

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de technologie
Département de génie civil

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER en Génie Civil
Option : MATERIAUX ET STRUCTURE

Présenté par

Sabiha HAMOUCHE

MODELISATION ET ETUDE DE L'ISOLATION SISMIQUE DES CONSTRUCTIONS

Soutenu le 17/12/2009 devant le jury composé de :

Mr CHELLOUAH A/Nacer	M.C A	Université de Bejaia	Président
Mr TAHAKOURT A/kader	PROF	Université de Bejaia	Examineur
Mr MEHADDENE Rachid	M.C A	Université de Tizi ouzou	Examineur
Mr KADRI Mohamed	M.C A	Université de Boumerdès	Rapporteur
Mr SEGHIR A/Ghani	M.A A	Université de Bejaia	Invité

MODELISATION ET ETUDE DE L'ISOLATION SISMIQUE DES CONSTRUCTIONS

Résumé

L'analyse des structures soumises aux actions sismiques constitue un domaine de recherche d'actualité et revêt un intérêt particulier dans les pays où l'activité sismique est importante. Le nord de l'Algérie est considéré par le Règlement Parasismique Algérien (RPA) comme une zone de forte sismicité, les séismes de Chlef (1980) et celui de Boumerdès (2003) montrent à quel point est exposée une grande partie de l'Algérie aux risques que peuvent engendrer de telles secousses.

Des techniques d'atténuation de l'énergie transmise par le séisme à la structure basées sur le principe de l'isolation sismique sont utilisées de par le monde pour réduire au maximum les dégâts causés aux structures et du coup sécuriser les ouvrages stratégiques et protéger les populations occupant ces ouvrages.

L'objectif de cette recherche est de montrer l'efficacité de l'isolation sismique pour les structures en béton armé par une comparaison des accélérations, des déplacements et des efforts tranchants à la base d'une structure sans isolation avec ceux qu'elle aurait subis si elle avait été isolée. Les résultats obtenus montrent que les structures dotées de l'isolation sismique permettent de réduire les accélérations et les déplacements inter étage. La structure isolée se comporte presque comme un corps rigide. De plus une étude numérique permettant de définir un facteur de réduction d'efforts tranchants dû à l'isolation sismique a été effectuée.

Mots clés : Isolation sismique, structure, séisme, appuis parasismiques, modélisation, réponse sismique, dissipation d'énergie.

MODELING AND STUDY OF SEISMIC ISOLATION OF BUILDINGS

Abstract

The analysis of structures subjected to seismic actions is an area of current research and is particularly relevant in countries where seismic activity is important. Northern Algeria is considered by the Algerian Earthquake Regulations (RPA) as a zone of high seismicity, earthquakes of Chlef (1980) and that of Boumerdes (2003) shows how exposed much of the Algeria risks that may cause such shocks.

Techniques of attenuation of the energy transmitted by the seism to the structure based on the principle of the seismic isolation are used all over the world to minimize damage to structures and secure strategic building and protect populations occupying these structures.

The objective of this research is to show the effectiveness of seismic isolation for reinforced concrete structures by comparing the acceleration, displacement and base shear of a structure without isolation with those it would undergoes when it was isolated. The results obtained show that structures with seismic isolation can reduce the accelerations and displacements inter-story. The isolated structure behaves almost as a rigid body. Moreover, a numerical study to define a reduction factor of shear due to seismic isolation was performed.

Keywords: Seismic Isolation, structure, earthquake, seismic support, modeling, seismic response, energy dissipation.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	i
LISTE DES TABLEAUX	iii
NOTATIONS.....	iv
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 CONCEPTS DE L'ISOLATION SISMIQUE	3
1.1 INTRODUCTION	3
1.2 APPLICATION DES TECHNIQUES D'ISOLATION PARASISMIQUE DANS LE MONDE	3
1.3 OBJECTIFS DE L'ISOLATION SISMIQUE A LA BASE	4
1.4 PRINCIPE DE L'ISOLATION SISMIQUE A LA BASE	4
1.5 LES DIFFERENTS TYPES DES APPUIS PARASISMQUES	6
1.5.1 Appui à base d'élastomère.....	6
1.5.2 Appuis de pendule à friction.....	9
1.6 CONFIGURATION DE L'ISOLATION SISMIQUE	10
1.7 AMORTISSEURS	11
1.7.1 Amortisseur à frottement	12
1.7.2 Amortisseurs visqueux	12
1.8 LES REGLES DE CONCEPTION DES APPUIS	13
1.9 INSTALLATION DE L'ISOLATEUR SISMIQUE	14
1.9.1 Étapes d'installation des isolateurs sismique dans un bâtiment existant.....	14
1.10 CONCLUSION.....	15
CHAPITRE 2 LA THEORIE DE L'ISOLATION SISMIQUE.....	16
2.1 INTRODUCTION	16
2.2 LA THEORIE DES STRUCTURES ISOLEES	16
2.2.1 Les équations du mouvement à deux degré de liberté (2DDL).....	16
2.3 EXTENSION DE LA THEORIE AUX BATIMENTS	23
2.3.1 Les équations du mouvement à N degré de liberté	23
2.4 CARACTERISTIQUES MECANQUES DES ISOLATEURS.....	24
2.4.1 Caractéristiques mécaniques des isolateurs élastomères :.....	24
2.4.2 Modèles bilinéaires des isolateurs.....	26
2.4.3 Caractéristiques mécaniques des appuis en élastomère.....	27
2.4.4 Caractéristiques mécaniques de système de pendule à friction.....	28
2.5 CONCLUSION	29
CHAPITRE 3 CODE DE REGLEMENTATION POUR L'ISOLATION SISMIQUE.....	30
3.1 INTRODUCTION.....	30
3.2 ANALYSE STATIQUE	30
3.2.1 Facteur de la zone sismique Z	32
3.2.2 Type de profil de sol	32
3.2.3 Types de sources sismiques : A, B et C.....	33
3.2.4 Facteurs dépendant de la proximité de la faille active: N_a et N_v	33
3.2.5 Coefficient M_M de la réponse MCE	34
3.2.6 Coefficients sismiques spectraux : C_{VD} , C_{VM} et C_{AD} , C_{AM}	34
3.2.7 Coefficients d'amortissement: B_D et B_M	36
3.2.8 Périodes effectives de système de vibration: T_D et T_M	37
3.2.9 Déplacements total de conception : D_{TD} et D_{TM}	37
3.2.10 Calculs des forces sismiques	39
3.2.11 Distribution verticale de la force sismique	39

3.3 ANALYSE DYNAMIQUE	40
3.3.1 Calcul des déplacements	40
3.3.2 Calcul des forces latérales.....	41
3.3.3 Déplacements inter étages	41
3.4 PROCÉDE ETAPE PAR ETAPE POUR LA CONCEPTION CONFORME A L' UBC-97.....	42
3.4.1 Étapes préliminaires de conception.....	42
3.5 CONCLUSION.....	44
CHAPITRE 4 MODELISATION NUMERIQUE DES ISOLATEURS	45
4.1 INTRODUCTION.....	45
4.2 MODELISATION DE L'ISOLATEUR.....	45
4.2.1 Présentations des trois modèles.....	46
4.2.2 Détermination de la rigidité de rotation pour le modèle 3	47
4.2.3 Détermination de la rigidité de cisaillement	49
4.3 PRESENTATION DES RESULTATS	51
4.3.1 Suivant le code UBC.....	51
4.3.2 Les résultats du model Filiatrault.....	55
CHAPITRE 5 ETUDE DE LA REPOSE DYNAMIQUE DES STRUCTURES ISOLEE ET ENCASTREE60	
5.1 INTRODUCTION.....	60
5.2 PRESENTATION DES STRUCTURES	60
5.2.1 Bâtiment symétrique a trois niveaux.....	60
5.2.2 Bâtiment à huit niveaux	68
5.3 L' ANALYSE BILINEAIRE ET LINEAIRE.....	76
5.3.1 DESCRIPTION DES STRUCTURES.....	76
5.3.2 Comparaison des résultats	78
CONCLUSION GENERALE	83
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	85

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Fig.1.1	Effets d'une secousse sismique sur un bâtiment avec et sans isolation à la base.....	4
Fig.1.2	Effet de l'augmentation de la période et du taux d'amortissement sur (a) l'accélération, (b) le déplacement.....	5
Fig.1.3	Appuis en élastomère à amortissement faible.....	7
Fig.1.4	(a) Appui en élastomère à amortissement élevé,(b) la coupe de section de l'appui.....	7
Fig.1.5	Appui en élastomère : (a) au repos,(b) la déformé de l'isolateur.....	8
Fig. 1.6	Appui en élastomère au noyau de plomb.....	8
Fig.1.7.a	Appuis de pendule à friction.....	9
Fig.1.7.b	Appui de pendule à friction avec doubles surfaces concaves.....	10
Fig.1.8	Les différentes déformations de l'appui de pendule à friction	10
Fig. 1.9	Possibilités de dispositions des « isolateurs » dans le cas d'un vide-sanitaire ou d'un sous-sol.....	11
Fig.1.10	(a) Amortisseur à frottement, (b) différente méthode de mise en œuvre.....	12
Fig.1.11	Système de contreventement avec amortisseurs visqueux dans un bâtiment.....	13
Fig.1.12	Installation de l'isolateur dans un bâtiment.....	14
Fig.2.1	Paramètres de système d'isolation à deux degré de liberté.....	17
Fig.2.2	Relation déplacement - force de modèle bilinéaire.....	26
Fig.3.1	Déplacements du système d'isolation.....	31
Fig.3.2	Facteurs de la zone sismique d'UBC-97.....	32
Fig.3.3	Catégories de type du sol de l'UBC-97.....	32
Fig.3.4	Facteur a proximité de la faille Na.....	33
Fig.3.5	Facteur a proximité de la faille Nv	34
Fig.3.6	Coefficient M_M de la réponse MCE.....	34
Fig.3.7	Coefficient sismique C_{VD}	35
Fig.3.8	Coefficient sismique C_{AD}	35
Fig.3.9	Coefficient sismique C_{VM}	36
Fig.3.10	Coefficient sismique C_{AM}	36
Fig.3.11	Dimension en plan pour la détermination du déplacement total D_{TD} et D_{TM} ...	38
Fig.4.1	Accélérogramme de dar el Beida.....	45
Fig.4.1a	Exemple d'un pont. (a) partie d'un Pont, (b) pilier, (c) modèle équivalent.....	46
Fig. 4.1.b	Les modèles d'isolateurs.....	47
Fig.4.2.a	Déplacement du modèle 1 suivant le code d'UBC.....	51
Fig.4.2.b	Déplacement du modèle 2 suivant le code d'UBC.....	51
Fig.4.2.c	Déplacement du modèle 3 suivant le code d'UBC.....	51
Fig.4.3.a	Accélération du modèle 1 suivant le code d'UBC.....	52
Fig.4.3.b	Accélération du modèle 2 suivant le code d'UBC.....	52
Fig.4.3.c	Accélération du modèle 3 suivant le code d'UBC.....	52
		53

Fig.4.4.a	Effort de cisaillement du modèle 1 suivant le code UBC.....	53
Fig.4.4.b	Effort de cisaillement du modèle 2 suivant le code UBC.....	53
Fig.4.4.c	Effort de cisaillement du modèle 3 suivant le code UBC.....	53
Fig.4.5.a	Boucle d'hystérésis du modèle 1 suivant le code UBC.....	54
Fig.4.5.b	Boucle d'hystérésis du modèle 2 suivant le code UBC.....	54
Fig.4.5.c	Boucle d'hystérésis du modèle 3 suivant le code UBC.....	54
Fig.4.6.a	Déplacement du modèle 1 suivant la méthode de Filiatrault.....	55
Fig.4.6.b	Déplacement du modèle 2 suivant la méthode de Filiatrault.....	55
Fig.4.6.c	Déplacement du modèle 3 suivant la méthode de Filiatrault.....	55
Fig.4.7.a	Accélération du modèle 1 suivant la méthode de Filiatrault.....	56
Fig.4.7.b	Accélération du modèle 2 suivant la méthode de Filiatrault.....	56
Fig.4.7.c	Accélération du modèle 3 suivant la méthode de Filiatrault.....	56
Fig.4.8.a	Effort de cisaillement du modèle 1 suivant la méthode de Filiatrault.....	57
Fig.4.8.b	Effort de cisaillement du modèle 2 suivant la méthode de Filiatrault.....	57
Fig.4.8.c	Effort de cisaillement du modèle 3 suivant la méthode de Filiatrault.....	57
Fig.4.9.a	Boucle d'hystérésis du modèle 1 suivant la méthode de Filaitrault.....	58
Fig.4.9.b	Boucle d'hystérésis du modèle 2 suivant la méthode de Filaitrault.....	58
Fig.4.9.c	Boucle d'hystérésis du modèle 3 suivant la méthode de Filaitrault.....	58
Fig.5.1	A - Vue en plan du bâtiment, B -Vue de coupe du bâtiment.....	60
Fig.5.2	Les dimensions de l'isolateur finales.....	66
Fig.5.3 a	Déplacement du dernier niveau	67
Fig.5.3.b	Accélération du dernier niveau	68
Fig.5.3.c	Effort de cisaillement à la base.....	68
Fig.5.4	Photo de la Vue global de la structure.....	69
Fig.5.5	Vue en plan de la structure.....	69
Fig.5.6	Domages subits par la structure.....	69
Fig.5.7	Les dimensions de l'isolateur finales.....	71
Fig.5.8a	Déplacement et accélération Suivant la direction transversale de la structure conventionnelle	73
Fig.5.8b	Déplacement et accélération Suivant la direction transversale de la structure isolée.....	73
Fig.5.9	Convergence linéaire	75
Fig.5.10	Spectre de réponse des trois accélerogramme.....	76
Fig. 5.11	Vue en plan de bâtiment type 4.....	77
Fig.5.12.a	La réponse en déplacement sous l'effet de Dar El-Beida.....	80
Fig.5.12.b	La réponse en accélération sous l'effet de Dar El-Beida.....	80
Fig.5.13.a	La réponse en déplacement sous l'effet d'Azazga.....	80
Fig.5.13.b	La réponse en accélération sous l'effet d'Azazga.....	81
Fig.5.14.a	La réponse en déplacement sous l'effet de Blida.....	81
Fig.5.14.b	La réponse en accélération sous l'effet de Blida.....	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Coefficient d'amortissement B_D et B_M	36
Tableau 3.2	Le facteur de réduction R	39
Tableau 3.3	Valeurs minimales de l'analyse dynamique données en fonction des valeurs de l'analyse statique.....	41
Tableau 4.1	Dimensions de l'isolateur.....	49
Tableau 4.2	Les rigidités de l'isolateur suivant le code UBC-97.....	50
Tableau 4.3	Les rigidités de l'isolateur suivant la méthode de Filiatrault.....	50
Tableau 4.4	Déplacements, accélérations maximums et effort de cisaillement à la base.....	59
Tableau 5.1.a	Périodes de la structure avec et sans le système de l'isolation.....	66
Tableau 5.1 b	Accélération et déplacement maximums de la structure isolée et encastrée.....	67
Tableau 5.2	Paramètres de conception sismiques.....	70
Tableau 5.3	Les rigidités de l'isolateur.....	70
Tableau 5.4	Périodes de la structure avec et sans le système de l'isolation.....	71
Tableau 5.5	Accélération et déplacement maximums de la structure isolée et encastrée.....	72
Tableau 5.6	Accélération et déplacement maximums de la structure isolée et encastrée.....	72
Tableau 5.7	Déplacement inter étages de la structure isolée et encastrée.....	74
Tableau 5.8	Effort de cisaillement du poteau B5,2 des deux structures isolée et encastrée	74
Tableau 5.9	Effort de réduction R	75
Tableau 5.10	Demande en capacité.....	75
Tableau 5.11	Les rigidités de l'isolateur.....	77
Tableau 5.12	Périodes des structures avec et sans le système de l'isolation.....	78
Tableau 5.13.a	Accélération et déplacement avec un modèle linéaire équivalent et un modèle bilinéaire.....	78
Tableau 5.13.b	Accélération et déplacement avec un modèle linéaire équivalent et un modèle bilinéaire	79
Tableau 5.13.c	Accélération et déplacement avec un modèle linéaire équivalent et un modèle bilinéaire.....	79
Tableau 5.13.d	Accélération et déplacement avec un modèle linéaire équivalent et un modèle bilinéaire.....	79

NOTATIONS

	Rigidité de la structure
	Amortissement de la structure
	Rigidité du système d'isolation
	Amortissement du système d'isolation
	Déplacement absolu de la structure
	Déplacement absolu du système d'isolation
	Déplacement au sol
	Masse de la structure
	Masse du système d'isolation.
	Masse de l'ensemble structure et le système d'isolation.
	Fréquence propre du système d'isolation
	Fréquence propre de la structure
	Déplacement relatif du système d'isolation
	Déplacement relatif de la structure
	Facteur d'amortissement du système d'isolation
	Facteur d'amortissement de la structure.
	Coefficients modaux dépendant du temps.
	Premier mode propre du système d'isolation.
	Deuxième mode propre du système d'isolation
	Premier mode propre de la structure.
	Deuxième mode propre de la structure.
	Masse généralisée.
	Coefficients de couplage
	Spectre de déplacement.
	Coefficient de cisaillement
	Fréquence propre.
β	Facteur d'amortissement

	Déplacement maximum de système d'isolation
	Déplacement maximum de la structure.
	Spectre d'accélération.
	Spectre de vitesse.
	Matrice de masse globale de la structure.
	Matrice d'amortissement de la structure.
	Matrice de rigidité de la structure.
	Vecteurs des déplacements, vitesses et accélérations des degrés de liberté à la base.
	Matrice de masse globale de la structure et le système d'isolation.
	Matrice d'amortissement de la structure et le système d'isolation.
	Matrice de rigidité de la structure et le système d'isolation.
	Rigidité horizontale de l'élastomère.
<i>G</i>	Module de cisaillement de l'élastomère
<i>A</i>	Surface de l'isolateur
	Épaisseur totale des couches d'élastomère.
<i>D</i>	Déplacement horizontal
	Rigidité verticale.
	Module de compression
<i>S</i>	Facteur de forme
	Épaisseur d'une seule couche d'élastomère
Φ	Diamètre de l'isolateur
	Rigidité élastique
	Rigidité post élastique
<i>F_y</i>	Charge de plastification.
	Rigidité effective de l'isolateur.
	Déplacement de rupture.
	L'énergie absorbée par cycle.
	Amortissement effectif.
	Période effective.
	Rayon de courbure.

	Coefficient de frottement.
	Coefficient de zone sismique.
	Coefficient dépendant de la proximité de la faille active.
S_I	Coefficient caractérisant le type de sol.
T_I	Période effective en secondes.
	Déplacement total.
	Déplacement total maximum.
g	Accélération de la pesanteur.
C_{VD}, C_{VM}	Coefficients sismiques.
	Période en seconde de la structure isolée correspondant au déplacement minimum.
	Période en seconde de la structure isolée correspondant au déplacement maximum.
	Rigidité minimale du système d'isolation correspondant au déplacement minimum.
	Rigidité minimale du système d'isolation correspondant au déplacement maximum.
	Poids total de la structure.
	Distance entre le centre de rigidité du système d'isolation.
	Excentricité.
	Force sismique.
	Force de cisaillement minimal.
	Facteur de réduction de force de conception.
w_x	Poids du niveau x.
h_x	Hauteur du niveau x.
w_i	Poids du niveau i.
h_i	Hauteur du niveau i.
	Déplacement minimum total.
	Déplacement maximum total.
	Hauteur totale des couches en élastomère et des plaques en acier.
	Rigidité de rotation.
	Rigidité de rotation à la contrainte de cisaillement nulle.
	Facteur de forme.
	Rigidité de flexion.

Module de recourbement.

Moment d'inertie de l'isolateur.

Module élastique de l'élastomère.

G Module de cisaillement de l'élastomère.

Epaisseur unitaire de la couche en élastomère

Epaisseur d'une seule couche élastomère et B est la largeur de l'appui

INTRODUCTION GENERALE

Les séismes, comme les autres catastrophes naturelles, peuvent avoir des conséquences graves et dévastatrices sur les bâtiments et la population. C'est pour cela qu'il est nécessaire d'étudier la manière dont se comportent les bâtiments pour établir des ouvrages résistants aux séismes et ainsi protéger la population de cet évènement incontrôlable. En effet, évaluer le risque des phénomènes sismiques est très difficile du aux faits de leur prévisions incertaines et de leur apparition aléatoire. Nous ne connaissons ni le moment ni le lieu où cela se produira et ne pouvons les déterminer avec précision. Pour cela les ingénieurs ont établis, au fur et à mesure des années, une conception appelée génie parasismique, l'art de construire des bâtiments résistants capables de se déformer et parfois même d'être endommagés sans s'effondrer.

L'évolution actuelle du génie parasismique à permis le développement et le perfectionnement des méthodes d'analyses et de calcul des structures soumises à des sollicitations sismiques en vue d'atténuer les effets dévastateurs des grands mouvements du sol.

Le mouvement du sol est transmis 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).

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

Cette technique est applicable non seulement à tous les types de bâtiments mais aussi aux ponts, aux structures industrielles tel que les bacs de stockage de produits pétroliers et autres produits dangereux. Elle convient aussi à l'amélioration des capacités de résistance des structures existantes.

L'objectif de ce travail est la modélisation des isolateurs sismiques et l'étude de plusieurs structures avec et sans appuis parasismique, afin de montrer l'efficacité de l'isolation sismique et mettre en valeur le rôle de ces derniers dans la réduction de la réponse sismique de ces structures.

Ce manuscrit est organisé en cinq chapitres dont le premier est consacré à la présentation de concept de l'isolation sismique à la base et les différents types d'appuis parasismiques. Dans le second chapitre, on passe à la présentation de la théorie et les caractéristiques des isolateurs, et dans le troisième chapitre, on présente les étapes de dimensionnement des isolateurs sismiques à la base. Le quatrième et le cinquième réalisent l'objet de nombreuses applications dans le but de modéliser les isolateurs sismiques et des études sur des structures ont été effectuées afin d'examiner leurs comportements lorsqu'elles sont dotées d'isolateurs. Finalement une conclusion générale clôture le manuscrit.

CHAPITRE 1 CONCEPTS DE L'ISOLATION SISMIQUE

1.1 Introduction

L'analyse dynamique des structures soumises aux actions sismiques, constitue un domaine de recherche très actif et revêt un intérêt particulier dans les pays de forte sismicité comme le cas de l'Algérie. La méthode de conception parasismique, consiste à assurer à la structure et à sa fondation une résistance suffisante pour reprendre les charges sismiques de façon sécuritaire et économique. Pour y arriver, les structures sont conçues de façon à dissiper l'énergie induite par le séisme. Une nouvelle technologie parasismique introduite dans les années 70 à 80, consiste en l'isolation sismique à la base. Actuellement quelques milliers de bâtiments et de ponts à travers le monde sont munis de systèmes d'isolation sismique. [13]

Dans ce chapitre nous allons présenter : l'objectif et le principe de l'isolation sismique à la base ainsi que les différents types d'appuis parasismiques.

1.2 Application des techniques d'isolation parasismique dans le monde

Il est estimé qu'à ce jour, 7500 constructions dans le monde ont bénéficié du contrôle passif des vibrations sismiques dont 6000 sur isolateurs parasismiques.

Au Japon, le nombre de bâtiments bénéficiant de ce système a connu un accroissement soudain qui ne s'est jamais ralenti depuis, suite au séisme catastrophique qui a frappé Kobe en Janvier 1995.

Aujourd'hui, l'utilisation de cette technique est en progression rapide dans le monde : En Chine, aux U.S.A, en Italie, en Arménie, en Nouvelle Zélande, en Turquie, en Grèce, en Russie, au Portugal, en Corée du Sud, au Chili, en Algérie et dans d'autres pays exposés au risque sismiques.

Le CTC-Chlef a introduit la technique du contrôle passif des vibrations sismiques des structures en Algérie à travers la construction du siège de son agence à AIN DEFLA située dans une zone sismiquement très active. Cette technique d'isolation à la base servira à améliorer les performances sismiques des bâtiments.

1.3 Objectifs de l'isolation sismique à la base

L'isolation sismique à la base consiste à découpler le mouvement de la structure de celui du sol dans le but de réduire la transmission des efforts dynamiques. Les forces sismiques exercées sur la structure isolée sont typiquement de l'ordre de 3 à 10 fois plus petites que la demande en force sur la structure classique [12]. L'isolateur capte les déformations (inélastiques) et filtre les accélérations (hautes fréquences) de sorte que la superstructure isolée (au dessus) se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et presque pas de déformations [18], cet effet est illustré sur la figure 1.1. Par conséquent, les forces d'inertie transmises aux éléments de fondations sont limitées. Ce comportement se traduit par la limitation des dommages subis par la superstructure et les éléments de fondation et par la préservation de la fonctionnalité de la structure après le séisme [22].

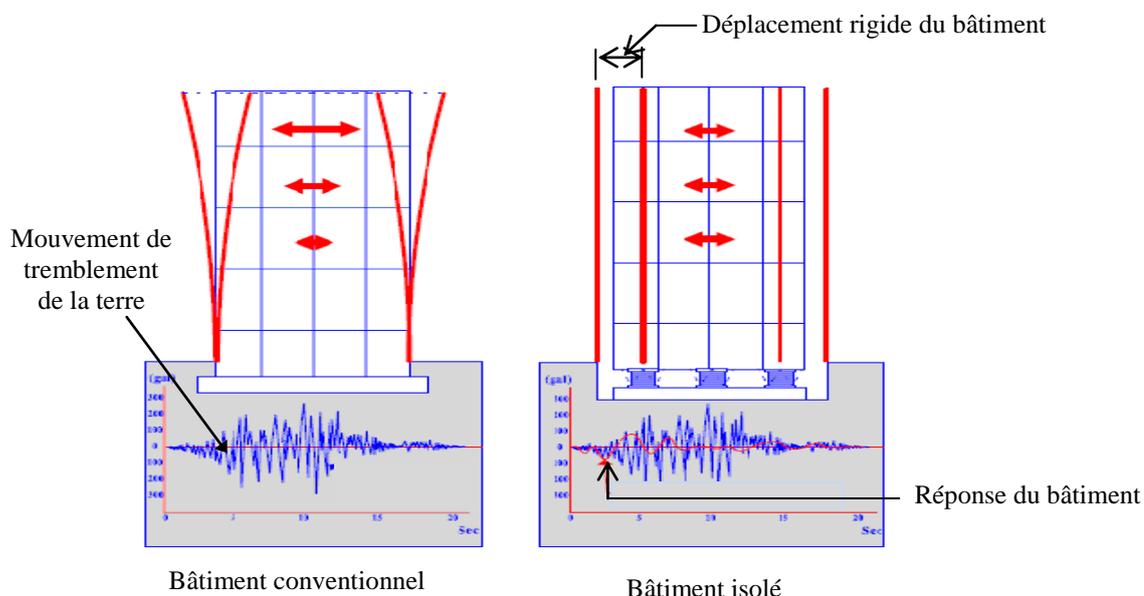


Fig.2.1 : Effets d'une secousse sismique sur un bâtiment avec et sans isolation à la base

1.4 Principe de l'isolation sismique à la base

L'isolation à la base repose sur le fait que si la période de vibration est augmentée suffisamment pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du tremblement de terre, les accélérations transmises à la structure (et par conséquent les forces d'inertie) sont considérablement réduites. En revanche, l'augmentation de la période engendre des déplacements plus importants concentrés au niveau de l'isolateur. Dès lors l'incorporation

d'un dispositif de dissipation d'énergie (amortisseur) à l'isolateur est requise afin de contrôler les déplacements et réaliser un compromis satisfaisant entre la réduction de la force et l'accroissement du déplacement [13], [17]. La figure 1.2 présente, de façon idéalisée, l'effet de l'accroissement de la période et de l'amortissement sur les accélérations et déplacements sismiques.

