

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Tlemcen Faculté de Technologie Département de Génie Civil



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme

Master en Génie Civil

Option : Ingénierie des structures

Thème :

**Analyse dynamique de la salle de prière de la grande
mosquée d'Alger**

Présenté le 15 Juin 2017 par :

ZAATAR Ben Brahim

TAHRAOUI Mohamed

Devant le Jury composé de :

Pr. MEGNOUNIF A. Président

Dr. MEDDANE N. Encadreur

Dr. MATALLAH M. Encadreur

Dr. DJAFOUR N. Examinatrice

Dr.GHAZALI.M. Examineur

Année Universitaire 2016-2017

Remerciements

Tout d'abord, On remercie Allah, le tout grand puissant de nous avoir donné la force, le courage et la volonté de mener à bien ce modeste travail.

Nos sincères remerciements s'adressent du fond du cœur à nos encadreurs Dr. MEDDANE N et Dr. MATALLAH M. qui nous ont orientés durant toute la préparation de ce projet de fin d'étude et qui nous ont fourni les conseils nécessaires.

On tient à remercier profondément les membres du jury et Prof. MEGNOUNIF A., Dr. DJAFOUR N. et Dr. GHEZALI. pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Nous tenons aussi à remercier également Melle MEDJAHED AMINA qui a contribué à notre travail, ainsi pour ses précieux conseils techniques et pour le temps mis à notre disposition.

Nos remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Résumé

Dans le cadre de ce travail, une analyse dynamique de la salle de prière de la grande mosquée d'Alger a été effectuée. La réponse sismique de cette structure est contrôlée par un système d'isolation composé d'un système de pendule de frottement (FPS) et un amortisseur à fluide visqueux.

Les résultats de cette étude ont été comparés avec ceux obtenus dans le cas d'une configuration avec appuis fixes et le cas où la structure est isolée seulement par des (FPS). Ce en considérant différents enregistrements sismiques.

À travers cette étude, il a été conclu que le système de contrôle choisi permet la réduction de la réponse dynamique d'une manière efficace.

Mots-clés : séisme, dynamique des structures, isolateur parasismique, amortisseur visqueux, réponse sismique

المخلص

للحماية ضد الزلازل تم تطوير تكنولوجيات جديدة منها " اجهزة امتصاص الطاقة "

امتصاص كمية كبيرة من الطاقة الزلزالية الموجهة الهيكل المبنى وكذلك لتقليل من الاضرار المحتملة للعناصر المكونة لهيكل المبنى و هذا هو الهدف الرئيسي من الاجهزة

في اطار هذا العمل قمنا بإنجاز تصميم نظام العازل (العازل و النابض) المستعمل في قاعة الصلاة في دراسة مقارنة بين استعمال النظام وعدمه وتحليل نتائج الحركة و السرعة و مشروع جامع الجرائر التسارع و الاجهاد القاعدي

الكلمات المفتاحية:

الزلازل، ديناميكية الهياكل، المعزل الزلزالي، والمثبط لزجة، واستجابة الزلزالية

Abstract

In This work, a dynamic analysis of the prayer room of the Great Mosque of Algiers was carried out. The seismic response of this structure is controlled by an insulation system composed of a friction pendulum system (FPS) and a viscous fluid damper.

The results of this study were compared with those obtained in the case of fixed supports and the case where the structure is isolated only by (FPS) considering different seismic records.

Through this study, it was concluded that the chosen control system allows the reduction of dynamic response in an efficient manner.

Keywords: earthquake, structural dynamics, earthquake isolator, viscous damper, seismic response

SOMMAIRE

CHAPITRE I : Généralité

I.1 Introduction	1
I.2 Historique des isolateurs	2
I.3 Définition de l'isolation parasismique.....	4
I.4 Principe de l'isolation parasismique.....	4
I .5 Les composantes essentielles d'un système d'isolation	6
I.6. Les différents systèmes d'isolation	6
I.6.1. les isolateurs parasismiques	9
I.6.1.1. système à base d'élastomère	9
I.6.1.2. Système à base de glissement	12
I.6.2.3. Appuis à déformation et glissement	15
I.6.2 Contrôle passif avec dissipateurs d'énergie.....	18
I.6.2.1. Amortisseurs métalliques.....	19
I.6.2.2. Amortisseurs à frottement	19
I.6.2.3. L'amortisseur de Sumitomo.....	20
I.6.2.4. L'amortisseur de Pall	20
I.6.2.5. Amortisseur boulonné encoché	21
I.6.2.6. Amortisseurs viscoélastiques (VE).....	22
I.6.3. Amortisseurs fluides visqueux:	23
I.3. Etude dynamique des systèmes isolées	24
I.3.1. MÉTHODE DE CALCUL DES STRUCTURE ISOLÉES	24
III.3.1.1 Méthode statique équivalente	25

III.3.1.2 La méthode d'analyse dynamique par spectre de réponse	26
III.3.1.3 La méthode d'analyse par accélérogramme	26
Conclusion	26

Chapitre II : Présentation de l'ouvrage

II.1.Introduction	26
II.2 les intervenants dans le projet.....	27
II.2.1 Le contrôle technique de la construction (CTC)	27
II.2.2 Bureaux d'études.....	28
II.2.3 Construction	28
II.3 Description de la Salle de prière.....	28
II.3.1. Propriétés géométriques :.....	28
II.3.2.Propriétés mécaniques.....	32
II.4 Système d'isolation de base	33
II.4.1 isolateur en pendule de frottement.....	34
II.4.1.2.Description des systèmes d'isolation	36
II.4.2 Formulation de l'isolateur	36
II.4.3 Amortisseurs à fluide visqueux	37
Conclusion.....	39

Chapitre III : Etude dynamique

III.1-Introduction	39
III.2. Modélisation de la salle de prière	40
III.3 Analyse modale	40

III.4.analyse dynamique	42
III.4.1.Enregistrements sismiques utilisés	42
III.4.1.1Caractéristiques du spectre de réponse élastique du site.....	44
III.4.1.2 Les Accélérogrammes	45
III.4.2. Response dynamique.....	48
CONCLUSION.....	60

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Généralité

Figure 1.1 : Schéma historique de développement de l'isolation à la base	2
Figure 1.2 : mise en place des isolateurs les massifs d'une structure	3
Figure 1.3 : localisation des isolateurs parasismiques pour les ponts.....	3
Figure 1.4 : effet de l'augmentation de la période et du taux d'amortissement visqueux.....	5
Figure 1.5 : isolation sismique-représentation simplifiée du principe.....	6
Figure 1.6 : localisation de s isolateurs parasismiques pour les bâtiments.....	7
Figure 1.7 : localisation des isolateurs parasismiques pour les ponts.....	7
Figure 1.8 : comportements des structures lors d'un séisme (a) encastree (b) isolée.....	8
Figure 1.9 : comparaison entre deux structures isolée . structure isolé (a- par un appui- par un appui et un amortisseur.....	9
Figure 1.10 : Appui élastomérique.....	9
Figure 1.11 : Les appuis en caoutchouc naturel et synthétique ' faible amortissement	10
Figure 1.12 : isolateur de caoutchouc a fort amortissement du bâtiment.....	11
Figure 1.13 : schéma d'un isolateur en élastomère d'amortissement élevé (HDR).....	11
Figure 1.14 : amortisseur TADAS. a) les plaques triangulaires b) les plaques soudées.....	12

Figure 1.15 : Appui a friction.....	13
Figure 1.16 : système de pendule a friction.....	14
Figure 1.17 : Appui a pendule glissant.....	14
Figure 1.18 : Appui utilisé par l'EDF.....	15
Figure 1.19 : Appui type système de l'Electricité De France.....	16
Figure 1.20 : Appui proposé par N.MOStaghel.....	17
Figure 1.21 : le principe de base d'un appui a billes (a roulement).....	18
Figure 1.22 : Dispositifs amortisseurs métalliques.....	19
Figure 1.23 : L'amortisseur de Sumitomo.....	20
Figure 1.24 : l'amortisseur de pall et son installation.....	21
Figure 1.25 : Amortisseur boulonné encoché	22
Figure 1.26 : Dispositifs des amortisseurs viscoélastiques.....	23
Figure 1.27 : a) Amortisseur a fluide de récipient clindrique de GERB. b) Mur d'amortissement visqueux (VDW)	24

Chapitre II : Présentation de l'ouvrage

Figure2.1 : projet de la Grande Mosquée d'Alger « Djamaa El Djazaïr ».....	26
Figure2.2 : localisation de la grand mosquée par Google Map(le15/05/2017).....	27
Figure 2.3 : vue en plan sous-sol 2 pris par AutoCAD.....	28
Figure2.4 : élévation nord de la salle de prière puise par AutoCAD.....	29

Figure 2.5 : la salle de prière en cours de construction.....	31
Figure 2.6 : la position d'isolateur de la Grande Mosquée d'Alger < Djamaa El Djazaïr>.....	32
Figure 2.7 : montre les colonnes utilisées dans la salle de prière de la grande Mosquée d'Alger.....	33
Figure 2.8 :type d'isolation (FPS avec Amortisseur).....	34
Figure 2.9 : Système d'isolation de base.....	35
Figure 2.10 : Système de Pendule de frottement (FPS).....	36
Figure 2.11 : dimensions pour un Système de Pendule de frottement.....	36
Figure 2.12 : Opération de l'isolateur en pendule de frottement.....	36
Figure 2.13 : La boucle force-déplacement hystérésis idéalisé	36
pour l'isolateur du pendule de frottement.....	37
Figure 2.14 : Mise en œuvre des amortisseurs.....	38

Chapitre III : Etude dynamique

Figure 3.1 : Modeles d'appuis utilisés.....	43
Figure 3.2 : Modèle 3D de la structure avec SAP2000.....	44
Figure 3.4 : accélérogramme de Boumerdes E-W.....	48
Figure 3.5 : 3 accélérogrammes de north-ridje.....	48
Figure 3.6 : accélérogramme de sakaria.....	48

Figure3.7 : déplacements des3 niveaux sous l'accélerogramme de boumerdess (modèle 01).....	49
Figure3.8. : déplacements des 3 niveaux sous l'accélerogramme de boumerdess (modèle 02).....	50
Figure3.9. : déplacements des 3 niveaux sous l'accélerogramme de boumerdess (modèle 03).....	50
Figure 3.10 : les déplacements des trois modèles sous le séisme de north-ridje.....	51
Figure 3.11 : les déplacements des trois modèles sous le séisme de sakaria.....	52
Figure3.12 : la vitesse des 3 niveaux du modèle 01.....	53
Figure3.13 : la vitesse des 3 niveaux du modèle 02.....	53
Figure3.14 : la vitesse des 3 niveaux du modèle 03.....	54
Figure 3.15 : les vitesses des trois modèles sous le séisme de north-ridje.....	55
Figure 3.16 : les vitesses des trois modèles sous le séisme de sakaria.....	55
Figure3.17 : les accélérations des3 niveaux du modèle 01 sous le séisme de boumerdesse.....	56
Figure3.18 : les accélérations des3 niveaux du modèle 02 sous le séisme de boumerdesse.....	57
Figure3.19 : les accélérations des3 niveaux du modèle 03 sous le séisme de boumerdesse.....	57
Figure 3.20 : les accélérations des trois modèles sous le séisme de north-ridje.....	58

Figure 3.21 : les accélérations maximales sous le séisme de sakaria.....	59
Figure 3.22 : l'effort tranchant à la base des 3 modèles sous le séisme de boumerdesse.....	60
Figure 3.23 : l'effort tranchant à la base des 3 modèles sous le séisme de north-ridje.....	60
Figure 3.24 : l'effort tranchant à la base des 3 modèles sous le séisme de sakaria.....	61
CONCLUSION	61
CONCLUSION GÉNÉRALE	63

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Généralité

.....

Chapitre II : Présentation de l'ouvrage

Le tableau 2.1 : propriété de l'isolateur FPS utiliser dans le projet.....37

Chapitre III :Etude dynamique

Tableau 3.1 : Périodes et facteurs de contribution modale (premier modèle).....40

Tableau 3.2 : Périodes et facteurs de contribution modale (deuxième modèle).....41

Tableau 3.3 : Périodes et facteurs de contribution modale (troisième modèle).....41

Tableau3.6 : les déplacements max sous l'accélérogramme de boumerdesse.....50

Tableau3.7 : les déplacements maximales sous les seismes de north-ridje et sakaria52

Tableau3.8 : la vitesse maximal de sous accélerogrammes de boumerdess.....54

Tableau3.9 : les Vitesses maximales sous les seismes de north-ridje et sakaria.....55

Tableau3.10 :l'accélération maximal sous de l'accélérogramme de boumerdesse.....57

Tableau3.11 : accélération maximales sous les seismes de north-ridje et sakaria.....59

Introduction générale

En raison de la vulnérabilité sismique de notre pays, le développement des concepts technologiques innovateurs est indispensable pour éviter les pertes humaines et matérielles. Les ingénieurs de structure ne peuvent pas être inconscients des dégâts provoqués par les séismes sur les plans humains et matériels dont a souffert notre pays, ce qui explique la nécessité de considérer le défi de l'intégration de nouvelles technologies comme systèmes de protection parasismique.

Ces techniques sont basées sur le découplage des fondations et la superstructure. Cette division a un effet sur la force provoquée par le séisme et l'objectif principal de cette technologie c'est l'absorption d'une partie importante de l'énergie sismique et la diminution, autant que possible, des dégâts dans les éléments structuraux. Cette technologie s'appelle 'isolation parasismique'. Elle a été utilisée dans un des grands projets en Algérie qui est celui de la grande mosquée d'Alger.

Dans ce projet deux types d'isolation (amortisseur fluide visqueux et FPS) ont été utilisés. Chacun joue un rôle fondamental. Le premier est pour contrôler le déplacement. Le deuxième est pour l'allongement de la période.

L'objectif principal de ce travail est de mettre en valeur l'influence des isolateurs sur le comportement de la salle de prière de la grande mosquée d'Alger. Ce travail est structuré en chapitres à savoir :

Le premier chapitre est consacré à des généralités de base concernant le principe et l'historique des différents systèmes d'isolation parasismique et leurs différents types à savoir les systèmes à base d'élastomère et les systèmes de glissement. Ainsi que les différents types d'amortisseurs. On présente aussi dans ce chapitre quelques règles parasismiques utiles pour le calcul des structures isolées.

Dans le deuxième chapitre, on va présenter le projet de la Grande Mosquée d'Alger « Djamaa El Djazaïr » spécialement la salle de prière et on va spécifier les caractéristiques de système d'isolation utilisé.

Le troisième chapitre comporte la modélisation de la salle de prière en éléments finis par le logiciel SAP2000 ainsi que l'étude dynamique de cette structure en considérant différents enregistrements sismiques. Une étude comparative entre trois modèles en changeant les conditions aux limites (encastrement, contrôlé par des isolateurs et contrôlé par des isolateurs et amortisseurs) est réalisée afin d'analyser l'influence du système d'isolation.

Le travail se termine par des conclusions et des perspectives.

I.1 Introduction:

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

Le séisme est classé parmi les catastrophes naturelles les plus meurtrières, il se produit vingt milles (20.000) tremblements de terre en moyenne par an dans le monde, toutefois, seulement vingt (20) d'entre eux peuvent être considérés comme des séismes majeurs. [1]

A l'échelle nationale, la ville de Chlef, a été fortement secouée par un séisme d'une magnitude de 7,2 à l'échelle Richter en 1980, celui-ci, a fait selon les statistiques officielles, plus de 3500 morts, 4500 blessés et des centaines de familles sans abris, on cite aussi ce séisme a une magnitude de 6.7 à l'échelle Richter, qui a frappé la wilaya de Boumerdès en 2003 faisant état de 2.278 morts, 10147 blessés et plus de 15000 sans-abri et des pertes estimées à plus de deux milliards de dinars [2]& [3].

Lors d'un séisme important, la fondation d'une structure est soumise à des accélérations horizontales et cycliques, par la suite la structure ne suit pas les mouvements de la fondation. En raison de la masse de l'ouvrage, des forces d'inertie apparaissent faisant osciller la structure. Ces forces dépendent des mouvements relatifs de la structure par rapport à la fondation.

Elles engendrent des déformations à la structure. En fonction de la violence du séisme, la structure peut subir des déformations plastiques qui peuvent conduire à sa ruine.

Durant ces dernières années, l'idée d'introduire entre le sol et les bâtiments un filtre permettant de dissiper le maximum d'énergie s'est développée. Cette stratégie est appelée isolation parasismique [16].

L'isolation à la base repose sur le principe stipulant que si la période de vibration de la structure est augmentée suffisamment pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du tremblement de terre, les accélérations transmises à celle-ci (et par conséquent les forces) sont considérablement réduites.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter en général les isolateurs et les amortisseurs et leur principe de fonctionnement. Nous allons présenter en fin de ce chapitre les méthodes de calcul dynamique des structures isolées.

I.2 Historique des isolateurs :

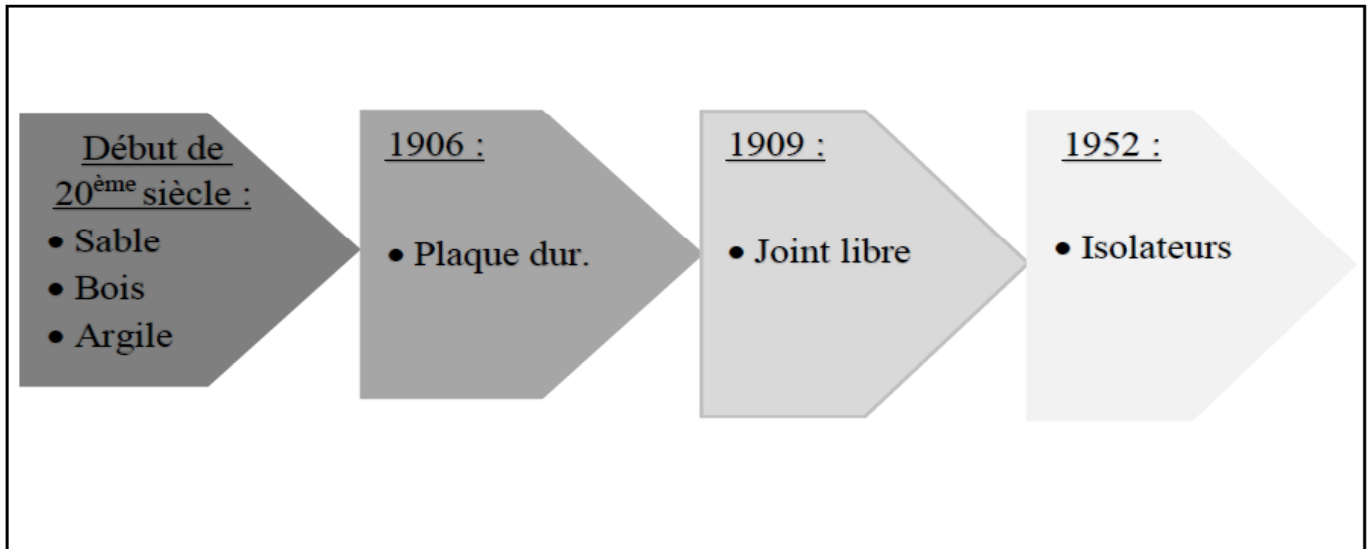


Figure1.1 : Schéma historique de développement de l'isolation à la base[18].

L'isolation à la base est une technologie qui existe depuis le début du 20^{ème} siècle. L'idée d'isolation parasismique est intervenue après plusieurs expériences et recherches. En Turquie, les bâtiments des églises ont été construits sur une couche de sable, ils sont naturellement isolés (Figure1.1).

En 1906 un bâtiment construit à Munich en Allemagne est édifié sur une plaque de base rigide. Cette plaque devait supporter l'édifice et reposait librement sur un manteau d'éléments sphériques fabriqués à partir d'un matériau très dur.

En 1909 un médecin de Calantarients déposait un brevet sur les bâtiments parasismiques sur joint libre, le premier concept d'isolation était de placer une structure entière sur des appuis à rouleaux. Ce système est incapable de supporter les charges sismiques, il est donc inacceptable.

Cependant, la première utilisation du caoutchouc dans une application du principe de protection parasismique moderne dans le monde n'a été réalisée que dans les années 70 à 80, sur une école élémentaire à Skopje [19].

Ce bâtiment, achevé en 1969, était constitué d'une structure de trois étages reposée sur des blocs de caoutchoucs simples. L'isolateur a été installé aussi sur un bâtiment public en Nouvelle-Zélande en 1981 [21].

La première application de l'isolation sismique des ponts au Canada a été réalisée à Richmond (C.B) lors de la réfection du pont sur l'autoroute 99 au-dessus de la rivière Slough Dease. Au Québec la première application de l'isolation sismique est en cours de réalisation sur le nouveau pont en construction à Alma sur la route 169 au-dessus de la rivière grande décharge.



Figure 1.2 : mise en place des isolateurs les massifs d'une structure [1].

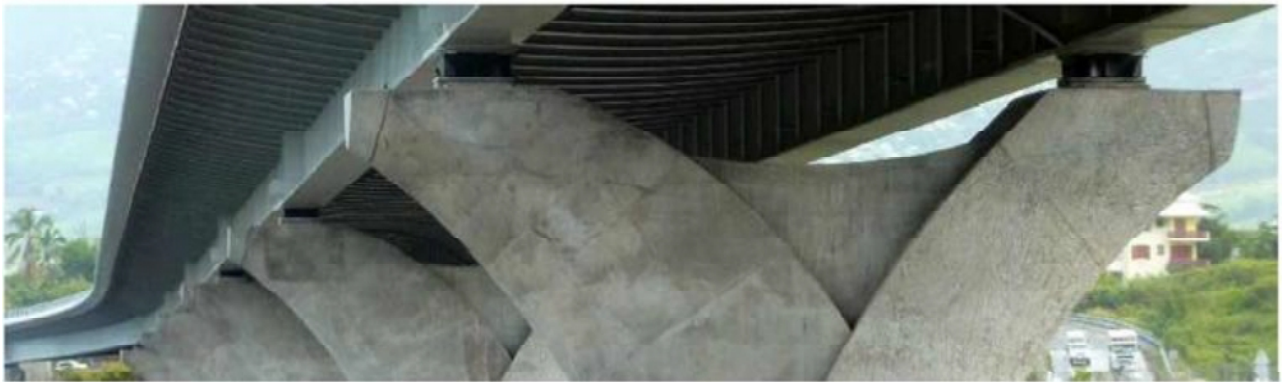


Figure 1.3 : localisation des isolateurs parasismiques pour les ponts [18].

Les Figures 1.2 et 1.3 montrent l'utilisation des isolateurs dans le cas des structures et d'un pont.

I.3 Définition de l'isolation parasismique:

L'isolation parasismique est une technique applicable non seulement à tous les types de bâtiment, mais aussi aux ponts, aux structures industrielles telles que les bacs de stockage de produits pétroliers et autres produits dangereux. Elle convient aussi à l'amélioration des capacités des résistances des structures existantes.

Bien que plusieurs pays aient adopté cette technologie. Elle est restée intégrée surtout dans les projets capitaux à savoir les hôpitaux, les centres de gestion des catastrophes, les musées, et les constructions urbaines.

L'isolation parasismique permet de réduire considérablement la rigidité du système structurel,

En donnant à la structure avec isolation parasismique une période fondamentale meilleure que celle de la même structure sans isolateurs et aussi les forces sismiques exercées sur la structure isolée sont typiquement de l'ordre 3 à 10 fois moins que celles exercées sur la structure non isolée.

L'isolateur absorbe les déformations (inélastiques) et filtre les accélérations (hautes fréquences) de sorte que la superstructure isolée se déplace essentiellement selon un mode rigide qui subit à des faibles accélérations ce qui conduit presque à aucune déformation de la structure. Et par conséquent, les forces d'inertie transmises aux éléments des fondations sont limitées et (demeurent inférieures à la capacité élastique pour tous les éléments). Ce comportement se traduit par la limitation des dommages subis par la superstructure et les éléments de fondation, ainsi que par la préservation de la fonctionnalité de la structure après le séisme [15].

I.4 Principe de l'isolation parasismique:

Le fonctionnement de l'isolation parasismique est basé sur deux principes fondamentaux :

- ✓ La souplesse du système structural.
- ✓ L'augmentation de l'amortissement.

La souplesse et la flexibilité de la structure, d'où l'allongement de la période fondamentale est obtenu par l'introduction d'un plancher entre le sol de fondation et la superstructure.

Intuitivement, on admet que la rigidité latérale de ce plancher est plus petite que la rigidité latérale de la superstructure, le système aura tendance à se déformer dans l'interface d'isolation, donc pas de déformation ou de dommage pendant la réponse sismique. Pour cela, l'isolateur est recommandé pour les structures rigides reposant sur des sols fermes.

L'augmentation de l'amortissement est essentiellement déterminée par le système d'isolation utilisé. Cette augmentation de l'amortissement sert à réduire la déformation du système d'isolation et de la superstructure.

La figure 1.4 ci-après présente schématiquement l'effet de l'accroissement de la période et de l'amortissement(β) sur les forces(f) et les déplacements sismiques(X).

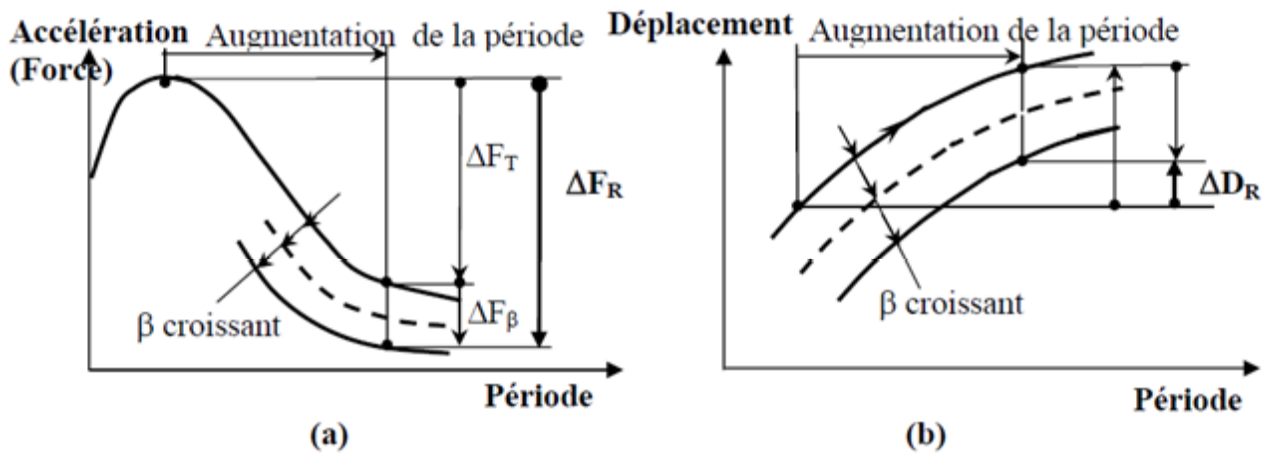


Figure 1.4 : effet de l'augmentation de la période et du taux d'amortissement visqueux (a) Sur l'accélération et les forces d'inertie (b) sur le déplacement sismique. [18]

L'utilisation d'isolateurs sismiques permet d'obtenir des appuis souples dans le plan horizontal. Les appuis du bâtiment par rapport au sol sont alors des ressorts horizontaux souples combinés à un amortisseur, dissipant l'énergie sismique (voir schéma de principe (Figure 1.5))

Grâce à ce type d'appui, les chocs sismiques horizontaux sont alors transmis, après une très forte atténuation, à l'ouvrage. Grâce aux isolateurs, les résonances potentielles entre l'excitation sismique et les fréquences propres de l'ouvrage peuvent être désharmonisées. Du fait que les propriétés des isolateurs peuvent être fixées et sont ainsi connues, la réaction résultante de l'ouvrage peut être déterminée avec précision. L'isolation de l'ouvrage va de pair avec de grandes déformations horizontales entre l'ouvrage et le sol. Les déformations horizontales à l'intérieur du bâtiment sont alors réduites. A la fin du séisme, l'ouvrage revient à sa position initiale grâce à une force de retour des isolateurs. Un recentrage de l'ouvrage doit être assuré. Soit, on choisit la rigidité des isolateurs de façon à ce qu'ils se recentrent eux-mêmes de manière presque exacte en cas de séisme [17].

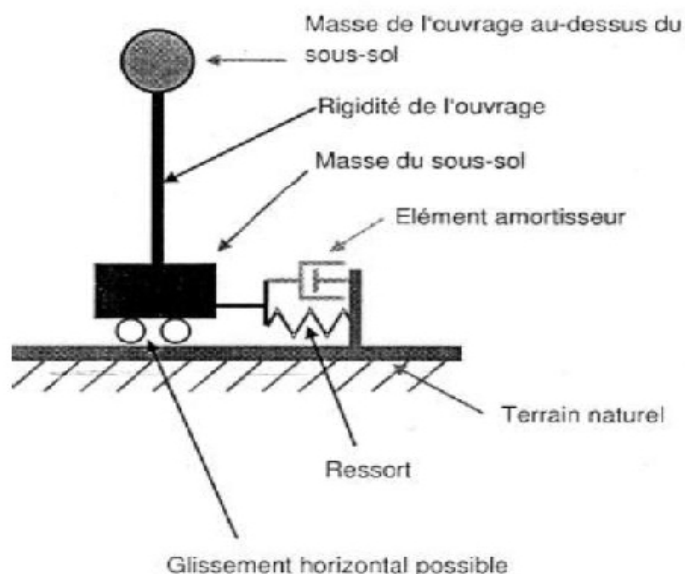


Figure 1.5 : isolation sismique-représentation simplifiée du principe[14].

