

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie civil et d'Hydraulique  
Référence : ...../2019



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية والري  
المرجع ...../2019

## Mémoire de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Thème

# Un système intelligent pour le contrôle de la réponse sismique des bâtiments

Nom et Prénom de l'étudiant :

**GHARBI Belal**

Encadreur :

**Pr OUNIS Abdelhafid**

Promotion Juillet 2019

*REMERCIEMENTS*

*Tout d'abord, je remercie Allah, le clément et miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage et la volonté de mener à bien ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier vivement et sincèrement mon encadreur Pr. **Ounis Abdelhafid** qui a assuré la direction de ce travail, pour tout le soutien, les orientations et la patience manifestée durant son encadrement tout le long de la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie également Dr. **Abdeddaim Mahdi** et Mr. **Salah djerouni** pour sa précieuse aide dans l'élaboration de ce travail. Je lui témoigne toute ma reconnaissance*

*Je remercie vivement les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.*

*Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Je voudrais remercier tous les professeurs qui m'ont enseigné avec tout le sérieux*

**Dédicace**

Ce travail est fortement dédié à mes parents pour leur soutien, leur encouragement et leur patience toute au long de mon parcours scolaire et universitaire, sans eux je ne serai pas là aujourd'hui.

Je dédié ce travail.

A toute ma famille et mes proches sans exception.

A tous mes enseignants.

A tous mes amis (es).

## Résumé

la sécurité et l'intégralité structurale sont de la plus haute importance que les conséquences d'une défaillance structurelle sont dévastatrices. Le maintien de l'intégralité structurale devient particulièrement important lorsque les structures sont soumises aux violents séismes, cas des sollicitations sismiques en champs proche. Il paraît donc évident de s'opposer à ces sollicitations dangereuses d'une manière contrôlée en produisant des forces de réaction adaptée. Divers moyens de contrôle des vibrations ont été considérés pour éviter l'échec catastrophique, tel que le contrôle actif et le contrôle passif.

L'isolation parasismique est une des méthodes promoteurs dans pour atténuer les effets des séismes sur les bâtiments. En revanche, sous excitation de forte amplitudes l'isolation à la base peut subir des grandes déformations et affecte négativement la sécurité et la conformabilité de la structure et des occupants. Une nouvelle approche est envisagée, il s'agit du contrôle hybride en couplant le système semi-actif avec l'isolateur, ce système sera utilisé pour l'atténuation des réponses sismiques de la structure soumise aux excitations sismique. La combinaison des attributs avantageux des systèmes semi-actifs (Amortisseur magnéto-rhéologique) et de l'isolation à la base peut améliorer les performances du système. Des études comparatives sur des structures isolées à la base

**Mots clés :** Isolation à la base ; Contrôle hybride ; Amortisseur magnéto-rhéologique ; Réponse sismique, contrôle semi-actif

### ملخص

الحفاظ على سلامة هياكل البنايات ذات أهمية قصوى لأن عواقب فشل الهيكل مدمرة. يصبح الحفاظ على السلامة الهيكلية بشكل خاص عندما تتعرض هياكل البنايات للزلازل العنيفة، خصوصاً حالة الزلازل ذات المصدر القريب. من الواضح أن أحد الحلول هو مواجهة هذه الهزات الخطرة بطريقة فعالة من خلال إنتاج قوى رد فعل كافية. وقد تم تطوير عدة طرق للسيطرة على الاهتزازات لتجنب كارثة الزلازل، من خلال ميكانيزمات تحكم سلبية وأخرى نصف نشطة. العزل الزلزالي هو واحد من الطرق الفعالة للتخفيف من آثار الزلازل على المباني. لكن، تحت تأثير الزلازل ذات حدة كبيرة يمكن للعازل الزلزالي ان يخضع لتشوهات كبيرة ويؤثر سلباً على سلامة الهيكل والسكان. في هذه الدراسة، تم اقتراح نظام عزل زلزالي هجين للسيطرة على استجابة البنايات تحت تأثير الزلازل. النظام الهجين المقترح مكون من نظام عزل زلزالي مثبت على الاساسات ونظام نصف نشط (مخمد ريو لوجي)، وسيتم استخدام هذا النظام لتخفيف الاستجابات الزلزالية للبنية المعرضة للتأثيرات الزلزالية القوية. يمكن لنظام العزل الزلزالي الهجين المقترح أن يحسن أداء النظام وتقليل تأثير الزلازل على البنايات.

**كلمات مفتاحية:** العزل القاعدي، العزل الهجين، مخمد ريو لوجي، الاستجابات الزلزالية، التحكم النصف نشط.

**Sommaire**

Remerciements .....	I
Dedicace .....	II
Resume .....	III
Sommaire .....	IV
Liste Des Symboles .....	VII
Liste Des Figures.....	VIII
Liste Des Tableaux.....	XI
Introduction Generale.....	1
<b>Chapitre I : Les Systèmes De Contrôle Des Vibrations</b>	
Introduction .....	3
1.2 Les Systemes De Controle Des Vibrations .....	4
1.2.1 CONTROLE PASSIF .....	5
1.2.1.1 Contrôle Passif Avec Isolation A La Base.....	5
a) Isolateur En Elastomère D’amortissement Elevé (Hdr).....	6
b) Isolateur En Pendule De Friction (Fps) .....	6
c) - Isolateur A La Base En Elastomère Avec Barreau De Plomb (Lrb) .....	7
1.2.1.2 Contrôle Passif Avec Dissipateurs D’énergie.....	8
a) Amortisseurs Métalliques.....	8
b)Amortisseurs A Frottement.....	9
c) Amortisseurs Viscoélastiques (Ve).....	10
d)Amortisseur A Fluide Visqueux (Vf) .....	10
1.2.1.3 Systèmes Inertiels Couplés .....	11
a)Les Amortisseurs De Masse Accordée (Tmd- Tuned Mass Damper) .....	11
b)Amortisseurs A Liquide Accordée Tld (Tuned Liquid Damper).....	11
1.2.2 CONTROLE ACTIF .....	12
1.2.2.1 Configuration De Base Des Systèmes De Contrôle Actif .....	13
1.2.2.2 Système A Tendon Actif.....	14
1.2.2.3 Système A Contreventement Actif .....	14
1.2.2.4 Amortisseur A Masse Accordée Actif (Atmd) : .....	15
1.2.3 CONTROLE SEMI-ACTIF .....	16
a) L’amortisseur A Masse Accordée Semi-Actif.....	17
b) Les Amortisseurs A Rigidité Variable.....	18
c) Les Amortisseurs Electro- Rhéologiques .....	18
e) Les Amortisseurs Magnéto-Rhéologiques.....	19
1.3 Les Systemes De Controle Hybride .....	20
1.3.1.AMORTISSEUR A MASSE ACCORDEE HYBRIDE.....	21
1.3.2 L’ISOLATION A LA BASE HYBRIDE.....	22

1.4.Conclusion.....	22
Chapitre II l'isolation parasismique	
2.1. Introduction .....	23
2.2. Generalites Sur La Technique D'isolation Parasismique.....	23
2.2.2. PRINCIPE DE BASE.....	24
2.3. Isolateur Elastomerique Avec Noyau De Plomb.....	25
2.3.1. MODELES POUR LES SYSTEMES D'ISOLATION A LA BASE .....	27
2.3.2 MODELISATION MATHEMATIQUE .....	27
2.3.2.1. Système D'isolation En Caoutchouc Avec Amortisseur En Barreau De Plomb Lrb .....	27
2.3.2.2. Structure A N Ddl Montée Sur Système D'isolation (Lrb) .....	28
2.4. Formulation Des Equations De Mouvement Des Structures Isolees A La Base Par Analyse Lineaire .....	29
2.4.1 ANALYSE D'UNE STRUCTURE A DEUX DEGRES DE LIBERTE .....	29
2.4.1.1. Equations De Mouvement.....	30
2.4.1.2. Formulation Matricielle .....	30
2.5. Generalisations De L'equation Au Systeme A Plusieurs Degres De Liberte .....	31
2.6. Conclusion.....	35
3.1. Introduction .....	36
3.2. Controle Semi Actif Par Amortisseur Magneto-Rheologique (Revue De La Litterature)	36
3.3. Generalites Sur Les Fluides Mr.....	38
3.3.1. FLUIDES MAGNETO-RHEOLOGIQUES .....	38
3.3.2. MODE DE FONCTIONNEMENT DES FLUIDES MR .....	39
3.3.2.1. Mode De Fonctionnement En Compression .....	39
3.3.2.2. Mode De Fonctionnement En Cisaillement .....	39
3.3.2.3. Mode Valve.....	40
3.3.4. MODELISATION DES FLUIDES MR.....	40
3.3.4.1. La Viscosité .....	40
3.3.4.2. Propriétés Fondamentales Des Fluides Mr .....	41
3.4. Description De L'amortisseur Magneto-Rheologique .....	41
3.5. Geometrie Des Amortisseuses Magnetos Rheologiques.....	42
3.5.1. L'AMORTISSEUR DE TYPE MONOTUBE .....	42
3.5.2. L'AMORTISSEUR BITUBE OU DOUBLE CYLINDRE .....	42
3.6. Modeles Mecaniques Des Amortisseurs Mr .....	43
3.6.1. MODELE BINGHAM .....	43
3.6.2. MODELE DE GAMOTA ET FILISCO .....	44
3.6.3. MODELE BOUC-WEN .....	45
3.6.4. MODELE BOUC-WEN MODIFIE .....	47

3.7. Conclusion.....	49
----------------------	----

**CHAPITRE IV FORMULATION MATHEMATIQUE ET NUMERIQUE PAR  
REPRESENTATION D'ETAT« STATE SPACE »**

4.1. Introduction .....	50
4.2. Hypotheses .....	50
4.3. Equation De Mouvement D'un Batiment Equipe De Dispositif De Controle .....	51
4.3.1. SOLUTION EN REPRESENTATION D'ETAT ( STATE SPACE ) .....	51
4.3.2. LA FORME GENERALE .....	51
4.4. Exemple Systeme A Cinq Etages Avec Isolation A La Base Equipe D'un Amortisseur Mr .....	53
4.4.1. EQUATIONS DE MOUVEMENT .....	54
4.4.2. EQUATIONS DE MOUVEMENT POUR CHAQUE MASSE : .....	54
4.5. Resolution Numerique.....	59
4.5.1 DESCRIPTION DE LA STRUCTURE .....	61
4.5.2. DESCRIPTION DE L'ISOLATEUR .....	63
4.5.3. DESCRIPTION DES EXCITATIONS SISMIQUES.....	63
4.6. Conclusion.....	65

**Chapitre V Résultats**

5.1 Introduction .....	66
5.2 Deplacement En Tete .....	66
5.3 Deplacement A La Base .....	68
5.4 Effort Tranchant A La Base .....	70
5.5 Deplacement Inter-Etages .....	73
5.6 Conclusion.....	75
Conclusion Generale .....	76
References Bibliographique .....	77

## Liste des symboles

---

### Liste des symboles

$m_s$  : La masse de la superstructure du bâtiment

$m_b$ : La masse de la base

$k_s$  : La raideur de la structure

$c_s$  : L'amortissement de la structure

$k_b, c_b$  : La rigidité et l'amortissement de l'isolateur

$u_s$  : Le déplacements absolus du structure

$u_b$  : Le déplacement absolu de la base

$v_s, v_b$  : Les déplacements relatifs (structure-base)

$u_g$  : Le déplacement du sol

$\dot{u}_s$  : La vitesse absolue de la structure

$\dot{u}_b$  : La vitesse absolue de la base

$\ddot{u}_s$  : L'accélération absolue de la structure

$\{\Gamma\}$  : Vecteur de distribution des efforts sismiques :

[A]:La matrice d'état (state matrix)

[B]: La matrice d'entrée, (input matrix)

[C] : La matrice de sortie (output matrix)

[D] : La matrice de transmission directe entre les entrées et les sorties du système

$\dot{y}$  : Vecteur d'entrée (input)

$\eta$  : La viscosité dynamique

$\Delta V$  : La différence de vitesse des couche

$\Delta Z$  : Distance entre deux couches

S :la surface de séparation de deux couches de fluide

$\tau$  : Contrainte de cisaillement de deux couches de fluide



## Liste Des Figures

---

### Liste Des Figures

#### Chapitre I : les systèmes de contrôle de vibrations

<b>Figure 1.1</b> : Mécanismes de contrôle des vibrations.....	4
<b>Figure 1.2</b> : Diagramme de contrôle passif.....	5
<b>Figure 1.3</b> : Isolateur en élastomère d'amortissement élevé (HDR).....	6
<b>Figure 1.4</b> : Isolateur en pendule de friction (FPS).....	6
<b>Figure 1.5</b> : Isolateur de base en élastomère avec barreau de plomb (LRB).....	7
<b>Figure 1.6</b> : Amortisseur TADAS, a) les plaques triangulaires b) les plaques soudées.....	8
<b>Figure 1.7 : i)</b> L'amortisseur de Sumitomo.....	9
<b>Figure 1.7 : ii)</b> L'amortisseur de Pall.....	9
<b>Figure 1.7 : iii)</b> Amortisseur boulonné encoché.....	9
<b>Figure 1.8</b> : Amortisseur viscoélastique en diagonal.....	10
<b>Figure 1.9</b> : Amortisseurs visqueux fluide développé par Taylor Company.....	10
<b>Figure 1.10</b> : les amortisseurs de masse accordée (TMD).....	11
<b>Figure 1.11</b> : Amortisseur à liquide accordé TLD à ballotement.....	11
<b>Figure 1.12</b> : Diagramme d'un contrôle actif.....	13
<b>Figure 1.13</b> : structure équipée d'un tendon actif.....	14
<b>Figure 1.14</b> : structure équipée d'un contreventement actif.....	14
<b>Figure 1.15</b> : Configuration de base d'une structure équipée d'un ATMD actif.....	15
<b>Figure 1.16</b> : Diagramme de contrôle Semi- Actif.....	16
<b>Figure 1.17</b> : Amortisseur semi actif de masse accordée.....	17
<b>Figure 1.18</b> : Amortisseur à liquide accordé semi-actif.....	17
<b>Figure 1.19</b> : Amortisseur semi-actif à rigidité variable.....	18
<b>Figure 1.20</b> : Amortisseur Electro- rhéologique .....	18
<b>Figure 1.21</b> : schéma de l'amortisseur magnéto-rhéologique.....	19
<b>Figure 1.21</b> : Configuration de base d'un Amortisseur à masse accordée hybride a) ATMD actif +ATMD actif Li et al. b) TMD passif +ATMD actif Cheng et al.....	21
<b>Figure 1.22</b> : Contrôle hybride d'une structure isolée à la base.....	22
<b>Chapitre II : l'isolation parasismique</b>	
<b>Figure 2.1</b> : Morceaux de bois installés entre la base et le palier des maisons en Iran.....	23
<b>Figure 2.2</b> : Bâtiment d'un tribunal en Angleterre traité ayant des isolateurs de base.....	24
<b>Figure 2.4</b> : Isolateur de base en élastomère avec noyau de plomb (LRB).....	25

## Liste Des Figures

---

<b>Figure 2.5 :</b> Courbe force-déplacement (LRB).....	27
<b>Figure 2.6:</b> Modèle mathématique pour un système d'isolation de type LRB.....	27
<b>Figure 2.7 :</b> Modèle mathématique d'une structure à N DDL montée sur un système d'isolation de type LRB.....	28
<b>Figure 2.8 :</b> Paramètres d'une structure isolée à deux degrés de libertés.....	29
<b>Figure 2.9 :</b> Structure à 1 degré de liberté à base fixe et isolée.....	31
<b>Figure 2.10 :</b> Structure à plusieurs étages équipée d'un isolateur parasismique.....	32

### Chapitre III : Amortisseur magnéto rhéologique

<b>Figure 3.1 :</b> Fluide magnéto-rhéologique avec et sans la présence d'un champ magnétique..	38
<b>Figure 3.2 :</b> Mode de fonctionnement en compression.....	39
<b>Figure 3.3 :</b> Mode de fonctionnement en cisaillement.....	39
<b>Figure 3.4 :</b> Mode de fonctionnement en valve.....	40
<b>Figure 3.5 :</b> Profil de vitesse d'un fluide.....	40
<b>Figure 3.6 :</b> Principe de fonctionnement d'un amortisseur MR.....	41
<b>Figure 3.7 :</b> Géométries d'un amortisseur monotube fonctionnant en mode valve (a) et mode valve et cisaillement (b).....	42
<b>Figure 3.8 :</b> Schéma d'un amortisseur MR bitube.....	42
<b>Figure 3.9 :</b> Modèle Bingham.....	43
<b>Figure 3.10 :</b> Modèle de Gamota et Filisco.....	44
<b>Figure 3.11:</b> Model Bouc-Wen.....	45
<b>Figure 3.12 :</b> Comparaison entre le comportement prédit par le model Bouc-Wen et le model réel de l'amortisseur MR.....	46
<b>Figure 3.13 :</b> Modèle Bouc-Wen modifié.....	47
<b>Figure 3.14:</b> Comparaison entre le comportement prédit par le model Bouc-Wen modifié et le model réel de l'amortisseur MR.....	48
<b>Figure 3.15:</b> Relation entre le voltage et les boucles d'hystérésis force déformation et force vitesse.....	49

### CHAPITRE IV : FORMULATION MATHÉMATIQUE ET NUMÉRIQUE PAR REPRÉSENTATION D'ÉTAT« STATE SPACE »

<b>Figure 4.1 :</b> Diagramme d'un modèle de bâtiment isolée a la base avec un amortisseur MR...	51
--	----

## Liste Des Figures

---

<b>Fig.4.2</b> : Forme générale de la représentation d'état « state space », (single input, single output) .....	52
Fig.4.3 : bâtiment 5 étages avec isolation à la base et amortisseur MR.....	53
Fig.4.4. Diagrammes de corps libres.....	53
<b>Figure 4.5</b> : Fichier Simulink de la représentation d'état.....	59
<b>Figure 4.6</b> : Fichier Simulink du modèle Bouc-Wen modifié de l'amortisseur MR.....	60
<b>Figure 4.7</b> : Fichier Simulink amortisseur MR Bouc-Wen modifié, suite.....	60
<b>Figure 4.8</b> : Modèle bidimensionnel de la structure étudiée.....	62
<b>Figure 4.9</b> : Accélérogramme des excitations sismiques.....	64
<b>Figure 4.10</b> : Diagramme de résolution par MATLAB.....	65

### Chapitre V : Résultats

<b>Figure 5.1</b> Déplacement en tête du bâtiment sous diverses stratégies de contrôle.....	67
<b>Figure 5.2</b> Déplacement à la base du bâtiment sous diverses stratégies de contrôle.....	69
<b>Figure 5.3</b> : Effort tranchant à la base du bâtiment soumis au séisme Nothridge, sous divers voltages de l'amortisseur MR.....	71
<b>Figure 5.4</b> : Effort tranchant à la base du bâtiment soumis au séisme Kobe, sous divers voltages de l'amortisseur MR.....	71
<b>Figure 5.5</b> : Effort tranchant à la base du bâtiment soumis au séisme Chi-Chi, sous divers voltages de l'amortisseur MR.....	72
<b>Figure 5.6</b> : Effort tranchant à la base du bâtiment soumis au séisme Impvall, sous divers voltages de l'amortisseur MR.....	72
<b>Figure 5.7</b> : Déplacement inter-étage du bâtiment soumis au séisme de Northridge, pour divers voltages de l'amortisseur MR.....	73
<b>Figure 5.8</b> : Déplacement inter-étage du bâtiment soumis au séisme de Kobe, pour divers voltages de l'amortisseur MR.....	73
<b>Figure 5.9</b> : Déplacement inter-étage du bâtiment soumis au séisme de Chi-Chi , pour divers voltages de l'amortisseur MR.....	74
<b>Figure 5.10</b> : Déplacement inter-étage du bâtiment soumis au séisme de Impvall , pour divers voltages de l'amortisseur MR.....	74

**LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau 4.1:</b> Paramètres du modèle prototype MR amortisseur.....	61
<b>Tableau 4.2:</b> Les paramètres de structure.....	62
<b>Tableau 4.3:</b> Paramètres de l'isolateur.....	63
<b>Tableau 5.1</b> Déplacement en tête du bâtiment sous diverses stratégies de contrôle.....	66
<b>Tableau 5.2 :</b> déplacement à la base du bâtiment.....	68
<b>Tableau 5.3 :</b> Effort tranchant à la base.....	70

### INTRODUCTION GENERALE

Un séisme correspond à une fracturation des roches en profondeur le long d'une faille généralement préexistante. Cette rupture s'accompagne d'une libération soudaine d'une grande quantité d'énergie qui se traduit en surface par des vibrations du sol. Le séisme est le risque naturel majeur le plus meurtrier et qui cause le plus de dégâts. De 1994 à 2004, les séismes ont fait plus de 80 000 victimes dans le monde. Comme exemple sur tous les séismes récents (Northridge, 1994 ; Kobe, 1995 ; Imit, 1999 ; Boumerdes, 2003).