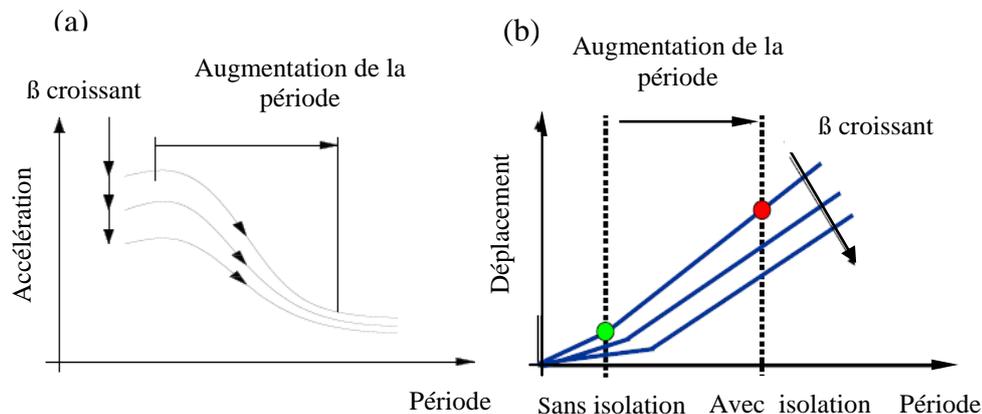


Fig.1.2 : Effet de l'augmentation de la période et du taux d'amortissement sur (a) l'accélération, (b) le déplacement [2], [4].

Les isolateurs à la base présentent généralement les caractéristiques suivantes [21] :

- Mouvement de basse fréquence avec amortissement élevé.
- Mécanisme sans entretien de déplacement latéral du bâtiment, réduisant l'énergie (c-à-d., la charge) transférée du sol vers la structure du bâtiment et permettant de retrouver la position d'origine après le séisme.
- Suffisamment flexible pour se déplacer latéralement et suffisamment rigide pour atténuer les charges au centre de gravité et rester immobile malgré des surcharges de vent... etc.
- Pièces de fixation rigides entre la structure du bâtiment et la fondation.

Les systèmes d'isolation sismique sont largement utilisés dans le monde dont l'application a été plus au moins répandue et une revue exhaustive de ces systèmes dépasse le cadre de ce travail. Néanmoins, on peut grossièrement classer les systèmes d'isolation sismiques en deux catégories, à savoir : les appuis à base d'élastomères et les appuis de glissement[17].

1.5 Les différents types des appuis parasismiques

La réussite de l'isolation sismique d'une structure particulière dépend fortement du choix approprié des dispositifs d'isolateurs, La plupart des systèmes utilisés aujourd'hui incorporent les appuis élastomères, l'élastomère étant le caoutchouc normal ou le néoprène, ou les appuis de glissement. Les systèmes qui combinent les appuis élastomères et les appuis de glissement ont également été proposés et mis en application [4].

1.5.1 Appui à base d'élastomère

Les appuis à base d'élastomère se composent de couches alternées d'élastomère et d'acier liés les unes aux autres. L'élastomère est un matériau macromoléculaire qui reprend approximativement sa forme et ses dimensions initiales après avoir subi une importante déformation sous l'effet d'une variation de contrainte [17].

Le matériau de base est obtenu en faisant subir une série de transformations au matériau brut malaxé avec différentes charges, après traitement, le produit se présente sous forme de feuilles de quelques millimètres d'épaisseur. Celle-ci sont empilées avec des frettes en acier, préalablement nettoyées et traitées, dans des moules dont les dimensions correspondent à celles du produit que l'on veut obtenir. L'ensemble est alors comprimé et vulcanisé par chauffage [16].

On retrouve : Appui en élastomère à faible amortissement, Appui en élastomère à amortissement élevé, Appui en élastomère au noyau de plomb.

1.5.1.1 Appui en élastomère à faible amortissement

Les appuis en élastomère à amortissement faible (figure 1.3) sont employés avec les dispositifs d'amortissement supplémentaires, tels que les amortisseurs visqueux, les barres en acier, dispositifs de friction, et ainsi de suite [4]. L'élastomère utilisé dans ces appuis peut être l'élastomère normal ou le néoprène. L'amortissement critique pour ce type d'appui varie seulement de 2% à 3% [6].

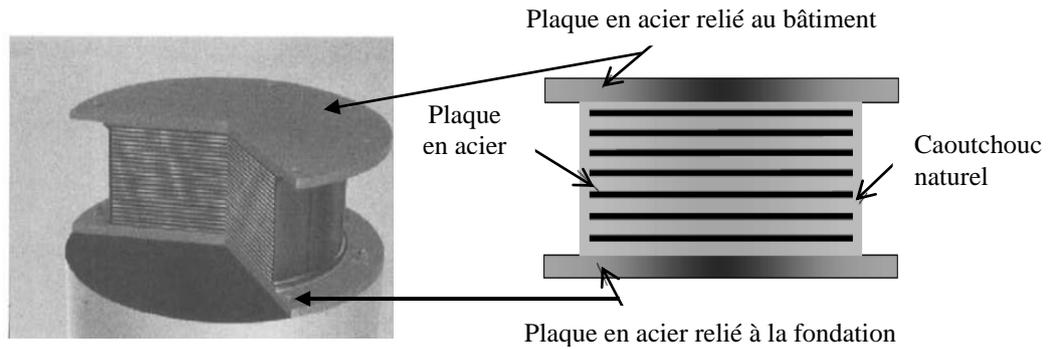


Fig.1.3 : Appuis en élastomère à amortissement faible [10]

1.5.1.2 Appui en élastomère à amortissement élevé

L'appui en caoutchouc à amortissement élevé se compose de plaques en élastomère et en acier, mais il possède la flexibilité nécessaire aussi bien que les possibilités de dissipation d'énergie [11],[16]. La figure 1.4 montre un exemple d'appui en caoutchouc à amortissement élevé.

Un modèle bilinéaire peut être adopté pour illustrer l'effet de la force latérale appliquée sur l'appui et le déplacement correspondant. La constante d'amortissement s'étend généralement entre 8% et 20% [4].

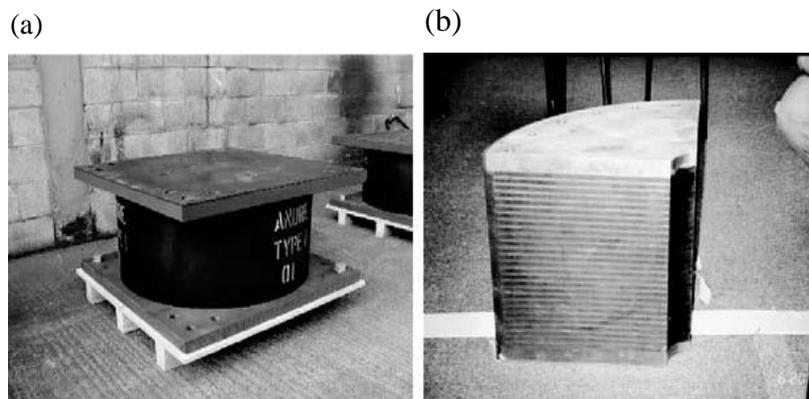


Fig.1.4 : (a) Appui en élastomère à amortissement élevé, (b) la coupe de section de l'appui [11]

La figure 1.5 présente la forme de l'appui en élastomère au repos et sa déformé lors d'un séisme.

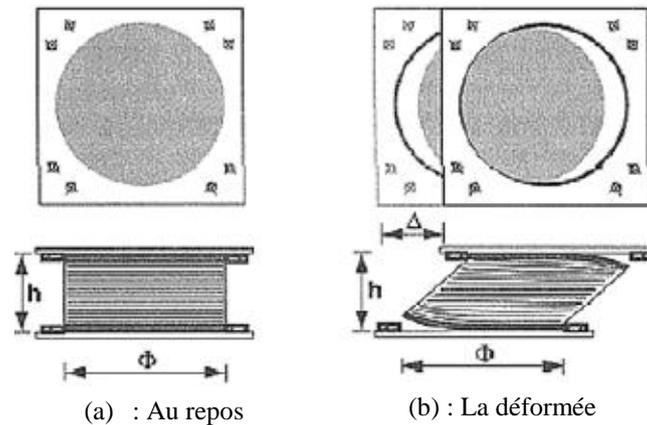


Fig.1.5 : Appui en élastomère : (a) au repos, (b) la déformé de l'isolateur

1.5.1.3 Appui en élastomère au noyau de plomb

Les appuis en élastomère avec un noyau de plomb se composent aussi de couches alternées d'élastomère et d'aciers liés les unes aux autres autour d'un noyau de plomb, inséré au centre, comme le montre la figure 1.6 [5].

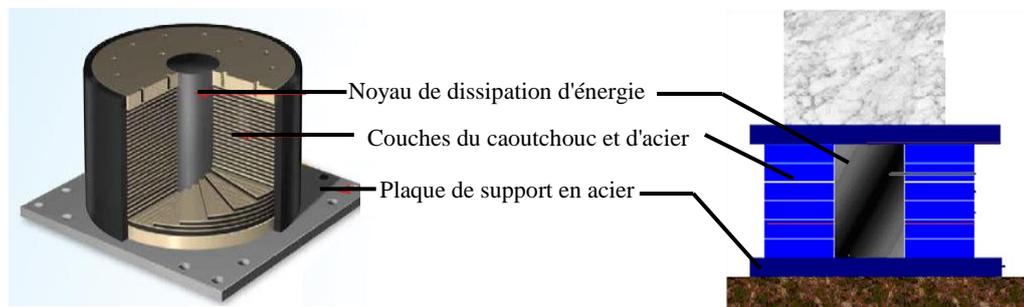


Fig.1.6 : Appui en élastomère au noyau de plomb

La réalisation de l'appui en élastomère au noyau de plomb dépend de la force latérale imposée. Si la force latérale est petite, le mouvement des plaques en acier est retenu par le noyau de plomb, et l'appui montre une rigidité latérale plus élevée. Si la force latérale devient plus grande, les plaques en acier forcent le noyau de plomb à se déformer, et l'hystérésis d'amortissement est développée avec de l'énergie absorbée par le noyau de plomb. En conséquence, la rigidité latérale de l'appui est réduite [11], [24]. L'amortissement équivalent de l'appui en élastomère au noyau de plomb change de 15% à 35%. Un modèle bilinéaire est

habituellement employé pour représenter les propriétés mécaniques de l'appui en élastomère au noyau de plomb [6].

Le principe de ce type d'appuis est le suivant [21]:

- Les couches en caoutchouc assurent un déplacement latéral, absorbent l'énergie induite lors du séisme, réduisent le transfert de charges du sol vers la structure du bâtiment et permettent de retrouver la position d'origine après le séisme.
- Les couches en acier assurent une capacité portante verticale du sol et un confinement du noyau en plomb.
- Le noyau en plomb limite les déplacements latéraux de la structure sous des surcharges de vent, absorbe une partie de l'énergie sismique et contrôle le déplacement latéral de la structure.

1.5.2 Appuis de pendule à friction

L'interface de glissement permet de dissiper l'énergie sismique par frottement. A titre d'exemple, le système de pendule à friction est un système qui utilise une interface de glissement sous forme de cuvette, portion d'une sphère, qui confère à la structure un mouvement global similaire à un pendule [14]. Le rayon de courbure et le coefficient de frottement de l'interface sont les caractéristiques clé qui contrôlent la période d'isolation et la quantité d'énergie dissipée par le système [24]. La figure 1.7.a montre l'appui de pendule à friction avec une surface de glissement sphérique ou concave.

Un appui de pendule à friction avec doubles surfaces concaves à récemment été développé. La figure 1.7.b décrit schématiquement ce type d'appui. Comparé à l'appui de pendule à frottement avec une surface concave simple, l'utilisation de doubles surfaces concaves peut réaliser le même mouvement horizontal avec réduction de la taille de l'appui [11].

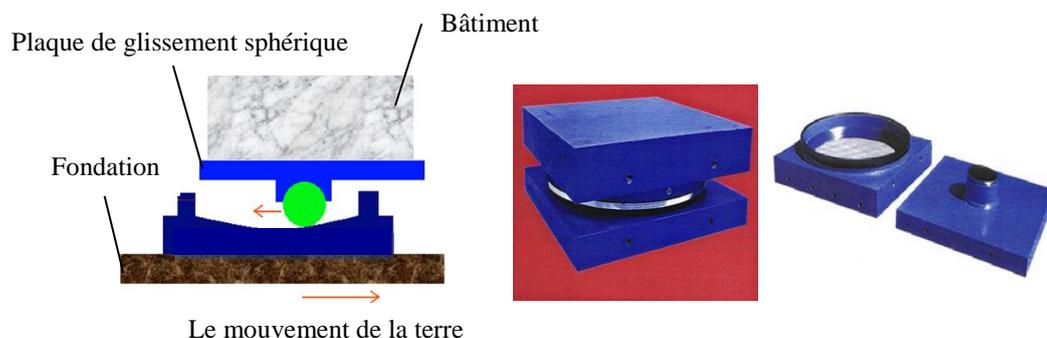


Fig.1.7.a : Appui de pendule à friction

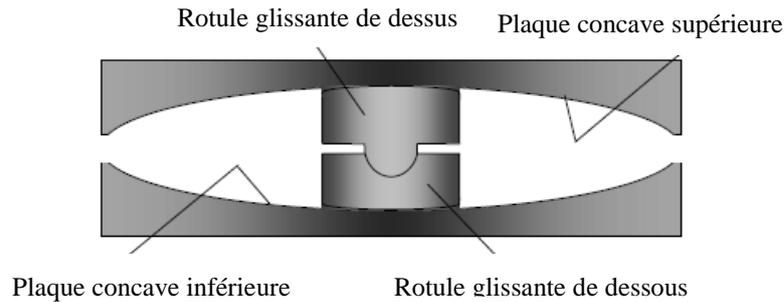


Fig.1.7.b : Appui de pendule à friction avec doubles surfaces concaves [11]

La figure 1.8 présente les différentes formes de déformé de l'appui de pendule à friction pendant le séisme.

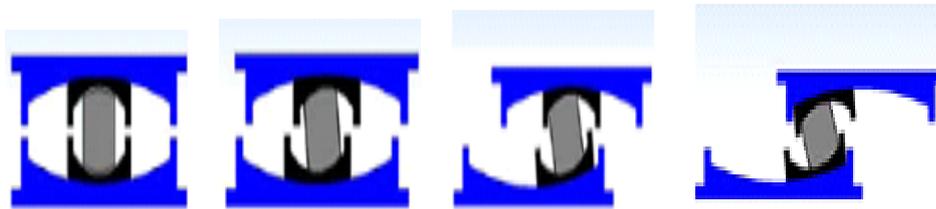


Fig.1.8 : les différentes déformations de l'appui de pendule à friction

Le choix du type d'appareil d'appui dépend de nombreux facteurs : descente de charge, rotation maximale, déplacements horizontaux, durabilité, coût, le type d'ouvrage, son environnement et ses dispositions constructives. C'est pourquoi il est délicat de pouvoir préciser le domaine d'emploi respectif d'une technique par rapport à une autre [6].

En zone sismique, même pour de fortes descentes de charges, il est préférable de prévoir des appareils d'appui en élastomère. En effet, compte tenu de la souplesse qu'apportent ces appuis, le comportement global de l'ouvrage sous séisme d'amplitude modéré est meilleur. Sous fort séisme, les appareils d'appui en élastomère se déchireront, et leur remplacement sera moins coûteux que s'il s'agit des systèmes de pendule à friction [22].

1.6 Configuration de l'isolation sismique

L'isolation sismique consiste à séparer la structure de sa fondation et à la faire reposer sur cette dernière par l'intermédiaire des isolateurs en élastomères naturels ou synthétiques, avec ou sans dispositifs complémentaires d'amortissement [20].

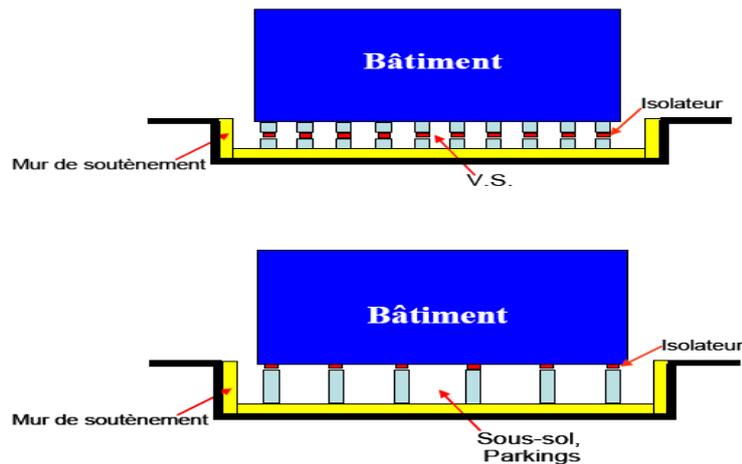


Fig.1.9 : Possibilités de dispositions des « isolateurs » dans le cas d'un vide-sanitaire ou d'un sous-sol

Les mouvements résultant des appuis, et qui sont généralement de l'ordre de plusieurs centimètres, suivant l'importance du séisme, ne doivent être contrariés par aucun obstacle. Les appuis ne peuvent donc pas être enserrés par un remblai ou par un trottoir.

Un espace libre doit régner autour de la fondation supérieure (premier plancher du bâtiment). L'écart laissé au bâtiment doit être calculé, ce qui peut être gênant en ce qui concerne les réceptions et les accès.

Les connexions (eau, gaz, électricité, etc.) entre le bâtiment et son environnement doivent être conçues en fonction des mouvements cités plus haut. Il ne faut pas perdre de vue aussi la nécessité de permettre le remplacement éventuel des appuis en prévoyant « des vérins » [22].

1.7 Amortisseurs

Les différents isolateurs peuvent être accompagnés par des dispositifs d'amortissements, ils ont le même principe de base lorsqu'ils sont incorporés dans la structure : ils peuvent absorber une portion d'énergie. En plus, ils peuvent réduire substantiellement le mouvement différentiel entre les éléments de la structure et par conséquent réduire les dégâts que peut subir la structure [2]. Ces dernières années, l'amélioration du concept des systèmes de dissipation d'énergie, et plusieurs appareils ont été installés dans des structures partout dans le monde. En général, ils sont caractérisés par leur capacité de dissiper l'énergie de vibration de la structure ou de la convertir en un autre mode de vibration ou en une autre forme d'énergie [21].

Il existe essentiellement deux types de dispositifs d'amortisseurs. Ils sont désignés sous les noms d'amortisseurs à frottement, et d'amortisseurs visqueux. Ils ont pour rôle commun de dissiper l'énergie induite lors d'un séisme en une énergie thermique [2].

1.7.1 Amortisseur à frottement

Le principe de ces amortisseurs repose sur le phénomène de dissipation de l'énergie par frottement. Pour protéger la structure des ruptures, il est évident que l'action calculée et le nombre d'amortisseurs à frottement à mettre en place, sont liés au système structurel et au mouvement sismique [11], [21]. La figure 1.10 présente un exemple d'amortisseur à frottement et les différentes méthodes de leur mise en œuvre.

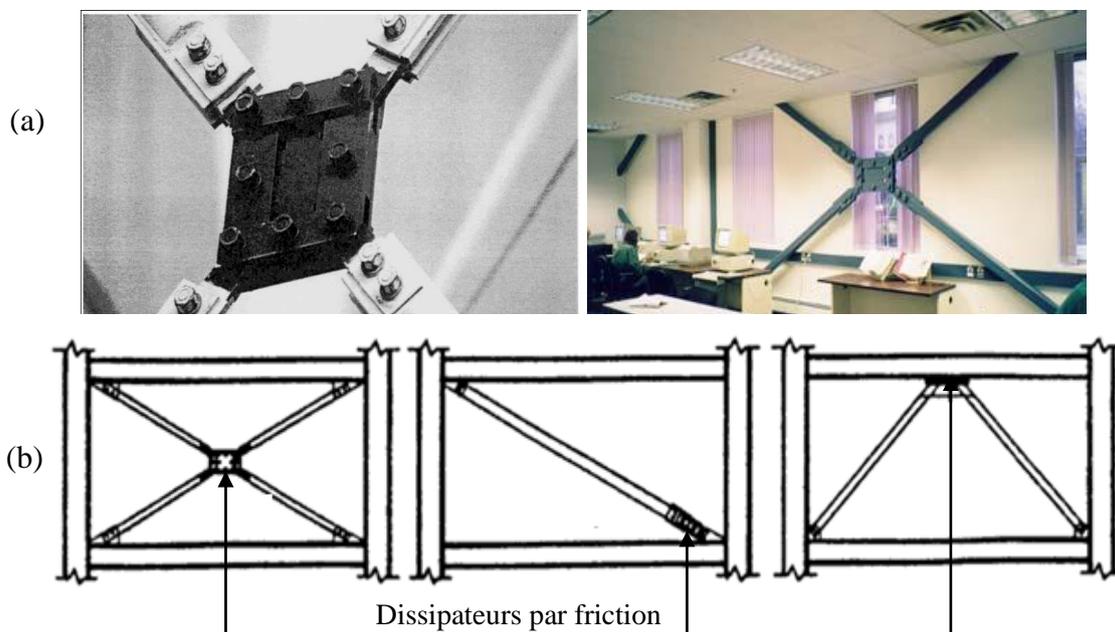


Fig.1.10 : (a) *Amortisseur à frottement*
(b) *différente méthode de mise en œuvre* [21]

1.7.2 Amortisseurs visqueux

Les amortisseurs visqueux sont des tiges qui se déplacent selon un mouvement de va-et-vient dans un cylindre de liquide visqueux et qui libèrent l'énergie induite lors d'un séisme au moyen d'un frottement entre la tige, le cylindre et le liquide [2]. La figure 1.11 présente un schéma d'un système de contreventement par amortisseur visqueux dans un bâtiment.



Fig.1.11 : Système de contreventement avec amortisseurs visqueux dans un bâtiment [21]

1.8 Les règles de conception des appuis

L'utilisation des appuis impose une conception spécifique [22] :

- Réaliser une fondation inférieure dans un même plan horizontal comportant des plots en béton armé (appuis) dont on assure l'encastrement au niveau des fondations.
- Réaliser une fondation supérieure constituant la base commune du bâtiment disposée dans un plan horizontal rigoureusement parallèle à celui de la fondation inférieure et encastrement dans le bâtiment.
- Prévoir une hauteur libre pour permettre le vérinage et la visite des appareils d'appuis. Pour l'accès du personnel d'inspection et d'entretien il faut prévoir :
 - 45 cm pour l'accès à « plat-ventre »
 - 1,50 à 2,00 m pour un accès normal dans le cas d'un vide-sanitaire
- Au niveau des têtes d'appuis, prendre toutes les dispositions pour permettre la pose, l'accès, le réglage, voire le changement des appareils d'appui (emplacements de vérinage) aussi bien pendant l'exécution que pendant la durée de vie de l'ouvrage.
- Les appuis doivent travailler de la même façon, ce qui implique un contrôle strict de leur horizontalité et de l'uniformité de la répartition des compressions sous charges statiques. Ce dernier point nécessite une très bonne connaissance de la descente des charges et montre que l'utilisation du système est à priori délicat, notamment si le sol d'assise a des caractéristiques médiocres, en raison des tassements différentiels susceptibles de se manifester. Des recalages d'appuis au moyen de vérins peuvent être envisagés pour uniformiser les compressions.

- Les liaisons du bâtiment avec l'extérieur (accès, raccordements avec les réseaux extérieurs) doivent être conçues pour répondre sans dommages aux déplacements relatifs entre le bâtiment sur appuis et son environnement solidaire du sol.

1.9 Installation de l'isolateur sismique

Les isolateurs sont installés entre la fondation et la structure, figure 1.12. La connexion doit assurer que les forces maximum sont sans risque transférées à partir de la fondation par l'isolateur à la structure au-dessus [5].

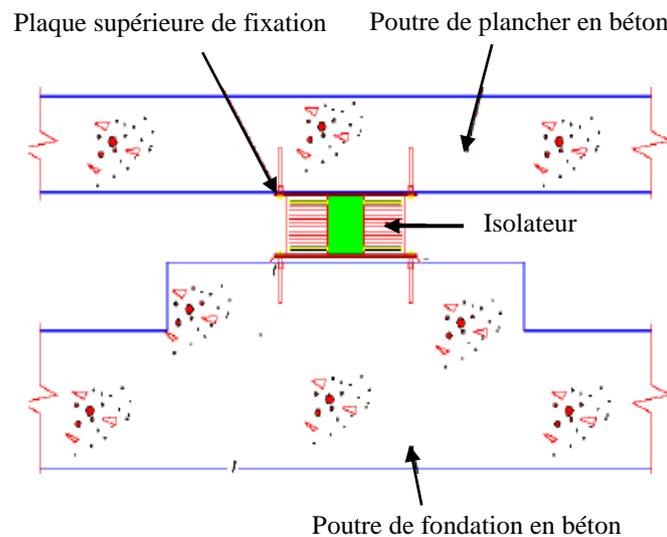


Fig.1.12 : Installation de l'isolateur dans un bâtiment [22]

1.9.1 Étapes d'installation des isolateurs sismique dans un bâtiment existant

- Placer les vérins hydrauliques
- Appliquer la pression
- Bloquer les vérins
- Placer la machine pour couper le morceau du poteau désigné pour placer l'isolateur
- Enlever le morceau de colonne
- Mettre en place l'isolateur

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une revue bibliographique qui à pour objectif, l'historique de l'isolation sismique à la base, les principes et fondements théoriques de cette discipline ainsi qu'une brève description des principaux systèmes d'isolation utilisés.

La sélection des types d'isolateurs à la base appropriés pour des bâtiments nécessite une évaluation des caractéristiques du bâtiment, des normes de performance sismique et des coûts de construction. Cependant l'appui en élastomère à amortissement élevé fournit un système simple et économique, de sorte qu'il n'a pas besoin des dispositifs d'amortissements.

CHAPITRE 2 LA THEORIE DE L'ISOLATION SISMIQUE

2.1 Introduction

De nombreuses recherches et études ont été concentrées sur le développement de la théorie sur les systèmes d'isolation et vérifications expérimentales de leur stabilité et durabilité. Depuis ces recherches, plus de 200 applications des systèmes d'isolation à la base aux bâtiments et ponts aux Etats-Unis ont été accomplis, qui démontrent que cette nouvelle technologie peut assurer la protection sismique pour les structures avec succès [11].

Un aperçu de la théorie sera présenté dans ce chapitre.

2.2 LA THEORIE DES STRUCTURES ISOLEES

2.2.1 Les équations du mouvement à deux degré de liberté (2DDL)

La théorie est basée sur un modèle structurel à deux masses, suivant les indications de la figure 2.1, m représente la masse du bâtiment et m_b représente la masse du système d'isolation à la base. La rigidité et l'amortissement de la structure sont représentés k_s , c_s et par k_b , c_b pour le système d'isolation, le déplacement absolu des deux masses sont définies par u_s et u_b . Mais il est pratique d'utiliser le déplacement relatif qui est défini par [6] :

$$v_b = u_b - u_g \quad v_s = u_s - u_g \quad (2.1)$$

Où u_g est le déplacement au sol. Ce choix des déplacements relatifs est particulièrement adéquat pour cette analyse parce que les deux résultats important sont le déplacement de système d'isolation v_b et le déplacement entre étage v_s [18].