I.5 Les composantes essentielles d'un système d'isolation sont :

Les composantes essentielles d'un système d'isolation sont :

- ✓ **Un appui capable de transmettre les charges verticales mais ayant une faible rigidité horizontale :**
C'est le noyau de l'isolateur. La rigidité latérale de l'appui est le paramètre clé dans l'augmentation de la période et par conséquent dans la réduction des forces sismiques.
- ✓ **Dispositif de dissipation d'énergie :**
Ce dispositif sert à contrôler la déformation de l'isolateur et par conséquent le déplacement absolu de la superstructure située au-dessus. La composante de dissipation d'énergie peut aussi amener à une réduction des forces et des accélérations dans la structure. Une multitude de systèmes de dissipation d'énergie ont été mis au point avec une application. Les systèmes de dissipation d'énergie les plus courants sont : les amortisseurs hydrauliques (viscous damper), les amortisseurs à base de friction (comportement plastique ou élasto-plastique), les amortisseurs à comportement hystérésis, les appuis en élastomères à haut taux d'amortissement, etc.....[17].
- ✓ **Un système de retenue :**
Le système d'isolation doit avoir une rigidité initiale élevée afin de minimiser les déplacements sous les charges de service tel que le freinage et le vent. Pour certains types d'isolateurs, il peut s'avérer nécessaire d'incorporer un mécanisme de retenue dont la résistance minimale et maximale sont établies avec soin [19].

I.6 Les différents systèmes d'isolation:

L'isolation sismique consiste à introduire des appareils d'appui dont la rigidité horizontale est nettement plus faible que celle de la structure sus-jacente. Les appuis sont généralement placés entre les fondations et la superstructure, entre le sous-sol et le rez-de-chaussée ou encore, entre le RDC et le premier étage pour les bâtiments (Figure 1.6) et entre les appuis et le tablier pour les ponts (Figure 1.7). Les déplacements induits par le tremblement de terre se concentrent au niveau de ces appuis, conçus pour pouvoir absorber d'importants déplacements, et la superstructure se déplace d'un bloc (Figure 1.8). [1]

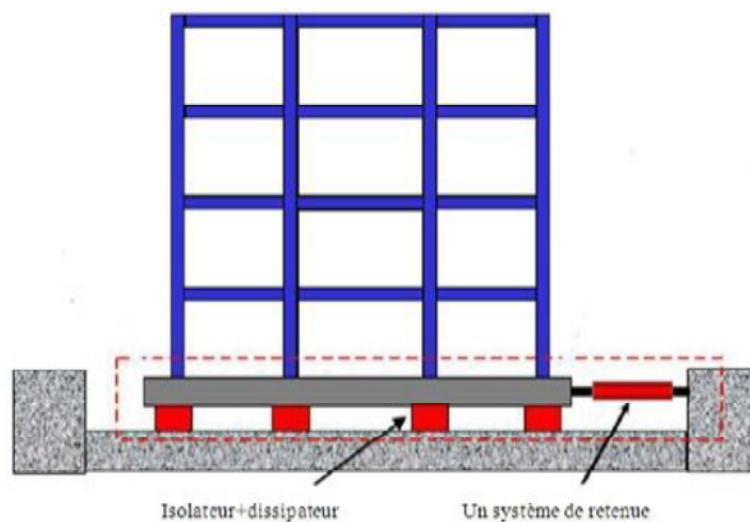


Figure 1.6 : localisation des isolateurs parasismiques pour les bâtiments[19]

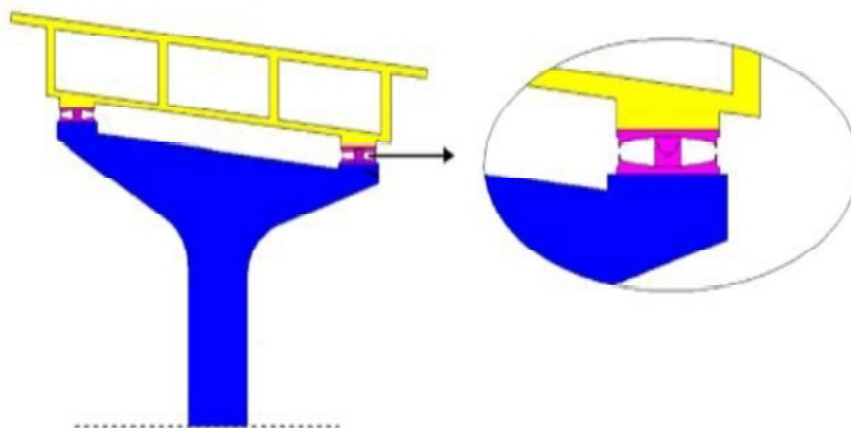


Figure 1.7 : localisation des isolateurs parasismiques pour les ponts[18]

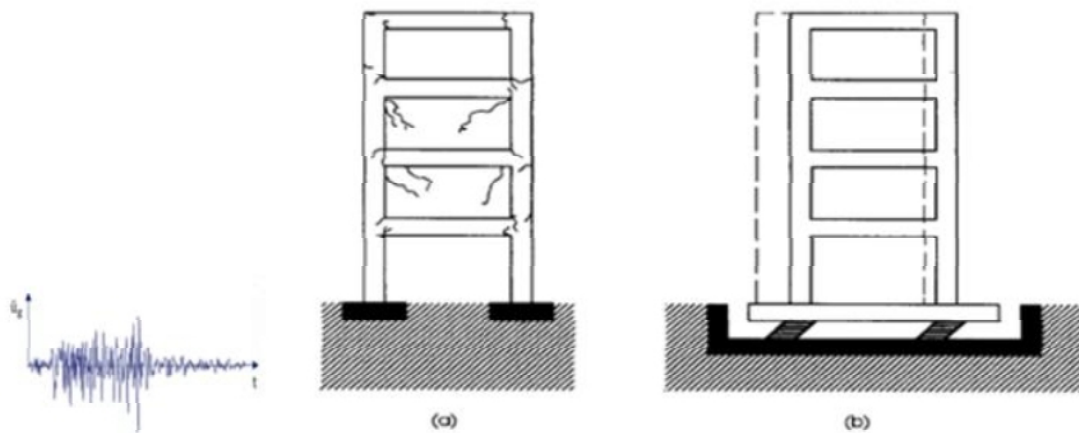


Figure 1.8 : Comportements des structures lors d'un séisme (a) encastrée (b) isolée[18].

La Figure 1.9 : montre une comparaison entre 2 structures isolées.

La première est isolée par un appui et la deuxième par un appui et un amortisseur, On remarque que le déplacement dans la premier cas est plus important que dans le deuxième cas [20].

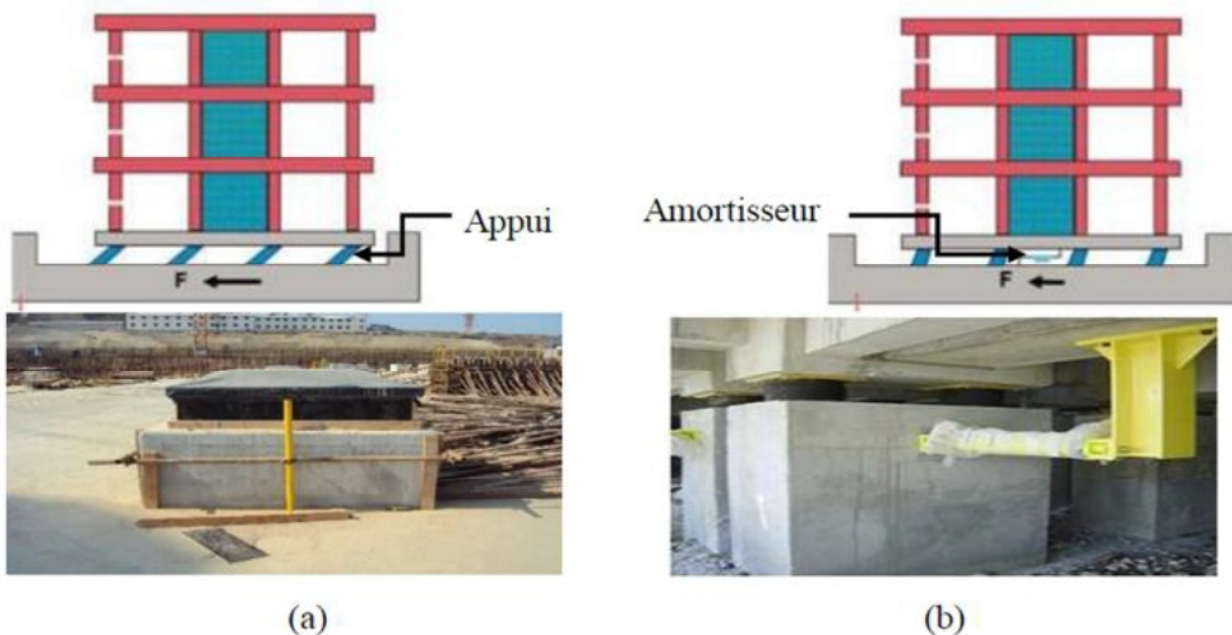


Figure 1.9 : Comparaison entre deux structures isolée. (a) structure isolée par un appui. (b) structure isolée par un appui et un amortisseur[18]

I.6.1. les isolateurs parasismiques :

1.6.1.1. système à base d'élastomère :

a-Isolateur élastomérique à faible taux d'amortissement:

La Figure (1.10) montre les appuis en élastomère (EB), qui se composent de minces feuilles de caoutchoucs alternées de plaques minces en acier. Les feuilles de caoutchouc sont vulcanisées et collées sur les plaques d'acier minces sous la pression et la chaleur. Des plaques de renfort en acier réduisent le flambement latéral de l'appui et augmentent la rigidité verticale, qui est de plusieurs centaines de fois de la rigidité horizontale.

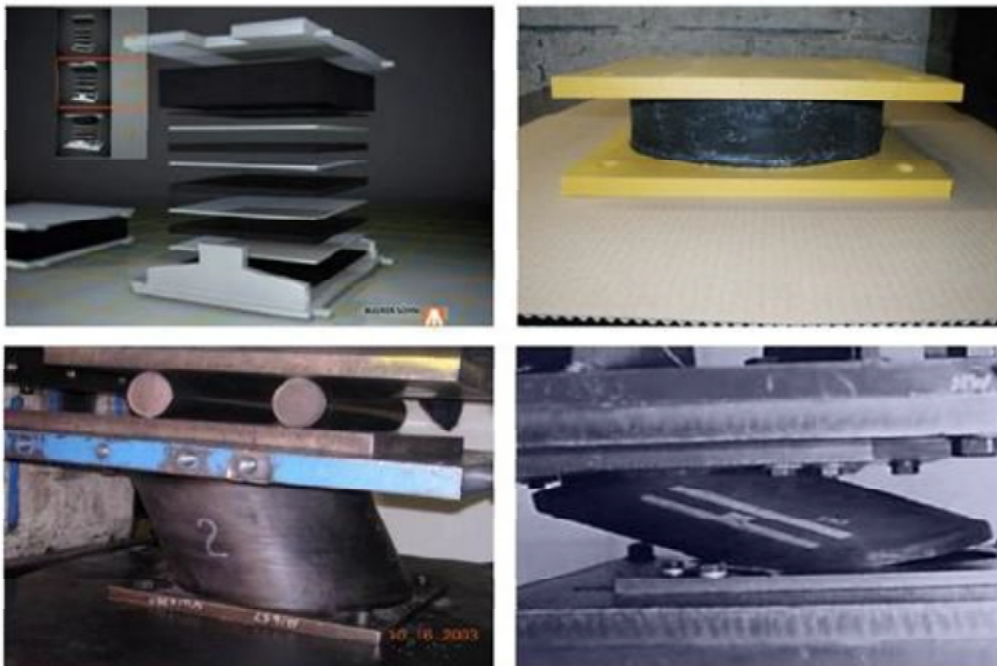


Figure 1.10 : Appui élastomérique. [4]

Les appuis en caoutchouc à faible amortissement (LDRB : Natural and Synthetic Rubber Bearings) (Figure 1.11) ont été utilisés au Japon en conjonction avec des dispositifs supplémentaires d'amortissement, tels que les amortisseurs visqueux, les barres en plomb, etc... où le caoutchouc est vulcanisé et lié à l'acier en une seule opération à chaud et sous pression dans un moule. Les frettes en acier empêchent le ballonnement (bulging) du caoutchouc et de fournir une rigidité verticale élevée, mais n'ont pas d'effet sur la rigidité horizontale, qui est contrôlée par un faible module de cisaillement de l'élastomère. L'amortissement critique varie entre 2 à 3%. [4]



Figure 1.11: Les appuis en caoutchouc naturel et synthétique ‘ faible amortissement’[3]

b- Isolateur élastomérique à fort taux d’amortissement :

L'énergie est dissipée par boucle hystérésis à l'aide d'un composant spécial de caoutchouc durant les cycles d'une déformation horizontale de l'isolateur. Après un séisme les propriétés excellentes de restauration des couches de caoutchouc retournent le bâtiment à sa position initiale. Un système HDRB (Figure 1.12) peut ne pas prouver la nécessité d'une rigidité initiale sous les charges de service et des charges latérales minimales, bien que certaines rigidités initiales soient fournies par un composant de caoutchouc à haut amortissement qui exhibe une plus grande rigidité sous des petites déformations. Une structure isolée avec HDRB a essentiellement une grande période constante, fondamentale en raison de la flexibilité du système d'isolation, ce qui rend la structure vulnérable à l'action du vent avec des fréquences dominantes proches de la fréquence fondamentale (Petros Komodromos, 2000). Cependant, le système HDRB est plus rigide lorsqu'il est soumis aux petites déformations qu'à grande déformation, les performances durant des secousses relativement courtes (mais fréquentes) peuvent être une problématique.



Figure 1.12 : isolateur de caoutchouc a fort amortissement du bâtiment de réserve d'urgence de conty los angeles . [2]

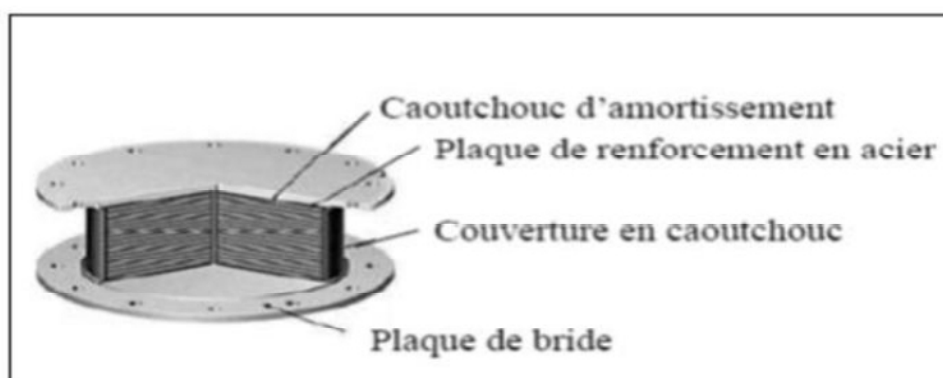


Figure 1.13 : schéma d'un isolateur en élastomère d'amortissement élevé (HDR) [1]

C-Isolateur élastomérique avec noyau de plomb :

L'appui en caoutchouc à barreau de plomb (LRB) est un autre type de système d'isolation absorbant l'énergie. Le système LRB a été développé et utilisé pour la première fois en Nouvelle-Zélande en 1975, après, ce système a été largement utilisé dans plusieurs pays dans le monde, il se compose principalement d'un appui en élastomère multicouche renforcé d'acier avec un noyau de plomb inséré en son centre comme le montre la Figure1.14 Le noyau de plomb est fermement pressé dans un trou au centre et le plomb forme une clef positive entre les plaques d'acier à l'intérieur de l'appui (confiné).

Lorsqu'il est soumis à des faibles charges latérales (telles que des séismes mineurs et vent), l'appui en caoutchouc à noyau de plomb est rigide latéralement et verticalement. La rigidité latérale résulte de la forte rigidité élastique du noyau de plomb et de la rigidité verticale (qui reste à tous les niveaux de charge) résultant de la composition acier-caoutchouc de l'appui.

A des niveaux de chargement plus élevés, le plomb se plastifie et la rigidité latérale de l'appui est considérablement réduite.

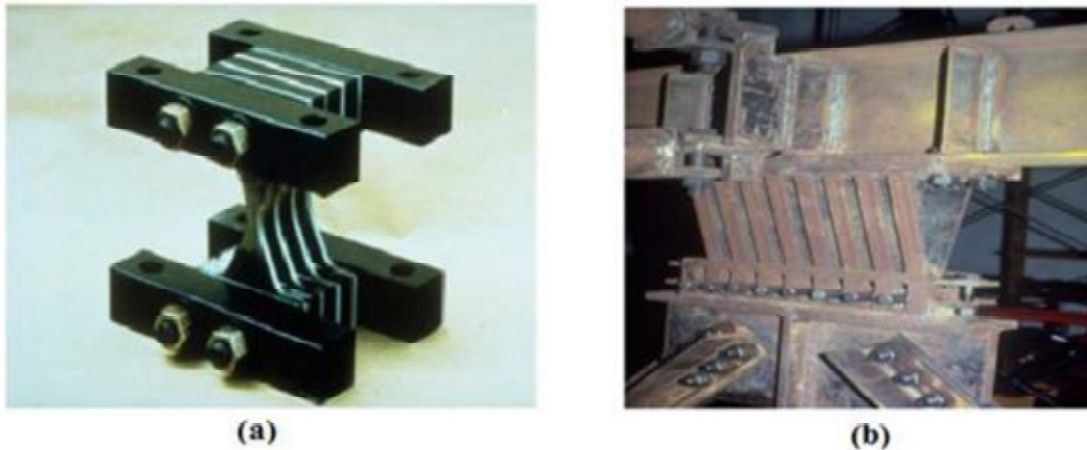


Figure 1.14 : amortisseur TADAS. a) les plaques triangulaires b) les plaques soudées. [18]
I.6.1.2. Système à base de glissement :

a-Appuis à friction:

Cet appui présenté à (la Figure 1.15) est constitué d'une interface en acier inoxydable contre du téflon. Le comportement est purement plastique, car si le coefficient de friction est faible (environ 10%), il assure une grande flexibilité et donc une réduction sensible à des sollicitations sismiques subies par les structures. L'acier inoxydable est généralement poli et le téflon peut être renforcé par des fibres de verre ou de carbone. Aucune force de rappel n'est assurée.

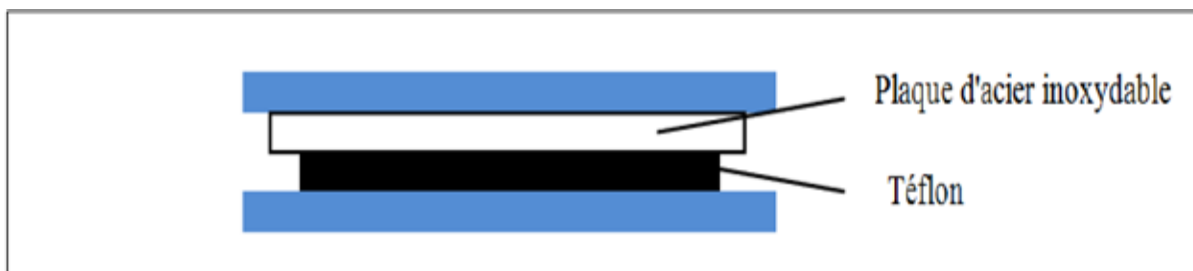


Figure 1.15 : Appui à friction[3]

b-Appui à pendule de friction:

Une autre approche pour augmenter la flexibilité dans une structure est de fournir un glissement ou une surface de frottement entre la fondation et la base de la structure. L'effort de cisaillement transmis à la superstructure à travers l'interface d'isolation est limité par la force statique de frottement, qui est égal au produit du coefficient de frottement et le poids de la superstructure. Le coefficient de frottement est généralement maintenu aussi fiable que possible en pratique.

Le système de pendule à frottement (FPS) est un système d'isolation sismique innovant qui semble offrir des améliorations de la résistance, la longévité, la souplesse, la facilité d'installation et les coûts comparables aux systèmes précédents. En outre, l'approche ajoute plusieurs performances intrinsèques et avantages non disponibles au paravent.

Le système FPS est fondé sur des principes d'ingénierie bien connue et sont construits avec des matériaux traditionnels avec une longévité démontrée et une résistance suffisante due à la détérioration de l'environnement. Les caractéristiques d'isolation souhaitables exposées par les composants du système FPS conserve la promesse d'un système économique et efficace pour augmenter considérablement la résistance sismique de nouvelles structures et de réduire considérablement les risques d'un tremblement de terre apparus dans les structures existantes. Dans l'ordre d'atteindre les avantages potentiels de cela et d'autres systèmes innovants, une attention particulière doit être mise sur les aspects [19]

Le système de pendule de frottement (FPS) propose une approche simple pour augmenter la résistance d'une structure face à un séisme. Le concept de FPS est basé sur une méthode innovatrice tout en réalisant un mouvement pendulaire. La figure (1.16) illustre schématiquement comment le système FPS atteint une réponse de pendule pour un bâtiment soutenu. Le bâtiment répond à des mouvements de tremblement de terre sous forme des mouvements de pendule à faible amplitude. L'amortissement de friction absorbe efficacement l'énergie d'un séisme. Le résultat est simple, prévisible et stable pour une réponse sismique.

Comparé avec l'appui élastomère l'appui de type LRB, la plupart des systèmes de friction ont l'avantage qu'ils ne sont pas affectés ni par la fréquence naturelle de la structure isolée ou le contenu fréquentiel du séisme. Le coefficient de frottement est le paramètre clé qui détermine s'il y aura glissement ou pas pour le système FPS. Cependant, la plupart des systèmes de friction présentent l'inconvénient qu'ils sont incapables de retourner la structure à sa position initiale.

Il est probable qu'un décalage permanent peut exister et avoir lieu entre les parties mobiles du système après un tremblement de terre majeur [18]

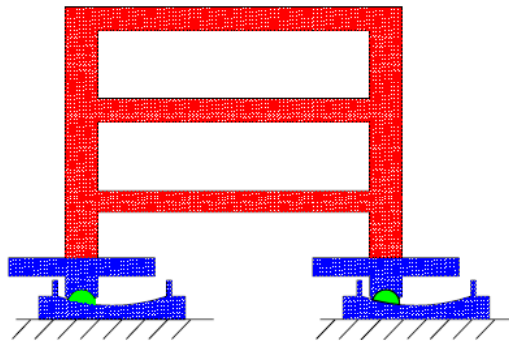
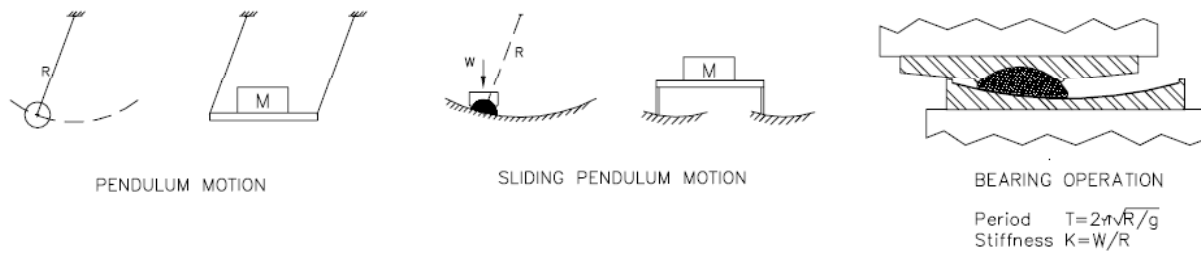


Figure 1.16 : système de pendule a friction[2].

C- Appuis à pendule glissant:

Cet appui présenté à la Figure 1.17 a été développé à l'Université de Berkeley, en Californie. Une réduction sensible des sollicitations sismiques est assurée par glissement des interfaces. Une force de recentrage est activée par gravité grâce à la concavité de la surface de glissement (portion d'une sphère) lorsque la rotule glissante s'écarte du centre géométrique de l'isolateur qui confère à la structure un mouvement global similaire à un pendule. Cet isolateur a en plus l'avantage d'être assez compact, car il est d'une faible épaisseur comparée à un appui élastomère. Il est cependant susceptible de recevoir des chocs si le déplacement réel dépasse le déplacement de conception de l'appui (Figure 1.17) [5].

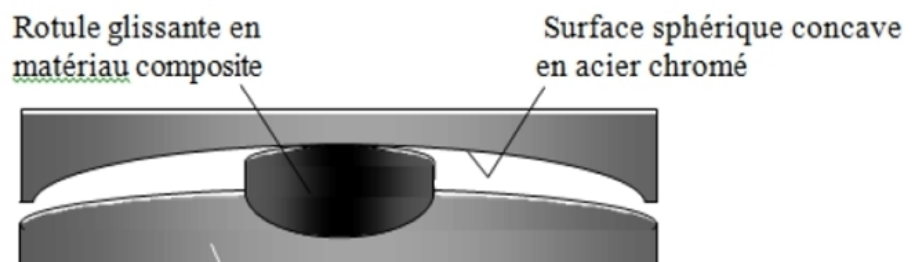


FIGURE 1.17 : Appui a pendule glissant. [1]**1.6.2.3.Appuis à déformation et glissement:**

Ce système d'appuis résulte de l'association de plaques de glissement et des appuis à déformation. Cette association supprime l'inconvénient pour ces derniers en cas de sols mous. Dans un premier temps, le système se déforme latéralement grâce à la distorsion de l'élastomère. Lorsque la force nécessaire à l'accroissement de la distorsion devient supérieure à la force de frottement entre les plaques, ce qui ne se produit que lors des séismes de très forte intensité, le glissement commence. Pendant un séisme violent, ce système de protection sismique est très efficace, il peut produire plusieurs glissements.

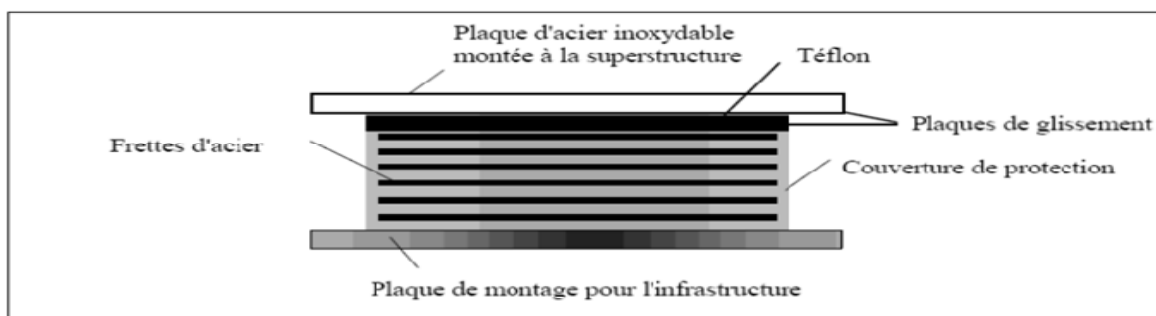
Ce système entraîne une réduction à la fois des accélérations et des déplacements en superstructure et conduit ainsi à une diminution importante des efforts tranchants à la base.

Parmi ces appuis, on peut citer:

a-Appui utilisé par l'EDF

Cet appui EDF (Electricité de France) est une combinaison d'une interface de téflon-acier inoxydable montée en série sur un appui élastomère, tel que représentée à la Figure (1.18).

L'inconvénient de ce système d'appui est qu'il n'assure pas de force de recentrage pour les efforts élevés. Pour les efforts de vent, l'élastomère assure une bonne stabilité de l'appui. Il limite les efforts dans la structure, c'est pourquoi il a été adopté par Electricité de France pour l'isolation des centrales nucléaires.

**Figure 1.18** : Appui utilisé par l'EDF. [1]

Ce système a été développé au début des années 70 afin de l'appliquer aux installations des équipements d'une centrale nucléaire ; pour atteindre un niveau de protection très élevée concernant ces équipements pendant une accélération de pic à 0.2g

Ce système est combiné d'un appui stratifié du néoprène (fabriqué selon des normes de haute qualité) avec une plaque d'alliage de plomb-bronze en contact direct avec l'acier inoxydable, la surface de glissement étant montée sur l'appui d'élastomère (Figure 1.19).

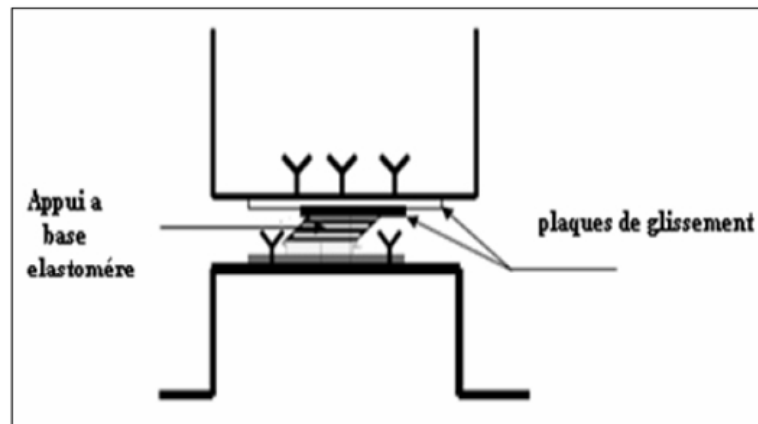


Figure 1.19 : Appui type système de l'Electricité De France[2].

L'ensemble de plaques de glissement et des appuis stratifiés du néoprène, sert à éviter l'inconvénient de la présence de sol mou. Et particulièrement, il est très efficace pour les constructions à fondation profonde.

