05	3.9197	468.013
	2	-0.0063	0.08	3.655	887.394
	1	-0.0033	0.10	3.6425	1307.683
	base	-0.605	-	-	1307.683 -1723.758

Tableau 9. Réponses maximales de la structure à 3 niveaux avec les appuis glissants en Téflon soumis aux différents types d'accélérogrammes.

Type d'accélérogrammes	Niveau	Déplacement Relatif (m)	Déplacement inter étage (x/h %)	Accélération totale (m/s/s)	Effort tranchant (kn)
El Centro NS	3	-0.0051	0.03	2.3195	276.952
	2	-0.0040	0.05	2.3171	551.307
	1	-0.0021	0.06	2.3100	826.398
	base	-0.5100	-	-	826.398 -1100.862
Northridge Sylmar County	3	0.0042	0.03	-1.8819	-224.709
	2	0.0032	0.04	-1.8714	-448.158
	1	0.0017	0.05	-1.8555	-669.716
	base	0.412	-	-	-669.716 889.239
Northridge Santa Monica	3	-0.0013	0.01	0.6104	72.884
	2	-0.0010	0.01	0.6075	145.410
	1	-0.0006	0.02	0.6038	217.427
	base	-0.134	-	-	217.427 -288.895
Loma prieta	3	-0.0022	0.01	1.00053	119.464
	2	-0.0017	0.02	0.99406	238.155
	1	-0.0009	0.03	0.98485	355.747
	base	-0.219	-	-	355.747 -472.224
Composante du séisme de Mexico	3	-0.0111	0.07	5.0158	598.891
	2	-0.0086	0.11	5.0045	1196.430
	1	-0.0046	0.13	4.9865	1791.826
	base	-1.104	-	-	1791.826 -2384.528

Tableau 10. Réponses maximales de la structure à 3 niveaux avec les appuis en caoutchouc fretté soumis aux différents types d'accélérogrammes.

Type d'accélérogrammes	Niveau	Déplacement Relatif (m)	Déplacement inter étage (x/h %)	Accélération totale (m/s/s)	Effort tranchant (kn)
El Centro NS	3	0.0019	0.01	-0.8623	-102.961
	2	0.0014	0.02	-0.8299	-201.434
	1	0.0008	0.02	-0.8377	-296.501
	base	0.103	-	-	-296.501 393.655
Northridge Sylmar County	3	-0.0027	0.02	1.2373	147.738
	2	-0.0021	0.03	1.2299	292.719
	1	-0.0011	0.03	1.2320	438.504
	base	-0.195	-	-	438.504 -585.611
Northridge Santa Monica	3	0.0016	0.01	-0.7072	-84.450
	2	0.0012	0.02	-0.6991	-167.925
	1	0.0006	0.02	-0.6986	-248.975
	base	0.073	-	-	-248.975 330.918
Loma prieta	3	-0.0021	0.01	0.9803	117.054
	2	-0.0016	0.02	0.9465	230.067
	1	- 0.0009	0.02	0.9500	338.544
	base	-0.129	-	-	338.544 -446.780

Tableau 11. Réponses maximales de la structure à 3 niveaux avec les appuis comportant un amortisseur en barreau de plomb soumis aux différents types d'accélérogrammes.

Type d'accélérogrammes	Niveau	Déplacement Relatif (m)	Déplacement inter étage (x/h %)	Accélération totale (m/s/s)	Effort tranchant (kn)
El Centro NS	3	0.00	0.00	0.000103	0.012
	2	0.00	0.00	0.000091	0.023
	1	0.00	0.00	0.000075	0.032
	base	-0.586	-	-	0.032 -0.038
Northridge Sylmar County	3	0.00	0.00	-0.000095	-0.011
	2	0.00	0.00	-0.000094	-0.023
	1	0.00	0.00	-0.000091	-0.033
	base	-0.113	-	-	-0.033 0.044
Northridge Santa Monica	3	0.00	0.00	0.000082	0.010
	2	0.00	0.00	0.000054	0.016
	1	0.00	0.00	0.000040	0.018
	base	0.078	-	-	0.018 -0.019
Loma prieta	3	0.00	0.00	-0.000107	-0.013
	2	0.00	0.00	-0.000102	-0.025
	1	0.00	0.00	-0.000096	-0.036
	base	0.100	-	-	-0.036 0.047
Composante du séisme de Mexico	3	0.00	0.00	-0.000212	-0.025
	2	0.00	0.00	-0.000210	-0.050
	1	0.00	0.00	-0.000210	-0.075
	base	1.556	-	-	-0.075 0.100

Tableau 12. Réponses maximales de la structure à 3 niveaux avec les appuis en pendules glissants soumis aux différents types d'accélérogrammes.

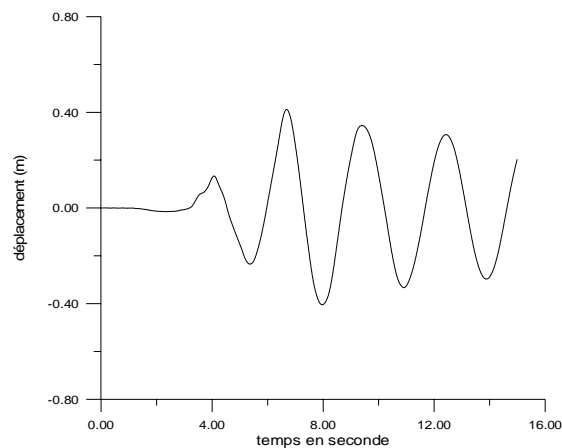
Type d'accélérogrammes	Niveau	Déplacement Relatif (m)	Déplacement inter étage (x/h %)	Accélération totale (m/s/s)	Effort tranchant (kn)
El Centro NS	3	-0.0048	0.03	2.1518	256.932
	2	-0.0037	0.05	2.1449	513.034
	1	-0.0020	0.06	2.1356	767.959
	base	-0.488	-	-	767.959 -1021.66
Northridge Sylmar County	3	0.0039	0.03	-1.7477	-208.678
	2	0.0030	0.04	-1.7377	-416.163
	1	0.0016	0.05	-1.7229	-621.882
	base	0.395	-	-	-621.882 825.740
Northridge Santa Monica	3	-0.0013	0.01	-0.5863	70.012
	2	-0.0010	0.01	-0.5832	139.615
	1	-0.0005	0.02	-0.5792	208.709
	base	-0.132	-	-	208.709 -277.221
Loma prieta	3	0.0020	0.01	-0.9133	-109.056
	2	0.0015	0.02	-0.9034	-216.882
	1	0.0008	0.02	-0.8851	-322.946
	base	0.204	-	-	-322.946 426.976
Composante du séisme de Mexico	3	-0.0110	0.07	4.9857	595.295
	2	-0.0085	0.11	4.9743	1189.228
	1	-0.0046	0.13	4.9567	1781.063
	base	-1.133	-	-	1781.063 -2370.506

Tableau 13. Réponses maximales de la structure à 3 niveaux avec les appuis résistant par frottement soumis aux différents types d'accélérogrammes.