En termes de ces quantités, les équations du mouvement d'un modèle à deux-degré- de liberté sont :

$$(m + m_b) \ddot{v}_b + m \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b) \ddot{u}_g \quad (2.2)$$

$$m \ddot{v}_b + m \ddot{v}_s + c_s \dot{v}_s + k_s v_b = -m \ddot{u}_g \quad (2.3)$$

Qui peuvent être écrites sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2.4)$$

Avec $M = m + m_b$

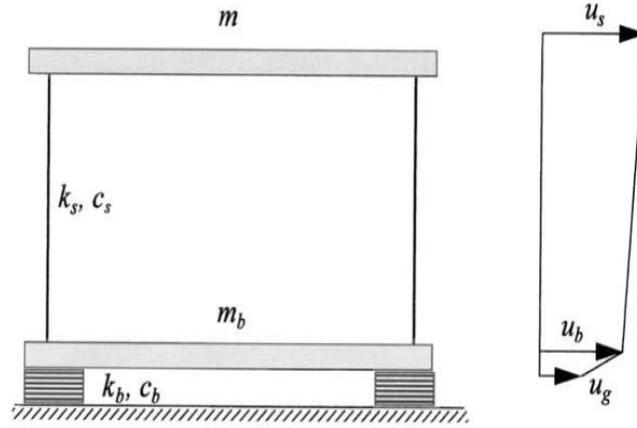


Fig.2.1 : Paramètres de système d'isolation à deux degré de liberté [17]

$$\ddot{v} + C\dot{v} + K v = -M r \ddot{u}_g \quad (2.5)$$

On définit un rapport de masse γ représenté dans l'équation (2.6)

$$\gamma = \frac{m}{m + m_b} = \frac{m}{M} \quad (2.6)$$

Et les fréquences ω_b et ω_s données par :

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m + m_b} \quad \omega_s^2 = \frac{k_s}{m} \quad (2.7)$$

Et on suppose que $\omega_b^2/\omega_s^2 = \epsilon$ et $\epsilon = 0(10^{-2})$.

Les facteurs d'amortissements β_b et β_s sont donnés par

$$2 \omega_b \beta_b = \frac{c_b}{m + m_b} \quad 2 \omega_s \beta_s = \frac{c_s}{m} \quad (2.8)$$

En termes de ces quantités. Les équations du mouvement de base (2.2) et (2.3) deviennent :

$$\gamma \ddot{v}_s + \ddot{v}_b + 2 \omega_b \beta_b \dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{v}_g \quad (2.9a)$$

$$\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + 2 \omega_s \beta_s \dot{v}_s + \omega_s^2 v_s = -\ddot{v}_g \quad (2.9b)$$

Les modes du système combiné seront désigné par ϕ^1 et ϕ^2 , avec

$$\phi^{1T} = (\phi_b^i, \phi_s^i) \quad i = 1,2 \quad (2.10)$$

L'équation caractéristique pour les fréquences est

$$(1 - \gamma) \omega^4 - (\omega_s^2 + \omega_b^2) \omega^2 + \omega_b^2 \omega_s^2 = 0 \quad (2.11)$$

La solution de l'équation (2.11) est :

$$\omega_1^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ \omega_b^2 + \omega_s^2 - [(\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2]^{1/2} \right\} \quad (2.12)$$

$$\omega_2^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ \omega_b^2 + \omega_s^2 + [(\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2]^{1/2} \right\} \quad (2.13)$$

Et au premier ordre dans ξ sont donnés par

$$\omega_1^2 = \omega_b^2 (1 - \gamma\epsilon) \quad \omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma)} (1 + \gamma\epsilon) \quad (2.14)$$

Et les formes des modes avec $(\phi_{b=1}^i)$, $i=1,2$ sont :

$$\phi^{1T} = (1, \epsilon) \quad \phi^{2T} = \left\{ 1, -\frac{1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma)\epsilon] \right\} \quad (2.15)$$

Pour exprimer les déplacements originaux en coordonnées modales, nous écrivons

$$v_b = q_1 \phi_b^1 + q_2 \phi_b^2 \quad v_s = q_1 \phi_s^1 + q_2 \phi_s^2 \quad (2.16)$$

Ou q_1, q_2 sont des coefficients modaux dépendant du temps.

Notons que les quantités modales M_i, L_i sont données par :

$$M_i = \phi^{iT} M \phi^i \quad M_i L_i = \phi^{iT} M r \quad (2.17)$$

Au premier ordre dans ϵ , ceux sont :

$$M_1 = M(1 + 2\gamma\epsilon) \quad M_2 = M \frac{(1 - \gamma)[1 - 2(1 - \gamma)\epsilon]}{\gamma} \quad (2.18a)$$

Et

$$L_1 = 1 - \gamma\epsilon \quad L_2 = \gamma\epsilon \quad (2.18b)$$

Quand (v_b, v_s) dans les équations (2.2) et (2.3) sont exprimés en termes de ϕ^1 et ϕ^2 , nous avons deux équations dans les coefficients modaux (q_1, q_2) de la forme suivante :

$$\ddot{q}_1 + 2 \omega_1 \beta_1 \dot{q}_1 + \lambda_1 \dot{q}_2 + \omega_1^2 q_1 = -L_1 \ddot{u}_g \quad (2.19a)$$

$$\ddot{q}_2 + \lambda_2 \dot{q}_1 + 2 \omega_2 \beta_2 \dot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 = -L_2 \ddot{u}_g \quad (2.19b)$$

Les termes $2 \omega_1 \beta_1$ et $2 \omega_2 \beta_2$ sont calculées à partir de :

$$M_i 2 \omega_i \beta_i = \phi^{iT} \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \phi^i \quad (2.20)$$

À partir de laquelle nous obtenons

$$2 \omega_1 \beta_1 = 2 \omega_b \beta_b (1 - 2\gamma\epsilon) \quad (2.21)$$

$$2 \omega_2 \beta_2 = \frac{1}{1 - \gamma} (2 \omega_s \beta_s + 2 \gamma \omega_b \beta_b) \quad (2.22)$$

$$\beta_1 = \beta_b \left(1 - \frac{3}{2} \gamma\epsilon\right) \quad (2.23)$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_s + \gamma \beta_2 \epsilon^{1/2}}{(1 - \gamma)^{1/2}} \left(1 - \frac{\gamma \epsilon}{2}\right) \quad (2.24)$$

Les coefficients de couplage λ_1 et λ_2 sont calculés à partir de :

$$\lambda_1 M_1 = \phi^{1T} \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \phi^2 \quad (2.25)$$

$$\lambda_2 M_2 = \phi^{2T} \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \phi^1 = \lambda_1 M_1 \quad (2.26)$$

Ainsi

$$\lambda_1 M_1 = (1, \epsilon) \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -a \end{pmatrix} = c_b - \epsilon a c_s \quad a = \frac{1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma)\epsilon] \quad (2.27)$$

Utilisation (M_1, M_2) de l'équation. (2.18a), nous avons

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{2 \omega_b \beta_b M - \epsilon \left\{ \left(\frac{1}{\gamma} \right) [1 - (1 - \gamma)\epsilon] \right\} 2 \omega_s \beta_s m}{M(1 + 2\gamma\epsilon)} \\ &= 2 \omega_b \beta_b (1 - 2\gamma\epsilon) - \epsilon 2 \omega_s \beta_s (1 - 2\gamma\epsilon) \\ &= 2 \omega_b [\beta_b (1 - 2\gamma\epsilon) - \epsilon^{1/2} \beta_s] \end{aligned} \quad (2.28)$$

Et

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \frac{2 \omega_b \beta_b M - \epsilon \left\{ \left(\frac{1}{\gamma} \right) [1 - (1 - \gamma)\epsilon] \right\} 2 \omega_s \beta_s m}{[M(1 - \gamma)/\gamma][1 - 2(1 - \gamma)\epsilon]} \\ &= (2 \omega_b \beta_b - \epsilon 2 \omega_s \beta_s) [1 + 2(1 - \gamma)\epsilon] \frac{\gamma}{1 - \gamma} \\ &= 2 \omega_b \left\{ \beta_b [1 + 2(1 - \gamma)\epsilon] - \epsilon^{1/2} \beta_s \right\} \frac{\gamma}{1 - \gamma} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Dans la plupart des applications structurelles on suppose que le facteur d'amortissement est assez petit, (ici λ_1 et λ_2) sont négligeable et que la solution requise peut être obtenue à partir des équations du mouvement modales découplées à savoir [6] :

$$\ddot{q}_1 + 2\omega_1 \beta_1 \dot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 = -L_1 \ddot{u}_g \quad (2.30a)$$

$$\ddot{q}_2 + 2\omega_2 \beta_2 \dot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 = -L_2 \ddot{u}_g \quad (2.30b)$$

Si le mouvement du sol, $\ddot{u}_g(t)$ est connu, alors les composantes modales $q_1(t)$, $q_2(t)$ peuvent être calculées à partir de :

$$q_1 = \frac{L_1}{\omega_1} \int_0^t \ddot{u}_g(t - \tau) e^{-\omega_1 \beta_1 \tau} \sin \omega_1 \tau d\tau \quad (2.31a)$$

$$q_2 = -\frac{L_2}{\omega_2} \int_0^t \ddot{u}_g(t-\tau) e^{-\omega_2 \beta_2 \tau} \sin \omega_2 \tau d\tau \quad (2.31b)$$

Et les estimations des valeurs maximum de q_1 et de q_2 peuvent être données par :

$$|q_1|_{max} = L_1 S_D(\omega_1, \beta_1) \quad (2.31c)$$

$$|q_2|_{max} = L_2 S_D(\omega_2, \beta_2) \quad (2.31d)$$

Avec $S_D(\omega, \beta)$ est le spectre de réponse de déplacement pour le mouvement du sol, $\ddot{u}_g(t)$, à une fréquence ω et à un facteur d'amortissement β .

Les valeurs du déplacement maximum de système d'isolation et la déformation structurelle sont données par :

$$|v_b|_{max} = [(\phi_1^1 |q_1|_{max})^2 + (\phi_1^2 |q_2|_{max})^2]^{1/2} \quad (2.32a)$$

$$|v_s|_{max} = [(\phi_2^1 |q_1|_{max})^2 + (\phi_2^2 |q_2|_{max})^2]^{1/2} \quad (2.32a)$$

Insérant les résultats obtenus à partir des équations. (2.18a), (2.18b), (2.32a), et (2.32b), nous obtenons :

$$\begin{aligned} |v_b|_{max} &= \{[L_1 S_D(\omega_1, \beta_1)]^2 + [L_2 S_D(\omega_2, \beta_2)]^2\}^{1/2} \\ &= \{(1 - \gamma\epsilon)^2 [S_D(\omega_1, \beta_1)]^2 + \gamma^2 \epsilon^2 [S_D(\omega_2, \beta_2)]^2\}^{1/2} \end{aligned} \quad (2.33a)$$

Et

$$\begin{aligned} |v_s|_{max} &= \left\{ \epsilon^2 (1 - \gamma\epsilon)^2 [S_D(\omega_1, \beta_1)]^2 + \gamma^2 \epsilon^2 \frac{1}{\gamma^2} [1 - (1 - \gamma)\epsilon]^2 [S_D(\omega_2, \beta_2)]^2 \right\}^{1/2} \\ &= \epsilon \{ (1 - 2\gamma\epsilon)^2 [S_D(\omega_1, \beta_1)]^2 + [1 - 2(1 - \gamma)\epsilon]^2 [S_D(\omega_2, \beta_2)]^2 \}^{1/2} \end{aligned} \quad (2.33b)$$

En règle générale, le terme $\epsilon^2 S_D(\omega_2, \beta_2)$ peut être négligé avec des spectres de tremblement de terre où le déplacement à des fréquences grandes (i.e. ω_2) est beaucoup plus petit que lors des fréquences basses (i.e. ω_1). Ceci donne

$$|v_b|_{max} = (1 - \gamma\epsilon) S_D(\omega_1, \beta_1) \quad (2.34)$$

Si on néglige les termes qui sont plus élevés que ϵ^2 , l'estimation de la déformation structurelle ou la déformation entre étage, v_s est donnée comme :

$$|v_s|_{max} = \epsilon [S_D(\omega_1, \beta_1)^2 + S_D(\omega_2, \beta_2)^2]^{1/2} \quad (2.35)$$

De même, le coefficient de cisaillement à la base C_s est donné par :

$$C_s = \left| \frac{k_s v_s}{m} \right|_{max} = \omega_s^2 |v_s|_{max} \quad (2.36)$$

Devient

$$\begin{aligned} C_s &= \omega_s^2 \epsilon [S_D(\omega_1, \beta_1)^2 + S_D(\omega_2, \beta_2)^2]^{1/2} \\ &= [\omega_b^4 S_D(\omega_1, \beta_1)^2 + \epsilon^2 \omega_s^4 S_D(\omega_2, \beta_2)^2]^{1/2} \\ &= [S_A(\omega_1, \beta_1)^2 + \epsilon^2 S_A(\omega_2, \beta_2)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Ainsi si nous maintenons seulement les premiers termes, nous obtenons

$$|v_s|_{max} = \frac{\epsilon S_V}{\omega_b} = \epsilon S_D(\omega_b, \beta_b) \quad (2.38a)$$

$$|v_b|_{max} = \frac{S_V}{\omega_b} = S_D(\omega_b, \beta_b) \quad (2.38b)$$

Et la conception de coefficient de cisaillement à la base C_s est défini par

$$C_s = \frac{k_s v_s}{m} = \omega_s^2 v_s \quad (2.39a)$$

Devient :

$$C_s = \omega_b S_V \left[1 + \epsilon^2 \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \right]^{1/2} \approx S_A(\omega_b, \beta_b) \left(1 + \frac{\epsilon}{1 - \gamma} \right)^{1/2} \approx S_A(\omega_b, \beta_b) \quad (2.39b)$$

2.3 Extension de la théorie aux bâtiments

2.3.1 Les équations du mouvement à N degré de liberté

L'analyse du modèle linéaire simple à deux-degré-de-liberté (2DDL), développé peut être appliquée au cas d'un bâtiment à plusieurs étages. Le système structural de ce bâtiment est représenté par une matrice de masse M , une matrice d'amortissement C , et la matrice de rigidité K . Pour une structure conventionnelle, le déplacement relatif u de chaque degré de liberté est donné par [6]

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Mr\ddot{u}_g \quad (2.40)$$

Avec r est un vecteur qui couple chaque degré de liberté au mouvement de terrain. Quand ce modèle structural est superposé à un système d'isolation à la base avec une masse m_b , une rigidité k_b , et l'amortissement c_b , l'équation (2.40) devient

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = -Mr(\ddot{u}_g + \ddot{v}_b) \quad (2.41)$$

Avec v est le déplacement relatif au plancher et v_b est le déplacement relatif du plancher au sol. L'équation globale qui combine entre la construction et le plancher est :

$$r^T M(\ddot{v} + r\ddot{v}_b + r\ddot{u}_g) + m_b(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = 0 \quad (2.42)$$

Qui peut être écrite sous la forme

$$r^T M\ddot{v} + (m + m_b)\ddot{v}_b + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (2.43)$$

L'équation (2.43) définit le terme $r^T M r$ comme la masse totale m du bâtiment, donc, $m + m_b$ est la masse totale avec le système d'isolation. La matrice à partir de ces équations est :

$$M^*\ddot{v}^* + C^*\dot{v}^* + K^*v^* = -M^*r^*\ddot{u}_g \quad (2.44)$$

Avec

$$M^* = \begin{bmatrix} m + m_b & r^T M \\ Mr & M \end{bmatrix} \quad C^* = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \quad (2.45a)$$

Et

$$K^* = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \quad r^* = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad v^* = \begin{bmatrix} v_b \\ v \end{bmatrix} \quad (2.45b)$$

2.4 Caractéristiques mécaniques des isolateurs

Avec les formes de bâtiment compliquées, la nature du sol au-dessous du système d'isolation, et la proximité de bâtiment à des failles actives importantes, une analyse linéaire ne peut pas capturer exactement la performance du bâtiment [6]. Les possibilités limitées de l'analyse linéaire ont été par la suite surmontées en incorporant, l'utilisation des techniques non linéaires qui sont toujours tout à fait difficiles, des prévisions simples basées sur la théorie élastique ont été développées par beaucoup de chercheurs et vérifiées par les essais en laboratoire et plus récemment par l'analyse des éléments finis [11].

2.4.1 Caractéristiques mécaniques des isolateurs:

La rigidité horizontale d'un isolateur est donnée par [23] :

$$K_H = \frac{G A}{t_r} \quad (2.46)$$

Avec G : Le module de cisaillement de l'élastomère

A : La surface d l'isolateur

t_r : L'épaisseur totale des couches d'élastomère.

La fréquence horizontale w_H qui alternativement est lié à la rigidité horizontale K_H à travers :

$$w_H^2 = \frac{K_H}{W} g \quad (2.46a)$$

$$T_H = \frac{2\pi}{w_H} \quad (2.46b)$$

La fréquence verticale est égale à $f_v=10$ Hz, puis à par $6S^2 = \frac{f_v^2}{f_H^2}$

Résolvant pour S, Tel que, S

$$S = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{f_v}{f_H}$$

Avec $f_H = T_H^{-1}$

Le déplacement horizontal maximum D est relié à la contrainte de cisaillement maximal γ par

$$\gamma = \frac{D}{t_r} \quad (2.47)$$

La rigidité verticale d'un isolateur est donnée par la formule suivante :

$$K_V = \frac{E_c A}{t_r} \quad (2.48)$$

Avec E_c est le module instantané de compression des plaques de caoutchouc et d'acier, la valeur de E_c pour une seule couche en caoutchouc est contrôlée par le facteur de forme S . définis comme [6] :

- Pour un isolateur circulaire du diamètre Φ et d'épaisseur t

$$S = \frac{\Phi}{4t}$$
- Pour un isolateur carré de dimension latéral a et de l'épaisseur t

$$S = \frac{a}{4t}$$

t : L'épaisseur d'une seule couche d'élastomère.

Pour une surface simple sous forme de cercle complet, le module de compression E_c est donné par :

$$E_c = 6GS^2 \quad (2.49)$$

Et pour une section carrée, le module de compression est donné par :

$$E_c = 6.73 GS^2 \quad (2.50)$$

Pour des isolateurs avec des facteurs de forme très grands, la compressibilité du caoutchouc affecte la valeur de E_c . Une évaluation plus précise de E_c peut être obtenue à partir de:

$$E_c = \frac{6GS^2 K}{6GS^2 + K} \quad (2.51)$$

- E_c : module de Compression
- S : Facteur de forme ($5 < S < 30$)
- K : Module de compressibilité ($1000\text{MPa} < K < 2500 \text{MPa}$)
- G : Module de cisaillement ($0.5\text{MPa} < G < 2.5 \text{MPa}$)

2.4.2 Modèles bilinéaires des isolateurs

Le modèle bilinéaire peut être employé pour tous les systèmes d'isolation utilisés dans la pratique. En fait le modèle par hystérésis bilinéaire peut refléter les caractéristiques non linéaires des appuis élastomère et les systèmes de pendulent à friction [11].

Le comportement non linéaire de force-déformation du système d'isolation est modélisé par la boucle d'hystérésis bilinéaire basée sur trois paramètres [6] :

- la rigidité élastique K_1
- la rigidité post élastique K_2 ,
- la force caractéristique Q qui est en fonction de la charge de plastification F_y

La force caractéristique, Q est habituellement employée pour estimer la stabilité du comportement par hystérésis quand l'appui teste plusieurs cycles de chargement. Ces trois paramètres reflètent correctement les propriétés mécaniques des appuis et fournissent des évaluations satisfaisantes du comportement non linéaire d'un appui [11].

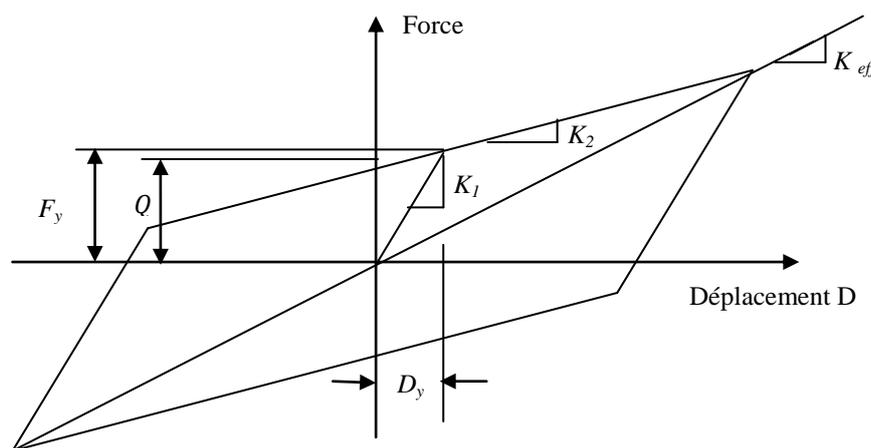


Fig.2.2 : Relation déplacement - force de modèle bilinéaire

La rigidité effective d'un appui, K_{eff} peut être exprimée en termes de rigidité K_2 , et la force caractéristique, Q avec déplacement latéral correspondant, D_y .

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad D \geq D_y \quad (2.52)$$

Avec D_y est le déplacement de rupture en termes de paramètres premiers

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (2.53)$$

Et la surface de la boucle d'hystérésis (l'énergie absorbée par cycle), w_D , est donnée par :

$$w_D = 4Q (D - D_y) \quad (2.54)$$

L'amortissement effectif β_{eff} est exprimé comme suite

$$\beta_{eff} = \frac{4Q (D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (2.55)$$

2.4.3 Caractéristiques mécaniques des appuis en élastomère

Les appuis en élastomère est un système non linéaire qui peut être effectivement idéalisé en termes de courbe bilinéaire de force-déplacement, leurs caractéristiques basées sur les trois paramètres : K_1 , K_2 , et Q (présenté dans la figure 2.2 [11]).

Les formules développées dans la section précédente s'appliquent également ici avec quelques équations supplémentaires. la rigidité effective pour un appui en élastomère est donnée par :

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad D \geq D_y \quad (2.56)$$

La fréquence naturelle ω est indiquée par

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{\frac{K_{eff} g}{W}} \\ &= \sqrt{\omega_0^2 + \mu \frac{g}{D}} \end{aligned} \quad (2.57)$$

Avec $\mu = Q/W$, $\omega_0^2 = \sqrt{K_2 g/W}$, et la période effective T est donnée par :

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{2\pi}{\omega} \\
 &= \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 + \mu \frac{g}{D}}}
 \end{aligned} \tag{2.58}$$

Remplacent l'équation (2.56) dans (2.55), on obtient :

$$\beta_{eff} = \frac{4Q (D - D_y)}{2\pi (K_2 D + Q) D} \tag{2.59}$$

La rigidité élastique K_1 est difficile à calculer et est habituellement prise comme $10 K_2$ [6], donc

$$D_y = \frac{Q}{9 K_2} \tag{2.60}$$

L'amortissement effectif devient :

$$\beta_{eff} = \frac{4Q (D - Q/9 K_2)}{2\pi (K_2 D + Q) D} \tag{2.61}$$

2.4.4 Caractéristiques mécaniques de système de pendule à friction

Si la charge sur un isolateur de pendule à friction est W , et le rayon de courbure de système de pendule à friction est R , alors la rigidité horizontale de l'isolateur peut être définie par [6] :

$$K_H = \frac{W}{R} \tag{2.62}$$

Ce qui produit une période d'isolation T donnée par

$$T = 2\pi \sqrt{R/g} \tag{2.63}$$

La rigidité effective est donnée par

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \tag{2.64}$$

Avec μ est le coefficient de frottement. Le coefficient de frottement dépend de la pression et de la vitesse de glissement. Le coefficient diminue avec l'augmentation de la pression et devient indépendant de la vitesse au-dessus de 51 mm/s pour des pressions de 14 MPA

L'amortissement fourni par frottement à la surface glissante peut être estimée par la formule suivante :

$$\beta = \frac{4\mu Wd}{2\pi[(W/R)D + \mu W]d} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu}{\mu + D/R} \quad (2.65)$$

2.5 Conclusion

Pendant ces dernières années, de nombreuses recherche et investigations ont été concentrées sur le développement de la théorie du système d'isolation, ainsi que les vérifications expérimentales de leur stabilité et longévité. Dans ce chapitre, nous avons présenté les équations du mouvement de la structure qui est une combinaison de deux équations, l'équation de la superstructure et celle de la base (isolateur). Ainsi que le développement et l'application du modèle bilinéaire pour les différents types d'appuis sont explicitement présenté.

Dans cette section, nous avons constaté que la matrice masse $[M]$ obtenue pour la structure isolée n'est pas diagonale.

CHAPITRE 3 CODE DE REGLEMENTATION POUR L'ISOLATION SISMIQUERE

3.1 Introduction

La conception de nouveaux bâtiments sous l'isolation sismique dans le monde est actuellement régie par le code suivant: UBC-97 (the Uniform building code), le règlement d'UBC-97 exige que le système d'isolation doit être stable pour le déplacement requis, et avoir des propriétés qui ne se dégradent pas sous le chargement cyclique répété [6].

Le concept du code n'est pas de réduire le coût de la structure, mais pour contrôler les dommages causés à la structure et de son contenu en prenant comme avantage le fait que l'isolation sismique permet une réponse élastique dans la structure. Dans ce chapitre nous présentons les procédures essentielles d'UBC 1997.

3.2 Analyse statique

Le déplacement D dans UBC-97 est le point de départ pour le processus de la conception. Il est basé sur l'hypothèse que les déformations de la superstructure sont négligeables et il est donné par [6] :

$$D = \frac{0.25 Z N S_I T_I}{B} \quad (3.1)$$

Avec :

Z : Coefficient de zone sismique (par exemple: 0,3 pour la zone 3 et 0,4 pour la zone 4)

N : Coefficient dépendant de la proximité de la faille active

S_I : Coefficient caractérisant le type de sol

T_I : Période effective en secondes

B : Coefficient d'amortissement

Les trois niveaux de déplacement à calculer sont comme suit [10]:

- D , le déplacement de conception, étant le déplacement au centre de la rigidité du système d'isolation correspondant au cas d'un séisme modéré DBE (Design Basis Earthquake).
- D_T , le déplacement total, étant le déplacement de l'appui à un coin du bâtiment y compris la composante du déplacement de torsion dans la direction de D .
- D_{TM} , le déplacement total maximum, étant le déplacement total évalué dans le cas d'un séisme majeur MCE (Maximum Capable Earthquake).

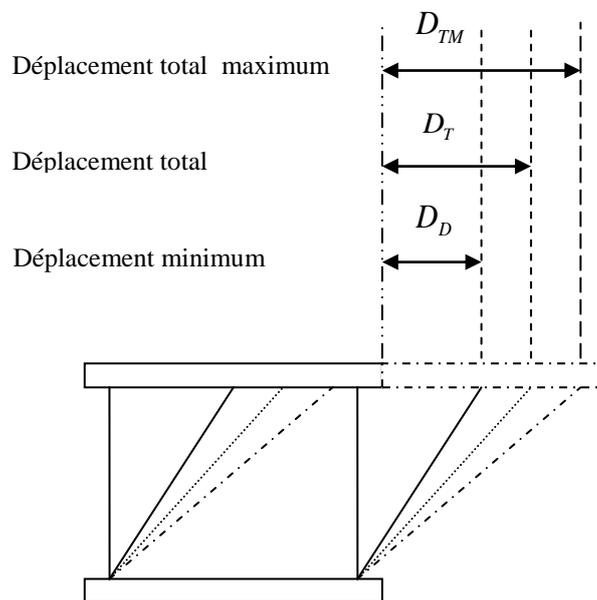


Fig.3.1 : Déplacements du système d'isolation [20]

Selon UBC-97, deux déplacements de base seront calculés D_D et D_M , qui sont définis comme étant le déplacement au centre de rigidité du système d'isolation correspondant au cas d'un séisme modéré DBE (Design Basis Earthquake) et au cas d'un séisme majeur MCE (Maximum Capable Earthquake) respectivement. Ils sont calculés en utilisant les formules suivantes [6], [20]:

$$D_D = \frac{(g/4\pi^2) C_{VD} T_{MD}}{B_D} \quad (\text{mm}) \quad (3.3)$$

$$D_M = \frac{(g/4\pi^2) C_{VM} T_M}{B_M} \quad (\text{mm}) \quad (3.4)$$

Avec g : l'accélération de la pesanteur.