Le coefficient de frottement de la surface de glissement est censé être 0.2 excédant la durée de vie de l'isolateur. Le cylindre du néoprène peut se déplacer avec une distance inférieure à 5.0 centimètre dans une situation normale. Par contre si le déplacement dépasse cette valeur, les éléments de glissement couvriront ce dépassement. Notons que l'inconvénient de ce système est qu'il ne contient aucun dispositif pour la remise des déplacements à zéro, or ces déplacements sont inhérents. Ce système a été utilisé une seule fois pour les installations de la centrale nucléaire à Koeberg en Afrique du Sud. [4]

b-Appui proposé par N.Mostaghel :

Un autre type d'appui à déformation et glissement a été conçu et testé. Il est composé de disques en acier inoxydable superposés, pouvant glisser les uns sur les autres.

Les disques sont recouverts de Téflon afin de diminuer le coefficient de frottement et reliés par un noyau central ou plusieurs noyaux en caoutchouc. Les noyaux sont librement insérés dans l'appui. Leur seul rôle est de distribuer les glissements sur la hauteur de l'isolateur et ils ne portent donc aucune charge verticale.

Une enveloppe en caoutchouc protège les disques contre la poussière et les agents atmosphériques. Le frottement entre les disques empêche les glissements sous l'effet du vent ou des séismes de faible intensité. Lorsque les secousses du sol engendrent des forces horizontales supérieures aux forces de frottement, des glissements se produisent, provoquant la déformation de l'appui. Les déplacements et la vitesse de la superstructure varient peu avec la période d'oscillation, ce qui signifie que la sensibilité du système au

contenu fréquentiel du séisme est très faible. Par ailleurs, la vitesse de glissement peut être réduite en augmentant le nombre de plaques (FIGURE 1.20) [3].

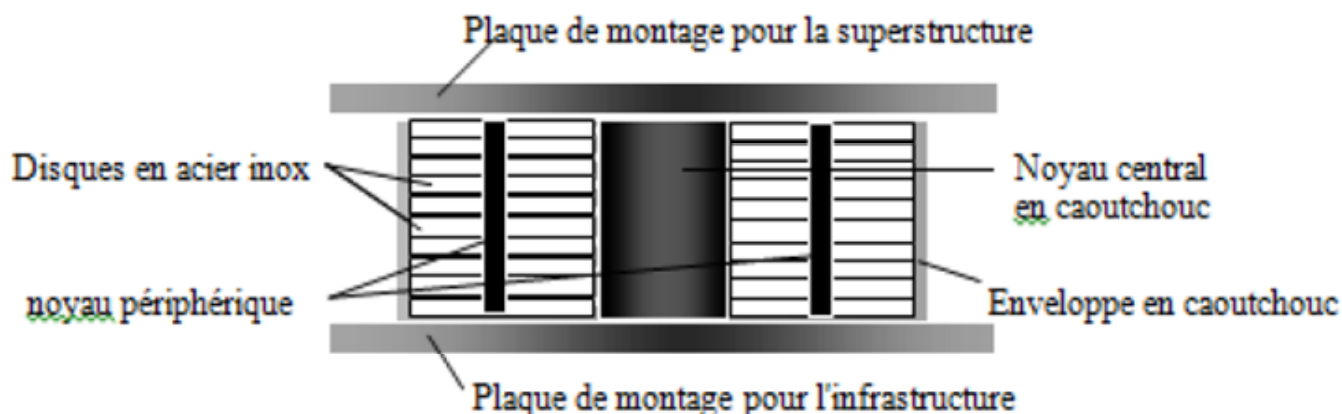


Figure 1.20 : Appui proposé par N.MOStaghel[3].

C-Les systèmes combinés EERC:

La combinaison entre les deux systèmes (élastomère et de glissement), a été développée et testée sur une table de vibration à EERC. Dans ce système les poteaux intérieurs de la structure étaient en téflon continué sur les éléments glissant en acier inoxydable, et les poteaux extérieurs sur les appuis caoutchouc naturel-faible amortissement. Les appuis élastomères contrôlent la torsion de la structure tandis que les éléments glissant fournissent l'amortissement. Une variante de ce système a été employée pour rénover plusieurs constructions. Ces structures ont utilisé des appuis en élastomère à fort amortissement et du téflon en acier inoxydable, dans les constructions de l'université, tandis que des plaques d'alliage de plomb-bronze sur un acier inoxydable, dans la construction de l'hôpital, pour le système glissement. [18]

d-Appuis à roulement:

Bien que plusieurs systèmes d'appuis à roulement aient été proposés, il n'existe que très peu de réalisations de ce type en raison des inconvénients qu'ils présentent.

Ce système se compose de deux plaques en acier (plates ou incurvées) superposées et séparées par des rouleaux.

Selon la qualité du matériau du rouleau ou du roulement à billes, la résistance du système peut être suffisante pour pallier aux charges de services.

Pour permettre des mouvements dans deux directions, on utilise des billes sphériques ou deux couches orthogonales de rouleaux cylindriques. Lors de chaque déplacement, les ovoïdes entraînent un léger soulèvement de la construction qui a alors tendance à revenir à

sa position initiale. Un dispositif de blocage vis-à-vis de l'action du vent ainsi que des amortisseurs parasismiques peuvent être prévus.

Le principe de fonctionnement est presque identique à celui du système de pendule de glissement. Dans ce système, au lieu d'un glisseur articulé, une bille est employée et mise entre deux surfaces concaves opposantes et le rayon de courbure des surfaces concaves est remplacé dans ce système par le rayon de la bille adéquat pour atténuer l'effet sismique.

La configuration et la situation initiale sous la charge sismique sont illustrées (la Figure 1.21) :

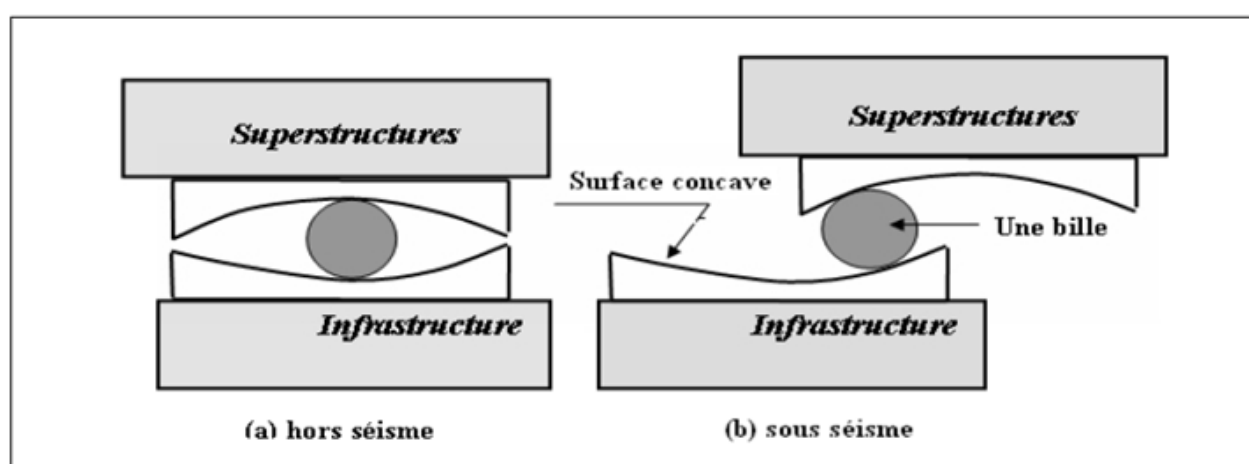


Figure 1.21 : le principe de base d'un appui à billes (à roulement) [1].

I.6.2 Contrôle passif avec dissipateurs d'énergie:

Les systèmes de contrôle passif avec dissipateurs d'énergie ont le même principe de base que les isolateurs sismiques lorsqu'ils sont incorporés dans la structure. Ils peuvent absorber une portion de l'énergie d'excitation extérieure. En plus, ils peuvent réduire substantiellement le mouvement différentiel entre les éléments de la structure et par conséquent réduire les dégâts dans cette dernière. Ces dernières années, de sérieux efforts ont amélioré le 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. Les principaux systèmes sont :

I.6.2.1. Amortisseurs métalliques:

Un des mécanismes les plus efficaces disponibles pour la dissipation de l'énergie d'entrée à une structure pendant un tremblement de terre. En structures métalliques traditionnelles, la conception parasismique dépend de la ductilité des pièces de charpente pour absorber l'énergie sismique. L'idée d'employer les amortisseurs hystérétiques métalliques dans une structure pour absorber une grande partie de l'énergie sismique a commencé par le travail conceptuel et expérimental. Plusieurs dispositifs d'amortisseurs hystérétiques métalliques considérés par ces chercheurs ont inclus la poutre de torsion, poutre de flexion, la bande-U comme affichée schématiquement dans et l'appui en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb affichés dans (la Figure 1.22). Ce sont des pièces réalisées en matériaux très ductiles tels que l'acier doux, plomb, alliage malléables, etc. La dissipation d'énergie est obtenue à travers les déformations plastiques auxquelles ils sont soumis lors des déplacements relatifs de la superstructure et des fondations.

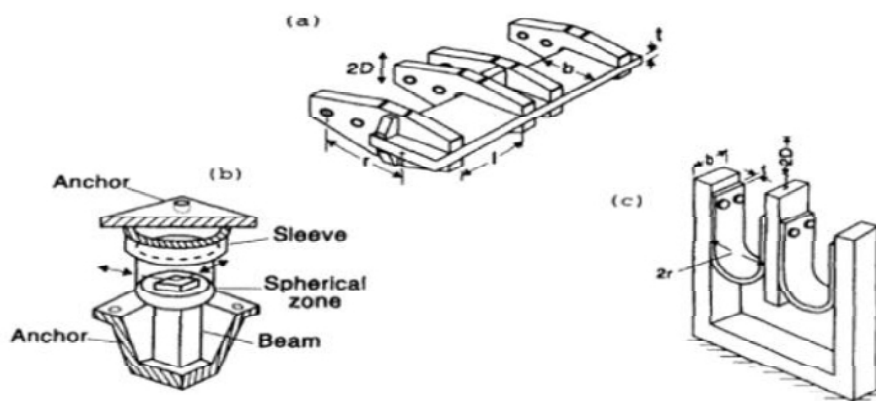


Figure 1.22 : Dispositifs amortisseurs métalliques a) poutre de torsion ,b) poutre de flexion , c) la bande-u) [3]

Des progrès considérables ont été accomplis dans le développement des amortisseurs métalliques. Par exemple, on a beaucoup de nouvelles conceptions, y compris les amortisseurs de la forme-X et des plaques triangulaires affichés dans (Figure1.22) :

Des nombreuses investigations expérimentales ont été conduites pour déterminer les caractéristiques du fonctionnement de différentes structures de dispositifs. En raison de ce programme de recherche continu, plusieurs produits ont été développés et mis en application. [5]

I.6.2.2. Amortisseurs à frottement:

Le frottement est un mécanisme efficace, fiable, économique, et largement appliqué, le principe de ces amortisseurs repose sur le phénomène de dissipation de l'énergie par friction qui apparaît sur les boucles d'hystérésis du diagramme efforts-déformations, qui peuvent être rectangulaires. Pour réaliser ce mécanisme de frottement, l'amortisseur comprend une série de plaques fixées les unes aux autres par des boulons en acier à haute résistance et spécialement traitées pour produire un degré de friction maximal. [5]

I.6.2.3.L'amortisseur de Sumitomo:

L'amortisseur de frottement de Sumitomo a été développé par les industries métallurgiques de Sumitomo au Japon. Pendant des années, l'amortisseur de frottement de Sumitomo était fabriqué pour des applications ferroviaires, mais il est maintenant étendu aux structures

(La figure 1.23) montre la construction d'un amortisseur de frottement typique de Sumitomo. Le dispositif se compose des plaquettes de cuivre, imbibées du graphite en contact avec le cylindre en acier du dispositif. La charge sur la surface de contact est développée par une série de cales qui agissent sous la compression des ressorts de rondelle de Belleville. Le graphite sert à lubrifier la surface de glissement et d'assurer un coefficient de frottement stable et un fonctionnement silencieux (Fahim Sadek, 1996; T.Soong, 1994). [5]

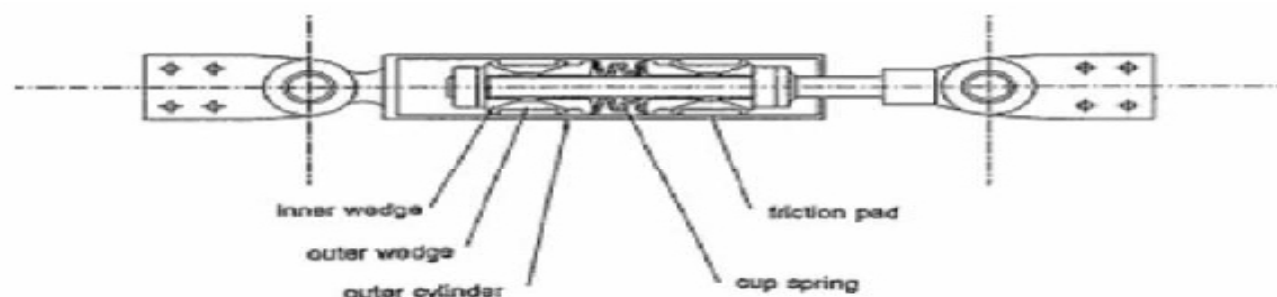


Figure 1.23 : L'amortisseur de Sumitomo

I.6.2.4.L'amortisseur de Pall :

Un exemple d'amortisseur qui emploie également le frottement de Coulomb pour absorber l'énergie lors d'un événement séismique est le dispositif de frottement. C'est un dispositif qui peut être situé à l'intersection des contreventements en croix dans le cadre comme le montre la (Figure 1.24) une fois la charge séismique est appliquée, le croisillon de tension induit un glissement au niveau du frottement. Par conséquent, les quatre liens forcent le croisillon de compression à glisser. De cette manière, l'énergie est absorbée dans les deux croisillons quoiqu'ils soient conçus pour être efficaces dans la traction seulement. Le dispositif est conçu pour empêcher le glissement sous les charges de service normales. Filiatrault et Cherry (1987) et d'Aiken et al. (1988) montrent l'efficacité de ces dispositifs en

prouvant une augmentation importante de la capacité de dissipation d'énergie et en réduisant le déplacement inter-étage par rapport aux structures en portiques sans de tels dispositifs. Filiatrault et Cherry (1990) ont développé une méthode de conception pour estimer la répartition des charges optimales de glissement pour les amortisseurs de frottement de Pall.

Le critère de conception est de réduire au minimum un index relatif d'exécution dérivée utilisant des concepts d'énergie. [5]



Figure 1.24 : l'amortisseur de pall et son installation

I.6.2.5. Amortisseur boulonné encoché:

Fitzgerald et al. (1989) ont proposé un dispositif de frottement qui permet au glissement d'avoir lieu dans les raccordements boulonnés encochés figure (1.25) (Fahim Sadek, 1996; T.Soong, 1994, Vicente Ruiz et Al.). L'amortisseur boulonné encoché se compose de plaques d'acier qui sont boulonnées ensemble avec une force de fixation spécifique. La force de fixation est telle que le glissement peut se produire à une force de frottement prédéterminée (Michael D. Symans, 2004) . L'interface glissante se compose seulement de l'acier. Une amélioration a été présentée par Grigorian et Popov (1993) qui ont examiné un raccordement boulonné encoché semblable à celui de Fitzgerald, excepté que l'interface de glissement s'est composée du laiton et de l'acier, une telle interface a présenté une caractéristique de friction plus stable que l'interface en acier. Des essais de simulateur de tremblement de terre d'un modèle à trois étages d'acier avec le raccordement encoché ont été effectués par Grigorian et Popov (1993) qui ont montré l'efficacité du dispositif en réduisant la réponse (Fahim Sadek, 1996). [5]

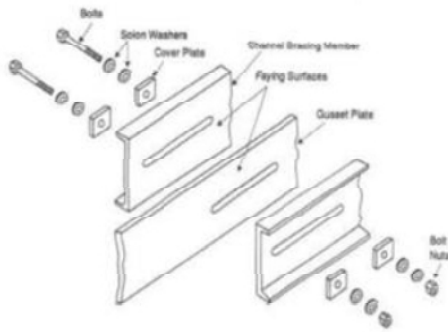


Figure 1.25 : Amortisseur boulonné encoché

I.6.2.6. Amortisseurs viscoélastiques (VE):

Les amortisseurs viscoélastiques se composent des matériaux viscoélastiques VE de grands amortissements tels que le caoutchouc, les polymères, et les substances vitreuses pour dissiper et absorber l'énergie par la déformation de cisaillement. Un amortisseur VE typique contient des couches des matériaux VE sur des plaques métalliques suivant les indications de la figure (23 a). Des composants d'amortisseur VE sont montés sur une structure en tant qu'une partie de la membrure, voir la Figure (23 b) et sur un système des diagonales de contreventement, voir la Figure (23 c). La déformation de cisaillement se produit et l'énergie est absorbée quand la vibration structurale induit le mouvement relatif entre les ailes horizontales des plaques métalliques externes et la plaque centrale [2].

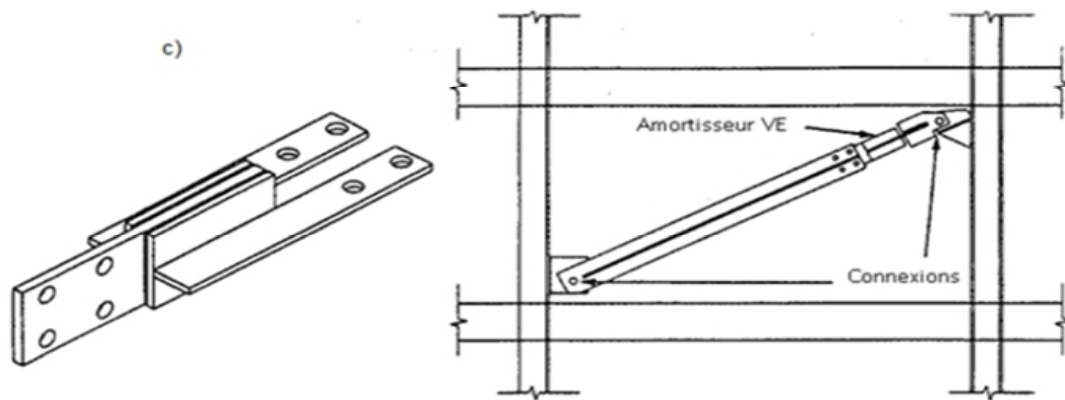


Figure 1.26: Dispositifs des amortisseurs viscoélastiques VE a) Détail d'un amortisseur VE, b) Connexion de l'amortisseur VE à la membrure[18]

I.6.3. Amortisseurs fluides visqueux:

Les amortisseurs métalliques, frottements et amortisseurs VE tous utilisent l'action des solides pour améliorer la performance des structures soumises aux excitations environnementales. L'utilisation du fluide visqueux pour la réduction de choc et de vibration est bien connue à l'industrie lourde et militaire.

Dans les années 70, la première mise en place complète des amortisseurs fluides visqueux a été faite pour des ponts en Italie. Dans les années 80, des efforts importants ont été faits pour développer cette technologie industrielle pour les structures de génie civil. Ces efforts ont mené au développement, l'analyse et la modélisation le test et la mise en place complète des amortisseurs fluides visqueux.

Le concept des amortisseurs fluides visqueux est affiché sur la figure (1.27).

Une conception simple est réalisée avec dashpot classique, et la dissipation se produit en convertissant l'énergie cinétique en chaleur pendant que le piston se déplace et déforme un fluide épais et très visqueux. Cet amortisseur liquide visqueux, voir la figure (1.27) a été fabriqué pour la première fois par le contrôle de vibration de GERB et utilisé comme composant des systèmes sismiques avec isolateurs à la base. Le mouvement relatif d'un amortisseur piston dans l'amortisseur du boîtier provoque le fluide visqueux pour entrer et sortir dans les deux sens à travers l'orifice, et l'énergie a absorbée par le frottement entre le fluide visqueux et l'orifice.

Le concept employé dans la superstructure apparaît dans la conception alternative du mur d'amortissement visqueux (VDW), voir la figure (24 b), a été élaboré par l'entreprise de construction Japonaise Sumitomo (Aiken et Kelly J.M, 1990), le piston est simplement une plaque métallique provoquer pour se déplacer dans son plan dans un récipient rectangulaire en métallique étroit est rempli de fluide visqueux. Pour installer un VDW, le piston est fixé au plancher ci-dessus, et le récipient est fixé au plancher ci-dessous. Le mouvement des planchers déforme le fluide, ainsi le frottement entre la plaque intérieure et le fluide visqueux absorbe l'énergie.

Semblable aux amortisseurs VE, les amortisseurs fluides visqueux se comportent linéairement avec la température et liés à la fréquence. Des joints de haute résistance sont exigés pour empêcher le fluide visqueux de son fuir. Le coût de cet amortissement relativement bas par contre son efficacité est haute. [17]

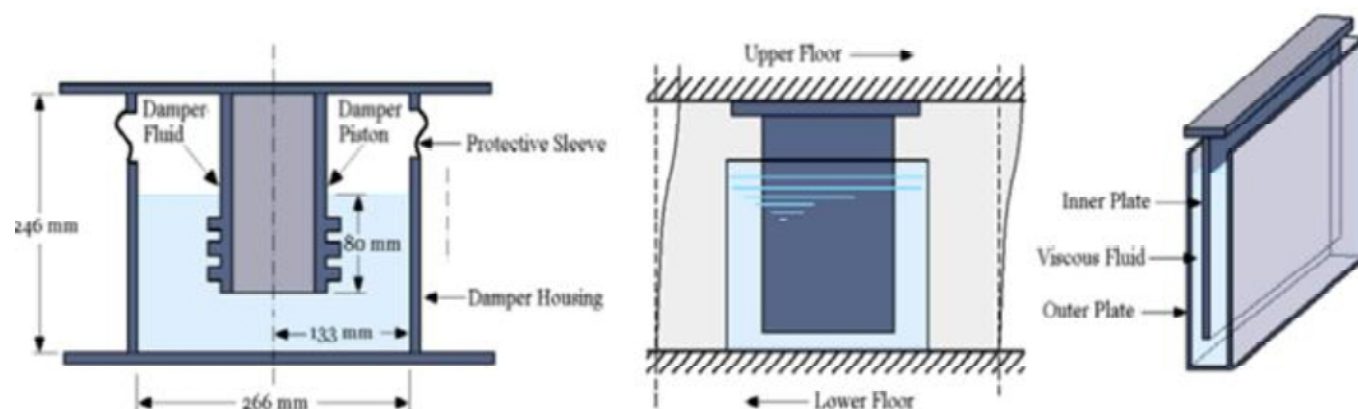


FIGURE 1.27 : a) Amortisseur à fluide de récipient cylindrique de GERB.
b) Mur d'amortissement visqueux (VDW) .

I.3. Etude dynamique des systèmes isolés :

I.3.1. MÉTHODE DE CALCUL DES STRUCTURE ISOLÉES :

Toute structure sismiquement isolée et chaque partie de celle-ci doivent être conçues et construites conformément aux exigences des règlements suivants :

- ✓ IBC 2000 (international building code)
- ✓ UBC 1997 (Uniform building code)

Tous les codes prévoient différents niveaux d'intensité du mouvement sismique. IBC2000 adopte une approche à deux niveaux du mouvement sismique, qui sont :

- ✓ Le tremblement de terre de conception (DBE ; Design Basis Earthquake) : ce niveau du mouvement de tremblement de terre a une probabilité de 10% pour être excédé en 50 ans (la période de retour du tremblement de terre est de 475 années). Ce niveau est employé pour concevoir le système d'isolation, la superstructure, et l'infrastructure.

Le tremblement de terre maximum (MCE ; Maximum Capable Earthquake) : est le niveau maximum de secousse sismique qui pourrait toucher le site où se trouve la structure. L'MCE est pris en tant que probabilité de 10% pour être dépassé en 100 ans (la période de retour du tremblement de terre est de 1000 années). Ce niveau est employé pour vérifier la stabilité du système d'isolation.

Selon le IBC 2000 Les constructions isolées peuvent être analysées et calculées suivant trois méthodes à savoir :

- La méthode statique équivalente
- La méthode d'analyse dynamique par spectre de réponse (response spectrum analysis)

- La méthode d'analyse dynamique par accélérogramme (Time History Analysis)

1.3.1.1 Méthode statique équivalente :

La procédure de la méthode statique équivalente est autorisée à être utilisée pour la conception d'une structure sismiquement isolée à condition que:

- 1) La structure est située à un site avec S_1 Inférieure ou égale à $0.60g$ (S_1 est l'accélération spectrale de 5% d'amortissement).
- 2) La structure est située sur un site de classe A (roche dure), B (roche), C (Sol très dense et roche meuble) ou D (sol ferme).
- 3) La structure au-dessus du plan d'isolation n'excède pas quatre étages ou 20m de hauteur.
- 4) La période maximale du système d'isolation (TM) ne dépasse pas les 3.0 secondes.
- 5) La période de conception de la structure isolée (TD) est trois fois plus grande que la période de la structure à base fixe.
- 6) La structure au-dessus du plan d'isolation est régulière [10].

7) Le système d'isolation doit satisfaire les critères suivants :

- 7.1) La rigidité effective du système d'isolation au déplacement de conception est Supérieure au tiers de la rigidité effective à 20% de déplacement maximum.
- 7.2) Le système d'isolation est capable de produire une force de rappel.
- 7.3) Les caractéristiques force et déplacement du système d'isolation sont indépendants du taux de chargement.
- 7.4) Les caractéristiques force et déplacement du système d'isolation sont indépendants de la charge verticale et de la charge bilatérale.
- 7.5) Le système d'isolation ne limite pas le déplacement maximal du tremblement de terre de moins de SM/SD fois le déplacement de la conception totale [14] ou : Dans la conception parasismique des structures en béton armé, les règles utilisées sont basées sur les connaissances les plus récentes dans le domaine de la recherche scientifique. Ces règles constituent un ensemble de normes de conception très avancées. Parmi les objectifs visés de ces normes sont d'assurer la protection des vies humaines et de limiter les dommages que peut avoir la structure durant une secousse sismique. Actuellement en Europe, l'Euro code 8 (EC8) est le code officiel de conception et de calcul des structures pour leur résistance aux séismes.

En Algérie, le premier code parasismique a paru après le séisme d'El Asnam 1980. Ce code a connu plusieurs versions. **La version actuelle utilisée est nommée le règlement parasismique Algérienne RPA 99/v2003 « DTR BC 2-48»**, et qui a été approuvée par la commission technique permanente lors de sa réunion du 4 Décembre 1999.

$$S_{M1} = F_v * S_1 \quad (3.1)$$

$$S_{D1} = 2/3 * S_{M1} \quad (3.2)$$

S_{M1} : Les accélérations de réponse maximum spectrale considéré comme le

Tremblement de terre pour 1 seconde de période.

S_{DI} : L'accélération de la réponse spectrale de la conception pour 1 seconde de période

F_V : Coefficient de site

S_1 : Les accélérations spectrales (pendant une période de 1 seconde) [10].

1.3.1.2 La méthode d'analyse dynamique par spectre de réponse :

L'analyse dynamique peut être utilisée dans tous les cas et doit être utilisée si les conditions mentionnées à l'adéquation de l'analyse statique ne sont pas satisfaites. L'analyse dynamique peut prendre la forme d'analyse de spectre de réponse ou d'analyse temps-histoire.

L'application de la méthode dynamique modale spectrale est exigée dans les cas suivants :

- ✓ La structure au-dessus du plan d'isolation est irrégulière.
- ✓ La structure au-dessus du plan d'isolation est de plus de quatre étages ou 20m de hauteur
- ✓ La période effective de la structure isolée (TD) est trois fois plus grande que la période fondamentale de la structure à base fixe ($TD > 3 TF$).[10]

1.3.1.3 La méthode d'analyse par accélérogramme :

La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes consiste l'étude des efforts dans la structure en fonction du temps, elle est utilisée dans tous les cas en particulier pour les structures isolées qui ne répondent pas aux critères de l'analyse statique ou l'analyse modale spectrale. Cette méthode est plus précise pour la représentation de l'action sismique ainsi que pour le calcul non linéaire des structures isolées.

Les codes exigent l'application de la méthode d'analyse dynamique par accélérogramme dans les cas suivants :

1. Au moins trois accélérogrammes enregistrées doivent être appliqués.
2. Si les accélérogrammes enregistrées ne sont pas disponibles, des enregistrements simulés appropriés peuvent être employés pour composer tout le nombre des enregistrements requis
3. Pour chaque composante des paires du mouvement du sol horizontal, un spectre de 5% d'amortissement doit être construit et le spectre résultant doit être combiné selon la combinaison SRSS (la racine carrée de la somme des carrés) des deux spectres.
4. Par suite, les réponses temporelles doivent être réduites (multipliées par un facteur) telle que la valeur moyenne du spectre de SRSS ne tombe pas au-dessous de 1.3 du spectre de conception correspondant à 5% d'amortissement (DBE ou MCE) et par un excédent de plus de 10% sur un intervalle de période de 0.5 TD à 1.25 TM, où TD et TM sont les périodes d'isolation effectives correspondantes respectivement au déplacement de conception et au déplacement maximum.[10]

Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe des appareils d'isolations à la base ainsi que leurs types, au cours des 20 dernières années, des technologies innovatrices concernant les dispositifs de dissipation d'énergie et d'isolation à la base ont été développées, et elles ont servi à améliorer la performance sismique des bâtiments. Les dispositifs de dissipation d'énergie comme les amortisseurs peuvent diminuer les dommages potentiels aux bâtiments en absorbant une quantité significative de l'énergie produite dans un bâtiment lors d'une secousse sismique et les isolateurs à la base jouent le rôle de couche flexible entre la fondation et le bâtiment; par conséquent, les mouvements du sol ont une faible incidence sur la structure du bâtiment. L'isolation à la base est une solution technique qui peut atténuer les accélérations importantes du sol et les mouvements inter-étages [5].

