

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL
N° :**



**DOMAINE : GENIE CIVIL
FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : STRUCTURE**

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: BERRAG Boulanouar & SULTAN Mohammed Hamood Ahmed

Intitulé

**Effet de l'isolation à la base sur les structures à
plusieurs degrés de liberté**

Soutenu devant le jury composé de :

Pr Titoum Messaoud
Dr Boulaouad Abderrachid
Dr Rahmani Abdallah Yacine

Université M'sila
Université M'sila
Université M'sila

Président
Rapporteur
Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à **Boulaouad abd erachid**, notre encadreur, qui nous a témoigné de sa confiance et de son aide scientifique et qui, par son expérience et sa compétence, nous a transmis, pas à pas. Il nous a laissé une grande liberté dans le travail mais a été toujours disponible pour nos questions. Sans lui, cette thèse n'aurait sûrement jamais vu le jour.

Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Toute notre gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions aussi tous nos amis pour nos discussions plus ou moins sérieuses et avec qui nous avons passé d'agréables moments.

Dédicaces

Toute notre gratitude et remerciement vont à dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour arriver à ce stade afin de réaliser

ce travail que je dédie à :

A mes très chers parents.

A Pour ma femme

A mes chers enfants Monsif Iyad, Amir

A mes frères et ma sœur

A tous les amis que j'aime et qui m'aiment

A mon frère et ami Sultan Mohammed

Je vous dédie ce mémoire.

Merci pour votre Amour et votre Soutien

BERRAG Boulanouar

Dédicaces

Toute notre gratitude et remerciement vont à dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour arriver à ce stade afin de réaliser

ce travail que je dédie à :

A mes très chers parents.

A mes frères et sœurs

A notre encadreur monsieur **boulaouad abd erachid**

A toute ma chère famille

A tous les amis que j'aime et qui m'aiment

A mon frère et ami Boulanouar Berrag

Je vous dédie ce mémoire.

Merci pour votre Amour et votre Soutien

Saltan Mohammed kamood

Résumé

La protection sismique des structures est une exigence qui est de plus en plus encadrée par les codes du domaine génie parasismique. L'isolation à la base est une des technologies les plus répondues dans ce domaine, par conséquent, elle offre une meilleure réduction d'effet sismique sur le bâtiment en termes de déplacement relatifs, d'accélération et des efforts tranchants.

L'objectif de notre recherche est d'évaluer la performance de ce système d'isolation en utilisant un type d'appui HDRB. Pour cela une analyse dynamique a été effectuée par le logiciel ETABS sur un bâtiment à dix niveaux avec deux configurations ; base fixe, base isolée, en choisissant une seule répartition. Le but est de démontrer l'efficacité de ce système par les meilleurs résultats.

Suite à une comparaison de deux systèmes cités auparavant, reste l'utilisation type HDRB le meilleur et donne des résultats satisfaisants.

Mots clés : ETABS, Robot, méthodes d'analyse dynamique, réponse sismique, isolateurs de base, bâtiment.

Abstract

The seismic protection of structures is a requirement which is increasingly framed by codes in the field of earthquake engineering. Base insulation is one of the most popular technologies in this area, therefore it offers a better reduction of seismic effect on the building in terms of relative displacement, acceleration and shear forces.

The objective of our research is to assess the performance of this insulation system using a type of HDRB support. For this, a dynamic analysis was carried out by the ETABS software on a ten-storey building with two configurations; fixed base, isolated base, choosing a single distribution. The goal is to demonstrate the effectiveness of this system with the best results.

Following a comparison of two systems mentioned above, the HDRB type use remains the best and gives satisfactory results.

Keywords : ETABS, Dynamic analysis methods, seismic response, basic insulators, building.

الملخص

حماية المباني من الزلزال هو شرط يتم تأطيره بشكل متزايد وفقا لمعايير المجال الزلزالي. عزل القاعدة هي واحدة من أكثر

التكنولوجيات الواردة في هذا المجال، بحيث تقدم أفضل تقليص لتأثير الزلازل على المبنى

من حيث الانتقال النسبي، التسارع وقوى القص

الهدف من بحثنا هو تقييم أداء نظام العزل باستخدام نوعين مختلفين من الدعم. لذا تم إجراء تحليل حركي بواسطة برنامج

"إيتابس" على مبنى مكون من عشرة طوابق؛ قاعدة ثابتة، قاعدة معزولة بكل نوع على حدا، الهدف من ذلك

هو إثبات فعالية هذا النظام على أفضل النتائج.

بعد المقارنة بين النظامين المذكورين من قبل توصلنا الى انن نظام العزل هو الأفضل، بحيث يقدم نتائج مرضية

الكلمات المفتاحية: الإيتابس، طرق التحليل الحركي، الاستجابة للزلازل، عازل قاعدي، بناية

SOMMAIRE

| | |
|-----------------------|------|
| Remerciements | i |
| Dédicace | ii |
| Dédicace | iii |
| Résumé | iv |
| Abstract | v |
| ملخص | vi |
| Sommaire | vii |
| Liste des figures | x |
| Liste des tableaux | xiii |
| Notations et symboles | xv |

1 Introduction-Problématique

3 Recherche Bibliographique

Chapitre I: Notions préliminaires à la sismologie

| | |
|----------------------------|---|
| I-1. Introduction | 8 |
| I-2. L'origine des séismes | 8 |
| I-3. Les ondes sismiques | 8 |
| I-4. Le Micro zonage | 9 |

Chapitre II: Principes et Techniques de L'isolation Sismique à la Base

| | |
|--|----|
| II-1. Les appuis parasismiques | 12 |
| II-2. Principe de base et fondements théoriques | 12 |
| II-3. Les différents systèmes d'isolation parasismique | 14 |
| II-3.1 Les appuis parasismiques | 14 |
| II-3.1.1 Appuis à déformation | 15 |
| II-3.1.2 Appuis en élastomère à fort taux d'amortissement HDRB | 16 |
| II-3.1.2 Appuis en élastomère avec noyau de plomb | 17 |
| II-3.1.3 Appuis à pot w_i | 18 |
| II-3.1.4 Appuis à glissement | 19 |
| II-3.1.5 Appuis à déformation et à glissement | 20 |
| II-3.1.6 Appuis à roulement | 21 |

| | |
|---|----|
| II-4. Amortisseurs parasismiques | 22 |
| II-4.1 Amortisseur hystérésis (élasto-plastique) | 22 |
| II-4.2 Amortisseur hydraulique | 23 |
| II-4.3 Amortisseur à friction | 23 |
| II-4.4 Amortisseur de masse accordée (TMD) | 24 |
| II-5. Choix entre les types d'appuis parasismiques | 24 |
| II-6. Les avantages de l'isolation parasismique | 25 |
| II-7. Les inconvénients de l'isolation parasismique | 25 |
| II-8. Conclusion | 26 |

Chapitre III : Fonctionnement et dimensionnement des appuis parasismiques.

| | |
|---|----|
| III-1. Introduction | 35 |
| III-2. Fonctionnement des appuis parasismiques | 35 |
| III-2.1.1 Appuis à déformation | 35 |
| III-2.1.2 Appuis à glissement | 37 |
| III-2.1.3 Modèle de calcul de la structure isolée | 39 |
| II-3. Les méthodes de l'analyse et dimensionnement des appuis parasismiques | 43 |
| II-3.1 Description des codes parasismiques | 43 |
| II-3.2 Les niveaux d'intensités du mouvement sismique | 43 |
| II-3.3 Méthode de calcul d'analyse des structures isolées | 44 |
| II-3.4 Méthodologie de dimensionnement des appuis parasismiques | 54 |
| II-4. Conclusion | 57 |

Chapitre IV : Etude comparative de la structure avec et sans le système d'isolation.

| | |
|---|----|
| IV -1. Introduction | 59 |
| IV -2. Modélisation des appuis parasismiques dans ETABS | 59 |
| IV -3. Description de l'excitation sismique | 62 |
| IV -4. Description du système d'isolation | 60 |
| IV -5. Descente des charges | 61 |

| | |
|--|----|
| IV -5.1 Périodes et pulsation | 61 |
| IV -5.2 Les déplacements | 62 |
| IV -5.2.1 Déplacement des étages | 62 |
| IV -5.2.2 Déplacement maximal du dernier niveau | 63 |
| IV -5.2.3 Déplacement maximal a la base du bâtiment | 64 |
| IV -5.3 Accélération du dernier niveau | 65 |
| IV -5.4 Les efforts tranchants | 67 |
| IV -5.4.1 Les efforts tranchants à la base | 67 |
| IV -5.4.2 Les efforts tranchants à différents niveau | 68 |
| IV -6. Conclusion | 69 |
| Conclusion générale | |
| Références bibliographiques | |

LISTE DES FIGURES

Recherche Bibliographique

| | |
|---|---|
| Figure 1 : Morceaux de bois installés entre la base et le palier des maisons en Iran | 1 |
| Figure 2 : Mise en place des isolateurs sur les massifs d'une structure | 1 |
| Figure 3 : Schéma historique de développement de l'isolation à la base | 3 |
| Figure 4 : Vue en plan et en élévation du gratte-ciel | 4 |
| Figure 5 : Hôtel de ville de San Francisco et PASSEDNA Californie [11] | 5 |
| Figure 6 : Hôpital Pierre Zobda-Quitman sur appuis parasismique [12][13] | 5 |
| Figure 7 : Schéma du réacteur expérimental Jules Horowitz (Cadarache, France) avec ses appuis parasismiques visibles dans la partie inférieure | 5 |
| Figure 8 : la Grande Mosquée d'Alger est conçue pour accueillir 120 000 fidèles | 6 |
| Figure 9 : Aquila bâtiments du quartier et le système de pendule de frottement utilisés | 6 |

CHAPITRE I : Notions préliminaires à la sismologie.

| | |
|--|----|
| Figure. I.1 : La carte de micro zonage Algérien | 10 |
|--|----|

CHAPITRE II : Principes et Techniques de L'isolation Sismique à la Base.

| | |
|--|----|
| Figure II. 1 : La position des appuis parasismiques dans un bâtiment | 12 |
| Figure II. 2 : Deux types de structure : une conventionnelle encastrée dans le sol, et une autre protégée contre les séismes par un système d'isolation à la base | 13 |
| Figure II. 3 : Principe de l'isolation sismique, réduction de l'accélération grâce au décalage de la période | 14 |
| Figure II. 4 : Comparaison entre deux structures isolée | 14 |
| Figure II. 5 : Appuis à déformation | 15 |
| Figure II. 6 : Appuis en élastomère à fort taux d'amortissement | 16 |
| Figure II. 7 : Appuis en élastomère avec noyau de plomb [28] | 18 |
| Figure II. 8 : Exemples de types de l'appareil d'appui | 18 |
| Figure II. 9 : Appui à pot | 19 |
| Figure II. 10 : Des exemples de l'appui à pot | 19 |
| Figure II. 11 : Appuis à glissement | 20 |
| Figure II. 12 : Appuis en pendules glissants FPS | 20 |
| Figure II. 13 : Appuis à déformation et à glissement | 21 |
| Figure II. 14 : Appuis à roulement | 22 |
| Figure II. 15 : Le principe de fonctionnement d'appuis à bille | 22 |

| | |
|---|-----------|
| Figure II. 16 : Amortisseur hystérésis (élasto-plastique) | 23 |
| Figure II. 17 : Amortisseur hydraulique | 23 |
| Figure II. 18 : Amortisseur à friction | 24 |
| Figure II. 19 : Un TMD pendulaire de 800 tonnes dans un bâtiment de 508m de hauteur (tour de Taipei 101) Taiwan | 25 |

CHAPITRE III : Fonctionnement et dimensionnement des appuis parasismiques.

| | |
|--|-----------|
| Figure III. 1 : Principe et fonctionnement de LDRB | 35 |
| Figure III. 2 : Principe et fonctionnement de LRB | 36 |
| Figure III. 3 : Principe et fonctionnement du FP | 37 |
| Figure III. 4 : Principe et fonctionnement de FPS | 38 |
| Figure III. 5 : Modèle de structure isolée | 39 |
| Figure III. 6 : Modèle mathématique | 39 |
| Figure III. 7 : La forme des modes propres de la structure isolée | 41 |
| Figure III. 8 : Boucles d'hystérésis sous chargement cyclique | 46 |
| Figure III. 9 : Déplacements du système d'isolation | 50 |
| Figure III. 10 : Dimensions en plan | 50 |

Chapitre IV : Etude comparative de la structure avec et sans le système d'isolation

| | |
|--|-----------|
| Figure IV.1. Accélérogramme du séisme de Boumerdès le 21 mai 2003 avec PGA = 0,33 g enregistré par la station de Keddara 1 | 60 |
| Figure IV.2. Les caractéristiques de l'appui HDRB a utilisé dans la structure | 60 |
| Figure IV.3. Vue en plan et 3D structure R+9 | 61 |
| Figure IV.4. Comparaison des périodes et pulsations pour les deux modèles | 62 |
| Figure IV.5. Comparaison de déplacement du dernier niveau par rapport à l'axe X | 63 |
| Figure IV.6. Comparaison de déplacement du dernier niveau par rapport à l'axe Y | 63 |
| Figure IV.7. Le déplacement à la base d'une structure isolé dans le sens X | 64 |
| Figure IV.8. Le déplacement à la base d'une structure isolé dans le sens Y | 64 |
| Figure IV.9. Comparaison de l'accélération suivant l'axe X | 66 |
| Figure IV.10. Comparaison de l'accélération suivant l'axe Y | 66 |
| Figure IV.11. Comparaison des efforts tranchants à la base pour les deux modèles dans la direction X | 67 |

| | |
|---|-----------|
| Figure IV.12. Comparaison des efforts tranchants à la base pour les deux modèles dans la direction Y | 67 |
| Figure IV.13. Comparaison des Moments à la base pour les deux modèles dans la direction X | 68 |
| Figure IV.14. Comparaison des Moments à la base pour les deux modèles dans la direction Y | 68 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----------|
| Tableau II. 1 : Caractéristique de caoutchouc | 15 |
| Tableau III. 1 : Coefficient sismique C_{VD} . | 47 |
| Tableau III. 2 : Facteur de la zone sismique Z. | 47 |
| Tableau III. 3 : Facteur de proximité de la faille active N_v . | 48 |
| Tableau III. 4 : Type de failles sismiques | 48 |
| Tableau III. 5 : Coefficients sismiques C_{VM} . | 48 |
| Tableau III. 6 : Coefficient de réponse au séisme capable maximum M_M . | 49 |
| Tableau III. 7 : Les coefficients d'amortissement B_D et B_M . | 49 |
| Tableau III. 8 : Valeurs de l'analyse dynamique données en fonction des valeurs de l'analyse statique. | 54 |
| Tableau IV. 1 : Les périodes et les pulsations de la structure à base fixe et isolée | 60 |
| Tableau IV. 2 : Les déplacements des étages dans les deux modèles selon les deux sens X et Y | 61 |
| Tableau IV. 3 : Comparaison entre les périodes les pulsations et les facteurs de contribution pour les quatre modèles | 86 |

NOTATIONS ET SYMBOLES

- b** : Dimensions de la structure.
- c** : L'amortissement.
- c_{eq}** : Coefficient d'amortissement équivalent.
- d** : Diamètre de la surface sphérique de l'appui FPS.
- e** : Excentricité.
- f_{c28}** : La résistance à la compression du béton à 28 jours.
- f_{t28}** : La résistance à la traction du béton.
- g** : accélération de la pesanteur.
- h_x** : Hauteur du niveau x.
- h_i** : Hauteur du niveau i.
- h_t** : Hauteur de l'appui HDRB.
- i** : Rayon de giration.
- k** : La rigidité.
- k_{eff}** : La rigidité effective du système d'isolation.
- l_f** : longueur de flambement.
- m** : La masse de la structure.
- m_s** : La masse de la structure.
- m_b** : La masse de la base.
- n_a** : Nombre des frettes d'acier.
- q₁, q₂** : Coefficients modaux dépendants du temps.
- t_r** : Epaisseur d'une seule couche en élastomère.
- t_e** : L'épaisseur des plaques d'extrémité.
- t_a** : L'épaisseur des frettes d'acier.
- u_b** : Déplacement absolu de la base.
- u_s** : Déplacement absolu de la structure.
- v_b** : Déplacement relatif de la base.
- v_s** : Déplacement relatif de la structure.
- y** : Distance entre le centre de rigidité du système d'isolation.
- A** : Section de l'appui.
- A, B, C** : Types de la faille sismique.

B_D : Coefficient d'amortissement correspond au tremblement de terre de conception DBE.

B_M : Coefficient d'amortissement correspond au tremblement de terre de conception MCE.

C_{VD} : Coefficient sismique correspond au tremblement de terre de conception DBE.

C_{VM} : Coefficient sismique correspond au tremblement de terre de conception MCE.

D : Le déplacement de conception.

D_y : Déplacement à la plastification.

D_{TD} : Déplacement totale de la conception correspond au tremblement de terre DBE.

D_{TM} : Déplacement totale de la conception correspond au tremblement de terre MCE.

D'_D : Le déplacement maximal du système d'isolation correspond au tremblement de terre BDE.

D'_M : Le déplacement maximal du système d'isolation correspond au tremblement de terre MCE.

E_{ij} : Le module d'élasticité instantané.

F_b, F_s : Les forces sismiques.

F_f : La force de frottement

F_D : Force maximum correspond au tremblement de terre DBE.

F_M : Force minimum correspond au tremblement de terre MCE.

F_x : Force appliquée au-dessus du secteur du bâtiment selon la distribution de masse au niveau x.

F_y : Force limite élastique.

G : Module de cisaillement de l'élastomère.

K_{D,eff} : Rigidité effective du système d'isolation correspond au tremblement de terre de conception DBE.

K_H : Rigidité horizontale de l'élastomère.

K_{M,eff} : Rigidité effective du système d'isolation correspond au tremblement de terre de conception MCE

K_{Dmax} : Rigidité effective maximale correspond au correspond au tremblement de terre DBE.

K_{Dmin} : Rigidité minimale de système d'isolation correspondant au déplacement minimum.

K_{Mmin} : Rigidité minimale de système d'isolation correspondant au déplacement maximum.

K_1 : Rigidité élastique.

K_2 : Rigidité post-élastique.

L_1, L_2 : Les facteurs de participation du premier et du deuxième mode dans la réponse

M_M : Coefficient de réponse au séisme capable maximum.

N : est la charge verticale reprise par l'appui qui reprise sous le poteau.

N_S : L'effort normal maximal à la base du poteau déterminé par la descente de charge.

N_v : Coefficient de proximité de la faille active.

Q : La résistance caractéristique.

R : Rayon de la surface sphérique d'appui FPS.

R_I : Facteur de réduction de force de conception.

S : facteur de forme.

S_A : Spectre d'accélération

S_A : Type de profil de sol très rocheux.

S_B : Type de profil de sol rocheux.

S_C : Type de profil de sol très dense et roche molle.

S_D : Type de profil de sol raide.

S_D : Le déplacement spectral du mouvement du sol.

T : Période de la structure à base fixe.

T_M : La période effective de la structure d'isolation en seconde correspondant au tremblement de terre maximum MCE.

T_D : La période effective de la structure d'isolation en seconde correspondant au tremblement de terre de conception DBE.

V_b : Force sismique.

V_s : Force du cisaillement minimale.

W : Le poids total de la structure.

W_x : Poids du niveau x.

W_i : Poids du niveau i.

Z : Coefficient de zone sismique.

ξ : Coefficient d'amortissement.

ω : Fréquence propre.

IV

μ : coefficient de frottement.

ξ_s : Facteur d'amortissement de la structure.

ξ_b : Facteur d'amortissement du système isolé.

ω_b : Fréquence propre du système isolé.

ω_b : pulsation propre du système isolé.

ω_s : pulsation propre de la structure.

Φ_1, Φ_2 : La matrice modale.

β_b : Coefficient d'amortissement du système isolé.

β_1, β_2 : Les rapports d'amortissements modaux pour la structure et le système d'isolation.

γ_{\max} : est la contrainte de cisaillement maximale.

σ_{bc} : La contrainte limite de service du béton en compression.

λ : Élancement du poteau.

Δ : Déplacement statique due à un déplacement de support unitaire.

ΔE : L'énergie totale dissipée.

$[C]$: Matrice de masse globale de la structure.

$[K]$: Matrice d'amortissement de la structure.

$[M]$: Matrice de rigidité de la structure.

$\{V\}$: Vecteur d'accélération de la structure.

$\{V\}$: Vecteur vitesse de la structure.

$\{V\}$: Vecteur de déplacement de structure.

EDC : énergie dissipée par cycle.

FPS : Friction Pendulum System.

HDRB : High Damping Rubber Bearing.

LDRB : Low Damping Rubber Bearing.

LRB: Low Rubber Bearing.

TMD : Tuned Mass Damper.

Introduction-Problématique

INTRODUCTION GENERALE :

Un séisme est un événement violent et imprévisible qui sollicite les structures d'une manière très différente de celle des actions usuelles. D'après Y. Chérait (2006), il se produit trois cent mille (300.000) tremblements de terre en moyenne par an dans le monde. Toutefois, seulement vingt (20) d'entre eux peuvent être considérés comme des séismes majeurs. Si les structures n'ont pas été conçues pour cette éventualité et construites correctement, des sollicitations sismiques importantes peuvent les endommager fortement jusqu'à entraîner leur ruine. Les conséquences sont souvent catastrophiques, pertes humaines et économiques. A titre d'exemple, le séisme de Boumerdes en Algérie avec une magnitude de 6.8 sur l'échelle de Richter.

La protection parasismique des bâtiments constitue une prévention efficace contre les effets des tremblements de terre, car plus de 90% des pertes en vies humaines sont dues à l'effondrement des ouvrages [1].

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, les forces dépendent des mouvements relatifs de la structure par rapport à la fondation. Ces forces engendrent des déformations de la structure. En fonction de la violence du séisme, la structure peut subir des déformations plastiques qui peuvent conduire à sa ruine.

Afin de réduire la force des tremblements de terre, plusieurs solutions ont été envisagées, dont un système isolation sismique à la base de la structure.

L'isolation sismique à la base consiste à découpler le mouvement du sol du mouvement de la structure dans le but de réduire les forces transmises à cette dernière. D'après l'étude de Lotfi Guizani sur l'isolation sismique des ponts au Canada, les forces sismiques exercées sur la structure isolée sont typiquement de l'ordre de 3 à 10 fois plus petites que la demande en force sur la structure non isolée. L'isolateur capte les déformations (inélastiques) et filtre les accélérations (hautes fréquences) de sorte que la superstructure isolée (au-dessus) se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et presque pas de déformations. Par conséquent, les forces d'inertie transmises aux éléments de fondations sont limitées par rapport à la capacité élastique de tels éléments. Ce comportement se traduit par la limitation des dommages subis par la superstructure et les éléments de fondation et par la préservation de la fonctionnalité de la structure après le séisme. L'objectif d'une conception d'un

ouvrage isolé à la base, est l'optimisation technique et économique vis-à-vis de l'ensemble des différentes contraintes, à savoir les contraintes naturelles présentées par l'ensemble des éléments de son environnement déterminant sa conception par exemple, les données sismologiques, climatiques, géométriques..., et aussi les contraintes fonctionnelles qui permettent à la structure d'assurer ses fonctions (le type de fondation, le type des isolateurs...), tout en respectant un certain nombre d'exigence de durabilité et de qualité architecturale.

Problématique

Ces les dispositifs sont les appareils d'appuis et les amortisseurs, notre choix est basé sur les appuis parasismiques. Ces derniers sont fabriqués par des matériaux résistants du caoutchouc et de l'acier, pour cela notre recherche, on va répondre aux problématiques suivantes :

- ✓ Quel sont les différents appareils d'appuis les plus influent en termes d'impact et de matériaux utilisés ?
- ✓ Est-ce que l'emplacement de ces appareils d'appuis influe sur la réponse dynamique d'un bâtiment ?
- ✓ Comment se fait la réduction sismique ?