Le mouvement de sol est transmis aux constructions par l'intermédiaire de leurs fondations ; si le sol pouvait se déplacer librement sous les ouvrages, ce mouvement ne pourrait être transmis. Dans ce contexte a émergé, ces dernières années, l'idée d'introduire entre le sol et les bâtiments un filtre, permettant de dissiper le maximum d'énergie. Cette stratégie appelée isolation parasismique.

L'isolation sismique a émergé comme une alternative attrayante qui promet la réalisation d'économies à court et à long terme.

L'isolation à la base est l'un des systèmes classiques les plus répandus pour la protection des structures ; la facilité de sa mise en place ainsi que ses bonnes performances ont encouragé un nombre important de pays à introduire cette technique dans leurs codes de calcul. Ainsi un grand nombre de bâtiments sont équipés de cette technologie révolutionnaire.

Le développement rapide des technologies des constructions a accéléré l'apparition des gratte-ciel et des bâtiments de moyennes et grandes hauteurs. Pour protéger ce type de structures des actions sismiques, l'isolation à la base ne suffit pas à elle seule pour contrôler la réponse sismique. Ainsi, il est devenu nécessaire d'introduire d'autres dispositifs pour agir comme force de recentrage au niveau des étages supérieurs des structures à grande hauteur équipée de système d'isolation à la base.

L'ajout de système de contrôle additionnel à une structure isolée à la base permet de former un système de contrôle dit « hybride ». L'hybridation permet de corriger les limites des deux systèmes de contrôle pour former un seul système efficace.

Dans notre étude l'efficacité d'un contrôle hybride formé d'un système d'isolation à la base et d'un amortisseur à magnéto-rhéologique (MR) est étudiée pour une structure de 8 étages soumise à diverses excitations sismiques. L'objectif principal de cette combinaison est de limiter les grands déplacements au sommet et à la base de la structure isolé en utilisant l'amortisseur magnéto-rhéologique (MR) placé au niveau de base de la structure comme force de contrôle. Afin de mettre en évidence les résultats obtenus ce mémoire sera organisé en cinq chapitres agencés comme suit :

**Le premier chapitre** présente les systèmes de contrôle des vibrations passif, semi actif, actif et hybride. Avec description, les schémas de chaque système, les types de chaque système seront présentés.

**Le deuxième chapitre** décrit les concepts théoriques de l'isolation parasismique tels que les modèles mathématiques de d'isolateur LRB (Lead-rubber bearings) et la formulation des équations du mouvement pour les deux structures isolées ou combinées (le système d'isolation et la superstructure) à 2 DDL et N DDL.

**Le troisième chapitre** présent la description de l'amortisseur magnéto-rhéologique MR, ainsi qu'une description sur le fluide magnéto-rhéologique, le mode de fonctionnement de ce type d'amortisseur MR et la modélisation des fluides MR. Nous allons ensuite présenter quelques modèles rhéologiques de la littérature ainsi que le modèle que nous avons utilisé dans cette étude, La comparaison entre les résultats expérimentaux va justifier notre choix sur le modèle proposé.

**Le quatrième chapitre présente** la description de formulation mathématique et résolution numérique en représentation d'état « *state space* » d'un système dynamique. On présente la description et les hypothèses pour validée la méthode de représentation d'état, la définition de la forme générale de la représentation d'état. La résolution d'un exemple système dynamique en représentation d'état est aussi présentée pour structure cinq étage isolée a la base avec amortisseur MR. La résolution numérique à travers MATLAB est aussi présentée en parallèle avec la description des paramètres de structure et l'isolateur étudiée et des excitations sismiques employées.

**Le cinquième chapitre** concerne les résultats de l'analyse numérique. Ces résultats sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques.

**CHAPITRE I**  
**LES SYSTÈMES**  
**DE CONTRÔLE DE VIBRATION**

### **1.1. Introduction**

Les ouvrages de génie civil, tels que les bâtiments, les ponts et les tours, peuvent vibrer fortement ou même s'effondrer lorsqu'ils sont soumis à de fortes excitations dues au vent ou aux séismes. Concevoir des structures pour résister aux dommages sismiques reste un défi pour les ingénieurs civils. Malgré les efforts intenses déployés en faveur de la conception de codes et de la construction résistants au vent et aux séismes, les structures sont toujours vulnérables face aux excitations de forte intensité.

Traditionnellement, les structures sont conçues pour dépendre totalement de leur propre rigidité pour résister à la force des séismes et sur leur faible taux d'amortissement. L'inefficacité des conceptions traditionnelles résistantes aux différentes excitations a conduit à l'application de la technologie de structure intelligente innovante de génie civil. Cette technologie a progressivement gagné en popularité à mesure que la mise en œuvre pratique continue de montrer que ce concept est un moyen prometteur pour protéger les structures face aux excitations dynamiques.

Grâce à la technologie de structures intelligentes, des dispositifs et des systèmes sont incorporés à la structure pour augmenter sa capacité de résistance aux séismes. La structure engage alors non seulement sa propre résistance mais également celle de ces dispositifs pour dissiper l'énergie dynamique afin de résister à la force sismique. Ces dispositifs connus sous le nom de système de contrôle de vibration peuvent être classés en quatre catégories principales : contrôle passif, actif, semi-actif et hybride.



### 1.2 Les systèmes de contrôle des vibrations

Les systèmes de protection sismique peuvent être classés en quatre catégories : passif, actif, semi-actif et hybride comme le montre la figure (1.1)

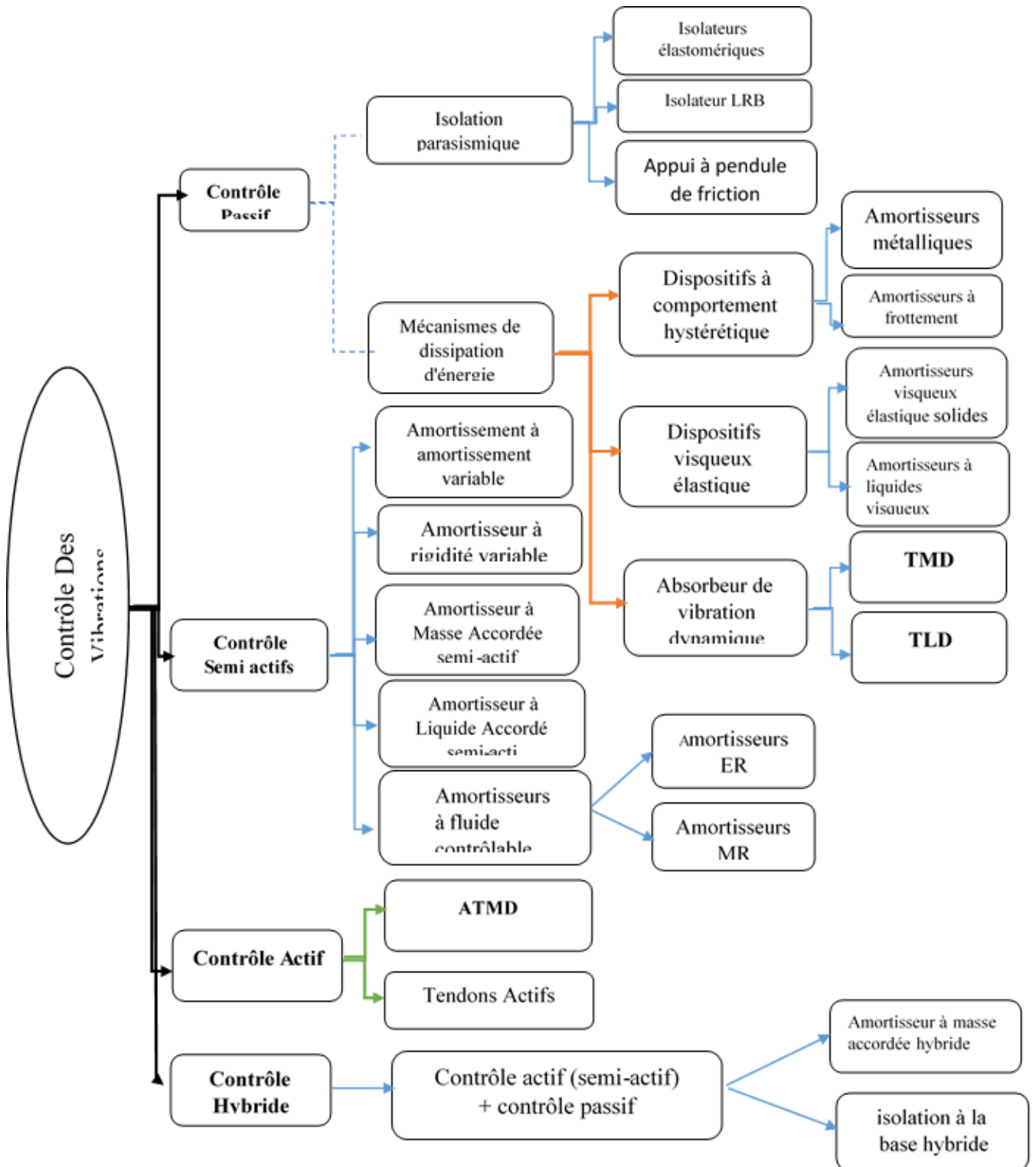


Figure 1.1 Mécanismes de contrôle des vibrations

### 1.2.1 Contrôle passif

Le contrôle passif consiste à équiper la structure d'un dispositif qui dissipe l'énergie ou filtre la transmission des efforts dans la structure. L'intégration ou l'ajout de systèmes, possédant des propriétés amortissantes, couplés à la structure de telle façon que les vibrations de la structure soient amorties passivement ne nécessite aucune source d'énergie externe. Dans le contrôle passif, la masse, l'amortissement, la rigidité ou leur combinaison sont modifiées en ajoutant des composants à la structure. Ces composants sont actionnés par les mouvements de la structure et fournissent des forces de contrôle en fonction de leurs caractéristiques dynamiques. Principalement, il existe deux catégories de systèmes passifs : L'isolation sismique à la base et le système de dissipation d'énergie.

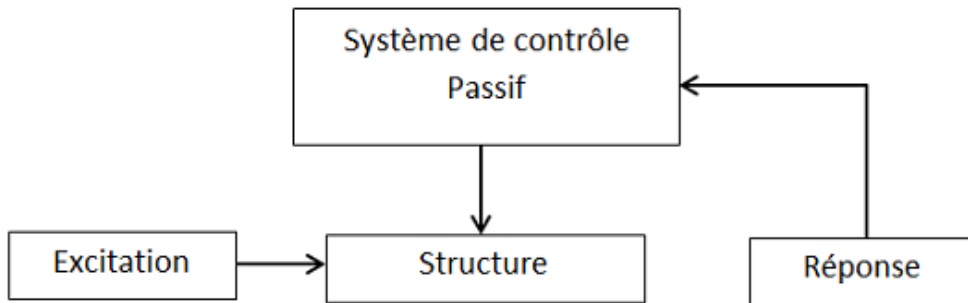


Figure 1.2 Diagramme de contrôle passif

#### 1.2.1.1 Contrôle passif avec isolation à la base

L'isolation sismique est une stratégie de conception fondée sur l'idée qu'il est possible de séparer la structure du mouvement du sol en introduisant des éléments souples entre la structure et les fondations. Les isolateurs permettent de réduire sensiblement la rigidité structurelle du système, offrant une période fondamentale de la structure isolée beaucoup plus grande que celle de la même structure sans isolateurs[1]. Il existe essentiellement deux types de système d'isolation : les isolateurs en élastomère et les systèmes glissants.

**a) Isolateur en élastomère d'amortissement élevé (HDR)**

Un isolateur en élastomère d'amortissement élevé (figure 1.3) est constitué de plusieurs couches en caoutchouc avec des propriétés d'amortissement élevées séparées par des plaques en acier afin d'augmenter la rigidité verticale

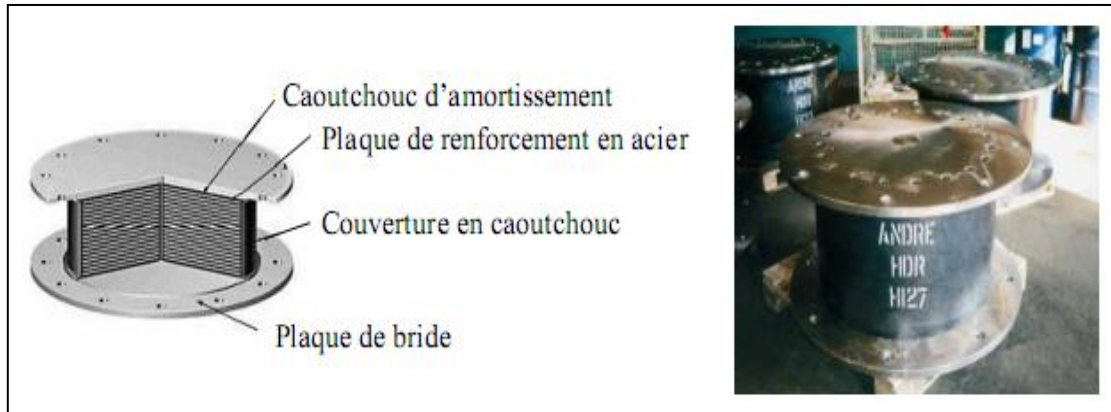


Figure 1.3 : Isolateur en élastomère d'amortissement élevé (HDR)

**b) Isolateur en pendule de friction (FPS)**

Il est constitué d'une surface sphérique d'acier inoxydable et d'un glisseur articulé en matériaux composite à base de Téflon. Le système d'isolation FPS (*Friction Pendulum System*) est composé d'un mécanisme de reconstitution (restauration) basé sur sa géométrie concave figure 1.4 [1;2]

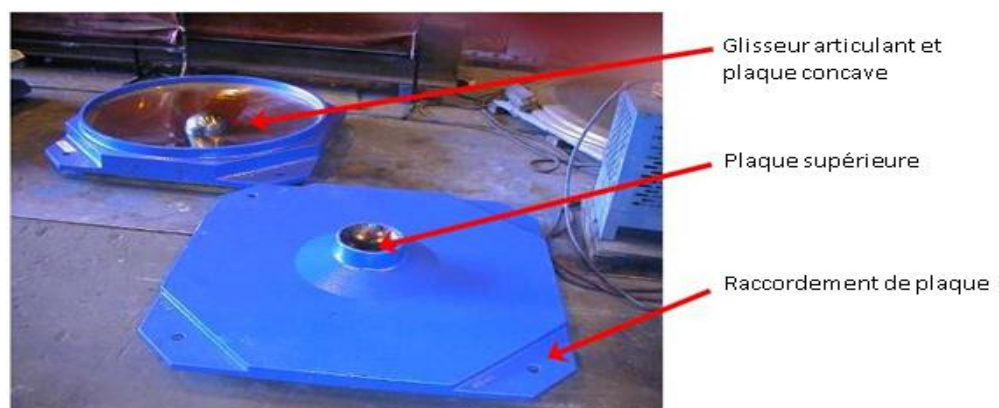


Figure 1.4: Isolateur en pendule de friction (FPS)

**c) - Isolateur à la base en élastomère avec barreau de plomb (LRB)**

Un isolateur LRB comme le montre la figure 1.5 est construite d'une alternance de couches de caoutchouc et d'acier qui contribue à assurer la stabilité, soutient la structure et isole les vibrations. En outre un noyau de plomb inséré comme centre de LRB pour augmenter l'effet d'amortissement.[3]

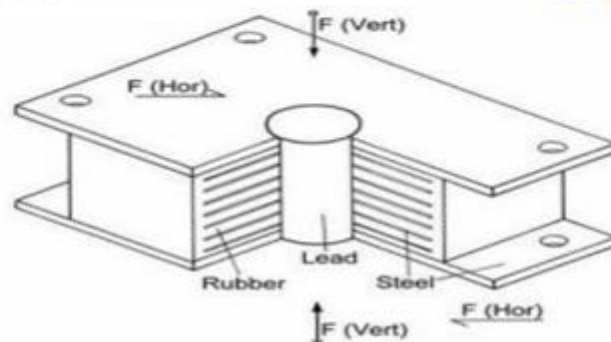
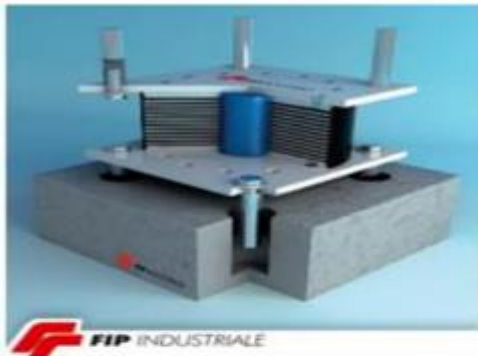
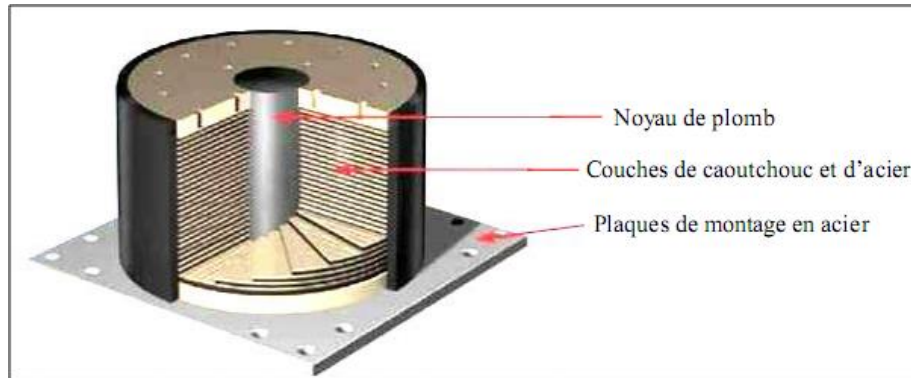


Figure 1.5 : Isolateur de base en élastomère avec barreau de plomb (LRB)

### 1.2.1.2 Contrôle passif avec dissipateurs d'énergie

Les systèmes de dissipation d'énergie passifs utilisent des dispositifs mécaniques pour dissiper une partie de l'énergie d'entrée structurelle, réduisant ainsi la réponse structurelle et les dommages structurels possibles. Ces dispositifs sont utilisés pour atténuer les vibrations structurelles face à des excitations sismiques. Les systèmes passifs typiques sont les amortisseurs de masse accordée (TMD- *Tuned Mass Damper*), les dispositifs de friction, les dispositifs d'amortissement métalliques, les amortisseurs visqueux élastiques et les amortisseurs à fluide visqueux. Les systèmes de dissipation passifs ne nécessitent aucune source d'énergie externe ni des dispositifs de mesure de la réponse structurelle

#### a) Amortisseurs métalliques

Ils sont comptés parmi les mécanismes les plus efficaces pour la dissipation de l'énergie d'entrée à une structure pendant un tremblement de terre. En structures métalliques traditionnelles, la conception parasismique dépend de la ductilité des pièces de charpente pour absorber l'énergie sismique. On a beaucoup de nouvelles conceptions, y compris les amortisseurs de la forme-X et des plaques triangulaires affichés dans figure 1.6 :