D'après les résultats obtenus, constatons que sous tous les chargements les déplacements relatifs restent toujours négligeables pour tous les systèmes. Cependant pour la base, des déplacements, qui dépassent un mètre, ont été enregistrés dans le cas du chargement du séisme de Mexico qui a une particularité d'avoir une fréquence fondamentale d'environ 0.5Hz, pour les appuis en caoutchouc fretté, les appuis résistant par frottement et les appuis en pendules glissants. Le fait que dans le cas des deux autres types d'appuis, à savoir les appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb et les appuis glissants en Téflon, ce déplacement n'a pas atteint un mètre est dû probablement à la présence e l'amortisseur en plomb qui résiste aux déformations de cisaillement pour le premier type, et les fonctions de rappel et de glissement qui sont en série pour le deuxième type.

Pour ces appuis les déplacements de la base sous les différents chargements sont présentés sur les figures 43 à 46.

Aussi pour les accélérations transmises, une amplification en moyenne de 33% est observée dans le cas du séisme de mexico pour les appuis en caoutchouc fretté et de 32% pour les appuis résistant par frottement.



**fig43(a) Déplacement de la base dans le cas
des appuis en caoutchouc fretté
(Sylmar county)**

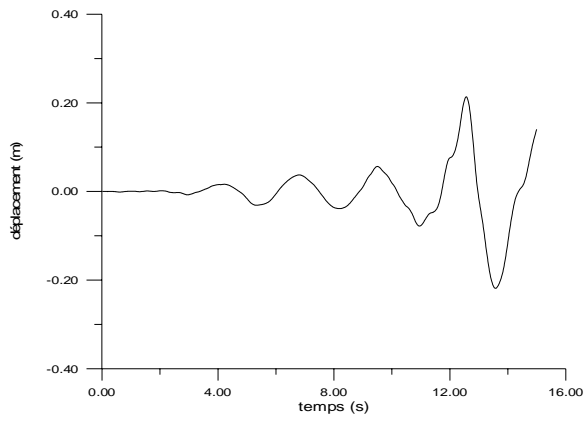


fig43(b) Déplacement de la base dans le cas des appuis en caoutchouc fretté

(Loma Prieta)

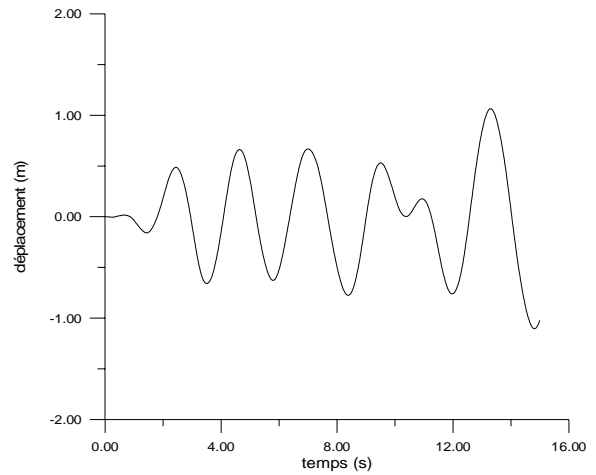


fig43(c) Déplacement de la base dans le cas des appuis en caoutchouc fretté

(Mexico)

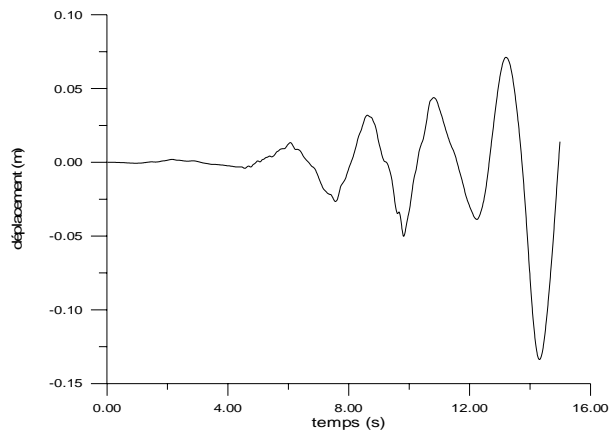


fig43(d) Déplacement de la base dans le cas des appuis en caoutchouc fretté (Santa Monica)

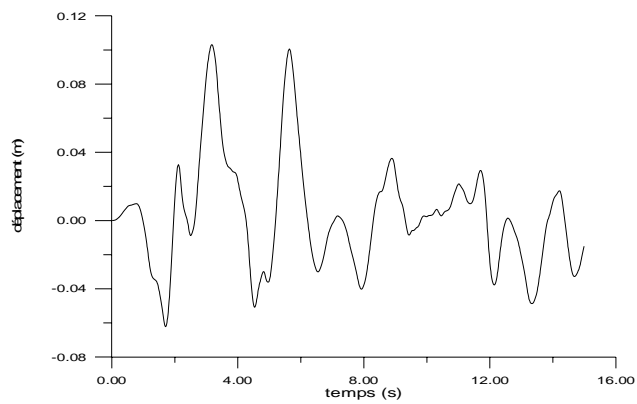


Fig.44 (a) déplacement de la base sur les appuis avec amortisseur en barreau de plomb (El Centro)

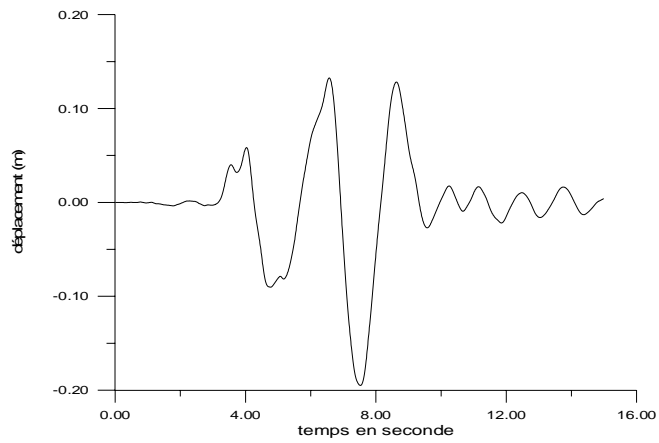


Fig.44 (b) déplacement de la base sur les appuis avec Amortisseur en barreau de plomb (Sylmar County)