L'objectif principal de ce travail est de mettre en valeur l'influence des isolateurs sur le comportement de la superstructure. Ce travail est structuré en quatre chapitres à savoir :

- ✓ Recherche bibliographique a consacré les isolations à la base. Dans celle-ci, une vue globale sur ces derniers est exposée : l'historique, le principe et les types des isolateurs parasismiques.
- ✓ Le chapitre I est consacré à la Notions préliminaires à la sismologie concernant L'origine des séismes : l'historique, Les ondes sismiques, Le Micro zonage.
- ✓ Le chapitre II est consacré à la Principes et Techniques de L'isolation Sismique à la Base concernant les isolations à la base. Dans celle-ci, une vue globale sur ces derniers est exposée : l'historique, le principe et les types des isolateurs parasismiques.
- ✓ Le chapitre III est divisé en deux sections. La première présente la loi de comportement de quelques types des isolateurs et la méthode de calcul d'une structure isolée à deux degrés de liberté. La deuxième donne les différentes méthodes d'analyse et dimensionnement des appuis parasismiques selon le code American Uniform Building code (UBC 97) [2].
- ✓ Le dernier chapitré consacré pour la modélisation de la structure avec et sans système d'isolation à l'aide du logiciel ROBOT et ETAPS La comparaison entre les deux structures.

1. Introduction :

Historiquement, des morceaux de bois ont été installés entre la base et le palier des maisons en Iran (figure 1). Des dispositifs pour l'isolement ou pour la dissipation de l'énergie ont été appliqués pour la première fois dans le domaine de la construction mécanique, telles que des amortisseurs dans les automobiles. Dans les années 50, la technologie structurale des blocs en caoutchouc flexible a été employée pour isoler des bâtiments induits par la vibration des chemins de fer (figure 2), le trafic de véhicule, le vent...etc.



Figure 1 : Morceaux de bois installés entre la base et le palier des maisons en Iran.

Les constructions sont liées au sol par leurs fondations (figure 1). Elles assurent une solidité de la superstructure face aux vibrations potentielles causées par les séismes. Pour cela, il faut intégrer un système de conception parasismique au niveau de la fondation pour minimiser les charges sismiques, par exemple ; l'isolation parasismique à la base.



Figure 2 : Mise en place des isolateurs sur les massifs d'une structure.

Dans notre pays, l'isolation parasismique est une technique de sécurité relativement nouvelle dans l'arsenal de l'ingénieur civil.

Elle consiste à découpler la structure des mouvements du sol induits par un tremblement de terre, afin d'empêcher des dommages à la structure. En d'autres termes, lors d'un séisme, la structure devrait idéalement rester immobile par rapport à un repère fixe dans l'espace (repère absolu

ou inertiel).

Pour réaliser un tel découplage (ou isolation sismique), différents appareils parasismiques, connus sous le nom d'isolateurs, sont installés de manière stratégique à divers emplacements de la structure, leur permettant ainsi de remplir leur tâche correctement lors d'un tremblement de terre.

2. Historique sur les isolateurs :

L'isolation à la base est une technologie existe depuis le début du 20ème siècle [6]. 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 [7].

En 1906 un bâtiment est construit à Munich en Allemagne. Le bâtiment est édifié sur une plaque de base rigide. Cette plaque devait supporter l'édifice et reposait librement sur un manteau d'élément sphérique fabriqué à partir d'un matériau très dur [7].

En 1909 un médecin de Calantarients déposait un brevet sur les bâtiments parasismique 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 [7].

Cependant, la première utilisation du caoutchouc dans une application du principe de protection parasismique modernes dans le monde n'ont été réalisées que dans les années 70 à 80, sur une école élémentaire à Skopje (en ex-Yougoslavie) [6]. Ce bâtiment, achevé en 1969, était constitué d'une structure de trois étages reposés sur des blocs de caoutchoucs simple. Elle a été installée aussi sur un bâtiment public en Nouvelle-Zélande en 1981 [8].

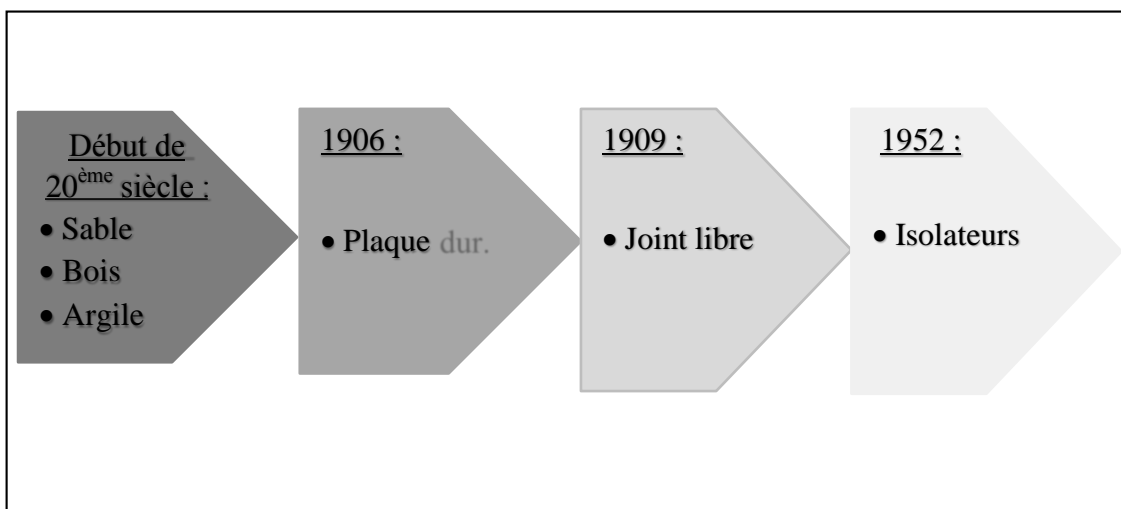


Figure 3 : Schéma historique de développement de l'isolation à la base.

3. Application des systèmes d'isolation

D'après un recensement qui a été effectué par MARTELLI et al en 2008, 10.000 structures nouvelles et existantes situées dans plus de 30 pays, ont utilisé la technique d'isolation parasismique. Ce recensement est basé sur le nombre des bâtiments construits à travers neuf (09) pays européens qui sont le Japon, Chine, Russie, USA, Italie, France, Taiwan, New Zélande, Armenia ; par la suite, lesdits recenseurs ont effectué un développement pour l'Italie basé sur l'utilisation des systèmes d'isolation de 1981 jusqu'à 2006 (Figure 3)

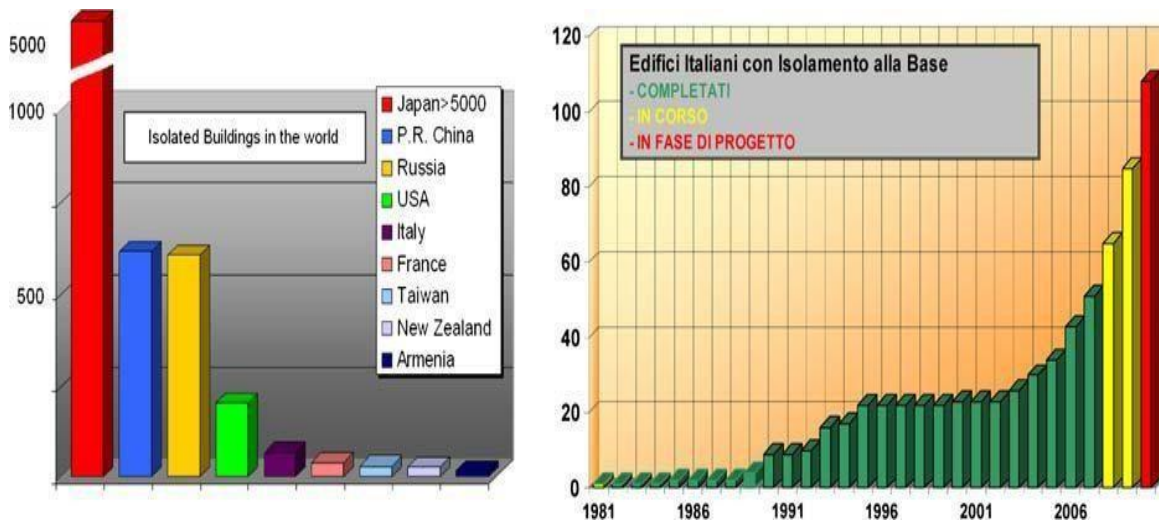


Figure 3 : Le nombre de bâtiments isolés dans les pays les plus actifs.

- Au Japon

C'est au Japon qu'on trouve le plus grand nombre des structures isolées ; environ 2000 édifices de haute taille, et plusieurs milliers de pont, cependant le premier bâtiment isolé à la base était construit est SENDI MT BUILDING (figure I.3) [9].

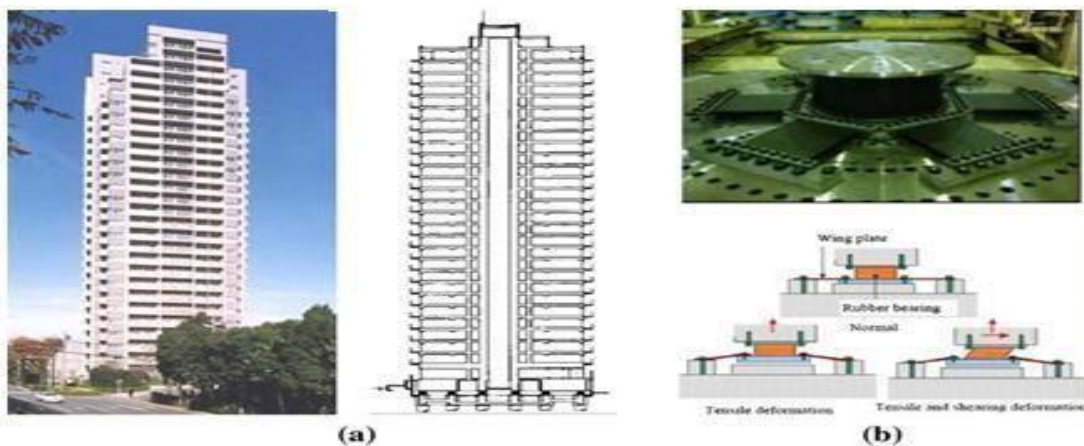


Figure 4 : Vue en plan et en élévation du grattes-ciels.

- Aux Etats-Unis

Les Etats-Unis n'ont installé la technologie que sur 150 constructions environ, principalement des grands bâtiments publics qui ont une importance historique ou une fonction stratégique, comme les hôpitaux, les casernes de pompier ou les commissariats de police, ainsi que 300 à 400 ponts [10]. On cite :



Figure 5 : Hôtel de ville de San Francisco et PASSEDNA Californie [11].

- En France

Les isolateurs ont été développés dans les années 70 et appliqués non seulement aux ponts, mais aussi aux bâtiments, les hôpitaux (Ex ; figure 5 présente l'hôpital Pierre Zobda-Quitman sur appuis parasismiques (isolation à la base ; 283 isolateurs et 36 amortisseurs) et structures des centrales nucléaires (figure 6).



Figure 6 : Hôpital Pierre Zobda-Quitman sur appuis parasismique [12][13].

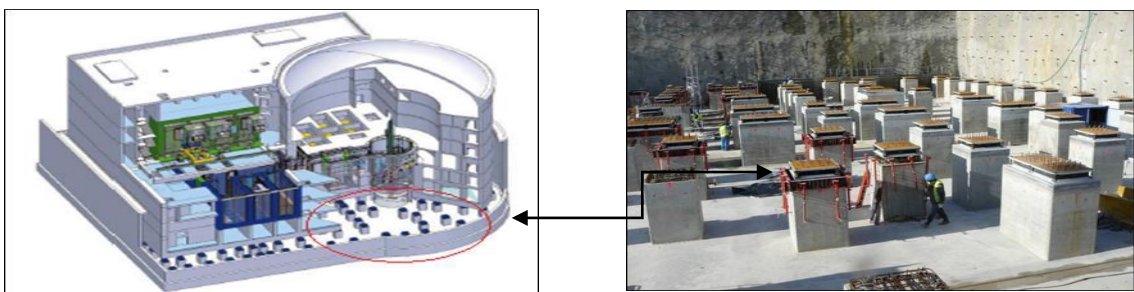


Figure 7 : Schéma du réacteur expérimental Jules Horowitz (Cadarache, France) avec ses appuis parasismiques visibles dans la partie inférieure.

- En Algérie

Le CTC-Chlef a récemment finalisé la construction du siège de son agence à Ain Defla, construit sur des appuis parasismiques à base d'élastomère. La Grande Mosquée d'Alger est un autre projet qui édifiée sur une combinaison des appuis parasismiques (figure I.7) et des amortisseurs. [14][15].

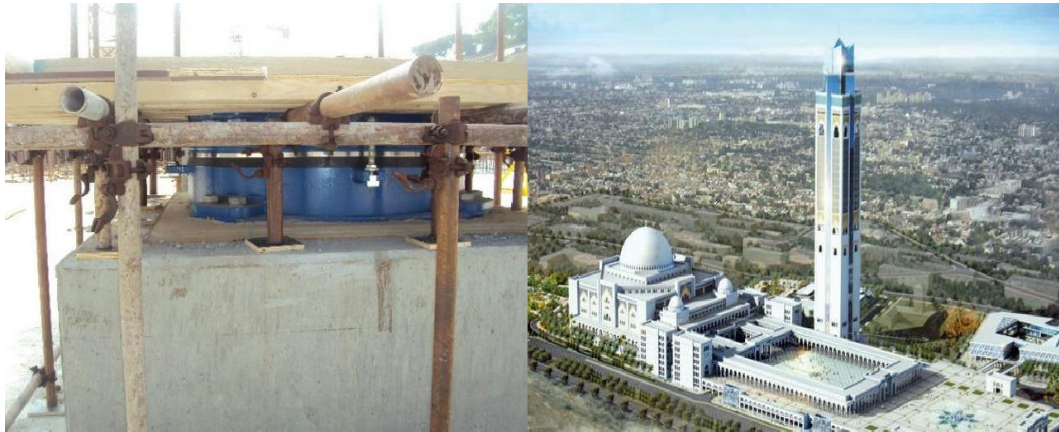


Figure 8 : la Grande Mosquée d'Alger est conçue pour accueillir 120 000 fidèles.

- Italie

Une des premières utilisations de systèmes d'isolation sismique dans ce pays est le système De pendule à friction (Figure 6). Après le tremblement de terre 2009, le quartier Aquila ont été reconstruites en utilisant ce type d'isolation.

La surface de friction est recouverte d'un matériau non corrosif (Téflon) ; la courbure de La friction d'amortissement est de 4 m, l'obtention de 20% avec un déplacement de 260 mm.



Figure 8. Aquila bâtiments du quartier et le système de pendule de frottement utilisés

Chapitre I

Notions préliminaires à la sismologie

I-1. Introduction

Le séisme est un risque naturel imprévisible qui détruit des bâtiments, des routes et des autres infrastructures. Il paralyse la fonction urbaine et cause la perte en vie humaine en l'espace d'un temps très court. Bien qu'il soit virtuellement impossible de prédire le temps exact où se produira cette catastrophe, il est possible de déterminer la probabilité relative de l'occurrence d'un séisme. Il est donc essentiel de se préparer au risque si l'on est dans une zone sismique comme l'Algérie ou le Japon.

Pour réduire le risque sismique, il est très important de se faire des images réalistes sur cet aléa de manière à mieux se préparer à l'avance et à se comporter correctement en cas de séisme.

Consciente des conséquences éventuelles du risque sismique, la population pourrait être conduite à une bonne prévention contre ce risque.

La protection parasismique des bâtiments constitue une prévention efficace contre les effets des tremblements de terre, car plus de 90% des pertes en vies humaines sont dues à l'effondrement des ouvrages [1]. C'est pourquoi les ingénieurs et les architectes ont donné les principes d'une bonne conception parasismique à l'aide de différents exemples tirés des leçons des séismes passés.

I-2. L'origine des séismes

La tectonique des plaques, dont le principe est connu depuis la seconde moitié du Xe Siècle, est à l'origine des chaînes de montagne et de phénomènes tels que les séismes et le Volcanisme.

La lithosphère (croûte et manteau supérieur) est morcelée en plusieurs fragments, appelés Plaques, qui constituent la surface terrestre. En raison des mouvements de convection au sein Du manteau, ces plaques sont mobiles les unes par rapport aux autres, avec des vitesses de Quelques centimètres par an.

Les mouvements des plaques peuvent être divergents (extension), convergents (compression) ou en coulissage (cisaillement). Environ 90% des séismes sont localisés au Voisinage des limites de ces plaques.

I-3. Les ondes sismiques

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques. L'onde peut traverser un milieu sans Modifier durablement ce milieu. L'impulsion de départ va "pousser" des particules Elémentaires, qui vont "pousser" d'autres particules et reprendre leur place et ainsi de suite.

Les différents types d'ondes sismiques :

Il existe deux types principaux d'ondes sismiques : de surface ou de volume. Celles de surface se propagent, comme leur nom l'indique, à la surface de la Terre, un peu comme les rides formées à la surface d'une pièce d'eau qui vient d'être frappée par un caillou.

Pour leur part, les ondes de volume se propagent à l'intérieur même de notre planète, à une vitesse qui est intimement liée à la nature du milieu traversé. Deux types d'ondes se distinguent :

- ✓ **Les ondes P** (pour primaires) sont dites de compression ou longitudinales, car le substrat se contracte puis se dilate à leur passage dans le sens de leur déplacement. Elles correspondent aux premiers signaux enregistrés par les sismographes, car ce sont les ondes les plus rapides.
- ✓ **Les ondes S** (pour secondaires) sont dites de cisaillement ou transversales, car le substrat se déplace perpendiculairement à la direction de l'onde lorsque celle-ci le traverse. Par ailleurs, elles ne se propagent pas dans les milieux liquides, ce qui signifie qu'elles disparaissent en pénétrant dans le noyau terrestre externe. Le qualificatif « secondaire » vient du fait qu'elles apparaissent après les ondes P sur les sismogrammes.

I-4. Le Micro zonage

La micro zonation sismique identifie les zones présentant une homogénéité de cause et Effets, qui sont caractérisées par certains paramètres : la fréquence des séismes et la distribution De leurs intensités et définit sur chacune de ces régions le comportement du site sous séisme Et l'aléa correspondant.

Les cartes de micro zonage estiment donc la réaction d'un site sous l'effet d'un évènement Catastrophique tel que le séisme.

L'Urbaniste et l'Architecte doit impérativement connaître le micro zonage du site à Urbanisé et ce avant la conception du projet - Cela permettra une meilleure maîtrise de l'espace A construire et une réduction de la vulnérabilité sur la structure urbaine.

Le zonage pour l'occupation du sol est la première étape à aborder. Il implique la Délimitation des secteurs de micro zonage sismique.

Exemple : Le territoire national Algérien (CGS, 2004) est subdivisé en 5 zones de sismicité Croissante soit [12] :

1. **Zone 0** : sismicité négligeable ;
2. **Zone I** : sismicité faible ;
3. **Zone IIa et IIb** : sismicité moyenne ;
4. **Zone III** : sismicité élevée.

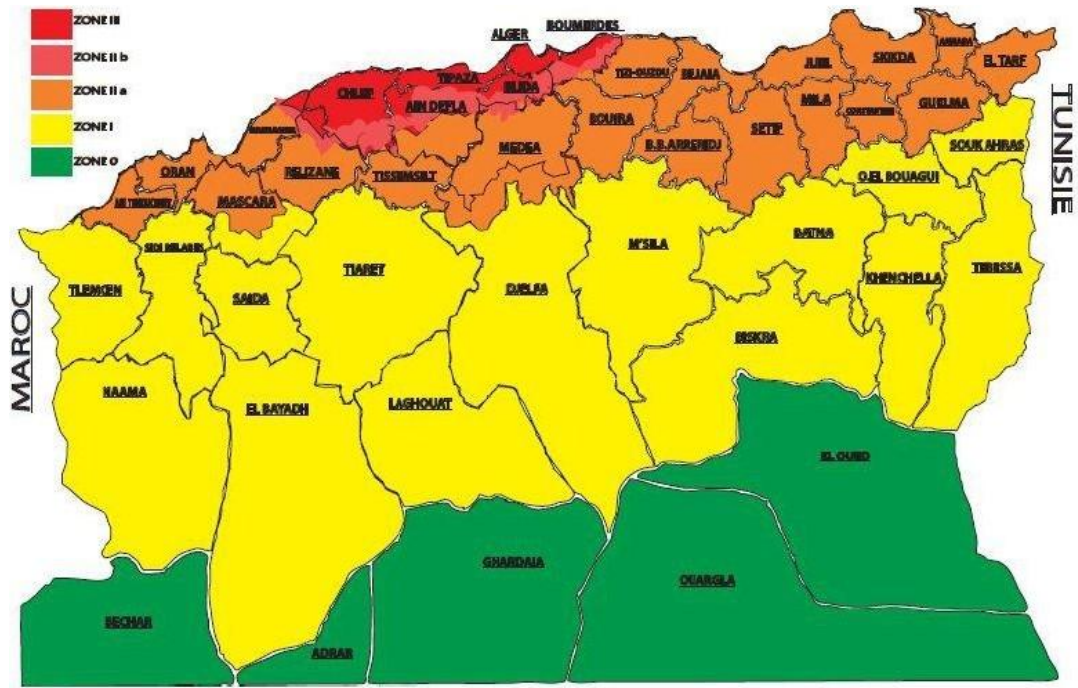


Fig.3.1. carte de zonage sismique de l'Algérie

Figure. I.1 : La carte de micro zonage Algérien.

Chapitre II

Principes et Techniques de L'isolation Sismique à la Base

II-1. Les appuis parasismiques

Les appuis parasismiques ou les isolateurs parasismiques sont des dispositifs permettant une isolation partielle entre la fondation et la superstructure, ils ne laissent passer que des Efforts déterminés par leurs propres caractéristiques. Ils doivent permettre des déplacements Horizontaux importants grâce à leur faible rigidité horizontale devant celle de la structure, par Ailleurs ils présentent une grande rigidité verticale avec une capacité de supporter les charges Gravitaires de la structure pendant et hors séisme.

La structure qui repose sur des appuis parasismiques s'appelle une structure isolée.

II-2. Principe de base et fondements théoriques

L'isolation à la base est un système de contrôle passif, consiste à mettre entre la fondation et la superstructure (figure II. 1), des dispositifs qui ont une déformabilité horizontale très importante (pour pouvoir dissiper la déformation transmise au bâtiment) et une rigidité verticale très élevée (pour supporter le poids du bâtiment).



Figure II. 1 : La position des appuis parasismiques dans un bâtiment.

La majeure partie de l'énergie d'un séisme est regroupée dans une bande de fréquence de 2 à 10 Hz, donc elle risque de subir une excitation conséquente si la fréquence fondamentale d'une structure encadrée au sol se situe dans cet intervalle. A cet égard, l'utilisation de systèmes d'isolation pour les structures conventionnelles sont plus sûres et plus performantes par ce que l'ajout de ces isolateurs, aura comme effet de réduire la fréquence fondamentale de la structure jusqu'à des valeurs typiquement situées en dessous de 0,5 Hz, et ainsi les efforts qu'exercent les séismes sur la structure isolée sont normalement de l'ordre de 3 à 10 fois plus petites que les efforts pouvant s'appliquer à la structure à base fixe [16][17].

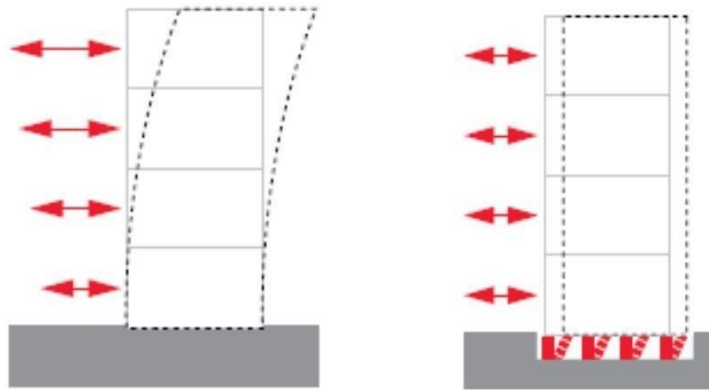


Figure II. 2 : Deux types de structure : une conventionnelle encastree dans le sol, et une autre protegee contre les seismes par un systeme d'isolation a la base.