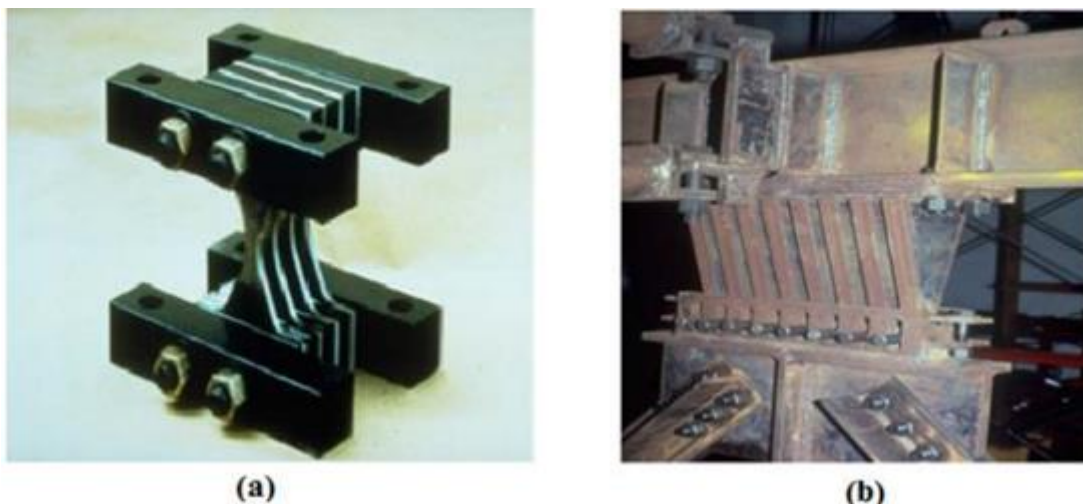


Figure 1.6 : Amortisseur TADAS, a) les plaques triangulaires b) les plaques soudées



**b) Amortisseurs à frottement**

Le frottement est un mécanisme efficace, fiable, économique, et largement appliqué, le principe de ces amortisseurs repose sur le phénomène de dissipation de l'énergie par friction, on cite :

- i. L'amortisseur de Sumitomo (Figure 1.7 i)
- ii. L'amortisseur de Pall (Figure 1.7 ii)
- iii. Amortisseur boulonné encoché (Figure 1.7 iii)

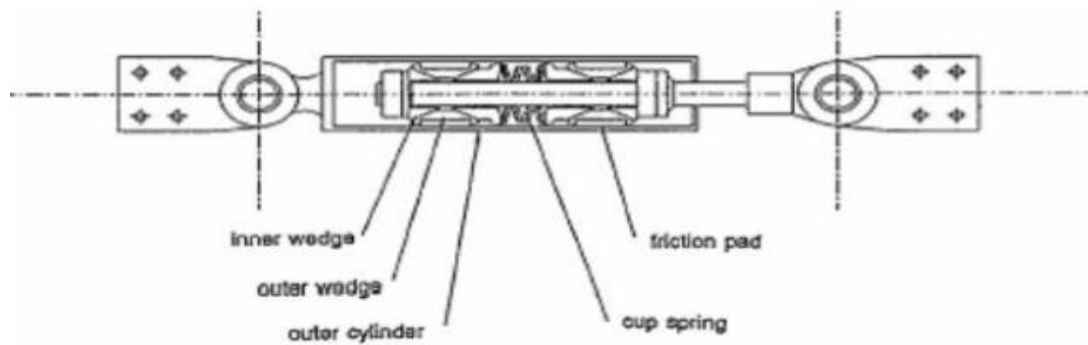


Figure 1.7 i) L'amortisseur de Sumitomo .Aiken et al. [4]



Figure 1.7 : ii) L'amortisseur de Pall.[5]

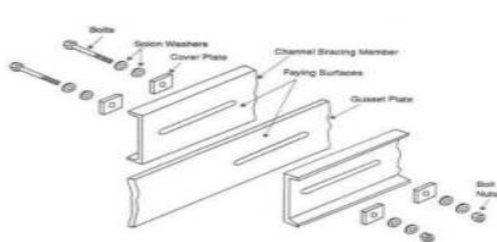


Figure 1.7 : iii) Amortisseur boulonné encoché

**c) Amortisseurs viscoélastiques (VE)**

Les amortisseurs viscoélastiques (VE) se composent des matériaux viscoélastiques avec un taux d'amortissement élevé pour dissiper l'énergie par déformation. De tels matériaux comprennent le caoutchouc et/ou les polymères. Un amortisseur viscoélastique typique est constitué de couches d'un matériau viscoélastique collé sur des plaques d'acier, comme le montre la Figure 1.8. Des détails supplémentaires sur les applications des amortisseurs peuvent être consultés dans les références *Crosby et al.* [6] et *Soong et al.* [7]

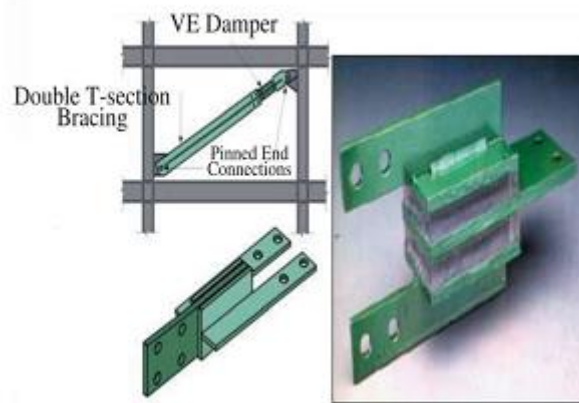


Figure 1.8 : Amortisseur viscoélastique en diagonal *Chang et al.* [8]

**d) Amortisseur à fluide visqueux (VF)**

La conception la plus prometteuse des amortisseurs VF est illustrée à la figure 1.9. Une conception simple est obtenue avec un amortisseur classique et la dissipation se produit en convertissant l'énergie cinétique en chaleur lorsque le piston se déplace et déforme un fluide très visqueux

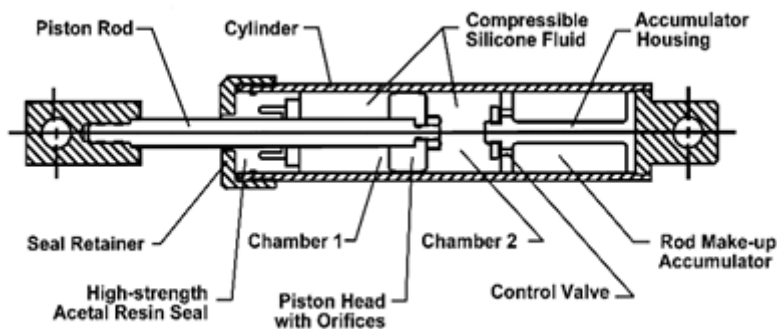


Figure 1.9 : Amortisseurs visqueux fluide développé par Taylor Company *Taylor* [9]

### 1.2.1.3 Systèmes inertiels couplés

Consiste en une masse solide ou liquide située à l'un des étages les plus élevés du bâtiment et lié à celui-ci via un ressort et un mécanisme d'amortissement (visqueux ou viscoélastique)

#### a) Les amortisseurs de masse accordée (TMD- *Tuned Mass Damper*)

Les amortisseurs de masse accordée, consistent en leur simple forme en un système auxiliaire (secondaire) de masse  $m_d$  et d'un ressort de rigidité  $k_d$  et un amortisseur  $c_d$  fixé sur la structure principale, généralement au sommet de la structure, comme le montre la figure 1.10. [10]

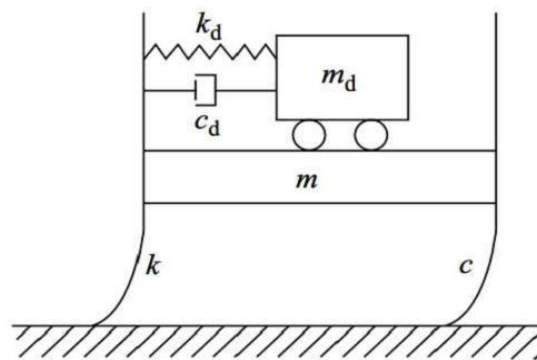


Figure 1.10 : les amortisseurs de masse accordée (TMD) [11]

#### b) Amortisseurs à liquide accordée TLD (Tuned Liquid Damper)

Un autre type d'absorbeur dynamique pour le contrôle des vibrations structurelles est le TLD. Dans un TLD, l'eau ou un autre liquide sert comme masse en mouvement, et la force de rappel est générée par la gravité. La vibration structurelle secoue le TLD et induit le mouvement du liquide à l'intérieur du conteneur, comme le montre la figure 1.11

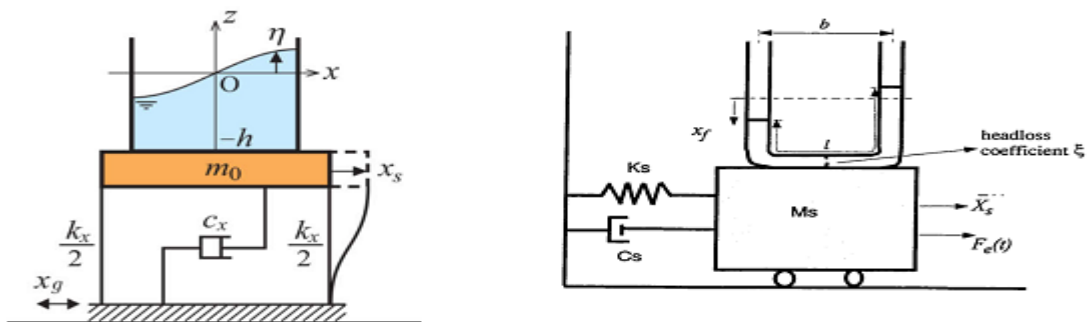


Figure 1.11 : Amortisseur à liquide accordé TLD à ballotement [12]



### 1.2.2 Contrôle actif

Les systèmes de contrôle passif sont rentables et fiables, mais leur capacité et/ou leur intelligence est limitée pour le contrôle structurel de la réponse sismique. Les systèmes passifs ont des mécanismes simples et sont faciles à fabriquer, mais ils ne sont pas suffisamment adaptés à l'excitation extérieure, car ils ne sentent ni l'excitation, ni la réponse, ni l'utilisation d'une force de contrôle externe. Certains d'entre eux, comme les TMD et les TLD, ne sont efficaces que pour le contrôle des réponses structurelles avec un mode dominant, comme les vibrations de structure induites par le vent. Ainsi, il est clairement nécessaire d'avoir un système adaptatif plus puissant pour protéger les structures des vibrations et des dommages excessifs causés par les séismes forts où les modes multiples sont importants dans la réponse structurelle. Cela a conduit à l'émergence de structures intelligentes avec un contrôle actif de la réponse. Cette technique innovante utilise des dispositifs spéciaux, tels que des actionneurs électrohydrauliques pour générer la force de contrôle requise contre la charge sismique en renvoyant la réponse structurale mesurée. Cette force de contrôle peut servir d'amortissement supplémentaire, réduisant ainsi les vibrations structurelles sous les excitations de service, du vent et du séisme. Les systèmes de contrôle actif ont été largement utilisés pour éliminer les bruits et les vibrations structurelles dans les industries mécaniques et aérospatiales. Leur application aux grands ouvrages de génie civil. Est un domaine novateur en recherche et développement *Cheng [13], Cheng et al. [14], Cheng et al. [15], Meirovitch [16], Soong et al. [17]*.

en reçu attention considérable ces dernières années en raison des avantages suivants :

- Amélioration de l'efficacité du contrôle.
- Le contrôle actif est sensible aux perturbations externes.
- Sélectivité des objectifs de contrôle, le système de contrôle peut être conçu pour divers objectifs, tels que la sécurité structurelle ou le confort humain.
- Applicabilité à différents mécanismes d'excitation. Le contrôle actif couvre une large gamme de fréquences, c'est-à-dire tous les modes significatifs de la structure. Un système de contrôle actif peut réduire efficacement les effets des vents et/ou séismes.

### 1.2.2.1 Configuration de base des systèmes de contrôle actif

Un système de contrôle actif est entièrement adaptable. Les structures équipées des systèmes actifs utilisent une source externe d'énergie pour générer la force de contrôle, appliquée directement à la structure pour réduire sa réponse. Étant donné que les structures de génie civil sont généralement de grandes dimensions, d'énormes équipements de génération de force et de grandes sources d'énergie externe sont nécessaires pour le contrôle actif de la réponse sismique

De contrôle actif est composé de trois éléments principaux : capteur (s), actionneur (s) et un contrôleur avec un algorithme de contrôle prédéterminé.

Les capteurs peuvent être installés sur la structure pour mesurer les excitations externes ainsi que sur le dispositif de contrôle pour mesurer des grandeurs telles que les déplacements, les vitesses, les accélérations et les forces de contrôle. Les dispositifs de contrôle peuvent également avoir des capteurs intégrés pour surveiller leur comportement

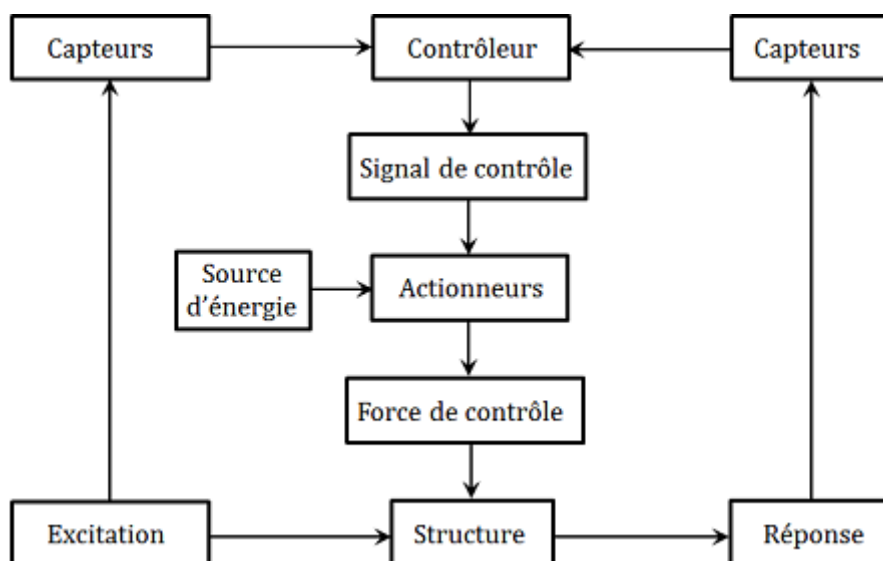


Figure 1.12: Diagramme d'un contrôle actif

Dans un système de structure intelligente, le contrôleur est similaire au cerveau humain. Il reçoit les mesures des capteurs, les analyse et génère les signaux de contrôle nécessaires pour entraîner l'actionneur sur la base d'un algorithme de contrôle prédéterminé. Ainsi, le contrôleur est un processeur d'information qui produit des signaux d'actionnement par une fonction de rétroaction (*feedback*) des mesures des capteurs.

### 1.2.2.2 Système à tendon actif

Les systèmes de contrôle de tendons actifs consistent en un ensemble de tendons précontraints dont la tension est contrôlée par des servomécanismes électro-hydrauliques. La figure 1.13 montre une configuration typique d'un système de contrôle actif utilisant des tendons actifs. Les tendons actifs sont installés entre deux étages d'une structure de bâtiment.

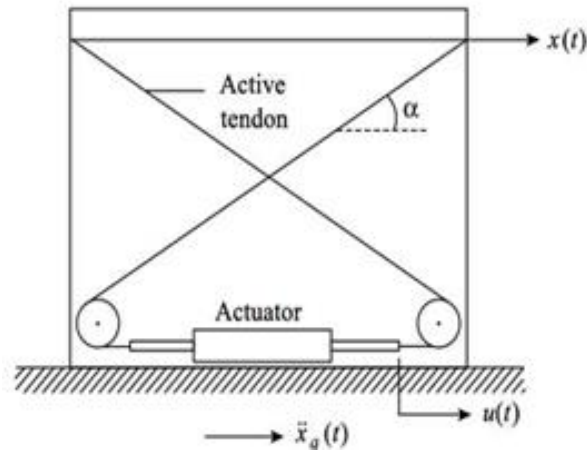


Figure 1.13: structure équipée d'un tendon actif

### 1.2.2.3 Système à contreventement actif

Un système de contreventement actif utilise des entretoises (contreventement) de structure existantes pour installer un dispositif de contrôle actif (c'est-à-dire un actionneur) sur la structure. On peut utiliser trois types de systèmes de contreventement actif-diagonaux, contreventement en K, contreventement en X, identiques à ceux des amortisseurs passifs, comme le montre la figure 1.14

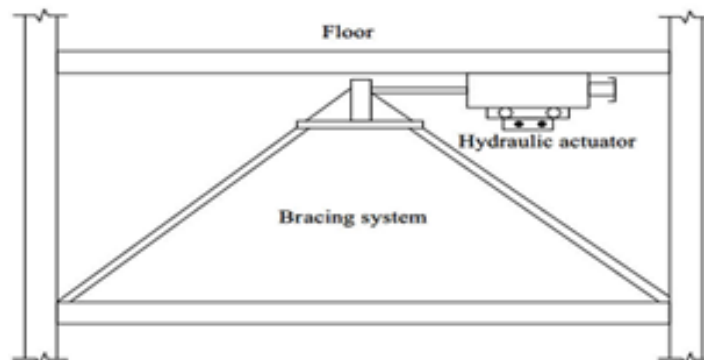


Figure 1.14 : structure équipée d'un contreventement actif

**1.2.2.4 Amortisseur à masse accordée actif (ATMD) :**

L'amortisseur à masse accordée actif ATMD a évolué à partir du TMD avec l'introduction d'un mécanisme de contrôle actif. Il est connu que les amortisseurs TMD ne sont efficaces que pour le contrôle de la réponse structurelle lorsque le premier mode est dominant, comme les vibrations structurelles induites par le vent. Le développement des ATMD se concentre sur la recherche du contrôle de la réponse sismique structurale avec une large bande de fréquences. Selon la littérature, les structures équipées avec un ATMD actif démontrent une efficacité accrue comparées aux structures dotées d'un TMD passif.

L'actionneur dans un ATMD est utilisé pour entraîner la masse auxiliaire, tandis que l'actionneur dans d'autres systèmes actifs agit habituellement directement sur la structure. Cependant, l'efficacité de contrôle d'un ATMD est ressentie principalement à la fréquence fondamentale et moins à des fréquences plus élevées *Yang [18]*., comme le montre la figure 1.15

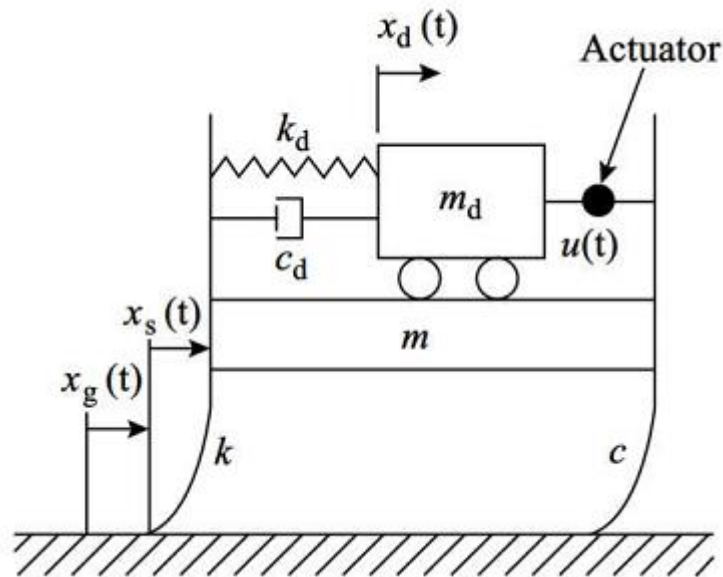


Figure 1.15 : Configuration de base d'une structure équipée d'un ATMD actif

### 1.2.3 Contrôle semi-actif

Un système d'amortisseur semi-actif comprend des capteurs, un ordinateur de contrôle, un actionneur de contrôle et un dispositif d'amortissement passif. Les capteurs mesurent l'excitation d'une réponse structurelle. L'ordinateur de contrôle traite la mesure et génère un signal de contrôle pour l'actionneur. Ensuite, l'actionneur agit pour ajuster le comportement du dispositif passif. On notera que l'actionneur est utilisé pour contrôler le comportement du dispositif passif au lieu d'appliquer une force directement sur la structure ; **Ainsi, il ne nécessite qu'une petite source d'énergie comme les batteries.** Ceci est un grand avantage parce que la source principale d'énergie de la structure peut échouer lors d'événements sismiques, et l'actionneur n'a pas de potentiel nuisible tel que la déstabilisation de la structure. Bien que les amortisseurs semi-actifs soient un peu plus complexes que les amortisseurs passifs, ils sont toujours faciles à fabriquer, fiables à utiliser et capables de performer mieux que les amortisseurs passifs.