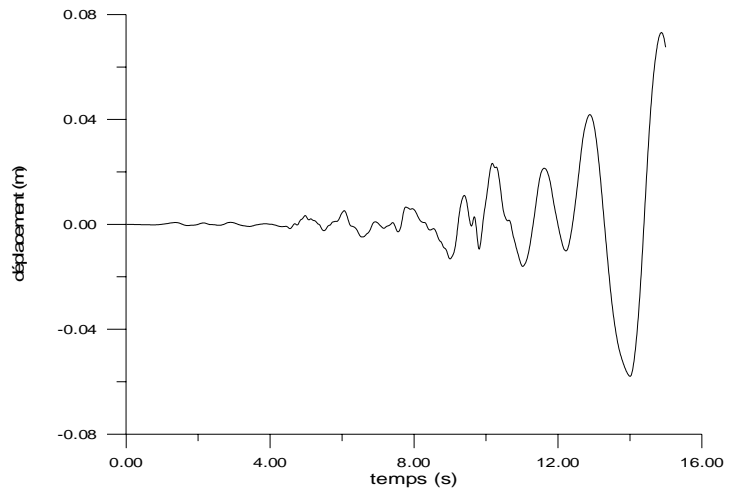


Fig.44 (c) déplacement de la base sur les appuis avec amortisseur en barreau de plomb (Santa Monica)

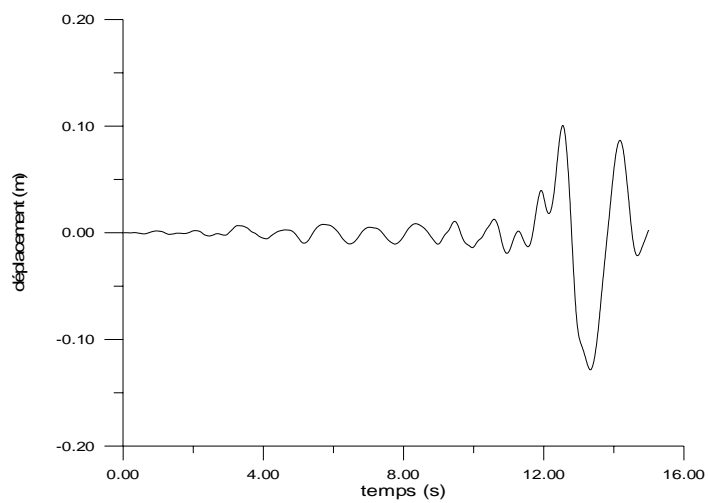


Fig.44 (d) déplacement de la base sur les appuis avec amortisseur en barreau de plomb (Loma Prieta)

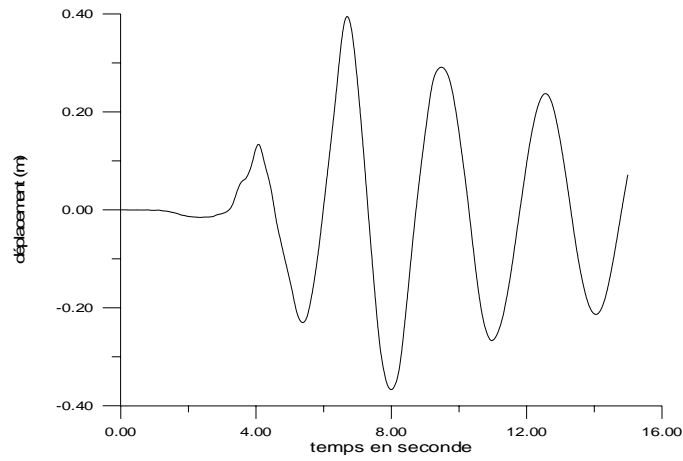


fig.45(a) Déplacement de la base dans le cas des appuis glissants en Téflon (Sylmar county)

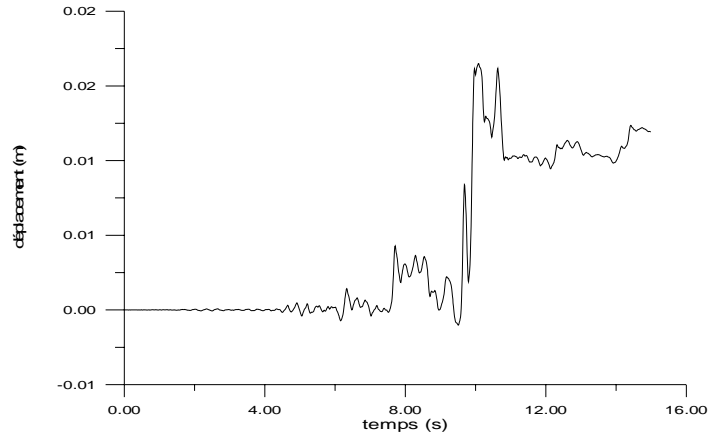


fig.45 (b) Déplacement de la base dans le cas des appuis glissants en Téflon (Santa monica)

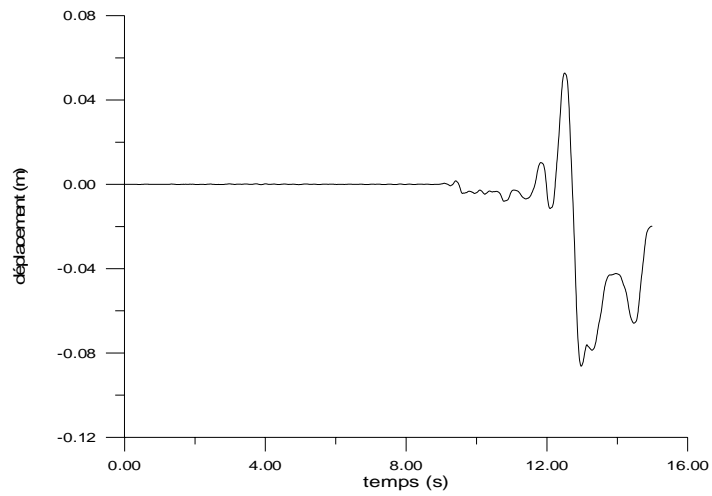


fig.45 (c) Déplacement de la base dans le cas des appuis glissants en Téflon (Loma Prieta)

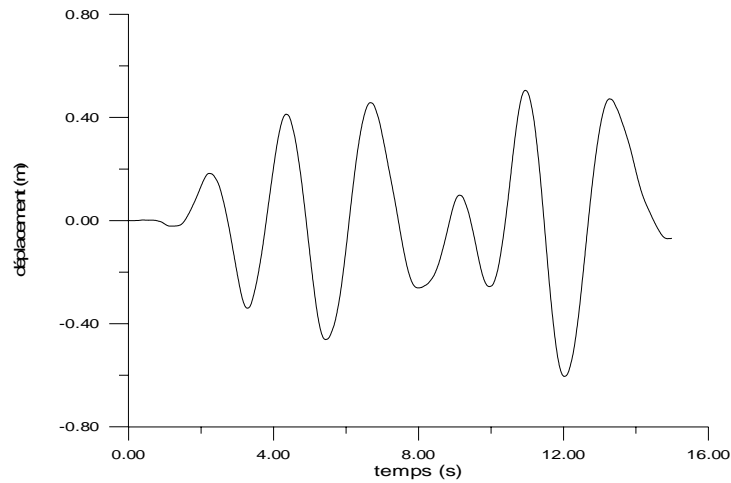


Fig.45 (d) Déplacement de la base dans le cas des appuis glissants en Téflon (Mexico)