C_{VD} et C_{VM} : coefficients sismiques spectraux.

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.

B_D et B_M sont des coefficients d'amortissement correspondant à la réponse DBE et MCE, respectivement.

3.2.1 Facteur de la zone sismique Z

Les facteurs de la zone sismique varient de 0,075 pour la zone 1 à 0,40 pour la zone 4, fig.3.2 (UBC-97, tableau 16-1) [6], [12].

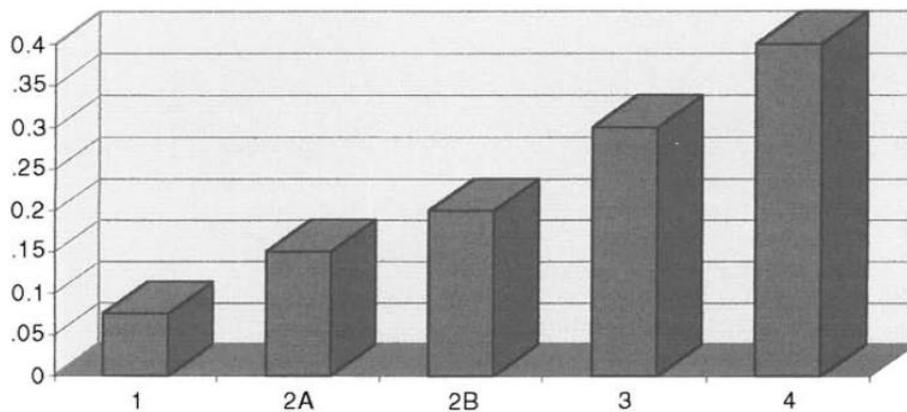


Fig.3.2 : Facteurs de la zone sismique d'UBC-97 [6]

3.2.2 Type de profil de sol

Les profils de sols de S_A à S_E sont basées sur la vitesse moyenne des ondes de cisaillement, (voir fig.3.3 ou UBC-97, tableau 16-J). Cette vitesse varie de moins de 180 m / s pour les sols mous (S_E), et plus de 1500 m / s pour les sols durs (S_A) [6].

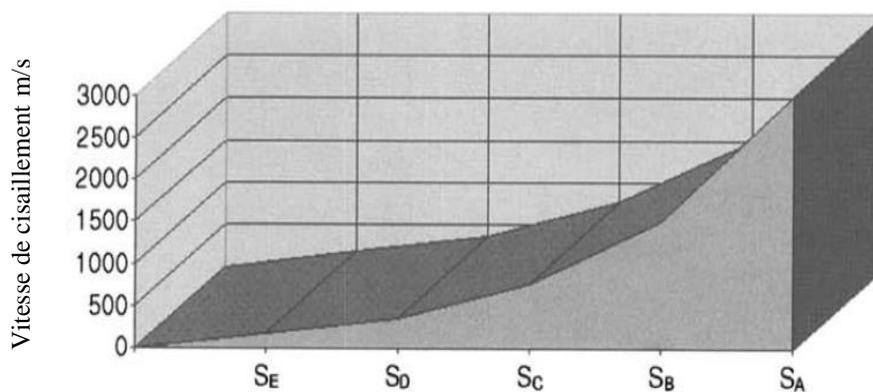


Fig.3.3 : Catégories de type du sol de l'UBC-97 [6]

3.2.3 Types de sources sismiques : A, B et C

Les failles sismiques sont regroupées en trois catégories en fonction de la gravité du danger qu'elles représentent. Failles capable de produire de grandes magnitudes ($M \geq 7.0$) et ont un taux élevé de l'activité sismique [taux de glissement sismique moyen annuel $SR \geq 5$ mm] sont classées comme étant de type A. Failles capable de produire des magnitudes modérées ($M < 6.5$) avec un taux relativement faible de l'activité sismique [$SR \leq 2$ mm] sont classées comme étant de type C. Tout autre type de faille hors A et C sont classées de type B [6].

3.2.4 Facteurs dépendant de la proximité de la faille active: N_a et N_v

Deux facteurs sont utilisés pour modéliser le mouvement d'amplification due aux effets de la proximité de la faille. Le premier facteur, N_a , est destiné pour une série de période courte, correspondant à un segment d'accélération constante de spectres de réponse. Le deuxième facteur, N_v , qui correspond au segment de la vitesse constante de spectres de réponse. Les facteurs proximité de la faille sont des fonctions de la distance la plus proche de la faille sismique et le type de faille sismique (voir figures 3.4 et 3.5) [6].

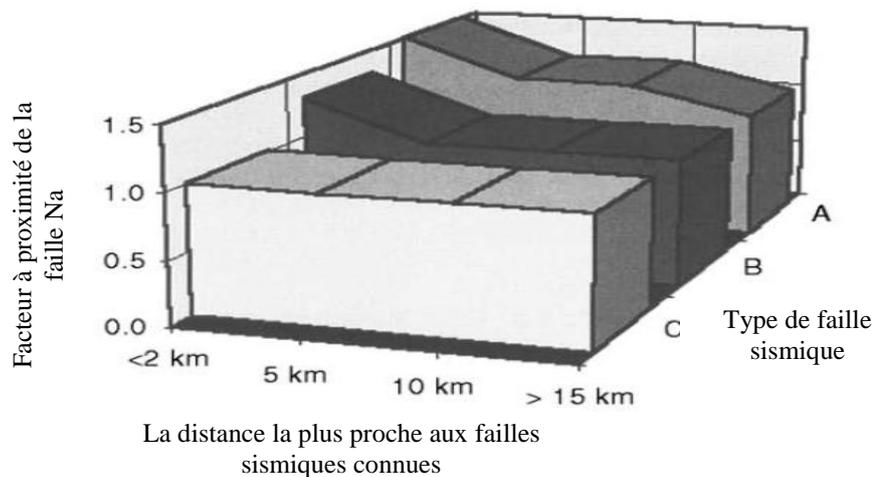


Fig.3.4 : Facteur a proximité de la faille N_a [6]

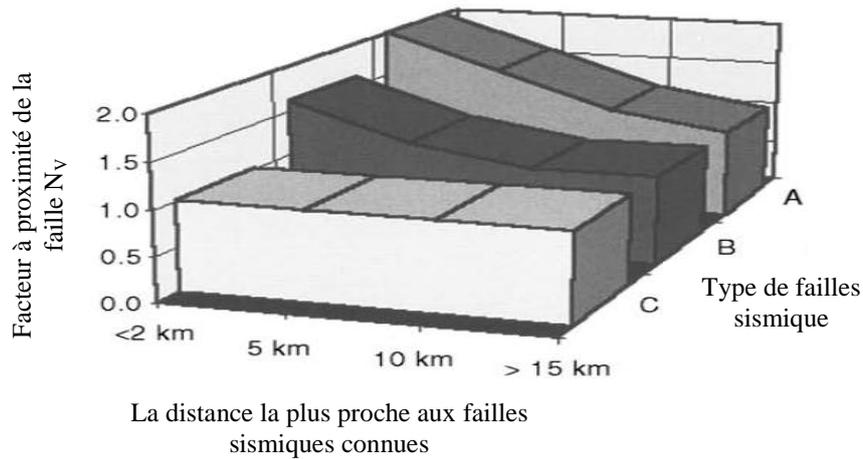


Fig.3.5 : Facteur à proximité de la faille N_v [6]

3.2.5 Coefficient M_M de la réponse MCE

Le coefficient M_M dans le cas d'un séisme majeur MCE (Maximum Capable Earthquake) est prévu pour estimer la réponse de MCE basée sur les caractéristiques de secousse au cas d'un séisme modéré DBE (Design Basis Earthquake). Tels que, M_M est défini comme une fonction de ZN_v et varie de 2.67 pour $ZN_v=0.075$ à 1.20 pour $ZN_v \geq 0.5$ (voir figure 3.6), les valeurs M_M sont énumérés dans le tableau A-16-D de l'UBC-97 [6].

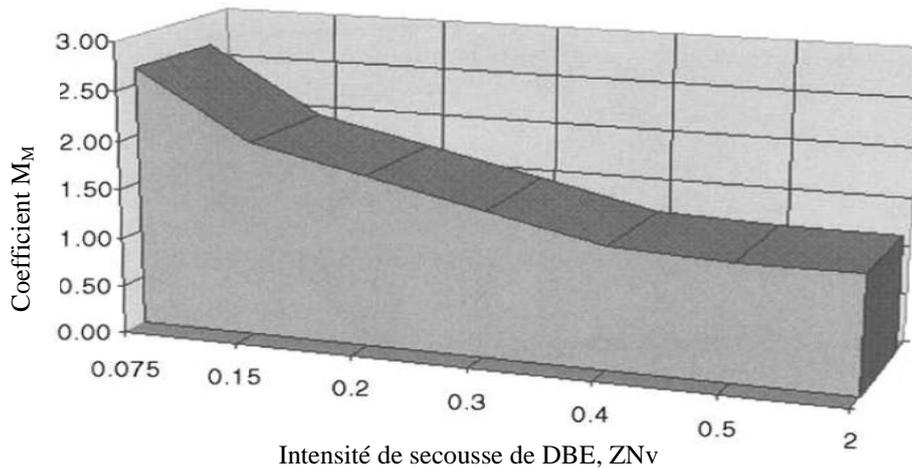


Fig.3.6 : Coefficient M_M de la réponse MCE [6]

3.2.6 Coefficients sismiques spectraux : C_{VD} , C_{VM} et C_{AD} , C_{AM}

Les termes C_{AD} et C_{VD} correspondent aux zones de vitesse constante et de l'accélération constante du spectre de DBE, respectivement, C_{VM} et C_{AM} réalisent la même fonction pour le

spectre MCE, pour les structures d'isolation sismiques, les valeurs de C_{VM} et C_{AM} , sont donnés dans l'UBC-97 (tableau A-16-G et A-16-F).

Suivant les indications des figures 3.7 et 3.8, C_{VD} et C_{AD} sont des fonctions de facteur de zone sismique et de type de profil de sol. Pour la zone 4 les valeurs représentées sur ces figures doivent être multipliées par le facteur à proximité de la faille appropriée N_v ou N_a [6].

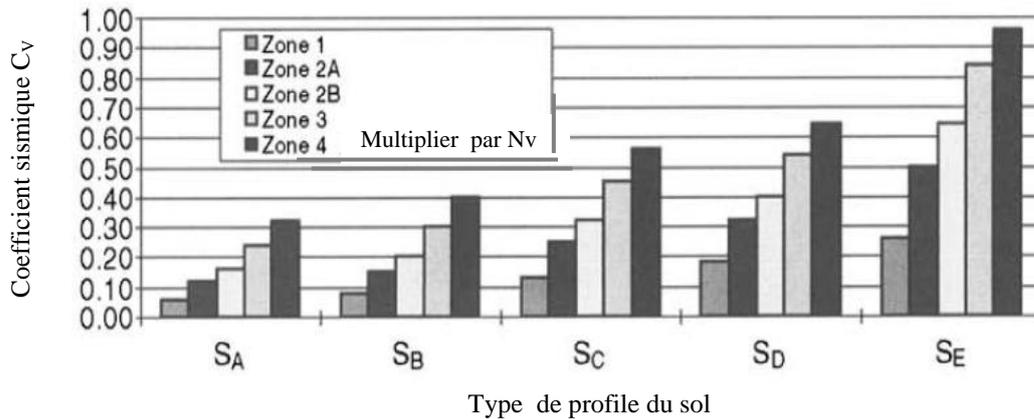


Fig .3.7 : Coefficient sismique C_{VD} [6]

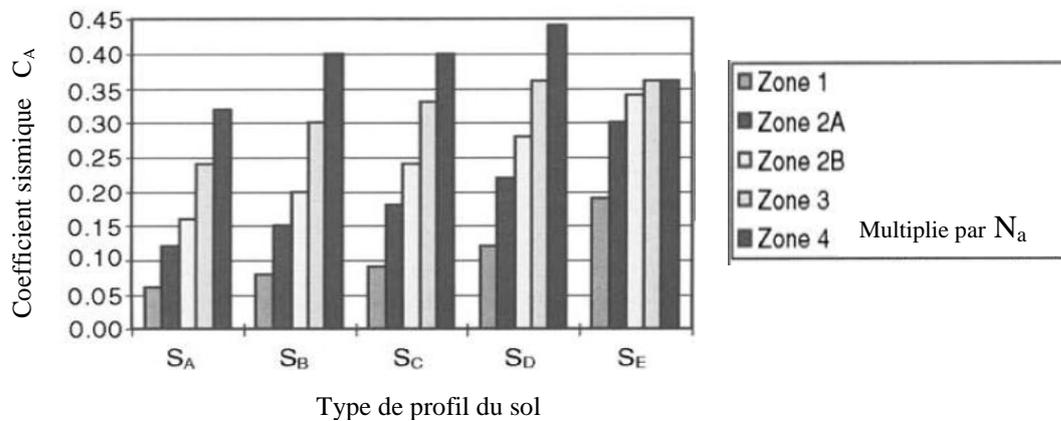


Fig .3.8 : Coefficient sismique C_{AD}

Les coefficients C_{VM} et C_{AM} sont montrés dans les figures 3.9 et 3.10, ils sont des fonctions de facteur de zone sismique et de type de profil de sol. Les valeurs représentées sur ces figures pour $M_M Z N_v$ ou $M_M Z N_a$, de plus de 0,40 devraient être multiplié par le facteur indiqué dans la figure [6].

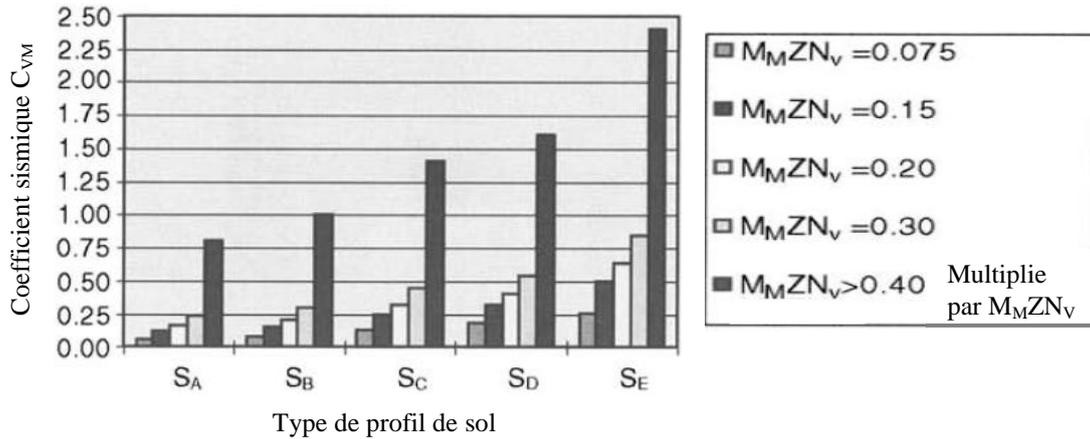


Fig.3.9 : Coefficient sismique C_{VM} [6]

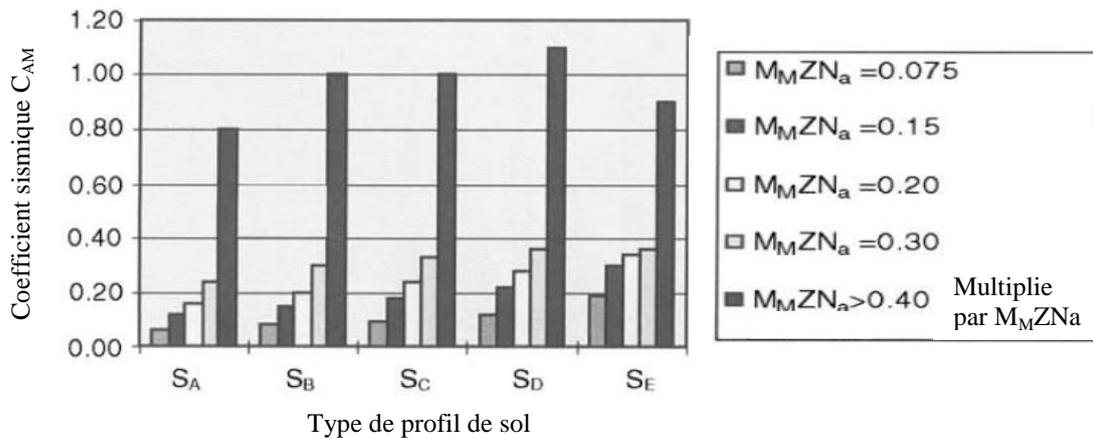


Fig.3.10 : Coefficient sismique C_{AM} [6]

3.2.7 Coefficients d'amortissement: B_D et B_M

L'amortissement effective dans le système, β , aux réponses de DBE et de MCE (désignés comme B_D et B_M) sont calculées à partir du tableau suivant [20]:

Tableau 3.1 : Coefficient d'amortissement B_D et B_M

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
$\geq 50 \%$	2.0

3.2.8 Périodes effectives de système de vibration: T_D et T_M

Les périodes T_D et T_M qui correspondent à la réponse de DBE et de MCE sont calculées à partir de [2] :

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{D,min} g}} \quad (3.5)$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M,min} g}} \quad (3.6)$$

Avec : $K_{D,min}$:Rigidité minimale (Kn/mm) du système d'isolation correspondant au déplacement minimum.

$K_{M,min}$: Rigidité minimale (Kn/mm) du système d'isolation correspondant au déplacement maximum.

W : Poids total de la structure.

3.2.9 Déplacements total de conception : D_{TD} et D_{TM}

Le déplacement de conception obtenu à partir des équations 3.3 et 3.4 ne représente pas le mouvement maximum du système d'isolation puisqu'il explique seulement le déplacement au centre de rigidité du système d'isolation. En fait, un déplacement supplémentaire existe dû à l'excentricité, en (mm). Ainsi, ces deux parties de déplacements forment le mouvement maximum du système d'isolation qui s'appelle le déplacement de conception totale [6].

L'excentricité, e , qui à comme conséquence le déplacement additionnel, comprend à l'excentricité réelle mesurée à partir de la masse de la structure au-dessus de l'interface d'isolation au centre de rigidité du système d'isolation, suivant les indications montrées sur la figure (3.11). Cette formule suppose que la charge sismique $K_{D,max}$ est appliquée à travers le centre de masse, qui est situé à une distance e du centre de la rigidité. Supposant un plan rectangulaire, avec dimension $b * d$ [11].

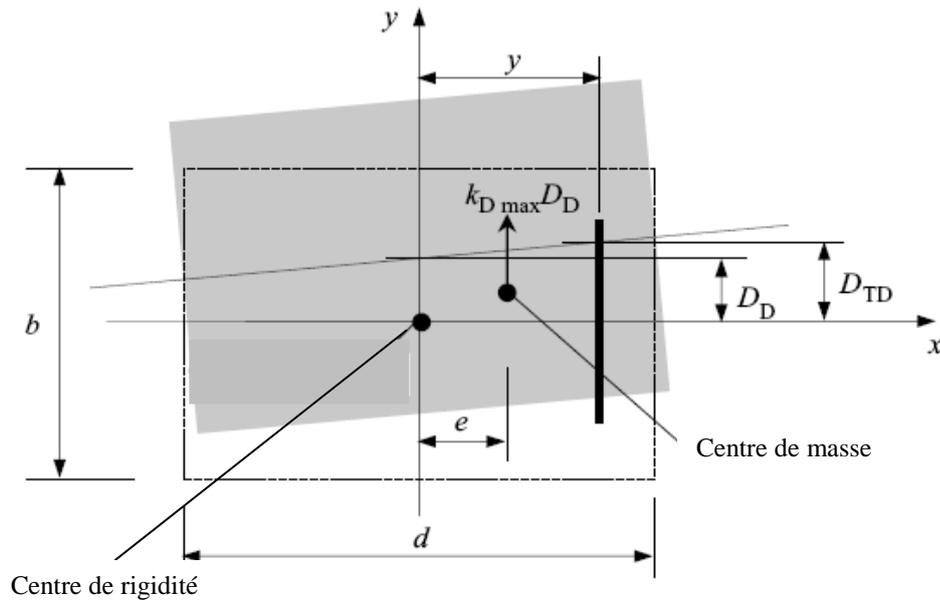


Fig.3.11 : Dimension en plan pour la détermination du déplacement total D_{TD} et D_{TM} [11]

Le déplacement total max D_{TM} est nécessaire pour la vérification de la stabilité du système d'isolation.

On suppose que les isolateurs sont uniformément répartis dans ce plan rectangulaire. Par conséquent, la rigidité de torsion du système d'isolation, $k_{torsion}$, peut être exprimée en termes de rigidité effective maximum, $K_{D,max}$:

$$K_{torsion} = \left(\frac{b^2 + d^2}{12} \right) K_{D,max} \quad (3.7)$$

La rotation du système d'isolation est dérivée comme suit:

$$\theta = \frac{K_{D,max} D_D e}{K_{D,max} [b^2 + d^2 / 12]} = \frac{12 D_D e}{b^2 + d^2} \quad (3.8)$$

Le déplacement additionnel, D_a , à la distance, y , qui est la distance entre le centre de rigidité du système d'isolation et un angle perpendiculaire à la direction du chargement sismique, peut être déterminé comme suit [9], [11].

$$D_a = \frac{12 D_D e}{b^2 + d^2} y \quad (3.9)$$

En ajoutant D_D à l'équation (3.9), le déplacement total de conception, D_{TD} (mm), devient :

$$D_{TD} = D_D + D_a = D_D \left(1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right) \quad (3.10)$$

De la même manière, le déplacement total maximum, D_{TM} , peut être déterminé comme suit :

$$D_{TM} = D_M \left(1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right) \quad (3.11)$$

3.2.10 Calculs des forces sismiques

Le système d'isolation ainsi que les éléments structuraux au-dessus de l'interface d'isolation doivent être conçus pour résister à la force sismique calculée en utilisant la formule [8],[20]

$$V_b = K_{D,max} D_D \quad (3.12)$$

La force de cisaillement minimale, V_s , pour concevoir les éléments structuraux au-dessus de l'interface d'isolation est donnée par l'équation suivante :

$$V_s = \frac{K_{D,max} D_D}{R_I} \quad (3.13)$$

Avec : $K_{D,max}$; Rigidité maximale en (Kn/mm) du système d'isolation correspondant au déplacement minimum.

R_I : facteur de réduction de force de conception (facteur de ductilité) s'étalant de 1.4 à 2.0, le tableau 3.2 montre quelques exemples des systèmes structuraux de base -fixe avec le facteur de réduction R correspondant [6].

Tableau 3.2 : Le facteur de réduction R

Construction	R_I	R
Le moment-résistant d'une poutre	2.0	8.5
Cisaillement d'un voile	2.0	5.5

3.2.11 Distribution verticale de la force sismique

La force latérale totale V_s doit être distribuée sur la hauteur de la superstructure au-dessus de l'interface d'isolation selon la formule suivante [7]:

$$F_x = V_s \frac{h_x w_x}{\sum_{i=1}^N w_i h_i} \quad (3.14)$$

Avec V_s : La force latérale totale au dessus de système d'isolation.

w_x : Poids du niveau x.

h_x : Hauteur du niveau x.

w_i : Poids du niveau i.

h_i : Hauteur du niveau i.

3.3 ANALYSE DYNAMIQUE

L'analyse dynamique est applicable dans tous les cas, elle consiste en une analyse par spectre de réponse ou une analyse par accélérogramme. Elle est également exigée si la période effective de la structure isolée, T_D , est plus grande de trois fois la période élastique de la structure encastrée [6].

3.3.1 Calcul des déplacements

Le déplacement minimum total et le déplacement maximum total du système d'isolation ne doivent pas être pris inférieurs à 90% de D_{TD} et inférieurs à 80% de D_{TM} respectivement.

Le déplacement minimum total de conception D_{TD} pour le système d'isolation peut être réduit à moins de 90% de celui donné par la formule statique, et le déplacement total maximum D_{TM} peut être réduit à moins de 80% du résultat de la formule statique. Le D_{TD} et D_{TM} sont calculés à partir D_D et D_M par l'utilisation de multiplicateurs, et le code permet une réduction supplémentaire en remplaçant D_D et D_M dans les formules statique par D'_D et D'_M [2], [6].

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + (T/T_D)^2}} \quad (3.15)$$

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + (T/T_M)^2}} \quad (3.16)$$

Avec : T étant la période élastique de la superstructure encastrée.

Cette nouvelle réduction sert à tenir compte de la flexibilité de la superstructure. Les formules statiques des équations (3.3) et (3.4) supposent que la superstructure est rigide.

3.3.2 Calcul des forces latérales

- Pour le système d'isolation la force sismique ne doit pas être prise supérieure 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 [12].

3.3.3 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 [10] :

- 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 $0.020h_x$

Tableau 3.3 : Valeurs minimales de l'analyse dynamique données en fonction des valeurs de l'analyse statique

Paramètre de calcul	Analyse statique	Analyse dynamique	
		Réponse spectrale	Réponse temporelle
Déplacement minimal	$D_D = \frac{(g/4\pi^2) C_{VD} T_{MD}}{B_D}$	$0.90D_{TD}$	$0.90D_{TD}$
Déplacement maximal	$D_M = \frac{(g/4\pi^2) C_{VM} T_M}{B_M}$	$0.80D_{TM}$	$0.80D_{TM}$
Force sismique	$V_b = K_{D \max} D_D$	$\geq 0.9 V_b$	$\geq 0.9 V_b$
Force sismique pour une structure régulière	$V_s = \frac{K_{D \max} D_D}{R_I}$	$\geq 0.8V_S$	$\geq 0.6V_S$
Force sismique pour une structure irrégulière	$V_s = \frac{K_{D \max} D_D}{R_I}$	$\geq 1V_S$	$\geq 0.8V_S$
Déplacements inter étages	$\leq 0.015 h_x$	$\leq 0.015 h_x$	$\leq 0.020 h_x$

3.4 Procédé étape par étape pour la conception conforme à l' UBC-97

3.4.1 Étapes préliminaires de conception [6]

Étape 1: Déterminer le facteur de zone sismique Z correspondant à partir de la Fig.3.2 ou (UBC-97, tableau 16-I).

Étape 2 : Déterminer le type de profil de sol à partir de la Fig.3.3 ou (UBC-97, tableau 16-J).

Étape 3 : Déterminer le type de faille sismique correspondant à partir de la partie 3.2.3 ou de l'UBC-97. Table 16-U.

Étape 4: Déterminer les facteurs à proximité de la faille N_a et N_v , correspondants pour chaque type de failles sismiques à partir des Figs.3.4 et de 3.5 ou (UBC-97, tableau 16- s et 16-T).

Étape 5: Calculer le coefficient de réponse aux séismes maximum M_M . multiplier Z et N_v pour obtenir ZN_v . utilisez la Fig.3.6 ou (UBC-97, tableau A-16-D) pour lire la valeur correspondante du M_M .

Étape 6 : Déterminer les coefficients sismiques C_{VD} et le D_{AD} , avec le facteur de zone sismiques et le profil du sol, obtenir les coefficients sismiques appropriés C_V et C_A à partir des Figs. 3.7 et de 3.8 ou (UBC-97, tableau 16-R et 16-Q). Nommés C_{VD} et C_{AD} , respectivement.

Étape 7 : Déterminer les coefficients sismiques C_{VM} et C_{AM} . En utilisant le type de profil du sol déterminé dans l'étape 2, multipliez M_M , Z et N_V pour obtenir $M_M Z N_V$. utiliser la Fig. 3.9 ou (UBC-97, tableau A-16-G) pour obtenir C_{VM} . De même, calculer $M_M Z N_a$ et employer la Fig. 3.10 ou (UBC-97, tableau A-16-F) pour obtenir la valeur de coefficient C_{AM} .

Étape 8 : Déterminer le facteur de réduction de système structural R_I correspondant au système structural utilisé au-dessus de l'interface d'isolation à partir du tableau 3.2 ou (UBC-97, tableau A-16-E). La valeur de R_I pour pratiquement tous les cas est 2.0.