La capacité de contrôle des amortisseurs semi-actifs est encore limitée car ils ne peuvent fonctionner que dans la capacité maximale des dispositifs passifs correspondants

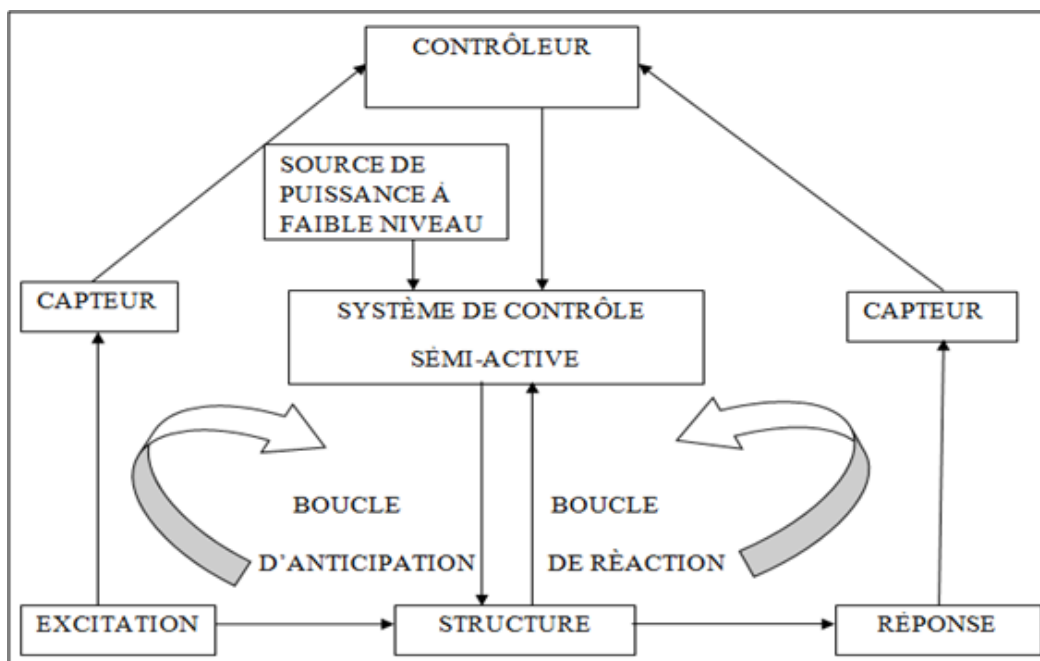


Figure 1.16: Diagramme de contrôle Semi- Actif

Il existe différents types d'amortissements semi-actifs proposés pour contrôler les structures en génie civil. Ci-dessous, nous présentons quelques exemples :

**a) L'amortisseur à masse accordée semi-actif**

L'actionneur SA produit la force de contrôle  $u$ . Cette force règle l'amortissement avec le TMD pour rester toujours optimale à chaque changement d'excitation.

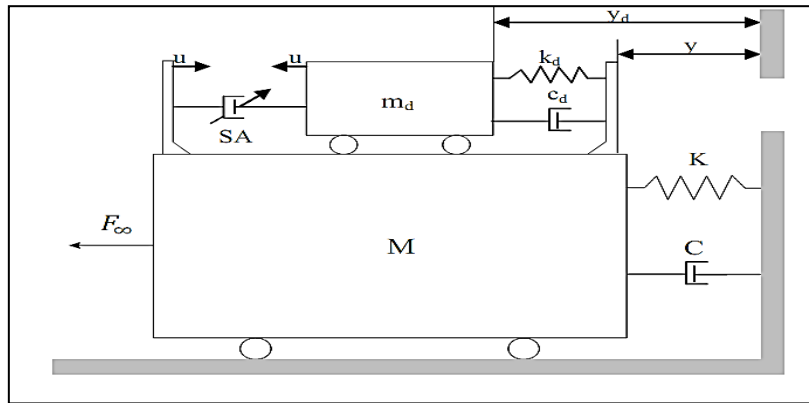


Figure 1.17 : Amortisseur semi actif de masse accordée

**b) Amortisseur à liquide accordé semi-actif :**

Un actionneur électropneumatique est utilisé pour entraîner une vanne à bille pour changer la section transversale d'un TLD de colonne en fonction de l'algorithme de contrôle, ajustant ainsi les propriétés d'amortissement pour obtenir de meilleures performances.

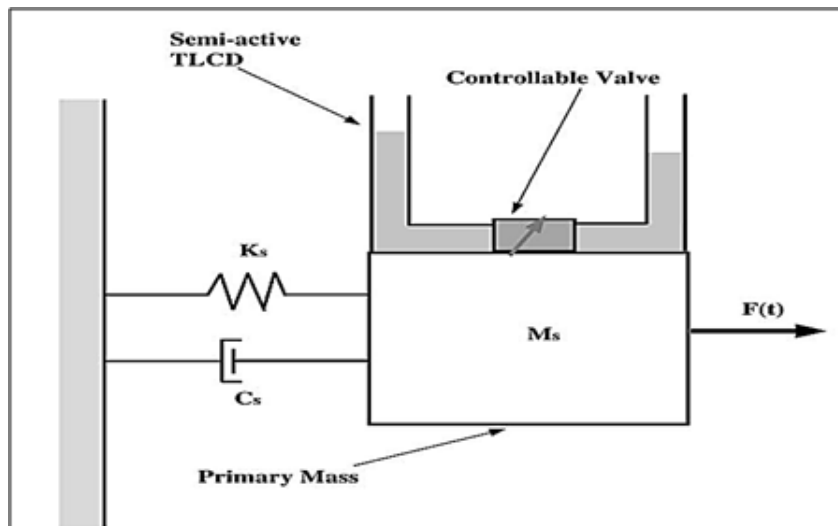


Figure 1.18 : Amortisseur à liquide accordé semi-actif, Sonmez et al. [19]

### c) Les Amortisseurs à rigidité variable

Ce dispositif est monté sur un système de contreventement de la structure. Lorsque la soupape est ouverte, le fluide circule librement et libère la connexion de la poutre, réduisant ainsi la rigidité structurelle. Lorsque la vanne est fermée, le fluide ne peut pas s'écouler en augmentant ainsi la rigidité structurelle. a été étudié et mis en œuvre au Japon *Kobori et al.* [20]. Comme représenté schématiquement sur la figure 1.19

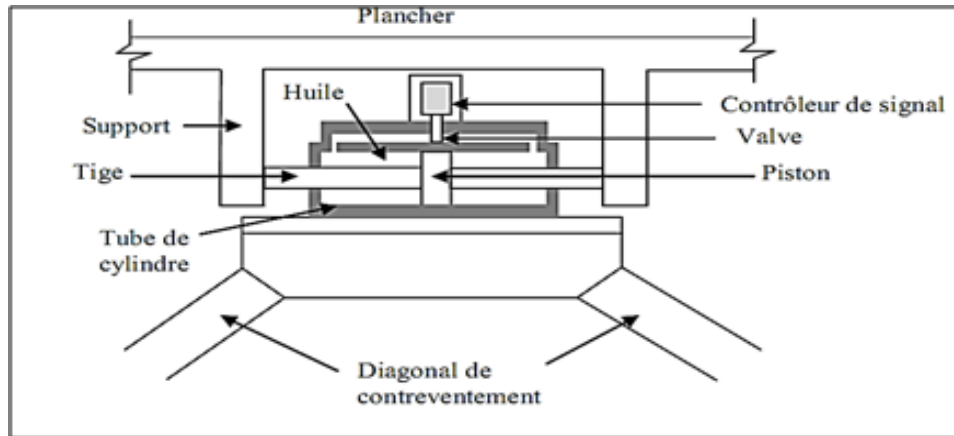


Figure 1.19 : Amortisseur semi-actif à rigidité variable

### d) Les amortisseurs Electro- rhéologiques

Les amortisseurs ER utilisent des fluides ER intelligents qui contiennent des particules diélectriques en suspension dans des fluides visqueux non conducteurs (huile) absorbés sur les particules. Lorsque le fluide ER est soumis à un champ électrique, les particules diélectriques se polarisent et deviennent alignées, offrant ainsi une résistance au flux. Les fluides ER sont capables de subir des augmentations réversibles spectaculaires de la résistance à l'écoulement ; Ils peuvent changer de manière réversible des fluides visqueux linéaires à écoulement libre vers les semi-solides avec limite d'élasticité contrôlable en millisecondes.

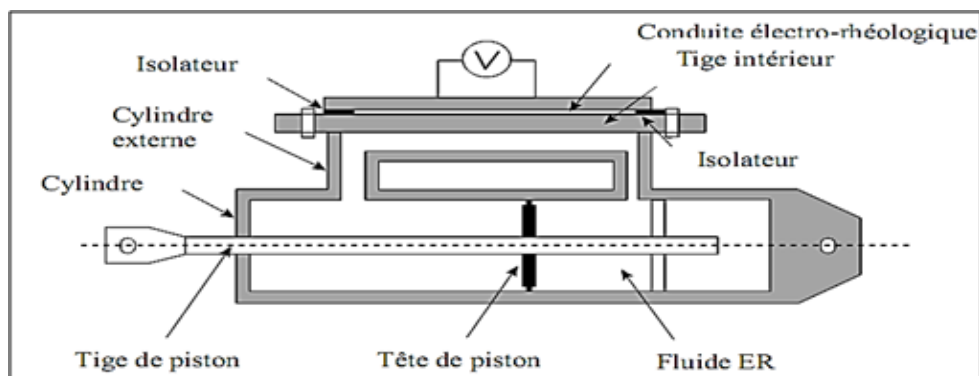


Figure 1.20 : Amortisseur Electro- rhéologique

### e) Les amortisseurs magnéto-rhéologiques

Les amortisseurs magnéto-rhéologiques utilisent un fluide MR intelligent, qui est un analogue magnétique du fluide ER et se compose généralement de particules de taille micro-magnétique polarisables magnétiquement dispersées dans un fluide visqueux, comme l'huile de silicone. Lorsque le fluide MR est exposé à un champ magnétique, les particules dans le fluide se polarisent et le fluide présente un comportement viscoplastique, offrant ainsi une résistance à l'écoulement du fluide. Le fluide MR est également caractérisé par sa capacité à subir un changement réversible d'un fluide visqueux linéaire à un fluide semi-solide en millisecondes lorsqu'il est soumis à un champ magnétique. En modifiant la force du champ magnétique selon un algorithme prédéfini, la force de contrôle générée par l'amortisseur MR peut être ajustée en conséquence. En comparaison avec les fluides ER, les fluides MR offrent des avantages de résistance à haut rendement (de l'ordre de 50 à 100 kPa), d'insensibilité aux contaminants et de comportement stable sur une large plage de températures.

Comme illustré schématiquement sur la figure 1.21, le prototype de cet amortisseur MR est un amortisseur d'orifice, et l'énergie est dissipée par le contrôle du flux. Toutefois, cet amortisseur utilise de l'huile hydrocarbonée dispersée au hasard avec du fer magnétiquement doux de taille micrométrique. Le champ magnétique est appliqué perpendiculairement à la direction de l'écoulement du fluide et un accumulateur compense le changement de volume du fluide.

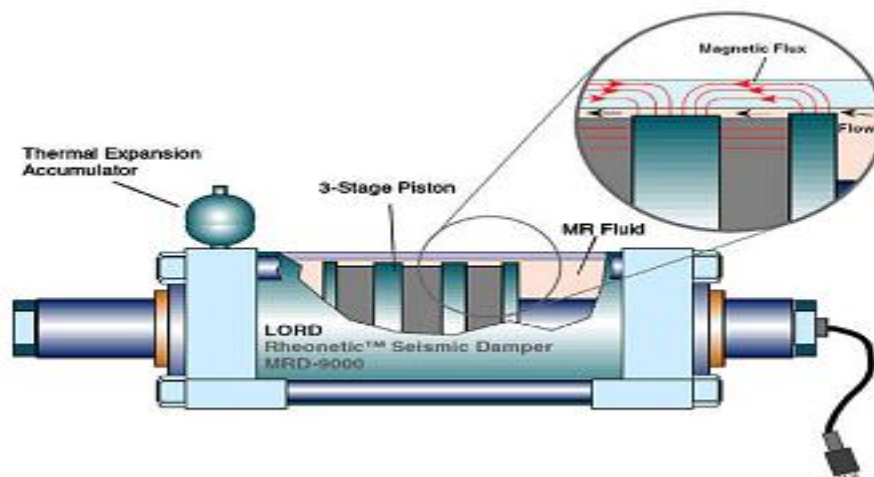


Figure 1.21 : schéma de l'amortisseur magnéto-rhéologique



### 1.3 Les systèmes de contrôle hybride

Comme déjà noté, les systèmes de contrôle actif sont mis en place pour surmonter la capacité limitée et l'intelligence modérée des amortisseurs passifs et semi-actifs. Cependant, le contrôle structurel actif présente toujours deux inconvénients. Tout d'abord, son fonctionnement dépend entièrement d'une alimentation externe et nécessite un système complexe de détection et de traitement du signal. Cette complexité limite son application et réduit la fiabilité du contrôle.

Deuxièmement, pour appliquer un contrôle actif aux ouvrages de génie civil, il faut disposer d'un grand équipement générateur de force, c'est-à-dire de gros actionneurs. Comme les structures résistantes aux séismes pèsent des centaines voire des milliers de tonnes, la force de contrôle requise doit dépasser des centaines de kN pour augmenter suffisamment la force d'amortissement structurel.

La technologie industrielle actuelle rend possible la conception et la fabrication d'un tel actionneur de grande taille, mais son coût limite sérieusement son application. **Les systèmes de contrôle hybride innovants**, qui sont obtenus en combinant des dispositifs de contrôle passif et actif, sont devenus attrayants. Lorsque ces techniques fonctionnent ensemble, la fiabilité est assurée par la première et la capacité est alimentée par celle-ci. **Un système hybride gagne les avantages des deux techniques et atténue** les limitations de l'une ou l'autre technique seule. Par conséquent, il dépasse les systèmes passifs, semi-actifs et actifs. Les systèmes de contrôle hybride ont fait l'objet d'une attention considérable depuis les années 1990 *Cheng et al. [21], Yoshioka et al. [22]*.

Trois systèmes de contrôle hybride typiques ont été développés : HMD, systèmes d'isolation de base hybrides et systèmes 'amortisseurs-actionneurs'

### 1.3.1. Amortisseur à masse accordée hybride

Les amortisseurs de masse hybrides combinent un TMD passif et un actionneur de contrôle actif, ou en ajoutant un AMD à un TMD, Un AMD est attaché à un TMD au lieu de la structure de sorte que l'AMD peut être petit ; Sa masse est de 10-15% de celle du TMD. La capacité de contrôle des vibrations des HMD se base principalement sur le mouvement naturel du TMD. L'actionneur génère une force de contrôle qui règle le mouvement du TMD et augmente ainsi l'efficacité et la robustesse du dispositif pour modifier les caractéristiques dynamiques de la structure. En d'autres termes, le TMD est accordé au mode fondamental de la structure, et l'AMD est conçu pour améliorer l'efficacité du contrôle pour les modes supérieurs de la structure. Ainsi, l'énergie et les forces requises pour faire fonctionner un HMD sont bien inférieures à celles associées à un système AMD complet avec des performances comparables, figure 1.21a. Cette caractéristique rend les HMD relativement peu coûteux pour atteindre une efficacité de contrôle améliorée, et ils ont été le dispositif de contrôle le plus commun utilisé dans des applications de structure de bâtiment à grand échelle D'autre part, les contraintes de conception, telles que les limitations d'espace sévères, peuvent empêcher l'utilisation d'un système HMD. Il est évident de signaler que le TMD passif peut être remplacé par un ATMD donnant naissance à ce qu'on appelle HAMD illustré sur la figure 1.21b

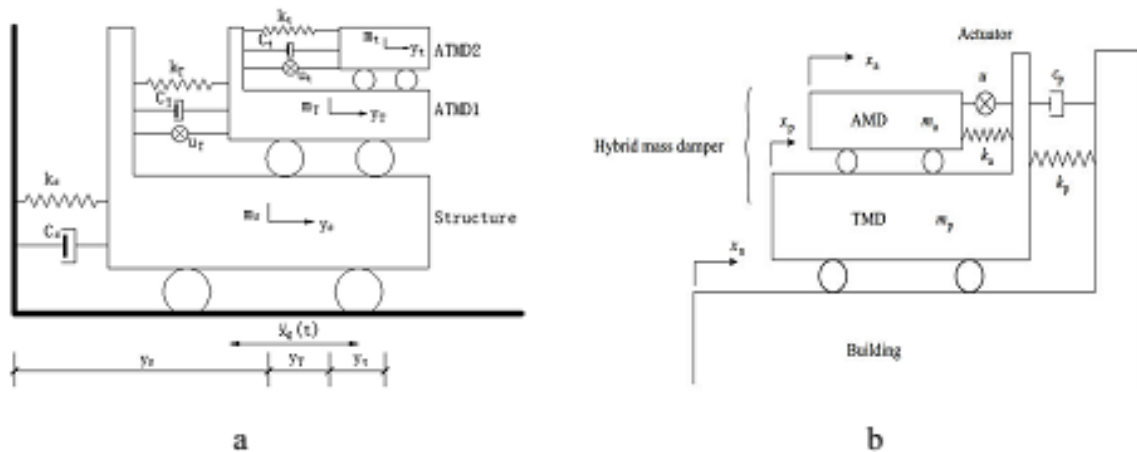


Figure 1.21 Configuration de base d'un Amortisseur à masse accordée hybride a) ATMD actif +ATMD actif Li et al. b) TMD passif +ATMD actif Cheng et al.

### 1.3.2. L'isolation à la base hybride

Un système hybride d'isolation à la base combinant un système d'isolation à la base et un système de contrôle actif a été proposé par *Yang et al.* [23]. Ce système, schématisé sur la figure 1.22 est composé d'un système de tendon actif installé sur la superstructure et d'un système d'isolation à la base. Des études théoriques ont été réalisées pour tel système hybride en tenant compte la non linéarité du système d'isolation. D'autres types de contrôle hybride peuvent être proposés en couplant des systèmes d'isolation avec des amortisseurs MR pour contrôler le mouvement de la superstructure *Yoshioka et al.* [24]. Ce système, appelé un système d'isolation intelligent, ce système utilise l'amortisseur pour s'adapter aux excitations sismiques

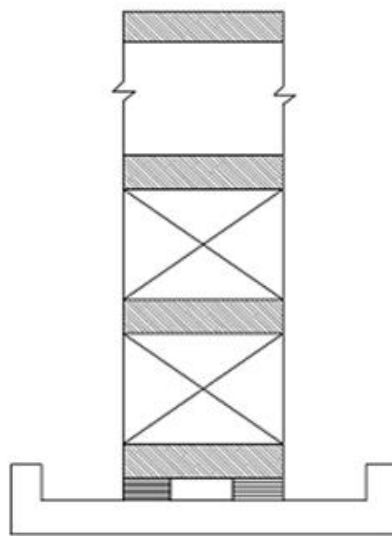


Figure 1.22 Contrôle hybride d'une structure isolée à la base

### 1.4. Conclusion

Une classification et une citation des différents mécanismes de contrôle de vibration pour les structures de génie civil ont été présentées dans ce chapitre. Les systèmes passifs, actifs semi-actifs, et hybride sont donnés en détails. Le choix du système de contrôle doit être fait selon un objectif bien défini en tenant compte du coût de chaque système. Les systèmes passifs semblent efficaces et moins coûteux mais avec certaines limites de performance. Les limites des systèmes passifs peuvent être surmontées par l'ajout d'un système actif. Ce dernier nécessite une source d'énergie pour son fonctionnement.

# **Chapitre II**

## **L'isolation parasismique**

### 2.1. Introduction

Le concept de base de l'isolation parasismique à la base est de minimiser la force sismique transmise dans une superstructure, et en même temps limiter la déformation de l'isolateur à l'intérieur d'une plage admissible. La capacité sismique d'une structure correspond à la réponse de sa superstructure considérée comme étant un corps rigide. Ainsi, la superstructure peut être libérée à partir de plusieurs conditions qui ont limité les bâtiments conventionnels d'avoir une capacité suffisante d'absorption d'énergie (ductilité). Par conséquent, un système d'isolation à la base peut fournir une procédure de conception beaucoup plus souple et simple qu'un système conventionnel. [25]

La conception sismique conventionnelle fournit une forte capacité d'appui pour la charge verticale (à l'exception de la charge sismique). En réalité, le poids de la structure est la principale charge de dimensionnement d'un bâtiment isolé à la base. Cette charge devrait être alors estimée avec précision dans le calcul, et la construction devrait également être réalisée avec précision selon des recommandations strictes.