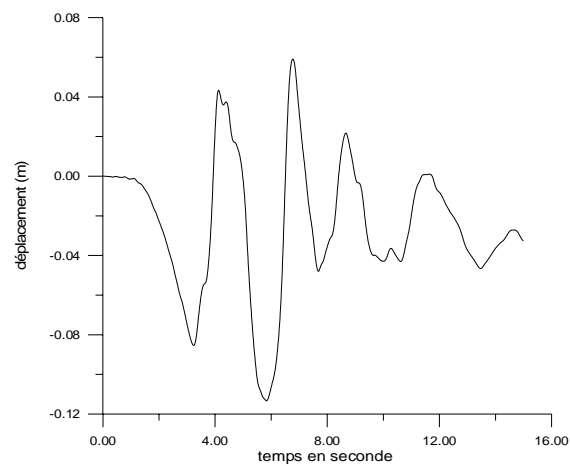


fig.46 (a) Déplacement de la base dans le cas des appuis en pendules glissants (sylmar county)

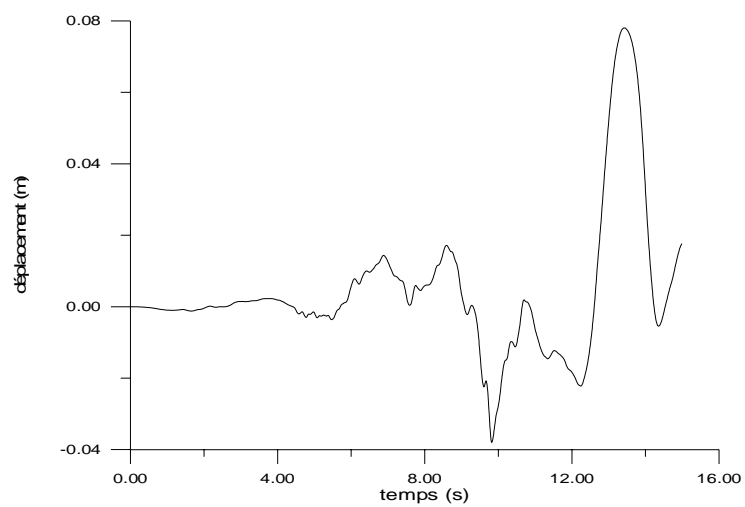


fig.46 (b) Déplacement de la base dans le cas des appuis en pendules glissants (Santa Monica)

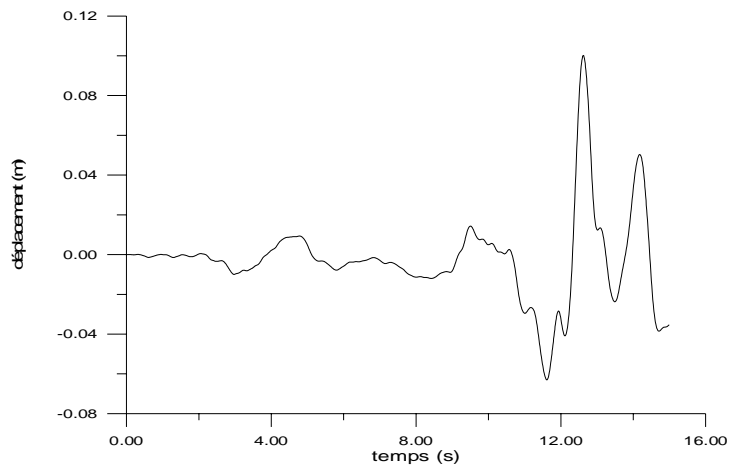


fig.46 (c) Déplacement de la base dans le cas des appuis en pendules glissants (Loma Prieta)

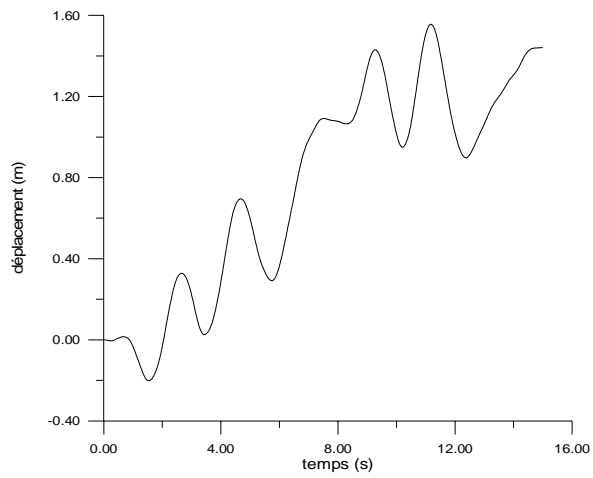


fig.46 (d) Déplacement de la base dans le cas des appuis en pendules glissants (Mexico)

4-3- Nombre de niveaux de la structure

Pour ce facteur, l'analyse a été effectuée sur des structures à trois (R+2), quatre (R+3) et cinq (R+4) niveaux ayant comme système d'isolation les appuis glissants en Téflon avec une période de vibration de 3 secondes. Les réponses des structures, sous le chargement sismique d'El Centro, sont présentées dans le tableau 14.

Il ressort de ce tableau que les déplacements relatifs augmentent avec le nombre de niveaux, en effet au dernier plancher de la structure en R+2 le déplacement est de 0.46 cm, il est de 0.86 cm et de 1.04 cm pour les structures en R+3 et R+4 respectivement. On a observé aussi que l'augmentation du nombre d'étages entraîne une augmentation du déplacement de la base qui est illustré sur les figures 47.

Aussi les efforts tranchants à la base augmentent avec le nombre de niveaux de la structure.

Contrairement aux déplacements, l'amplification des accélérations de la superstructure n'est pas une conséquence d'augmentation du nombre d'étages de la structure, par ailleurs des accélérations de 4.2946 m/s^2 et 3.5150 m/s^2 ont été enregistrées au dernier plancher des structures en R+3 et R+4 respectivement.

4 -4 - Période du système d'isolation.

Il est toutefois utile de signaler que dans ce cas l'étude a été menée sur une structure à six niveaux avec des appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb.

Deux périodes de vibration du système d'isolation, 1.65 et 3 secondes, ont été considérées et les réponses des structures sont consignées dans le tableau 15.

D'après les résultats, l'allongement de la période entraîne une diminution des déplacements relatifs des planchers et une croissance du déplacement de la base.

D'après la formule qui donne le déplacement du système d'isolation ($D_D = \frac{g}{4\pi^2} \frac{ZNS_I T_D}{B_D}$)

le déplacement de la base croit avec la période du système d'isolation.