Dans le cas des structures isolées, certaines vérifications dans l'analyse dynamique sont nécessaires par rapport aux structures non isolées.

II.1 Introduction :

La grande mosquée d'Alger ou Djamaa El Djazaïr est une mosquée située en Algérie. En cours de construction.

Ce projet de construction ambitieux suscite une attention particulière quant à la technique de construction à adopter et surtout au vu de son coût et de son caractère stratégique sur le plan socioculturel [1] [2] [3].

Il est nécessaire de lui assurer une pérennité et une parfaite résistance aux agressions naturelles telles que les secousses sismiques.

Le projet de cet ouvrage important est représenté par(la Figure 2.1)



Figure2.1 : Projet de la Grande Mosquée d'Alger « Djamaa El Djazaïr » [1]

Il s'agira de la plus grande mosquée d'Afrique et de la troisième au monde après masjid al haram de la Mecque et masjid al nabawi de medine. Son cout a déjà dépassé les deux milliards de dollars fin 2016 [1].

Cette mosquée pourra accueillir 120000 fidèles et sera dotée d'un minaret de 265m de hauteur, le plus grand au monde. Elle comprendra plusieurs bâtiments indépendants disposés sur une surface de 20 hectares. Elle sera dotée d'une salle de prière, salle de conférence un musée d'art d'histoire islamiques, d'un centre de recherche sur l'histoire d'Algérie, de locaux commerciaux, d'un restaurant de bibliothèques et d'un parking de 6000 places [1] [2] [3].

La figure (2.2) montre une vue de la grande mosquée prise par Google Map Le (15/05/2017).

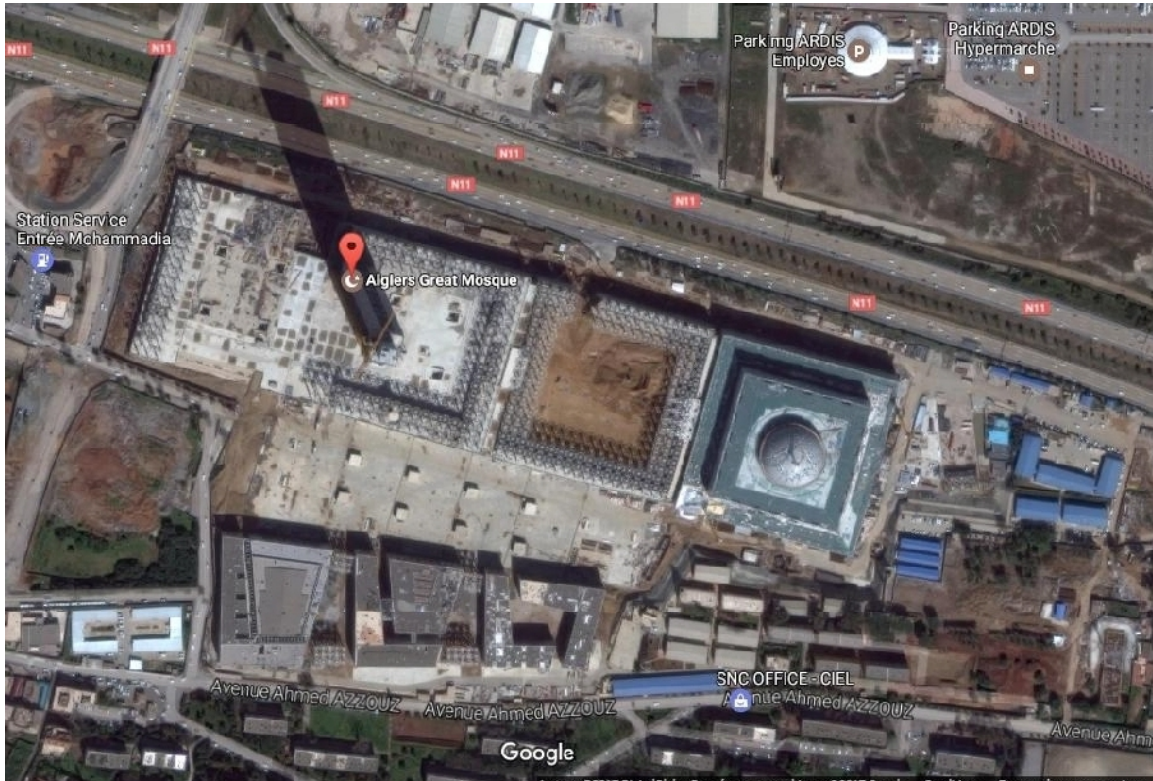


Figure 2.2 : localisation de la grande mosquée par Google Map (le 15/05/2017)

Dans ce travail on s'intéresse à l'analyse du comportement dynamique de la salle de prière de cette mosquée.

Ce chapitre est consacré à la description de cette partie importante de la mosquée d'Alger.

II.2 les intervenants dans le projet

II.2.1 Le contrôle technique de la construction (CTC) :

C'est l'Organisme national de contrôle technique de la construction (CTC) qui a pris en charge le projet du Djamaâ el Djazaïr dès sa première conception.

C'est avec une équipe de 15 cadres sur le chantier que l'intervention du CTC consiste à contrôler les plans et les travaux effectués sur place. Les équipes du CTC sont soutenues par des experts algériens qui connaissent bien le dossier et qui disent que le bâtiment a une résistance très élevée au séisme. Les capacités du CTC sont avérées pour contrôler les travaux de réalisation d'un ouvrage de la taille du Djamaâ el Djazaïr. [3]

Le CTC est en avance en ce qui concerne les normes parasismiques et il est parmi les premières institutions algériennes à appliquer et contrôler les nouvelles technologies [3].

II.2.2 Bureaux d'études :

Le groupement allemand qui a conçu Djamaâ el Djazaïr est formé par les deux bureaux d'études allemands nommés « KSP Jürgen Engel Architekten » et « Krebs und Kiefer » jusqu'à 2016.

Ce groupement d'études allemand a remporté le concours international d'architecture pour ce projet en janvier 2008 avant que la signature du contrat ne se fasse en juillet 2008 pour la maîtrise d'œuvre en présence de la chancelière allemande Angela Merkel.

La mission inclut les études de conception générale et d'exécution pour tous les corps d'état ainsi que le suivi et contrôle des travaux de réalisation de Djamaâ El Djazaïr.

L'équipe de conception se composait de plus de 100 architectes et ingénieurs.

En 2007, la société d'ingénierie-construction Dessau-Soprin a obtenu le contrat de gestion de ce projet

Le bureau d'études français Socotec s'est ensuite joint au projet de cette mosquée.

C'est le bureau d'études français Egis qui assure le suivi de la réalisation de cette mosquée depuis février 2016 [3] ainsi que pour la vérification des plans complémentaires que fait l'entreprise China State Construction Engineering (CSCEC).

II.2.3 Construction :

C'est l'entreprise chinoise China State Construction Engineering (CSCEC) qui a été chargée de la réalisation de la Mosquée El Djazaïr.

Les premières opérations de coulage des fondations en béton ont commencé le 16 août 2012, après une cérémonie de lancement des travaux.

La construction devait générer 17 000 emplois entre travailleurs chinois (10 000) et algériens (7 000) [3] .

II.3 Description de la Salle de prière :

II.3.1. Propriétés géométriques :

La construction de la troisième plus grande mosquée au monde a commencé au début de 2013. La salle de prière s'étendant sur une superficie de 145m x 145 m et Elle est composée de deux sous sol et d'un RDC d'une hauteur totale de 66.69 m, la hauteur du 1 sous-sol est de 5.25 m tandis celle du 2 ème est de 2.7 m.

La structure a été isolée avec 246 isolateurs et 80 amortisseurs hydrauliques à fournir un ensemble de 8% d'amortissement et pour limiter le déplacement sismique maximal à 500 mm en raison de la sismicité de la zone de construction.

La longueur totale de la salle de prière est de 145 m de même sa largeur est de 145 m (Figure2.3).

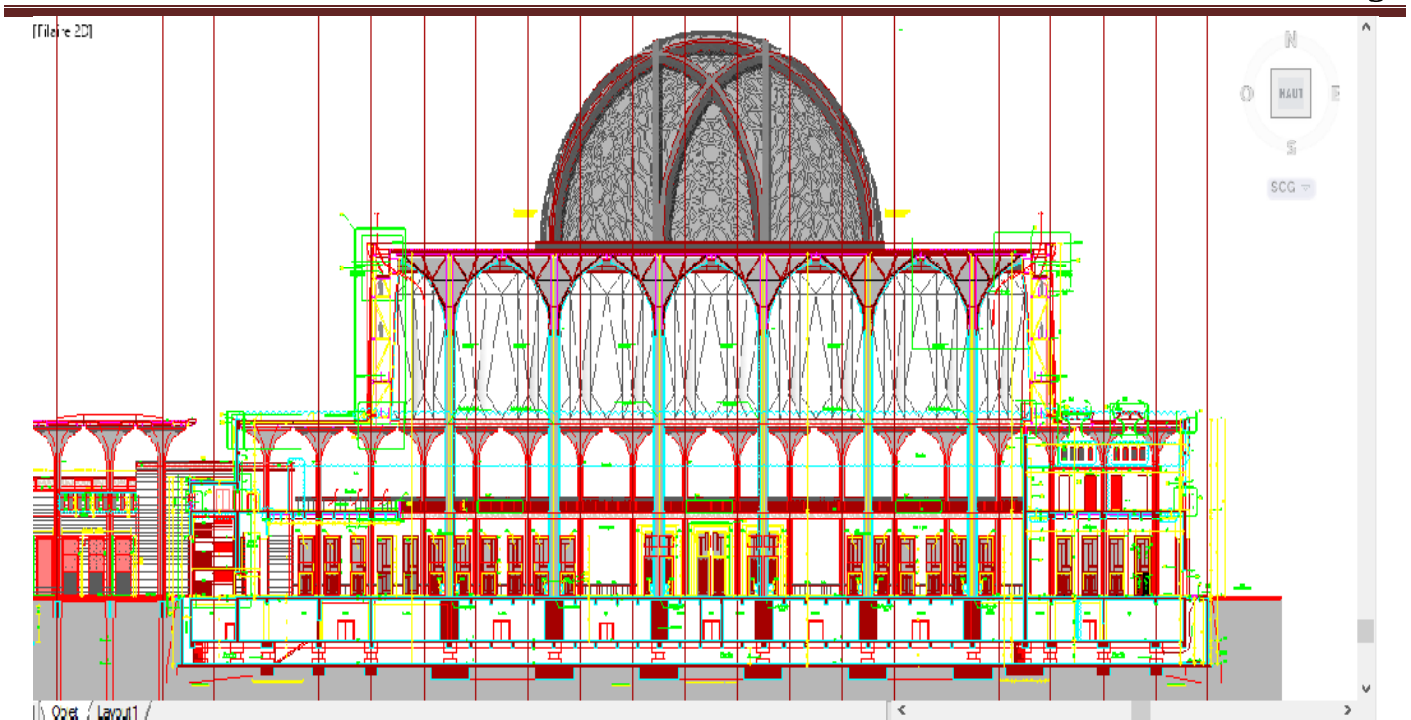


Figure2.4 : élévation nord de la salle de prière puise par AutoCAD.

La **figure 2.5** montre une photo de la salle de prière en cours de construction



Figure2.5: la salle de prière en cours de construction

Les poutres du premier sous-sol sont de section $90 \times 60 \text{ cm}^2$ et les poutres du Deuxième sous-sol sont de section $110 \times 80 \text{ cm}^2$ dans les deux sens. Les poutres de niveau RDC sont de type métallique (HEA220). Les sections des poteaux : situés dans le 2^{ème} sous-sol sont de $200 \times 200 \text{ cm}^2$ (intérieur) et $110 \times 110 \text{ cm}^2$ (de rive)

Les sections des socles utilisés dans le 1^{er} sous-sol pour les isolateurs sont de $200 \times 200 \text{ cm}^2$ tandis que ceux utilisés pour les amortisseurs sont de $180 \times 200 \text{ cm}^2$.

La Figure 2.6 : montre le niveau d'isolateur de la Grande Mosquée d'Alger - Djamaa El Djazaïr. [1]

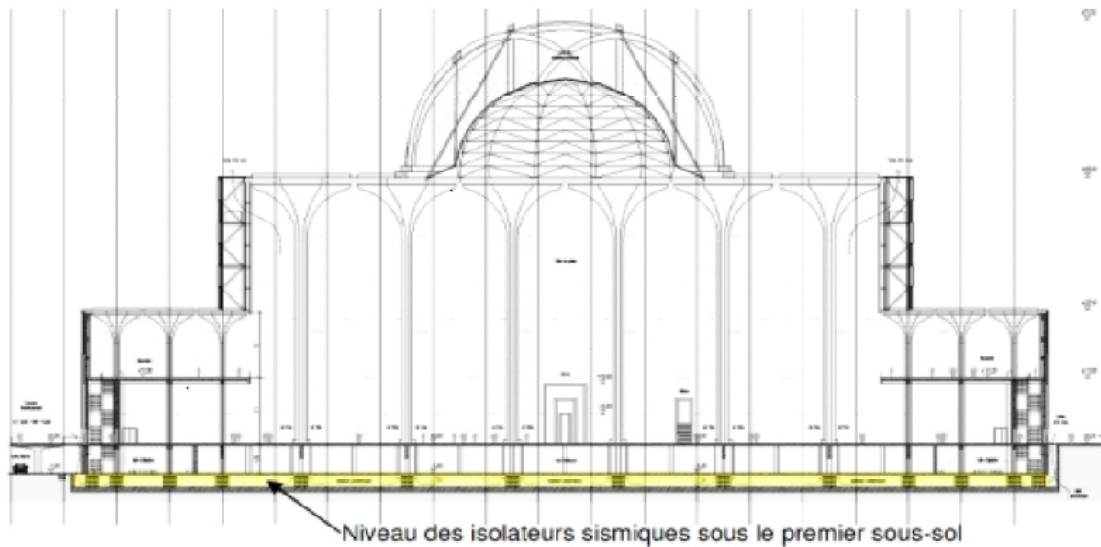


Figure 2.6 : la position d'isolateur de la Grande Mosquée d'Alger - Djamaa El Djazaïr.

Au centre de la salle se trouvent 32 colonnes de diamètre 162 cm, d'une hauteur de 34m, 8 de ces colonnes supportent la coupole au centre de la Salle.

Sur le pourtour de la salle de prière se trouvent des colonnes de diamètre 81cm et d'une hauteur maximale de 17m. La Figure2.7 montre les colonnes utilisées pour la salle de prière.

L'ensemble de la Salle de Prière est construite sans joint de dilatation, avec une isolation sismique au niveau du 2^{ème} sous-sol. C'est grâce à ces conditions préalables que la réalisation du « hall de colonnes » [1] Planifié est possible



La Figure 2.7 : montre les colonnes utilisées dans la salle de prière de la grande Mosquée d'Alger.

II.3.2 Propriétés mécaniques

a- Résistance à la compression du béton :

Le béton est défini par sa contrainte déterminée à 28 jours d'âge, d'après des essais sur des éprouvettes normalisées de 16cm de diamètre et de 32cm de hauteur. Elle est notée f_{c28} . Pour notre cas on prendra $f_{c28}=25\text{Mpa}$ [1].

b-Module de déformation longitudinale

Ce module est connu sous le nom de module de « Young ou module de déformation longitudinal », il est défini sous l'action des contraintes normales d'une longue durée ou de courte durée d'application.

On trouve le module de déformation instantanée et différée[1].

- **Module d'élasticité instantanée :**

Il est mesuré à partir de la courbe ($\sigma - \xi$) d'un test de courte durée, il représente le module d'élasticité sous chargement accidentel.

$$E_{ij}=11000(f_{cj})^{1/3} \quad (f_{cj}, E_{ij} \text{ en Mpa})$$

Dans notre étude pour les éléments préfabriqués $E_{ij}=32164,2 \text{ Mpa}$

- **Module d'élasticité différée :**

Il est mesuré à partir de la courbe ($\sigma - \xi$) d'un test de longue durée, il représente le module d'élasticité sous chargement durable ou transitoire.

$$E_{vj}=3700(f_{cj})^{1/3}$$

Pour notre cas $f_{cj}=f_{c28}=25\text{Mpa}$

$$E_{ij}=20,32164\text{Mpa} \quad E_{vj}=10818,9\text{Mpa}$$

- **c-Coefficient de poisson :**

Le coefficient de poisson du béton est pris égal

à E.L.U : $\nu=0,0$ calcul des sollicitations (béton fissuré).

à E.L.S : $\nu=0,2$ calcul des déformations (béton non fissuré).

II.4 Système d'isolation de base :

La salle de prière de la grande mosquée est isolée par un système de contrôle composé d'un isolateur et d'un amortisseur .

La Figure 2.8 montre des isolateurs et des amortisseurs de la grande mosquée [3]

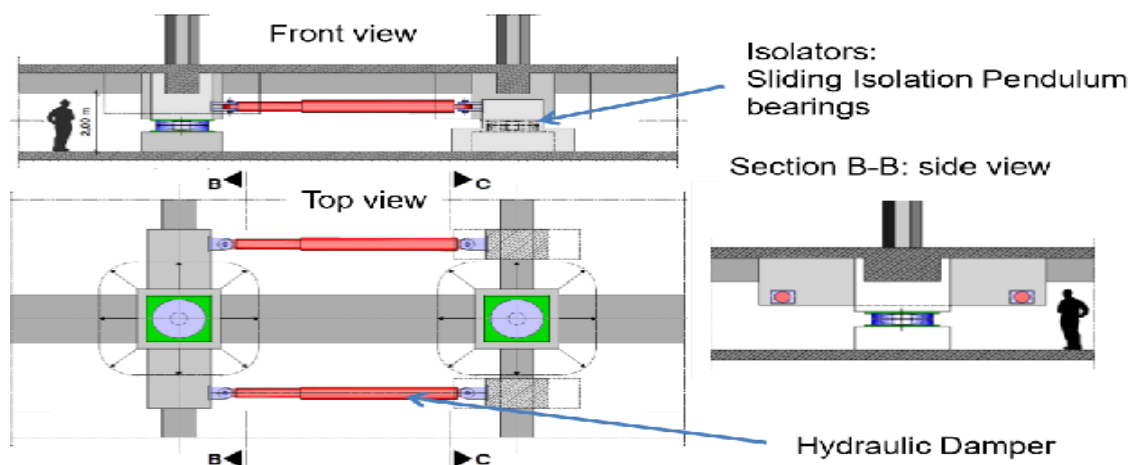


Figure 2.8 : Type d'isolation (FPS avec Amortisseur)

La Figure 2.9 : montre une photo pris au chantier de la grande mosquée montrant le système d'isolation.



Figure 2.9 : Système d'isolation de base

II.4.1 Isolateur en pendule de frottement :

Les isolateurs utilisés dans ce projet sont de type FPS (friction pendule system).

Les systèmes FPS peuvent prendre diverses formes. Appui lisses plates peuvent être combinés avec des paliers en élastomère pour former des systèmes d'isolation hybrides avec une gamme de capacités et de raideurs de dissipation d'énergie, la Figure 2.10 représente le système FPS.

Ils comprennent un pot, disque et roulements à rotule, le palier sphérique ayant la résistance à la rotation et par conséquent la répartition la plus favorable de la pression sur l'interface de glissement.

Les systèmes (FPS) ne sont pas décrits par la même équation de mouvement comme des pendules classiques et leur période de vibration est directement proportionnelle au rayon de courbure de la surface concave. Les décalages de la période sont donc possibles avec des surfaces qui ont de grands rayons de courbure. Le frottement entre le coulisseau articulé et la surface concave dissipe l'énergie, et le poids de la structure agit comme une force de rappel, en raison de la courbure de la surface de glissement [3]

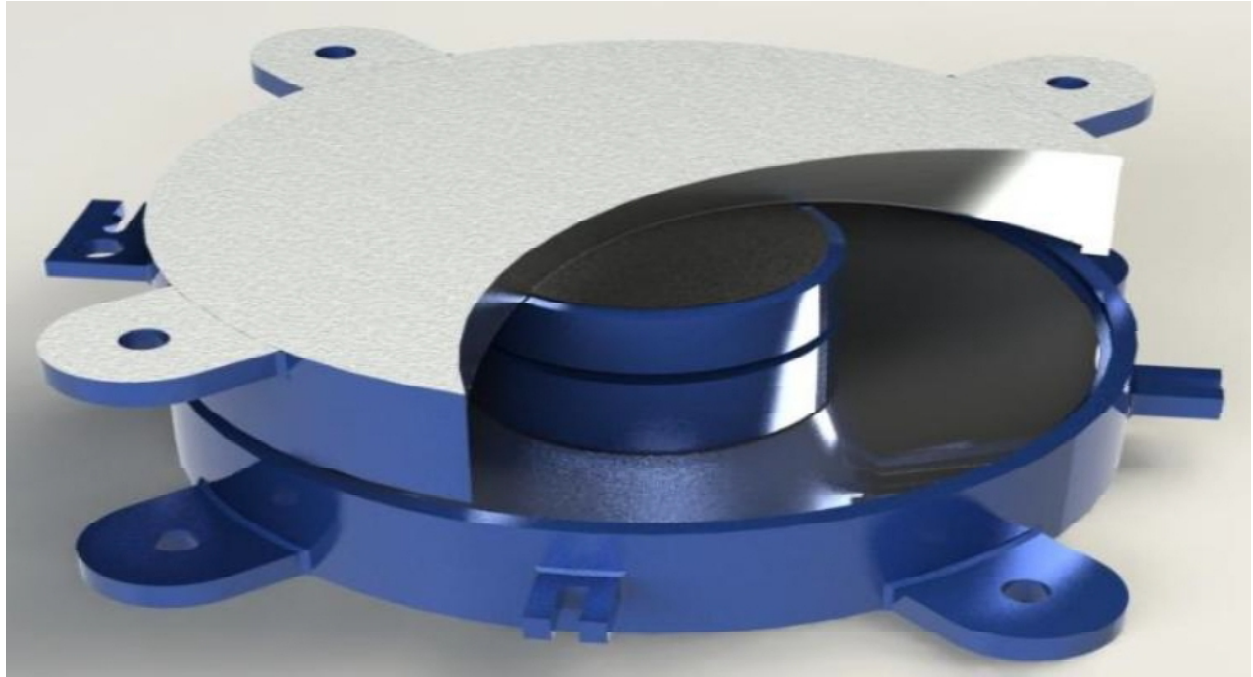


Figure 2.10 : Système de Pendule de frottement (FPS).

II.4.1.2-Description des systèmes d'isolation :

Les Isolateurs en pendules de frottement(FPS) utilisé dans le projet de la grande mosquée ont les caractéristiques suivantes : (Figure2.11)

- ✓ 246 unités, jusqu'à 27MN charge verticale.
- ✓ double surface de glissement.
- ✓ Recentrage assuré
- ✓ placé sous chaque colonne pour une bonne transmission de la charge

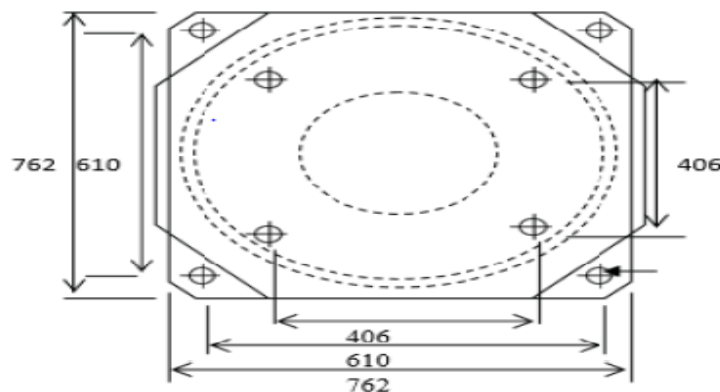


Figure 2.11 : dimensions pour un Système de Pendule de frottement.

Le tableau 2.1 : résume les propriétés du système FPS utilisé dans ce projet

K_v (kN/ m)	K_{eff} (kN/ m)	K_1 (kN /m)	u max	u min	R(m)	D(m)	Ce
24727500	1500	2845.528	0.08	0.04	2.4	0.6	35

Le tableau 2.1 : propriété de l isolateur FPS utiliser dans le projet [3]

Avec :

K_v : Rigidité verticale total, **K_{eff}** : Rigidité effective, **K_1** : Rigidité élastique, **R** : Rayon, **D** : Déplacement latérale, **Ce** : l'amortissement équivalent.

II.4.2 Formulation de l'isolateur :

La résistance du palier contre les forces horizontales qui agissent pour augmenter le déplacement, est assurée par deux mécanismes différents. La première est la résistance de frottement, F_f , généré au niveau de l'interface entre le coulisseau articulé et la surface concave,. Cette force est égale au produit du coefficient de frottement dynamique μ , et la composante du poids normal à la surface concave :

$$F_f = \mu W \cos\theta \quad (2.1)$$

La Figure2.12 : montre les caractéristique géomètre de FPS

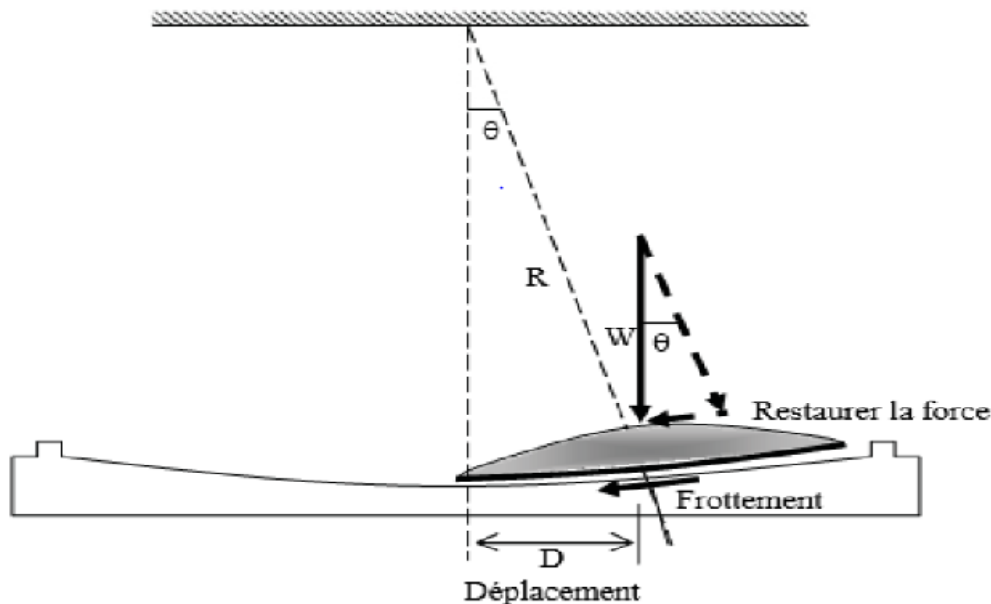


Figure2.12 : Opération de l'isolateur en pendule de frottement.

Le second mécanisme de résistance est la force de rappel générée par la composante tangentielle du poids agissant sur le palier,. La force est donnée par:

$$F_f = W \sin\theta$$

Si le déplacement, D , du palier est faible par rapport au rayon, R , de la surface concave, Alor :

$$\cos\theta = 1 \text{ et } \sin\theta = D/R$$

On remplace les équations et en additionnant les résultats, La résistance horizontale totale du palier de déplacement est donnée par :

$$F = \mu W + WD/R \quad (2.2)$$

On prend $Q_d = \mu D$ et $K_d = W/R$
donne:

$$F = Q_d + K_d D \quad (2.3)$$

$$T = 2\pi \sqrt{R/g} \quad (2.4)$$

Avec g est l'accélération de la pesanteur. La période T de glissement est vue pour être simplement déterminée par le rayon, R . [3]

La boucle force-déplacement d'hystérésis idéalisée pour l'isolateur du pendule de frottement est représentée dans la figure 2.13

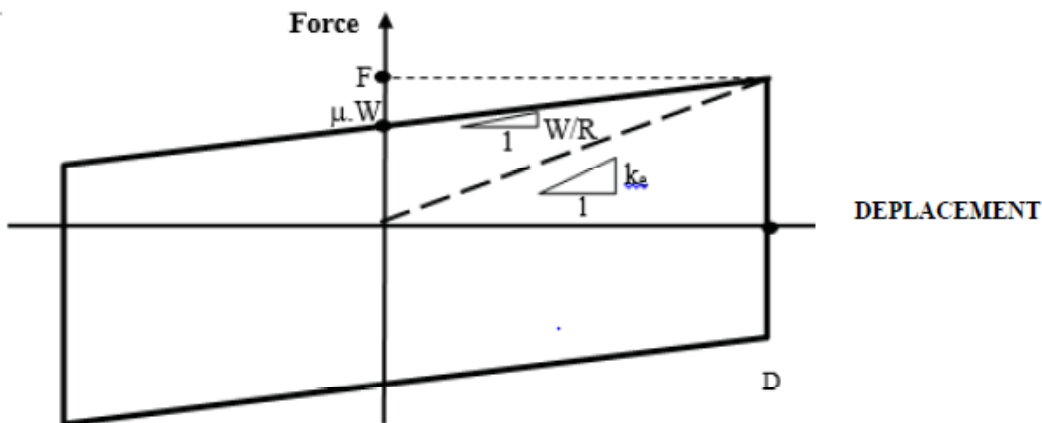


Figure 2.13: La boucle force-déplacement hystérésis idéalisée pour l'isolateur du pendule de frottement.