### 2.2. Généralités sur la technique d'isolation parasismique

#### 2.2.1. Aperçu historique :

Historiquement, des morceaux de bois ont été installés entre la base et le palier des maisons en Iran (figure 2.1). 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 2.2), le trafic de véhicule, le vent...etc. [26]



Figure 2.1 : Morceaux de bois installés entre la base et le palier des maisons en Iran.

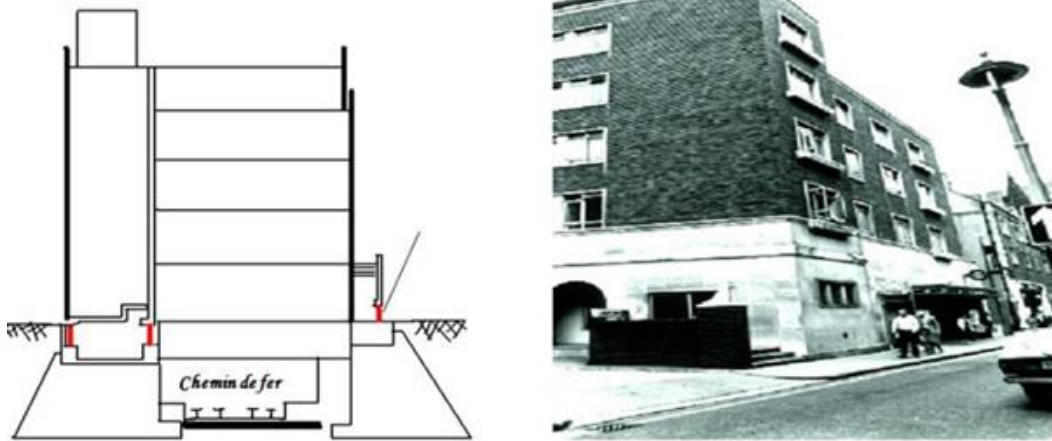


Figure 2.2: Bâtiment d'un tribunal en Angleterre traité ayant des isolateurs de base [27]

La première tentative moderne d'isoler une structure à la base contre l'effet de séisme a été réalisée à l'école de Heinrich Pestalozzi en 1969 à Skopje (ex- Yougoslavie).

Par la suite, ce système a été appliqué pour le bâtiment de William Clayton en 1981 en Nouvelle Zélande, suivi du centre de droit communautaire et de justice aux Etats-Unis en 1985. La réponse favorable des structures isolées a été observée lors du séisme de Northridge aux Etats-Unis en 1994. En Algérie, Le CTC-Chlef a été le premier à introduire la technique d'isolation parasismique à travers la construction du siège de son agence à Ain-Defla.

### 2.2.2. Principe de base

Le principe c'est d'augmenter suffisamment la période de vibration de la structure pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du séisme. Les accélérations transmises à celle-ci (et par conséquent les forces) sont considérablement réduites, figure. 2.3

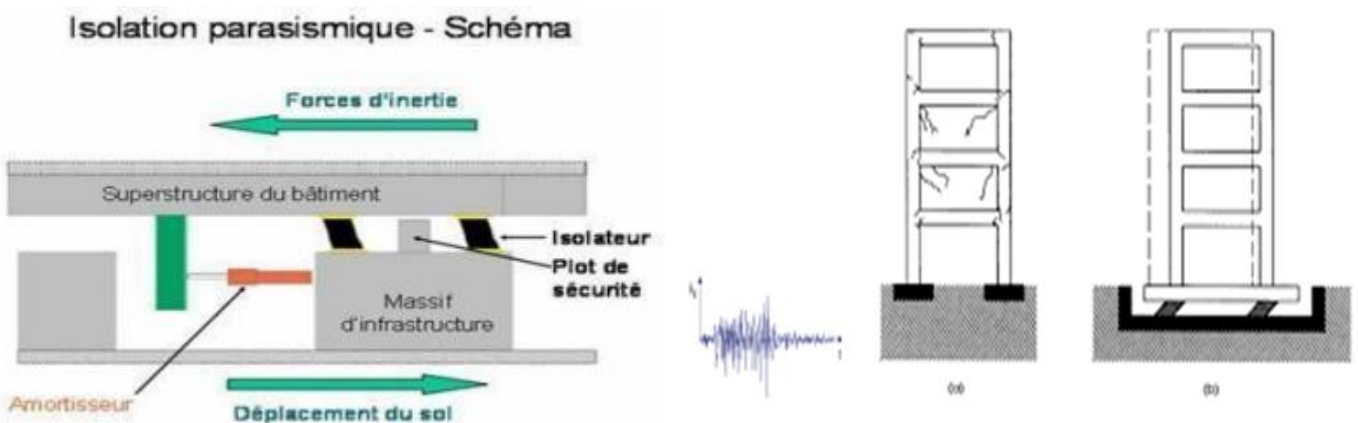


Figure 2.3. Principe de Isolation parasismique [28]

### 2.3. Isolateur élastomérique avec noyau de plomb

L'appui en caoutchouc à barreau de plomb LRB (*Lead Rubber Bearing*) est un type de système d'isolation absorbant l'énergie, donné toute son étendue récemment. Le système LRB a été développé et utilisé pour la première fois en Nouvelle-Zélande en 1975 (R. I. Skinner, 2005), après ce système a été largement utilisé dans plusieurs pays dans le monde, il se compose principalement d'un appui en élastomère multicouche renforcée d'acier avec un noyau de plomb inséré en son centre comme le montre la figure (2.4). Le noyau de plomb est fermement pressé dans un trou au centre et le plomb forme une clef positive entre les plaques d'acier à l'intérieur de l'appui (confiné). Ainsi, lorsque l'appui en élastomère est déformé horizontalement, l'insertion du plomb est forcée entre les plaques d'aciers entrecroisées, pour déformer tout son volume en cisaillement pur. Le noyau de plomb est utilisé pour réduire le déplacement latéral et de proposer un mécanisme additionnel pour la dissipation d'énergie, tandis que la flexibilité et la force de rappel sont assurées par l'appui en caoutchouc (Kelly, 1996). L'appui en caoutchouc à barreau de plomb fournit les fonctionnalités combinées telles que : le soutien de charge verticale, la flexibilité horizontale et la capacité d'absorption d'énergie, ces fonctionnalités s'avèrent nécessaires pour les structures isolées à la base contre l'attaque d'un séisme et empêche également les mouvements du bâtiment sous l'action du vent, en d'autres termes, fournit une rigidité verticale suffisante pour maintenir le poids propre du bâtiment et tout en permettant une flexibilité horizontale, assurée par le décalage de la fréquence fondamentale d'un bâtiment isolé, très loin de la gamme de fréquence dominante de la plupart des séismes (B.S Kong et al., 2003), Il en résulte une réduction à plusieurs fois les forces d'inerties et les accélérations dans la structure. Mais la flexibilité additionnelle nécessaire pour décaler la période fondamentale naturelle induit un grand déplacement au niveau du système d'isolation, qui doit être réduit à un niveau acceptable par dissipation d'énergie grâce à l'utilisation d'amortisseurs externes ou introduction d'un self amortissement supplémentaire du système d'isolation, l'amortissement souhaitable, est de maintenir le déplacement de l'isolateur à l'intérieur de certaines limites dans le cas de faible fréquence de mouvement du sol (Krishnamoorthy et al., 2009]. Lorsqu'il est soumis à des faibles charges latérales (telles que des séismes mineurs et vent), l'appui en caoutchouc à noyau de plomb est rigide latéralement et verticalement. La rigidité latérale résulte de la forte rigidité élastique du noyau de plomb et de la rigidité verticale (qui reste à tous les niveaux de charge) résultant de la composition acier caoutchouc de l'appui. A des niveaux de chargement plus élevés, le plomb se plastifie et la rigidité latérale de l'appui est considérablement réduite [29]

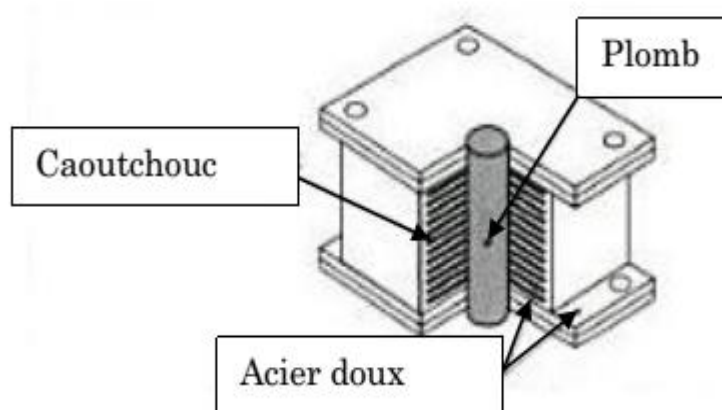


Figure 2.4 : Isolateur de base en élastomère avec noyau de plomb (LRB) [29]

Cela produit le décalage de la période, qui est un effet caractérisant l'isolation à la base. Quand l'appui est recyclé à grands déplacements, comme lors d'un tremblement de terre modéré et fort, la déformation plastique du plomb absorbe l'énergie comme amortissement hystérétique. L'amortissement visqueux équivalent produite par l'hystérésis est fonction du déplacement et généralement dans une plage de 15% et 35%. Un avantage majeur de l'appui en caoutchouc à noyau de plomb est qu'il combine les fonctions suivantes : une rigidité à des niveaux de charge de service, une flexibilité à des niveaux de charge sismique et l'amortissement en une seule unité compacte. Ces propriétés mettent l'appui en caoutchouc à barreau de plomb comme type d'isolateur le plus communément utilisé lorsque des niveaux élevés d'amortissement sont nécessaires (dans les zones à forte sismicité) ou des structures où la rigidité sous des charges de service est importante (par exemple les ponts). En ce qui concerne l'historique du développement de ce système, un certain nombre de recherches ont été effectuées dans le passé et même récentes dans le domaine de l'isolation à la base, ont mis en lumière les bâtiments à plusieurs étages montés sur le système LRB, proche de la faille active. Islam et al ont étudié le système d'isolation bien qu'il s'agit d'une technologie relativement récente. L'isolation sismique pour les bâtiments à plusieurs étages ont été bien évaluées et examinées par (Hong et Kim, 2004); (Barata et Corbi, 2004); (Agarwal, 2007); (Komodros, 2008); (Lu Lin, 2008) ; (Spyrakos, 2009); (Panayiotis et al 2010); (Islam et al 2011 a et b). Le comportement avec écrouissage de l'isolateur à la base sous charge croissante a été développé pour les immeubles de grande et moyenne hauteur (jusqu'à quatre étages) et des sites présentant un risque sismique modéré (Pocanshi et Phocas, 2007).



### 2.3.1. Modèles pour les systèmes d'isolation à la base

Il y a de nombreux éléments d'isolation qui peuvent être considérés ou utilisés pour la modélisation du système d'isolation à savoir : les éléments visqueux, les éléments élastiques, l'hystérésis pour les appuis en élastomère bilinéaire et les éléments hystérétiques pour les appuis à glissements. Les éléments hystérétiques peuvent être uniaxial ou biaxial, et les éléments linéaires élastiques et visqueux sont pris en considération pour la modélisation des appuis élastomériques linéaires et des amortisseurs à fluide. La figure (2.5) montre le caractéristique force-déplacement d'un isolateur à la base de type LRB. [30]

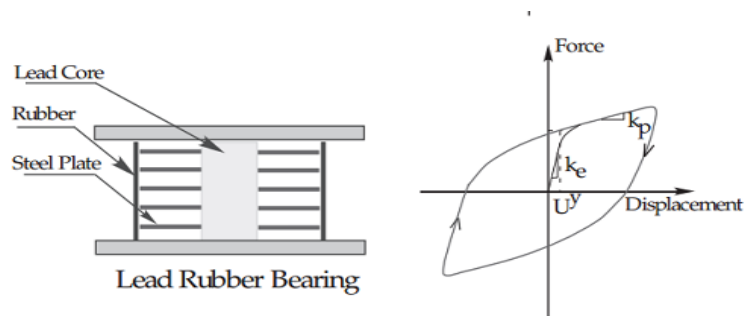


Figure 2.5 Courbe force-déplacement (LRB)

### 2.3.2 Modélisation mathématique

Ce type d'isolateur se compose de couches alternées de caoutchouc et d'acier liées les unes aux autres autour d'un cylindre de plomb pur, inséré au centre de ces couches d'acier et de caoutchouc. Le système se comporte comme un amortisseur hystérétique et le modèle mathématique est donné par les figures ci-dessous (2.6) et (2.7).

#### 2.3.2.1. Système d'isolation en caoutchouc avec amortisseur en barreau de plomb LRB

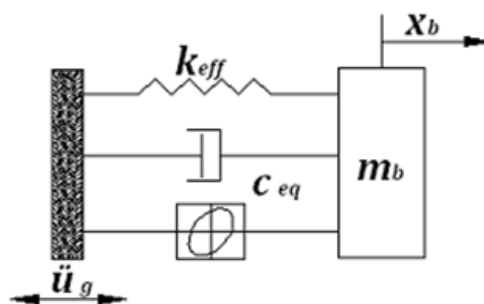


Figure 2.6: Modèle mathématique pour un système d'isolation de type LRB

Pour déterminer les propriétés du système LRB (la rigidité effective et l'amortisseur équivalent), le modèle bilinéaire de la courbe caractéristique est employé. L'équation de mouvement du système LRB est donnée comme suit :

$$m_b (\ddot{x}_b + \ddot{u}_g) + C_{eq} \dot{x}_b + K_{eff} x_b = 0 \quad (2.1)$$

$$m_b \ddot{x}_b + C_{eq} \dot{x}_b + K_{eff} x_b = -m_b \ddot{x}_g \quad (2.2)$$

### 2.3.2.2. Structure à N DDL montée sur système d'isolation (LRB)

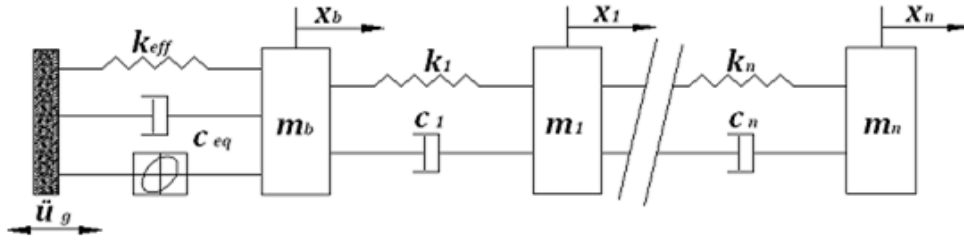


Figure 2.7 : Modèle mathématique d'une structure à N DDL montée sur un système d'isolation de type LRB

L'équation de mouvement d'une structure à N DDL montée sur un système LRB, qui emploie les valeurs de rigidité effective et d'amortissement équivalent, elle est donnée comme suit :

$$(m_b + \sum_{i=1}^n m_i) \ddot{x}_b + C_{eq} \dot{x}_b + K_{eff} x_b + \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i + \sum_{i=1}^n c_i \dot{x}_i + \sum_{i=1}^n k_i x_i = -(m_b + \sum_{i=1}^n m_i) \ddot{u}_g \quad (2.3)$$

Avec :

$K_{eff}$  : La rigidité effective du système d'isolation.

$C_{eq}$  : Le coefficient d'amortissement équivalent linéaire.

$\xi_{eq}$  : Le rapport d'amortissement équivalent linéaire.

Et

$$C_{eq} = 2\xi_{eq} \sqrt{MK_{eff}} \quad (2.4)$$

$$\xi_{eq} = \frac{\Delta E}{2\pi K_{ff} D_D^2} \quad (2.5)$$

Où,  $\Delta E$  est l'énergie totale dissipée et le  $D_D$  déplacement de conception.

### 2.4. Formulation des équations de mouvement des structures isolées à la base par analyse linéaire.

La formulation des équations de mouvement pour des structures isolées par la théorie linéaire d'isolation sismique a été donnée en détail par Naeim and Kelly [31]. Cette théorie est une application directe des principes de la dynamique des structures. Par conséquent, ces équations permettent la détermination des propriétés modales correspondantes. Puisque la plupart des systèmes d'isolation sont intrinsèquement non linéaires, cette analyse linéaire développée par Kelly sera seulement approximative pour une telle structure isolée montée sur un système d'isolation représenté par une rigidité et amortissement équivalent.

#### 2.4.1 Analyse d'une structure à deux degrés de liberté

Pour comprendre le comportement d'une structure isolée à N degrés de liberté, il est utile de considérer un modèle structural simple à deux masses (figure 2.3). La masse  $m_s$  est destinée pour représenter la superstructure et la masse  $m_b$  pour représenter la masse de la pour représenter la masse du plancher au-dessus du système d'isolation linéaire. La rigidité et l'amortissement de la structure sont représentés par  $k_s$  et  $c_s$ . La rigidité et l'amortissement du système d'isolation sont représentés par  $k_b$  et  $c_b$ .

Les déplacements absolus des deux masses sont donnés par  $u_s$  et  $u_b$ . Il convient d'employer les déplacements relatif  $v_s$  et  $v_b$ , qui représentent respectivement les deux résultats principaux, le déplacement inter-étage et le déplacement du système d'isolation.

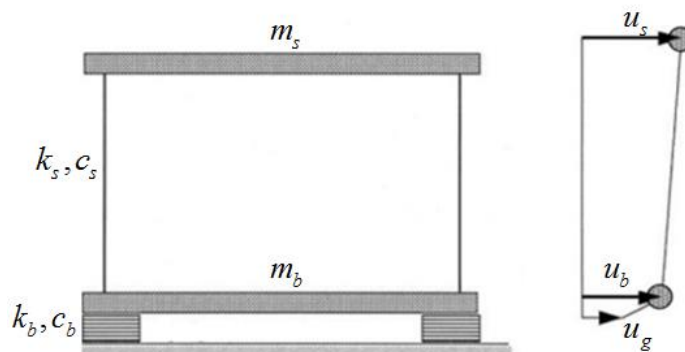


Figure 2.8 : Paramètres d'une structure isolée à deux degrés de liberté

$$v_b = u_s - u_b \quad v_b = u_b - u_g$$

Où  $u_g$  : déplacement du sol.