Étape 9 : Sélectionner le type des appuis (isolation bearings) et les coefficients d'amortissement B_D et B_M . Sélectionner une évaluation conservatrice appropriée du taux de l'amortissement fourni. Par exemple, pour les systèmes en caoutchouc de haut-amortisseur (high-damping rubber systems), employer un taux d'amortissement de 10-12%, avec cette information utilisé le tableau 3.1 ou (UBC-97, tableau A-16-C) et lisez la valeur correspondante du coefficient d'amortissement. Assignez la même valeur à B_D et à B_M . Employer l'interpolation linéaire à la nécessité.

Étape 10 : Sélectionner une période de vibration d'isolation désirée T_D . Retenir d'un premier bilan estimatif pour la période fondamentale de vibration du système d'isolation au niveau de déplacement de base de conception. D'une manière générale, une période d'isolation entre 2.0 et 3.0 sec est souhaitable.

Étape 11 : Estimer la rigidité effective de système l'isolation .employer une équation simple (3.5) pour estimer la rigidité du système d'isolation pour la période d'isolation établie dans l'étape 10, Assigner cette valeur aux deux $K_{D, min}$ et $K_{D, max}$.

Étape 12: Estimer le déplacement latéral minimum de conception D_D . Employer l'équation (2.3) avec les valeurs calculées dans les étapes précédentes et calculez l'évaluation

initiale de déplacement minimum de conception D_D . Si cette valeur est plus grande que ce qui est acceptable pour votre projet, vous avez besoin d'un système plus raide. Aller de nouveau à l'étape 10 et commencez par une plus petite évaluation de la période de vibration. Autrement, procéder à la prochaine étape.

Étape 13: Établir les forces latérale minimum de conception V_b et V_s , utiliser les éqs.3.12 et 3.13 pour estimer les forces latérales minimum de conception pour les systèmes d'isolation et le système structural au-dessous de l'interface d'isolation (V_b) et les éléments structuraux au-dessus de l'interface d'isolation V_s , respectivement.

Étape 14: Exécuter une conception préliminaire des éléments de superstructure. Avec V_s estimé dans l'étape 13, calculez les forces latérales statiques à chaque niveau du bâtiment en utilisant éqt.3.14. Utiliser ces forces latérales pour le classement préliminaire par taille d'effort des éléments de superstructure.

Étape 15: Exécuter une conception préliminaire des isolateurs et de leur distribution. En utilisant le déplacement préliminaire, rigidité, force, et les propriétés d'amortisseur établies dans les étapes précédentes et les procédures de conception présenté en chapitre 3, conserver les isolateurs pour résister à la charge de pesanteur, à la charge latérale, et les conditions au déplacement. En outre, établir un diagramme hystérésis de force-déplacement préliminaire pour chaque type d'isolateur, ces diagrammes peuvent être basés sur les résultats d'essai obtenus à partir des essais effectués sur des appuis de type semblables et de taille ou sur des propriétés fournies par des fabricants d'isolateurs.

Les propriétés d'hystérésis assumées à ce stade sont portées à la vérification et à la révision possible pendant l'étape finale de conception quand les résultats des essais de prototype et de tests de production deviennent disponibles.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les procédures essentielles d'UBC 1997, cette étude nous aide à mieux comprendre les étapes de calcul et de dimensionnement des isolateurs.

CHAPITRE 4 MODELISATION NUMERIQUE DES ISOLATEURS

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on se propose en premier lieu de modéliser et d'étudier les isolateurs sismiques en utilisant trois modèles numériques (fig.4.1b) qui permettent de prendre en compte le comportement non linéaire. En deuxième lieu, afin de montrer l'efficacité de l'isolation sismique, des études de plusieurs structures ont été effectuées afin d'examiner leurs comportements lorsqu'elles sont munies d'isolateurs.

Les structures sont excitées par l'accélérogramme de Dar el Beida. Les vingt cinq premières secondes de l'enregistrement sont reportées sur la figure 4.1.

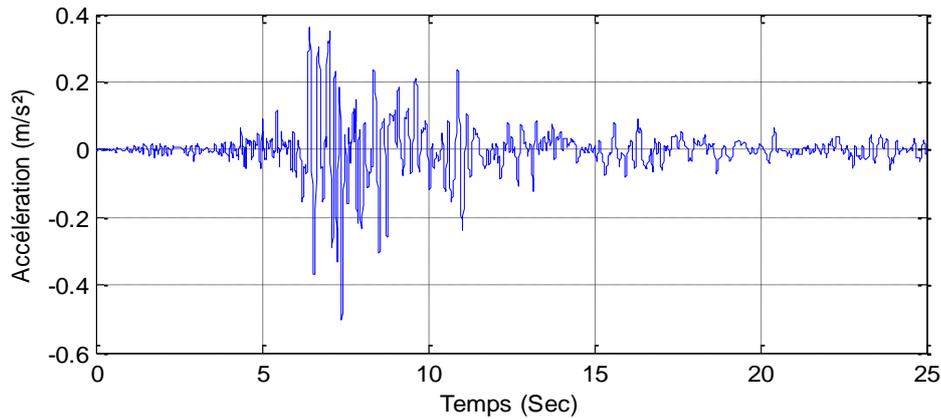


Fig.4.1 : Accélérogramme de Dar el Beida

4.2 Modélisation de l'isolateur

Le système d'isolation a été utilisé pour l'isolation sismique d'un pont, on simplifie l'étude, en utilisant un système à 1ddl composé d'une masse et d'un ressort fig.4.1a.

Les propriétés de la structure sont : la section de la structure est de $A=3.57 \text{ m}^2$, le moment d'inertie du poteau (pilier) est $I_c=0.1036 \text{ m}^4$, le module d'élasticité de béton E_c est 20.700 GPA, masse volumique $\rho =2500 \text{ kg/m}^3$, la hauteur du pilier est de $L_c = 9.14 \text{ m}$, la longueur de la structure est de $L_s = 36.6 \text{ m}$, la masse de la structure $m= A L_s \rho$ est de 326655 kg. la rigidité du pilier est de $k = \frac{12 E_c I_c}{L_c^3}$, on retrouve une rigidité de 33703325.89 N/m et une période $T=0.61s$.

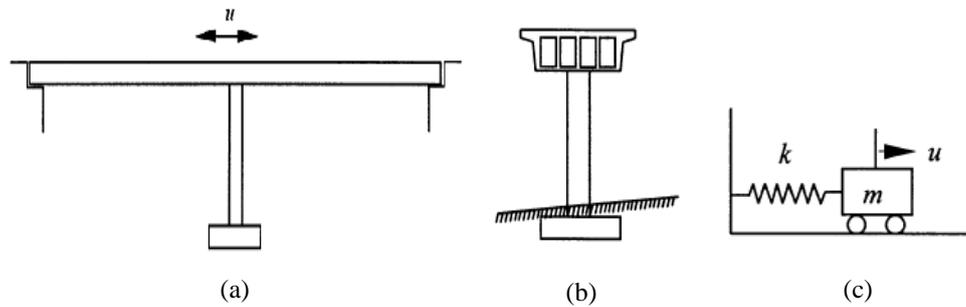


Fig 4.1a : Exemple d'un pont. (a) partie d'un Pont, (b) pilier, (c) modèle équivalent

4.2.1 Présentations des trois modèles

On reprend les caractéristiques du pont pour bien modéliser et examiner les trois modèles suivant :

- **Modèle 1** : modèle isolateur du SAP est un poteau qui a les caractéristiques de pilier du pont représenté dans la figure 4.1a, avec un isolateur défini dans le SAP (rubber isolator).
- **Modèle 2** : ressort à comportement bilinéaire, qui consiste à modéliser un poteau qui a les mêmes caractéristiques que le pilier du pont présenté dans la figure 4.1a avec une masse qui représente la masse du pont et un ressort à comportement bilinéaire qui représente l'isolateur. Des études expérimentales (Robinson, 1982) ont démontrées qu'on peut modéliser un isolateur élastomère par un ressort ayant un comportement bilinéaire (fig.4.1b, modèle 2) [1].
- **Modèle 3** : le modèle analytique à deux ressorts non linéaire développé par Nagarajaiah et Ferrell, (1999), et Buckle et al, (2000) consiste en assemblant un ressort de cisaillement et un ressort de rotation, avec des rigidités non linéaires [15].

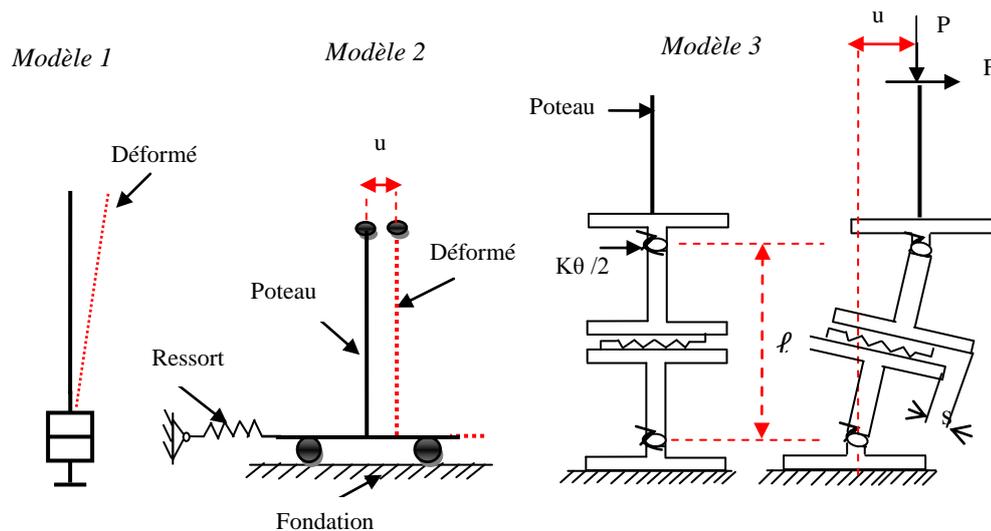


Fig. 4.1.b: Les modèles d'isolateurs

4.2.2 Détermination de la rigidité de rotation pour le modèle 3

Les caractéristiques principales de ce modèle sont [15]:

- La rigidité horizontale dépend de la force de cisaillement, de la charge axiale, du déplacement horizontal et de la contrainte de cisaillement.
- La rigidité de rotation dépend de la contrainte de cisaillement.

Les non-linéarités sont basées sur les résultats d'essais, le modèle analytique non linéaire se compose de deux éléments reliés par un ressort de cisaillement et deux ressorts de rotation (figure 4.1b, modèle 3).

Le modèle est chargé par une force axiale P et une force horizontale F au dessus du poteau. La plaque supérieure est libre de se déplacer verticalement et horizontalement, toutefois elle est retenue dans la direction de rotation.

Le déplacement horizontal u , au sommet du poteau est donné par l'équation (4.1), où l est la hauteur totale des couches en élastomère et des plaques en acier, à l'exclusion des plaques supérieures et inférieures en acier.

$$u = l \sin \theta + s \cos \theta \quad (4.1)$$

La rigidité de rotation K_θ est fonction de s , qui est le facteur de forme. L'équilibre rotationnel est donné dans l'équation 4.2, où C_θ est en fonction de $f(s/l_r)$, l_r est l'épaisseur de toutes

Les couches en élastomère, $K_{\theta 0}$ est la rigidité de rotation à la contrainte de cisaillement nulle. Cette équation est non linéaire.

$$K_{\theta 0} = \left(1 - C_{\theta} f\left(\frac{s}{l_r}\right) \right) \theta = P(\ell \sin \theta + s \cos \theta) + F(\ell \cos \theta + s \sin \theta) \quad (4.2)$$

Si les termes non linéaires sont négligés, et des petites angles sont considérés, le modèle se réduit à un modèle linéaire, pour lequel la rigidité de rotation $K_{\theta 0}$ peut être facilement obtenue, suivant les indications dans les équations (4.3) jusqu'à (4.8), où $(EI)_{eff}$ définit la rigidité de flexion, E , le module de recourbement, I , est le moment d'inertie de l'isolateur, E_0 est le module élastique de l'élastomère (approximativement égale à $4G$), et G , est le module de cisaillement de l'élastomère [15].

$$K_{\theta} = K_{\theta 0} \left(1 - C_{\theta} \frac{s}{l_r} \right) \quad (4.3)$$

$$K_{\theta 0} = P_E l \quad (4.4)$$

$$P_E = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{l^2} \quad (4.5)$$

$$(EI)_{eff} = E_r I (l/l_r) \quad (4.6)$$

$$E_r = E_0 (1 + 0.742 s^2) \quad (4.7)$$

$$C_{\theta} = \alpha \left(\frac{t_u - t_r}{B} \right) \quad (4.8)$$

Avec : α est une constante sans dimensions de valeur l_r .

t_u : est l'épaisseur unitaire de la couche en élastomère.

t_r : est l'épaisseur d'une seule couche élastomère et B est la largeur de l'appui.

- Calcul de la rigidité de rotation

La structure considérée dans la figure 4.1a a un poids total $W = 32665.5$ Kn, l'isolateur utilisé est de section carré composé de 12 couches d'élastomères et 11 plaques en acier, les dimensions de l'isolateur sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Dimensions de l'isolateur

Dimensions (mm)	ℓ	ℓ_r	t_u	t_r	B
	222	200	1.00	16.67	1323.2

$$I = \frac{B^4}{12} = 0.255458 \text{ m}^4$$

$$E_0 = 4G = 4 * 2400 = 9600 \text{ Kn/m}^2$$

$$E_r = 9600(1 + 0.742 * (20)^2) = 2858880 \text{ Kn/m}^2$$

$$(EI)_{eff} = 2858880 * 0.255458 \left(\frac{0.222}{0.20} \right)$$

$$(EI)_{eff} = 810659.38 \text{ Kn.m}^2$$

$$P_E = \frac{3.14^2 * 810659.38}{0.222^2} = 162177932.7 \text{ Kn}$$

On néglige la dégradation de la rigidité, donc $\left(1 - C_\theta \frac{s}{l_r}\right) = 0 \implies K_\theta = K_{\theta 0}$

$$K_{\theta 0} = 162177932.7 * 0.222 = 36003501.07 \text{ Kn}$$

$$K_\theta = 36003501.07 \text{ Kn}$$

4.2.3 Détermination de la rigidité de cisaillement

Le calcul de la rigidité de cisaillement est réalisé avec deux méthodes qui sont: la première est la méthode de dimensionnement suivant le code UBC-97 et la deuxième est celle de Filiatrault.

4.2.3.1 Suivant le code UBC

Les détails de dimensionnement de l'isolateur seront donnés pour une autre application dans le chapitre cinq, Pour cette étude les résultats de calcul sont résumés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Les rigidités de l'isolateur suivant le code UBC-97

Rigidité élastique K_1 (Kn/m)	160634.1
Rigidité post élastique K_2 (Kn/m)	16063.41
La force plastique F_y (Kn)	1230.62

4.2.3.2 Suivant la méthode de Filiatrault

Les paramètres clé de cette méthode sont la rigidité initiale, $K_1 = 10 K_2$, la rigidité post élastique K_2 et la charge de plastification F_y . Plusieurs études expérimentales et théoriques (Lee et Medland, 1978, Megget, 1978, Blakeley, 1980, Eisenberg et Rutenberg, 1986), ont démontrées des valeurs raisonnables de la rigidité latérale et la charge de plastification pour un ensemble d'isolateurs [1].

$$K_2 = (1 \text{ à } 2) W$$

$$F_y = (0.05 \text{ à } 0.10) W$$

Avec W : Poids total de la structure en Kn.

K_2 : La rigidité post élastique totale en Kn /m.

F_y : La charge plastique totale en Kn.

Pour cette application, le poids total $W = 32665.5 \text{ Kn}$

$$K_2 = 1 * W = 32665.5 \text{ Kn /m}$$

$$K_1 = 10 * 32665.5 = 326655 \text{ Kn /m}$$

$$F_y = 0.05 * W = 1633.27 \text{ Kn}$$

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant

Tableau 4.3 : les rigidités de l'isolateur suivant la méthode de Filiatrault.

Rigidité élastique K_1 (Kn/m)	326655
Rigidité post élastique K_2 (Kn/m)	32665.5
La force plastique F_y (Kn)	1633.27