Étant donné que le comportement de l'isolateur est non linéaire, les propriétés linéarités équivalentes sont nécessaires si les méthodes élastiques d'analyse doivent être utilisées. Comme avec des isolateurs en élastomère, ces propriétés comprennent la rigidité d'appui efficace et un rapport d'amortissement visqueux équivalent pour tenir compte de l'effet de la dissipation d'énergie hystérétique.

La rigidité d'appui effective, et elle est obtenue en divisant la force horizontale, F par le déplacement du palier correspondant, D . [4]

on a donc :

$$K_e = \mu W/D + W/R \quad (2.5)$$

Etant donné que la zone de la boucle d'hystérésis est donnée par:

$$EDC = 4\mu WD$$

$$\beta_e = EDC/2\pi K_e D^2 \max \quad (2.6)$$

donne l'expression suivante pour le rapport d'amortissement visqueux équivalent, β_e :

$$\beta_e = 2\pi(\mu/(\mu + D/R)) \quad (2.7)$$

II.4.3 Amortisseurs à fluide visqueux :

Les amortisseurs utilisés sont à fluide visqueux (figure 2.14)

- ✓ On a 40 dans la direction X et 40 dans la direction y.
- ✓ une charnière sphérique pour accueillir les rotations aux deux extrémités. Est utilisée.

-l'amortisseur utilisé a les caractéristiques suivantes :

- La force maximale est de 2500kN
- La raideur équivalente : 5800 kN/m
- L'exposant(α) :0.05

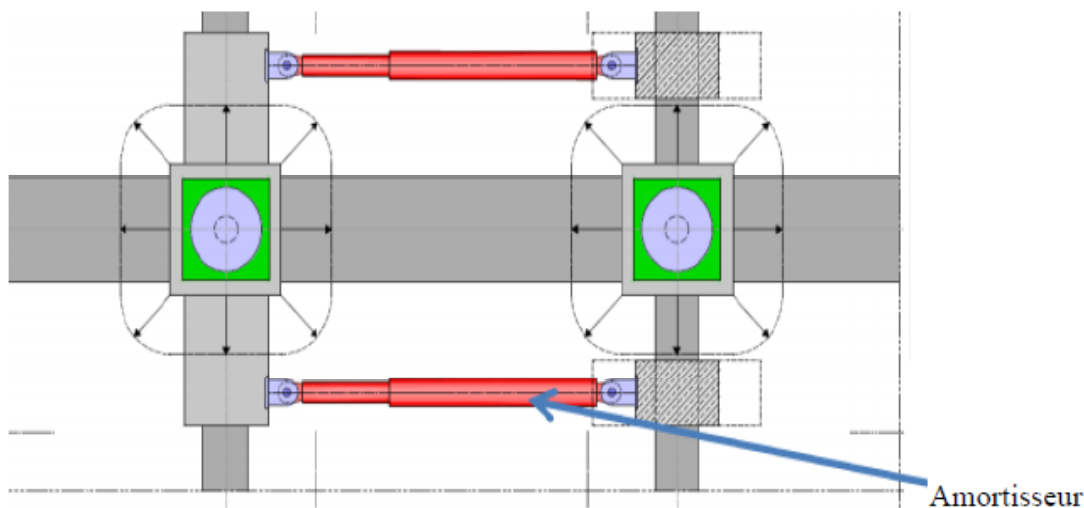


Figure 2.14: Mise en œuvre des amortisseurs [4].

II.5.Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté la salle de prière de la grande mosquée d'Alger, ainsi que les intervenants dans ce projet. La description géométrique de chaque élément de la structure a été également fournie. Enfin, on a identifié les caractéristiques de système d'isolation utilisé dans ce projet.

III.1-Introduction :

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la salle de prière de la grande mosquée d'Alger. Nous avons établi 3 modèles par le logiciel sap2000 version 14 :

- Le premier modèle : Structure à base fixe.
 - Le deuxième modèle : Structure isolée avec des FPS
 - Le troisième modèle : Structure isolée avec des FPS et des amortisseurs à fluides visqueux.
- On note que c'est le troisième modèle qui constitue le cas réel, les deux autres modèles vont être utilisés pour étudier l'influence du type d'appuis.

III.2. Modélisation de la salle de prière :

La salle de prière de la grande mosquée a été modélisée en 3D en éléments finis par le logiciel Sap2000.

Les poutres et les poteaux sont modélisés par des éléments frame de sections différentes. De même le contreventement par des éléments frames de section (HEA220).

La coupole est modélisée aussi par un ensemble d'éléments frame.

Les appuis de la structure étudiée sont considérés encastrés pour le premier modèle, tandis que pour le deuxième et le troisième des éléments Link ont été utilisés pour modéliser les FPS (le Link est de type friction isolateur) et les amortisseurs (le Link est de type Damper).

Les étapes de cette modélisation sont présentées en annexe A.

La Figure 3.1 montre les modèles des appuis établis pour la structure

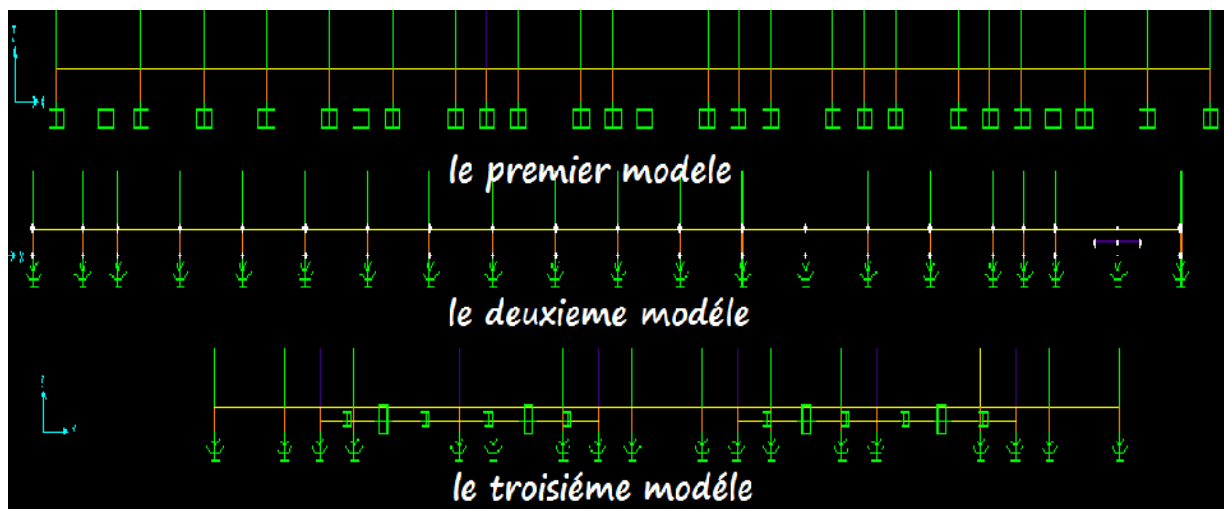


Figure 3.1 : Modeles d'appuis utilisés

La Figure 3.2 : montre le modèle en 3D de la salle de prière

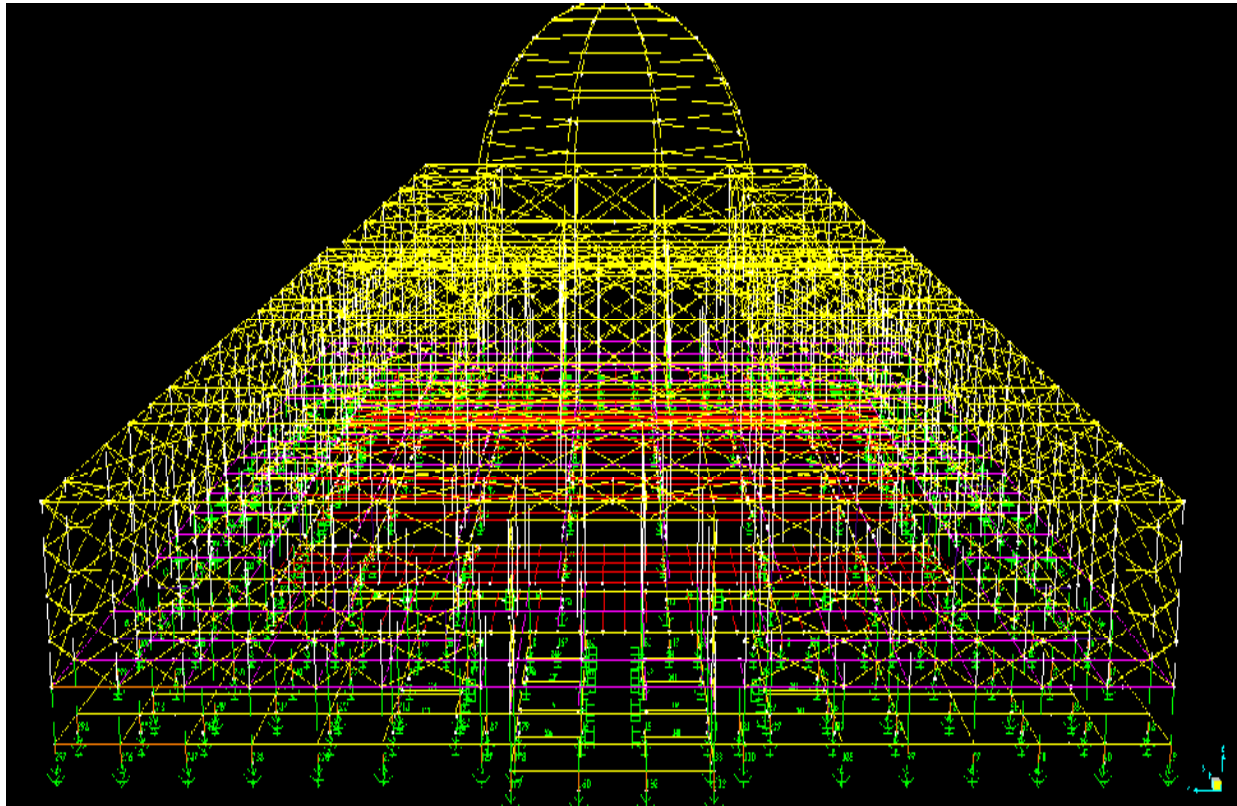


Figure 3.2 : Modèle3D de la structure avec SAP2000

III.3 Analyse modale :

Les tableaux 3.1,3.2 et 3.3 présentent les caractéristiques modales(périodes et masses modales)pour les 3 modélisations considérées dans cette étude.

La période fondamentale dans le premier modèle structure encasté est de 1.89s cette période est inférieure à 30% de la période empirique donnée par le RPA de plus de 30%

La période empirique plus 30% est de 2.275s qui dépasse la période fondamentale.

$$T=c_T \cdot h^{(3/4)} \text{ Avec } C_T=0.075(\text{RPA Version 2003}) \quad \text{et} \quad h=66.69\text{m}$$

$$\text{Donc } T=1.75\text{s}$$

Mode	T	ω	ΣU_x	ΣU_y	ΣU_z
	Sec	rad/sec			
1	1,893403	3,3185	0,00015	0,59286	5,384E-08
2	1,693618	3,7099	0,63592	0,5931	4,65E-07
3	1,397767	4,4952	0,63592	0,59354	4,668E-07
4	1,189934	5,2803	0,6361	0,65116	4,704E-07
5	0,982092	6,3978	0,6361	0,65116	0,02759
6	0,9149	6,8676	0,63619	0,67471	0,0276
7	0,870495	7,2179	0,64712	0,67472	0,0276
8	0,854904	7,3496	0,64713	0,6751	0,0276
9	0,823043	7,6341	0,64713	0,6751	0,04851
10	0,768284	8,1782	0,68639	0,67519	0,04852
11	0,6484	9,6903	0,68642	0,68418	0,04852
12	0,615709	10,205	0,68642	0,68418	0,04853

Tableau 3.1 : Périodes et facteurs de contribution modale (premier modèle).

Mode	T	ω	ΣU_x	ΣU_y	ΣU_z
	Sec	rad/sec			
1	4,679766	1,3426	0,00075	0,92456	5,36E-10
2	4,595132	1,3674	0,99479	0,92547	3,54E-09
3	4,138094	1,5184	0,995	0,99301	3,54E-09
4	1,397568	4,4958	0,995	0,99301	6,63E-09
5	1,184693	5,3036	0,995	0,9982	3,42E-07
6	1,050381	5,9818	0,99915	0,99821	3,59E-06
7	0,983124	6,391	0,99915	0,99821	0,02738
8	0,863201	7,2789	0,99915	0,99831	0,02738
9	0,854736	7,351	0,99932	0,99834	0,02739
10	0,849156	7,3993	0,99934	0,99989	0,02739
11	0,823976	7,6254	0,99934	0,99989	0,04825
12	0,696907	9,0158	0,99999	0,99989	0,04825

Tableau 3.2 : Périodes et facteurs de contribution modale (deuxième modèle).

Mode	T	ω	ΣU_x	ΣU_y	ΣU_z
Us	Sec	rad/sec			
1	3,874062	1,6219	0,00036	0,94448	1,277E-09
2	3,787343	1,659	0,98851	0,9449	8,303E-09
3	3,183315	1,9738	0,98859	0,98438	8,334E-09
4	1,397529	4,4959	0,98859	0,98438	1,122E-08
5	1,163246	5,4014	0,9886	0,99553	3,518E-07
6	1,034205	6,0754	0,99786	0,99556	3,908E-06
7	0,983124	6,391	0,99786	0,99556	0,02719
8	0,862631	7,2837	0,99786	0,99564	0,0272
9	0,853868	7,3585	0,99833	0,99566	0,0272
10	0,84179	7,4641	0,99835	0,99971	0,0272

Tableau 3.3 : Périodes et facteurs de contribution modale (troisième modèle)

Les résultats des trois tableaux confirment que :

-L'ajout du système d'isolation augmente la période fondamentale de la structure. la période de la structure à base fixe de 1.89s est devenue 4.67s dans le deuxième modèle et 3.87s pour le 3ème modèles.

-la période fondamentale est influencée par la période des amortisseurs.

- le mode fondamentale de la structure isolée entraîne une masse modale de 99% pour le deuxième modèle et 94% pour le troisième modèle c'est à dire la masse modale dépasse 90% de la masse totale des premiers modes.

-Contrairement au cas de la structure encastrée où cette condition est très difficile à vérifier, on a au deuxième mode 68.41%.

- Les modes supérieures sont donc complètement négligées dans le cas de la structure contrôlée. le premier mode est prépondérant.

III.4. Analyse dynamique :

III.4.1. Enregistrements sismiques utilisés :

III.4.1.1 Caractéristiques du spectre de réponse élastique du site

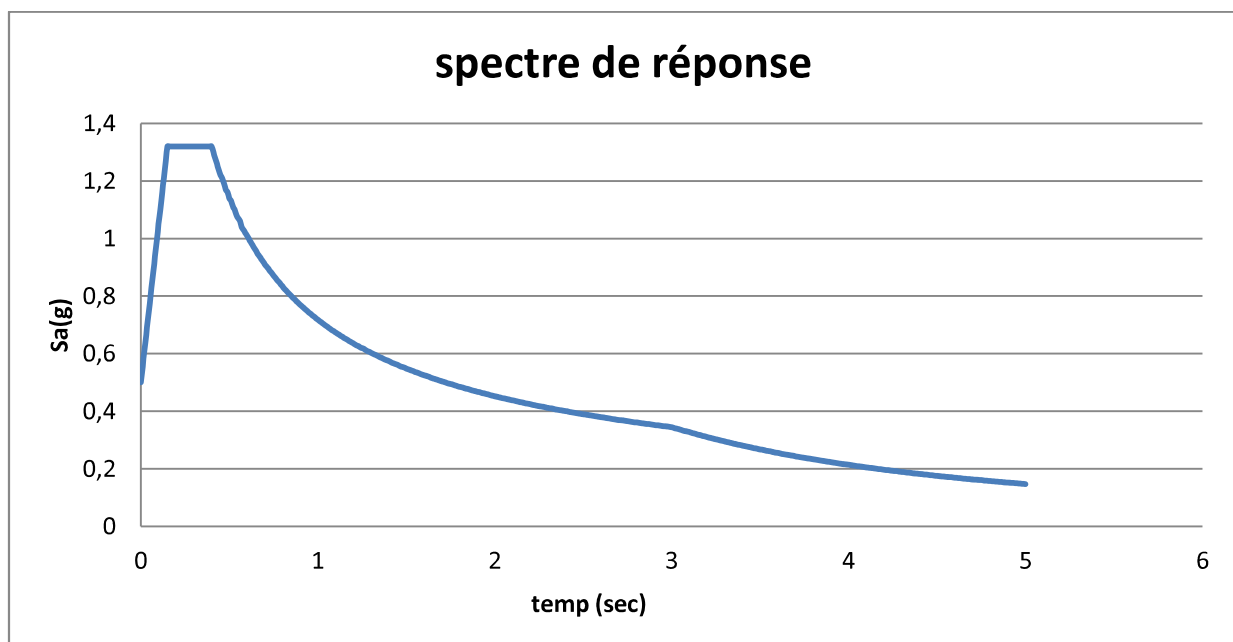
Les coefficients nécessaires pour déterminer le spectre de réponse élastique selon la norme RPA 99 version 2003 sont :

- le coefficient d'accélération de zone $A = 0,4$, puisque Alger se situe dans la zone sismique III et que le complexe de la mosquée est à classer dans le groupe d'usage 1A (RPA 99 version 2003,)

- le facteur de qualité $Q = 1,20$, puisque les bâtiments ne respectent ni les conditions minimales sur les files de contreventement ($Pq1 = 0,05$), ni la redondance en plan ($Pq2 = 0,05$), ni la régularité en plan ($Pq3 = 0,05$), ni la régularité en élévation ($Pq4 = 0,05$) (RPA 99 version 2003, tableau 4.4)

- le coefficient de comportement global de la structure $R = 3.5$, puisqu'il s'agit d'un système de contreventement formé par des voiles porteurs et des noyaux. ($R=1$ pour un spectre élastique).

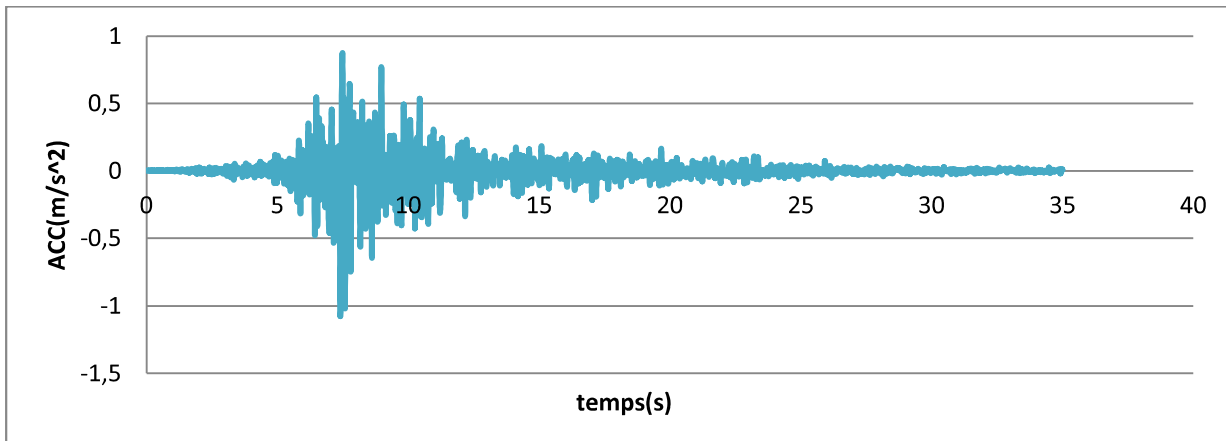
Le site est classifié en S2



III.4.1.2 Les Accélérogrammes :

b - Accélérogrammes :

On a utilisé trois accélérogrammes qui correspondent aux enregistrements sismiques de boumerdess(Figure 3.4) ,de north-ridje(Figure 3.5) et de sakaria (Figure 3.6)



Figure

3.4: accélérogramme de Boumerdes E-W

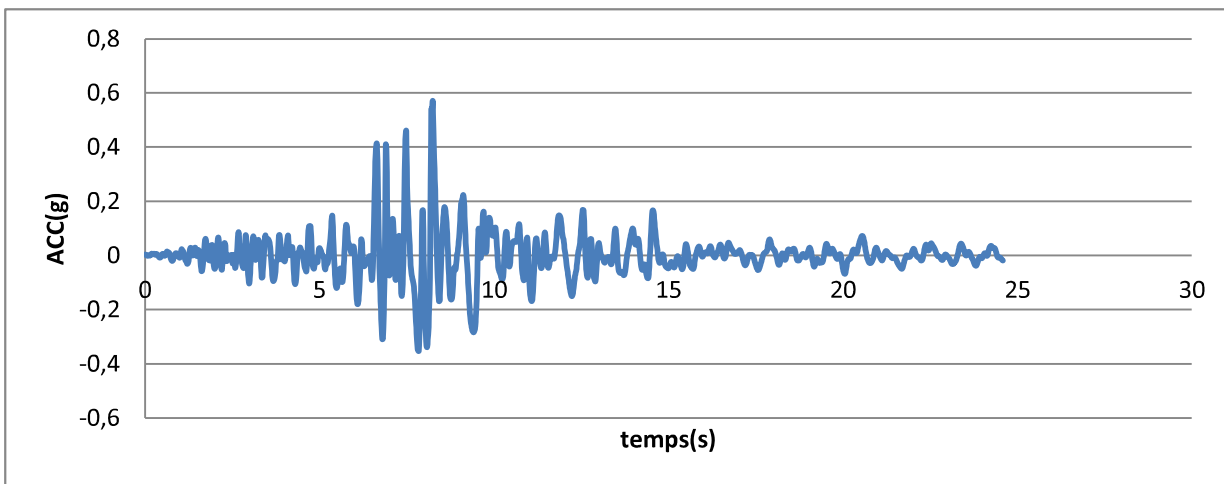


Figure 3.5: accélérogramme de north-ridje

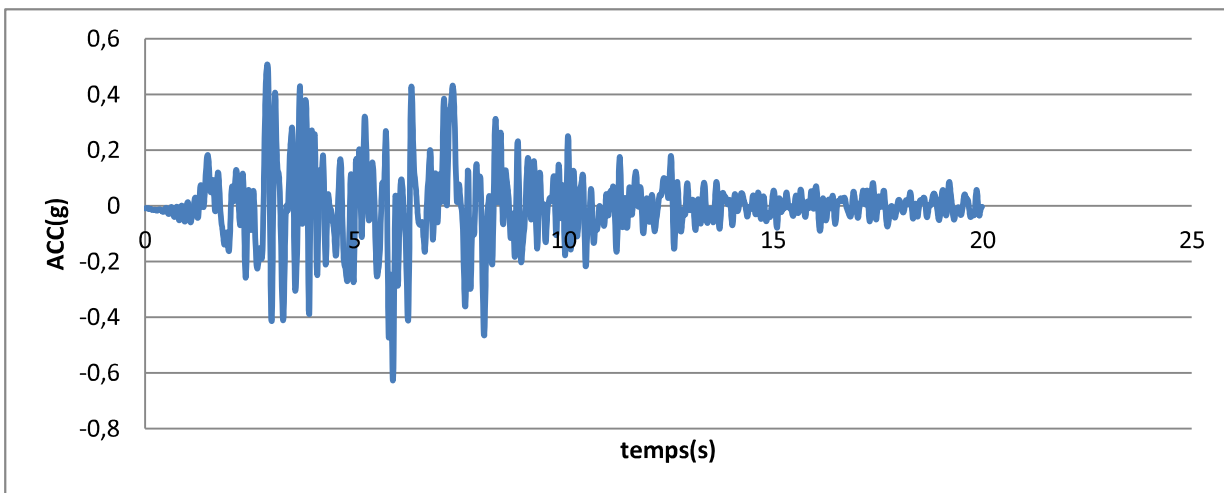


Figure 3.6: accélérogramme de sakaria.

III.4.2.Comportement dynamique de la structure:

En utilisant les accélérogrammes présentés précédemment, une analyse dynamique de la salle de prier de la grande mosquée d'Alger a été effectuée. Ce en considérant les trois modèles (structure encastrés, structure contrôlés seulement par des isolateurs et structure contrôlés par des isolateurs et amortisseurs).

Dans cette partie, on va analyser la variation du déplacement, vitesse, accélération et celle de l'effort tranchant à la base.

a-variation des déplacements :

Pour le séisme de boumerdess on présente le déplacement obtenu des trois niveaux (sous sol1(ss01),sous sol2(ss02) et RDC). Ceci pour les trois modèles Figure 3.7,3.8 et 3.9.

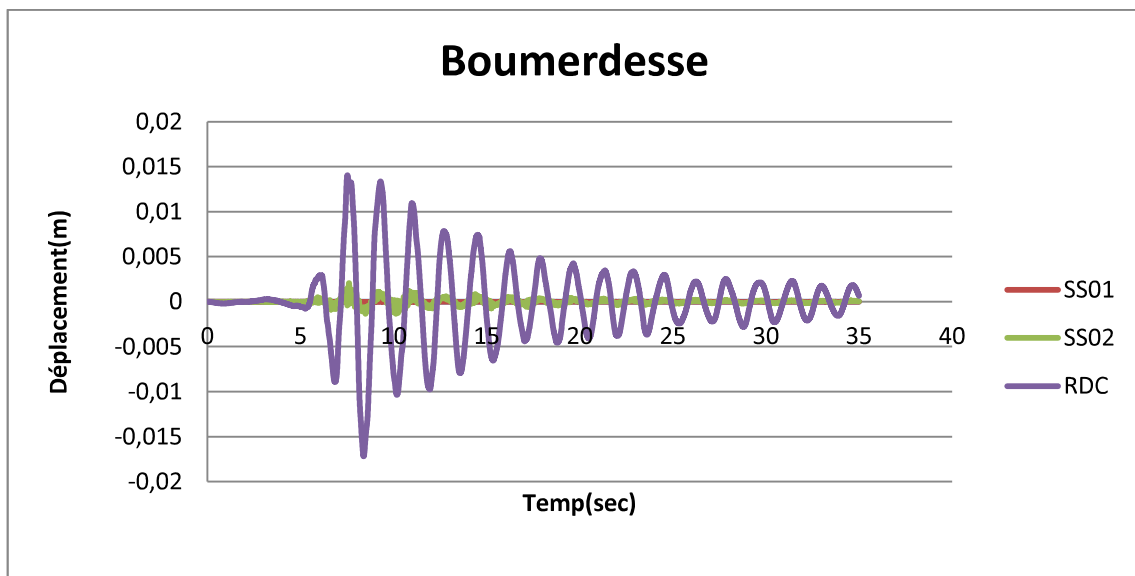


Figure3.7 : déplacements des3 niveaux sous l'accélérogramme de boumerdess (modèle 01).

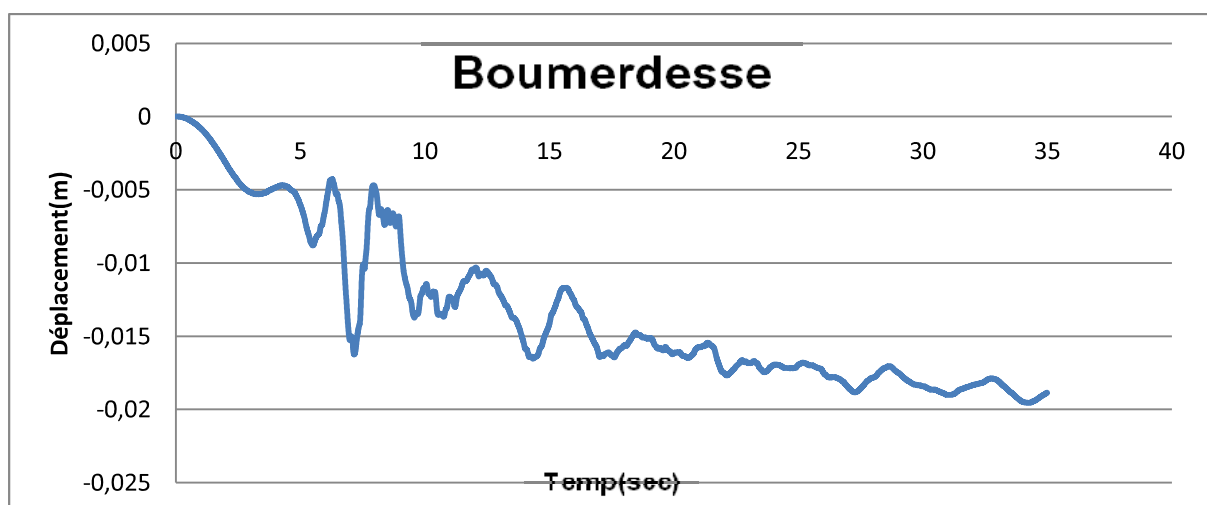


Figure3.8. : déplacements des 3 niveaux sous l'accélérogramme de boumerdess (modèle 02).