Les isoleurs sismiques fournissent une flexibilite suffisante dans la direction horizontale (parallele au sol) de l'isoleur passif, d'ou la reduction de la frequence fondamentale de vibration, afin que la periode naturelle de la structure differe le plus possible de la periode naturelle du tremblement de terre, et par consequent, atteindre une diminution des accelerations au niveau de la base des batiments. En revanche, l'augmentation de la periode engendre des deplacements plus importants se concentrent au niveau de l'isoleur. Dans ce cas, l'integration des unites d'isolation ou de l'usage d'un dispositif parallele et externe du dispositif de dissipation d'energie (amortisseurs) est requise pour controler les mouvements et realiser une conciliation efficace entre la reduction de la force et l'accroissement du deplacement [16][18][19].

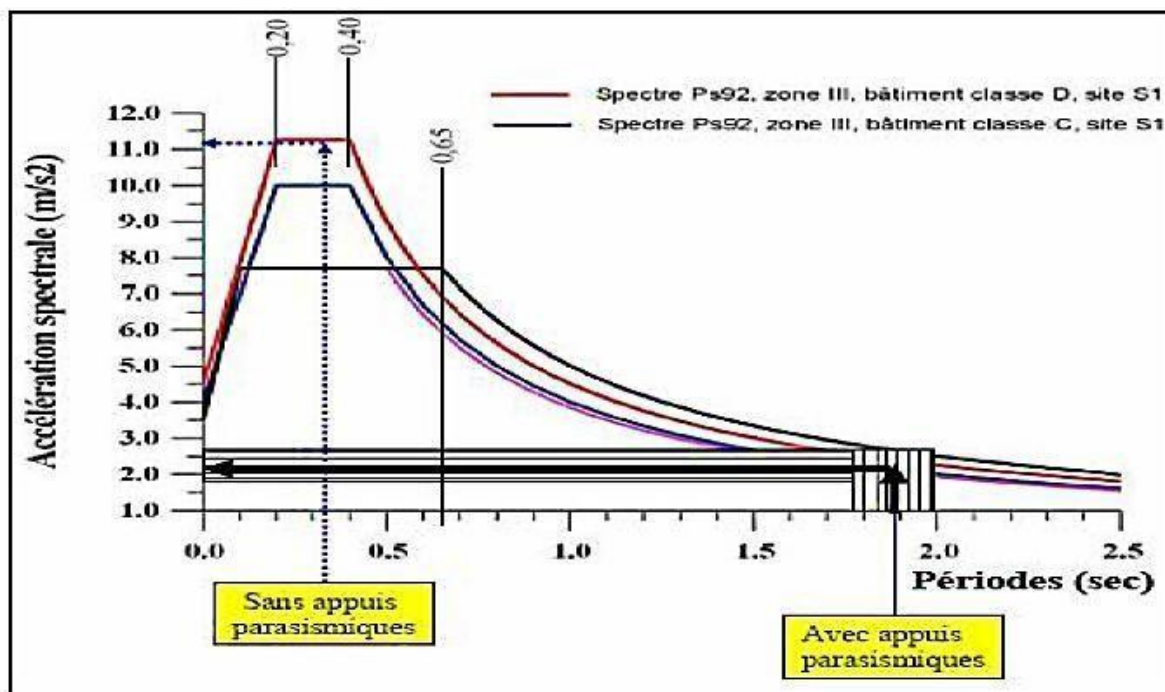


Fig. II. 3 : L'effet des appuis parasismiques

Les systèmes des isolations sismiques sont situés généralement à la base et doivent permettre un déplacement horizontal de 15cm ou plus [19].

Remarque

Si le système est une combinaison d'un appui parasismique et d'amortisseurs, donc les appuis réduisent les efforts mais augmentent les déplacements par contre les amortisseurs réduisent les déplacements en dissipant l'énergie. Cette combinaison permet de protéger la structure [20]. Elle est utilisée pour la grande mosquée d'Alger.

La figure II.4 ci-après présente schématiquement l'effet de cette combinaison

« L'appui et l'amortisseurs » sur un bâtiment lors d'un séisme.

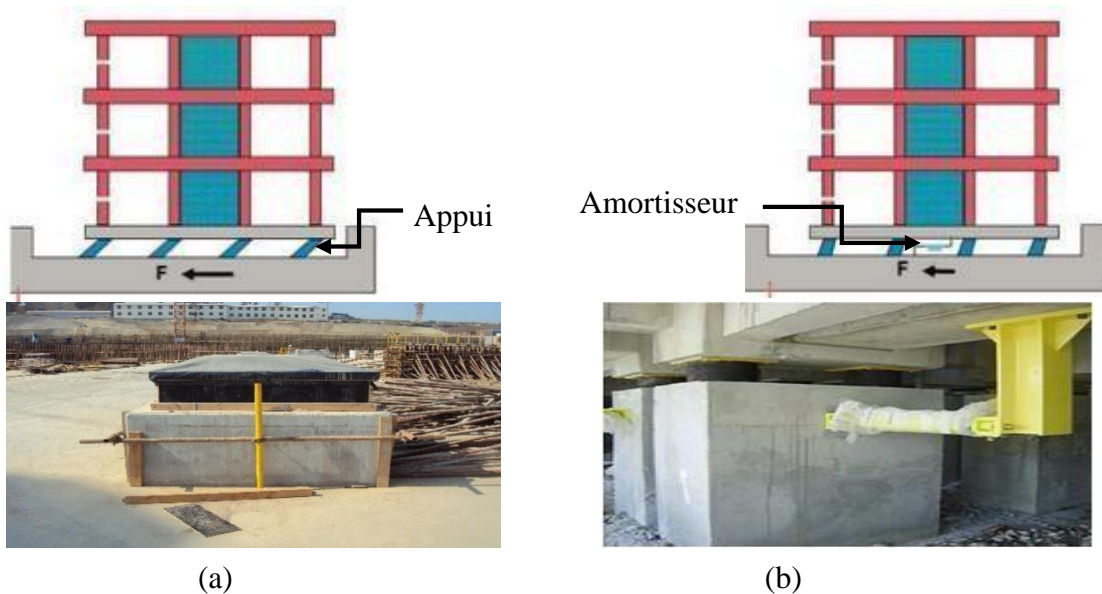


Figure II. 4 : Comparaison entre deux structures isolées.

(a) Structure isolée par un appui. (b) Structure isolée par un appui et un amortisseur.

II-3. Les différents systèmes d'isolation parasismique

Un système d'isolation à la base combine deux mécanismes principaux :

- Les appuis parasismiques ;
- Un mécanisme de dissipation d'énergie (amortisseur) ;

II-3.1 Les appuis parasismiques

Les appuis parasismiques ont un grand intérêt pour la plupart des pays concernés par le risque sismique. L'appareil d'appui est l'élément clé qui permet la liberté de mouvement entre une structure et son assise, tout en assurant la transmission des efforts verticaux et les rotations.

Il en existe plusieurs types, certaines ont déjà été utilisés, d'autres sont restés au stade d'étude théorique ou d'essais. Parmi ces catégories et selon leur mode de fonctionnement, on distingue :

- Appuis à déformation ou élastomère ;
- Appuis à pot ;
- Appuis à glissement ;
- Appuis à déformation et glissement ;
- Appuis à roulement ;

II-3.1.1 Appuis à déformation

Les appuis à déformation utilisés depuis plus de 40 ans, ont toujours montré un comportement satisfaisant, ces appuis sont réalisés en élastomère fretté (couches alternées d'élastomère ; caoutchouc naturel ou élastomère synthétique (néoprène) et de plaques métalliques (frettes)) analogues aux appuis couramment utilisés pour les ponts (appareils d'appuis), que s'est généralisé l'emploi de plaques d'élastomère fretté en tant qu'appuis d'ouvrages d'art [21].

Le caoutchouc est un matériau qui peut être obtenu soit naturellement et c'est alors un polymère de l'isoprène, soit de façon synthétique qui lui est produit industriellement à partir de dérivés du pétrole [22].

Tableau II. 1 : Caractéristiques de caoutchouc.

| Caoutchouc naturel | Le caoutchouc synthétique |
|--|--|
| 1) Une bonne résistance à la traction 2) Un excellent allongement à rupture 3) Une tendance à la cristallisation 4) Un bon comportement aux sollicitations dynamiques | 1) Une excellente résistance au vieillissement contrairement à Caoutchouc naturel 2) Un très faible taux de fluage sous charge 3) Une bonne résistance au déchirement |

Entre la structure et les fondations, on intercale des couches de l'acier pour la rigidité verticale et des couches de frette pour résister au poids de la structure en évitant une déformation verticale (figure II. 5). Le fait d'ajouter des couches d'élastomère au dispositif permet une flexibilité horizontale ainsi un déplacement de la superstructure en bloc dans le sens contraire au déplacement du sol. De ce fait, il réduit considérablement le déplacement relatif des étages. Plus, les élastomères sont élastiques/flexibles, moins les charges sismiques ressenties par le bâtiment sont importantes. Cependant une trop grande flexibilité des appuis diminue considérablement la stabilité de l'ouvrage en temps normal. Ces appuis sont donc appelés à juste titre « à déformation » car ils se déforment pour diminuer les effets des secousses sur le bâtiment [23][24][25].

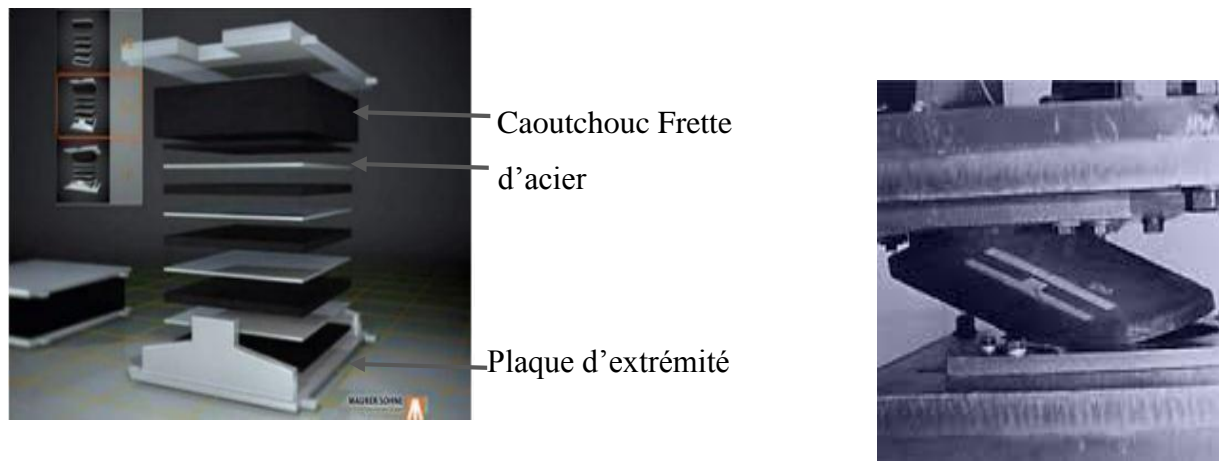


Figure II. 5 : Appuis à déformation.

Il existe plusieurs types d'appareils d'appuis en élastomères qui sont utilisés en réalité, tels que l'appui en élastomère à fort taux d'amortissement **HDRB (High Damping Rubber Bearing)**, appui en élastomère à faible taux d'amortissement **LDRB (Low Damping Rubber Bearings)** et l'appui en élastomère avec noyau de plomb **LRB**.

II-3.1.2 Appuis en élastomère à fort taux d'amortissement HDRB

Les appuis **HDRB** (figure II. 6) ont été principalement développés aux USA, au Japon et en Italie. Ils sont composés de couches alternées de matériau élastomère qui est obtenu après une étape de vulcanisation du latex et de plaques d'acier. Ils fournissent un haut coefficient d'amortissement (supérieur à 10%) ainsi qu'une grande capacité de déplacement et un module de cisaillement réduit. Ces caractéristiques sont obtenues par l'ajout d'additifs de type résine ou huile au matériau élastomère.

Les plaques de renforcement en acier sont complètement incorporées et scellées dans le

Chapitre II principes et techniques de l'isolation sismique à la base

matériau élastomère et ainsi protégées contre la corrosion. Le caoutchouc est fixé par vulcanisation aux plaques de connexion supérieure et inférieure. Les appuis peuvent également être fournis avec des plaques d'ancrage, permettant ainsi un remplacement plus facile de l'appareil si des travaux de maintenance sont nécessaires [19] [26] [28].



Figure II. 6 : Appuis en élastomère à fort taux d'amortissement

II-3.1.3 Appuis en élastomère avec noyau de plomb

Les appuis LRB (figure II. 7) sont des systèmes à base d'élastomère combinés avec un système d'hystérésis. Cet appui est similaire à l'appui précédent, sauf qu'en plus, il est doté en son centre d'un noyau de plomb généralement cylindrique ainsi les valeurs d'amortissement associées à de tels systèmes sont plus élevées que celles des appuis HDRB (jusqu'à 30%). Ce noyau de plomb travaillera en flexion car il n'est pas flexible comme les élastomères. Le noyau de plomb a pour objectif d'avoir une rigidité initiale lorsqu'il n'y a pas de séisme pour éviter que la structure ne bouge pas sous l'effet du vent ou des vibrations causés par le passage des gens ou bien des voitures par exemple et il joue aussi le rôle d'amortisseur grâce au phénomène d'hystérésis car il travaille en flexion sur le plan horizontal. Cependant, le noyau de plomb a un petit défaut, il transmet les accélérations de haute fréquence, donc réduit l'efficacité de l'isolation [27] [18] [28].

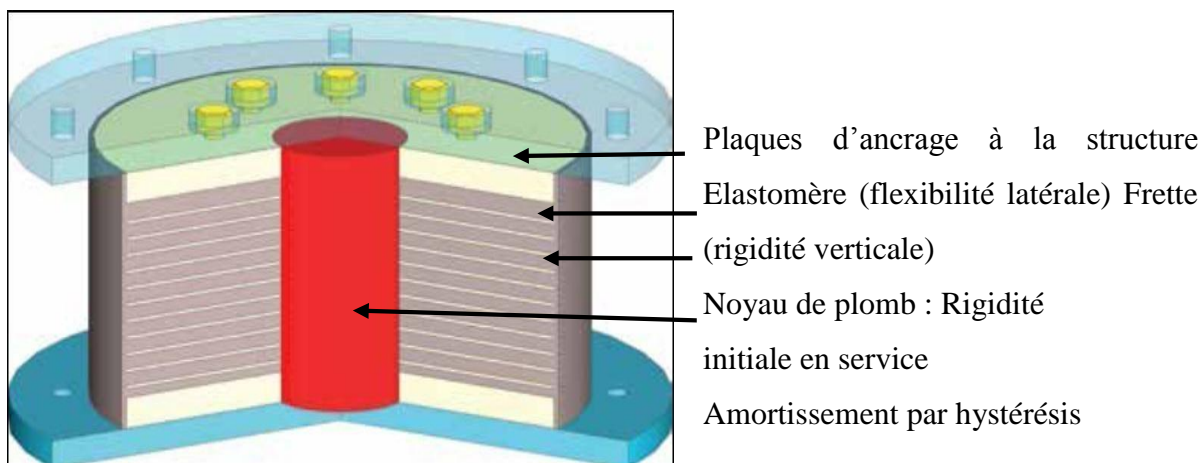


Figure II. 7 : Appuis en élastomère avec noyau de plomb [28].

- **La norme française NF EN 1337-3**

Cette norme définit six types d'appareils d'appuis [29] :

- ✓ Type A : appareil d'appui à une seule frette enrobée.
- ✓ Type B : appareil d'appui comportant au moins deux frettes et entièrement enrobé.
- ✓ Type C : appareil d'appui comportant des plaques métalliques extérieures.
- ✓ Type D : appareil d'appui glissant comportant en surface une feuille de PTFE.
- ✓ Type E : appareil d'appui glissant comportant en surface une plaque métallique en contact avec la feuille de PTFE.
- ✓ Type F : Appareil d'appui non fretté et en bande.

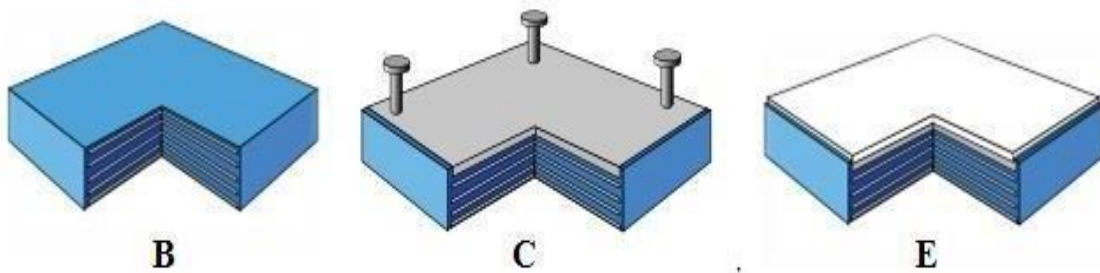


Figure II. 8 : Exemples de types d'appareils d'appuis.

II-3.1.4 Appuis à pot

Les appuis à pot sont fabriqués avec un disque en élastomère au centre d'un assemblage de pièces d'acier. Ils reprennent les efforts verticaux et les efforts horizontaux correspondants, ainsi que les mouvements longitudinaux et transversaux.

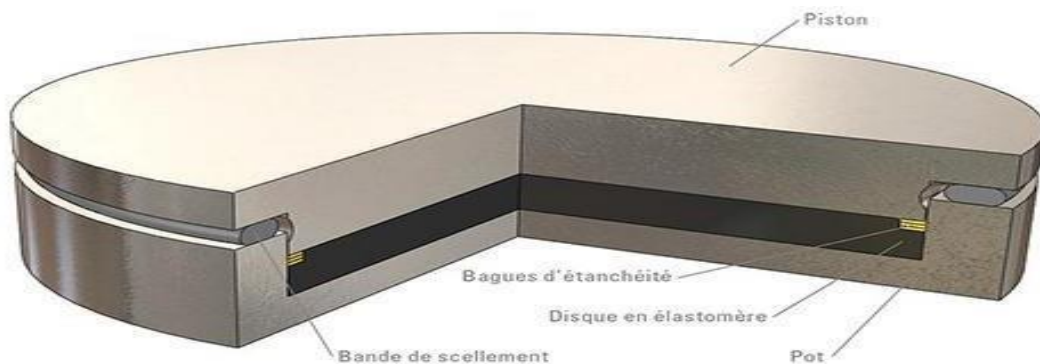


Figure II. 9 : Appui à pot.

Les types de l'appui à pot [30]

Dans la littérature, on trouve les types d'appui à pot suivants :

- ✓ Appuis fixes PF ;
- ✓ Appuis multidirectionnels PM ;
- ✓ Appuis multidirectionnels à guidage latéral PMG ;
- ✓ Appuis multidirectionnels à guidage central PCMG ;
- ✓ Appuis avec dispositifs anti-soulèvement ;



Figure II. 10 : Des exemples de l'appui à pot.

II-3.2 Appuis à glissement

Les pendules à friction isolent différemment des autres types d'appuis parasismiques. Deux éléments bougent l'un par rapport à l'autre pour permettre le mouvement latéral de la structure et pour dissiper l'énergie. Ils peuvent être utilisés tant avec les structures légères qu'avec les plus massives, car leur période ne dépend que du rayon de courbure. Ils peuvent aussi supporter une charge verticale élevée et offrir un amortissement de plus de 30 %. Toutefois, contrairement aux précédents types d'appuis, ils ne peuvent pas être utilisés avec un autre type d'appareils d'appui sur une même structure.

Les appuis sont conçus pour supporter des forces verticales ainsi diminuer les forces horizontales et prendre en compte les rotations par le biais d'une embase sphérique et d'une partie inférieure d'embase de forme concave. De plus, la forme concave de la partie supérieure assure une protection optimale, car même si les forces sont très importantes il n'y a pas d'effet de butée du plot de glissement contre les plots de retenue, car la vitesse est fortement diminuée [23][31].

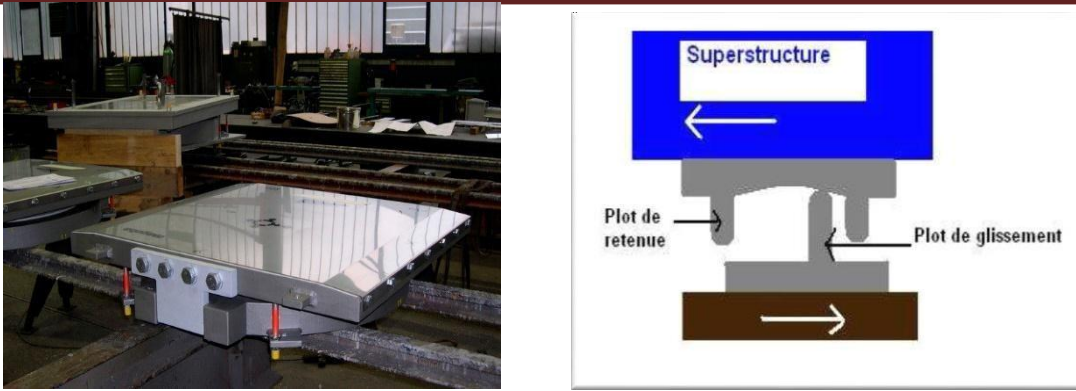


Figure II. 11 : Appuis à glissement.

Dans la famille des appuis à glissement, l'appui en pendule glissant (FPS) (Figure II. 12) est le plus retrouvé. C'est un système qui utilise une interface de glissement sous forme de cuvette (portion d'une sphère) qui confère à la structure un mouvement global similaire à un pendule. Le rayon de courbure et le coefficient de frottement de l'interface sont les caractéristiques clé qui contrôlent la période d'isolation et la quantité d'énergie dissipée du système.

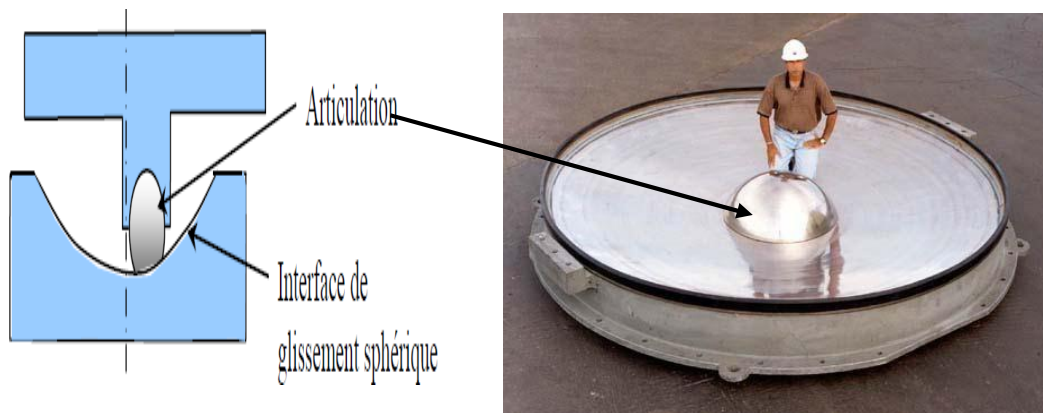


Figure II. 12 : Appuis en pendules glissants FPS.

II-3.3 Appuis à déformation et à glissement

Ce système d'appuis résulte de l'association de plaques de glissement et des appuis à déformation (figure II. 13). 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, 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 type d'appui 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

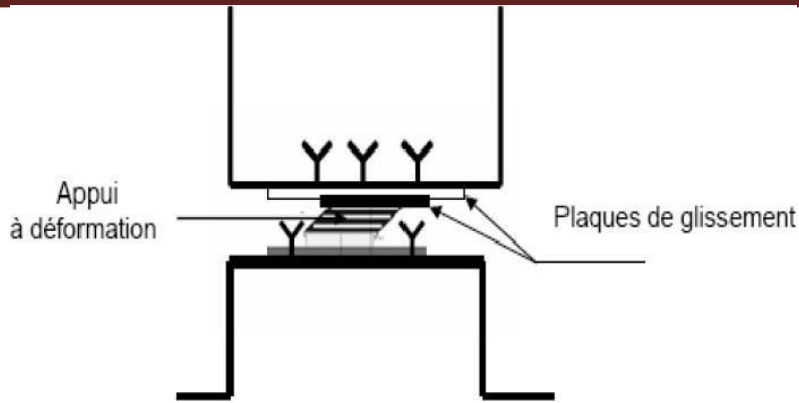


Figure II. 13 : Appuis à déformation et à glissement.