Les accélérations transmises sont aussi réduites pour le cas de la période de 3 secondes, en effet plus la période est allongée plus les accélérations transmises sont réduites, par conséquent les efforts tranchants à la base sont réduits.

La période de vibration du système est une donnée très importante qui influence le comportement de la structure.

	Niveau	Déplacement Relatif (m)	Déplacement inter étage (x/h %)	Accélération totale (m/s/s)	Effort tranchant (Kn)
Structure à trois niveaux	3	0.0046	0.04	-3.6323	-433.705
	2	0.0030	0.05	-2.2926	-540.763
	1	0.0014	0.04	2.3422	-525.499
	base	0.034	-	-	-525.499 511.885
Structure à quatre niveaux	4	-0.0086	0.06	4.2946	512.779
	3	-0.0064	0.07	2.4952	676.693
	2	-0.0038	0.06	-1.9425	671.324
	1	-0.0016	0.05	-2.3041	583.751
	base	0.052	-	-	583.751 585.770
Structure à cinq niveaux	5	-0.0104	0.06	-3.5150	-419.694
	4	-0.0089	0.07	2.2956	-538.676
	3	-0.0067	0.08	2.0002	678.278
	2	-0.0042	0.07	2.5593	698.201
	1	-0.0018	0.05	2.6474	635.522
	base	0.058	-	-	635.522 600.555

Tableau 14. Réponses maximales des structures à différents niveaux avec les appuis glissants en Téflon soumis au séisme d'El Centro.

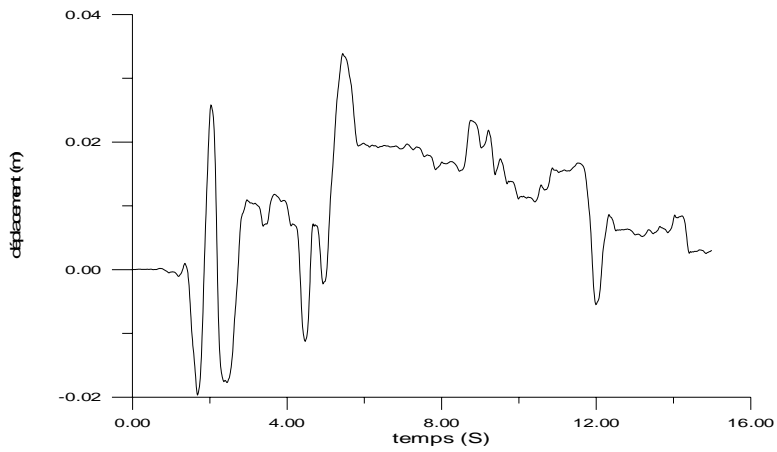


fig47 (a) Déplacement de la base dans le cas de la structure à 3 niveaux sur les appuis glissants en Téflon

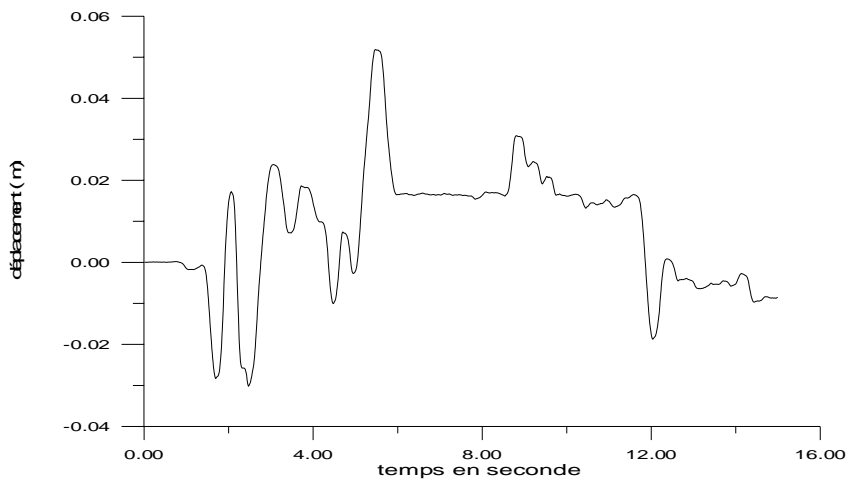


fig47 (b) Déplacement de la base dans le cas de la structure à 4 niveaux sur les appuis glissants en Téflon

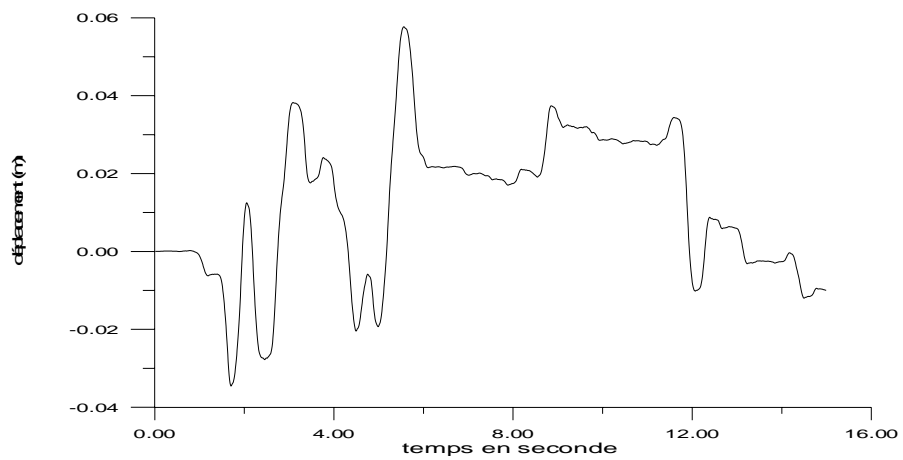


fig47(c) Déplacement de la base dans le cas de la structure à 5 niveaux sur les appuis glissants en Téflon

Période du système d'isolation	Niveau	Déplacement Relatif (m)	Déplacement inter étage (x/h %)	Accélération totale (m/s/s)	Effort tranchant (t)
1.65 seconde (Sylmar county)	6	0.0521	0.20	3.2649	116.445
	5	0.0457	0.24	-2.5809	197.571
	4	0.0379	0.29	2.1650	-272.933
	3	0.0286	0.33	2.2298	-335.959
	2	0.0160	0.30	2.3765	-381.982
	1	0.0064	0.17	2.5039	449.407
	base	-0.109	-	-	449.407 -528.099
3 secondes (Sylmar county)	6	0.0384	0.14	-1.8754	-66.887
	5	0.0341	0.17	-1.7529	-128.721
	4	0.0288	0.20	-1.6767	-186.749
	3	0.0222	0.25	-1.5793	-246.859
	2	0.0127	0.23	-1.4038	-305.270
	1	0.0052	0.14	-1.3199	-352.429
	base	0.336	-	-	-352.429
1.65 seconde (El Centro)	6	0.0381	0.16	-2.7633	-98.554
	5	0.0333	0.19	-2.0203	-167.790
	4	0.0276	0.22	-1.8431	-213.421
	3	0.0205	0.25	-1.5635	-257.384
	2	0.0112	0.21	-1.6142	273.616
	1	0.0044	0.12	1.7350	-267.707
	base	0.052	-	-	-267.707 312.620
3 secondes (El Centro)	6	-0.0345	0.12	1.5822	56.430
	5	-0.0308	0.14	1.5311	109.405
	4	-0.0262	0.18	1.5224	163.448
	3	-0.0204	0.23	1.5089	222.161
	2	-0.0118	0.22	1.4771	283.745
	1	-0.0049	0.13	1.4421	336.282
	base	-0.328	-	-	336.282 -388.539