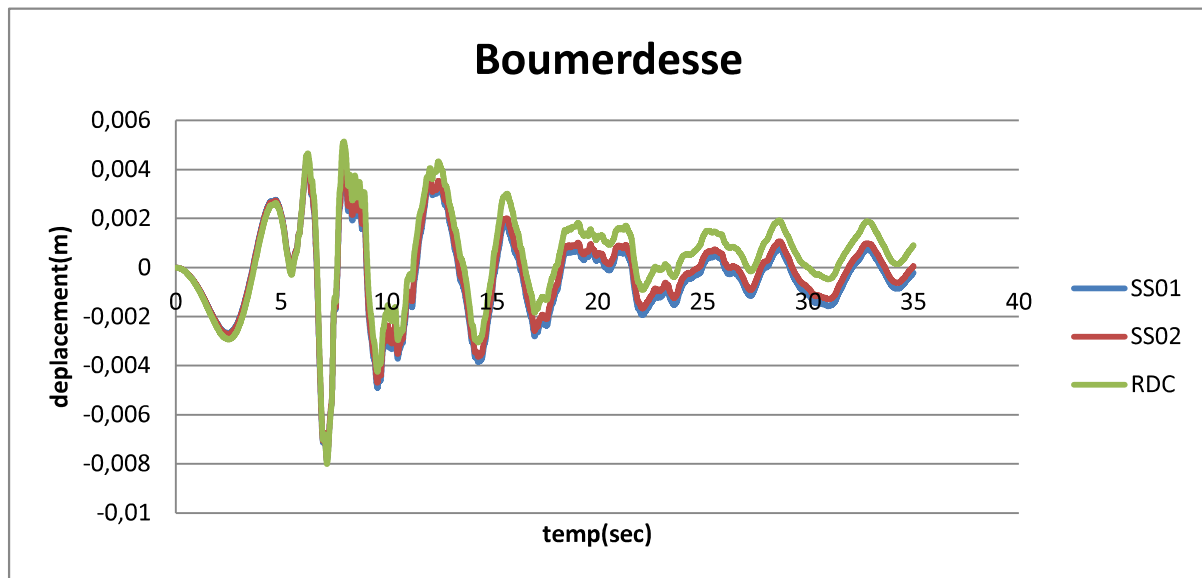


Figure3.9. : déplacements des 3 niveaux sous l'accélérogramme de boumerdess (modèle 03).
Le tableau3.6 : résume les valeurs maximales de déplacements.

signal	Modèle 01 (RDC)	Modèle 02(RDC)	Modèle 03(RDC)
boumerdess	0.01718	0.01955	0.00814

Tableau3.6 : les déplacements max sous l'accélérogramme de boumerdesse.

On observe à partir de la Figure 3.7 que le déplacement augmente avec la hauteur jusqu'à un déplacement maximal du dernier niveau égale à 1.71 cm.

Par contre les déplacements horizontaux des différents niveaux de la structure isolée (Figure 3.8 et 3.9) sont approximativement identiques sur toute la hauteur avec des déplacements inter-étages presque nuls.

Ce qui veut dire que la structure isolée vibre comme un corps rigide et avec des déplacements des sous sol considérablement importants comparativement à une structure isolée, ceci est causé par les grands déplacements de la base de cette dernière.

La différence entre le déplacement de la structure isolée avec et sans amortisseur revient au rôle de l'amortisseur qui réduit les déplacements (Figure 3.8 et 3.9).

On présente également la réponse dynamique sous les séismes de north-ridje (Figure 3.10) et Celui de sakaria (Figure 3.11) Ceci pour les trois modèles considérés .

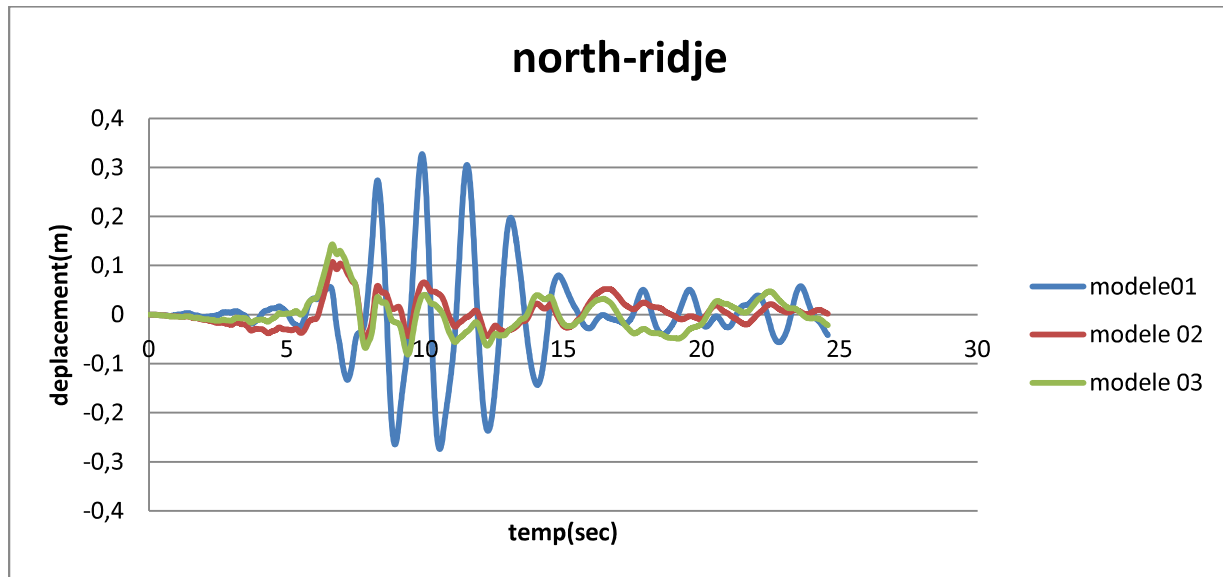


Figure 3.10 : les déplacements des trois modèles sous le séisme de north-ridje.

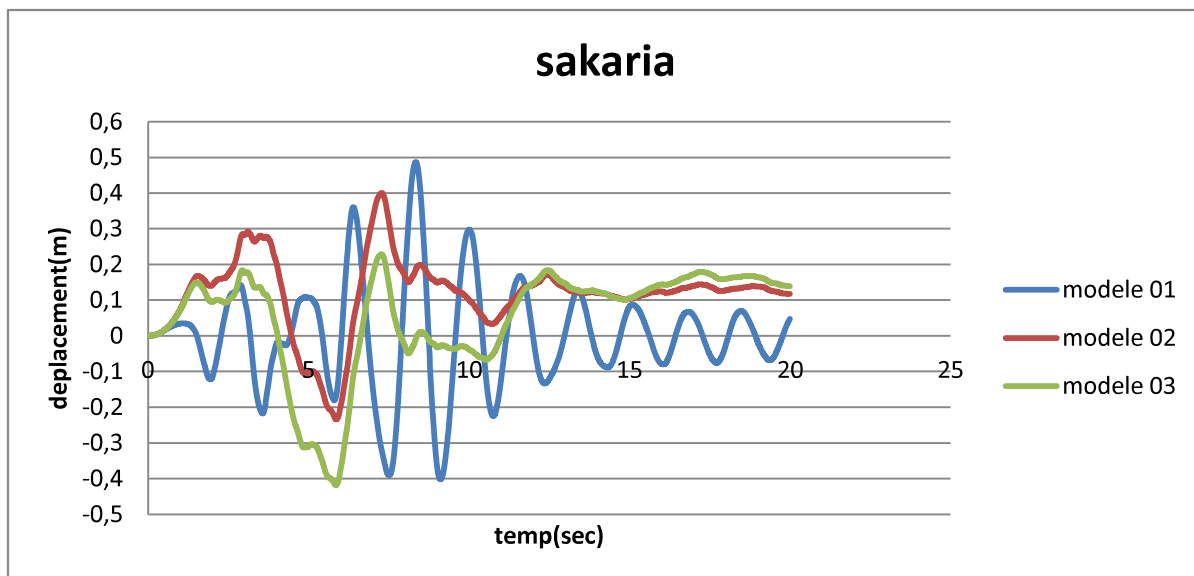


Figure 3.11 : les déplacements des trois modèles sous le séisme de sakaria.
Le tableau 3.7 : présente les valeurs maximales

signaux	Modèle 01	Modèle 02	Modèle 03
North-ridje	0.3268	0.1431	0.1075
sakaria	0.4866	0.4001	0.229

Tableau3.7 : les déplacements maximales sous les seismes de north-ridje et sakaria .

On remarque à partir les deux figures (3.10 et 3.11) que le déplacement du modèle 01 est plus important que celui des autres modèles. Ceci montre l'avantage des systèmes de contrôle dans la réduction du déplacement. Sous le séisme de north-ridje le déplacement de la structure encastré a été démuni 3 fois par contre sous le séisme de sakaria la réduction est relativement moins importante.

b-Variation de la Vitesse :

Pour le séisme de boumerdess on présente la vitesse obtenue dans les trois niveaux de la structure et pour les 3 modèles Figure3.12,3.13et 3.14.

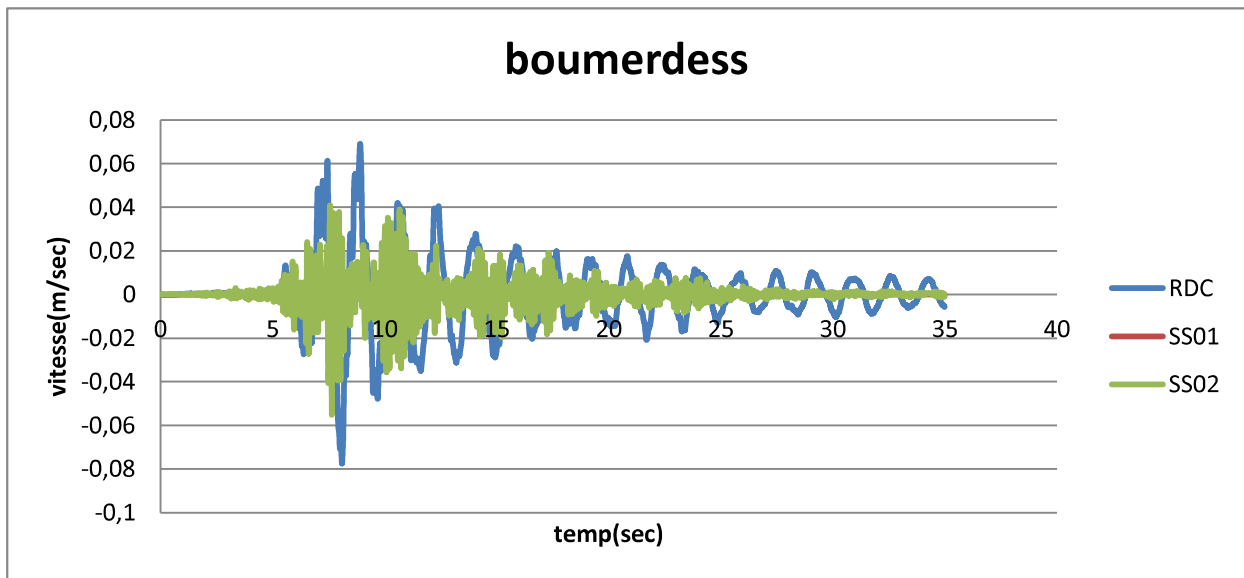


Figure3.12 : la vitesse des 3 niveaux du modèle 01.

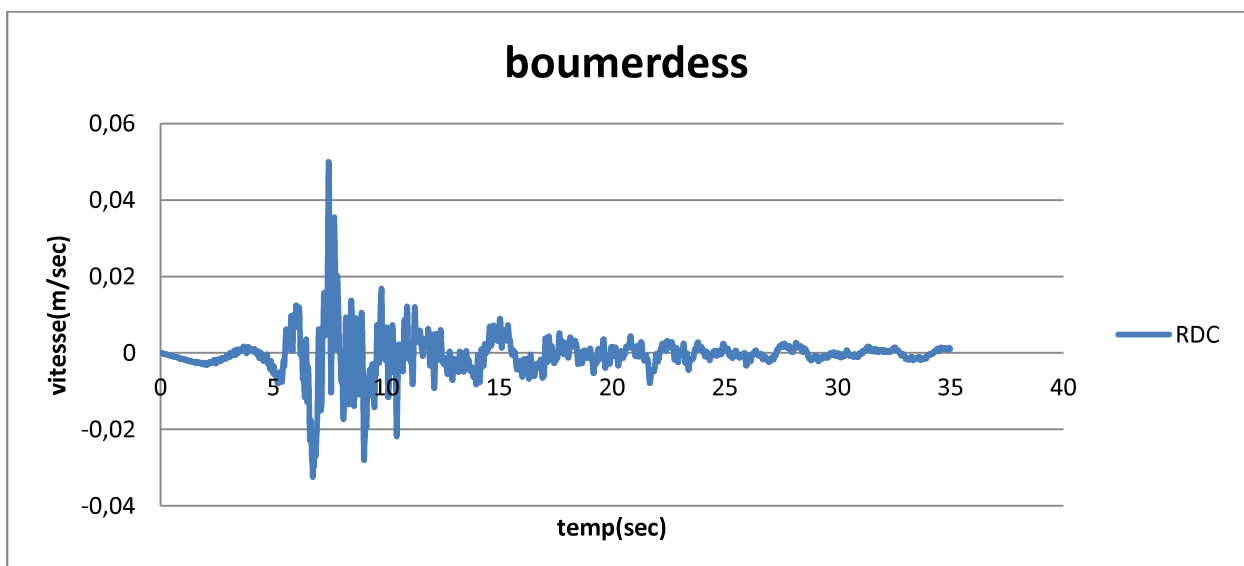


Figure3.13 : la vitesse des 3 niveaux du modèle 02.

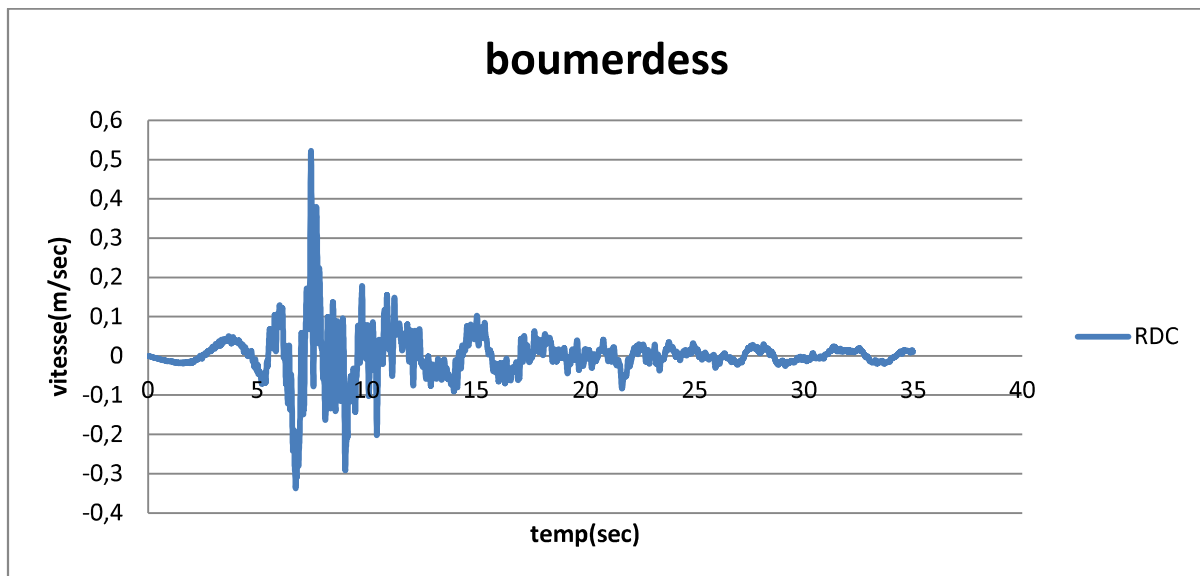


Figure 3.14 : la vitesse des 3 niveaux du modèle 03.

Le tableau 3.8 : résume la vitesse maximale des 3 modèles sous séisme de boumerdess

Signal	Modèle 01	Modèle 02	Modèle 03
Boumerdess	0.07754	0.04995	0.0522

Tableau 3.8 : la vitesse maximale de sous accélerogrammes de boumerdesse.

Dans le cas de la structure encastrée (Figure 3.12) on constate que la vitesse augmente avec la hauteur, la vitesse maximale se trouve dans le dernier niveau.

Par contre dans la structure isolée on remarque que la vitesse est la même dans tous les niveaux.

En comparant les trois modèles on remarque que l'accélération diminue. En ajoutant le système d'isolation.

Les Figures 3.15 et 3.16 montrent la variation de la vitesse pour les trois modèles et sous les séismes de north-ridje et sakaria.

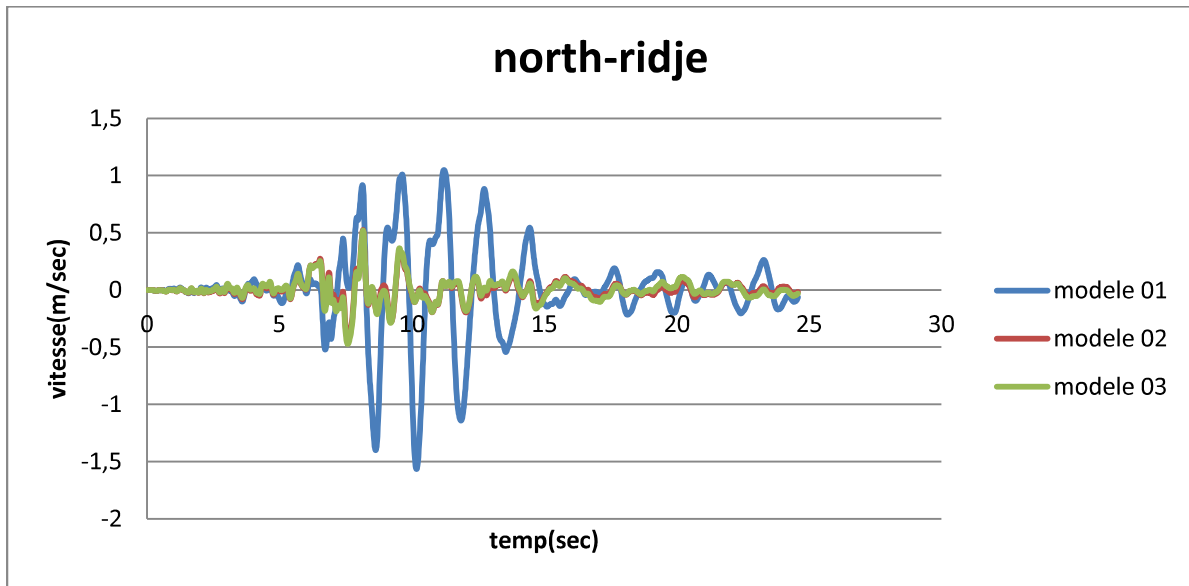


Figure 3.15 : les vitesses des trois modèles sous le séisme de north-ridje.

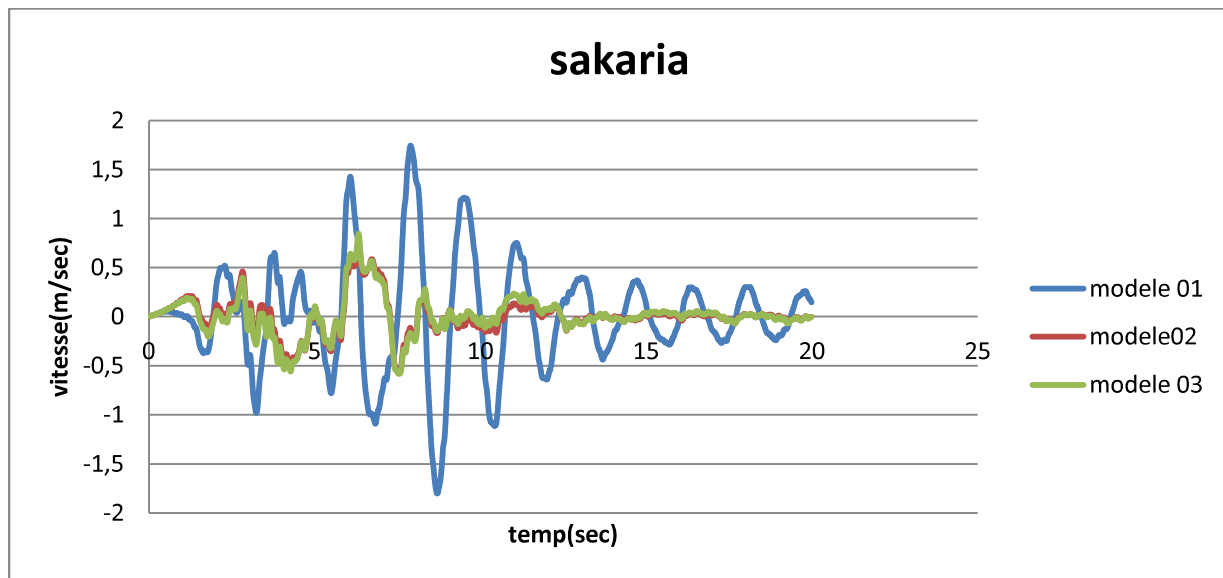


Figure 3.16 : les vitesses des trois modèles sous le séisme de sakaria.

Le tableau 3.9 : résume les vitesses maximales pour les 3 modèles sous les séismes de north-ridje et sakaria.

signaux	Modèle 01	Modèle 02	Modèle 03
North-ridje	1.5648	0.5259	0.5192
sakaria	1.8026	0.791	0.8439

Tableau3.9 : les Vitesses maximales sous les séismes de north-ridje et sakaria.

On remarque à partir des deux Figures (3.15 et 3.16) que la vitesse du modèle 01 a été réduite en présence des isolateurs, la réduction est de presque 3 fois .

On observe également que les vitesses maximales des modèles 01 et 2 sont presque égales.

C- variation des accélérations :

Pour le séisme de boumerdesse on présente aussi l'accélération obtenue dans les trois niveaux de la structure pour les trois modèles.

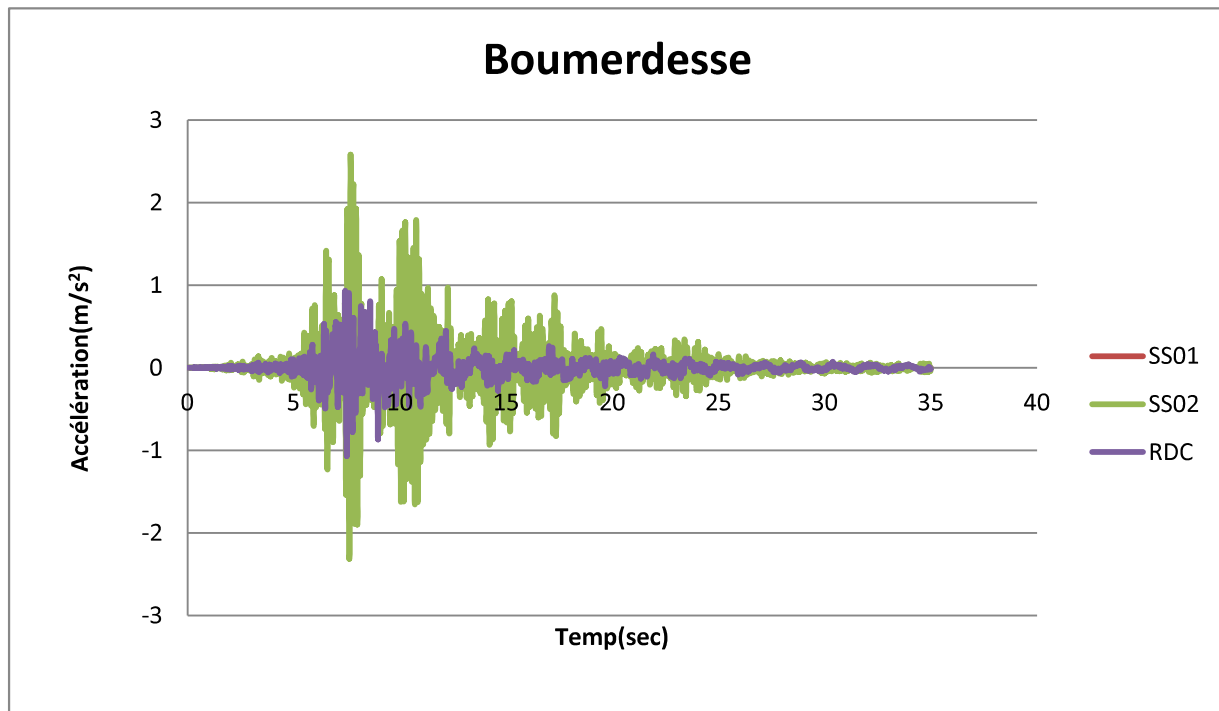


Figure 3.17 : les accélérations des 3 niveaux du modèle 01 sous le séisme de boumerdesse.

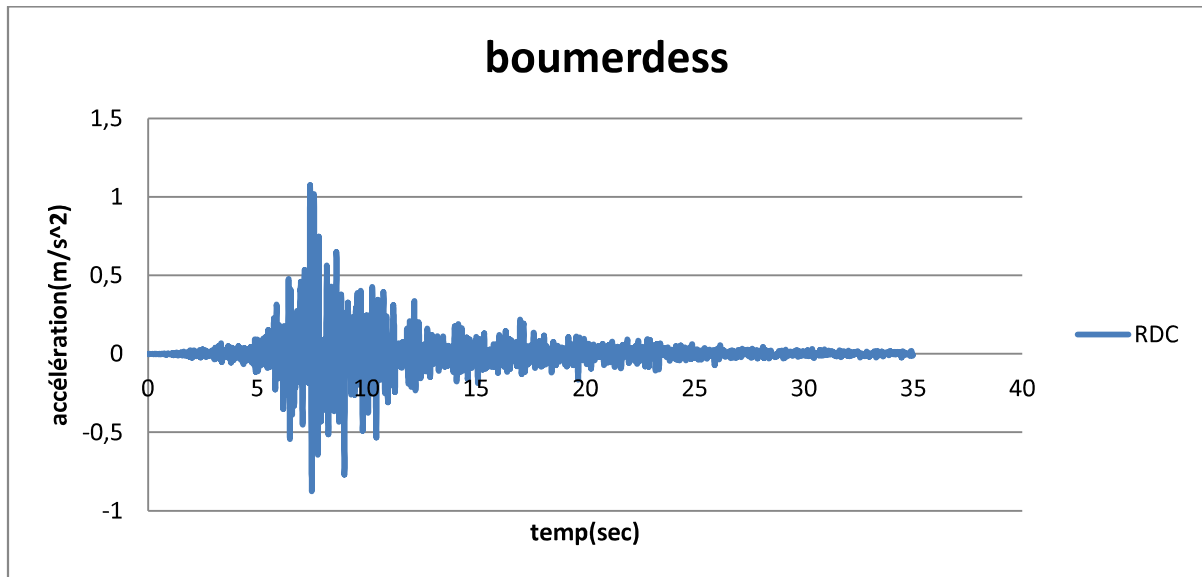


Figure 3.18 : les accélérations des 3 niveaux du modèle 02 sous le séisme de boumerdesse.

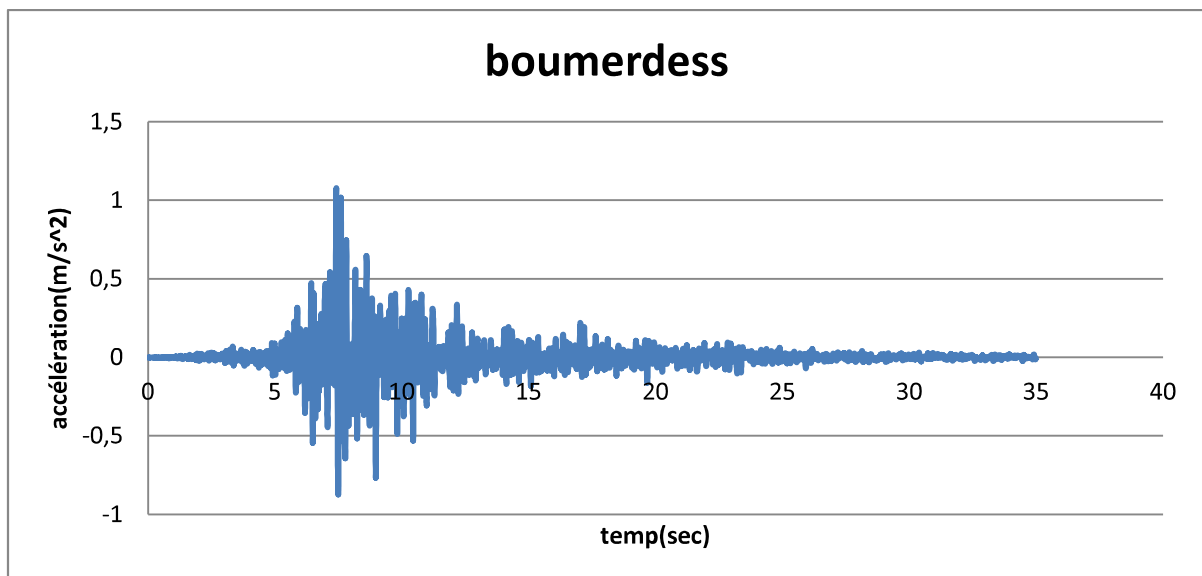


Figure 3.19 : les accélérations des 3 niveaux du modèle 03 sous le séisme de boumerdesse.

signal	Modèle 01	Modèle 02	Modèle 03
boumerdesse	2.581	1.07	1.07

Tableau 3.10 : l'accélération maximale sous de l'accélérogramme de boumerdesse.

Dans le cas de Modèle 01 (la structure encadrée)(Figure 3.17), les accélérations sont variables du premier jusqu'au dernier niveau la structure vibre d'un côté à un autre avec une amplification des accélérations avec des accélérations relatives entre les différents niveaux.

Les accélérations horizontales de la structure isolée sont approximativement identiques sur toute la hauteur, à cause de découplage entre la salle de prière et le sol provoqué par le système de contrôle.