II-3.4 Appuis à roulement

Ce système se compose de deux plaques en acier (plates ou incurvées) superposées et séparées des rouleaux (figure II. 14). Selon la qualité du matériau du rouleau ou du roulement à billes, la résistance du système peut être suffisante pour contrarier aux charges de services.

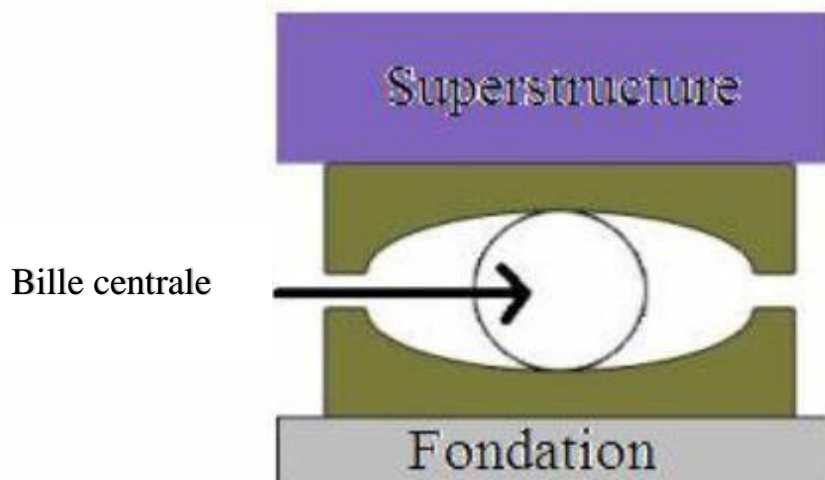


Figure II. 14 : Appuis à roulement.

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 opposées et le radius de courbure des surfaces concaves, est remplacé dans ce système par le radius de la bille adéquat pour atténuer l'effet séismique. La configuration et la situation initiales sous la charge sismique sont illustrées dans la figure II. 15.

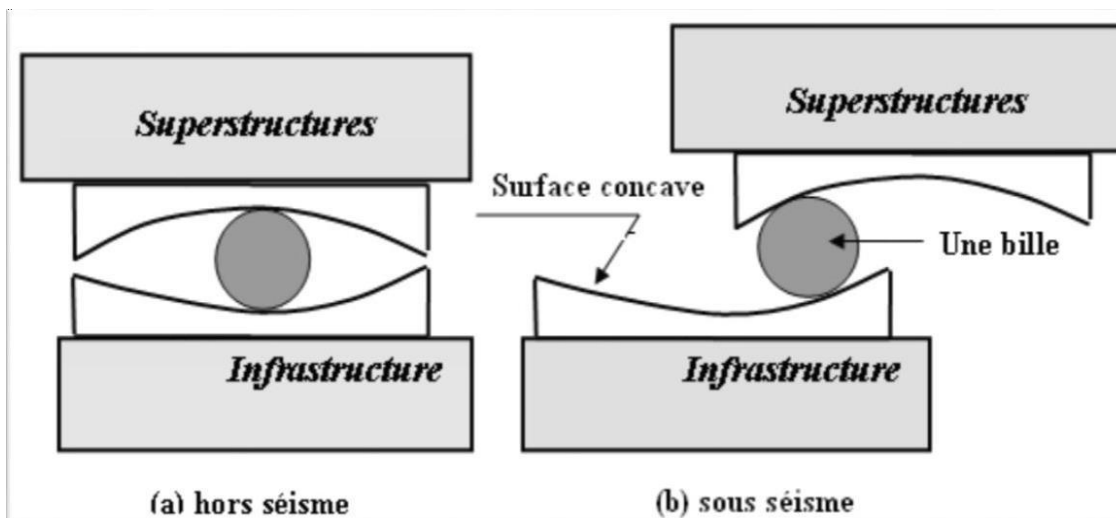


Figure II. 15 : Le principe de fonctionnement d'appuis à bille.

II-4. Amortisseurs parasismiques

Les amortisseurs permettent d'absorber et donc dissiper l'énergie emmagasinée par la structure pendant le tremblement de terre. Ces amortisseurs peuvent être installés dans l'appui antisismique ou bien installés en parallèle. Ils ont pour but de limiter la déformation de l'appui ainsi que le déplacement de la structure.

On distingue différents types de dispositifs :

- ✓ Amortisseur hystérésis (élasto-plastique) ;
- ✓ Amortisseur hydraulique ;
- ✓ Amortisseur à friction ;
- ✓ Amortisseur de masse accordée TMD (Tuned Mass Damper) ;

II-4.1 Amortisseur hystérésis (élasto-plastique)

Ils constituent un assemblage de pièces en acier doux ou bien en plomb soit des alliages malléables. Lorsque les fondations et la structure sont en mouvement, ces matériaux se déforment de manière à dissiper l'énergie sismique. Ces amortisseurs ne demandent pas d'entretien et sont faciles à remplacer. Ils se présentent, comme celle de fluide visqueux, sous forme de barreaux en acier, en plomb ou bien grâce à des poutres.

Ce système est associé à un appui parasismique « appui à déformation ou élastomère » (figure II. 16). Il est surtout utilisé comme aide à l'isolation pour absorber une partie du déplacement vertical et diminuer celui-ci en exerçant une résistance aux déplacements horizontaux et non verticaux. Il ne demande pas d'entretien, et leur utilisation est facile [23][25].

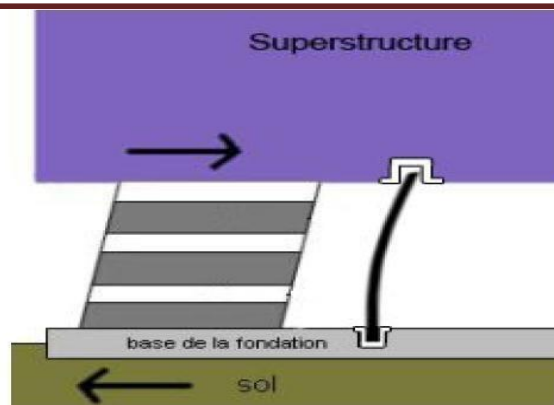


Figure II. 16 : Amortisseur hystérésis (élasto-plastique).

II-4.2 Amortisseur hydraulique

Ces systèmes sont constitués de tube cylindrique dans lequel une pièce mobile sépare le volume du cylindre en deux chambres isolées l'une de l'autre (figure II. 17). La tige est plongée dans un fluide très dense comme l'huile hydraulique, le bitume ou la pâte silicone, pour permettre le déplacement de longue durée et pour absorber une grande quantité d'énergie provoquée par le mouvement sismique. Ils permettent à la superstructure de reprendre sa position initiale après un séisme sans dommages. L'inconvénient de ces amortisseurs est l'influence de la température du fluide sur la sa densité [23] [32].

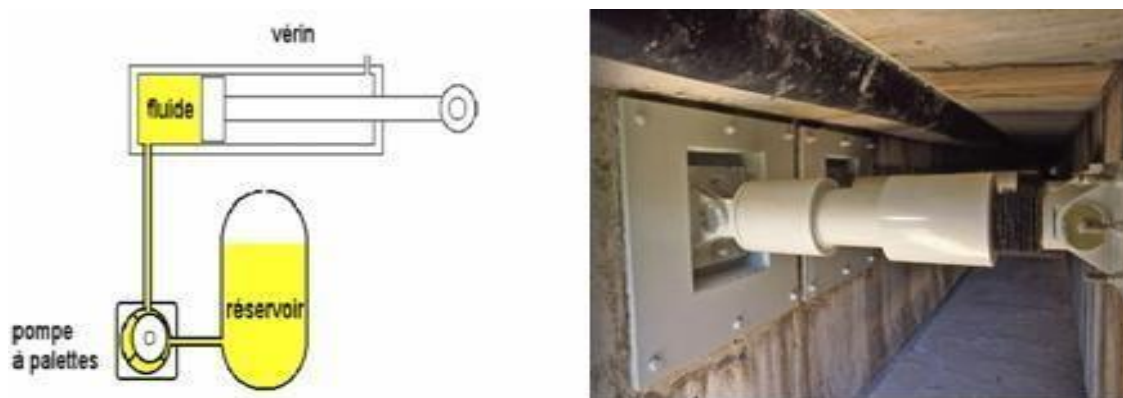


Figure II. 17 : Amortisseur hydraulique.

II-4.3 Amortisseur à friction

Le principe des amortisseurs de types frottement sec est de dissiper le maximum de l'énergie exercée lors du chargement dynamique et de l'emmagasiner sous forme d'énergie thermique par friction. Ils sont placés à des endroits stratégiques de la superstructure (figure II. 18) pour assurer une meilleure résistance aux séismes [23].



Figure II. 18 : Amortisseur à friction.

II-4.4 Amortisseur de masse accordée (TMD)

Ces systèmes sont les plus couramment utilisés dans différents champs d'application en génie civil tel que les bâtiments, les ouvrages d'art et surtout les buildings de grande hauteur. Ces dispositifs sont retrouvés notamment les grandes tours du monde tel que la Taipei 101 (figure II. 1), Burdj Khalifa. Ce dispositif est un concept assez simple mais très efficace et peu coûteux, il s'agit d'un pendule. En effet une grosse masse est reliée à la structure par des ressorts ou bien des câbles. Quand un séisme frappe la base de la tour elle se met à osciller c'est ainsi que le pendule qui est un dispositif oscillatoire va absorber cette énergie en oscillant dans le mouvement inverse de la tour [33][34].

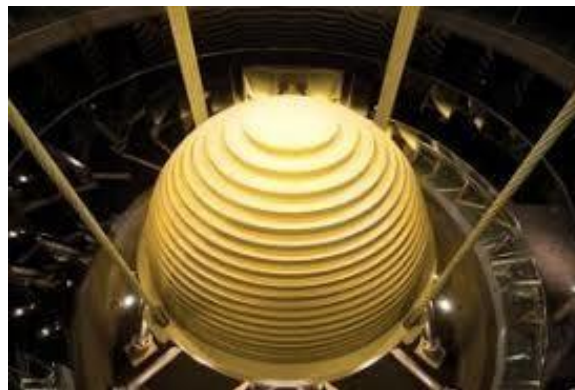


Figure II. 1 : Un TMD pendulaire de 800 tonnes dans un bâtiment de 508m de hauteur (tour de Taipei 101) Taiwan.

II-5. Choix entre les types d'appuis parasismiques

L'isolation à la base exige un choix de type d'appui parasismique selon les normes, leurs propriétés, et le coût. Par ailleurs il faut prendre en compte leur efficacité et leurs réparations à long terme. Étant donné que le caoutchouc est un matériau qui se dilate et se rétrécit, donc il est nécessaire d'accomplir des vérifications périodiques dans le but d'assurer sa flexibilité au cours du temps. Par contre, les appuis à roulement et à glissement n'exigent aucun entretien.

En outre, l'état du sol est une autre raison qui influe sur le choix des appuis comme les appuis à

Chapitre II principes et techniques de l'isolation sismique à la base

déformation qui se détériorent dans les sols mous donc ils perdent leur productivité à long terme. Ainsi les appuis à glissement s'accordent mieux à cause des faibles coefficients de frottement des plaques donc la réponse de la superstructure est indépendante du contenu fréquentiel du mouvement sismique.

Les appuis à roulement sont très peu utilisés en raison de leurs inconvénients, dont les principaux sont le grippage éventuel du système en l'absence durable de mouvement, et leur faible capacité d'amortissement.

II-6. Les avantages de l'isolation parasismique

- Le degré de protection pouvant être acquérir est très éminent au niveau requis par les règles parasismiques pour les ouvrages à risque normal. Les ouvrages restent habituellement exploitables, même après les séismes terribles ;
- Les dégâts sont faibles ou presque nuls à l'équipement et aux éléments non structuraux ;
- En principe après un séisme les appuis restent immaculés et sont opérationnels face aux nouvelles secousses ;
- La diminution des charges sismiques permet de calculer la structure en hypothèse de comportement élastique. Ce calcul est bien maîtrisé et plus fiable que celui des constructions habituellement susceptibles de subir des déformations plastiques, qui font concept d'hypothèses approximatives ;
- Les inconvénients associés à une forme dissymétrique ou complexe des structures sont restreints, car leur comportement sur appuis dépend principalement de la répartition de la rigidité de ces derniers et non plus de celle du bâtiment ;

II-7. Les inconvénients de l'isolation parasismique

- Les bâtiments construits sur des appuis parasismique (escaliers, tuyauterie,) ou reliant la structure avec ses abords immédiats (réseaux, marches extérieures,) doivent être élaborés de façon à admettre sans préjudices les déplacements relatifs de la superstructure et des fondations. Ces proportions sont impérieuses dans le cas des réseaux de gaz, de défense contre l'incendie et des réseaux réceptif des fluides polluants ;
- La largeur des joints de séparation entre deux bâtiments doit être considérable car les déplacements des blocs pouvant atteindre des valeurs décimétriques ;
- Les changements à venir de la structure, des cloisons, des façades et d'autres éléments lourds ou rigides ne doivent pas rectifier d'une façon expressive le comportement dynamique originnaire du bâtiment pris en compte pour le dimensionnement des appuis, sous peine de provoquer des montants

II-8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le concept général des isolateurs à la base et ses différents sous-systèmes (appuis parasismiques et amortissements) en dotant leurs importantes caractéristiques, leurs comportements, leurs avantages et inconvénients ainsi que leurs effets sous l'action sismique. Dans le chapitre qui suit, on va présenter la méthodologie de dimensionnement de ces appuis selon le code américain (UBC97) en notant aussi la procédure d'analyse dynamique des structures à base isolée.

Chapitre III

Fonctionnement et dimensionnement des appuis parasismiques

III.1 Introduction

Le principe de l’isolation parasismique est de fournir une discontinuité entre la fondation et la superstructure, de sorte que l’énergie sismique ne peut pas être entièrement transmise à la superstructure, ce résultat donne une réduction significative de l’accélération des niveaux supérieurs et du déplacement inter-étage, par conséquent, assurer la protection du matériel et des composants onéreux du bâtiment.

Ce chapitre est divisé en deux parties ; la première partie concerne le fonctionnement et les équations mathématiques et analytiques des appuis parasismiques, tandis que la deuxième partie est dédiée aux méthodes d’analyse et dimensionnement de ces appuis selon le code américain UBC97.

III.2 Le fonctionnement des appuis parasismiques

Dans cette partie, on va convertir le principe de fonctionnement des appareils d’appui en un modèle mathématique afin d’écrire les équations de mouvement. Ceci en vue d’analyser le comportement du système (l’isolation + superstructure).

III.2.1 Appuis à déformation

III.2.1.1 Appuis en élastomère à faible taux d’amortissement LDRB

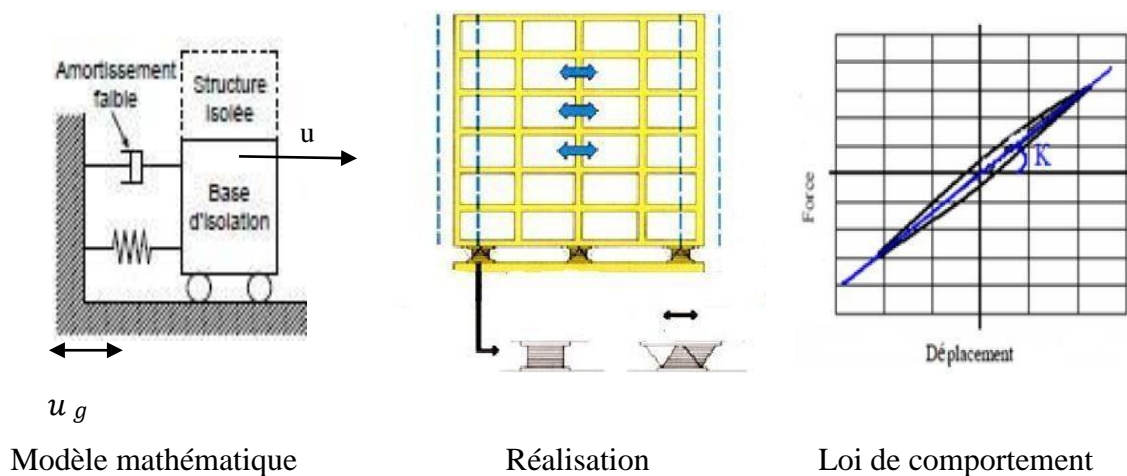


Figure III. 1 : Principe et fonctionnement de LDRB.

L'équation du mouvement est :

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g)c\dot{u} + ku = 0 \tag{III.1}$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad \rightarrow \quad \ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g \tag{III.2}$$

Où :

m : La masse de la superstructure.

ξ : coefficient d'amortissement ω : pulsation propre.

\ddot{u}_g : L'accélération du sol.

III.2.1.2 Appuis en élastomère à fort amortissement en barreau de plomb LRB

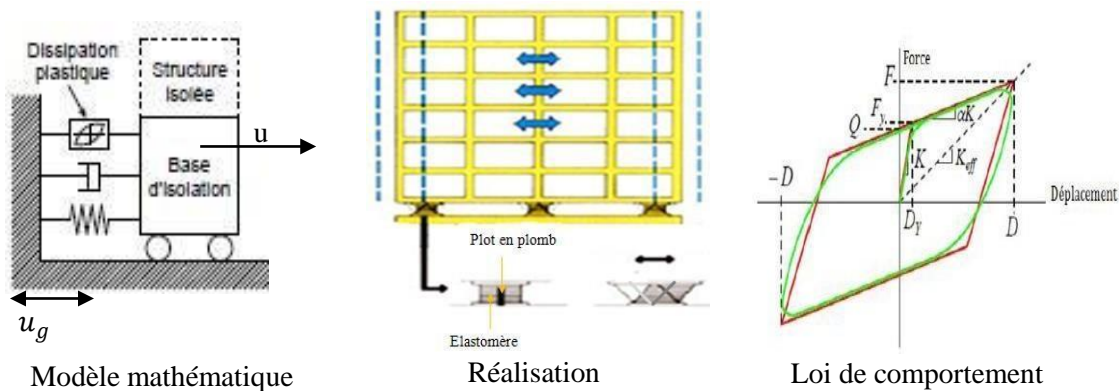


Figure III. 2 : Principe et fonctionnement de LRB.

L'équation du mouvement :

$$m\ddot{u} + c_{eq}\dot{u} + k_{eff}u = -m\ddot{u}_g \tag{III.3}$$

k_{eff} : La rigidité effective du système d'isolation donnée par la formule suivante :

$$K_{eff} = \frac{F^+ - F^-}{D^+ - D^-} \tag{III.4}$$

c_{eq} : Le coefficient d'amortissement équivalent, défini par :

$$c_{eq} = 2\xi_{eq}\sqrt{mk_{eff}} \tag{III.5}$$

$$2\xi_{eq} = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{\Delta E}{k_{eff}(|D^+| + |D^-|)^2} \right) \right] \tag{III.6}$$

Où :

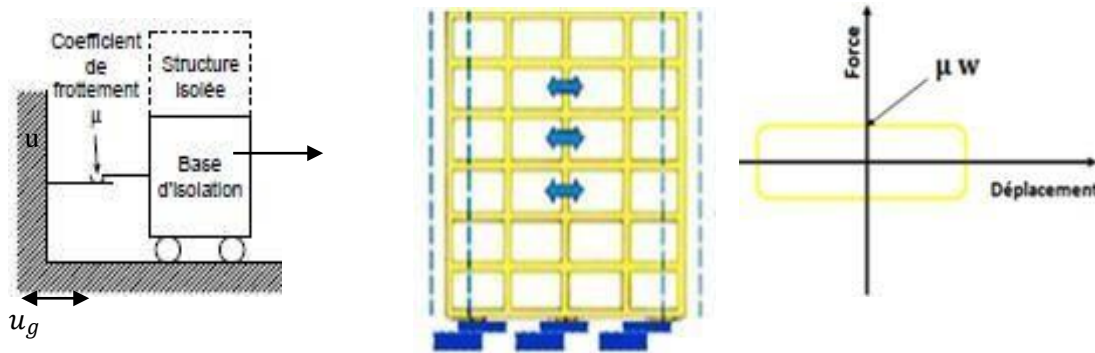
ΔE : L'énergie totale dissipée.

D : Le déplacement de conception.

III.2.2 Appuis à glissement

Les appuis à glissement qu'on va présenter dans cette section, sont les FP et les FPS.

III.2.2.1 Appuis à frottement pur FP



Modèle Réalisation Loi de comportement mathématique

Figure III. 3 : Principe et fonctionnement du FP.

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

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + F_f = 0 \tag{III.7}$$

La force de frottement dans les plaques est donnée par la formule suivante :

$$F_f = \mu mg \operatorname{sgn}(\dot{u}) \tag{III.8}$$

L'équation de mouvement du système devient :

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + \mu mg \operatorname{sgn}(\dot{u}) = 0 \tag{III.9}$$

$$\ddot{u} + \mu g \operatorname{sgn}(\dot{u}) = -\ddot{u}_g \tag{III.10}$$

Où :

μ : Le coefficient de frottement.

g : L'accélération de la pesanteur.

sgn (đ): Le signe de la direction de la vitesse tel que :

$$Si \dot{u} > 0 \Rightarrow \operatorname{sgn}(\dot{u}) = +1$$

$$Si \dot{u} < 0 \quad \operatorname{sgn}(\dot{u}) = -1$$

$$Si \dot{u} = 0 \quad \operatorname{sgn}(\dot{u}) = 0$$

$\mu g - \ddot{u}_g \geq 0$: Cette relation exprime la condition d'attachement, si cette condition n'est pas vérifiée, il y aura glissement.

III.2.2.1 Appuis à en pendules glissants FPS

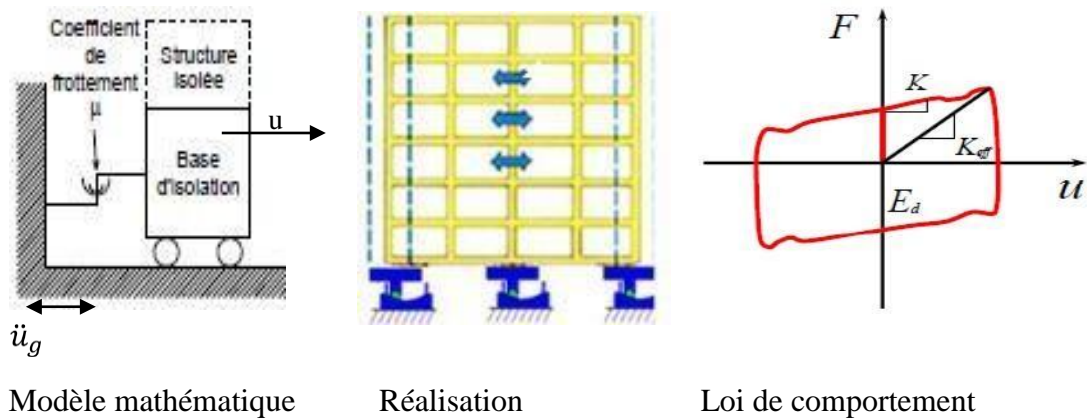


Figure III. 4 : Principe et fonctionnement de FPS.

La force latérale développée dans ce système est :

$$F = \frac{W}{R} u + \mu W \text{sgn}(\dot{u}) \tag{III.11}$$

Où :

R : Rayon de courbure de la surface sphérique.

W : Poids de la structure.

L'équation du mouvement est :

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + F = 0 \tag{III.12}$$

$$m\ddot{u} + m\ddot{u}_g + \frac{W}{R} u + \mu W \text{sgn}(\dot{u}) = 0 \tag{III.13}$$

Remarque :

Le rapport de rigidité est donné par le poids et le rayon de courbure ; donc on aura l'équation suivante :

$$m\ddot{u} + \omega^2 u + \mu W \text{sgn}(\dot{u}) = -m\ddot{u}_g \tag{III.14}$$

Où :

$$\omega^2 = \frac{g}{R}$$

III.2.3 Modèle de calcul de structure isolée

Pour comprendre le comportement des structures isolées qui sont considérées comme des systèmes de plusieurs degrés de liberté, il est utile de faire une analyse par un modèle simplifié à 2 DDL présenté sur la figure III.5.