4.3 Présentation des résultats

4.3.1 Suivant le code UBC

- *Déplacements*

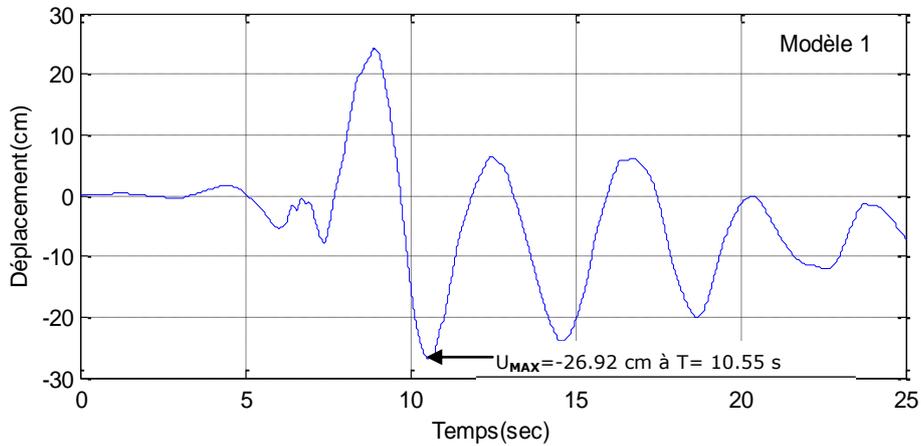


Fig.4.2.a : Déplacement du modèle 1 suivant le code d'UBC

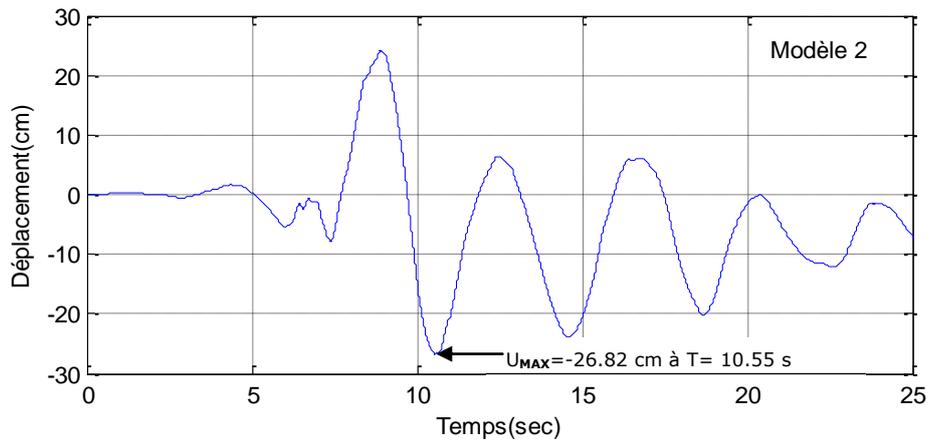


Fig.4.2.b : Déplacement du modèle 2 suivant le code d'UBC

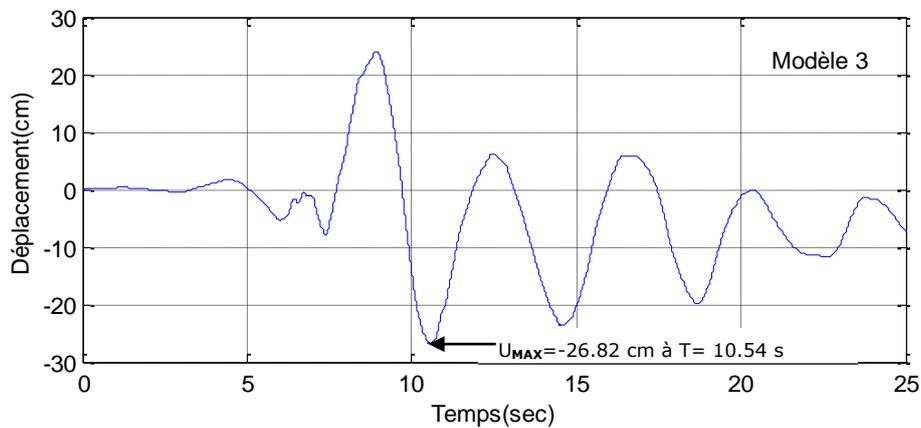


Fig.4.2.c : Déplacement du modèle 3 suivant le code d'UBC

- Accélération

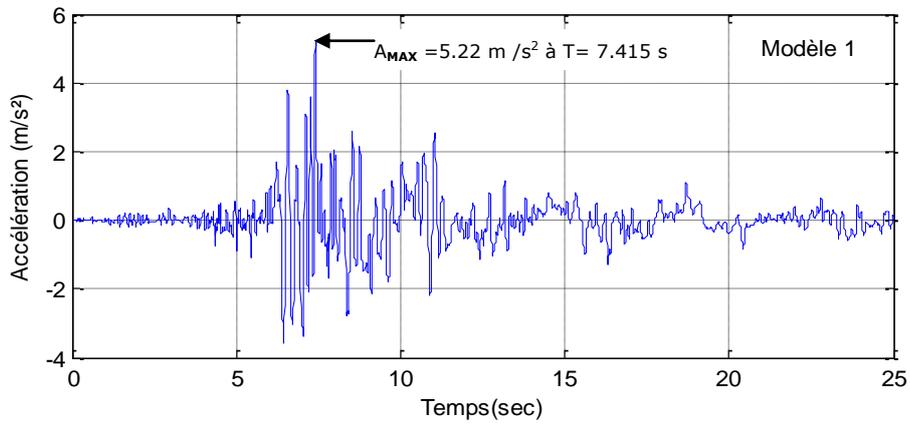


Fig.4.3.a : Accélération du modèle 1 suivant le code d'UBC

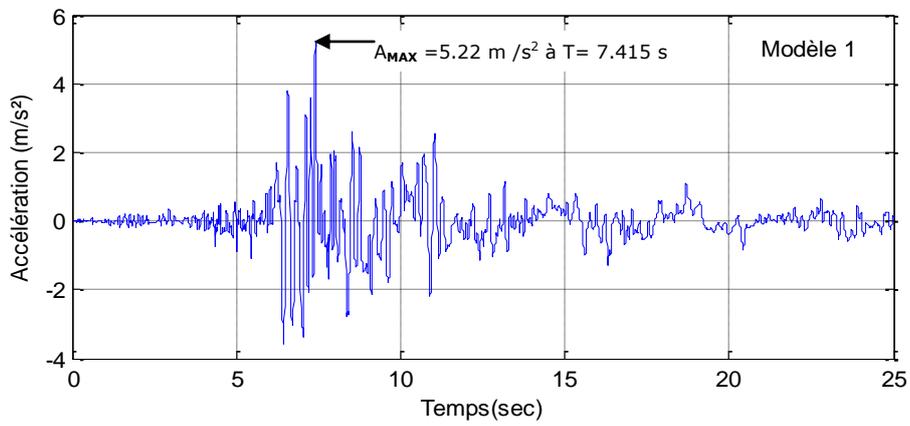


Fig.4.3.b : Accélération du modèle 2 suivant le code d'UBC

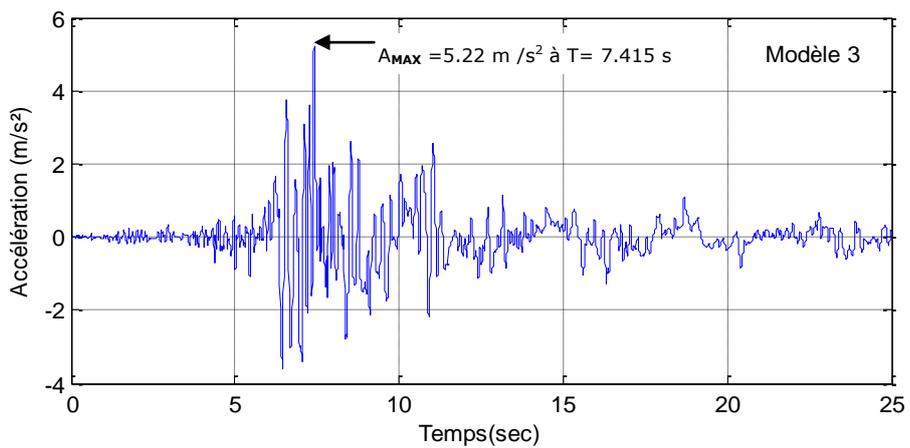


Fig.4.3.c : Accélération du modèle 3 suivant le code d'UBC

- Effort de cisaillement à la base

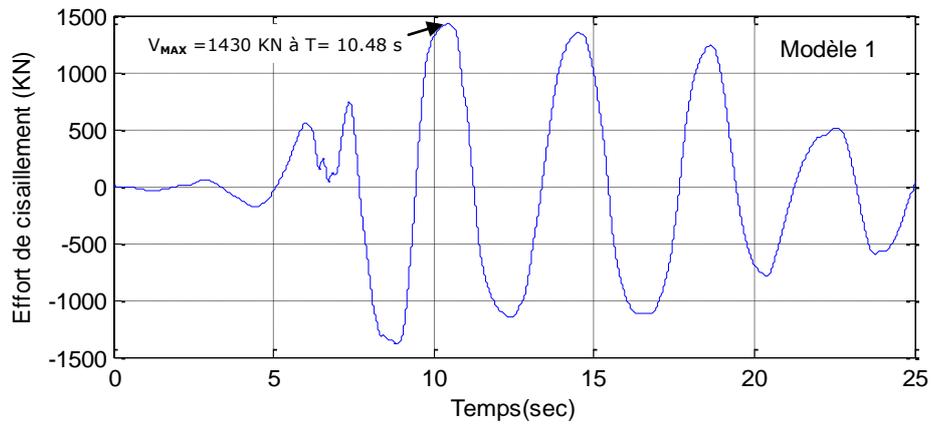


Fig.4.4.a : Effort de cisaillement du modèle 1 suivant le code

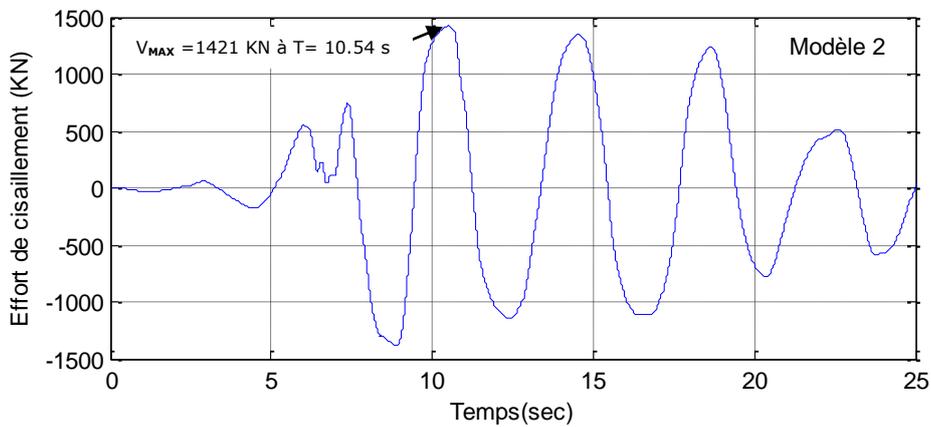


Fig.4.4.b : Effort de cisaillement du modèle 2 suivant le code d'UBC

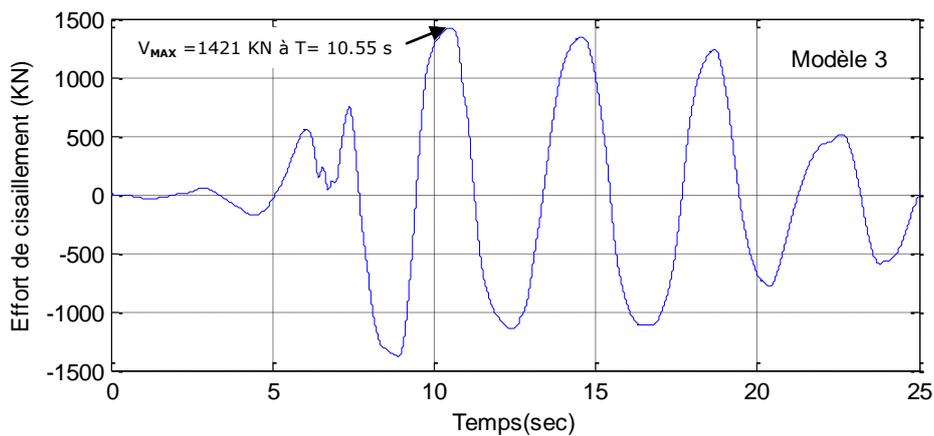


Fig.4.4.c: Effort de cisaillement du modèle 3 suivant le code d'UBC

- Boucle d'hystérésis

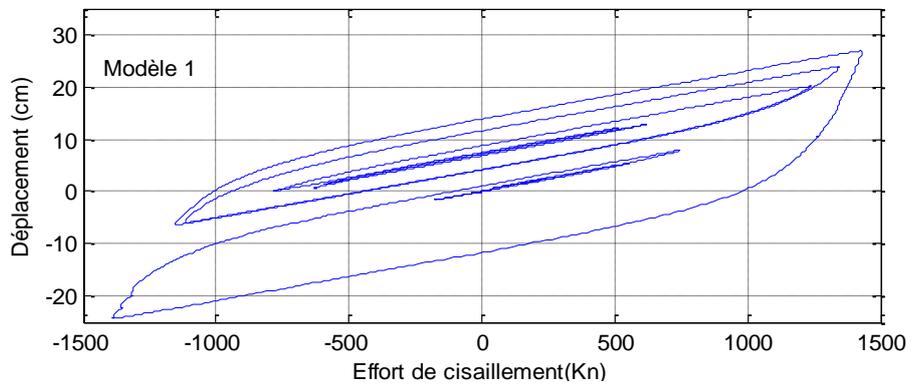


Fig.4.5.a : Boucle d'hystérésis du modèle 1 suivant le code UBC

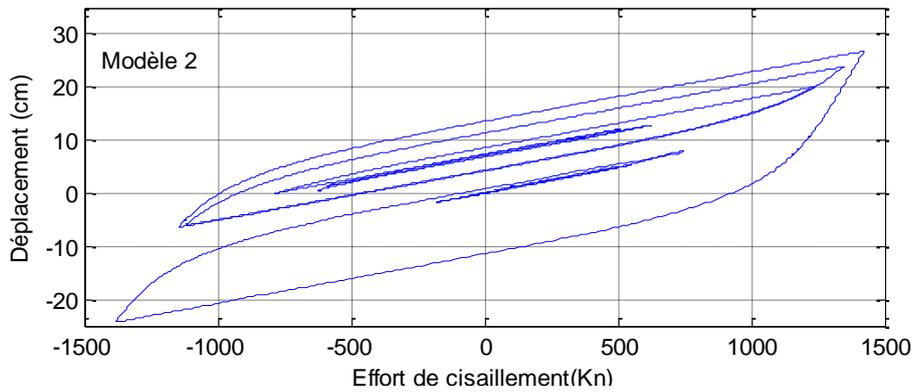


Fig.4.5.b : Boucle d'hystérésis du modèle 2 suivant le code UBC

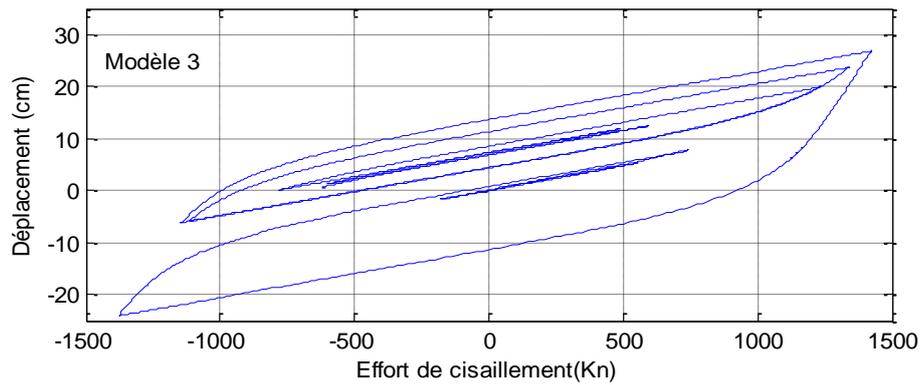


Fig.4.5.c : Boucle d'hystérésis du modèle 3 suivant le code UBC

4.3.2 Les résultats du model Filiatrault

- *Déplacements*

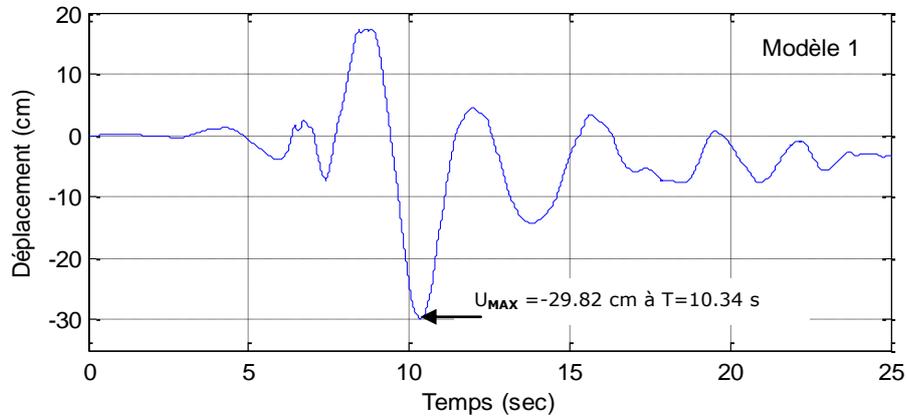


Fig.4.6.a : Déplacement du modèle 1 suivant la méthode de Filiatrault

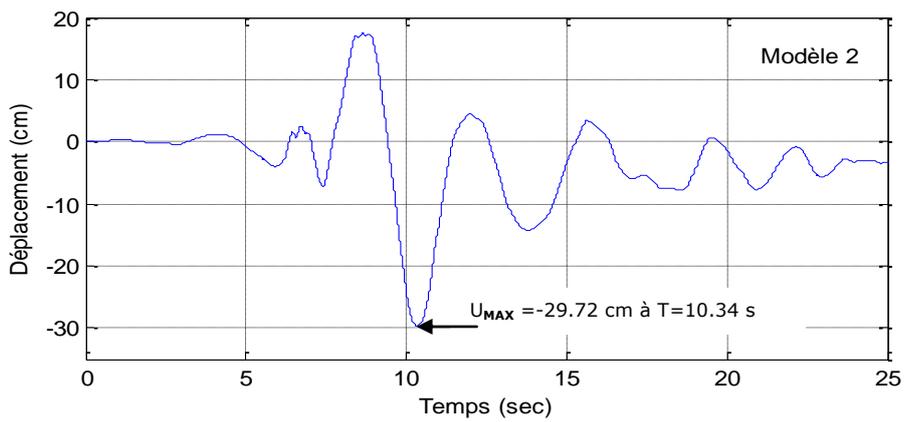


Fig.4.6.b : Déplacement du modèle 2 suivant la méthode de Filiatrault

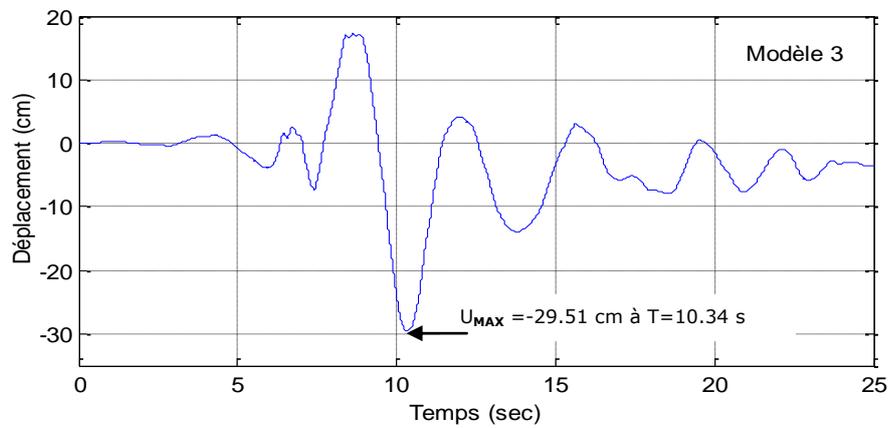


Fig.4.6.c : Déplacement du modèle 3 suivant la méthode de Filiatrault

- Accélération

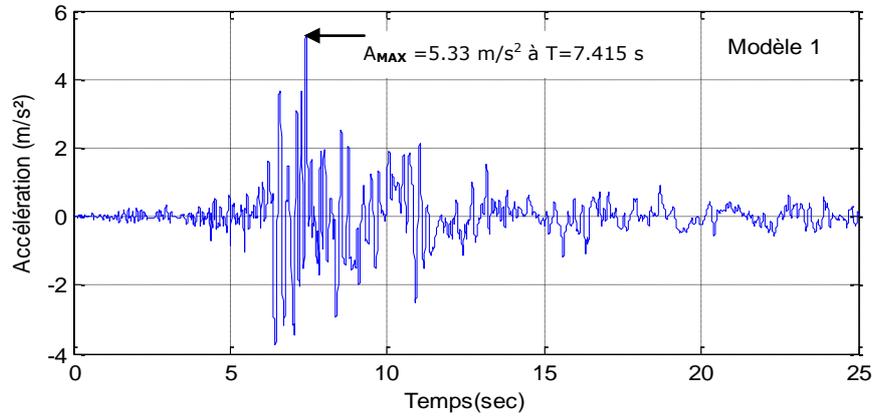


Fig.4.7.a : Accélération du modèle 1 suivant la méthode de Filiatrault

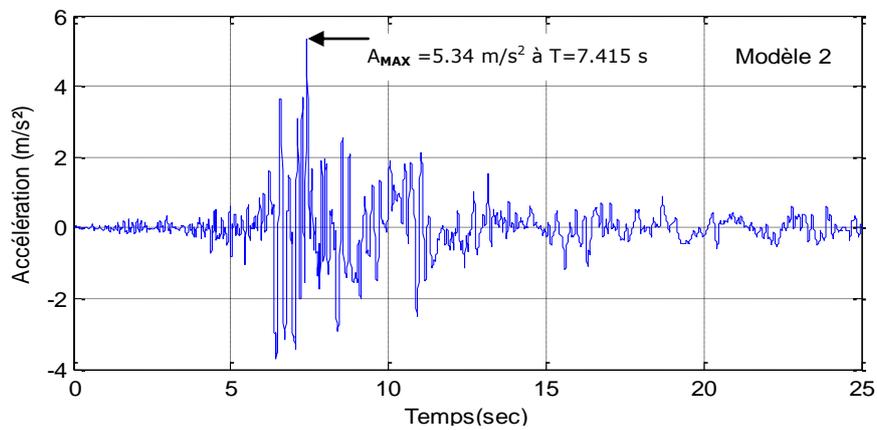


Fig.4.7.b : Accélération du modèle 2 suivant la méthode de Filiatrault

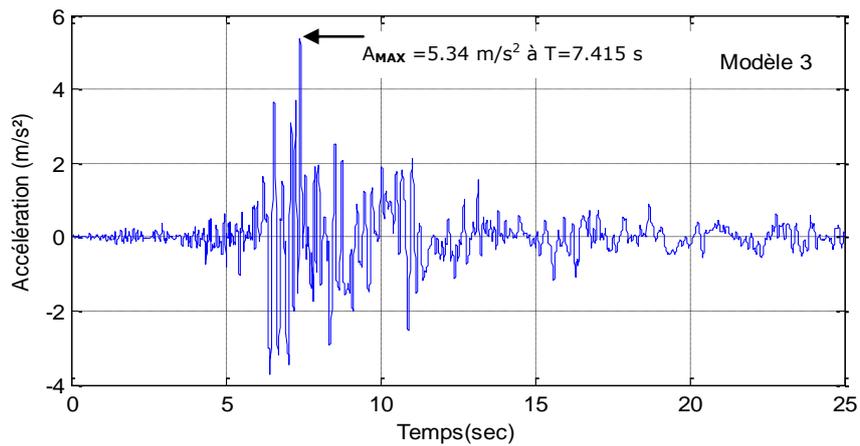


Fig.4.7.c : Accélération du modèle 3 suivant la méthode de Filiatrault

- Effort de cisaillement à la base

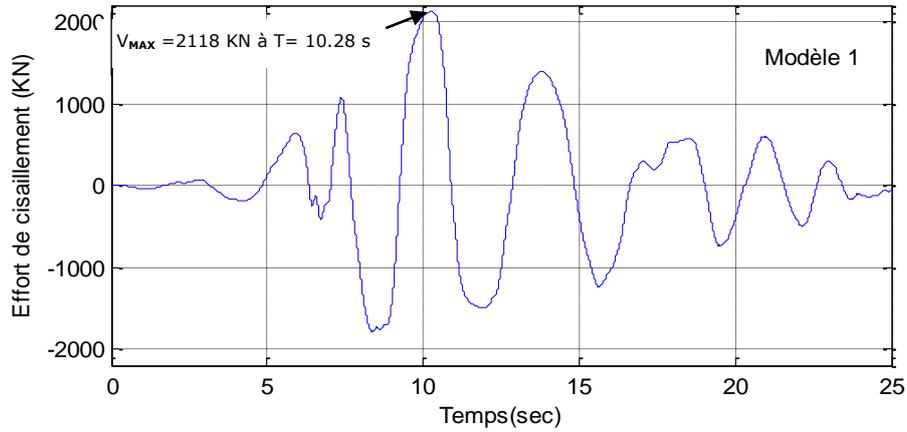


Fig.4.8.a : Effort de cisaillement du modèle 1 suivant la méthode de Filiatrault

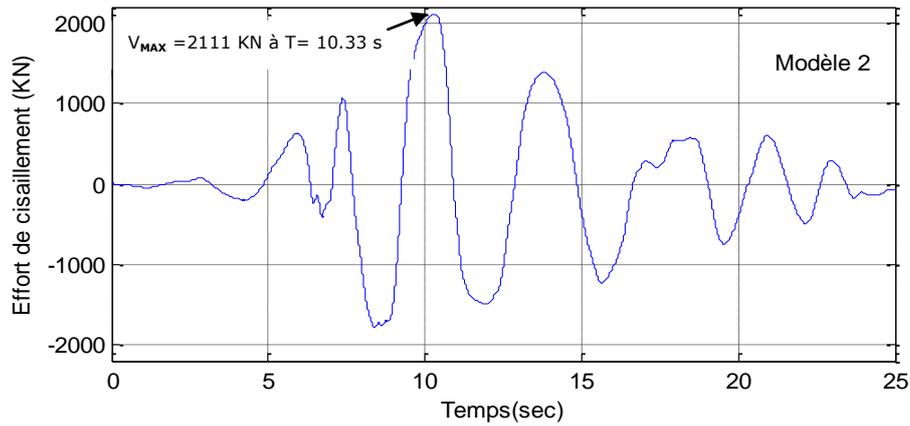


Fig.4.8.b : Effort de cisaillement du modèle 2 suivant la méthode de Filiatrault

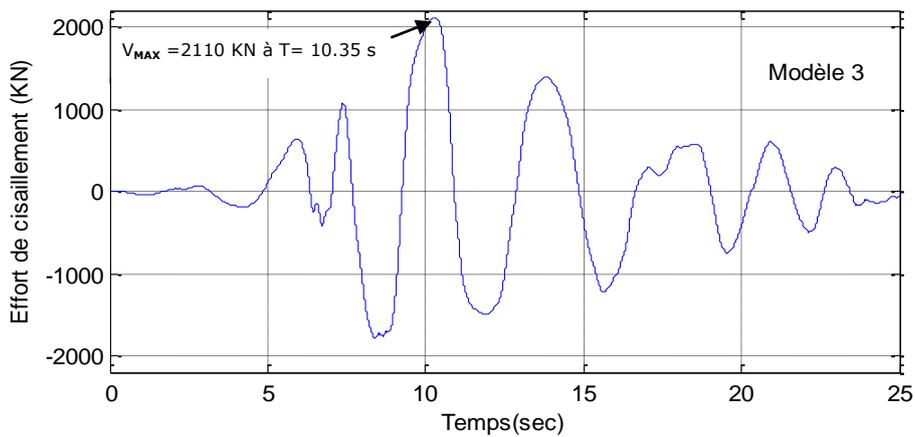


Fig.4.8.c : Effort de cisaillement du modèle 3 suivant la méthode de Filiatrault

- Boucle d'hystérésis

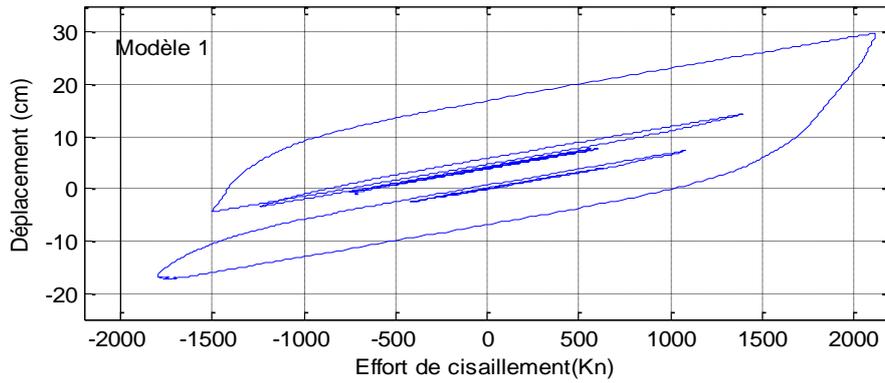


Fig.4.9.a : Boucle d'hystérésis du modèle 1 suivant la méthode de Filaitrault

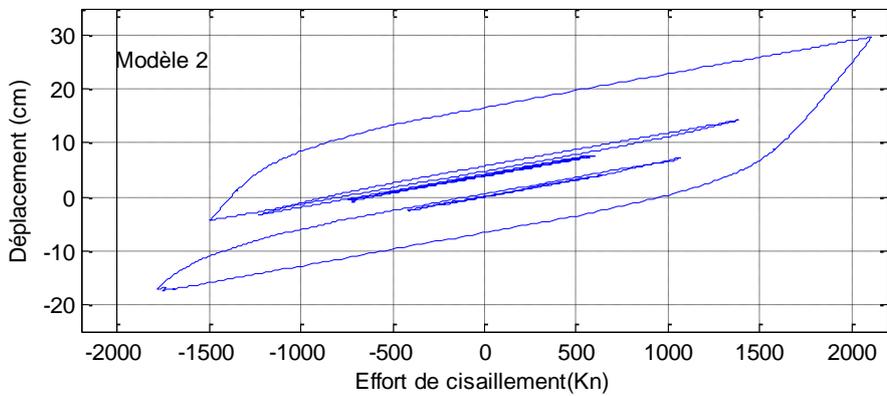


Fig.4.9.b : Boucle d'hystérésis du modèle 2 suivant la méthode de Filaitrault

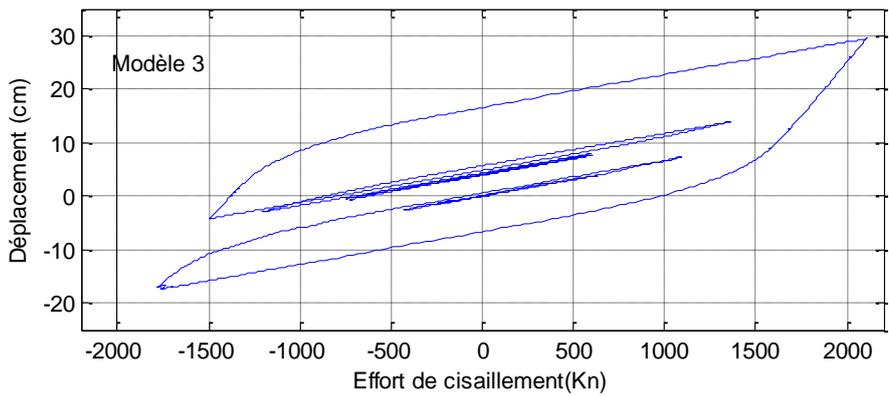


Fig.4.9.c : Boucle d'hystérésis du modèle 3 suivant la méthode de Filaitrault

On remarque que ces figures présentent pratiquement la même allure et donnent sensiblement les mêmes pics qui se produisent aux mêmes instants pour les déplacements et les accélérations. Pour les efforts de cisaillement à la base, il y a une petite différence.

On remarque aussi que ya un déplacement résiduel au niveau des isolateurs.

On résume dans le Tableau 4.4, les valeurs maximales des déplacements, des accélérations et les efforts de cisaillements ainsi que les écarts relatifs max.

Tableau 4.4 : Déplacements, accélérations maximums et effort de cisaillement à la base

	Suivant le code UBC-97				Suivant la méthode de Filiatrault			
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Ecart relatif max %	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Ecart relatif max %
Déplacement max en (cm)	-26.92	-26.82	-26.82	0.37	-29.82	-29.72	-29.51	1.04
Accélération max (m/s ²)	5.22	5.23	5.22	0.19	5.33	5.34	5.34	0.18
Effort de cisaillement (KN)	1430	1421	1421	0.63	2118	2111	2110	0.37

L'écart relatif entre les trois modèles ne dépasse pas 1.5% suivant la méthode de Filiatrault et se réduit à un maximum de à 0.63% suivant le code UBC-97.

La rigidité rotationnelle définie dans le modèle 3 n'influx pas sur les résultats obtenus avec les deux autres modèles, elle joue un seul rôle c'est de montrer la déformée des couches de l'isolateur.

La surface de la boucle d'hystérésis (la relation entre l'effort de cisaillement et le déplacement) est l'énergie absorbée par cycle, W_D qui est donnée en fonction de la force Q , celle-ci est en fonction de F_y par la relation : $F_y = Q + K_2 D_y$, donc plus F_y augmente plus la surface de la boucle d'hystérésis augmente, ce qui explique l'augmentation de l'effort de cisaillement pour la méthode de Filiatrault.

CHAPITRE 5 ETUDE DE LA REPOSE DYNAMIQUE DES STRUCTURES ISOLEE ET ENCASTREE

5.1 Introduction

Les séismes de Chlef de 1980 (magnitude 7.3) et celui de Boumerdès de 2003 (magnitude 6.8), ainsi que les secousses enregistrées depuis 2003 d'une magnitude allant jusqu'à 5,2 et dont l'épicentre a été localisé en mer, à 9 km au nord-est de Zemmouri montre à quel point est exposé le nord algérien.

Le but de cette application est d'étudier les performances et les mécanismes de réponse des structures isolées à la base. Deux types de bâtiments différents sont employés.

Le SAP2000, est employé pour l'analyse 3D des structures. Les structures utilisées pour cette étude sont : une structure à trois niveaux et à huit niveaux, Les descriptions détaillées des bâtiments sont:

5.2 Présentation des structures

5.2.1 Bâtiment symétrique a trois niveaux

Le bâtiment à trois niveaux à un plan régulier (36m x 12m) suivant les indications de la figure 5.1, le système structurel est en béton armé avec des poteaux identiques de 50*50 cm, et des poutres de dimension 40/70 cm. La hauteur de l'étage est de 3.06 m.

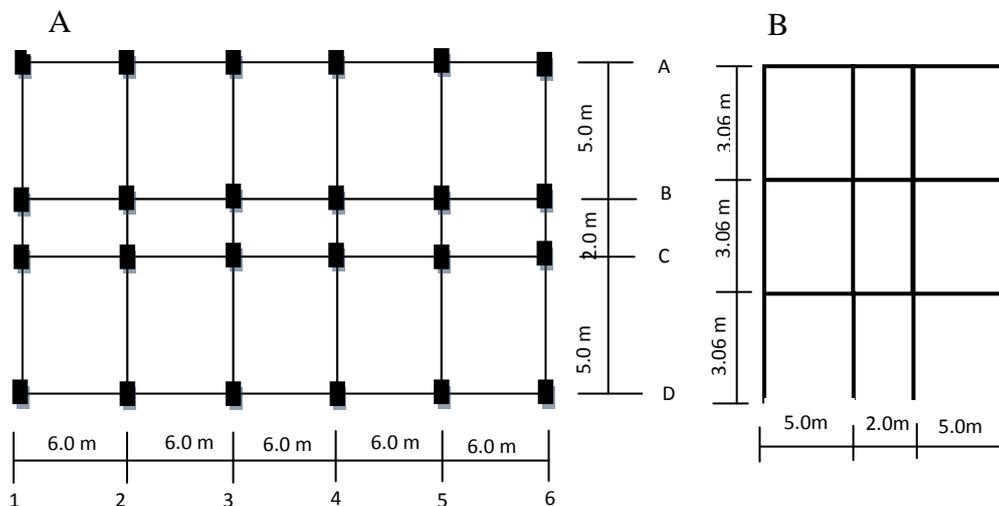


Fig.5.1 : A - Vue en plan du bâtiment, B -Vue de coupe du bâtiment

5.2.1.1 Description du système d'isolation et l'excitation sismique

Le système d'isolation consiste en 24 appuis en élastomère à amortissement élevé, placés d'une façon concentrique sous chaque poteau, ils sont les dispositifs les plus utilisés généralement, ainsi les nombreuses études ont mesuré leur propriétés et leur comportements. La figure 5.2 décrit les dimensions finales de l'isolateur choisi. L'excitation sismique considérée, pour ces structures encastrée et isolée, est la composante transversale du séisme de Dar el Beida.