Dans le modèle 01 on remarque que les accélérations sont plus grandes que dans le modèle 02 cette différence revient aux isolateurs qui sont caractérisés par une insensibilité à la fréquence d'excitation sismique et sont donc très efficaces pour réduire les niveaux d'accélérations élevés de la structure. La réduction est de plus que la moitié et elle est identique pour les deux modèles 2 et 3 (Tableau 3.10).

Pour les séismes de north-ridje et sakaria on présente la variation de l'accélération pour les 3 modèles (Figure 3.20 et 3.21).

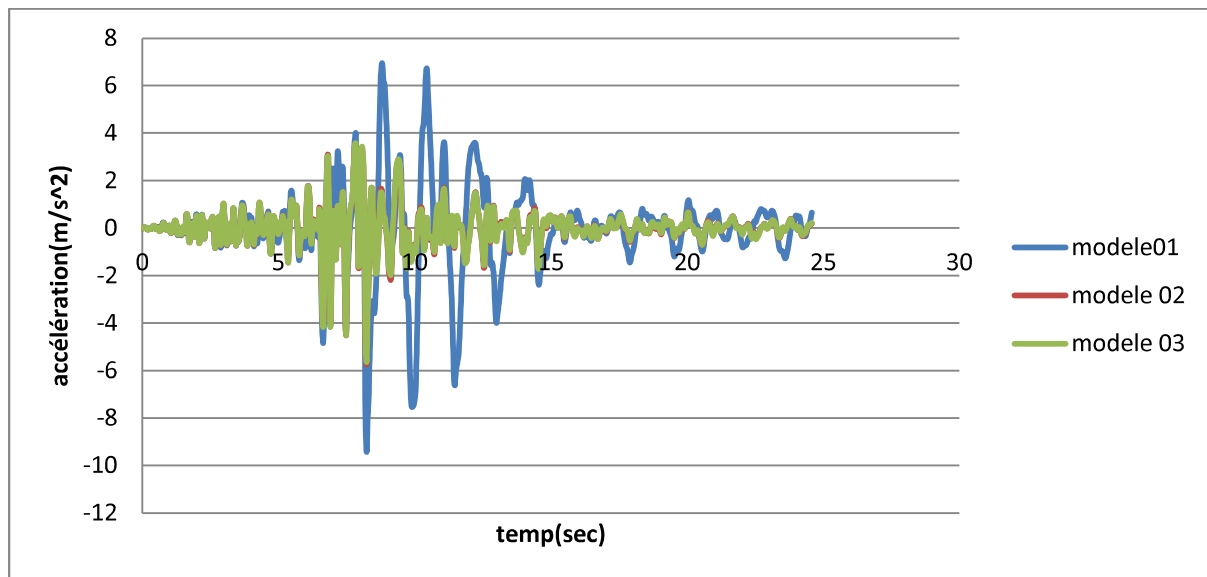


Figure 3.20 : les accélérations des trois modèles sous le séisme de north-ridje.

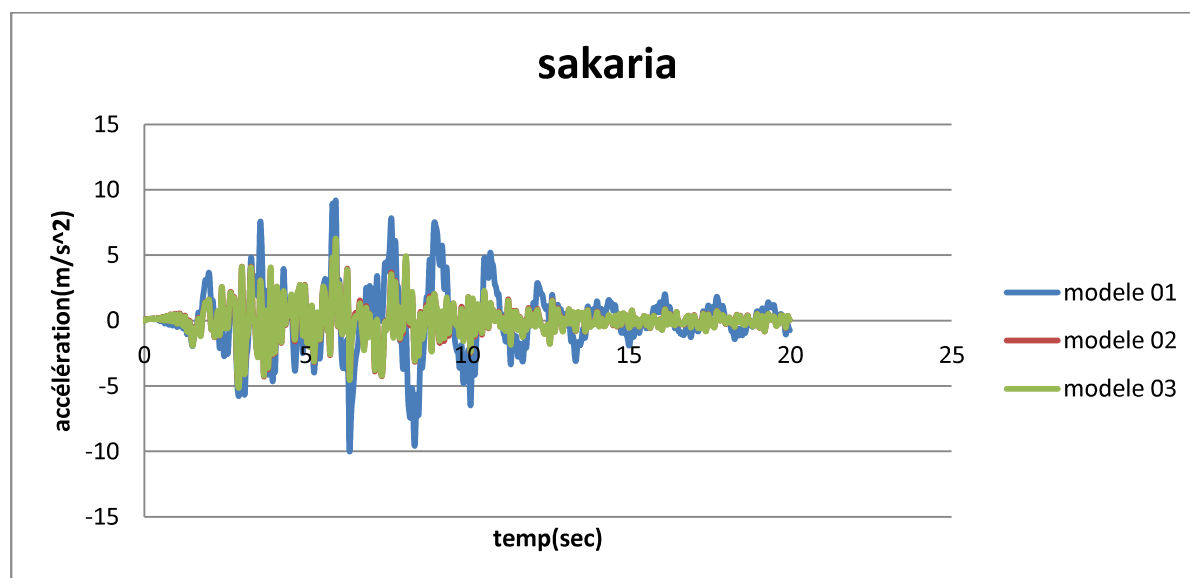


Figure3.21 : les accélérations maximales sous le séisme de sakaria.

signaux	Modèle 01	Modèle 02	Modèle 03
North-ridje	9.43	5.72	5.73
sakaria	10.03	6.22	6.23

Tableau3.11 : accélération maximale sous les séismes de north-ridje et sakaria.

Les résultats montrent que l'accélération diminue de la moitié dans les modèles 2 et 3 par rapport au modèle 1. Les deux types d'isolation donnent des accélérations identiques.

III.3.4 Les efforts tranchants

Les figures 3.21,3.22,3.23 montrent une comparaison entre les efforts tranchants à la base de la structure isolée et la structure encastree pour les trois signaux consideres.

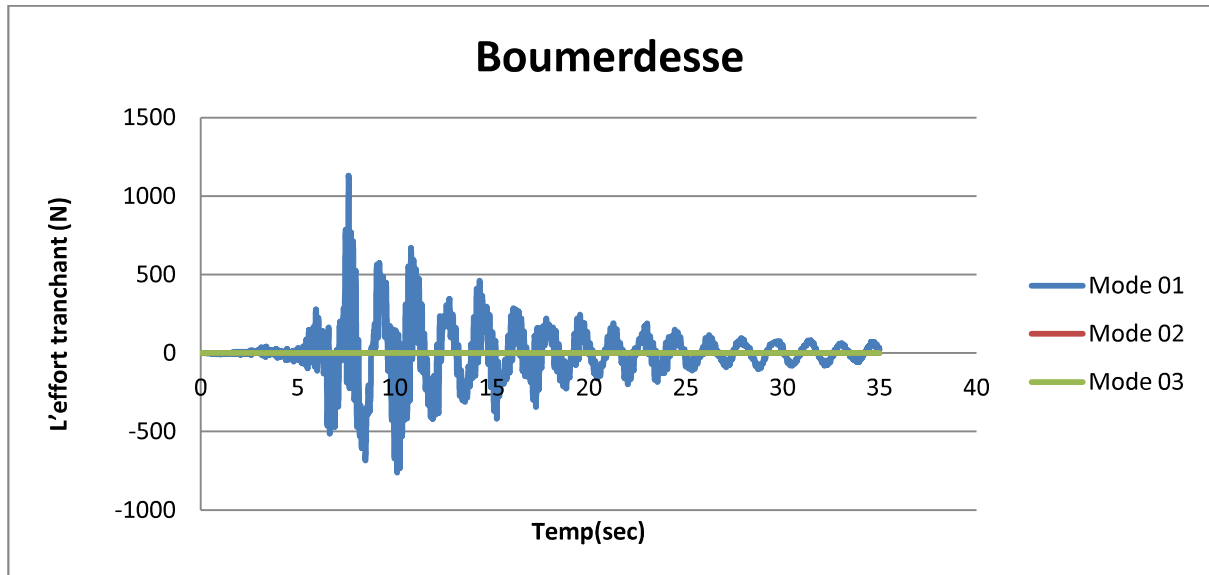


Figure 3.22: l'effort tranchant à la base des 3 modèles sous le séisme de boumerdesse.

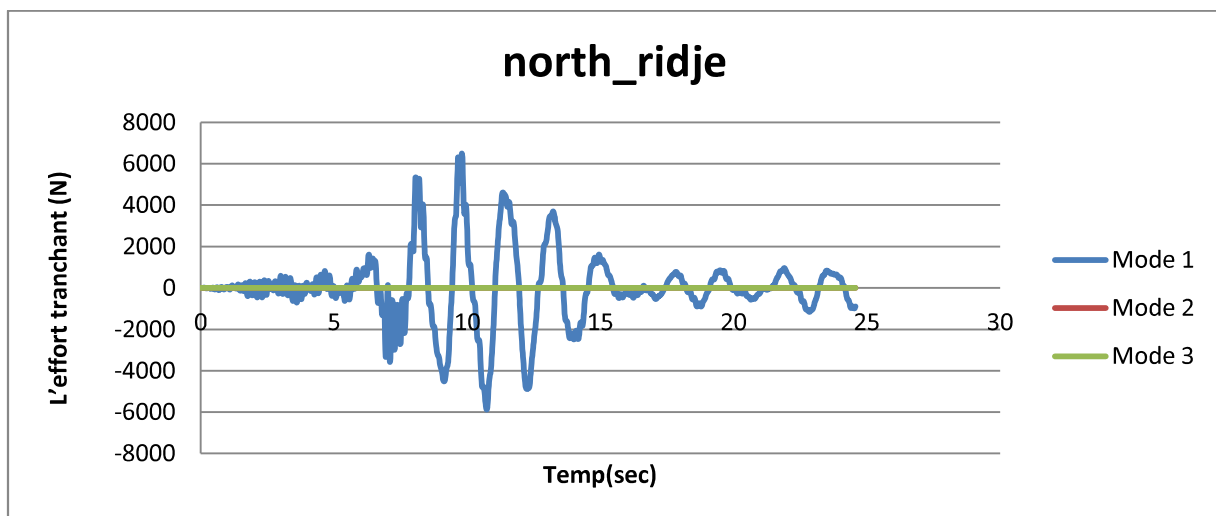


Figure 3.23: l'effort tranchant à la base des 3 modèles sous le séisme de north-ridje.

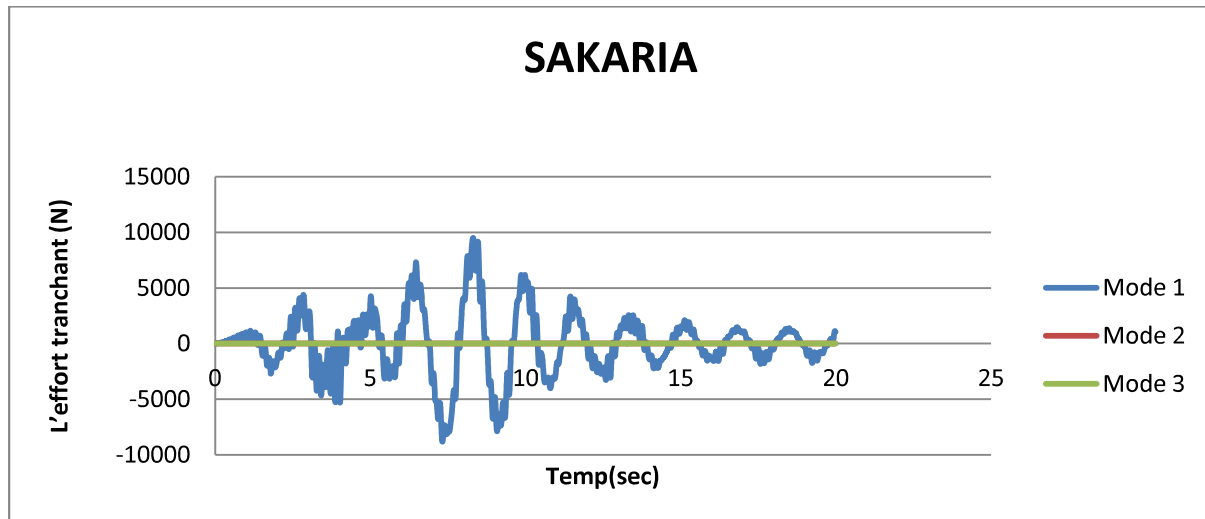


Figure 3.24: l'effort tranchant à la base des 3 modèles sous le séisme de sakaria.

À travers les Figures 3.22, 3.23 et 3.24 .on observe que les efforts tranchants à la base dans la structure encastrée sont plus importants par contre dans le cas de la structure isolée à la base ils sont presque nul, ce qui conduit à conclure que le système d'isolation est capable de réduire les efforts tranchants à la base, ceci est dû à la réduction des accélérations transmises à la superstructure.

CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a étudié la réponse dynamique de la salle de prier de la grande mosquée Sous trois signaux sismiques et en considérant 3 modèles de conditions d'appuis ; encastré contrôlé par des isolateurs et contrôlé par des isolateurs et amortisseurs.

L'analyse modale effectuée montre que la présence des isolateurs augmente la période propre. Dans ce cas le premier mode devient prépondérant.

Les résultats obtenus à travers les comparaisons effectuées sur les trois Modèles nous permettent de déduire que :

- Les déplacements inter étages sont pratiquement négligeables dans la structure isolée cette dernière se comporte comme un corps rigide.
- Les déplacements et la vitesse de la structure isolée (modèle 02et 03) sont moins importants par rapport aux cas de la structure encastrée.

-Le système d'isolation avec et sans amortisseur donne des valeurs presque identiques.

- On enregistre également une très forte réduction de l'effort tranchant à la base.

D'après les résultats obtenus dans l'étude comparative de la salle de prière on peut dire que le système d'isolation sismique est nécessaire pour cette étude afin de réduire les déplacements, vitesse, effort tranchant.

Le seul problème rencontré dans cette étude c'est bien la modélisation de la salle prière et ses éléments, tels que les chapiteaux et la coupole en charpente métallique qui sont représentés par des charges concentrées au niveau des colonnes.

L'évolution dans le domaine du génie parasismique devrait être suivie par une adoption de cette nouvelle technique dans les futurs règlements parasismiques algériens, tel que les codes existants IBC 2000 et UBC 97.

Cette étude nous a permis de maîtriser l'utilisation du logiciel SAP 2000 qui est très pratique pour les calculs des structures isolés a la base.

En fin, nous pouvons conclure que la technique d'isolation parasismique est une alternative de conception largement admise pour la réduction des risques de tremblement de terre ainsi que pour la réalisation d'une performance sismique supérieure pour les structures nouvelles et existantes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] BENAYAD, K. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES OUVRAGES SUR ISOLATEURS DE BASE. Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen Faculté de Technologie. Magistère en Génie Civil, Option: Seismic Risk and Earthquake Engineering. Janvier 2013.100page.

[2] BENAHMED, N.et LASRI ,S. EFFET DES ISOLATEURS DE BASE SUR LA REPONSE DYNAMIQUE D'UN BATIMENT. Université de Tlemcen Faculté de Technologie. Master en Génie Civil Option : Ingénierie des structures. 12 Juin 2016.137 page.

[3] BAKLI, W .et HALLAZ , A. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE LA SALLE DE PRIÈRE DE LA GRANDE MOSQUEE D'ALGER AVEC ISOLATION PARASISMIQUE. UNIVERSITE –BLIDA 1. MASTER Option : *STRUCTURE, REPARATION ET COUT DE CONSTRUCTION*,promo 2015/2016.106page.

[4] EN 1998-1: Eurocode 8 (EC8) - Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2010

[5] Présentation du projet de Djamaâ el Djazaïr, ANARGEMA (agence nationale de réalisation et de gestion de de Djamaâ El Djazaïr)

[6] European Technical approval ETA-06/0131: Spherical and cylindrical bearing with special sliding material, 2013

[7] Test report for SIP DR isolators applied for the Grand Mosque D'Alger; University of California San Diego, 2012

[8] Test report for MHD dampers applied for the Grand Mosque D'Alger; University of California San Diego, 2013

[9] International Conference of Building Officiels.1997.Uniform Building Code.

[10] Règles Parasismiques Algériennes RPA99 version 2003, Ministère de l'habitat

Centre national de recherche appliqué en génie parasismique.

[11] BONDONET G., *Élaboration d'un isolateur à la base original pour les ponts et*

viaducs au Canada, Thèse de Doctorat, 1997, Montréal, Québec, 421 p.

[12] IBC2000 international building code PP 392,400

- [13]. Achour Farida (2004), *Influence des isolateurs sismiques sur la réponse dynamique des bâtiments*, Mémoire de magistère en Génie civil, Ecole Nationale des Travaux Publics (Algérie).
- [14]. Bencharif Raouf et Terchi Brahim (2008), *Contribution des appuis parasismiques dans la réduction des effets sismiques sur les bâtiments*, Projet de fin d'études du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Travaux Publics, Ecole Nationale des Travaux Publics (Algérie).
- [15]. A.H. Barbat and L.M. Bozzo (1997), *Seismic analysis of base isolated buildings*, Archives of Computational Methods in Engineering.
- [16]. Beom-Soo Kang (2009), *Dynamic response characteristics of seismic isolation systems for building structures*, Journal of Mechanical Science and Technology.
- [17]. Alessandro Martelli (2010), *On the need for reliable seismic input assessment for optimized design and retrofit of seismically isolated civil and industrial structures*, Equipment, and cultural heritage. Journal of Pure and Applied Geophysics.
- [18] Lotfi Guizani « Sur l'isolation sismique des ponts au canada ».
- [19] Lotfi Guizani « Isolation sismique et technologies parasismique pour les ponts au Québec ».ALGER : ALG Groupe Conseil international.
- [20] Mémoire de magister : évaluation de la réponse dynamique des bâtiments de grande hauteur munis de système de dissipation d'énergie, Smail Tayeb (USD de Blida).

Etapes de modélisation avec le logiciel SAP2000

✓ Modélisation avec le logiciel SAP2000

L'organigramme suivant résume la démarche de modélisation de la structure avec SAP2000. Les détails de cette modélisation sont présentés dans l'ANNEX

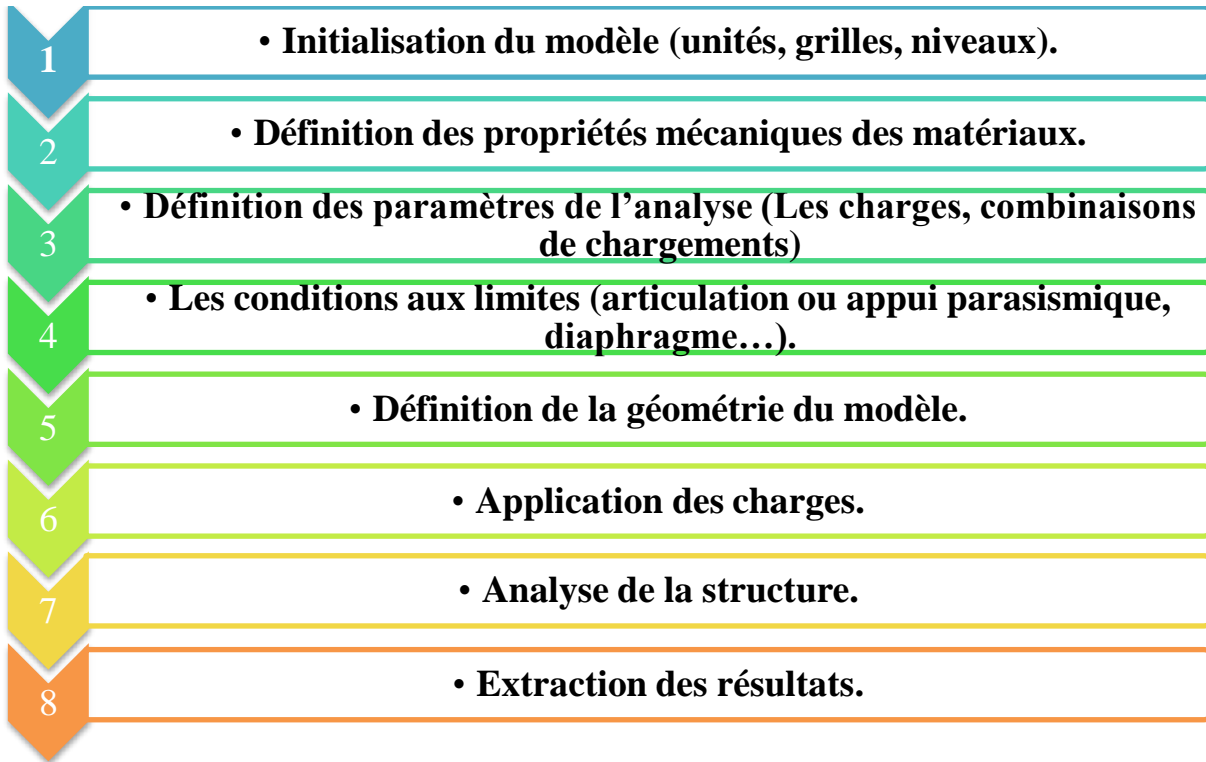
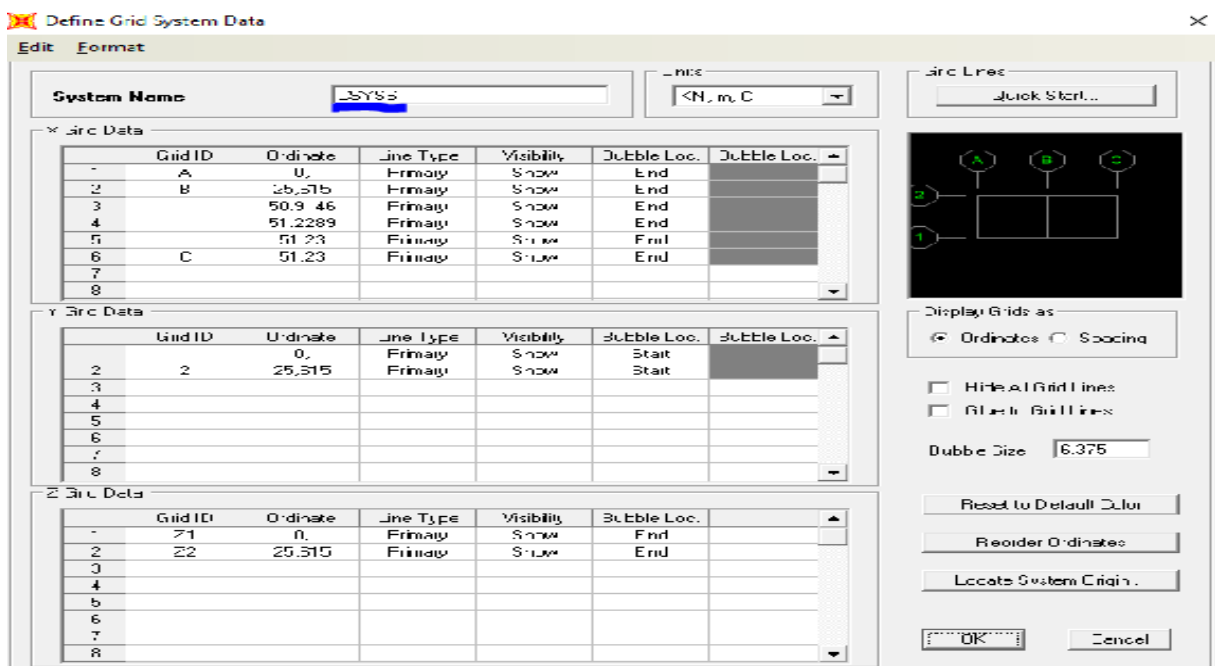
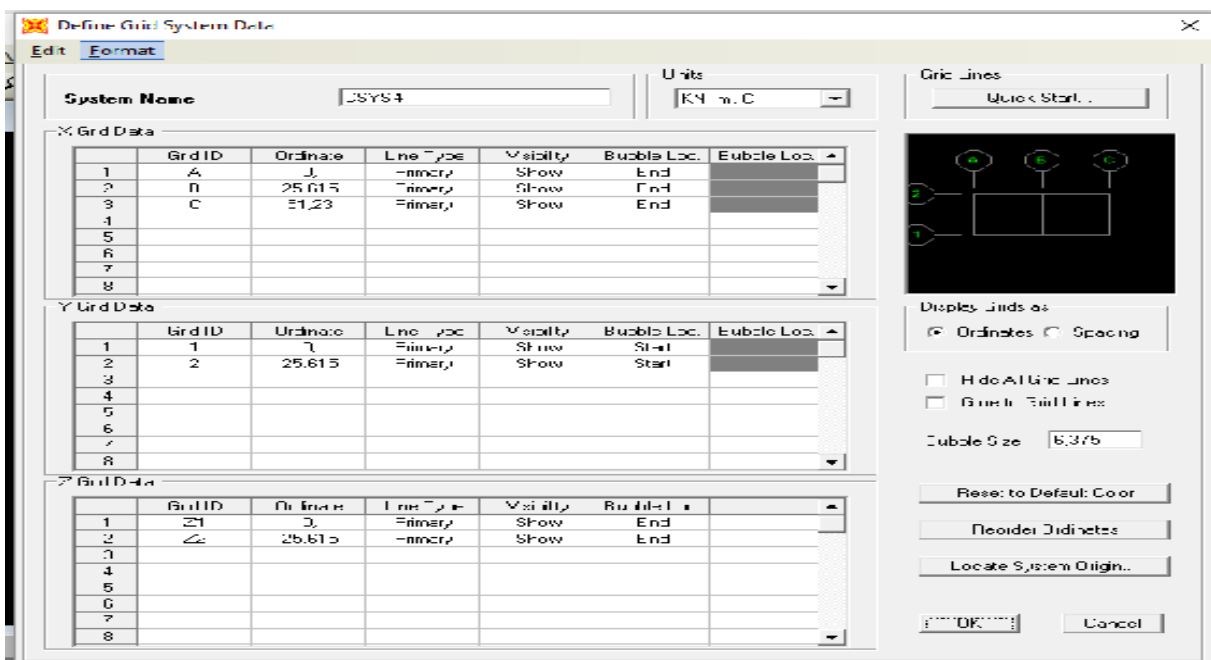
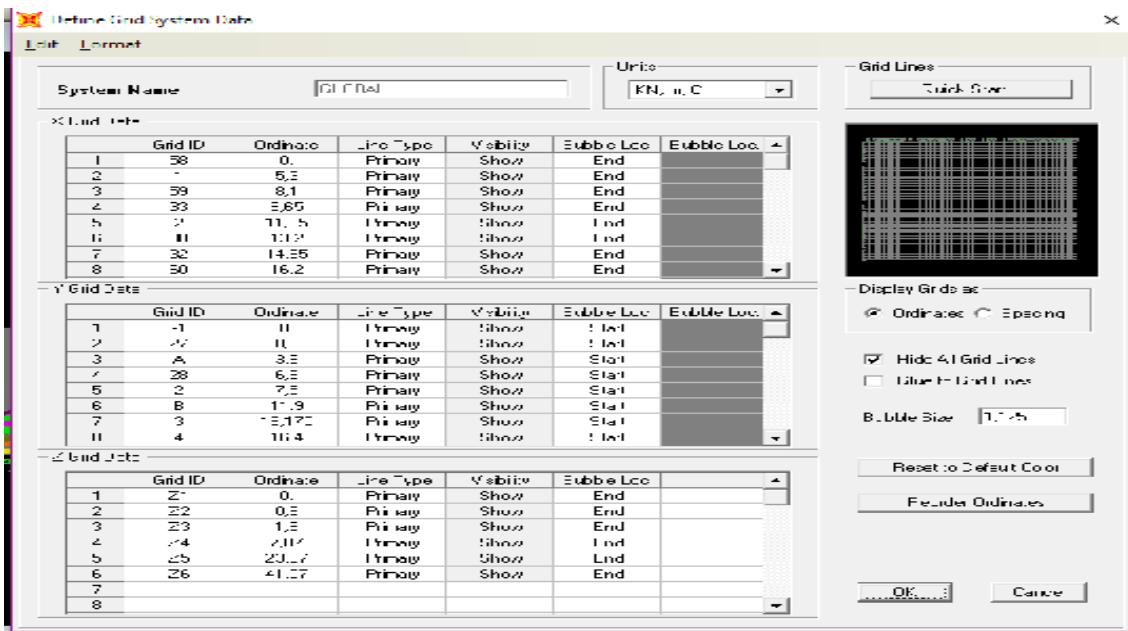


Figure 3.2 : la démarche de modélisation de la structure avec SAP2000

✓ Initialisation du modèle (unités, grilles, niveaux)

- 1) Démarrer le programme et choisir les unités par défaut.
- 2) Commencer un nouveau modèle : File >New model.

Pour notre structure cas on 3 repères (car la coupole doit être tracé dans un repère et le 3^{eme} pour l'assemblage)



✓ Définition des propriétés mécaniques des matériaux.

- Définir les propriétés mécaniques du béton :

Define > Material properties > Add New Material

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: beton

Material Type: Concrete

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 25

Mass per Unit Volume: 2,5493

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 32000000

Poisson's Ratio, ν : 0,2

Coefficient of Thermal Expansion, α : 1,170E-05

Shear Modulus, G: 13333333

Other Properties for Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f_c : 20684,274

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

- Définir la masse volumique.
- Définir le module d'élasticité.
- Définir le coefficient de poisson.

Switch To Advanced Property Display

✓ Définition des paramètres de l'analyse

Exemple : analyse non linéaire temporelle.