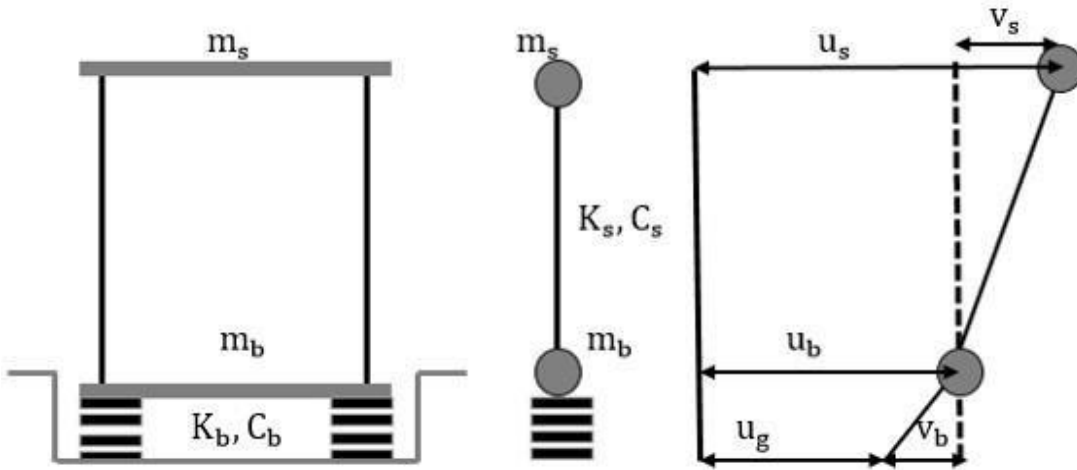


Figure III. 5 : Modèle de structure isolée.

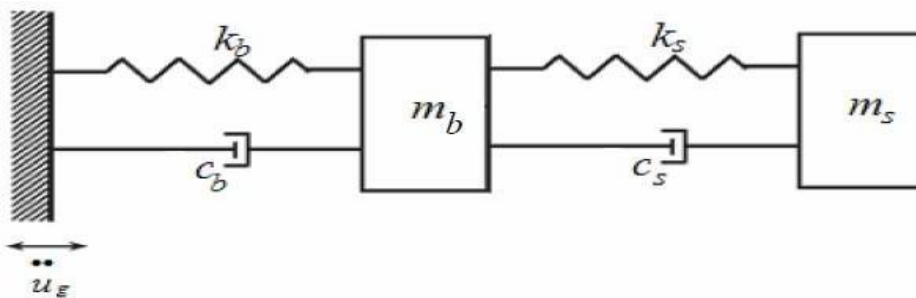


Figure III. 6 : Modèle mathématique.

Avec u_b , u_s sont les déplacements absolus de m_b et m_s respectivement. v_b , v_s sont les déplacements relatifs de m_b et m_s respectivement.

\ddot{u}_g est l'accélération du sol.

Où :

$$\begin{cases} v_s = u_s - u_b \\ v_b = u_b - u_g \end{cases}$$

Les équations du mouvement :

Les équations du mouvement du modèle structural, une fois excitée par un séisme en termes de déplacements absolus sont :

$$m_s \ddot{u}_s + C_s(u_s - u_b) + K_s(u_s - u_b) = 0 \tag{III.15}$$

$$m_s \ddot{u}_s + m_b \ddot{u}_b + C_b(u_b - u_g) + K_b(u_b - u_g) = 0 \tag{III.16}$$

D'où en termes de déplacements relatifs, les équations précédentes deviennent :

$$m_s(\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + C_s(\dot{v}_s + \dot{u}_b - \dot{u}_g) + K_s(v_s + u_b - u_g) = 0 \quad (\text{III.17})$$

$$m_s(\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + m_b(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + C_s(\dot{v}_b + \dot{u}_g - \dot{u}_g) + K_b(v_b + u_g - u_g) = 0$$

$$m_s v_s + m_s v_b + C_s v_s + K_s v_s = -m_s \quad (\text{III.18})$$

$$(m_s + m_b)\ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_b + C_b \dot{v}_b + K_b v_b = -(m_s + m_b)\ddot{u}_g$$

Sous forme matricielle, les équations du mouvement deviennent :

$$[M]\{V\} + [C]\{V\} + [K]\{V\} = [M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (\text{III.19})$$

Où :

$$\begin{bmatrix} m_b + m_s & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b & 0 \\ 0 & C_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_b + m_s & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g$$

Avec

$$M = m_s + m_b$$

$$\text{Donc : } \gamma = \frac{m_s}{M}, \omega_s^2 = \frac{K_s}{m_s}, \omega_b^2 = \frac{K_b}{M}$$

Où :

Les facteurs d'amortissement ξ_b et ξ_s sont donnés par :

$$2\omega_b \xi_b = \frac{C_b}{m + m_b} \text{ et } 2\omega_s \xi_s = \frac{C_s}{m}$$

Les équations de mouvement deviennent :

$$\ddot{v}_b + \gamma \ddot{v}_s + 2\omega_b \xi_b \dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (\text{III.20})$$

$$\ddot{v}_b + \ddot{v}_s + 2\omega_s \xi_s \dot{v}_s + \omega_s^2 v_s = -\ddot{u}_g \quad (\text{III.21})$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \gamma \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\omega_b \xi_b & 0 \\ 0 & 2\omega_s \xi_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_b^2 & 0 \\ 0 & \omega_s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g$$

Les pulsations propres sont déterminées par la relation suivante :

$$\det([k] - \omega_n^2 [M]) = 0 \quad (\text{III.22})$$

$$\det \left(\begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix} - \omega_n^2 \begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \right) = 0 \quad \rightarrow \quad \det \left(\begin{bmatrix} \omega_b^2 & 0 \\ 0 & \omega_s^2 \end{bmatrix} - \omega_n^2 \begin{bmatrix} 1 & \gamma \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right) = 0$$

L'équation caractéristique pour la détermination des pulsations propres ω_n est donnée par :

$$(1 - \gamma)\omega_n^4 - (\omega_s^2 - \omega_b^2)\omega_n^2 + \omega_s^2 \omega_b^2 = 0 \quad (\text{III.23})$$

Les solutions de cette équation sont alors :

$$\omega_n^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ (\omega_s^2 + \omega_b^2) - \left[(\omega_s^2 + \omega_b^2)^2 - 4(1-\gamma)\omega_s^2 \omega_b^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (\text{III.24})$$

$$\omega_n^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ (\omega_s^2 + \omega_b^2) + \left[(\omega_s^2 + \omega_b^2)^2 - 4(1-\gamma)\omega_s^2 \omega_b^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (\text{III.25})$$

Posons $\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2}$ qui varie entre 10^{-1} et 10^{-2} vu que $\omega_b \ll \omega_s$

Les deux équations de ω_1 et ω_2 , en tenant compte de ε , se réduisent à :

$$\omega_1^2 = \omega_b^2(1 - \gamma\varepsilon) \tag{III.26}$$

$$\omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{(1-\gamma)}(1 + \gamma\varepsilon) \tag{III.27}$$

Du fait que ε est de l'ordre de 10^{-2} , il peut être suffisamment précis dans beaucoup de cas de prendre comme approximation pour φ_1 et φ_2 les premiers termes :

$$\omega_1^2 = \omega_b^2 \tag{III.28}$$

$$\omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{(1-\gamma)}(1 + \gamma\varepsilon) \tag{III.29}$$

Les modes propres de vibration de la structure associés aux fréquences approximatives sont déterminés par l'équation suivante :

$$([k] - \omega_n^2[M])\{\varphi^n\} = \{0\} \tag{III.30}$$

$$\left(\begin{bmatrix} \omega_b^2 & 0 \\ 0 & \omega_s^2 \end{bmatrix} - \omega_n^2 \begin{bmatrix} 1 & \gamma \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{Bmatrix} = 0$$

$$(\omega_b^2 - \omega_n^2)\varphi_b^n - \omega_n^2\gamma\varphi_s^n = 0 \tag{III.31}$$

$$-\omega_n^2\varphi_b^n + (\omega_s^2 - \omega_n^2)\varphi_s^n = 0 \tag{III.32}$$

Le premier mode $\varphi_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{Bmatrix}$ correspond à la pulsation ω_2 .

Le deuxième mode $\varphi_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ \frac{1 - (1-\gamma)\varepsilon}{\gamma} \end{Bmatrix}$ correspond à la pulsation ω_1 .

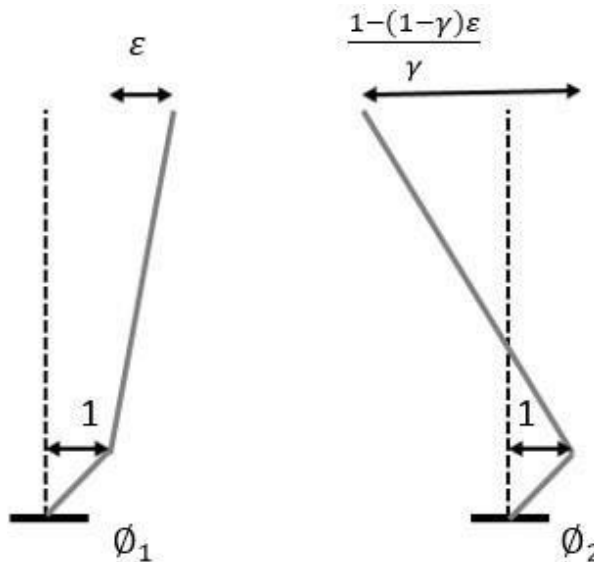


Figure III. 7 : La forme des modes propres de la structure isolée.

Après que les deux modes sont obtenus, les déplacements relatifs v_b, v_s peuvent être écrits comme suit :

$$\begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_b^1 & \phi_b^2 \\ \phi_s^1 & \phi_s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix}$$

q_1, q_2 : Coefficients modaux dépendants du temps, ils sont donnés par :

$$q_1 = \frac{L_1}{\omega_1} \int_0^t \ddot{u}_g(t - \tau) e^{-\tau\omega_1\beta_1} \sin \omega_1 \tau d\tau \quad (III.33)$$

$$q_2 = \frac{L_2}{\omega_2} \int_0^t \ddot{u}_g(t - \tau) e^{-\tau\omega_2\beta_2} \sin \omega_2 \tau d\tau \quad (III.34)$$

L_1, L_2 : Les facteurs de participation du premier et du deuxième mode dans la réponse, ils sont donnés par :

$$\begin{cases} L_1 = 1 - \gamma\varepsilon \\ L_2 = \gamma\varepsilon \end{cases}$$

Du fait que, $\gamma < 1$ et que ε est de l'ordre de 10^{-2} , le facteur de participation dans la réponse pour le deuxième mode qui entraîne la déformation dans la structure est très petit.

Par conséquent, ce résultat montre l'efficacité des systèmes d'isolation, car quand la valeur de la fréquence du deuxième mode est translatée à une valeur plus élevée que celle associée au cas d'une structure à base fixe, le décalage entre ces deux valeurs isole la structure du mouvement fort du séisme.

β_1, β_2 : Les rapports d'amortissements modaux pour la structure et le système d'isolation, ils sont donnés par :

$$\beta_1 = \beta_b \left(1 - \frac{3}{2}\gamma\varepsilon\right) \quad \text{et} \quad \beta_2 = \frac{1}{(1-\gamma)^{\frac{1}{2}}} \left(\beta_s + \gamma\beta_b\varepsilon^{\frac{1}{2}}\right) \quad (III.35)$$

Par la suite, les valeurs maximales de q_1 et q_2 sont données par :

$$|q_1|_{\max} = L_1 S_D(\omega_1, \beta_1) \quad \text{et} \quad |q_2|_{\max} = L_2 S_D(\omega_2, \beta_2) \quad (III.36)$$

Où :

$S_D(\omega, \beta)$: Le déplacement spectral du mouvement du sol.

Ainsi, les déplacements v_s, v_b maximums sont donnés par :

$$|v_s|_{\max} = \varepsilon S_D(\omega_b, \beta_b) \quad (III.37)$$

$$|v_b|_{\max} = S_D(\omega_b, \beta_b) \quad (III.38)$$

En fin les forces sismiques F_s, F_b sont données par :

$$F_s = m_s \left\{ S_A^2(\omega_1, \beta_1) + \varepsilon^2 (1 - \gamma)^2 (1 - 2\varepsilon)^2 S_A^2(\omega_2, \beta_2) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (III.39)$$

$$F_b = m_b \omega_b^2 \left\{ (1 - \gamma\varepsilon)^2 \frac{S_A^2(\omega_1, \beta_1)}{\omega_1^4} + \gamma\varepsilon^2 \frac{S_A^2(\omega_2, \beta_2)}{\omega_2^4} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (III.40)$$

III.3 Les méthodes d'analyse et dimensionnement des isolateurs

Le principe d'isolation à la base a été utilisé dans de nombreux pays. La réalisation des appareils d'appuis parasismiques a connu une activité sur le plan commercial.

III.3.1 Description des codes parasismiques

Les règlements parasismiques se diffèrent d'un pays à un autre selon l'aléa sismique, les méthodes de calcul, le système d'isolation et la superstructure.

En Algérie, la dernière version du règlement parasismique Algérien est le RPA 99 version 2003, qui expose les principes généraux de conception et de calcul pour l'étude des ouvrages vis-à-vis des séismes.

Ainsi, le code ne fournit aucune note sur le calcul des bâtiments à bases isolées.

C'est la raison pour laquelle qu'on doit faire recours à d'autres règlements mondiaux pour régir les calculs sur les structures isolées, on a choisi le code américain UBC-97, le plus utilisé.

Le code UBC97 (the Uniform Building Code) prescrit que le système d'isolation doit être stable pour le déplacement requis, et avoir des propriétés qui ne se dégradent pas sous le chargement cyclique répété. Le concept du code est de contrôler les dommages causés à la structure et de son contenu en prenant comme avantage le fait que l'isolation sismique permet une réponse élastique dans la structure.

III.3.2 Les niveaux d'intensité du mouvement sismique

L'UBC-97 adopte une approche à deux niveaux du mouvement sismique, qui sont :

III.3.2.1 Le tremblement de terre de conception DBE

Le tremblement de terre de conception DBE (Design Basis Earthquake) terme utilisé principalement pour les bâtiments et pour concevoir le système d'isolation. Ce niveau du séisme a une probabilité de 10% pour être excédé en 50 ans ; la période de retour dans les codes de construction est généralement de 475 ans mais dans les nouveaux codes de construction aux états unis et au Canada la période de retour de référence est de 2500 ans [42].

III.3.2.2 Les tremblements de terre maximum MCE

Les tremblements de terre maximums MCE (Maximum Credible Earthquake) correspond au niveau maximum de séisme qui peut être envisagé sur un site où se trouve la structure. Le MCE a une probabilité de 10% pour être dépassé en 100 ans avec une période de retour de 10 000 ans pour les

zones de faible à modérée sismicités. Ce niveau est employé pour vérifier la stabilité du système d'isolation [42].

Le séisme de référence est généralement défini par les paramètres macrosismiques suivant ; intensité épiscopentrale, profondeur focale, distance épiscopentrale et sismicité induite par le site.

III.3.3 Méthodes de calcul et d'analyse des structures isolées

Toutes les méthodes d'analyse d'une structure à base fixe permettent le calcul des forces sismiques d'une structure isolée mais avec une procédure plus complexe qui représente le comportement non linéaire du système d'isolation. Pour cela, on a adopté les recommandations du code Américain UBC 97. Les structures isolées à la base peuvent être analysées suivant trois approches différentes :

- La méthode statique équivalente.
- La méthode d'analyse modale spectrale.
- La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes.

III.3.3.1 La méthode statique équivalente

Cette méthode est applicable pour les structures satisfaisant aux conditions préconisées par le code UBC97 :

- La structure est située au moins 10 kilomètres de tous les failles actives.
- La structure est située sur des profils de sol de type : S_A (Très rocheux), S_B (Rocheux), S_C (Sol très dense et roche molle) ou S_D (Profil de sol raide).
- La structure au-dessus de l'interface d'isolation est égale à ou moins de quatre étages ou de 20 m de hauteur.
- La période effective maximale du système d'isolation T_M est égale à ou moins 3 secondes.
 - La période effective de conception du système de l'isolation T_D est plus grande trois fois que la période de la structure à base fixe.
 - La structure au-dessus du système d'isolation est de configuration régulière.

Le système d'isolation est défini par tous les attributs suivants :

- La rigidité effective du système d'isolation au déplacement de conception est plus grande qu'un tiers de la rigidité effective à 20% du déplacement de conception.
- Le système d'isolation est capable de produire une force de reconstitution.
- Le système d'isolation a des propriétés de force-déplacement qui sont indépendant du taux de chargement.

- Le système d'isolation a des propriétés de force-déplacement qui sont indépendantes de charge verticale bilatérale.

Caractéristique de déformation du système d'isolation :

- Les déplacements et les forces latérales minimums de conception de tremblement de terre sur les structures du système d'isolation seront basés sur les caractéristiques de déformation du système.
- Les caractéristiques de déformation du système d'isolation incluront explicitement les effets du système de vent-contrainte si un tel système est employé pour répondre aux exigences de conception de ce document.
- Les caractéristiques de déformation du système d'isolation seront basées sur les essais correctement justifiés selon le code UBC 97.

a/ Les périodes effectives de la structure

- La période effective de conception du système de l'isolation T_D

T_D : La période effective de la structure d'isolation en seconde correspondant au tremblement de terre de conception DBE calculé selon la formule suivante :

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{Dmin} g}} \quad (III.41)$$

- La période effective maximale du système d'isolation T_M

T_M : La période effective de la structure d'isolation en seconde correspondant au tremblement de terre maximum MCE calculé selon la formule suivante :

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{Mmin} g}} \quad (III.42)$$

Avec g : Accélération de la pesanteur.

W : Poids de la structure.

K_{Dmin} et K_{Mmin} : Les valeurs minimales des rigidités effectives $K_{D,eff}$ et $K_{M,eff}$ du système d'isolation en kips/inch (KN/mm) correspondant au déplacement de conception D_D et D_M respectivement dans la direction horizontale. Elles sont déterminées à partir des boucles d'hystérésis (force-déplacement) obtenues à partir des essais de chargements cycliques sur les isolateurs de prototype.

Les valeurs minimales des rigidités effectives sont données par les équations suivantes :

$$K_{D,eff} = \frac{F_D^+ - F_D^-}{D_D^+ - D_D^-} \quad (III.43)$$

$$K_{M,eff} = \frac{F_M^+ - F_M^-}{D_M^+ - D_M^-} \quad (III.44)$$

Avec

F_{D^+} , F_{D^-} , F_{M^+} , F_{M^-} , D_{D^+} , D_{D^-} , D_{M^+} et D_{M^-} : sont respectivement les forces et les déplacements maximums ou minimums correspondant aux niveaux de réponse de DBE ou MCE sur les systèmes d'isolation de prototypes employés dans les essais sous chargements cycliques.

Les rigidités $K_{D,min}$, $K_{D,max}$ sont respectivement les valeurs minimales et maximales de $K_{D,eff}$ correspondant au déplacement minimum de conception D_D et $K_{M,min}$, $K_{M,max}$ sont respectivement les valeurs minimales et maximales de $K_{M,eff}$ correspondant au déplacement maximum D_M .

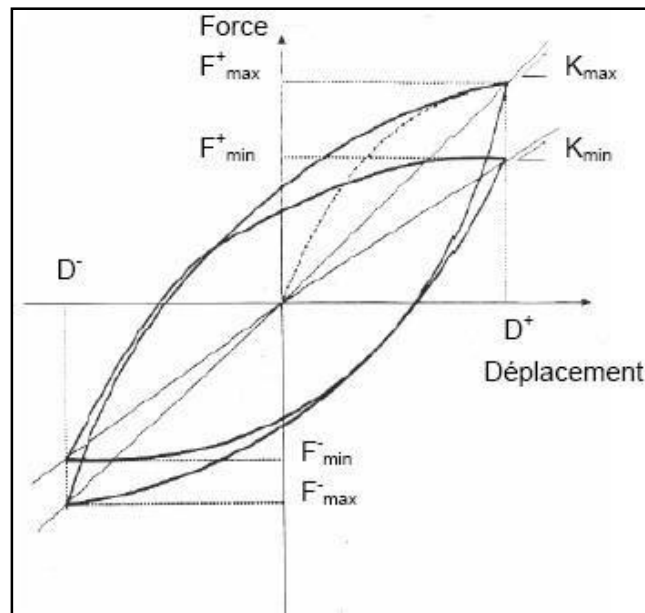


Figure III. 8 : Boucles d’hystérésis sous chargement cyclique.

b/ Les déplacements latéraux minimums

- Déplacement de conception :

Le système d’isolation sera conçu et construit pour résister aux déplacements latéraux minimums de tremblement de terre qui agit en direction de chacune des axes horizontaux principaux de la structure selon la formule suivante :

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VD} T_D}{B_D} \quad (III.45)$$

- Déplacement maximum :

Le déplacement maximum du système d'isolation, D_M , dans la direction la plus critique de la réponse horizontale sera calculé selon la formule :

$$D_M = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right)C_{VM}T_M}{B_M} \quad (\text{III.46})$$

Avec

C_{VD} et C_{VM} : Coefficients sismiques.

B_D et B_M : Coefficients d'amortissement.

C_{VD} est en fonction du facteur de zone sismique et du type de profil du sol. Il est donné selon l'UBC 97 (chapitre 16, sous chapitre 5, Tableau 16-R) comme suit :

Tableau III. 1 : Coefficient sismique C_{VD} .

| Type de profil de sol | Facteurs de zone sismique | | | | |
|-----------------------|---------------------------|--------|-------|-------|------------|
| | Z=0,075 | Z=0,15 | Z=0,2 | Z=0,3 | Z=0,4 |
| S_A | 0,06 | 0,12 | 0,16 | 0,24 | 0,32 N_V |
| S_B | 0,08 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 N_V |
| S_C | 0,13 | 0,25 | 0,32 | 0,45 | 0,56 N_V |
| S_D | 0,18 | 0,32 | 0,4 | 0,54 | 0,64 N_V |
| S_E | 0,26 | 0,5 | 0,64 | 0,84 | 0,96 N_V |

Z : Coefficient de zone sismique, ses valeurs sont données selon UBC 97 (chapitre 16, sous chapitre 5, Tableau 16-I) comme suit :

Tableau III. 2 : Facteur de la zone sismique Z.

| Zone | I | IIA | IIB | III | IV |
|----------|-------|------|-----|-----|-----|
| Z | 0,075 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 |

N_V : Coefficient de proximité de la faille active. Il est en fonction de type de la faille sismique. Ces valeurs sont données selon l'UBC97 (chapitre 16, sous chapitre 5, tableau 16-T) comme suit :

Tableau III. 3 : Facteur de proximité de la faille active N_v .

| Type de faille sismique | Proximité de la faille active | | | |
|-------------------------|-------------------------------|------|-------|----------------------|
| | $\leq 2 \text{ Km}$ | 5 Km | 10 Km | $\geq 15 \text{ Km}$ |
| A | 2 | 1,6 | 1,2 | 1 |
| B | 1,6 | 1,2 | 1 | 1 |
| C | 1 | 1 | 1 | 1 |

A, B, C : sont les types de la faille sismique. Ils sont en fonction de Magnitude de moment maximum M et Taux de glissement sismique moyen annuel SR.