Tableau 15. Réponses maximales de la structure à 6 niveaux avec les appuis avec amortisseur en barreau de plomb soumis aux séismes d'El Centro et de Northridge.

	Niv.	Déplacement Relatif (m)	Déplacement inter étage (x/h %)	Accélération totale (m/s/s)	Effort tranchant (Kn)
16 Appuis parasismiques	3	0.0046	0.05	-3.63236	-433.705
	2	0.0030	0.05	-2.2926	-540.763
	1	0.0014	0.04	2.342263	-525.499
	base	0.036	-	-	511.885
12 Appuis parasismiques	3	0.0037	0.04	-3.052441	-364.461
	2	0.0024	0.04	1.818061	-424.463
	1	0.0011	0.03	-2.046538	-386.024
	base	0.051	-	-	443.052
8 Appuis parasismiques	3	-0.0024	0.02	-2.055472	-245.423
	2	0.0016	0.03	1.31126	283.632
	1	0.0008	0.02	-1.471366	-298.323
	base	0.072	-	-	371.613

Tableau 16. Réponses de la structure avec 16 appuis, 12 et 8 appuis parasismiques soumise à l'excitation d'El Centro.

4 -5- Nombre d'appuis parasismiques

Le tableau (16) tend à comparer les réponses de la structure, obtenues en faisant varier le nombre d'appuis utilisés pour porter la structure et cela dans le but de savoir si le nombre d'appuis utilisés influe sur son comportement, Autrement dit est ce qu'il faut placer sous chaque poteau un isolateur ?

D'après les résultats numériques, on peut ne pas placer sous chaque poteau un isolateur, mais le nombre à utiliser doit être suffisant pour pouvoir supporter le poids de la structure et éviter le soulèvement de la structure, car les isolateurs ont une fonction porteuse en sus du rôle du filtre qu'ils jouent.

Aussi les isolateurs doivent être placés symétriquement et sous chaque poteau d'angle un isolateur doit être placé.

Mais il reste tout de même qu'une étude expérimentale est nécessaire pour se prononcer sur l'influence de ce paramètre.

4 - 6-Avec ou sans palées de stabilité (palées triangulées).

En supprimant les palées de stabilité, une augmentation des déplacements de la superstructure et de la base a été enregistrée.

Les palées ont fait réduire les déplacements inter étages de 60 % et cela en augmentant la rigidité de la superstructure. La figure 48 présente les accélérations transmises au dernier niveau de la structure avec et sans palées de stabilité.

L'effet de l'isolation augmente avec la différence de rigidité entre la base et la superstructure.

Structure sans les palées triangulées					Structure avec les palées triangulées			
Niv.	Déplacem ent Relatif (m)	Dépl.int. étage (x/h %)	Accél. totale m/s/s)	Effort tranch. (kn)	Déplacement Relatif (m)	Dépl.int. étage (x/h %)	Accélé. (m/s/s)	Effort tranch. (kn)
3	-0.0160	0.15	-3.9316	-469.445	0.0046	0.04	-3.6323	-433.705
2	-0.0110	0.18	2.8001	551.064	0.0030	0.05	-2.2926	-540.763
1	-0.0051	0.15	2.9831	578.295	0.0014	0.04	2.3422	-525.499
base	0.042	-	-	573.564	0.034	-	-	511.885

Tableau 17. Réponses de la structure avec les appuis glissants en Téflon avec et sans palées de stabilité sous l'excitation d'El Centro.

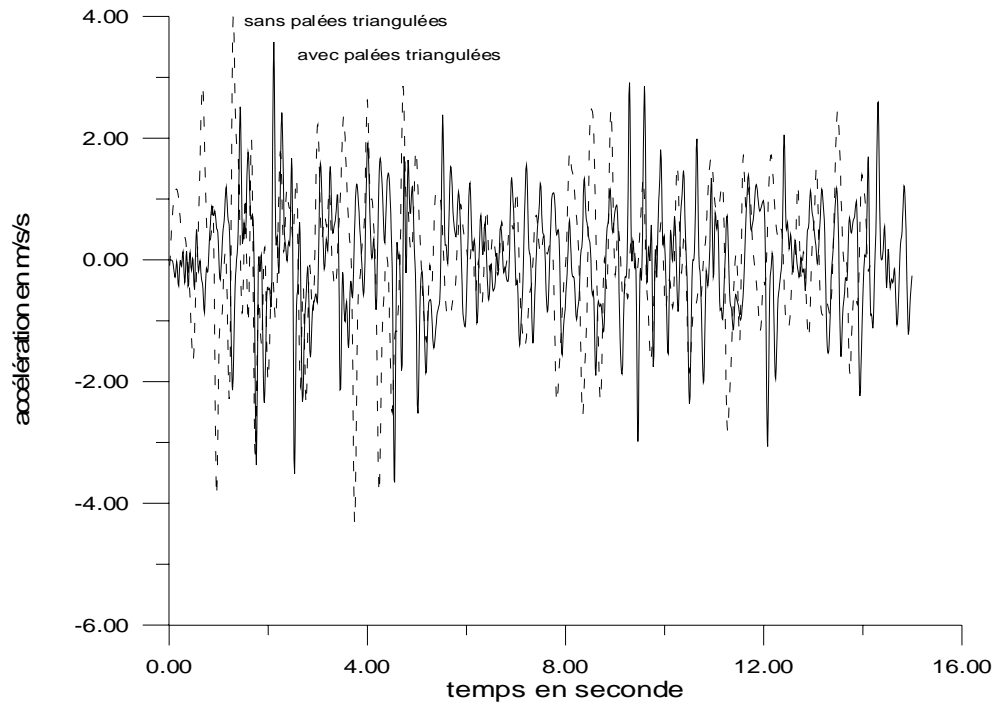


Fig.48 Accélérations du dernier niveau de la structure avec et sans palées de stabilité sous l'excitation d'El Centro.