Define Load Cases

Load Case Name: DEAD, MODAL, G, Q, Ty, U1, U1U1 - Lw, accel, accel2, accel3

Load Case Type: Linear Elastic, Nonlinear Direct Integration History, Nonlinear Direct Integration History

Click to: Add New Load Case, Add Copy of Load Case..., Modify/Show Load Case..., Delete Load Case, Display Load Cases, Show Load Case Time...

OK, Cancel

Load Case Data: Nonlinear Direct Integration History

Load Case Name: BOLLERJEW, Set Def Name, Notes: Modify/Show...

Load Case Type: Time-istory, Design...

Initial Conditions: Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State, Continue from State at End of Nonlinear Case

Analysis Type: Linear, Nonlinear, Modal, Direct Integration

Geometric Nonlinearity Parameters: None, P-Delta, P-Delta plus Large Displacements

Modal Load Case: Take Modes from Case: INITIAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	bounceacc	10
Accel	U1	bounceacc	10

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data: Number of Total Time Steps: 100, Output Time Step Size: 5,00E-03

Time-istory Motion Type: Transient, Periodic

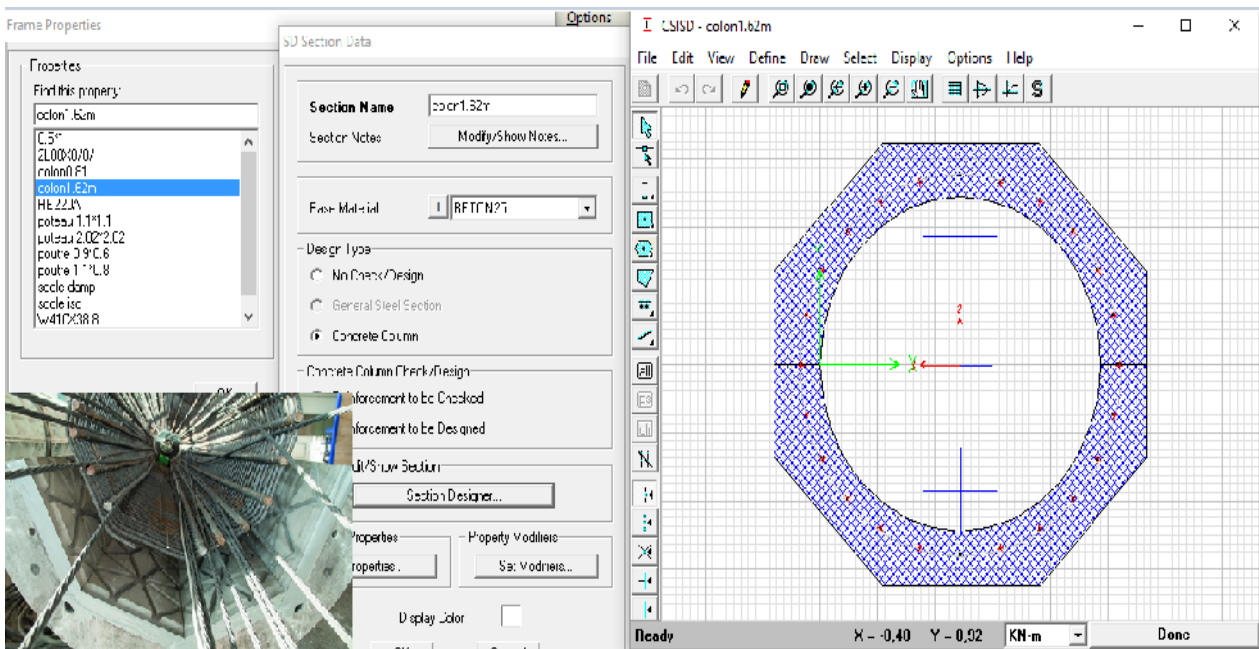
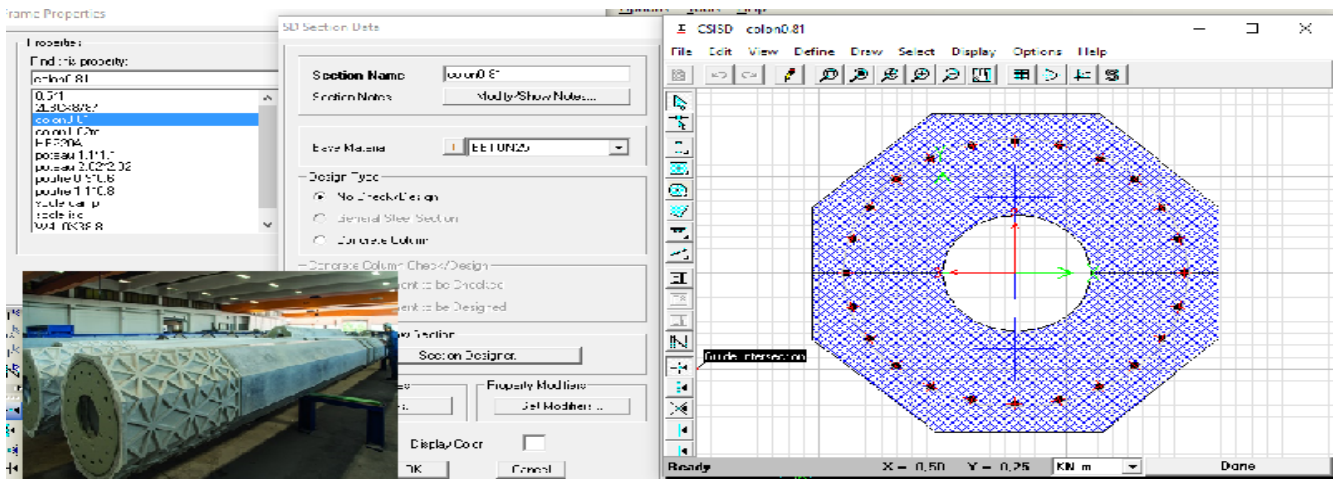
Nonlinear Parameters: Damping: Peng-Koong-Duhamel, Hilber-Hughes-Taylor, Nonlinear Parameters: Delout

OK, Cancel

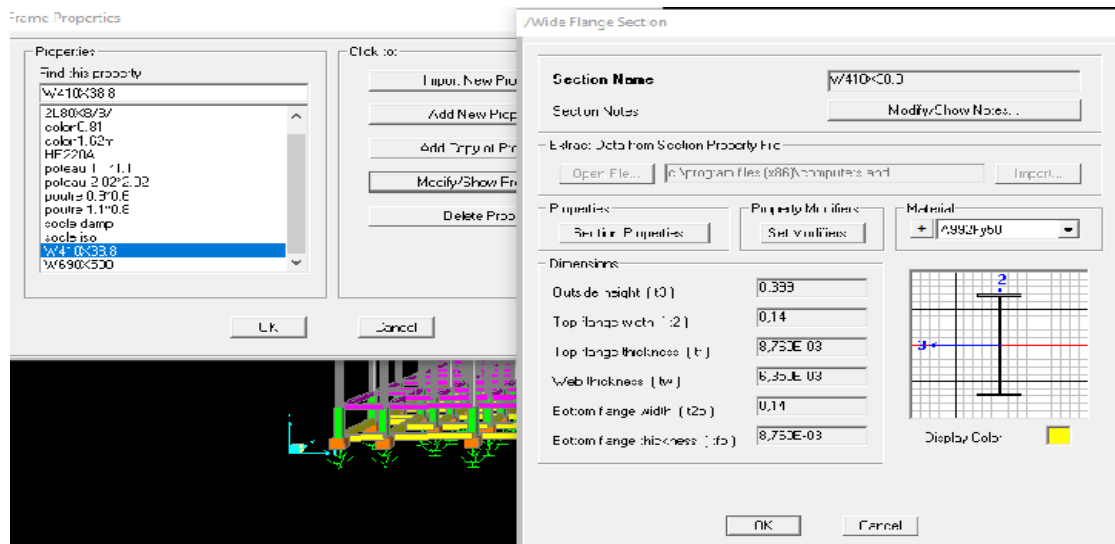
✓ Définition de la géométrie du modèle.

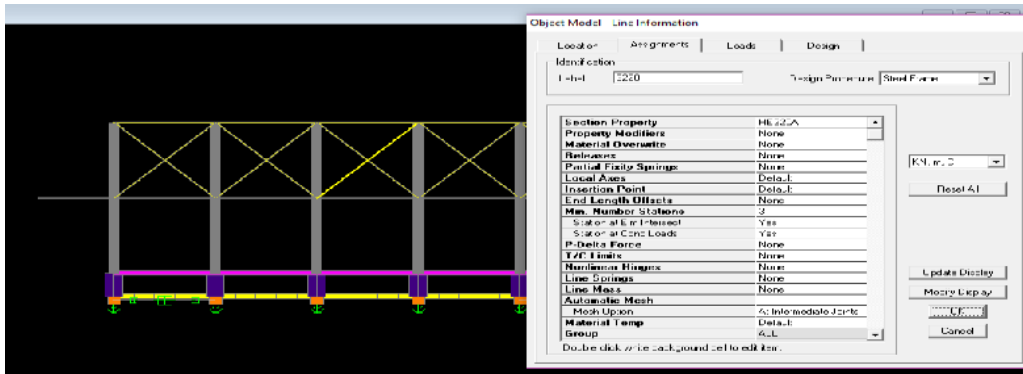
Les colonnes

- 1) Définir les sections des colonnes et contreventements poteaux, poutres,;
- 2) **Define > Sections properties > Frames sections > Add New Properties**

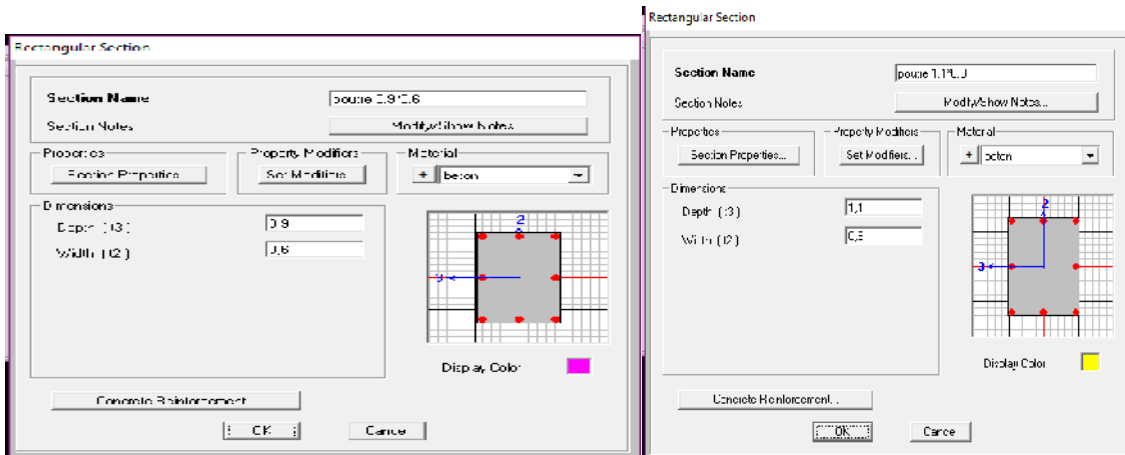


Les contreventements :

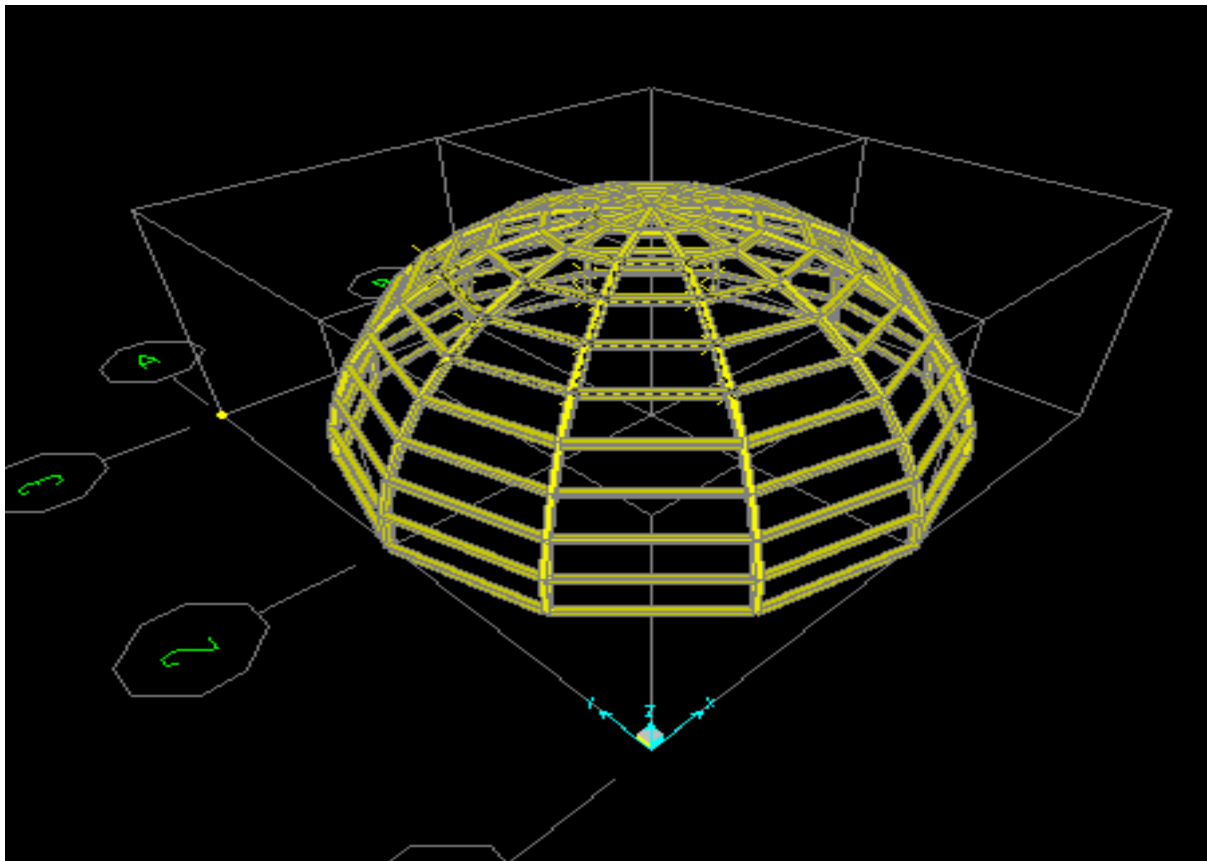




Les poteaux et les poutres



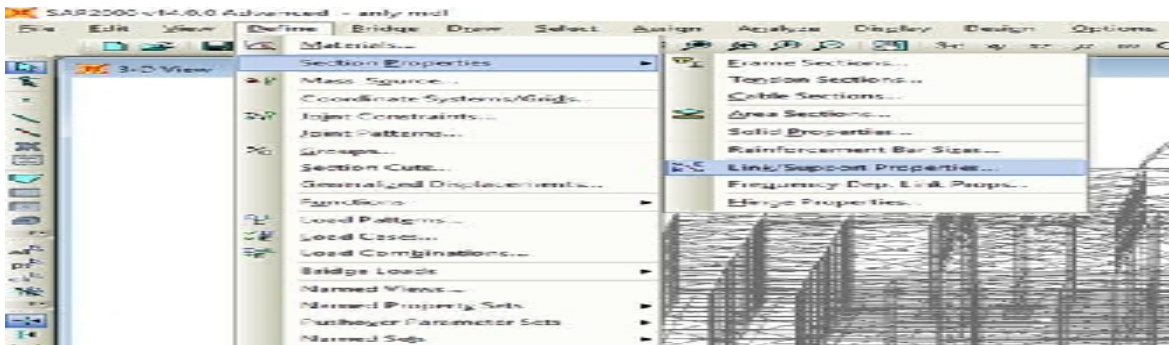
La coupole



- Les conditions aux limites (articulation ou appui parasismique, diaphragme...).

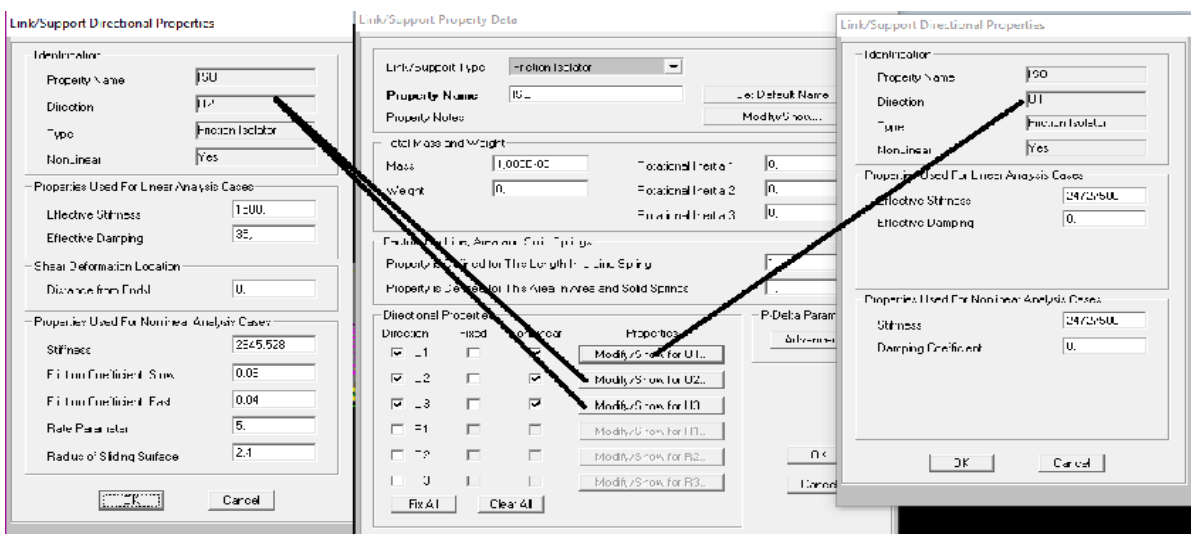
Éléments LINK :

L'élément de liaison est utilisé pour connecter deux joints ensemble. L'élément de support est utilisé pour connecter un joint à la terre. Les deux types d'éléments utilisent les mêmes types de propriétés. Chaque élément de liaison ou d'appui peut présenter jusqu'à trois types de comportement: linéaire, non linéaire et dépendant de la fréquence, selon les types de propriétés affectées à cet élément et le type d'analyse en cours

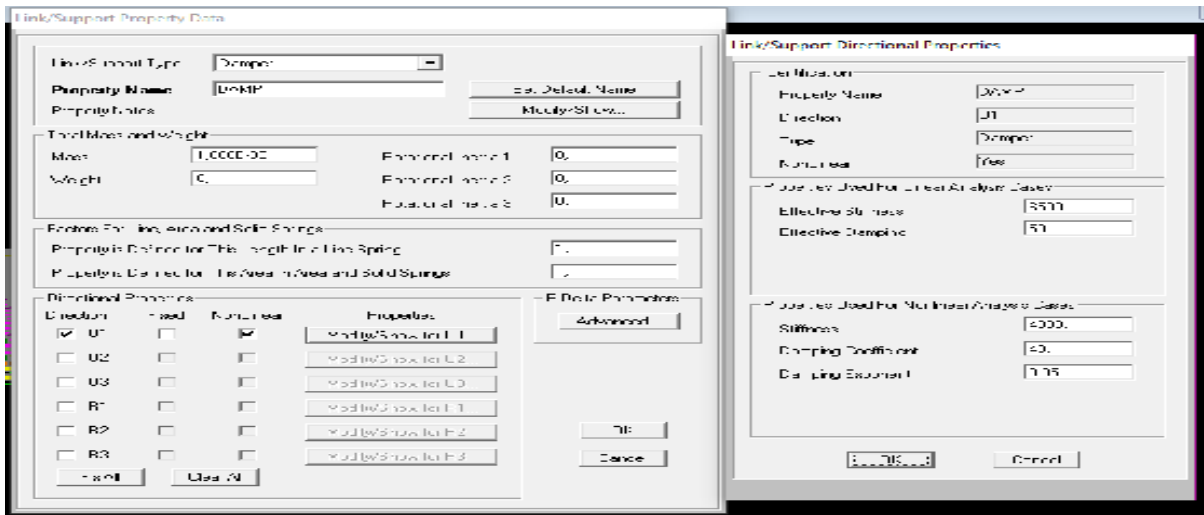


La modélisation du FPS peut être effectuée à l'aide d'un appui glissant isolateur. La création du LINK se fera de la manière suivante.

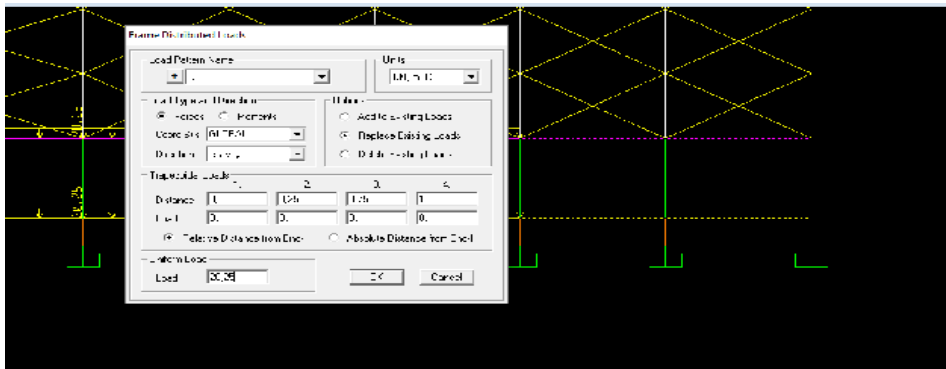
Le FPS est un élément Link de type friction isolateur



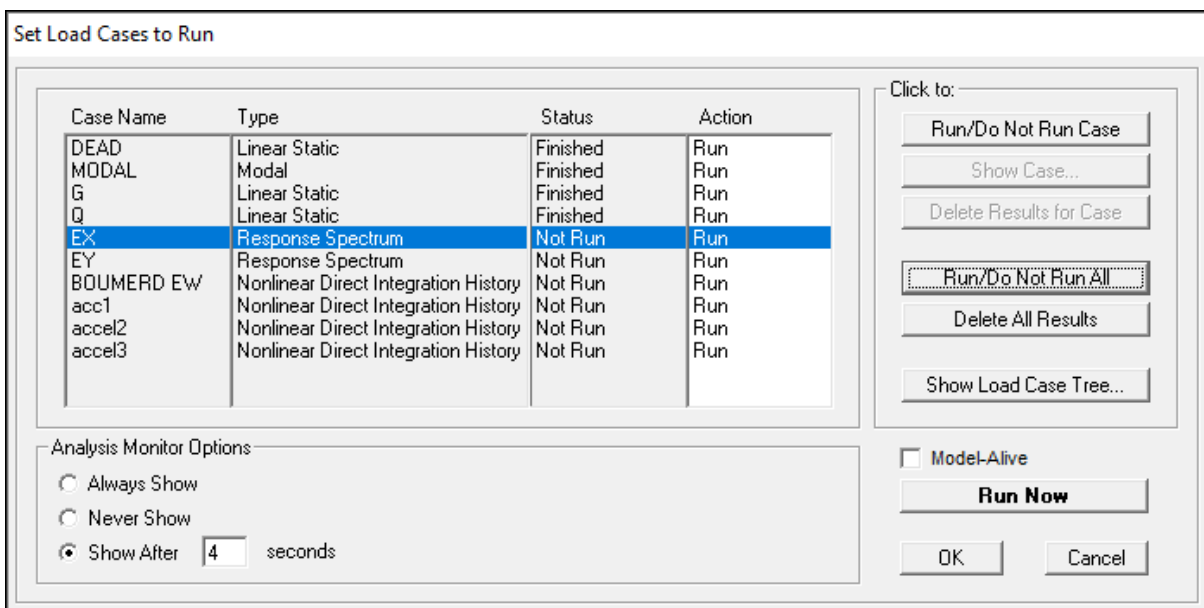
La modélisation des amortisseurs par Link de type damper



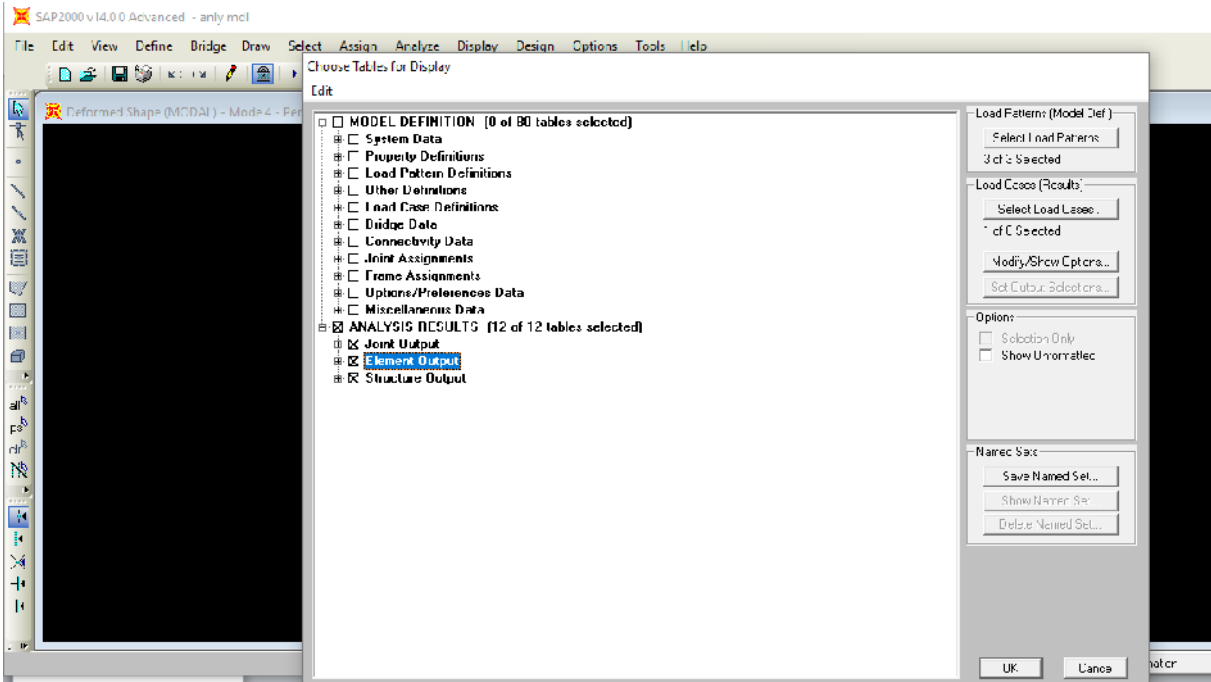
- Application des charges.



- Analyse de la structure



Pour afficher les déplacements et les accélérations et les vitesses.



Joint Displacements

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

Joint Displacements

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	StepNum Unitless	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians
1	MODAL	LinModal	Mode	1	-0,000523	0,002284	0,0000001884	-0,00000586
1	MODAL	LinModal	Mode	2	0,001926	0,000044	-0,0000001616	-0,000000133
1	MODAL	LinModal	Mode	3	0,001818	-0,001376	-0,0000001966	0,000002978
1	MODAL	LinModal	Mode	4	-0,000046	0,000091	0,00000005002	0,0000005763
1	MODAL	LinModal	Mode	5	-0,000709	0,002766	-0,0000004001	0,000008052
1	MODAL	LinModal	Mode	6	0,002364	0,000121	0,0000005488	0,000000747
1	MODAL	LinModal	Mode	7	-0,000003733	0,000003572	0,00000002284	0,0000002757
1	MODAL	LinModal	Mode	8	-0,000332	-0,000145	0,0000008448	-0,000003782
1	MODAL	LinModal	Mode	9	0,000758	0,000274	0,0000002075	0,00000308
1	MODAL	LinModal	Mode	10	-0,000097	-0,001876	0,0000008415	-0,000022
1	MODAL	LinModal	Mode	11	-0,000014	-0,000012	0,00000000151	-0,0000001313
1	MODAL	LinModal	Mode	12	-0,001939	-0,000336	-0,000001289	-0,000004487
1	MODAL	LinModal	Mode	13	0,001859	-0,002497	0,000001872	-0,0000032
1	MODAL	LinModal	Mode	14	-0,000002411	0,00000007425	0,00000001598	0,00000002697
1	MODAL	LinModal	Mode	15	0,002748	-0,002234	0,000002447	-0,0000026
1	MODAL	LinModal	Mode	16	0,000007995	-0,000006205	0,00000002587	-0,0000005485
1	MODAL	LinModal	Mode	17	-0,000031	0,000022	0,00000003931	0,0000003534
1	MODAL	LinModal	Mode	18	0,000001381	-0,000001008	0,00000009088	-0,0000004535
1	MODAL	LinModal	Mode	19	0,000033	0,000004271	0,0000000259	0,0000004085
1	MODAL	LinModal	Mode	20	-0,000015	0,000002677	0,00000003519	0,0000001056
1	MODAL	LinModal	Mode	21	-0,000000085	-0,0000015	0,000000005337	-0,0000007215

Record: 1 of 51312

Add Tables... Done

Evolution temporelle

SAP2000 v14.0.0 Advanced - anafel

Plot Function Trace Display Definition

Initial Case: (Multi-stepped Cases) R011MFR01.Pw

Choose Plot Functions

Joining Plot Functions...

List of Functions: SSU2, SSU1, Z-UU, Input Energy

Vertical Functions: RDC

Horizontal Plot Function: TIMF

Selected Plot Function Line Options: Solid Line, Dashed Line, Dotted Line

Vertical Scale Factor: []

Time Range: From [] To [] [Reset Defaults]

Axis Range Override: Horizontal, Vertical

Axis Labels: Horizontal [], Vertical []

Grid Overlay

Save Name Set... Display...

Display Plot Function Traces