Tableau III. 4 : Type de failles sismiques

| Type de failles sismiques | M | SR |
|---|--------------|---------------|
| A : Failles capables de produire de grandes magnitudes et ont un taux élevé d'activité sismique | $M \geq 7,0$ | $SR \geq 7,0$ |
| B : Tout autre type de faille hors A et C | $M \geq 7,0$ | $SR < 5$ |
| | $M < 7,0$ | $SR > 2$ |
| | $M \geq 6,5$ | $SR < 2$ |
| C : Failles capables de produire des magnitudes Modérées avec un taux relativement faible de l'activité Sismique | $M < 6,5$ | $SR \leq 2$ |

C_{VM} est en fonction du type de profil de sol et de l'intensité maximum capable de tremblement de terre $M_{MZ} N_v$. Il est donné selon l'UBC97 (chapitre 16, sous chapitre 4, Tableau A-16-G) comme suit

Tableau III. 5 : Coefficients sismiques C_{VM} .

| Type de profil de sol | L'intensité maximum capable de tremblement de terre | | | | |
|-----------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| | $M_{MZ} N_v = 0,075$ | $M_{MZ} N_v = 0,15$ | $M_{MZ} N_v = 0,20$ | $M_{MZ} N_v = 0,30$ | $M_{MZ} N_v \geq 0,40$ |
| S_A | 0,06 | 0,12 | 0,16 | 0,24 | $0,8 M_{MZ} N_v$ |
| S_B | 0,08 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | $1,0 M_{MZ} N_v$ |
| S_C | 0,13 | 0,25 | 0,32 | 0,45 | $1,4 M_{MZ} N_v$ |
| S_D | 0,18 | 0,32 | 0,40 | 0,54 | $1,6 M_{MZ} N_v$ |
| S_E | 0,26 | 0,50 | 0,64 | 0,84 | $2,4 M_{MZ} N_v$ |

M_M : Coefficient de réponse au séisme capable maximum. Il est en fonction d'intensité de tremblement de terre de conception Z_{Nv} . Il est donné selon l'UBC97 (chapitre 16, sous chapitre 4, Tableau A-16-D) comme ci-après :

Tableau III. 6 : Coefficient de réponse au séisme capable maximum M_M .

| | | | | | | |
|----------|-------|------|------|------|------|-------------|
| Z_{Nv} | 0,075 | 0,15 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | $\geq 0,50$ |
| M_M | 2,67 | 2,0 | 1,75 | 1,5 | 1,25 | 1,20 |

B_D et B_M : Les Coefficients d'amortissement sont donnés en termes d'amortissement effectif β correspondant respectivement au tremblement de terre de conception et maximum DBE et MCE. Il est donné selon l'UBC97 (chapitre 16, sous chapitre 4, Tableau A-16-C) comme suit :

Tableau III. 7 : Les coefficients d'amortissement B_D et B_M .

| | | | | | | | |
|------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| β | $\leq 2\%$ | 5% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% |
| B_D, B_M | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 2 |

- **Déplacement total :**

Le déplacement total de la conception D_{TD} et le déplacement total maximum D_{TM} des éléments, dû à la torsion réelle et accidentelle. Cette dernière est calculée en fonction de la distribution spatiale de la rigidité latérale du système d'isolation et l'emplacement le plus désavantageux de l'excentricité de masse.

Remarque :

D_{TD} et D_{TM} ne seront pas pris en tant que moins que cela prescrit par les formules :

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right] \geq 1,1 D_D \text{(II.47)}$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right] \geq 1,1 D_M$$

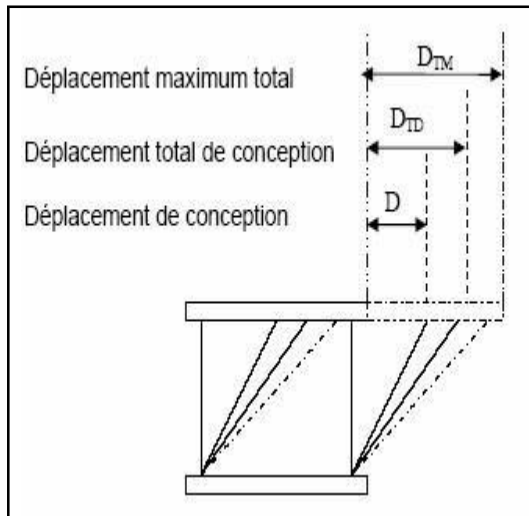


Figure III. 9 : Déplacements du système

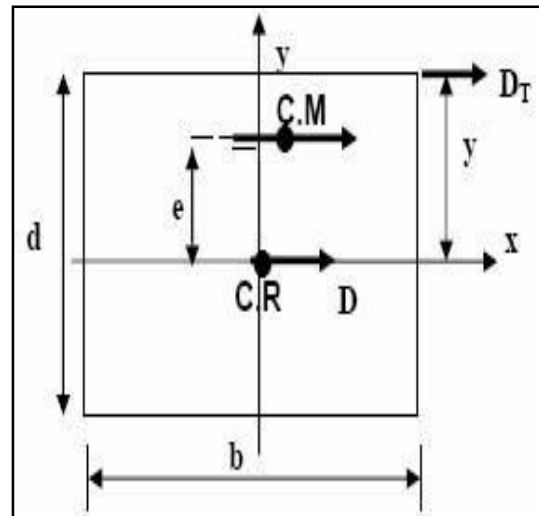


Figure III. 10 : Dimensions en plan

c/ Les forces sismiques

Les systèmes d'isolations et tous les éléments structuraux au-dessus du système d'isolation seront conçus et construits pour résister à une force sismique latérale minimum V_b , en utilisant toutes les dispositions appropriées pour une structure non isolée :

$$V_b = K_{Dmax} D_D \tag{III.49}$$

La force sismique minimale prise pour le calcul des éléments au-dessus du système d'isolation est égale à :

$$V_s = \frac{K_{Dmax} D_D}{R_I}$$

Où :

R_I : Facteur basé sur le type de système de la force latérale résistant utilisé pour la structure au-dessus du système d'isolation. Selon UBC 97 : $1.6 < R_I < 2.0$

- La force sismique V_s ne devrait pas être prise inférieure à :

- La force de conception correspondante à la charge du vent.
- La force latérale exigée pour activer entièrement le système d'isolation multipliée par 1.5.

- Distribution verticale de la force sismique :

Toute la force sera répartie sur la structure au-dessus de l'interface d'isolation selon la formule :

$$F_x = \frac{V_s W_x h_x}{\sum_{i=0}^n W_i h_i} \tag{III.51}$$

Où :

W_x et W_i : Poids des niveaux x et i respectivement.

h_x et h_i : Hauteurs des niveaux x et i respectivement au-dessus du niveau d'isolation.

À chaque niveau indiqué comme x, la force F_x appliquée au-dessus du secteur du bâtiment selon la distribution de masse au niveau. Les efforts dans chaque élément seront calculés comme effet de la force F_x , appliqué aux niveaux appropriés au-dessus de la base.

d/ Les déplacements inter-étages

Le déplacement inter-étages de la structure au-dessus du système d’isolation ne dépassera pas le rapport :

$$\frac{0.01}{R_I} \tag{III.52}$$

III.3.3.2. La méthode d’analyse modale spectrale

Cette méthode, à l’opposé de la méthode statique équivalente, elle permet d’analyser de nombreuses structures isolées. Elle est exigée dans le cas où la régularité de la structure est au-dessus du plan d’isolation. Egalement, la superstructure doit être de plus de quatre étages ou 20m de hauteur.

- La période effective de la structure isolée (t_d) est trois fois plus grande que la période fondamentale de la structure à base fixe ($t_f > 3 t_f$).

a/ Les déplacements

Le déplacement total de conception du système d’isolation ne doit pas être pris inférieur à 90% de D_{TD} calculé à la méthode statique équivalente.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right] \geq 0,9 D_D$$

Le déplacement maximal du système d’isolation ne doit pas être pris inférieur à 80% de D_{TM} calculé à la méthode statique équivalente.

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right] \geq 0,8 D_M$$

Les deux déplacements selon le code UBC97 seront évalués en utilisant les valeurs du D_{TD} et D_{TM} pour déterminer l’accordance, exception en remplaçant D_D par D'_D et D_M par D'_M selon les formules suivantes :

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^E}} \tag{III.53}$$

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \tag{III.54}$$

Où :

T est la période de la structure à base fixe calculée auparavant.

Remarque :

Cette réduction tient compte de la flexibilité de la superstructure parce que les formules statiques supposent que la superstructure est rigide, par contre n'importe quelle flexibilité et déplacement de la superstructure tendraient à diminuer le déplacement dans le système d'isolation.

b/ Les forces sismiques

- La force sismique du système d'isolation ne doit pas être prise inférieure à 90% de V_b .
- La force sismique calculée pour une structure de configuration régulière, peut être prise inférieure à 80% de V_s mais pas inférieure à 60% de V_s .

c/ Les déplacements inter-étages

Le déplacement inter étage correspond à la fore latérale de conception, y compris le déplacement dû à la déformation verticale du système d'isolation ne dépassera pas la limite du rapport :

$$\frac{0.015}{R_I} \quad (III.55)$$

III.3.3.3 La méthode d'analyse par accélérogrammes

Le principe d'analyse dynamique par accélérogramme, est d'étudier l'effet des forces sur la structure en fonction du temps. Elle est convenable en particulier pour les systèmes d'isolation qui ne répondent pas aux conditions des méthodes citée auparavant.

Pour une étude sismique, cette méthode est la plus précise, pour le calcul non linéaire des structures isolées. Elle exige l'utilisation d'un ou des accélérogrammes ainsi la disponibilité d'un programme numérique pour l'analyse.

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

- La structure située sur un site de classe E (sols meuble ; mouvement de longue période) ou F (sols sujets aux problèmes de liquéfaction).
- La structure isolée par des systèmes ayant un amortissement effectif supérieur à 30% (Par ce que les niveaux élevés de l'amortissement conduisent à la participation des modes supérieurs dans la réponse).
- La structure isolée par des systèmes qui ne peuvent pas produire une force de rappel significative.

- Les codes exigent d'autres conditions sur la manière dont les mouvements des sols utilisés comme réponses temporelles doivent être appliqués dans la conception et l'analyse des structures isolées, ces conditions sont :

- Au moins trois paires des composantes horizontales du mouvement du sol enregistrées devraient être choisies et employées.
- Les réponses temporelles devraient montrer les durées de mouvements forts conformément aux magnitudes et aux caractéristiques de source des mouvements du sol.
- Les réponses temporelles développées pour les sites situés à moins de 15 kilomètres des failles actives majeures devraient incorporer les phénomènes de failles proches.
- Si les enregistrements appropriés ne sont pas disponibles, des enregistrements simulés appropriés peuvent être employés pour composer tout le nombre des enregistrements requis.
- 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.
- Par suite, les réponses temporelles doivent être normalisées (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 $0,5 T_D$ à $1,25T_M$ où T_D et T_M sont les périodes d'isolation effectives correspondantes respectivement au déplacement de conception et au déplacement maximum.
- Si trois réponses temporelles sont employées, la conception doit être basée sur les valeurs maximales de réponse. Si sept réponses temporelles sont employées, la conception peut être basée sur les valeurs moyennes de réponse.

a/ Les déplacements

- Déplacement total :

Le déplacement total de la conception D_{TD} : $D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right] \geq 0,9 D_D$

Le déplacement total maximum D_{TM} : $D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right] \geq 0,8 D_M$

b/ Les forces sismiques

- La force sismique pour le système d'isolation ne doit pas être prise inférieure à 90% de V_b .

- La force sismique ne doit pas être prise inférieure à 80% de V_s et pas inférieure à 60% de V_s si la superstructure, est régulière en plan et en élévation.

c/ Les déplacements inter étages

Le déplacement inter-étages de la structure au-dessus du système de l'isolation calculé par cette méthode ne dépassera pas la limite du rapport :

$$\frac{0.02}{R_I} \tag{III.56}$$

Tableau III. 8 : Valeurs de l'analyse dynamique données en fonction des valeurs de l'analyse statique.

| Paramètre de conception | Méthode statique | Méthode dynamique | |
|---|---|--------------------------|-------------------------|
| | | Modale spectrale | Temporelle |
| Déplacement de conception | $D_D = \frac{(\frac{g}{4\pi^2})C_{VD} T_D}{B_D}$ | | |
| Déplacement maximum | $D_M = \frac{(\frac{g}{4\pi^2})C_{VM} T_M}{B_M}$ | | |
| Déplacement total de la conception | $D_{TD} = D_D [1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2}] \geq 1,1D_D$ | $D_{TD} \geq 0,9 D_D$ | $D_{TD} \geq 0,9 D_D$ |
| Déplacement total maximum | $D_{TM} = D_M [1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2}] \geq 1,1D_M$ | $D_{TM} \geq 0,8 D_D$ | $D_{TM} \geq 0,8 D_D$ |
| Force sismique pour le système d'isolation | $V_b = K_{Dmax} D_D$ | $\geq 0,8 V_b$ | $\geq 0,9 V_b$ |
| Force sismique pour une structure régulière | $V_s = \frac{1}{R_I} K_{Dmax} D_D$ | $\geq 0,8 V_b$ | $\geq 0,6 V_b$ |
| Force sismique pour une structure irrégulière | $V_s = \frac{1}{R_I} K_{Dmax} D_D$ | $\geq 1,0 V_b$ | $\geq 1,0 V_b$ |
| Déplacement inter-étages | $\leq \frac{0.01}{R_I}$ | $\leq \frac{0.015}{R_I}$ | $\leq \frac{0.02}{R_I}$ |

III.3.4 Méthodologie de dimensionnement des appuis parasismiques

La sécurité des bâtiments isolés à la base par des appuis parasismiques est uniquement une question de calculs et de dimensionnement, par l'ingénieur civil, de la structure porteuse et de l'appareil d'appui. Le dimensionnement de ces isolateurs s'effectue par des formules données par les codes UBC 97.

III.3.4.1 Dimensionnement de l'appui en élastomère à fort amortissement HDRB

- Déterminer le type et la longueur de faille sismique, le type de profil de sol et les coefficients N_V, M_M, C_{VD} et C_{VM}
- Le calcul des valeurs minimales des rigidités effectives $K_{D,min}$ et $K_{M,min}$:

$$K_{D,min} = \frac{4\pi^2 N}{T_D^2 g} \tag{III.57}$$

$$K_{M,\min} = \frac{4\pi^2 N}{T_M^2 g} \quad (\text{III.58})$$

Avec N est la charge verticale reprise par l'appui.

3. Le calcul de déplacement :

- Le déplacement de conception D_D :

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VD} T_D}{B_D} \quad (\text{III.59})$$

- Le déplacement maximal D_M :

$$D_M = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VM} T_M}{B_M} \quad (\text{III.60})$$

- Le déplacement total de conception $D_{T,D}$ et maximum $D_{T,M}$:

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right] \quad (\text{III.61})$$

$$D_{TD} = D_M \left[1 + y \frac{12 e}{b^2 + d^2} \right] \quad (\text{III.62})$$

Avec e : est l'excentricité réelle entre le centre de la masse de la structure au-dessus du système d'isolation et le centre de la rigidité de ce dernier, plus 5 % d'excentricité accidentelle

y : est la distance perpendiculaire entre l'élément d'appui d'angle considéré et le centre de la rigidité du système d'isolation selon la direction de calcul considérée. b et d : sont les dimensions de la structure.

4. L'épaisseur des couches de caoutchouc t_r :

$$t_r = \frac{D_D}{\gamma_{\max}} \quad (\text{III.63})$$

Avec γ_{\max} : est la contrainte de cisaillement maximale.

5. Le calcul de section de l'appui A :

$$K_H = \frac{G A}{t_r} \quad (\text{III.64})$$

Avec G : Module de cisaillement de l'élastomère.

$$A = \frac{K_H t_r}{G} \quad (\text{III.65})$$

6. Calcul de l'énergie dissipée par cycle EDC :

$$EDC = 2\pi K_{\text{eff}} D_D^2 \beta \quad (\text{III.66})$$

7. La résistance caractéristique Q :

$$Q = \frac{EDC}{4D} \quad (\text{III.67})$$

8. Calcul de la rigidité post-élastique K_2 :

$$K_{\text{eff}} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad \leftrightarrow \quad K_2 = K_{\text{eff}} - \frac{Q}{D} \quad (\text{III.68})$$

9. Calcul de la rigidité élastique K_1 :

On a le rapport entre K_1/K_2 varie entre 3 et 5 [43].

$$K_1 = 5K_2 \quad (III.69)$$

4. Calcul de la force limite élastique F_y :

$$F_y = K_1 D_y \quad [7] \quad (III.70)$$

Avec D_y : Déplacement à la plastification donné par la formule suivante :

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad [43] \quad (III.71)$$

5. Calcul de la pulsation propre ω_H et la période T_H :

$$\omega_H = \sqrt{\frac{K_H g}{W}} \quad \text{et} \quad T_H = \frac{2\pi}{\omega_H} \quad (III.72)$$

6. Détermination du facteur de forme S :

$$6S^2 = \frac{f_V^2}{f_H^2} \quad (III.73)$$

7. Calcul de l'épaisseur de caoutchouc qui sépare deux frettes d'acier t_c :

$$t_c = \frac{a}{4S} \quad (III.74)$$

8. Calcul du nombre des frettes d'acier n_a :

$$n_a = \frac{t_r}{t_c} - 1 \quad (III.75)$$

9. Calcul de la hauteur totale de l'appui HDRB :

$$h_t = (2t_e) + (t_a n_a) + t_r \quad (III.76)$$

Avec

t_e : L'épaisseur des plaques d'extrémité : 25 mm.

t_a : L'épaisseur des frettes d'acier : 2 mm.

III.3.4.2 Dimensionnement de l'appui en pendules glissants FPS

1. Déterminer le coefficient C_{VD}

2. Calcul du rayon de la surface sphérique :

$$R = g \left(\frac{T_D}{2\pi} \right)^2 \quad (III.77)$$

3. Calcul du déplacement D :

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2} \right) C_{VD} T_D}{B_D}$$

4. Calcul de la rigidité effective :

$$K_{eff} = \frac{N}{R} + \frac{\mu \times N}{D_D} \quad (III.78)$$

Avec μ est le coefficient de frottement qui est de 0.06 [44].

5. Calcul de la rigidité horizontale :

$$K_H = \frac{N}{R} \quad (\text{III.79})$$

On vérifie β par la formule $\beta = \frac{2}{\pi} \frac{\mu}{\mu + D_D/R}$ suivante :

$$(\text{III.80})$$

6. Détermination du déplacement vertical de l'appui :

$$D_V = \frac{D_D^2}{2R} \quad (\text{III.81})$$

7. Calcul de diamètre de la surface sphérique d :

$$d > 2D_D \quad (\text{III.82})$$

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, le système d'isolation sismique est traduit théoriquement par des équations de mouvements, pour les appareils d'appuis et le système isolé (de deux degrés de liberté). Ceci dans le but de comprendre leur principe de fonctionnement. Pour cela, trois méthodes de calcul ont été présentées. La méthodologie de dimensionnement des appuis parasismiques a été aussi intégrée. Par la suite, on va étudier une structure de type bâtiment à dix niveaux en se basant sur les principes des dimensionnement développés dans les règlements algériens (BAEL91, RPA99 et DTR B.C.2.2).

Chapitre VI

**Etude comparative de la structure
avec et sans le système**

Etude comparative de la structure avec et sans le système d'isolation

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre on va exploiter les informations abordées dans les deux premiers chapitres de notre mémoire pour la modélisation des appuis parasismique dans le logiciel ETABS ainsi que leur influence sur le comportement dynamique de notre structure. Une comparaison sera faite entre deux modèles ; à savoir, un modèle à base fixe et l'autre avec appuis du type HDRB.

➤ **Présentation de l'ouvrage**

L'ouvrage à étudier est un bâtiment à usage d'habitation composé d'un RDC plus neuf étages avec une terrasse inaccessible, l'étage courant contient deux appartements. Il est implanté à Oran ; une zone à moyenne sismicité, ZONE « II ».

L'ouvrage est une structure en béton armé avec une forme régulière et dont les caractéristiques sont représentées comme suit :

□ **Les dimensions de l'ouvrage sont :**

- Longueur totale du bâtiment : 16.50 m.
- Largeur totale du bâtiment : 12.50 m.
- Hauteur totale du bâtiment : 30,60 m.
- Hauteur du RDC : 3,06 m.
- Hauteur d'étage : 3,06 m.

□ **Caractéristiques des matériaux**

- La masse volumique de béton armé : 2500 Kg/m³.
- La résistance à la compression du béton à 28 jours f_{c28} : 25 MPa.
- La résistance à la traction du béton f_{t28} : 2,1 MPa.
- Le module d'élasticité instantané E_{ij} : 32000 MPa.

IV.2. Modélisation des appuis parasismiques dans ETABS

ETABS est composé de deux types d'éléments de liaison : ISOLATOR1 est généralement utilisé pour modéliser des appuis de type élastomère et ISOLATOR2 est considéré pour les appuis à pendule par frottement. Pour ISOLATOR1, la rigidité effective k_{eff} et l'amortissement effectif β_{eff} d'un appui le long des deux directions principales de la superstructure doivent être l'entrée pour l'analyse par spectre de réponse et l'analyse par accélérogramme [36].

IV.3. Description de l'excitation sismique

Comme on a vu dans ce chapitre III, il y a deux méthodes d'analyse ; statique et dynamique. Cette dernière contient deux types d'analyse, l'une par spectre de réponse et l'autre par accélérogramme. Dans notre travail de mémoire de Master, on va utiliser l'accélérogramme du séisme de 21 Mai 2003 à Boumerdès enregistré par la station de Keddara 1 avec un PGA de 0,33g

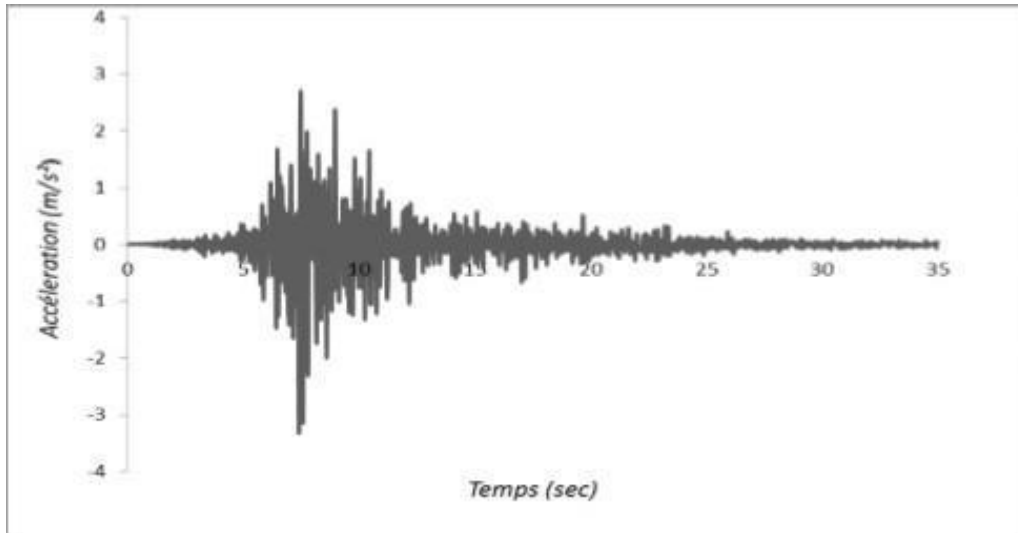


Figure IV.1. Accélérogramme du séisme de Boumerdès le 21 mai 2003 avec un PGA = 0,33 g enregistré par la station de Keddara 2 (accélérogramme au substratum).

IV.4. Description du système d'isolation

Dans le deuxième chapitre on a présenté plusieurs types d'isolateurs, l'un parmi ces types qu'on va l'utiliser est celui à élastomère à haut amortissement dont les caractéristiques géométriques sont représentées dans la figure (IV.2).