5.2.1.2 Méthode de dimensionnement des dispositifs d'isolation selon l'UBC-97

- Les étapes de dimensionnement de l'isolateur

Les données structurelles de base à adopter pour la conception du système d'isolation sismique pour ce bâtiment sont :

$$T_D = 2.50 \text{ sec}$$

$$T_M = 2.90 \text{ sec}$$

$$R = 2.00$$

$$G = 500 \text{ KN/m}^2$$

$$K = 2000 \text{ MPa}$$

$$\beta_i = 15 \%$$

$$W_T = 37248 \text{ KN}$$

$$\gamma_{\max} = 150\%$$

Pour une zone sismique de type III, le coefficient de zone sismique Z est :

$$Z = 0.3$$

Type de la faille sismique est de type A

La faille active est environ ~10 km du site, donc après calcul on aura :

$$N_a = 1$$

$$N_v = 1.2$$

$$Z N_v = (0.3) * (1.2) = 0.36$$

Interpolant MM dans la fig.3.6 ou tableau A-16-D, On aura

$$M_M = 1.35$$

Pour $Z = 0.3$ et type de sol, qui est S_D ,

$$C_v = C_{VD} = 0.54 \quad \text{et} \quad C_A = C_{AM} = 0.36$$

Pour $M_M Z N_v = (1.35) * (0.36) = 0.486 \geq 0.4$, on doit multiplier la valeur trouvée par un coefficient qui est déterminé par l'UBC (Tableau A-16-G) en fonction du type de sol. On retrouve le coefficient sismique C_{VM} :

$$1.6 * M_M Z N_v = 0.777$$

$$C_{VM} = 0.777$$

Pour $M_M Z N_a = (1.35) * (0.3) = 0.405 \geq 0.4$, on doit multiplier la valeur trouvée par un coefficient qui est déterminé par l'UBC (Tableau A-16-F) en fonction du type de sol. On retrouve le coefficient sismique C_{AM} :

$$1.1 * M_M Z N_a = (1.35) * (0.405) = 0.445$$

$$C_{AM} = 0.445$$

Pour une poutre de moment de résistance ordinaire, $R_I = 2$

Pour un amortissement de 15%, on a : $B_D = B_M = 1.35$

T_D , T_M sont les périodes du système d'isolation correspondant au déplacement minimal et maximal. On prend :

$$T_D = 2.5 \text{ sec} \quad \text{et} \quad T_M = 2.7 \text{ sec}$$

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{D,\min} g}}$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M,\min} g}}$$

Le poids total du bâtiment est estimé à $W = 14103 \text{ KN}$ approximativement, On calcule les rigidités K_D et K_M à partir des deux équations définies précédemment

$$K_{D,\min} = \frac{4\pi^2}{T_D^2} \frac{W}{g} \quad \text{et} \quad K_{M,\min} = \frac{4\pi^2}{T_M^2} \frac{W}{g}$$

$$K_{D,\min} = \frac{4\pi^2}{2.5^2} \frac{14103}{9.81} = 9071.555 \text{ Kn/m}$$

$$K_{M,\min} = \frac{4\pi^2}{2.7^2} \frac{14103}{9.81} = 7777.39 \text{ Kn/m}$$

Pour chaque isolateur

$$K_{M,\min} = \frac{9071.555}{24} = 377.98 \text{ KN/m}$$

$$K_{M,\min} = \frac{7777.39}{24} = 324.06 \text{ KN/m}$$

Estimation des déplacements D_D et D_M

$$D_D = \frac{(g/4\pi^2) C_{VD} T_{MD}}{B_D}$$

$$D_M = \frac{(g/4\pi^2) C_{VM} T_M}{B_M}$$

$$D_D = \frac{9.81}{4\pi^2} \frac{0.54}{1.35} \frac{2.5}{1.35} = 0.2487 \text{ m}$$

$$D_M = \frac{9.81}{4\pi^2} \frac{0.777}{1.35} \frac{2.7}{1.35} = 0.3865 \text{ m}$$

Le code exige la conception pour une excentricité accidentelle de 5%

$$e = 0.05 * 30 = 1.5 \text{ m}$$

Estimation du déplacement total, D_{TD} et D_{TM}

$$D_{TD,M} = D_{D,M} \left(1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right)$$

$$1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} = 1 + \frac{12}{2} \frac{12 * 1.5}{30^2 + 12^2} = 1.1034 \text{ m}$$

$$D_{TD} = 1.1034 (0.2487) = 0.2744 \text{ m}$$

$$D_{TM} = 1.1034 (0.3865) = 0.4264 \text{ m}$$

Calcul de l'épaisseur des couches du caoutchouc t_r

$$t_r = \frac{D_D}{\gamma_{\max}}$$

$$t_r = \frac{0.2487}{1.5} = 0.1658 \text{ m} \quad \text{On prend } t_r = 200 \text{ mm}$$

A partir de l'équation de la rigidité horizontale, on calcul la surface de l'isolateur

$$K_H = \frac{G A}{t_r}$$

$$A = \frac{t_r K_H}{G} = \frac{0.2 * 377.98}{500} = 0.1512 \text{ m}^2$$

Pour un isolateur circulaire, on retrouve son diamètre à partir de :

$$A = \frac{\pi}{4} \phi^2$$

$$\phi = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{0.1512}{\pi}} = 0.438 \text{ m}$$

$$\phi = 440 \text{ mm}$$

On vérifie la rigidité réelle de l'appui et la période fondamentale

$$A = \frac{\pi}{4} \phi^2 = \frac{3.14 * 0.440^2}{4} = 0.15197 \text{ m}^2$$

$$K_{D,\min} = \frac{0.15197 * 500}{0.2} = 379.94 \text{ KN/m}$$

$$K_{D,\min} = 379.94 * 24 = 9118.56$$

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_D g}} = 2\pi \sqrt{\frac{14103}{397.40 * 24 * 9.81}} = 2.49 = 2.5 \text{ s}$$

$$K_H = \frac{4\pi^2}{2.5^2} \frac{14103}{9.81} = 9071.55 \text{ KN/m}$$

$$K_H = 377.98 \text{ KN/m}$$

L'isolateur est modélisé comme un élément bilinéaire, avec trois paramètres essentielles :

K_1, K_2 et Q

$$W_D = 2\pi * (377.98) * (0.2487)^2 * (0.15) = 22.022 \text{ KN.m}$$

$$Q = \frac{W_D}{4D} = \frac{22.022}{4 * 0.2487} = 22.137 \text{ KN}$$

$$K_2 = K_{\text{eff}} - \frac{Q}{D} = 377.98 - \frac{22.137}{0.2487} = 288.96 \text{ KN/m}$$

$$K_1 = 10 K_2 = 2889.6 \text{ KN/m}$$

La fréquence horizontale w_H qui alternativement est liée à la rigidité horizontale K_H à travers :

$$w_H^2 = \frac{K_H}{W} g$$

$$T_H = \frac{2\pi}{w_H}$$

$$w_H^2 = \frac{377.98 * 24}{14103} * 9.81 = 6.31 \text{ sec}^{-2}$$

$$w_H = 2.511 \text{ rad/sec}$$

$$T_H = 2.5 \text{ sec}$$

On sélectionne la fréquence verticale $f_v=10 \text{ Hz}$, puis à partir $6S^2 = \frac{f_v^2}{f_H^2}$ et résolvant pour S ,
Tel que, S : facteur de forme ($5 \leq S \leq 30$)

$$S = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{f_v}{f_H} = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{10}{1/2.5} = 10.20 \quad \text{On prend } S = 10$$

$$S = \frac{\phi}{4t}$$

$$t = \frac{\phi}{4S} = \frac{440}{4*10} = 11 \text{ mm}$$

$$nt = 200 \text{ mm} \quad n = 18.18 \text{ donc on prend } n = 18$$

$$n = 18 \quad t = 11.11 \text{ mm}$$

Par conséquent, ceci nous permet de décrire la conception de l'isolateur suivant les indications dans la figure 5.2, les plaques d'extrémité ont 25mm d'épaisseurs, et les plaques en acier sont 2mm chacune. La hauteur totale de l'appui est :

$$h = (2 * 25) + 200 + (17 * 2) = 284 \text{ mm}$$

Les plaques en acier auront un diamètre de $\phi_s = 430 \text{ mm}$, donnant 5mm pour la plaque de couverture.

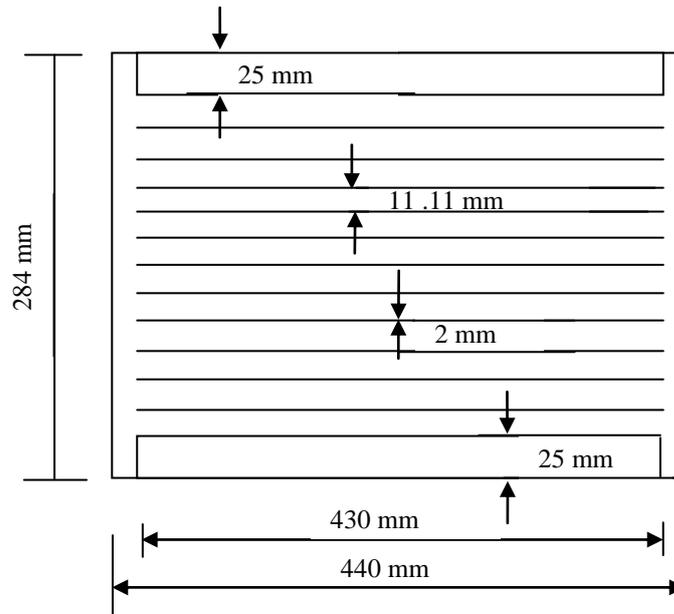


Fig.5.2 : les dimensions de l'isolateur finales

5.2.1.3 Comparaison des résultats

- *Périodes propres*

Les périodes obtenues pour les deux types de structures sont présentées sur le tableau 5.1a, ces résultats montrent que les périodes correspondant aux modes isolés sont augmentés en moyenne de 70 %, ce qui montre que l'effet de l'isolation à la base est d'assouplir le bâtiment.

Tableau 5.1.a : Périodes de la structure avec et sans le système de l'isolation

Mode	Période en sec	
	Structure isolée	Structure conventionnelle
1	1.0220	0.3061
2	1.0193	0.2959
3	0.8770	0.2659

- **Accélérations et déplacements**

Tableau 5.1 b : Accélération et déplacement maximaux de la structure isolée et encastrée

Niveau	Structure encastrée		Structure isolée	
	Accélération maximale m/s ²	Déplacement maximal cm	Accélération maximale m/s ²	Déplacement maximal cm
3	21.78	4.70	5.33	24.85
2	16.55	3.57	5.30	24.71
1	7.77	1.68	5.24	24.43
0			5.16	23.94

Les réponses maximales en accélération et déplacement des différents niveaux des structures encastrées et isolées sont présentées sur le tableau 5.1.b, la comparaison de ces résultats nous montre que le système d'isolation a fait diminuer l'accélération du dernier niveau de 75.52%
Les figures suivantes présentent la réponse dynamique du dernier niveau des structures encastrée et isolée sous l'excitation sismique de Dar el Beida

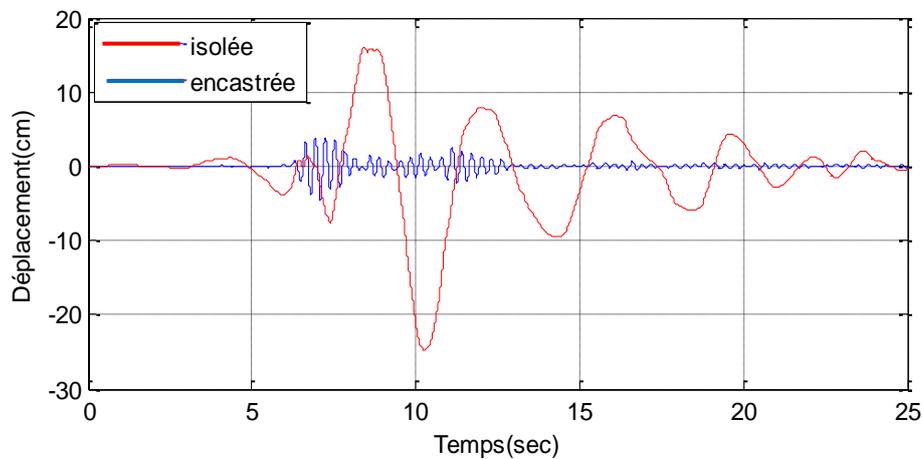


Fig.5.3 a : Déplacement du dernier niveau

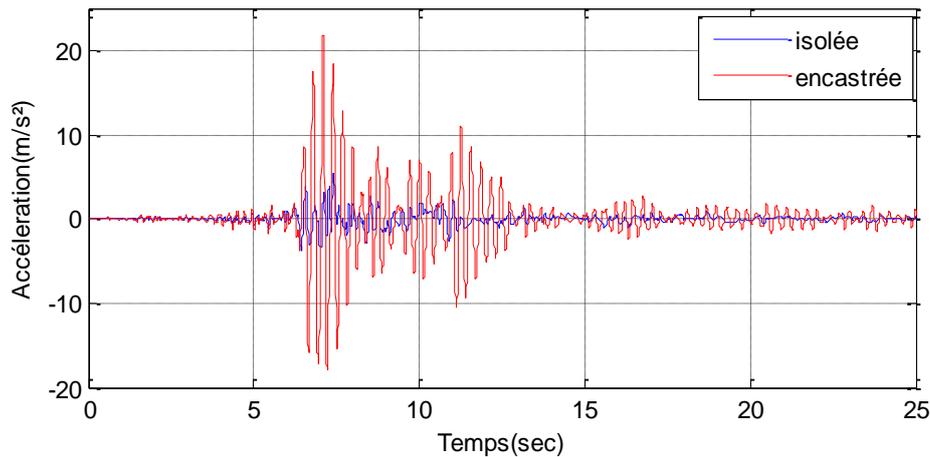


Fig.5.3.b : Accélération du dernier niveau

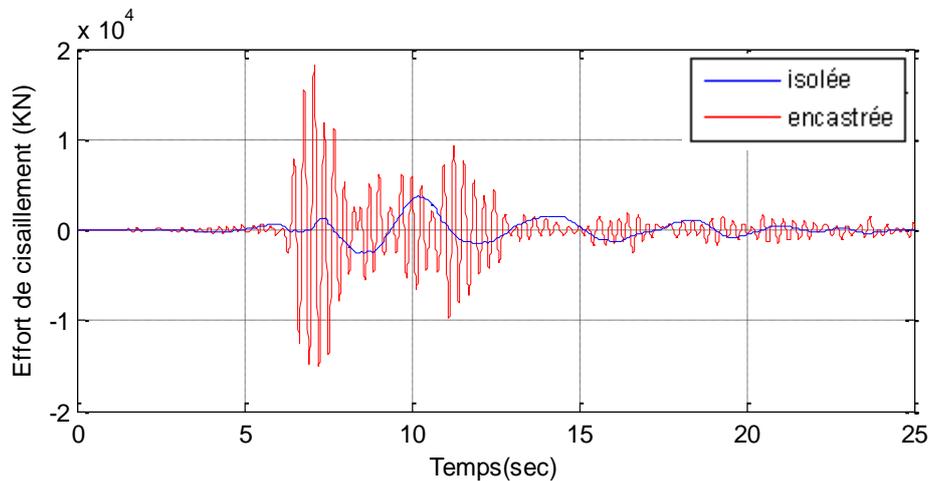


Fig.5.3.c: Effort de cisaillement à la base

5.2.2 Bâtiment à huit niveaux

Pour montrer l'efficacité de l'isolation sismique pour une structure en béton armé à huit niveaux endommagée par le séisme de Boumerdes. On a comparé les accélérations, les déplacements et l'effort tranchant à la base de la structure telle quelle a été conçue sans isolation avec ceux quelle aurait subit si elle a été isolée. De plus une étude numérique permettant de définir un facteur de réduction d'efforts tranchant dû à l'isolation sismique a été effectuée.

5.2.2.1 Présentation de la structure

La structure est un bâtiment à huit niveaux en béton armée de forme en plan rectangulaire de $8 \times 20 \text{ m}^2$ comportant cinq travées suivant un côté et deux travées suivant l'autre côté. Les

poutres sont de $30 \times 40 \text{ cm}^2$, les poteaux du RDC sont de $60 \times 60 \text{ cm}^2$ et la hauteur d'étage est de 3.06 m, comme le montre la figure 5.4.

A : vue réelle de la structure



B: modèle 3D de la structure modélisée

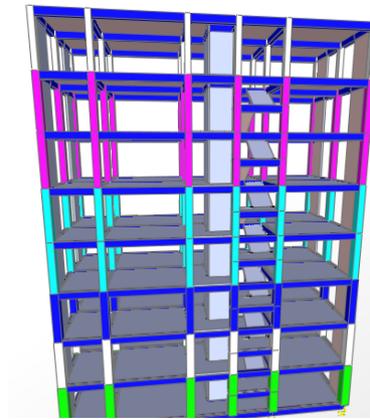


Fig.5.4 : Photo de la Vue globale de la structure

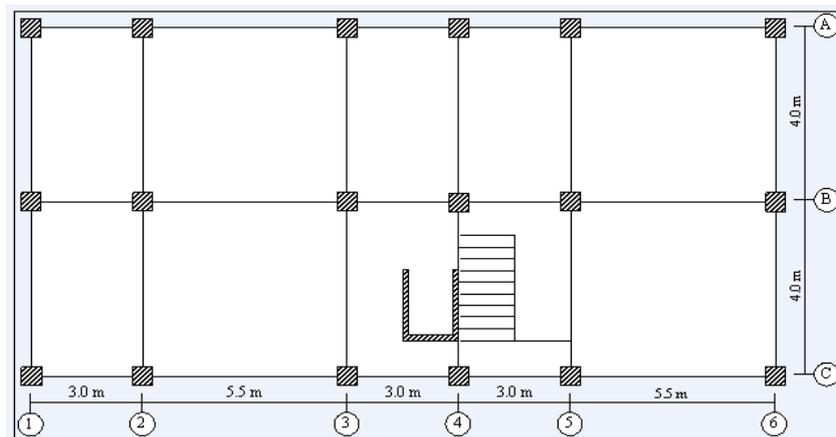


Fig.5.5 : Vue en plan de la structure

La figure 5.6 représente quelques dommages subits par la structure

Poteau C5



Fig.5.6 : Dommages subits par la structure

5.2.2.2 Description du système d'isolation et l'excitation sismique

Le système d'isolation consiste en 22 appuis en caoutchouc à amortissement élevé (18 + 4 appui pour l'ascenseur), placés d'une façon concentrique sous chaque poteau. L'excitation sismique considérée, pour les deux types de structures encastrée et isolée, est les composantes transversales et longitudinales du séisme de Dar el Beida.

5.2.2.3 Méthode de dimensionnement des dispositifs d'isolation selon l'UBC-97

Les caractéristiques du système d'isolation sont résumées dans le tableau 5.2

Tableau 5.2 : Paramètres de conception sismiques

Zone 2a : coefficient de zone sismique Z	0.15
Le type de profile de sol	S _E
Le type de la faille	A
La faille active est environ	≈7 km
Le coefficient MM	1.646
Facteur dépendant de la proximité de la faille, N _a	1.30
Facteur dépendant de la proximité de la faille, N _v	1.61
Coefficient sismique, C _A	0.3
Coefficient sismique, C _V	0.5
M _M ZN _a	0.321
M _M ZN _v	0.397
Coefficient sismique, C _{AM}	0.34
Coefficient sismique, C _{VM}	0.95
Coefficient d'amortissement, B _{D,M}	1.35

Après le calcul on retrouve les rigidités et les dimensions de l'isolateur utilisé pour cette analyse (tableau 5.3 et figure 5.7)

Tableau 5.3 : Les rigidités de l'isolateur.

Les rigidités	
K ₁ (KN/m)	3576.3
K ₂ (KN/m)	357.63
F _y (KN)	28.15

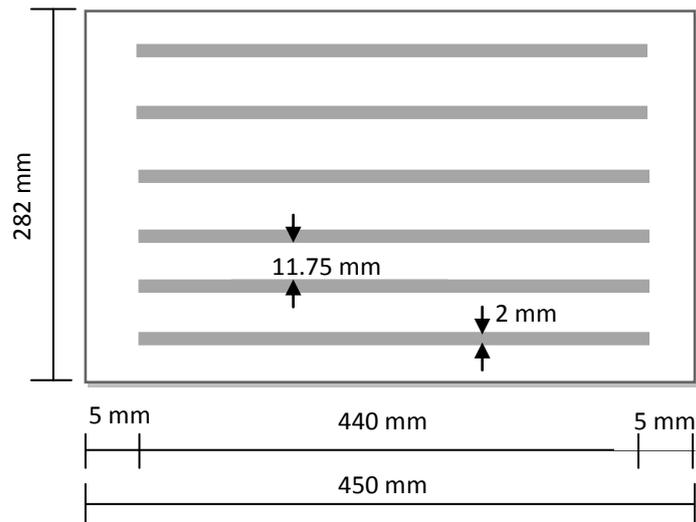


Fig.5.7 : les dimensions de l'isolateur final

2.2.2.4 Comparaison des résultats

- *Périodes propres*

Les périodes obtenues pour les deux types de structures sont présentées sur le tableau 5.4, ces résultats montrent que les périodes correspondant aux modes isolés sont augmentés en moyenne de 58%, ce qui montre que l'effet de l'isolation à la base est d'assouplir le bâtiment.

Tableau 5.4 : Périodes de la structure avec et sans le système de l'isolation

Mode	Période en sec	
	Structure isolée	Structure conventionnelle
1	1.73683	0.72691
2	1.33938	0.62436
3	0.83922	0.55595
4	0.40033	0.24881
5	0.35175	0.19413
6	0.02203	0.17306
7	0.01262	0.14208
8	0.01227	0.10276

- **Accélérations et déplacements**

Tableau 5.5 : Accélération et déplacement maximaux de la structure isolée et encastrée

- Suivant la direction transversale

Niveau	Structure conventionnelle		Structure isolée	
	Accélération maximale m /s ²	Déplacement maximal cm	Accélération maximale m /s ²	déplacement maximal cm
8	11.17	5.00	5.31	14.82
7	9.17	4.54	5.27	14.55
6	7.35	4.06	5.22	14.26
5	7.42	3.42	5.16	13.94
4	7.76	2.70	5.10	13.60
3	6.56	1.89	5.04	13.24
2	4.32	1.11	4.97	12.86
1	1.69	0.40	4.91	12.47
0			4.84	12.10

Tableau 5.6 : Accélération et déplacement maximaux de la structure isolée et encastrée

- Suivant la direction longitudinale

Niveau	Structure conventionnelle		Structure isolée	
	Accélération maximale m /s ²	Déplacement maximal cm	Accélération maximale m /s ²	déplacement maximal cm
8	11.39	4.40	5.68	25.41
7	8.50	3.86	5.64	24.93
6	7.99	3.27	5.60	24.45
5	9.42	2.63	5.55	21.95
4	9.53	1.96	5.51	23.44
3	8.06	1.30	5.46	22.92
2	5.23	0.72	5.41	22.38
1	2.65	0.25	5.36	21.84
0			5.34	21.41

Les réponses maximales en accélération et déplacement des différents niveaux des structures encastrées et isolées sont présentées sur les tableaux 5.5 et 5.6 pour les deux directions transversale et longitudinale, la comparaison de ces résultats nous montre que le système d'isolation a fait diminuer l'accélération et augmenter le déplacement du dernier niveau, de 50.13% et 82.68% respectivement.

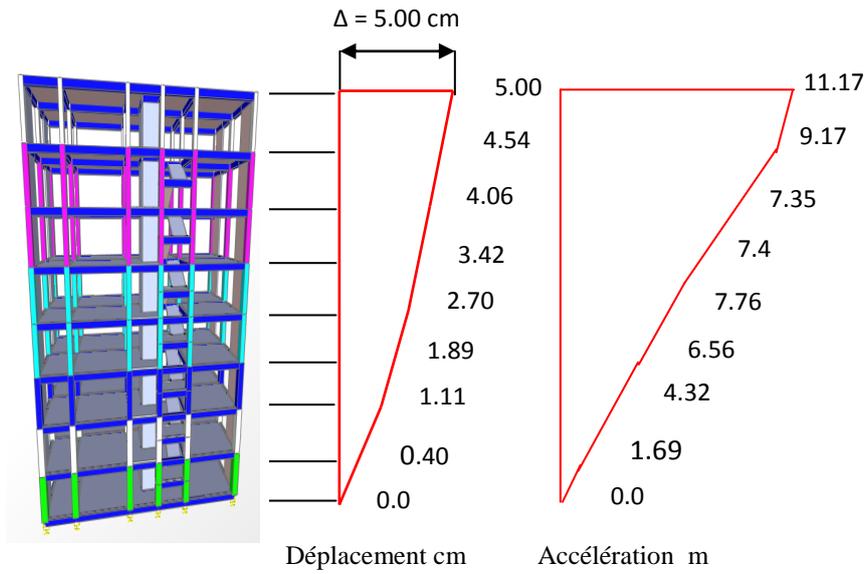


Fig.5.8a : Déplacement et accélération Suivant la direction transversale de la structure conventionnelle

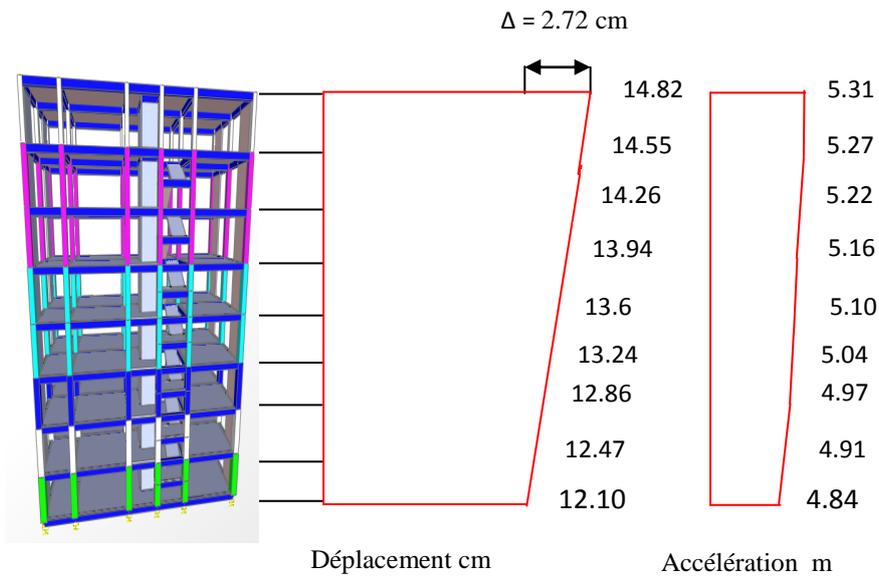


Fig.5.8b : Déplacement et accélération Suivant la direction transversale de la structure isolée

D'après les résultats, il ressort que le rôle des appuis parasismiques est d'assouplir le bâtiment à la base.

Tableau 5.7 : Déplacement inter étages de la structure isolée et encastrée

Déplacement inter étages		
Niveau	Structure isolée cm	Structure conventionnelle cm
8	0.27	0.46
7	0.29	1.48
6	0.32	0.63
5	0.34	0.72
4	0.36	0.81
3	0.38	0.79
2	0.39	0.71
1	0.37	0.40

D'après les résultats du tableau 5.7, on peut dire que la superstructure dans le cas de la structure isolée s'est comportée comme étant un corps rigide.

- **Effort de cisaillement pour le poteau B5,2**

Tableau 5.8 : Effort de cisaillement du poteau B5,2 des deux structures isolée et encastrée

	Structure encastrée	Structure isolée
Effort de cisaillement (KN)	259	50.80

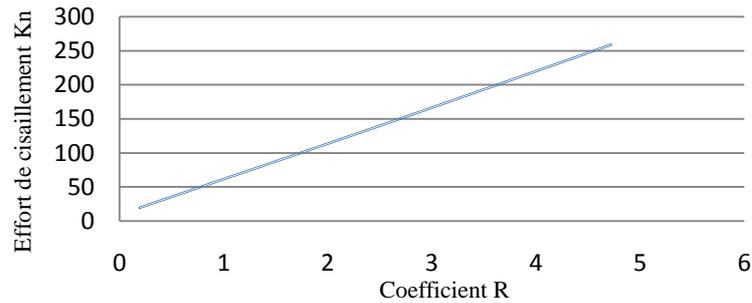
Le tableau 5.8 présente les efforts tranchants dans les bâtiments avec et sans isolation sismique, on remarque que le (poteau B5,2) dans le bâtiment équipé d'isolateur sismique subit un effort tranchant 5 fois plus faible que celui du bâtiment classique ,en conséquence, la construction munie d'isolateurs pourra résister au séisme avec très peu de dommage, au contraire de l'édifice classique qui peut s'effondrer ,En outre, en cas de secousse successives, l'immeuble isolée demeure intact après secousse et reste tout à fait apte à résister à une autre secousse.

Pour ramener l'effort de cisaillement du poteau d'une structure isolée à celui de la structure encastrée à la base, on excite les deux modèles de structure avec l'accélérogramme du séisme de Dar el Beida, on aura les efforts de cisaillement de chaque structure. On fait le rapport des deux efforts pour avoir le premier coefficient R_1 , on le multiplie fois l'accélérogramme, pour trouver un nouvel effort de cisaillement, on refait la procédure suivant la formule suivante, jusqu'à ce que on trouve le même effort pour les deux structure.

$$R_{i+1} = \frac{V_{obji+1}}{V_i} R_i$$

Tableau 5.9 : Effort de réduction R

R	V _{obj}
0.1933	19.82
2.5259	141.6
4.6201	253.7
4.7166	259

**Fig.5.9 : Convergence linéaire**

La figure 5.9 indique que le bâtiment isolée peut être poussé à un effort de cisaillement objectif qui est égale a celui du bâtiment original (encastré à la base), on peut parler alors d'une convergence linéaire entre l'effort de cisaillement et le facteur de réduction R, qui est égale à 5.