### 2.4.1.1. Equations de Mouvement

Les équations du mouvement pour une structure isolée à deux degrés de libertés en termes de déplacements absolus sont :

$$m_s \ddot{u}_s + c_s (\dot{u}_s - \dot{u}_b) + k_s (u_s - u_b) = 0 \quad (2.5)$$

$$m_b \ddot{u}_s + m_b \ddot{u}_b + c_s (\dot{u}_s - \dot{u}_b) + k_s (u_s - u_b) = 0 \quad (2.6)$$

Pour les déplacements relatifs les équations (2.3) et (2.4) deviennent :

$$m_s \ddot{v}_s + m_s \ddot{v}_b + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m_s \ddot{u}_g \quad (2.7)$$

$$(m_s + m_b) \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m_s + m_b) \ddot{u}_g \quad (2.8)$$

### 2.4.1.2. Formulation matricielle

Les équations de mouvement (2.7) et (2.8) sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2.9)$$

Où  $M = m_s + m_b$  ,

L'équation (2.9) peut être écrite sous d'autre forme matricielle est donnée par :

$$[M]\{\ddot{v}\} + [C]\{\dot{v}\} + [K]\{v\} = -[M]\{r\} \ddot{u}_g \quad (2.10)$$

Avec :

$$M = \begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \quad \{v\} = \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \{r\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

Les fréquences de vibrations et sont données par :

$$2\omega_b^2 = \frac{k_b}{m_s + m_b} \quad \text{et} \quad \omega_s^2 = \frac{k_s}{m_s} \quad (2.12)$$

$$2\omega_b \beta_b = \frac{c_b}{m_s + m_b} \quad \text{et} \quad 2\omega_s \beta_s = \frac{c_s}{m_s} \quad (2.13)$$

**2.5. Généralisations de l'équation au système à plusieurs degrés de liberté**

Le principe fondamental du système d'isolation à la base est d'isoler la structure de l'effet de l'excitation du sol en installant un isolateur de comportement souple entre la fondation et la superstructure. En utilisant des isolateurs, la superstructure se comporte comme un corps rigide tandis que l'isolateur subit une déformation relativement importante. Pour illustrer le comportement de la structure isolée à la base, nous considérons les structures de la figure 2.9a et 2.9b. Dans la figure 2.9a, une structure à base fixe à 1 degré de liberté (1DDL) avec les paramètres : masse  $m$  rigidité  $k$  et amortissement  $c$ , tandis que dans la figure 2.9b, la structure est équipée d'un système d'isolation à la base avec une rigidité  $k_b$ , un amortissement  $c_b$  et une masse  $m_b$ . La structure à base fixe peut être caractérisée par une période naturelle  $T_f$ , une fréquence naturelle  $\omega_f$  et un pourcentage d'amortissement  $\zeta_f$ , ou :

$$T_f = \frac{2\pi}{\omega_f} \tag{2.14}$$

$$\omega_f = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.15}$$

$$\omega_f = \frac{c}{2m\omega_f} \tag{2.16}$$

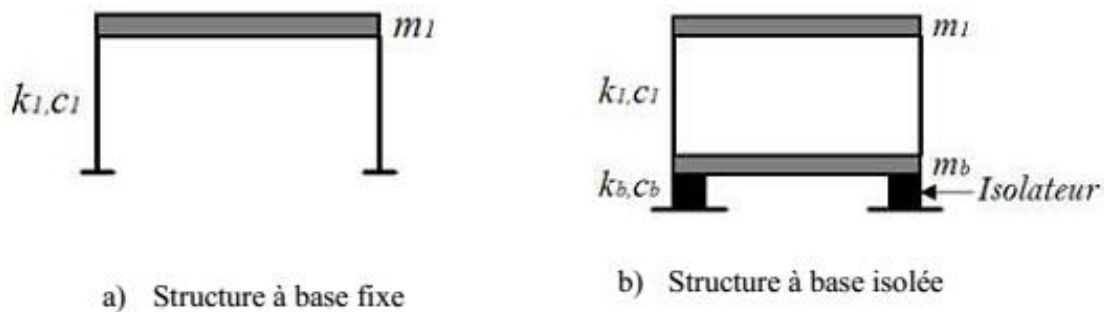


Figure 2.9 : Structure à 1 degré de liberté à base fixe et isolée [32]

D'autre part, la structure isolée à la base est caractérisée par sa période naturelle  $T_b$ , une fréquence naturelle  $\omega_b$  et un taux d'amortissement  $\xi_b$ . Il est généralement recommandé dans la littérature de l'isolation parasismique que la période effective  $T_b$  pour une structure à base isolée doit être située dans un intervalle de période compris entre 1,5 s et 3,0 s ( $1,5 \text{ s} < T_b < 3 \text{ s}$ ). D'une autre expression, l'isolateur est censé de décaler la période de la structure de la zone de fortes accélérations vers la zone des faibles accélérations qui est comprise généralement dans l'intervalle de période précédent.

## Chapitre II : l'isolation parasismique

Le système d'isolation parasismique est efficace si la période naturelle du bâtiment isolé  $T_b$  est beaucoup plus élevée que la période naturelle de la structure à base fixe  $T_f$  (ou  $\omega_b$  est beaucoup plus petite que  $\omega_f$ ).

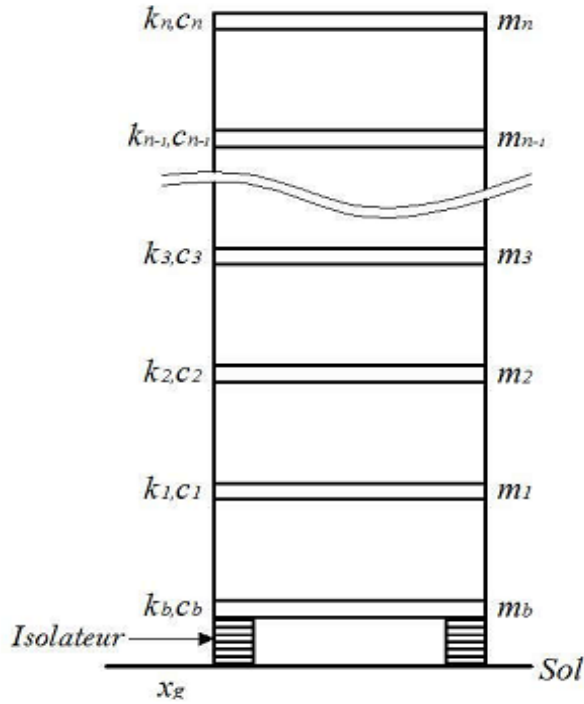


Figure 2.10 Structure à plusieurs étages équipée d'un isolateur parasismique [32]

En appliquant la condition d'équilibre, l'équation de mouvement au niveau de l'étage  $n$  s'écrit comme suit :

$$m_n \ddot{u}_n + c_n (\dot{u}_n - \dot{u}_{n-1}) - k_n (u_n - u_{n-1}) = 0 \quad (2.17)$$

Où

$m$  est la masse du dernier étage;  $c_n$  et  $k_n$  désignent respectivement l'amortissement et la rigidité entre l'étage  $n$  et l'étage  $n-1$  ;  $u_n$  et  $u_{n-1}$  représentent les déplacements absolus de l'étage  $n$  et l'étage  $n-1$  .

Suivant le même principe, l'équation de mouvement de l'étage 2 est exprimée comme suit :

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + k_2 (u_2 - u_1) - c_3 (\dot{u}_3 - \dot{u}_2) - k_3 (u_3 - u_2) = 0 \quad (2.18)$$

## Chapitre II : l'isolation parasismique

L'étage situé juste sur l'isolateur de base est dénoté 1, et en considérant le mouvement du sol  $\ddot{x}_g$ , l'équation de mouvement peut s'écrire comme suit :

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_b (\dot{u}_1 - \dot{x}_g) + k_b (u_1 - x_g) - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) - k_2 (u_2 - u_1) = 0 \quad (2.19)$$

Où

$m_1$  est la masse de l'étage 1;  $c_2$  et  $k_2$  sont l'amortissement et la rigidité effective de l'étage 1 et 2 respectivement;  $c_b$  et  $k_b$  sont désignés respectivement comme étant l'amortissement et la rigidité du système d'isolation;  $u_2$  et  $u_1$  représentent le déplacement de l'étage 2 et 1.

En introduisant le déplacement relatif entre chaque étage et le mouvement du sol exprimé en termes de  $x_{n-1} = u_{n-1} - x_g$  les équations (2.17) (2.18) (2.19) deviennent :

$$\left. \begin{aligned} m_n \ddot{x}_n + c_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) - k_n (x_n - x_{n-1}) &= -m_n \ddot{x}_g \\ m_{n-1} \ddot{x}_{n-1} + c_{n-1} (\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_{n-2}) + k_n (x_{n-1} - x_{n-2}) - c_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) - k_n (x_n - x_{n-1}) &= -m_{n-1} \ddot{x}_g \\ m_b \ddot{x}_b + c_b (\dot{x}_b - \dot{x}_1) - k_b (x_b - x_1) - k_1 (x_1 - x_b) &= -m_b \ddot{x}_g \end{aligned} \right\} (2.20)$$

L'ensemble des équations (2.20) forme des équations de mouvement du système à plusieurs degrés de liberté (NDDL). Ces équations peuvent être exprimées en notation matricielle et exprimées comme suit :

$$[M_i] \{\ddot{x}_i\} + [C_i] \{\dot{x}_i\} + [K_i] \{x_i\} = -[M_i] \{r\} \ddot{x}_g \quad (2.21)$$

Où l'indice  $i$  désigne que la structure est isolée à la base.

Alors que la matrice de masse,  $[M_i]$ , la matrice d'amortissement,  $[C_i]$  et la matrice de rigidité,  $[K_i]$ , se présentent sous les formes suivantes:

$$[M_i] = \begin{bmatrix} m_b & & & & & \\ & m_1 & & & & \\ & & m_2 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & m_{n-1} & \\ & & & & & m_n \end{bmatrix} \quad \text{La matrice de masse}$$

$$[C_i] = \begin{bmatrix} c_b + c_1 & -c_1 & & & & & \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & & & & \\ & -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & \\ & & -c_3 & \ddots & \ddots & & \\ & & & \ddots & c_{n-1} + c_n & -c_n & \\ & & & & -c_n & c_n & \end{bmatrix} \quad \text{La matrice d'amortissement}$$

$$[K_i] = \begin{bmatrix} k_b + k_1 & -k_1 & & & & & \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & & & & \\ & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & \\ & & -k_3 & \ddots & \ddots & & \\ & & & \ddots & k_{n-1} + k_n & -k_n & \\ & & & & -k_n & k_n & \end{bmatrix} \quad \text{La matrice de rigidité}$$

Dans l'équation (2.21),  $\{r\}$  est un vecteur unitaire ( $1 \times n$ ),  $\{x_i\}$ ,  $[\dot{x}_i]$  et  $[\ddot{x}_i]$  représentent le vecteur de déplacement relatif, le vecteur de vitesse et le vecteur d'accélération de la structure isolée :

$$\{x_i\} = \begin{Bmatrix} x_b \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{Bmatrix} \quad \{\dot{x}_i\} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{Bmatrix} \quad \{\ddot{x}_i\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_{n-1} \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix}$$

On écrit les équations sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_{n-1} \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b + c_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_n & c_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{Bmatrix} +$$



$$\begin{bmatrix} k_b+k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & k_{n-1}+k_n & -k_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_n & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_b \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m_b \\ m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{n-1} \\ m_n \end{Bmatrix} \ddot{x}_g$$

## 2.6. Conclusion

Pour mieux comprendre l'efficacité du système d'isolation sismique, des formulations concernant les équations de mouvement pour les deux structures isolées à 2 DDL et N DDL ont été faites avec la théorie linéaire d'isolation développée par Kelly. La simplicité de cette théorie approximative montre le rôle important du système d'isolation qui consiste à découpler le mouvement du sol du mouvement de la structure dont le but de réduire les forces sismiques transmises à cette dernière. Les formulations obtenues ont pour objectif d'imprégner à la structure un déplacement de bloc presque indéformable où les accélérations induites seront approximativement constantes sur toute la hauteur de la structure. Par conséquent, les déplacements relatifs et les accélérations seront réduits pour tous les niveaux de la structure. Ceci est traduit par la participation essentielle du premier mode dans les structures isolées.

**Chapitre III**

**Amortisseur**

**magnéto-rhéologique(MR)**

### 3.1. Introduction

Le contrôle structural semi-actif a comme principale caractéristique l'adaptabilité du contrôle actif et la fiabilité de contrôle passif, en utilisant seulement une petite quantité d'énergie. Le contrôle semi-actif agit en modifiant les propriétés mécaniques des éléments internes de la structure. Ces éléments absorbent l'énergie et par conséquent atténuent les mouvements indésirables. La mise en œuvre la plus courante des systèmes semi-actifs sont les fluides de viscosité variable. Cette viscosité variable, en utilisant un système de contrôle devient une viscosité contrôlée, ce qui la différencie d'un système passif. Le grand avantage du contrôle semi-actif est qu'ils peuvent fournir un rendement meilleur que les systèmes passifs et son besoin énergétique est assez faible par rapport aux systèmes actifs. Un des systèmes de contrôle semi-actifs les plus courants est l'amortisseur magnéto rhéologique ; à l'intérieur de cet amortisseur un fluide magnéto-rhéologique composé d'un liquide, des particules magnétisables et des additifs.

### 3.2. Contrôle semi actif par amortisseur magnéto-rhéologique (revue de la littérature)

L'amortisseur magnéto-rhéologique est considéré comme un dispositif de contrôle semi-actif à cause de sa consommation d'énergie modérée contre une production importante de la force d'amortissement.

Une des premières études portées sur l'amortissement a été entreprise par Krasnicki. Dans cette étude, un système à un seul degré de liberté avec un prototype d'amortisseur semi actif employant le modèle « skyhook » est comparé aux résultats obtenus à partir de simulations. Le système était soumis à des entrées harmoniques et aléatoires ; la transmissibilité a été comparée à celle obtenue par la simulation. L'amortissement semi actif a bien joué un rôle dans l'atténuation des vibrations.

Des systèmes semi actifs ont aussi été examinés sur un gros camion suite à une étude réalisée par Ahmadian. Dans cette étude, des amortisseurs semi actifs ont été mis sur chacune des six roues. Le camion a été testé sur la route et l'amortissement semi actif a bien montré des améliorations.

### Chapitre III : Amortisseur magnéto rhéologique

---

Dans une étude développée à l'université du Nevada, des chercheurs ont réalisé la conception et le développement d'un amortisseur MR pour des véhicules avec une analyse par éléments finis, électromagnétique et tridimensionnelle ainsi qu'une modélisation se basant sur la mécanique des fluides ont été réalisées pour prévoir le comportement de l'amortisseur MR.

Les ingénieurs des travaux publics dans l'industrie de construction ont incorporé la technologie des fluides MR dans le domaine de la construction. Un système d'amortissement utilisant les amortisseurs MR travaille de la même façon qu'un amortisseur d'automobile protégeant les structures ou les ponts contre les vents et séismes. Des amortisseurs intelligents sont actuellement employés sur le Pont de Dongting en Chine.

**Qu and Xu [32]** ont observé que l'amortisseur MR peut être utilisé comme moyen de couplage entre deux bâtiments et qu'ils peut réduire l'effet du « coup de fouet » entre un bâtiment de grande hauteur relié à un autre bâtiment de petite hauteur, et il peut également réduire la réponse des deux bâtiments couplés si l'algorithme de contrôle est bien choisi.

**Xu et al [33]** ont étudié l'efficacité d'un amortisseur MR reliant une structure de 12 étages à une autre structure avoisinante de 3 étages à travers une étude expérimentale sur un modèle réduit. Les résultats obtenus montrent que l'amortisseur MR muni d'un algorithme de contrôle multi-étages peut réduire l'effet du « coup de fouet » et la réponse sismique des deux structures.

**Bharti et al [34]** ont étudié l'efficacité de l'amortisseur MR sur la réduction de la réponse sismique de deux bâtiments adjacents couplés avec ce dernier. L'étude a porté sur l'influence de l'emplacement de l'amortisseur et le voltage maximum de commande sur les performances de contrôle. En se basant sur les résultats de l'étude numérique il a été observé que :

- L'amortisseur MR est un moyen efficace pour contrôler la réponse des deux bâtiments pour différentes excitations sismiques (El Centro 1940, Loma Prieta 1989, Kobe 1995)
- La réduction de la réponse sismique est plus évidente pour le petit bâtiment.
- L'utilisation de l'amortisseur MR sur quelques étages seulement réduit le coût de l'installation de 50% et la réduction de la réponse est très significative.
- L'utilisation de l'amortisseur MR comme simple dispositif de contrôle passif a montré une réduction de la réponse sismique ce qui est très utile en cas de défaillance de l'algorithme de contrôle.

### Observations

- Le contrôle semi-actif reste une méthode convoitée à cause de ses avantages, offrant de bonnes performances pour un faible apport d'énergie extérieure.
- L'amortisseur magnéto-rhéologique fait partie des systèmes d'amortissement semi-actif les plus performants comme le montre les études réalisées sur ce sujet.

### 3.3. Généralités sur les fluides MR

#### 3.3.1. Fluides Magnéto-rhéologiques

Les fluides magnéto-rhéologiques (ou simplement fluides MR) appartiennent à la classe des liquides à viscosité contrôlable, dont le comportement rhéologique est fortement influencé par l'application d'un champ magnétique. Cet effet se manifeste par un très grand changement au niveau de la force délivrée par l'amortisseur. La découverte et le développement des fluides MR reviennent à **J. Rabinow [36]** et **W. Winslow [37]** à la fin des années 1940. Comme indiqué dans la figure 3.1. Ces phénomènes peuvent solidifier la suspension et limiter le mouvement du liquide. Par conséquent, la viscosité du liquide augmente.

Le changement de viscosité est proportionnel à la valeur du champ magnétique appliqué et peut se manifester en quelques millisecondes.

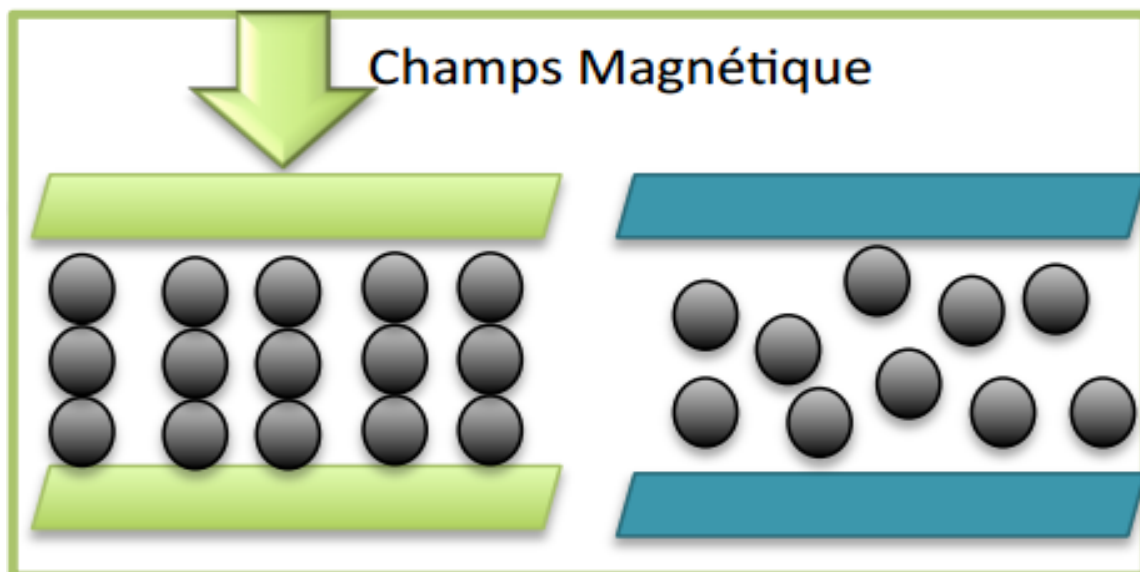


Figure 3.1 Fluide magnéto-rhéologique avec et sans la présence d'un champ magnétique

### 3.3.2. Mode de fonctionnement des fluides MR

#### 3.3.2.1. Mode de fonctionnement en compression

Constitué d'une couche mince de fluide MR, de l'ordre du millimètre, placée entre deux surfaces mobiles dans une direction orthogonale au fluide et traversées par un champ magnétique. [38] comme indiqué sur la figure 3.2

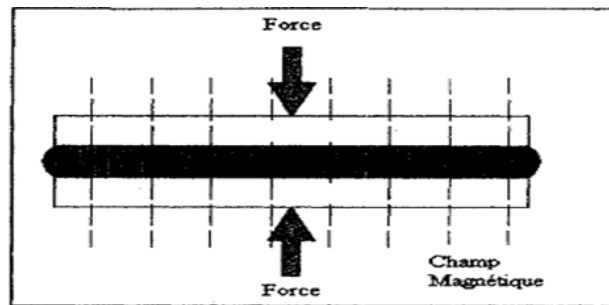


Figure3.2 : Mode de fonctionnement en compression

#### 3.3.2.2. Mode de fonctionnement en cisaillement

Un dispositif peut opérer en mode de cisaillement quand une mince couche (12.70 à 38.10 centimètres) de fluide MR est interposée entre deux surfaces mobiles dans des directions tangentielles à l'interface de contact fluide/surface. L'application d'un champ magnétique va générer des contraintes supplémentaires entre les deux surfaces. Le mode de cisaillement est principalement utile pour les amortisseurs qui ne fournissent pas de grandes forces. , comme indiqué sur la figure 3.3

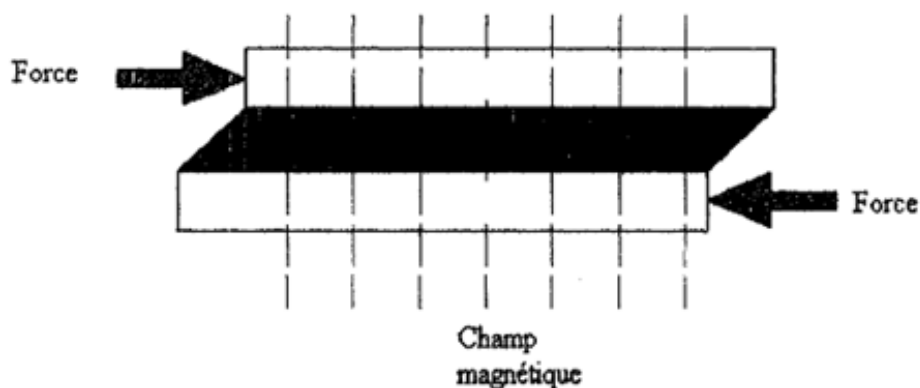


Figure 3.3 : Mode de fonctionnement en cisaillement

### 3.3.2.3. Mode valve

Un dispositif MR opère en mode de valve quand le fluide MR est utilisé pour empêcher l'écoulement du fluide d'un réservoir à l'autre, comme indiqué sur la figure 3.4