5 -Conclusion

Les résultats numériques obtenus par l'étude paramétrique nous ont permis de déduire que :

- Les déplacements relatifs des planchers sont très faibles dans le cas de tous les systèmes d'isolation.
- Les accélérations transmises à la superstructure sont inférieures à celles du sol même aux étages supérieurs pour tous les types d'appuis.
- Les déplacements relatifs et le déplacement de la base sont inversement proportionnels.
- Le déplacement de la base dépend du type d'appuis parasismiques.
- Les appuis élastomères ont enregistré des amplifications des accélérations de la superstructure et des grands déplacements à la base sous le chargement du séisme de Mexico (basses fréquences) ce qui montre leur sensibilité au contenu fréquentiel.

- Les déplacements relatifs sont proportionnels au nombre de niveaux
- les réponses de la superstructure sont d'autant réduites que la période du système d'isolation est allongée
- Les éléments de stabilité jouent un rôle dans la réduction des réponses de la structure.

En conclusion cette étude paramétrique nous a permis de confirmer ce qui suit :

- Tous les systèmes d'isolation ont une caractéristique en commun :
la souplesse horizontale.
- Parmi tous les systèmes passés en revue, les appuis glissants restent les plus efficaces même sous les chargements à basses fréquences.
- La période du système d'isolation a une grande influence sur le comportement de la structure.
- L'efficacité des appuis augmente avec la différence entre leur rigidité horizontale et celle de la superstructure.

Conclusion générale

Construire a toujours été un des premiers soucis de l'homme et l'une de ses occupations privilégiées. Construire c'est mettre à la disposition des hommes une portion aménagée et conditionnée à leur convenance, mais c'est aussi utiliser avec intelligence les matériaux existants avec un degré de sécurité approprié pour réduire le risque sismique et préserver les vies humaines, surtout que les tremblements de terre dangereux se produisent au moins une fois par an et ceux qui ont ravagé le monde en sont témoins et pour ne citer que les plus récents Boumerdes 21 mai 2003, Bam (Iran) décembre 2003, El Hoceima (Maroc) février 2004. Pour cela, plusieurs méthodes de construction parasismique ont été développées et seront encore développées davantage et sur cette liste des innovations des méthodes de conception parasismique, figure l'isolation parasismique qui est une méthode d'isolation partielle des structures du sol et qui constitue une alternative à l'approche classique de la protection des ouvrages qui accepte des dégâts de manière contrôlée.

L'objectif principal de ce travail était de mettre en évidence le rôle des appuis parasismiques dans la réduction des réponses dynamique des bâtiments et déduire les paramètres influant sur le comportement du système combiné (la base et la superstructure).

Pour atteindre l'objectif qui lui est assigné ce travail était basé sur des formulations théoriques et des analyses numériques qui nous ont permis par ailleurs de confirmer ce qui a été formulé dans la littérature sur le comportement des bâtiments isolés.

L'analyse dynamique des structures isolées présentée dans le chapitre trois nous a permis de déduire les matrices masse $[M]$, rigidité $[K]$ et d'amortissement $[C]$ d'une structure isolée ainsi que l'équation caractéristique pour la détermination des pulsations de la structure isolée. L'étude comparative effectuée sur une structure à trois niveaux avec et sans le système d'isolation qui consistait en 16 appuis glissants en Téflon nous a permis de mettre en évidence le rôle des appuis parasismiques dans le filtrage des fréquences de la superstructure et leur effet sur la réponse des structures isolées :

- Les accélérations transmises à la superstructure sont inférieures à celle du sol.
- Les déplacements inter étages sont pratiquement négligeables.
- Les forces sismiques agissant sur la superstructure sont réduites.

- La réponse de la structure isolée se trouve réduite de deux à trois fois par rapport à celle d'une structure classique.

L'étude paramétrique a porté sur les facteurs suivants :

- Types d'appuis parasismiques
- Types d'accélérogrammes
- Nombre de niveaux de la structure
- Période du système d'isolation
- Nombre d'appuis parasismiques utilisés pour isoler la structure
- Avec ou sans palées de stabilité (palées triangulées)

L'investigation des résultats numériques obtenus nous a permis d'émettre les conclusions suivantes :

- Les déplacements imposés à la structure isolée se localisent au niveau des appuis parasismiques.
- La réponse d'une construction sur appuis parasismiques est principalement fonction des caractéristiques des appuis et du contenu fréquentiel de l'excitation sismique.
- L'efficacité des appuis augmente avec la différence entre leur rigidité horizontale et celle de la superstructure.
- Le degré d'isolation est défini comme étant le rapport des souplesses du système d'isolation et de la superstructure.

La liste des paramètres sur lesquels cette étude a porté n'est pas exhaustive, il serait aussi intéressant de voir les réponses de la structure en considérant les paramètres suivants :

- Type de contreventement de la superstructure
- Degré d'amortissement du système d'isolation
- Associer les différents types d'amortisseurs aux différents types d'appuis

Il serait toujours intéressant aussi de mener une étude expérimentale en parallèle sur un modèle réduit d'une structure isolée et d'étayer ainsi ces résultats numériques avec des résultats expérimentaux.

Références Bibliographiques

- [1]: ACHOUR F., AZZOUZ K., AFRA H. (2003) « Analyse Sismique des structures Comportant des Systèmes d'Isolation à leur Base » Actes du colloque international sur la construction, Alger 11-12 Octobre.
- [2]: ALHAN C., GAVIN H. (2003) « Parametric Analysis of Passive Damping in Base Isolation 16th ASCE Engineering Mechanics, University of Washington, Seattle July 16-18.
- [3]: AZZOUZ K. (1991) « Influence of Base Isolators on Earthquake Response Analysis of R/C Buildings » Individual Studies by participants at the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Japan vol. 27, pp. 153-164
- [4]: BTTINALI F., BERGAMO G., BONACINA G., CASIRATI M., MENGA R., VENTURUZZO M., MARTELLI A. (1994) « Seismic Base Isolation of Civil and Industrial Structures » proceeding of the second international conference on earthquake resistant construction and design, Berlin.
- [5]: BHATTI M.A., PISTER K.S., POLAK E. (1978) « Optimal Design of Earthquake Isolation System » report N° UBC/EERC 78/22.
- [6]: BRUNO S., VALENTE C. (2002) « Comparative Response Analysis of Conventional and Innovative Seismic Protection Strategies » earthquake Engineering and structural dynamics, N°31, pp. 1067- 1092.
- [7]: CHANG S.P., KOH H.M., KIM J. (2000) « Development of New Seismic Design Concepts considering Moderate Seismicity in Korea » proceedings of the China-US Millennium symposium of Earthquake Engineering, Beijing, November 8-11.
- [8]: CLARK P.W., ALKEN I.D., NAKASHIMA M., MIYAZAKI M., KIDORIKAWA M. (1999) « New Design Technologies, the 1995 Kobe (Hyogo Nanbu) » Earthquake as a trigger for implementing new seismic design Technologies in Japan. Earthquake Engineering Research institute (EERI).
- [9]: CLOUGH R.W., PENZIEN J. (1982) « Dynamics of Structures » Mc Graw-Hill International Editions.