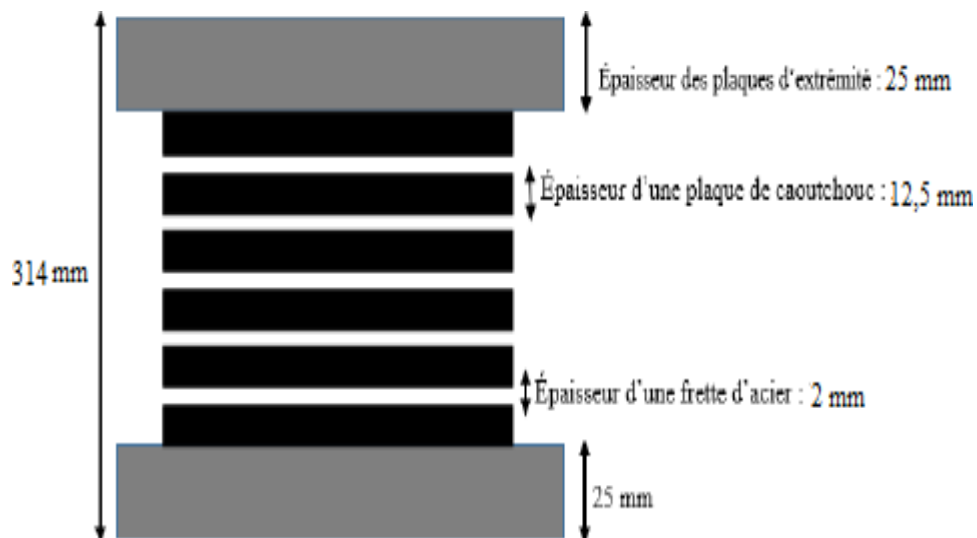


Figure IV.2. Les caractéristiques de l'appui HDRB utilisé dans la structure

Chapitre IV Etude comparative de la structure avec et sans d'isolation

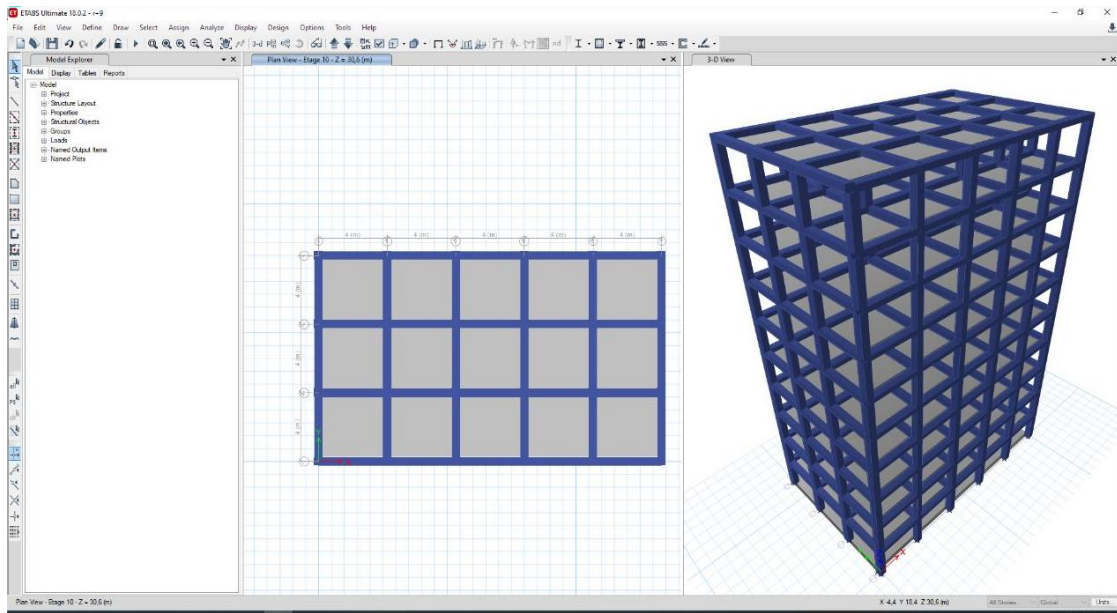


Figure IV.3. Vue en plan et 3D structure R+9

IV.5. Comparaison des résultats

IV.5.1. Périodes et pulsation

Le tableau ci-dessous représente les périodes et les pulsations de notre bâtiment dans les deux cas, à savoir, bâtiment à base fixe et le même bâtiment avec appui HDRB.

Tableau IV.1. Les périodes et les pulsations de la structure à base fixe et isolée.

| Mode | Modèle de la structure à base fixe | | | | | Modèle de la structure isolée par l'appui HDRB | | | | |
|------|------------------------------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|--|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Fréquence (Hz) | Période (sec) | Masses cumulées UX (%) | Masses cumulées UY (%) | Masses cumulées UZ (%) | Fréquence (Hz) | Période (sec) | Masses cumulées UX (%) | Masses cumulées UY (%) | Masses cumulées UZ (%) |
| 1 | 5,05 | 1,24 | 0 | 77,44 | 0 | 2,30 | 2,73 | 0,00 | 98,47 | 0,00 |
| 2 | 5,74 | 1,10 | 4,49 | 77,44 | 74,89 | 2,33 | 2,70 | 6,69 | 98,47 | 92,28 |
| 3 | 6,23 | 1,01 | 79,78 | 77,44 | 79,47 | 2,39 | 2,63 | 99,24 | 98,47 | 98,98 |
| 4 | 15,10 | 0,42 | 79,78 | 90,16 | 79,47 | 9,08 | 0,69 | 99,24 | 99,81 | 98,98 |
| 5 | 16,53 | 0,38 | 80,8 | 90,16 | 89,98 | 10,03 | 0,63 | 99,30 | 99,81 | 99,83 |
| 6 | 17,74 | 0,35 | 91,29 | 90,16 | 90,82 | 11,13 | 0,56 | 99,89 | 99,81 | 99,87 |
| 7 | 26,95 | 0,23 | 91,29 | 94,94 | 90,82 | 17,40 | 0,36 | 99,89 | 99,98 | 99,87 |
| 8 | 28,42 | 0,22 | 91,59 | 94,94 | 94,97 | 18,42 | 0,34 | 99,90 | 99,98 | 99,98 |
| 9 | 30,05 | 0,21 | 95,58 | 94,94 | 95,23 | 20,13 | 0,31 | 99,99 | 99,98 | 99,99 |
| 10 | 39,50 | 0,16 | 95,58 | 96,88 | 95,23 | 25,63 | 0,25 | 99,99 | 100,00 | 99,99 |
| 11 | 41,32 | 0,15 | 95,73 | 96,88 | 96,82 | 27,30 | 0,23 | 99,99 | 100,00 | 100,00 |
| 12 | 43,01 | 0,15 | 97,2 | 96,88 | 96,99 | 28,68 | 0,22 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Chapitre IV Etude comparative de la structure avec et sans d'isolation

Ont vas représenter les valeurs des périodes précédentes dans un histogramme illustré ci-dessous :

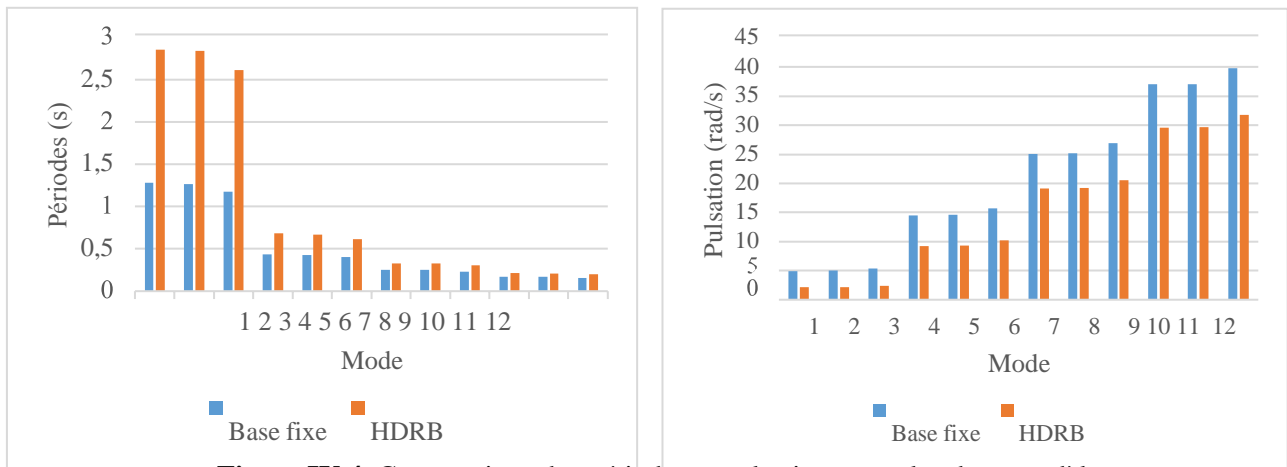


Figure IV.4. Comparaison des périodes et pulsations pour les deux modèles

D'après le (tableau IV.2) et la (Figure IV.4) nous constatons les remarques suivantes :

- ✓ Les résultats obtenus montrent que l'effet du système d'isolation est d'assouplir le bâtiment par le rallongement de la période fondamentale de la structure à une valeur plus grande par rapport à celle obtenue pour la structure encastree. Cette période est rallongée de 2 fois. En effet, ce décalage de la période vers celle de l'isolateur est la raison primaire de l'efficacité du système d'isolation.
- ✓ On remarque aussi que pour le modèle à base fixe, les facteurs de participation modale dépassent les 90% dans le sens des x et des y au sixième mode, on constate que la structure réagit par le premier mode, Cela est significatif dans le cadre de l'analyse dynamique des structures car la contribution des modes supérieurs est complètement négligeable ce qui n'a pas été vérifié dans le cas de la structure encastree.

IV.5.2. Les déplacements

IV.5.2.1. Déplacement des étages

Le tableau suivant représente les déplacements totaux maximaux des étages dans les deux sens.

Tableau IV.2. Les déplacements des étages dans les deux modèles selon les deux sens X et Y

| Niveau | Base fixe | | Base isolé | |
|--------|------------------|------|------------------|------|
| | Déplacement (cm) | | Déplacement (cm) | |
| | UX | UY | UX | UY |
| 9 | 2,26 | 1,80 | 4,03 | 3,89 |
| 8 | 2,00 | 1,60 | 3,95 | 3,82 |
| 7 | 1,74 | 1,39 | 3,87 | 3,74 |
| 6 | 1,50 | 1,19 | 3,80 | 3,67 |
| 5 | 1,24 | 0,99 | 3,72 | 3,61 |
| 4 | 0,91 | 0,72 | 3,65 | 3,55 |
| 3 | 0,66 | 0,53 | 3,59 | 3,48 |
| 2 | 0,49 | 0,39 | 3,54 | 3,41 |
| 1 | 0,24 | 0,19 | 3,47 | 3,36 |
| RDC | 0,00 | 0,00 | 3,44 | 3,29 |

Chapitre IV Etude comparative de la structure avec et sans d'isolation

Il est clair que les valeurs les plus élevées sont constatées pour le bâtiment à base isolée comparativement à celui à base fixe.

IV.5.2.2. Déplacement maximal des niveaux :

Les figures suivantes montrent une comparaison entre les déplacements maximal des niveaux des deux modèles dans les deux directions X et Y :

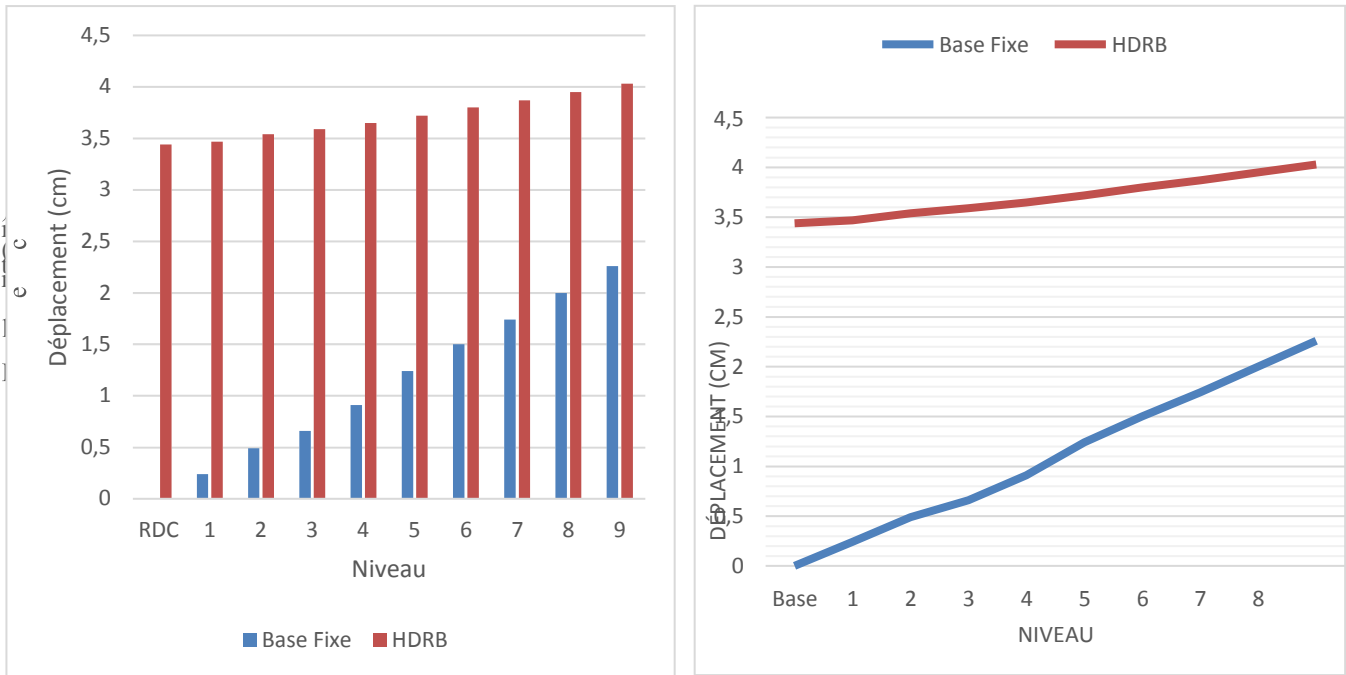


Figure IV.5. Comparaison de déplacement maximal des niveaux par rapport à l'axe X

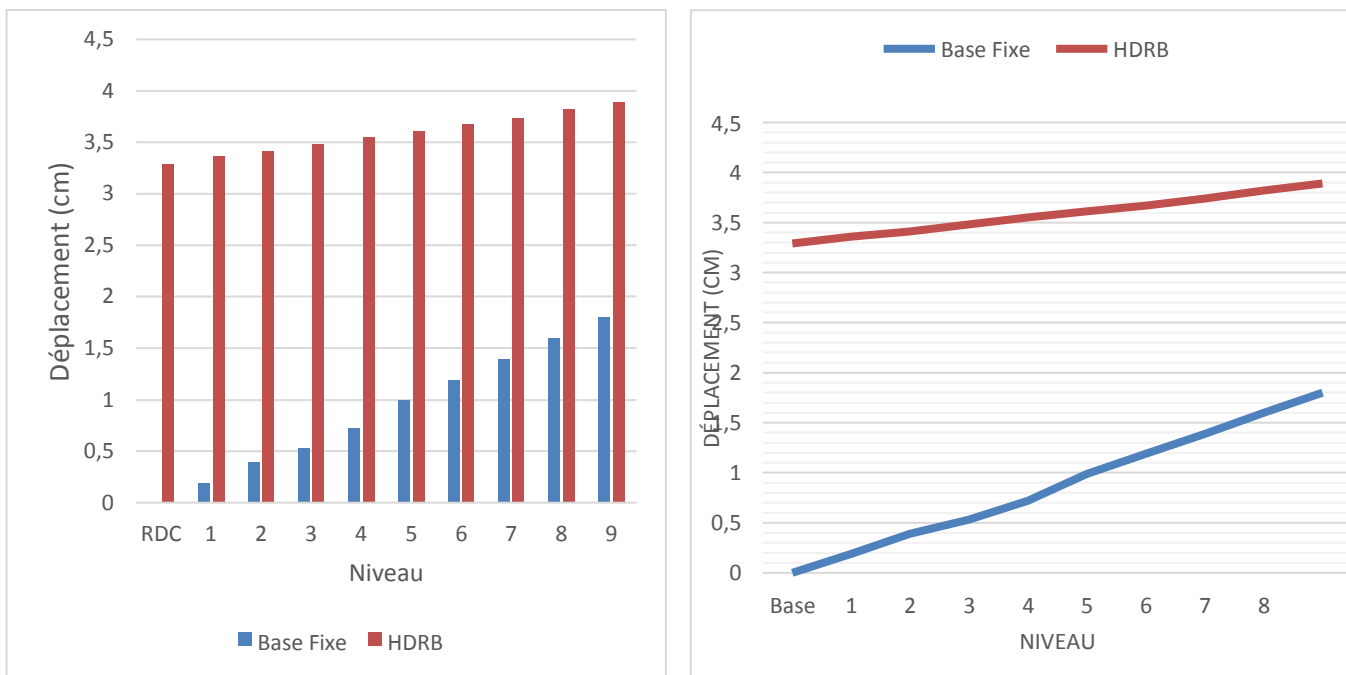


Figure IV.6. Comparaison de déplacement maximal des niveaux par rapport à l'axe Y

D'après les figures (IV.5) et (IV.6) on remarque que le déplacement maximal dans la direction X est égal à 2,26 cm, 4,03 cm, Et direction Y est égal à 1,80 cm, 3,89 cm, pour les deux modèles respectivement.

IV.5.2.3. Déplacement maximal du dernier niveau :

Les figures suivantes montrent une comparaison entre les déplacements des derniers niveaux des deux modèles dans les deux directions X et Y :

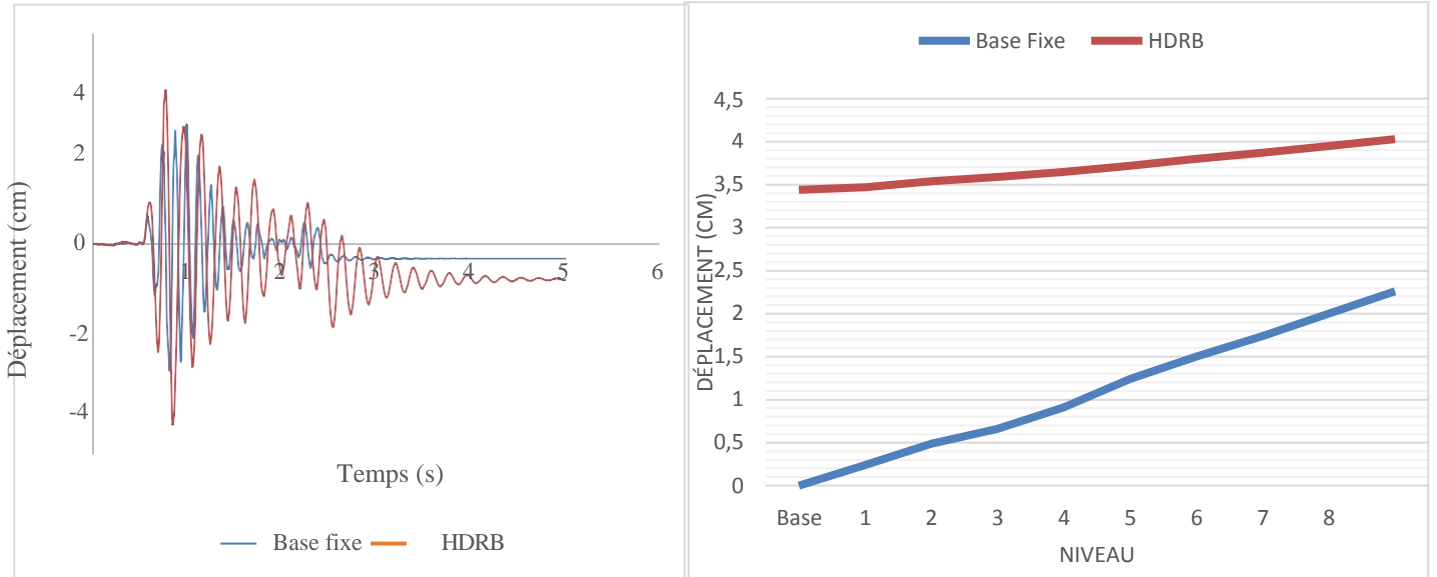


Figure IV.7. Comparaison de déplacement du dernier niveau par rapport à l'axe X

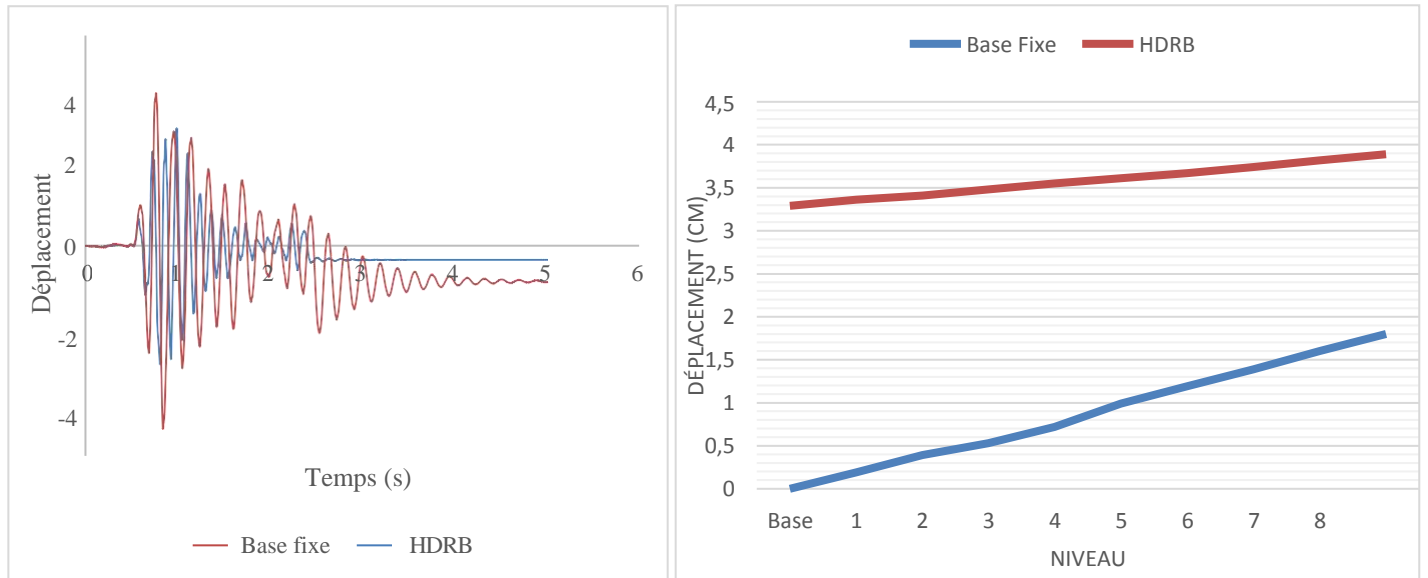


Figure IV.8. Comparaison de déplacement du dernier niveau par rapport à l'axe Y

Les figures (IV.7) et (IV.8) nous remarquons que le déplacement du dernier niveau du bâtiment à base fixe est inférieur à celui à base isolée avec un pourcentage de 29,88 % et 35,11% dans le sens x et y, respectivement. Une autre constatation est que Les déplacements de la structure isolée sont plus considérables qu'aux déplacements de la structure à base fixe.