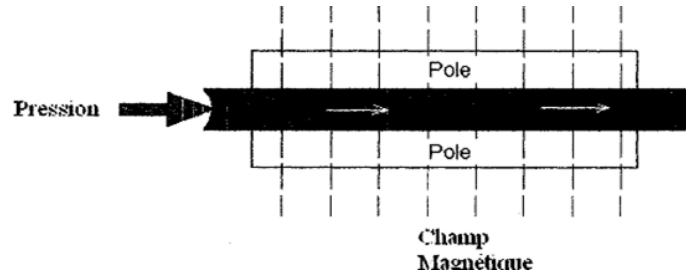


Figure 3.4 : Mode de fonctionnement en valve

### 3.3.4. Modélisation des fluides MR

Les fluides MR sont composés d'un fluide non-conducteur visqueux, souvent une huile, dans laquelle des particules magnétiques (liquides ou solides) ont été introduites. L'effet MR a lieu quand un champ magnétique est appliqué. Les dispositifs MR peuvent être contrôlés avec une basse tension, le courant conduit nécessite seulement une alimentation de courant de 1 à 2 A. Ainsi, les particules s'arrangent en formant des chaînes. L'état du fluide change très rapidement (en quelques millisecondes) de l'état liquide visqueux à un état liquide pâteux. Le fluide formé est connu comme un fluide de Bingham. [39]

#### 3.3.4.1. La viscosité

La viscosité détermine la vitesse de mouvement du fluide. La viscosité varie en sens inverse de la température. La force de frottement  $F$  qui s'exerce à la surface de séparation de deux couches de fluide contiguës distantes de  $\Delta z$ , s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres. La vitesse de chaque couche est une fonction de la distance  $z$  de cette couche au plan fixe. La force de frottement est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit  $\Delta v$ , à leur surface  $S$  et inversement proportionnelle à  $\Delta z$  (Figure 3.5)

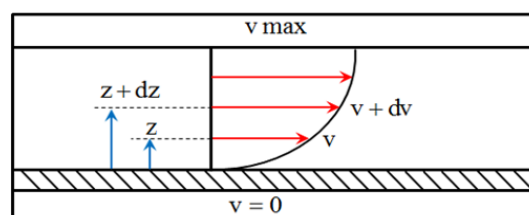


Figure 3.5 : Profil de vitesse d'un fluide

$$F = -\eta S \frac{dV}{dZ} \quad (3.1)$$

Le facteur de proportionnalité  $\eta$  est le coefficient de viscosité dynamique du fluide

#### 3.3.4.2. Propriétés fondamentales des fluides MR

Les fluides MR sont caractérisés par :

- Augmentation considérable de leur viscosité sous l'influence d'un champ magnétique, Cette augmentation est due au passage de l'état liquide à l'état solide par la formation des chaînes de particules qui sont attirées par des forces magnétiques.
- Les fluides MR appartiennent à la classe des fluides non Newtoniens.

#### 3.4. Description de l'amortisseur magnéto-rhéologique

Un amortisseur magnéto-rhéologique a échelle réelle a été proposé pour la première fois par Spencer et al [40] en 1998, et cela afin d'appuyer les résultats numériques auxquels ils sont parvenus, d'une géométrie simple dans laquelle la partie extérieure du cylindre fait partie d'un circuit magnétique, l'orifice qui permet le passage du fluide se trouve entre l'extérieur du piston et l'intérieur du cylindre abritant le fluide et le piston figure 3.6

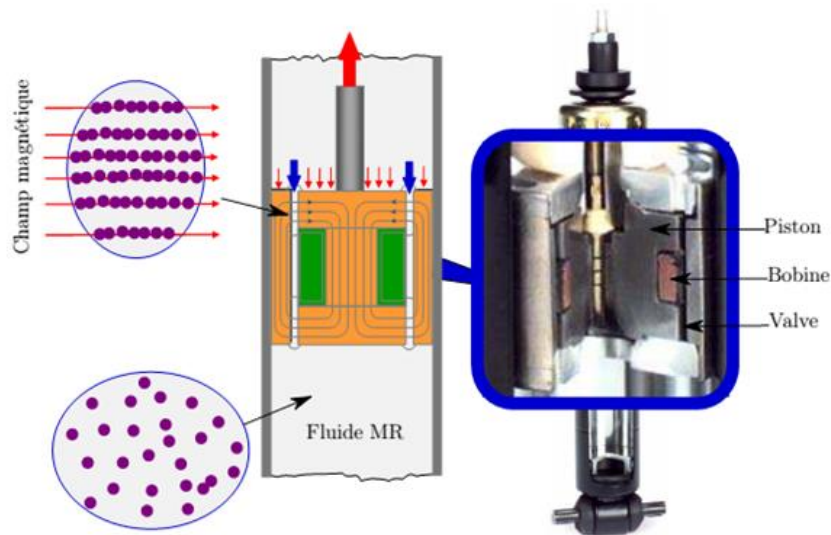


Figure 3.6 : Principe de fonctionnement d'un amortisseur MR.



### 3.5. Géométrie des amortisseurs magnéto rhéologiques

La géométrie, la taille et les performances de chaque type sont spécifiques au domaine d'application. [38]

#### 3.5.1. L'amortisseur de type monotube

Le type le plus utilisé. Sa géométrie comporte un seul tube contenant le fluide, le piston et sa tige ainsi qu'un dispositif d'accumulation, un réservoir de gaz sous pression au pied du corps de l'amortisseur (figure 3.7).

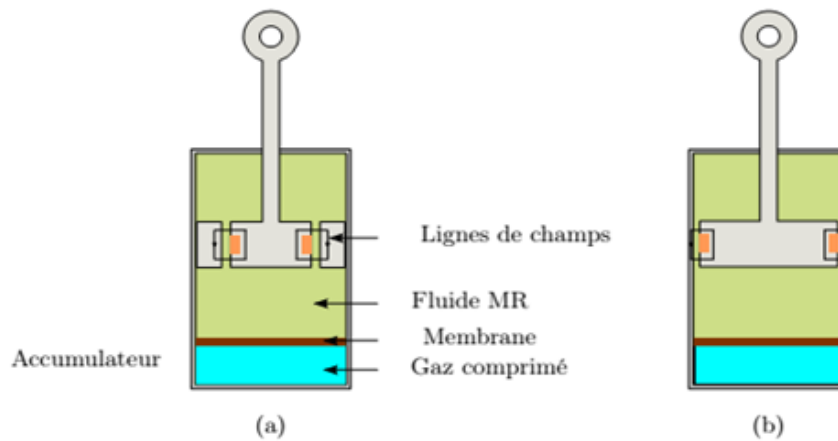


Figure 3.7 - Géométries d'un amortisseur monotube fonctionnant en mode valve (a) et mode valve et cisaillement (b)

#### 3.5.2. L'amortisseur bitube ou double cylindre

Le deuxième type de géométrie est l'amortisseur bitube ou double cylindre (figure 3.8). Il est constitué de deux tubes coaxiaux.

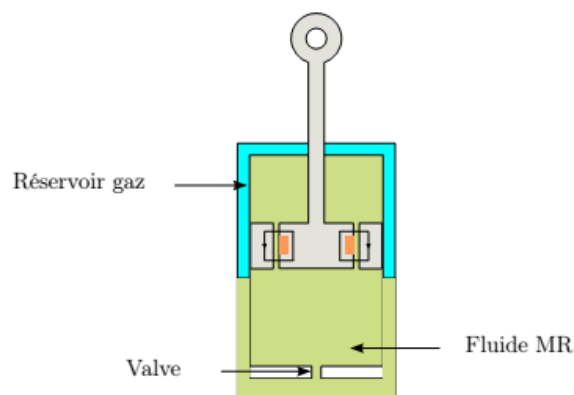


Figure 3.8 : Schéma d'un amortisseur MR bitube

### 3.6. Modèles Mécaniques Des Amortisseurs MR

Dès l'apparition de l'amortisseur magnéto-rhéologique le plus grand défi des chercheurs était de développer un modèle mathématique qui représente d'une manière fidèle le comportement physique de l'amortisseur (MR). Plusieurs modèles mathématiques ont vu le jour et leur développement a permis d'obtenir une représentation mathématique très proche de la réalité. Le principal challenge dans la modélisation numérique des amortisseurs MR est la précision dans l'introduction de la nature non linéaire de ces dispositifs. Le modèle doit être capable de simuler le comportement non linéaire de l'amortisseur MR, mais en même temps, il doit être aussi simple que possible pour permettre sa mise en œuvre effective dans les systèmes de contrôle. Par conséquent, une modélisation adéquate de ces dispositifs de contrôle semi-actif doit impliquer un modèle numérique simple, suffisamment précis et robuste. Le comportement des amortisseurs MR a été décrit par des modèles pseudo-statiques donnant la relation effort-déformation en mode linéaire. Néanmoins ces modèles ont été jugés insuffisants pour prédire le comportement non linéaire des amortisseurs MR pour le contrôle des vibrations. Par conséquent, des modèles dynamiques ont été développés. [41]

#### 3.6.1. Modèle Bingham

Proposé par Stanway en 1985 [42] un modèle mécanique idéalisé basé sur le modèle de Bingham, pour le comportement des amortisseurs électro-rhéologiques. Le modèle de Bingham se compose d'une force de coulomb en parallèle avec un amortisseur visqueux. Dans ce modèle,  $f_0$  est une force qui tient compte de la position moyenne non nulle due à l'accumulateur.

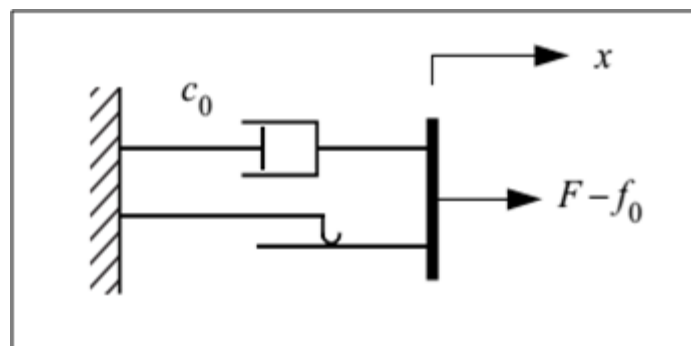


Figure 3.9 : Modèle Bingham proposé par Stanway, Sproston [42]

### Chapitre III : Amortisseur magnéto rhéologique

L'équation gouvernant le comportement du modèle Bingham est donné comme suit :

$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) + c_0 \dot{x}_d + f_0 \quad (3.2)$$

$f_c$  : la force de friction qui est liée aux propriétés du fluide.

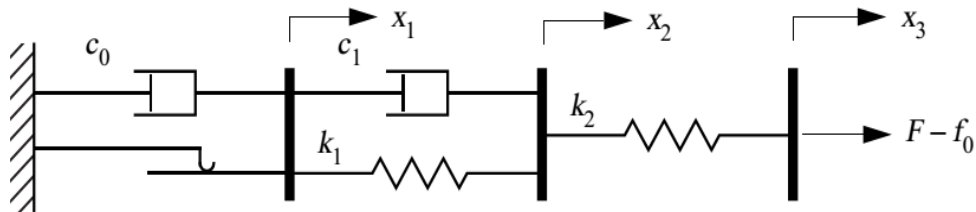
$\dot{x}_d$  : est la vitesse relative entre les deux extrémités de l'amortisseur.

$c_0$  : est le coefficient d'amortissement.

$f_0$  : est une force incluse pour prendre en considération les valeurs non-nulles observées dans l'accumulateur de l'amortisseur

#### 3.6.2. Modèle de Gamota et Filisco

Toujours dans le but de prédire le comportement des matériaux ER, Gamota et Filisco ont proposé une reformulation du modèle de Bingham, donnée par le modèle plastique viscoélastique. Le modèle comprend le modèle de Bingham (c'est à dire, un élément de friction en parallèle à un amortisseur) en série avec un modèle standard d'un solide linéaire. Les équations caractérisant ce modèle sont données par :



**Figure 3.10** : Modèle de Gamota et Filisco proposé par Gamota and Filisko [43]

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1(x_2 + x_1) + c_1(\dot{x}_2 + \dot{x}_1) \\ &= c_0 \dot{x}_1 + f_b(H) \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) \\ &= k_2(x_3 - x_2) \end{aligned} \right\} \text{Si } |F| > f_b \quad (3.3)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1(x_2 + x_1) + c_1 \dot{x}_2(\dot{x}_1) \\ &= k_2(x_3 - x_2) \end{aligned} \right\} \text{Si } |F| \leq f_b \quad (3.4)$$

### Chapitre III : Amortisseur magnéto rhéologique

$c_0$  est le coefficient d'amortissement visqueux associé au modèle de Bingham,  $k_1, k_2$  et  $c_1$  sont associés au modèle du solide linéaire. Notons que  $x_3$  correspond au déplacement réel de l'amortisseur. Lorsque  $|F| > f_b$ , le système d'équations 3.3 devient un système de trois équations à trois inconnues parmi lesquelles la force  $F$  qu'on cherche à calculer. Dans le second cas  $|F| \leq f_b$ , le système reste statique  $\dot{x}_1 = 0$  et d'équation 3.4 devient un système de deux équations à deux inconnues.

#### 3.6.3. Modèle Bouc-Wen

Le modèle a été introduit par Bouc [44] en 1971, et par la suite généralisé par Wen [45], qui démontre la polyvalence de ce modèle pour représenter une grande variété de modèles hystérétiques. En raison de cette caractéristique avantageuse, le modèle a été utilisé pour décrire plusieurs systèmes hystérétiques non linéaires comme les isolateurs par hystérésis et les amortisseurs MR. C'est l'un des modèles les plus représentatifs et le plus utilisé dans la modélisation du comportement hystérétique de l'amortisseur MR.

Le modèle Bouc-Wen a trois composantes : un ressort, un amortisseur et un bloc Bouc-Wen, dans une configuration parallèle comme sur la figure 3.11. La non-linéarité du système se trouve dans le bloc Bouc-Wen, qui est capable de capturer le comportement des amortisseurs MR.

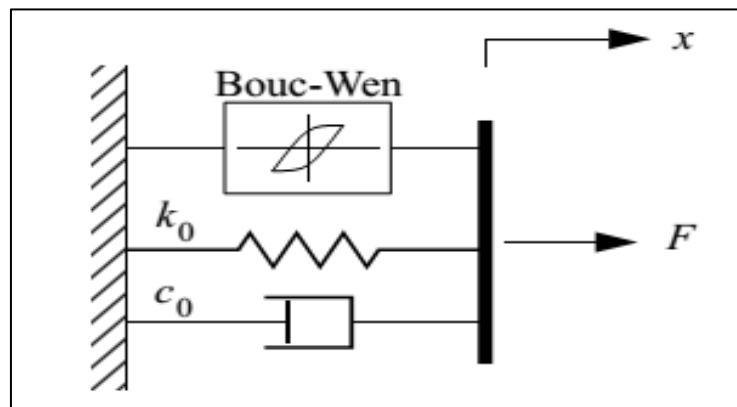


Figure 3.11: Model Bouc-Wen proposé par Wen [45]

Ce modèle a été adopté par Spencer et *al.* (1997) pour étudier le comportement d'un amortisseur MR en comparant les performances de ce modèle avec d'autres modèles paramétriques. Selon la configuration mécanique illustrée à la figure 3.11, la force d'amortissement dans ce système est donnée par :

$$F = c_0 \dot{x}_d + k_0(x_d - x_0) + \alpha z \quad (3.5)$$

où  $c_0$  est le coefficient visqueux,  $k_0$ , le coefficient de raideur,  $x_0$  le déplacement initial du ressort, il a été incorporé dans le modèle pour présenter un accumulateur et  $z$  est une variable évolutive associée au bloc Bouc-Wen et régie par l'expression suivante :

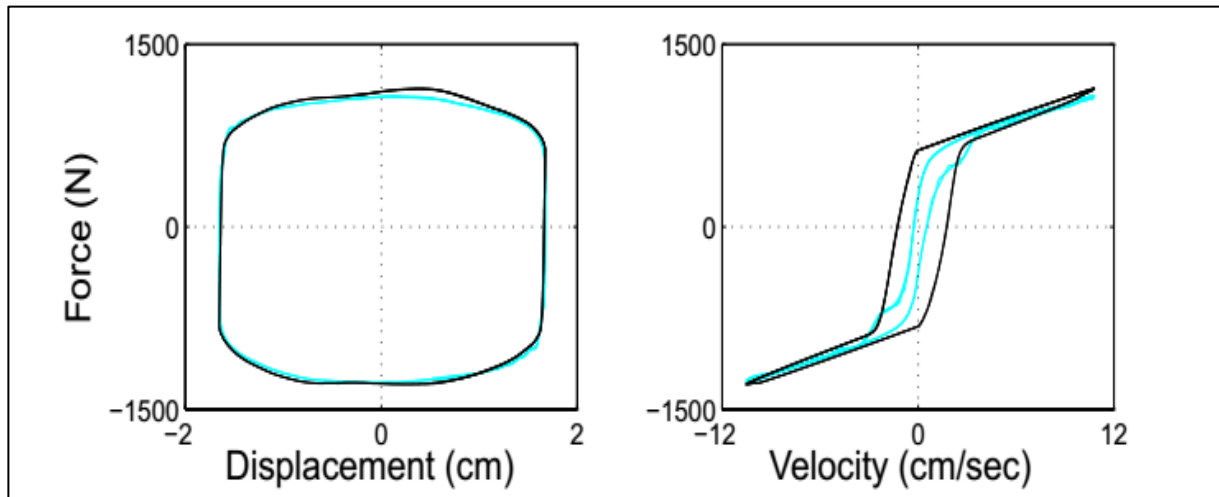
$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}_d| |z|^{n-1} - \beta \dot{x}_d |z|^n + A \dot{x}_d \quad (3.6)$$

Dans ce modèle, les paramètres  $c_0$  et  $\alpha$  sont dépendant du voltage dans le conducteur de courant, la relation entre ces paramètres est donnée comme suit :

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (3.7)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (3.8)$$

Dans le but de trouver un modèle mathématique qui reproduit d'une manière fidèle le comportement réel de l'amortisseur MR, Spencer Jr, Dyke [46] a procédé à la comparaison de résultat obtenus par le modèle Bouc-Wen a ceux obtenus par des test réel effectuer sur un amortisseur (MR). La comparaison est effectuée en termes de boucles de force-déplacement et force-vitesse. Les résultats obtenus sont démontrés sur la figure 3.12



**Figure 3.12 :** Comparaison entre le comportement prédit par le model Bouc-Wen et le model réel de l'amortisseur MR [46]

La figure 3.12 montre que le modèle Bouc-Wen reproduit fidèlement le comportement de l'amortisseur MR en boucle de force-déplacement, mais ce n'est pas le cas en boucle force-vitesse ou le modèle mathématique surestime la force dans la région des vitesses proche de

zéro. Il est aussi observé que le comportement reproduit par le modèle mathématique est linéaire alors que le comportement réel de l'amortisseur MR est non linéaire. Cela a conduit Spencer Jr, Dyke [46] à développer un modèle plus performant connu sous le nom de Bouc-Wen modifié.

### 3.6.4. Modèle Bouc-Wen modifié

Le model Bouc-Wen modifié est utilisée pour simulé le comportement dynamique de l'amortisseur MR impliquant des paramètres dépendant du voltage. Cela a pour but de modélisé la fluctuation des champs magnétiques. La figure (3.13) montre le modèle rhéologique de l'amortisseur.