[10]: CONSTANTINOU M.C., REINHORN A.M., MOKHA A.S. (1990) « Experimental and Analytical Study of Combined sliding Disc Bearing and Helical Steel Spring Isolation System » Technical Report NCEER-90-00-19, University at Buffalo.

[11]: DEB S.K. (2003) « Seismic Base Isolation – An overview » CPFTEGE,
December 23-24.

[12]: DELUCA A., FAELLA G., MELE E (1994) « Effects of Design level on Dynamic Behaviour of Multistory Base Isolated Structures » Proceeding of the Second International Conference on Earthquake Resistant Construction and design, Berlin.

[13]: FEMA 274, « Seismic Isolation and Energy Dissipation (Systematic Rehabilitation) » Federal Emergency Management Agency, Washington.

[14]: FERRAIOLI M., MALANGONE P. (1998) « nonlinear Modeling for Dynamic Analysis of Base Isolated Structures » 11th European Conference on Earthquake Engineering.

[15]: INAUDI J.A., KELLY J.M. (1992) « Optimum Damping in Base Isolated Structures » proceedings of the tenth World conference on Earthquake Engineering, Madrid.

[16]: International code Council (2000) « Seismically Isolated Structures Design Requirements » International Building Code, chapter 13, (provisions).

[17]: International code Council (2000) « Seismically Isolated Structures Design Requirements » International Building Code, chapter 13, Commentary.

[18]: IZUMI M., TOBITA J., KUROSAW I., MIYAZAWA F., KUBOTA K. (1990) « Earthquake Response Characteristics of Base Isolated Buildings by Direct Comparison with a Non Isolated one » The Architectural reports of the Tohoku University N°29, March.

[19]: KELLY J.M., EIDINGER J.M., DERHAM C.J. (1977) « A practical soft Story Earthquake Isolation System » Report N° UBC/EERC-77/27, November.

[20]: KELLY J.M (1997) « Earthquake Resistant Design with Rubber », Springer Editions.

[21]: KELLY J.M (1998) « Seismic Isolation as a Innovative Approach for the Protection of Engineered structures » 11th European Conference on Earthquake Engineering

- [22]: KIM J., CHOUN Y.S. and CHOI I.K. (1994) « A Comparative Study on the Base Isolation Systems for the Spent Fuel Storage Pool », Proceedings of the second International Conference on Earthquake Resistant Construction and Design, Berlin.
- [23]: LEE D.G., HONG J.M., KIM J. (2001) « Vertical Distribution of Equivalent Static Loads for Base Isolated Building Structures » Engineering Structures, N°23, pp 1293-1306.
- [24]: LU X., ZHOU Q. (2002) « Dynamic Analysis Method of Combined Energy Dissipation system and its Experimental Verification » Earthquake engineering and Structural Dynamics, N°31 pp 1251-1265.
- [25]: MICHAEL D., MCFARLAND, WANG Y., VAKAKIS A.F., BERGMAN L.A. (2002) « A Parametric Analysis of a Novel Shock Isolation System » 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, June 2-5, Columbia University, New York.
- [26]: MOKHA A., CONSTANTINOU M.C., REINHORN A.M. (1988) « Teflon Bearings in A seismic Base Isolations, Experimental studies and Mathematical Modeling » Technical Report NCEER-88-00-38, University at Buffalo.
- [27]: MOKHA A., CONSTANTINOU M.C., REINHORN A.M. (1990) « Teflon Bearings in Base Isolation, part I: Testing » Journal of structural Engineering, ASCE, Vol. 116 N°2, pp 438-454.
- [28]: MOKHA A., CONSTANTINOU M.C., REINHORN A.M. (1990) « Teflon Bearings in Base Isolation, part II: Modeling » Journal of structural Engineering, ASCE, Vol. 116 N°2, pp 455-474.
- [29]: NAASEH S. (2001) « Practical Solutions for Seismic Isolation Lessons Learned » 5th World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Rome Italy, October 7-11.
- [30]: NGARAJAIAH S., LI R., REINHORN A.M., CONSTANTINOU M.C., TSOPELAS P. (1994) « 3D- BASIS- TABS- Computer Program for Nonlinear Dynamic Analysis of Three Dimensional Base Isolated Structures » Technical Report NCEER-94-00-18.
- [31]: OCCHIUZZI A., VENEZIANO D., DYCK J.V.(1994) « Seismic Design of Base Isolated Structures » proceeding of the second international Conference on Earthquake Resistant Construction and Design, Berlin.

- [32]: PINTO O.C., GONCALVES P.B. (1998) « Nonlinear Optimal Control of Flexible Structures » 11th European Conference on Earthquake Engineering.
- [33]: RUIZ S.E., SOSA A., GONZALEZ R. – ALCORTA (1992) « Comparative Study of Isolated Structures » proceedings of the tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid.
- [34]: SAMALI B., WU Y.M., LI J.C (2003) « Shake Table tests on a Mass Eccentric Model with Base Isolation » Earthquake Engineering and Structural dynamics, N°32, pp 1-21.
- [35]: SKINNER R.I., MCVERRY G.H., ROBINSON W.H. (1992) « Developments In Understanding, Analysing and Designing Structures with Aseismic Isolation » proceedings of the tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid.
- [36]: SKINNER R.I., ROBINSON W.H., MCVERRY G.H (1993) « An Introduction to Seismic Isolation » John Wiley.
- [37]: SU L., AHMADI G., TADJKHSH I. (1989) « Comparative Study of base Isolation Systems » Journal of Engineering Mechanics, Vol 115, N°9, pp 1976-1991.
- [38]: WANG, PO Y. « Fundamentals of Seismic base Isolation » International Training **Programs for Design of Building structures.**
- [39]: WILSON E.L., HABIBULAH A. « Sap 90TM, a series of Computer programs for the Finite Element Analysis of Structures » structural Analysis, Users Manual.
- [40]: YAMAGUCHI S., TERAMOTO T., WADA A. (1990) « Introduction to AIJ “Recommendation of Base Isolated Buildings” »
- [41]: ZACEK M. (1996) « Construire Parasismique » Editions Parenthèses.
- [42] : ZHANG H., FOLIENTE G.C., YANG Y.G., MAF (2002) « Parameter Identification of Inelastic Structures under Dynamic loads » Earthquake Engineering and Structural dynamics, N°31, pp 1113-1130.
- [43]: ZHOU F., XIAN Q. (2000) « Recent Development on Seismic Isolation, Energy Dissipation, passive and Semi Active control of Structures in P.R. CHINA » Proceedings of the china-US Millennium Symposium of Earthquake Engineering, Beijing, November 8-11.