- **Capacité des structures**

Le tableau suivant montre la demande en capacité pour le bâtiment original (encastrée) et modifiée (isolé) pour Les trois premiers poteaux à partir de RDC au niveau des escaliers B5 respectivement. La demande est importante pour le bâtiment original qui dépasse1.

Tableau 5.10 : Demande en capacité

Poteaux	Structure isolée	structure conventionnelle
B5,1	0.201	1.159
B5,2	0.209	1.486
B5,3	0.215	1.169

5.3 L'analyse bilinéaire et linéaire

Le but de cette analyse est d'étudier l'effet de la hauteur du bâtiment pour l'isolation sismique et aussi pour étudier et comparer la différence dans les réponses sismiques des structures isolées par les modèles bilinéaires et linéaires équivalents. Quatre types de bâtiments sont préposés. Le système d'isolation consiste en appuis en élastomère à amortissement élevé. On applique à ces bâtiments trois accélérogramme suivant la direction x, celui de Dar el Beida, Azazga et Blida .les spectres de réponse pour les trois accélérogramme sont présentés dans la figure 5.10

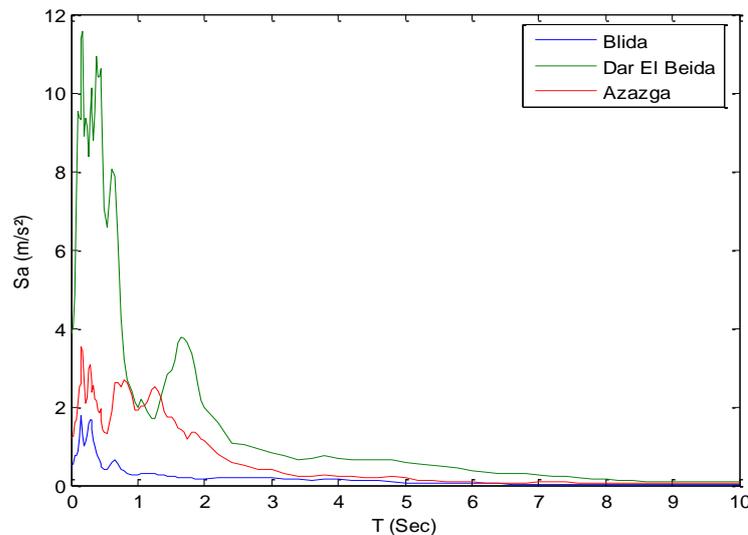


Fig .5.10 : Spectre de réponse des trois accélérogramme

Les caractéristiques de force-déformation non linéaire de l'isolateur peuvent être remplacées par un modèle linéaire équivalent par une rigidité élastique effective et un amortissement effectif. Les paramètres du modèle bilinéaire des isolateurs sont déterminés selon les paramètres du modèle linéaire équivalent qui dépendent de la période de l'amortissement effectif β_{eff} et le déplacement, D.

5.3.1 Description des structures

Les structures utilisées pour cette étude, servent de bâtiments scolaires. Les descriptions détaillées des bâtiments sont :

- **Bâtiment symétrique à trois niveaux (Type 1)** : Le bâtiment symétrique à trois niveaux (Type 1) est l'application de la partie 5.2.1

- **Bâtiment symétrique à cinq niveaux (Type 2)** : Le bâtiment à cinq niveaux à un plan régulier (36m x 12m). Le système structurel est identique au bâtiment à trois niveaux.
- **Bâtiment symétrique à huit niveaux (Type 3)** : Le bâtiment à huit niveaux, le système structurel est identique au bâtiment à trois niveaux.
- **Bâtiment non-symétrique à cinq niveaux (Type 4)** : Le bâtiment non-symétrique à cinq niveaux à un plan régulier (36m x 12m) suivant les indications présentées sur la figure 5.11. Le nombre d'isolateur utilisé pour ce type de structure est 20, qui sont placés sous chaque poteau.

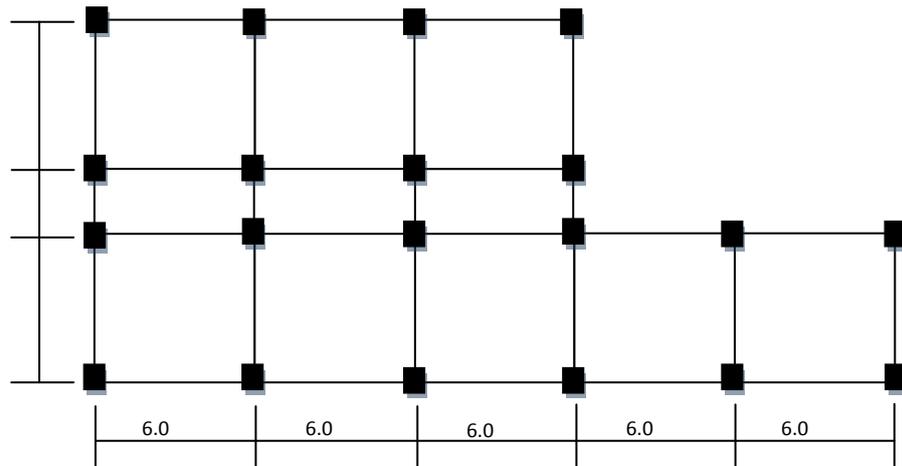


Fig. 5.11 : Vue en plan de bâtiment type 4

Après le calcul on retrouve les rigidités présentées dans le tableau 5.11 pour les quatre types de bâtiments

Tableau 5.11 : Les rigidités de l'isolateur.

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
F_y (kN)	24.66	40.87	63.43	38.41
K_2 (kN/m)	288.97	480.14	763.20	451.34
K_1 (kN/m)	2889.7	4801.4	7632.01	4513.4
K_{eff} (kN/m)	377.98	628.04	998.30	590.37

5.3.2 Comparaison des résultats

- *Période*

Tableau 5.12 : Périodes des structures avec et sans le système de l'isolation

Période en sec									
Type 1		Type 2		Type 3		Type 4			
Modes	isolée	encastrée	isolée	encastrée	isolée	encastrée	isolée	encastrée	
T ₁	1.0220	0.3061	1.0430	0.4982	1.1756	0.7863	1.0194	0.4883	
T ₂	1.0193	0.2959	1.0343	0.4784	1.1541	0.7532	1.0146	0.4747	
T ₃	0.8771	0.2658	0.8103	0.4277	0.8089	0.6816	0.7850	0.4303	

- *Accélérations et déplacements*

- Type 1

Tableau 5.13.a : Accélération et déplacement avec un modèle linéaire équivalent et un modèle bilinéaire

	Accélération maximale			Déplacement maximum		
	isolée		encastrée	isolée		encastrée
	linéaire	Bilinéaire		linéaire	bilinéaire	
Dar el Beida	5.40	5.34	21.78	36.27	24.85	4.70
Azazga	12.92	12.86	37.77	84.88	47.16	7.03
Blida	4.38	4.16	11.27	18.33	10.86	2.93

Les accélérations maximales du dernier étage obtenues par le modèle bilinéaire est de 5.34 m/s², et celle obtenue à partir du modèle linéaire équivalent est 5.40 m/s², on les compare à celle retrouvée pour la structure encastée à la base, qui est de 21.78 m/s², le système d'isolation a fait diminuer l'accélération de 75.48 % entre la structure isolée avec le modèle bilinéaire et la structure encastée et de 1.11 % entre la structure isolée avec le modèle bilinéaire et le modèle linéaire équivalent.

D'une part, le déplacement maximum de la structure isolée obtenu par le modèle bilinéaire est 24.85 cm, tandis que, celui obtenu à partir du modèle linéaire équivalent est 36.27 cm. Ceci implique que le modèle linéaire équivalent surestime le déplacement d'isolateur. On observe

également des résultats similaires pour les deux modèles sous l'effet des accélérogrammes d'Azazga et Blida.

- Type 2

Tableau 5.13.b : Accélération et déplacement avec un modèle linéaire équivalent et un modèle bilinéaire

	Accélération maximale			Déplacement maximum		
	isolée		encastrée	isolée		encastrée
	linéaire	Bilinéaire		linéaire	bilinéaire	
Dar el Beida	5.59	5.38	11.26	34.71	25.83	3.48
Azazga	12.94	12.93	20.78	86.06	47.51	10.57
Blida	4.72	4.403	12.65	16.77	11.13	5.69

- Type 3

Tableau 5.13.c : Accélération et déplacement avec un modèle linéaire équivalent et un modèle bilinéaire

	Accélération maximale			Déplacement maximum		
	isolée		encastrée	isolée		encastrée
	linéaire	Bilinéaire		linéaire	bilinéaire	
Dar el Beida	5.49	5.16	11.96	35.32	22.41	8.09
Azazga	12.42	12.31	34.23	88.03	52.49	52.85
Blida	4.84	4.83	12.40	16.97	11.80	7.44

- Type 4

Tableau 5.13.d : Accélération et déplacement avec un modèle linéaire équivalent et un modèle bilinéaire

	Accélération maximale			Déplacement maximum		
	isolée		encastrée	isolée		encastrée
	linéaire	Bilinéaire		linéaire	bilinéaire	
Dar el Beida	5.68	5.36	11.28	31.61	25.40	3.40
Azazga	12.86	12.90	19.66	84.81	46.25	10.32
Blida	4.99	4.37	13.86	16.90	11.04	6.06

Les figures suivantes présentent la variation des déplacements ainsi que les accélérations en fonction du temps sont données sous l'effet du tremblement de terre Dar el Beida, Azazga et Blida, respectivement.

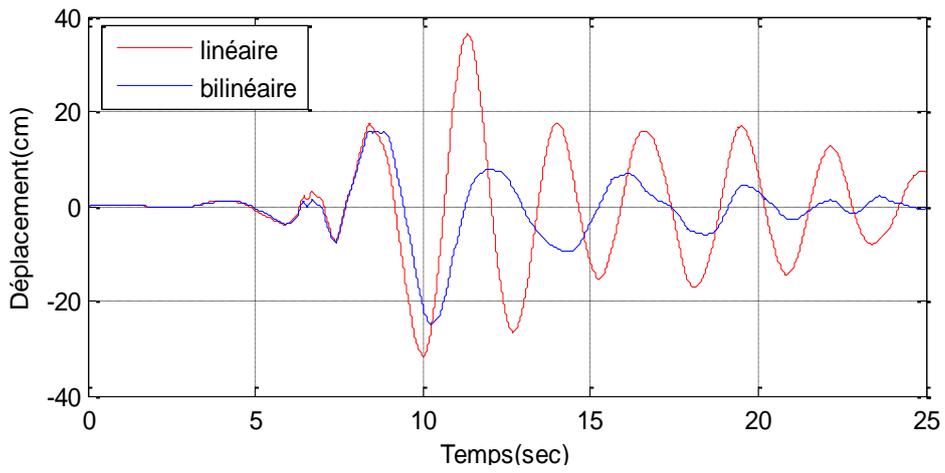


Fig.5.12.a: La réponse en déplacement sous l'effet de Dar El-Beida

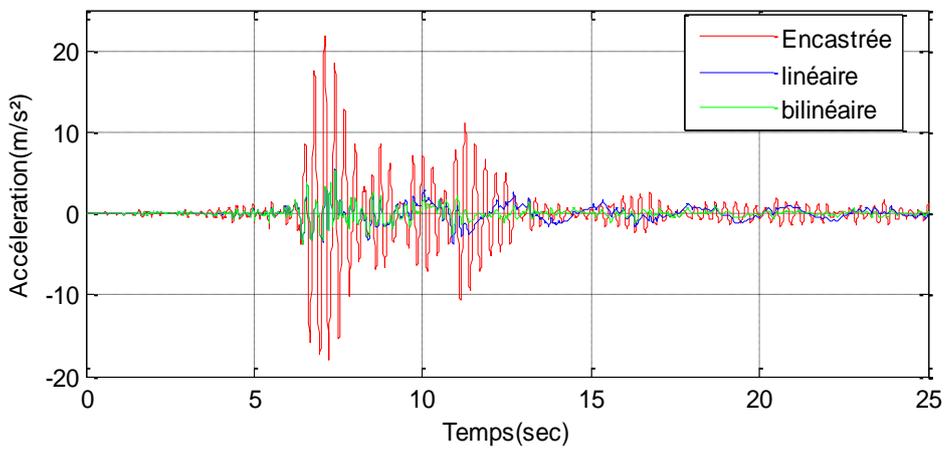


Fig.5.12.b: La réponse en accélération sous l'effet de Dar El-Beida

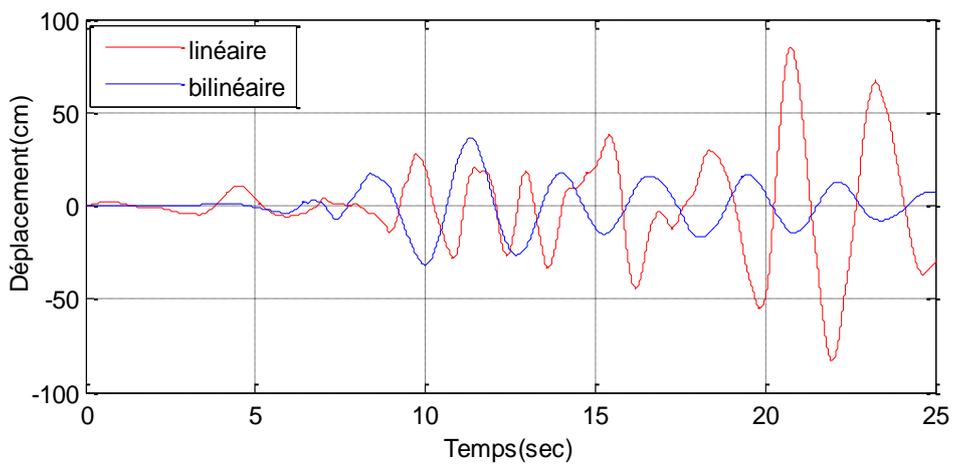


Fig.5.13.a: La réponse en déplacement sous l'effet d'Azazga

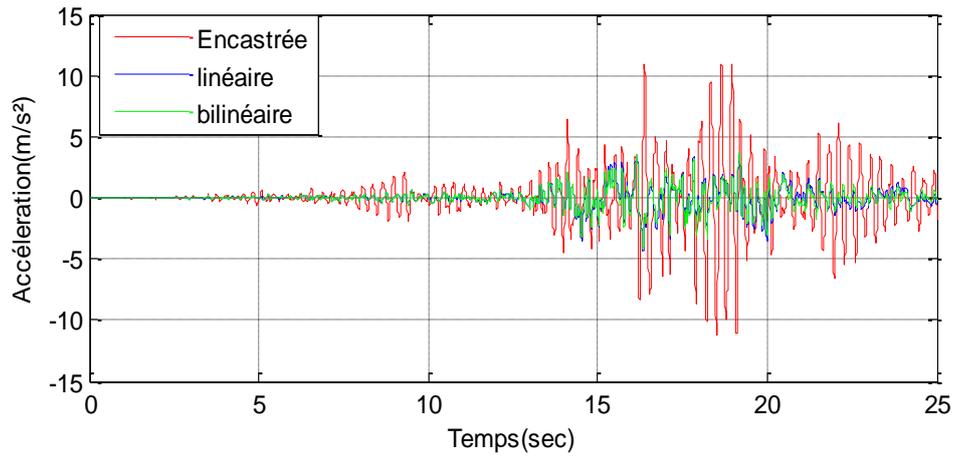


Fig.5.13.b: La réponse en accélération sous l'effet d'Azazga

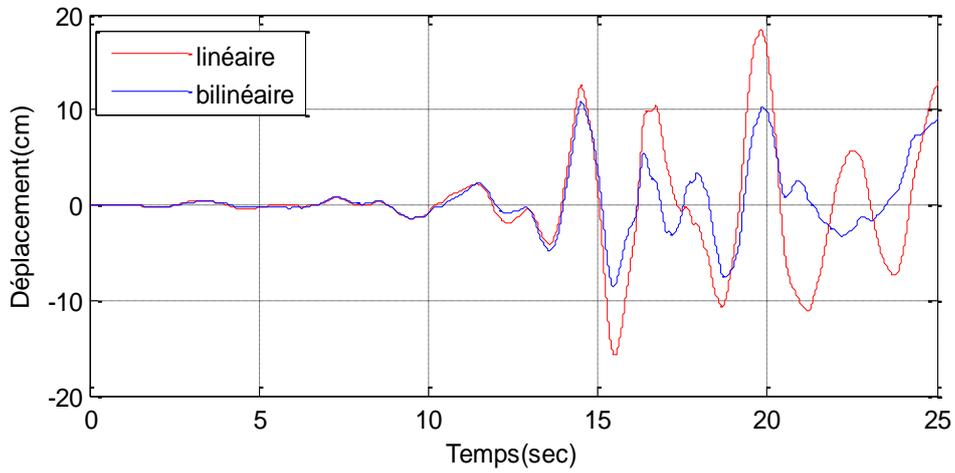


Fig.5.14.a: La réponse en déplacement sous l'effet de Blida

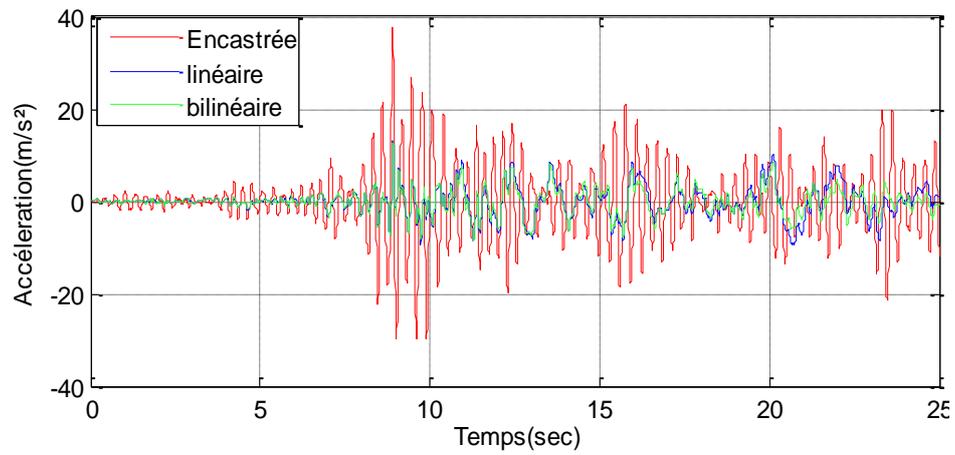


Fig.5.14.b: La réponse en accélération sous l'effet de Blida

5.4 Conclusion

L'analyse des structures avec et sans le système d'isolation nous a permis de déduire ce qui suit :

- Le déplacement maximal de la structure isolée est localisé au niveau des appuis parasismiques sous l'effet du tremblement de terre Dar el Beida, Azazga et Blida.
- Les déplacements inter étages sont réduits pour les structures isolées.
- A la différence de la structure classique, la matrice masse $[M]$ obtenue pour la structure isolée n'est pas diagonale.

CONCLUSION GENERALE

Les techniques antisismiques modernes représentent un excellent, et souvent économique, système pour réaliser une protection sismique efficace des structures nouvelles et existantes. L'isolation sismique à la base améliore considérablement la protection des bâtiments pour deux raisons essentielles: la réduction de la déformation des éléments structuraux et l'atténuation des accélérations transmises à la structure. La première permet une réduction de la quantité de matériaux dans la superstructure et la seconde, limite le risque de dommages pour le contenu, particulièrement important lorsqu'il s'agit d'équipements fragiles qui doivent rester opérationnel pendant et après un séisme.

Grâce aux isolateurs parasismiques, un niveau potentiellement élevé de protection des bâtiments par rapport aux techniques conventionnelles peut être atteint avec, en plus, la réalisation d'économies sur les coûts du projet.

L'objectif de ce travail était la modélisation et étude des isolateurs sismiques, ainsi l'étude de plusieurs structures avec et sans appuis parasismique et mettre en valeur le rôle de ces derniers dans la réduction de la réponse de ces structures.

L'investigation des résultats des analyses et leur comparaison, nous ont permis d'émettre les principales conclusions suivantes :

- Il n'y a pas d'amplification des accélérations transmises à la superstructure et cela peut s'expliquer par l'allongement de la période de vibration de la structure.
- Le déplacement maximal de la structure isolée est localisé au niveau des appuis parasismique.
- Les accélérations de la structure isolée sont réduites par rapport à ceux obtenues pour la structure classique.
- Les efforts tranchants à la base de la structure isolée sont réduits par rapport a ceux obtenu pour la structure encastree, en conséquence, la construction munie d'isolateurs pourra résister au séisme avec très peu de dommage, l'immeuble isolée demeure intact après secousse et reste tout à fait apte à résister à une autre secousse.

Ce travail qui se veut une introduction à l'isolation sismique nous a permis d'avoir une initiation au calcul des bâtiments sur appuis parasismiques, domaine qui n'est pas encore maîtrisé en Algérie, vu que l'Algérie est un pays à forte sismicité, nous préconisons l'application de la méthode d'isolation parasismique pour les ouvrages qui sont appelés à rester opérationnels pendant et après un séisme.

Ainsi, en perspective, il est d'abord intéressant de commencer par la modélisation des isolateurs (l'élastomère) en trois dimensions, faire une étude paramétrique pour vérifier les effets du vieillissement des appuis. Ensuite, le plus important est d'introduire l'interaction sol - isolateur - structure.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: **A.Filiatraut** « *Elément de génie parasismique et de calcul des structures* », Edition de l'école polytechnique de Montréal, 1996.
- [2]: **A. Whittaker** « *Seismic protective systems* », CIE 619 Earthquake Engineering and Structural Dynamics II
- [3]: **C. Casarotti** « *Bridge isolation and dissipation devices:state of the art review of seismic response and modeling of modern seismic isolation and dissipation devices* », thèse of Master, University of Pavia 2004
- [4]: **E. Acar** « *Comparison of design specifications for seismically isolated buildings* », thèse of Master, the graduate school of natural and applied sciences of Middle East technical University, FEBRUARY 2006
- [5]: **E. M. Lapointe** « *An investigation of the principles and practices of seismic isolation in bridge structures* », thèse of Master, Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering, May 7,2004
- [6]: **F. Naeim, J.M. Kelly** « *Design of Seismic Isolated Structures :from Theory to Practice* ». John Wiley & Sons Inc., USA,1999
- [7]: **FEMA -302 Applied Technology Council** « *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures* », chapitre 13, Building Seismic Safety Council, Washington D.C.,1997
- [8]: **FEMA -451 Applied Technology Council** « *NEHRP recommended provisions : design examples* », chapitre 11,Building Seismic Safety Council Washington, D.C, August 2006.
- [9]: **FEMA-274 Applied Technology Council** « *NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building* », Federal Emergency Management Agency Washington, D.C, October 1997
- [10]: **FEMA-450 Applied Technology Council** « *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1—Provisions, prepared by the Building Seismic* », chapitre 13, Safety Council of the National Institute of Building Sciences, 2003.
- [11]: **F.Y.Cheng,H.jiang,K.Lou** « *Smart structures innovative systems for seismic reponse control* », Taylor & Francis group London New York,2008.

- [12]: **International Conference of Building Officials (1997)**, « *Earthquake Regulations for Seismic-Isolated structures* », Uniform building Code, chapitre 16, Whittier, CA.
- [13]: **L. Guizani, ing., M.Sc.A** « *Sur l'isolation sismique des ponts au Canada* », Les Industries Z-Tech Inc.
- [14]: **M. Eroz** « *advanced models for sliding seismic isolation and applications for typical multi-span highway bridges* », Georgia Institute of Technology December 2007
- [15]: **M. Higashino, S. Okamoto** « *Response Control and Seismic Isolation of Buildings* ». Taylor & Francis, 2006
- [16]: **M.Zacek**« *Isolation parasismique des bâtiments*»
<http://www.lesgrandsateliers.fr/echanges-reflexion/pole-risques-majeurs/interventions-de-milan-zacek-le-14-mars-2008/FORMATION%20CAUE%202008%20Conception%20parasismique%20des%20batiments.pdf>
- [17]: **16 O.Ben Mekki** « *Amortissement semi-actif des structures flexibles* », thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Mai 2006.
- [18]: **R. L Mayes, F. Naeim** « *design of structures with seismic isolation* », Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [19]: **S. Bungale.Taranath Ph.D.,S.E** « *Wind and Earthquake resistant buildings: structural analysis and design* », John A.Martin & Associates, Inc. Los Angeles, California, Octobre 2004.
- [20]: **S. Djouadi & O. Cherrak** « *Etude d'un bâtiment sur appuis parasismiques* », mémoire de PFE, Ecole Nationale des Travaux Publics,2004.
- [21]: **S. Foo, N. Naumoski et M. Saatcioglu** « *Aléas sismiques, code du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles Canadiens* ». Département de génie civil, Université d'Ottawa (Ontario), Canada
- [22]: **T. E Kelly,S.E** « *Base isolation of structures* », Holmes Consulting Group Ltd,New Zealand ,Design guidelines July 2001.
- [23]: **W. Chen & C. Scawthorn** «*Earthquake Engineering handbook*». Boca Raton London New York Washington, D.C.2003
- [24]: **Y.Bozorgnia, V. V.Bertero** « *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering* », Boca Raton London New York Washington, D.C.2006

MODELISATION ET ETUDE DE L'ISOLATION SISMIQUE DES CONSTRUCTIONS

Résumé

L'analyse des structures soumises aux actions sismiques constitue un domaine de recherche d'actualité et revêt un intérêt particulier dans les pays où l'activité sismique est importante. Le nord de l'Algérie est considéré par le Règlement Parasismique Algérien (RPA) comme une zone de forte sismicité, les séismes de Chlef (1980) et celui de Boumerdes (2003) montre à quel point est exposée une grande partie de l'Algérie aux risques que peuvent engendrer de telles secousses.

Des techniques d'atténuation de l'énergie transmise par le séisme à la structure basée sur le principe de l'isolation sismique sont utilisées de par le monde pour réduire au maximum les dégâts causés aux structures et du coup sécuriser les ouvrages stratégiques et protéger les populations occupants ces ouvrages.

L'objectif de cette recherche est de montrer l'efficacité de l'isolation sismique pour les structures en béton armé par une comparaison des accélérations, des déplacements et des efforts tranchant à la base d'une structure sans isolation avec ceux qu'elle aurait subit si elle a été isolée. Les résultats obtenus montrent que les structures dotées de l'isolation sismique permettent de réduire les accélérations et les déplacements inter étage. La structure isolée se comporte presque comme un corps rigide. De plus une étude numérique permettant de définir un facteur de réduction d'efforts tranchant dû à l'isolation sismique a été effectuée.

Mots clés : *Isolation sismique, structure, séisme, appuis parasismiques, modélisation, réponse sismique, dissipation d'énergie.*

MODELING AND STUDY OF SEISMIC ISOLATION OF BUILDINGS

Abstract

The analysis of structures subjected to seismic actions is an area of current research and is particularly relevant in countries where seismic activity is important. Northern Algeria is considered by the Algerian Earthquake Regulations (RPA) as a zone of high seismicity, earthquakes of Chlef (1980) and that of Boumerdes (2003) shows how exposed much of the Algeria risks that may cause such shocks.

Techniques of attenuation of the energy transmitted by the seism to the structure based on the principle of the seismic isolation are used all over the world to minimize damage to structures and secure strategic building and protect populations occupying these structures.

The objective of this research is to show the effectiveness of seismic isolation for reinforced concrete structures by comparing the acceleration, displacement and base shear of a structure without isolation with those it would undergoes when it was isolated. The results obtained show that structures with seismic isolation can reduce the accelerations and displacements inter-story. The isolated structure behaves almost as a rigid body. Moreover, a numerical study to define a reduction factor of shear due to seismic isolation was performed.

Keywords: *Seismic Isolation, structure, earthquake, seismic support, modeling, seismic response, energy dissipation.*