IV.5.2.1. Déplacement inter-étages

Les figures suivantes montrent les déplacements inter-étages de la structure dans les deux directions X et Y :

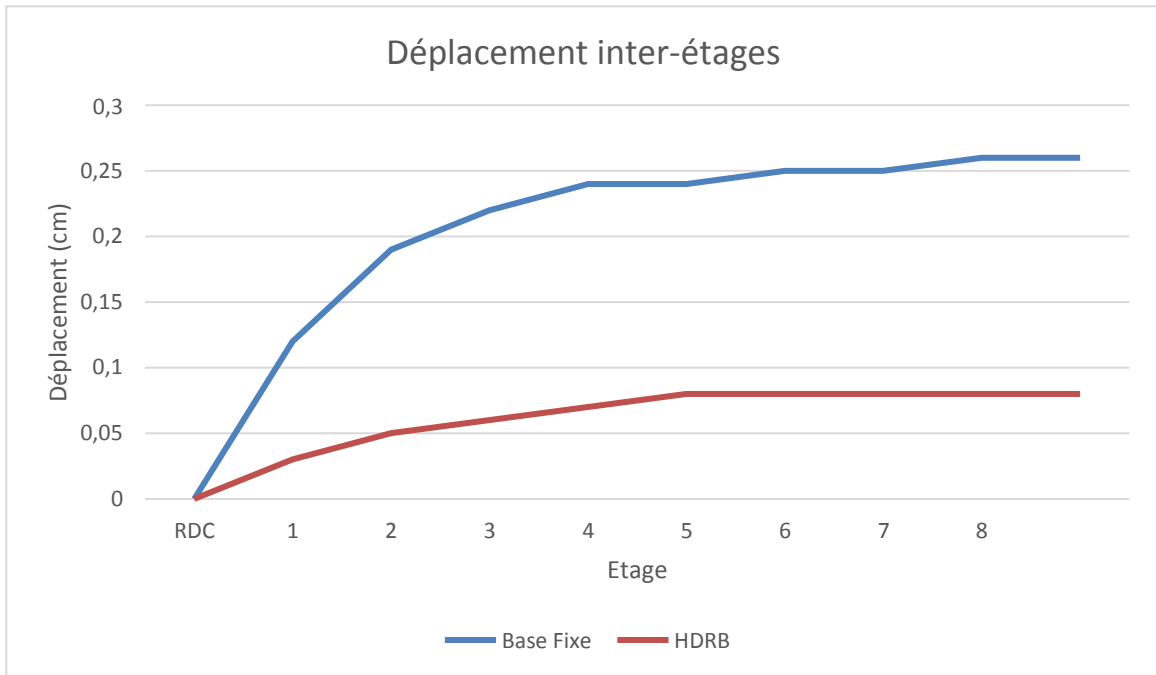


Figure IV.9. Le déplacement inter-étages dans le sens X

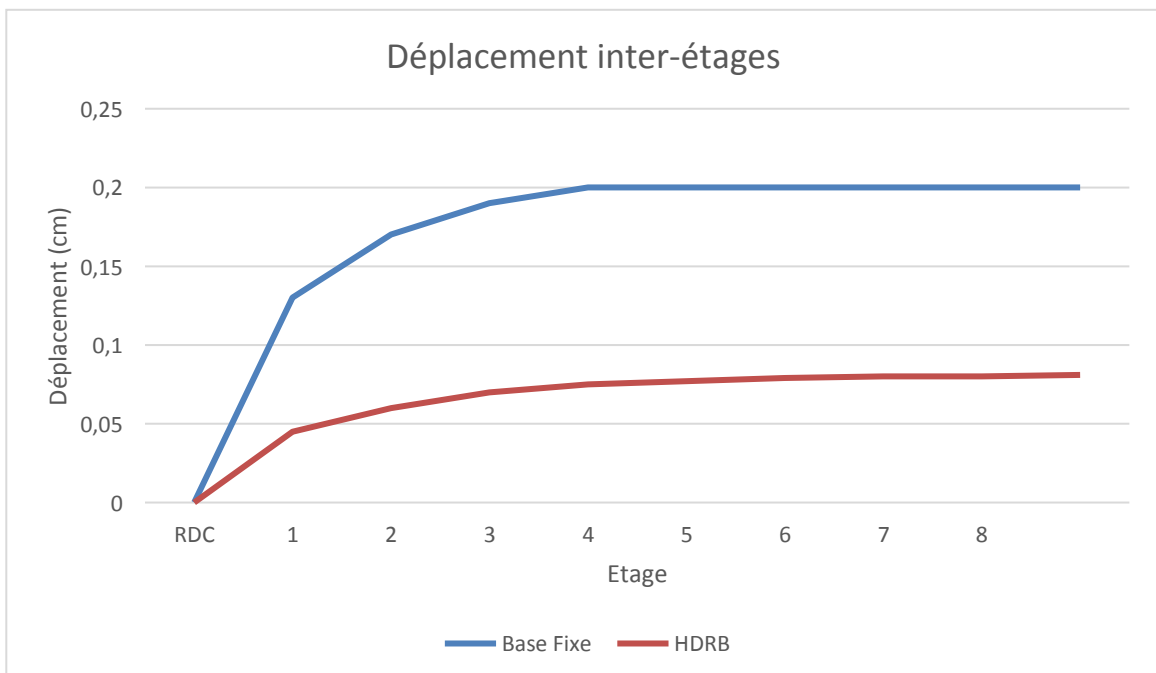


Figure IV.10. Le déplacement inter-étages dans le sens Y

Les figures (IV.9) et (IV.10), Il à noter que le déplacement inter-étage est réduit considérablement même à un faible taux d'amortissement du système HDRB par rapport à une base fixe.

IV.5.3. Accélération du dernier niveau

Les deux figures ci-dessous désignent les accélérations dans les deux axes principaux des deux modèles de la structure :

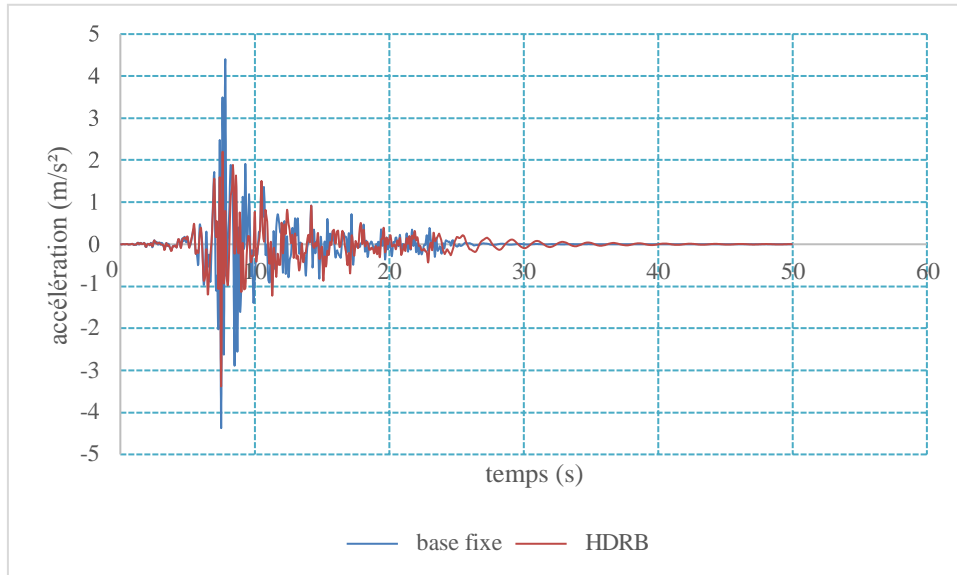


Figure IV.11. Comparaison de l'accélération suivant l'axe X.

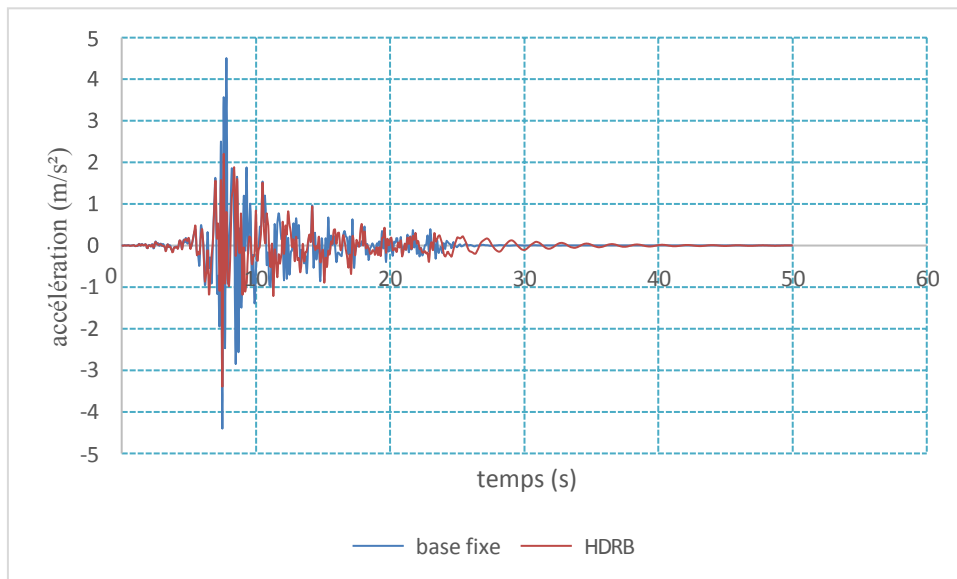


Figure IV.12. Comparaison de l'accélération suivant l'axe Y.

Les figures (IV.12) et (IV.13) dévoilent que l'accélération du dernier niveau de la structure à base fixe est supérieure à celle à base isolé par HDRB (de l'ordre de 25%). Ceci est interprété par la différence dans la période fondamentale des deux structures ; une structure à base fixe est plus rigide que celle à base isolé supposée souple.

IV.5.4. Les efforts tranchants

IV.5.4.1 Les efforts tranchants pour différents niveaux

Les figures (IV.13 et IV.14) montrent une comparaison entre les efforts tranchants au différent niveau pour les deux modèles dans les deux directions (X, Y).

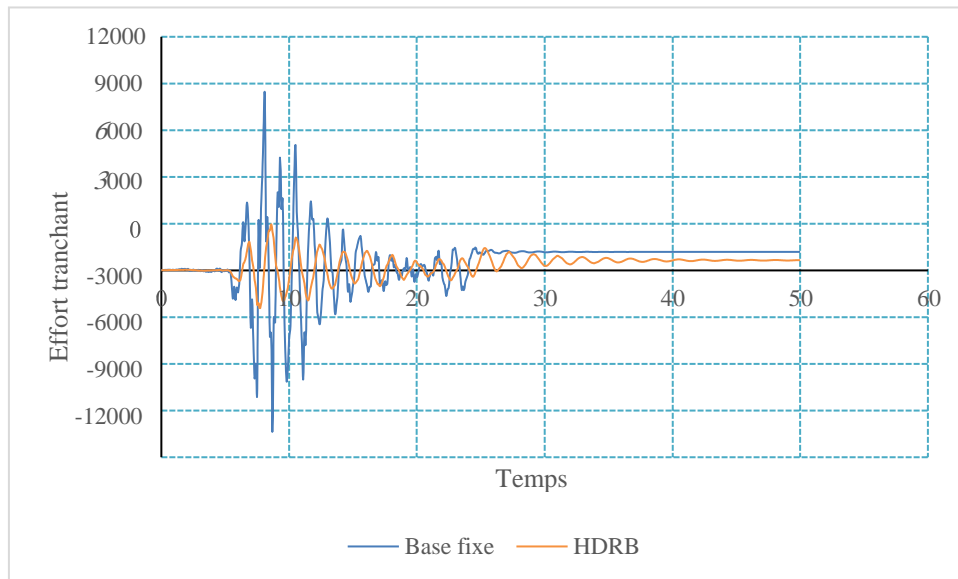


Figure IV.13. Comparaison des efforts tranchants au différent niveau dans la direction X.

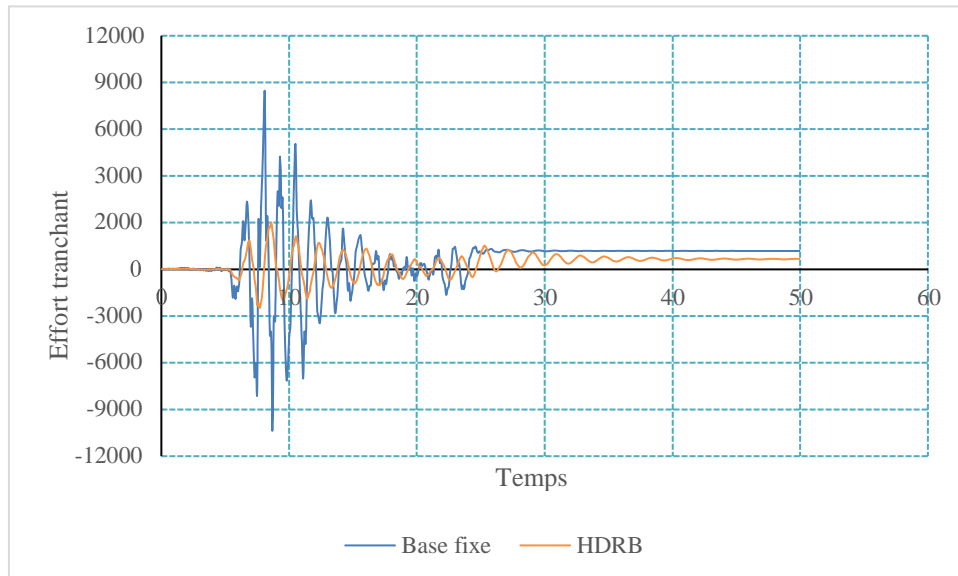


Figure IV.14. Comparaison des efforts tranchants au différent niveau dans la direction Y.

Les figures (IV.11) et (IV.12) montrent une réduction importante de l'effort tranchant au différent niveau de la structure par HDRB et montrent la variation des efforts tranchants au différent niveau dans les deux directions X et Y, et nous trouvons que les efforts tranchants au différent niveau de la structure à base isolée dans les deux directions X et Y sont réduits par rapport à celle à base fixe, donc le système d'isolation réduit l'effort tranchant au différent niveau. Ceci est dû à la réduction des accélérations transmises à la superstructure.

IV.5.4.2 Les efforts tranchants à la base

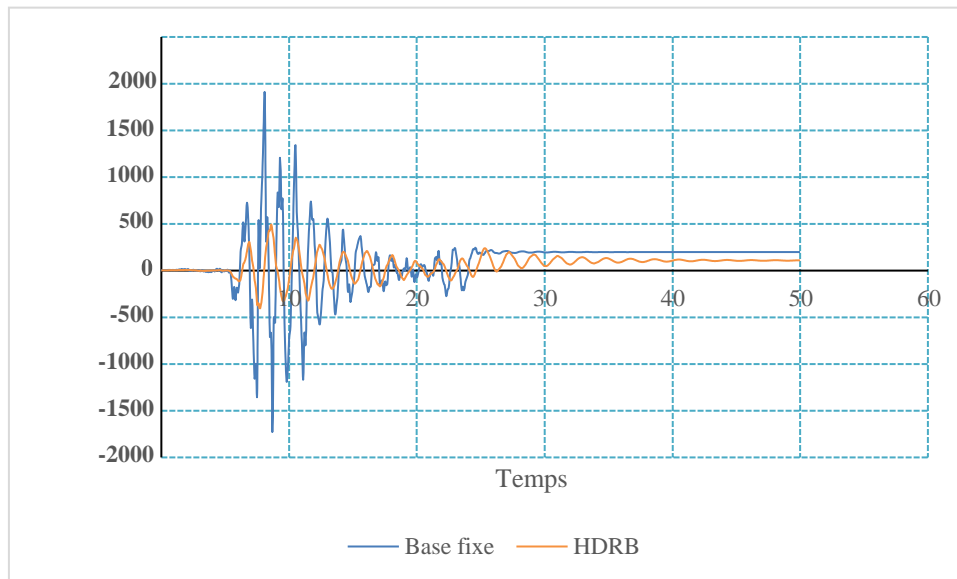


Figure IV.15. Comparaison des Moments à la base pour les deux modèles dans la direction X.

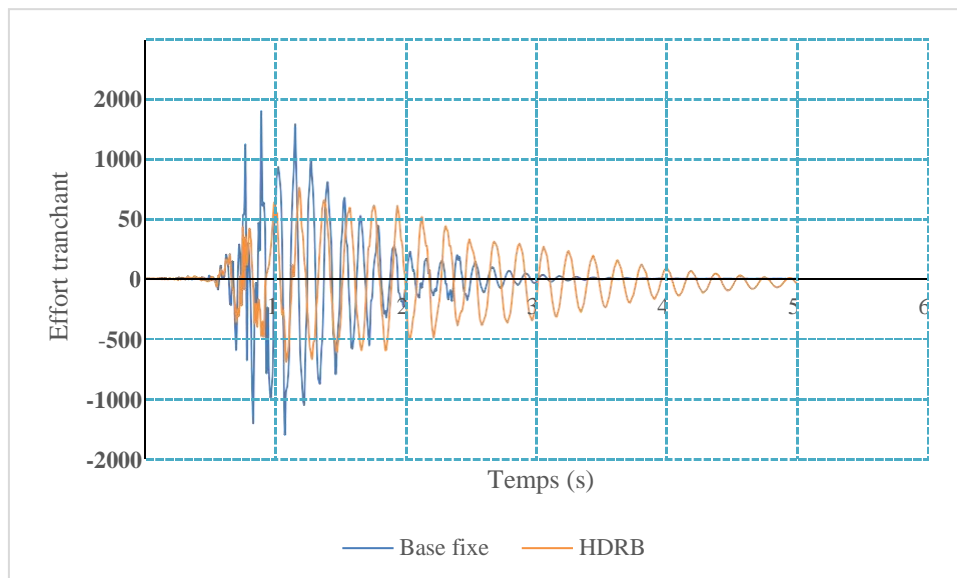


Figure IV.16. Comparaison des Moments à la base pour les deux modèles dans la direction Y.

Les figures (IV.13) et (IV.14) montrent aussi une réduction importante du moment de flexion maximum à la base de la structure par HDRB. Cette diminution du moment de flexion apporte un autre gain dans le dimensionnement et le ferrailage de la structure, ce qui compense les frais des isolateurs.

IV.6. Conclusion

Dans cette partie du travail, on a analysé la contribution des appuis parasismiques à la réponse des structures. D'après les résultats obtenus, on peut conclure les résultats suivants :

- Les périodes du système isolé sont prolongées par rapport aux celles du système à base fixe.
- Les déplacements de la structure isolée sont plus considérables qu'aux déplacements de la structure à base fixe.
- Les déplacements inter-étages de la structure isolée sont quasi nuls. Cela signifie que la structure vibre presque comme un corps rigide.
- Les accélérations de la structure isolée sont moins importantes que celles de la structure à base fixe.
- Les efforts tranchants sont réduits par ce système d'isolation.
- L'efficacité du système HDRB par rapport à base fixe.

Conclusion générale

Pour affronter les actions sismiques et renforcer les structures, il est nécessaire d'adapter des conceptions parasismiques afin de minimiser les dégâts causés par les séismes. Pour cela, le plus convenable est d'ajouter un système de protection sismique. L'isolation à la base est un des concepts les plus applicables dans les ouvrages sujets à l'excitation sismique dans le but de minimiser les effets des excitations dynamiques par la réduction des déplacements relatifs, des accélérations et des efforts tranchants à la base.

Dans cette thèse, les performances des systèmes d'isolations de types (HDRB) ont été étudiées grâce à des études comparatives effectuées sur deux structures de différentes rigidités (dix niveaux) respectivement dans les deux cas : avec et sans dispositif d'amortissement, et pour différents taux d'amortissement ; ceci d'une part. D'autre part, l'étude a été orientée sur l'influence de la nature de l'excitation sismique sur la réponse des structures considérées.

La structure choisie comme cas d'étude, a été dimensionnée selon les codes Algériens (D.T.R, B.A.E.L91 et RPA99).

Une étude comparative d'une structure de moyenne hauteur à base fixe devant une structure isolée montée sur un système HDRB, sous différentes natures d'excitation sismiques et à des taux d'amortissement variables, a permis d'aboutir aux résultats suivants :

- Les périodes de la structure isolée sont allongées par rapport aux périodes de la structure à base fixe.
- Seul le premier mode doit être inclus pour les structures isolées.
- Le déplacement est fortement réduit pour la quasi-totalité des excitations sismiques
- Il à noter que le déplacement inter-étage est réduit considérablement même à un faible taux d'amortissement du système HDRB.
- On enregistre également une très forte réduction de l'effort tranchant à la base tout en augmentant le taux d'amortissement du système d'isolation.
- L'augmentation de la surface de la courbe d'hystérésis se traduit par une grande dissipation d'énergie, cela dénote l'effet majeur de l'isolateur HDRB comme dissipateur d'énergie.
- Le système HDRB s'avère le plus adéquat à un taux d'amortissement de 20% pour toutes les réponses.
- Les résultats obtenus de cette simulation numérique nous permettent d'annoncer que l'isolateur capte les déformations et filtre les accélérations de sorte que la superstructure isolée se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et des déformations quasi-nulles.

Références bibliographiques

- [1] ZACEK M., *Conception parasismique des bâtiments*, Lyon, France, 2010.
- [2] International Conférence of Building Officiels. 1997. Uniform Building Code.
- [3] MOUGIN J.P., *Béton Armé aux Etats Limites 91 modifié99*, deuxième Edition Eyrolles 2000.
- [4] Règles Parasismiques Algériennes RPA99 version 2003, Ministère de l'habitat Centre national de recherche appliqué en génie parasismique.
- [5] Charges Permanentes et Charges d'Exploitation.
- [6] GUIZANIL., Groupe Conseil Inc., *Isolation sismique et technologies parasismiques pour les ponts au Québec : Mise au point*.1997.
- [7] 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.
- [8] INFO EXPOPROTECTION. *Protection parasismique/Place à l'amortissement* [En ligne] (page consultée le 07/12/2012) Disponible sur :
- [9] YOZO S., OSAMU H, et TSUTOMU K., *Structural design of base isolation system for tall building in Japon*, 2004.
- [10] POLYMEDIA. La Revue POLYTECHNIQUE [En ligne] (page consultée le 29/01/2014) Disponible sur : <http://www.polymedia.ch/RpArticles/view/344>
- [11] DEPOSITPHOTOS. Image [En ligne]. Disponible sur : <http://fr.depositphotos.com/25505429/stock-photo-pasadena-city-hall-dome.html>
- [12] CHU de Martinique, *Construction de nouveau plateau technique de l'hôpital PIERE ZOBDA QUITMAN*, 2013, France, 6 p.
- [13] CHU de Martinique, *Un nouveau plateau technique pour le CHU de Martinique*, 2013, France, 60-65 p
- [14] Contact-Chlef, *Contrôle Technique de la Construction*, 2009, 4 p.
- [15] MALKI, L., *Procédés technologiques pour le bâtiment*, El Watan, 20 Novembre 2001.

- [16] CATALIN, S. T., *Commande de systèmes d'isolation antisismique mixte*, Thèse de Doctorat, 2013, Paris, France, 197 p.
- [17] SCRIBD. Les séismes [en ligne] Disponible sur :
<https://fr.scribd.com/doc/288762214/Les-seismes>
- [18] GUIZANI L., Les Industries Z-Tech Inc. *L'isolation sismique des ponts au Canada*, 1997.
- [19] MAGEBA *Dispositif de protection parasismique mageba pour la préservation des structures*, 2015, Bülach, Switzerland, 4 p.
- [20] DOUCEHYDRO. *Isolation à la*
- [21] DAVIDOVICI, V. *Appuis parasismique. Sécurités des bâtiments-Constructions parasismiques* [En ligne] (page consultée le 03/03/2003).
- [22] FRANÇOIS, J., FRAGNET, M., LACOSTE, G et al. *Appareils d'appui en élastomère fretté*, Edition ed. : Sétra, 20017. ISBN 978-2-11-095820-4.
- [23] Charly LAPORTE. *Systèmes parasismiques pour structures*. 25 p
- [24] GP. *Tpe sur le génie parasismique* [En ligne] Disponible sur : http://gp.tpe.free.fr/index_fichiers/Page520.htm
- [25] CARRON, L. *Les systèmes parasismiques* [En ligne] (page consultée le 13/03/2015)
- [26] QUANG, T. N., *Etude du comportement du néoprène et d'appareils d'appui parasismique en néoprène frette*, Thèse de Doctorat, 2013, Strasbourg, France, 138 p.
- [27] KHAC, H. P., *Vulnérabilité et spectres de plancher des structures sismiquement isolées*, Thèse de Doctorat, 2010, 134 p.
- [28] GOODCO Z-TECH, *Appuis en élastomère*, 2010, Montréal, Canada, 20 p.
- [29] AFNOR. *Appareils d'appuis structuraux. Partie3 : Appareils d'appui en élastomère*. NF EN1337-3 [en ligne]. (page consultée le 23/03/2008). ISBN 0335- 3931. 86 p.
- [30] GOODCO Z-TECH, *Appuis de type pot*, 2010, Montréal, Canada, 20 p.
- [31] SEISMES. *Séismes et Préventions*.

- [32] BATH, A., CARPARELLI, H. et CAVALLO, D. Les bâtiments parasismiques [En ligne]
Disponible sur : <http://tpebatimentsparasismiques.weebly.com/les-fondation.html>
- [33] BEN MEKKI, O., Amortissement semi-actif des structures flexibles, Thèse de Doctorat, 2006,
Roma, Italie, 214 p.
- [34] PINKAEW, T., LUKKUNAPRASIT, P. et CHATUPOTE, P. Seismic effectiveness of Tuned Mass Dampers for damage reduction of structures, 2015.
- [35] : Susan Paul, Dr. T. Sundararajan, Prof. Basil Sabu (seismic performance and economic feasibility of structures by optimal positioning of combined base isolation systems) Avril 2017.
- [36] : centre national de recherche appliquée en génie parasismique (CGS) (Conception et Analyse Statique et Dynamique des Structures Sur Appuis Parasismiques) Mars 2006