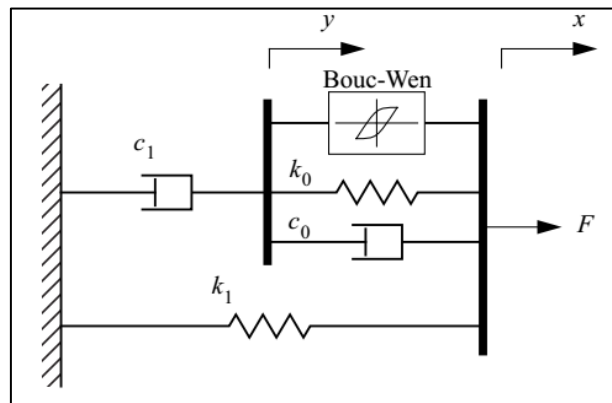


Figure 3.13 : Modèle Bouc-Wen modifié

La force générée par le modèle Bouc-Wen modifié peut-être exprimée par l'équation suivante :

$$F = c_1 \dot{y} + k_1 (x_d - x_0) \quad (3.9)$$

Le déplacement pseudo-interne  $y$  et la variable évolutive  $z$  sont données par

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_1 + c_0)} + (\alpha z + c_0 \dot{x}_d + k_0 (x_d - y)) \quad (3.10)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}_d - \dot{y}| |z| |z|^{n-1} - \beta (\dot{x}_d - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x}_d - \dot{y}) \quad (3.11)$$

Le déplacement et la vitesse relatifs entre les deux extrémités de l'amortisseur sont donnés par  $x_d$  et  $\dot{x}_d$ , respectivement.

### Chapitre III : Amortisseur magnéto rhéologique

Le déplacement initial de l'amortisseur est donné par  $x_0$ , la rigidité de l'accumulateur est  $k_1$ . L'amortissement visqueux à large et basse vitesses est représenté par  $c_0$  et  $c_1$ , respectivement.  $k_0$  Représente la rigidité à large vitesse.  $\alpha$  Est un coefficient évolutif. Les coefficients  $\gamma, \beta, n$  et  $A$  sont des paramètres liés au comportement hystérésis de l'amortisseur. Dans ce modèle les paramètres  $\alpha, c_0$  et  $c_1$  dépendent du voltage de commande  $u$  et sont exprimés comme suit :

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (3.12)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} u \quad (3.13)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (3.14)$$

Le filtre du premier ordre exprimé par l'équation (3.15), représente l'équilibre rhéologique et la conduite du système électromagnétique de l'amortisseur MR, d'où la dépendance de la force au voltage ( $V$ ) appliqué dans les équations (3.12-3.14).

$$\dot{u} = -\eta(u - V) \quad (3.15)$$

Afin de s'assurer des performances de ce modèle mathématique, une comparaison entre les résultats obtenus par ce modèle et ceux obtenus suite à des essais sur un modèle réel a été faite. La figure 3.14 montre les résultats obtenus suite à cette comparaison et cela en termes des boucles force-déplacement et force-vitesse.

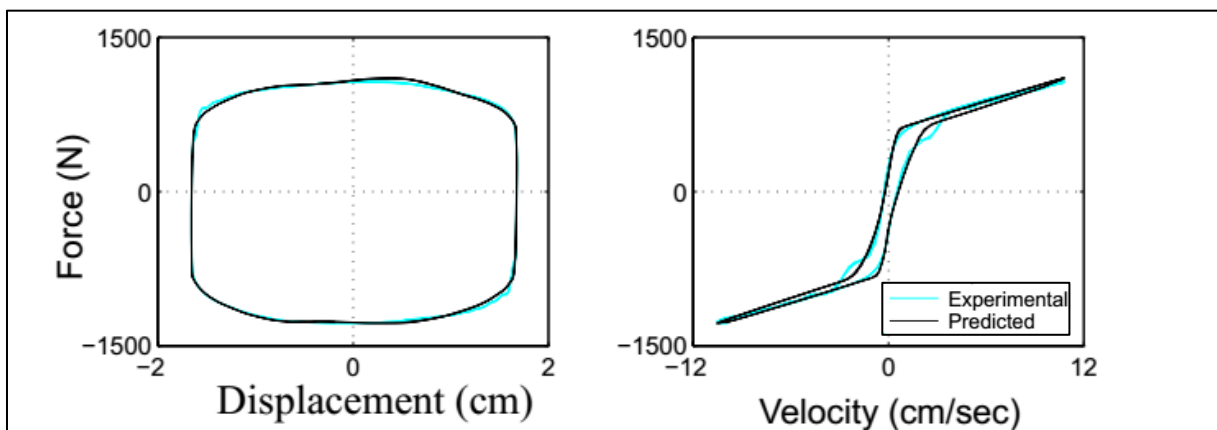
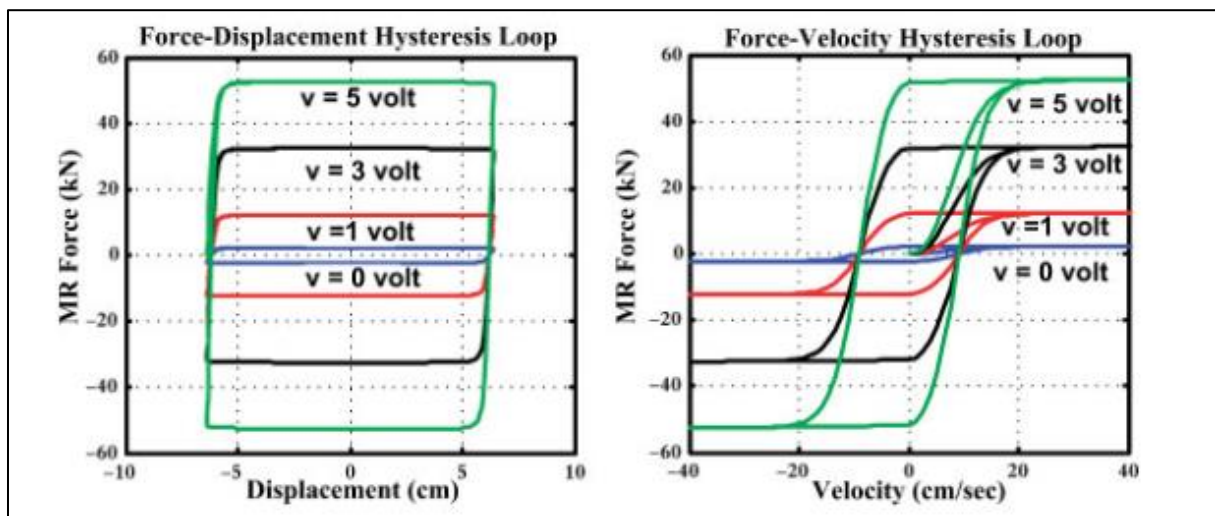


Figure 3.14: Comparaison entre le comportement prédit par le model Bouc-Wen modifié et le model réel de l'amortisseur MR[46].

### Chapitre III : Amortisseur magnéto rhéologique

Il est clair sur la figure 2.14 que le modèle Bouc-Wen modifié proposé par Spencer Jr, Dyke [46] reproduit d'une manière presque similaire le comportement de l'amortisseur MR réel, ce modèle vient ainsi comblé les lacunes observées sur les autres modèles surtout au niveau du comportement dans des régions où la vitesse est proche de zéro.

L'un des avantages de ce modèle est la relation entre le voltage induit ( $V$ ) et la force produite par l'amortisseur MR, ainsi en variant le voltage une variation de la force générée par l'amortisseur MR peut être obtenue, l'effet de la variation du voltage a été étudié dans plusieurs travaux de recherche. Sur la figure 3.15 l'effet de la variation du voltage sur la dissipation d'énergie est montré.



**Figure 3.15:** Relation entre le voltage et les boucles d'hystérésis force déformation et force vitesse .

Les bonnes performances du modèle Bouc-Wen modifié ont motivé son utilisation comme modèle mathématique de l'amortisseur MR dans cette étude.

### 3.7. Conclusion

Dans ce chapitre l'aspect physique et mathématique de l'amortisseur magnéto-rhéologique a été présenté. A commencer par les fluides magnéto-rhéologiques en passant par la description et les caractéristiques techniques de l'amortisseur. Puis, les modèles mathématiques développés depuis l'apparition de l'amortisseur MR jusqu'à l'aboutissement au modèle le plus représentatif du comportement de l'amortisseur.



**CHAPITRE IV**  
**FORMULATION**  
**MATHEMATIQUE ET**  
**NUMERIQUE PAR**  
**REPRESENTATION D'ETAT**  
**« STATE SPACE »**

## CHAPITRE IV FORMULATION MATHÉMATIQUE ET NUMÉRIQUE PAR REPRÉSENTATION D'ÉTAT « STATE SPACE »

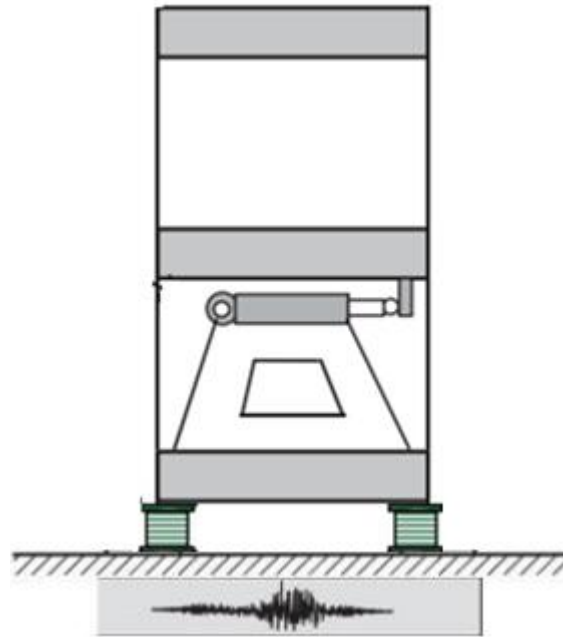
### 4.1. Introduction

La mise en équation, ou la formulation mathématique d'un système dynamique sous contrôle semi actif abouti à des équations différentielles complexes dont la résolution analytique est assez difficile et parfois compliquée. Afin de résoudre ce genre d'équation complexe on fait appel aux fonctions de transfert tel que la représentation d'état « *state space* », la transformée de Laplace, pole zéro. Dans notre travail, nous utiliserons la formulation de transfert basée sur la représentation d'état « *state space* » pour ramener les équations différentielle de  $n^{\text{ème}}$  ordre à  $n$  équations différentielles de 1<sup>er</sup> ordre.

### 4.2. Hypothèses

Pour analyser la réponse sismique d'un bâtiment équipé avec des dispositifs de contrôle quelques hypothèses sont introduites :

- Le bâtiment est supposé être symétrique dans son plan. Le mouvement du sol est supposé se produire dans la direction des plans symétriques du bâtiment pour que le problème puisse être simplifié en un problème à deux dimensions comme le montre la figure 3.1.
- Le bâtiment est modélisé comme un système linéaire à plusieurs degrés de liberté où la masse est concentrée au niveau de chaque étage et la rigidité est assurée par des voiles ou des poteaux. Cette hypothèse indique que l'excitation sismique considérée n'est pas sévère et en raison de l'augmentation significative de la capacité d'absorption d'énergie, les bâtiments sont en mesure de conserver des propriétés élastiques et linéaires sous l'effet du séisme.
- Les variations spatiales des mouvements du sol ne sont pas considérées. Ceci est justifié par le fait que les dimensions totales en plan dans la direction de l'excitation sismique ne sont pas grandes. Le fait de négliger l'interaction sol-structure limite l'applicabilité des résultats aux bâtiments sur sol ferme, elle est moins restrictive pour les bâtiments dont les fondations ne sont pas massives (fondations superficielles, par exemple).



**Figure 4.1** : Diagramme d'un modèle de bâtiment isolée a la base avec un amortisseur MR.

### 4.3. Equation de mouvement d'un bâtiment équipé de dispositif de contrôle

#### 4.3.1. Solution en représentation d'état ( *state space* )

C'est une méthode de résolution numérique des problèmes à plusieurs degrés de liberté (NDDL) d'un ordre supérieur. Cette méthode est basée sur la réduction de l'ordre des équations dynamiques de la manière suivante :

Si une équation différentielle est du 2<sup>ème</sup> ordre ———> elle est écrite sous forme de deux (2) équations différentielles du 1<sup>er</sup> ordre.

D'une manière générale, une équation différentielle du  $n^{\text{ième}}$  ordre est transformée en  $n$  équations du premier ordre (l'ordre des équations différentielles devient donc le nombre d'équations différentielles du premier ordre) Datta [48].

#### 4.3.2. La forme générale

La forme générale de l'écriture de la représentation d'état est comme suit :

$$\{\dot{X}\} = [A]\{X\} + [B]\{U\} \quad (4.1)$$

$$\{Y\} = [C]\{X\} + [D]\{U\} \quad (4.2)$$

Dans la formulation en représentation d'état « *state space* » on considère quatre matrices [A], [B], [C], [D] définies comme suit [48, 49].

**[A]** : La matrice d'état (*state matrix*) elle dépend des paramètres du système dynamique (M, K, C), lien entre  $\dot{X}$  et  $X$

**[B]** : La matrice d'entrée, (*input matrix*), elle dépend des entrées *inputs* (toute force extérieure agissant sur le système dynamique) elle est directement liée à  $\dot{X}$  et  $U$  comme le montre l'équation (4.1).

**[C]** : la matrice de sortie (*output matrix*) ; elle est généralement unitaire.

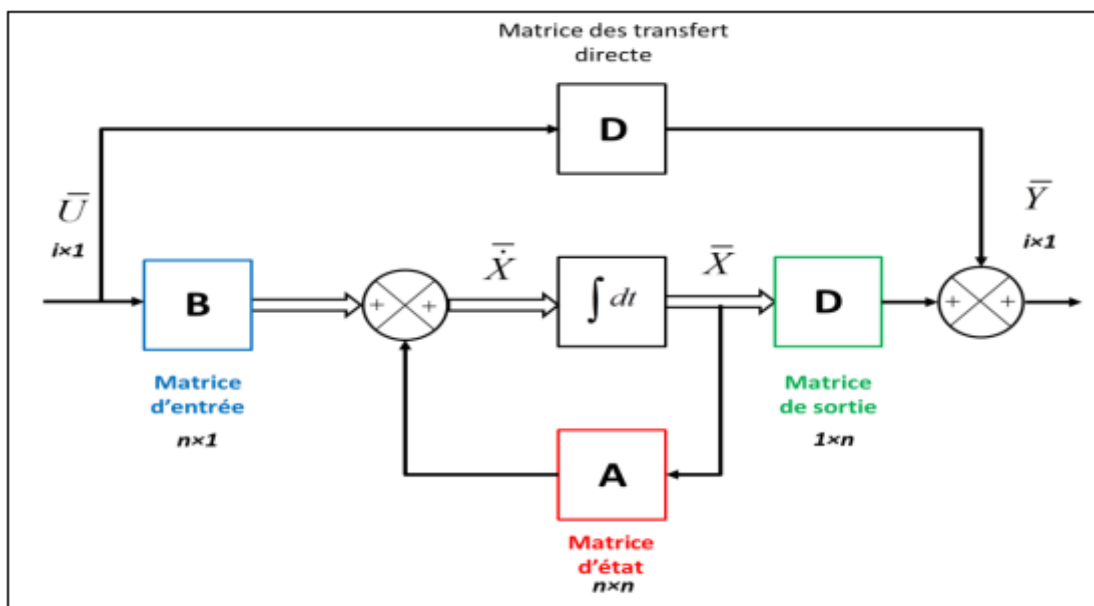
**[D]** : la matrice de transmission directe entre les entrées et les sorties du système (*outputs et inputs*) dans les problèmes de dynamique cette matrice est généralement nulle.

**n** : nombre de degrés de liberté (DDL)

**i** : nombre des entrées (*inputs*)

**j** : nombre des sorties (*outputs*)

$\{U\}$  : Vecteur d'entrée (*input*)



**Fig.4.2** : Forme générale de la représentation d'état « state space », (single input, single output)[49, 50]

**4.4. Exemple Système à cinq étages avec isolation à la base équipé d'un amortisseur MR :**

Dans cet exemple, nous étudions un système mécanique ou classique MRA (Masse, Ressort, Amortisseur) à cinq étage avec isolation à la base, pour la mise en œuvre de la résolution mathématique par la représentation d'état « *state space* ».

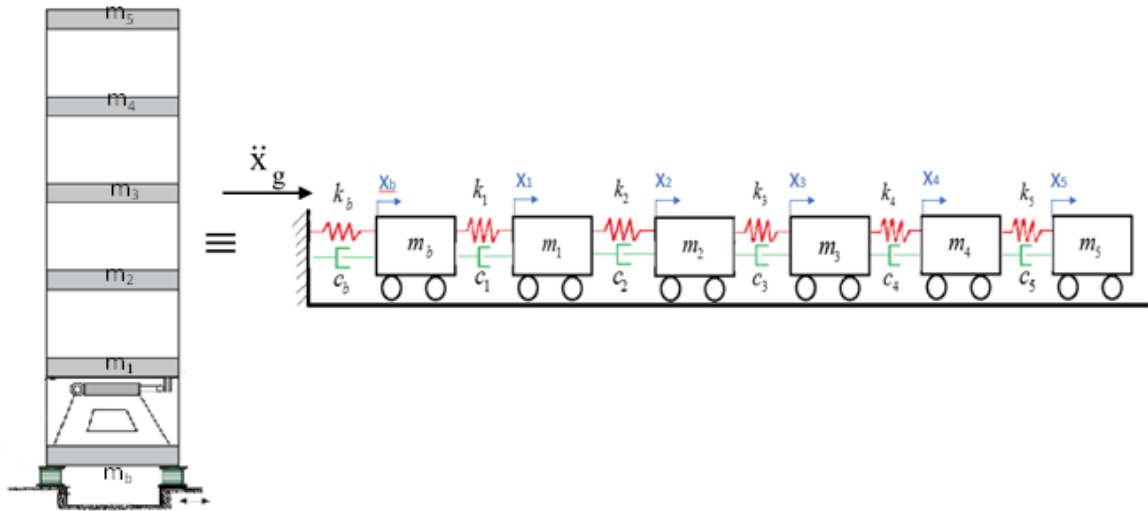


Fig.4.3 : bâtiment 5 étages avec isolation à la base et amortisseur MR

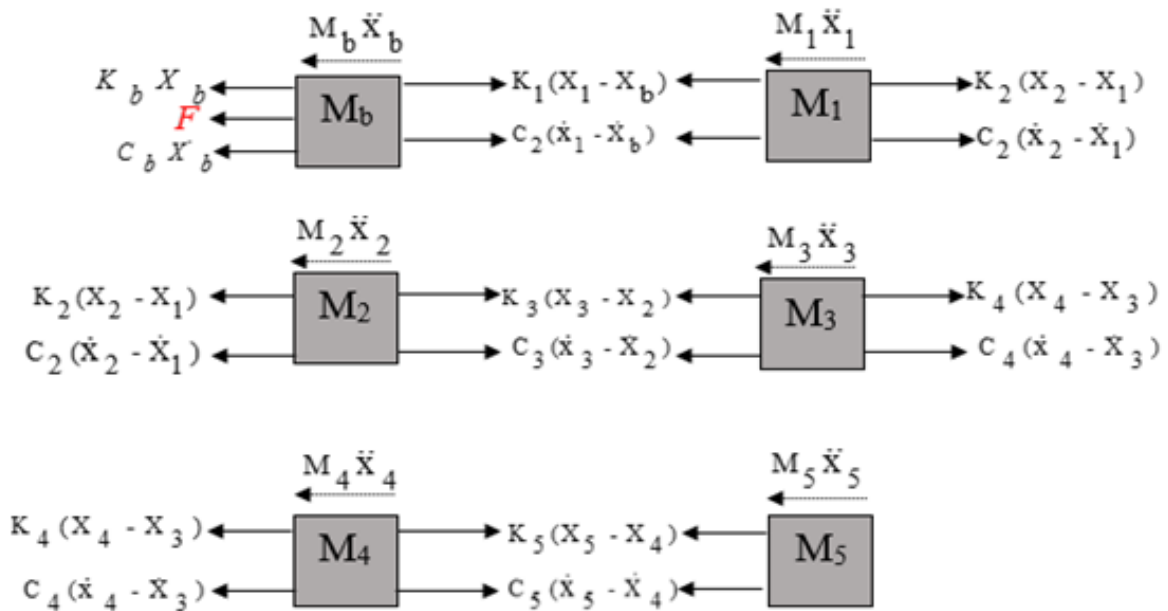


Fig.4.4. Diagrammes de corps libres

#### 4.4.1. Equations de Mouvement

L'équation de mouvement d'un système à plusieurs degrés de liberté sous excitation sismique avec un contrôle est de la forme suivante :

$$[\mathbf{M}_i] \{\ddot{\mathbf{x}}_i\} + [\mathbf{C}_i] \{\dot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{K}_i] \{\mathbf{x}_i\} = -[\mathbf{M}_i] \{\mathbf{r}\} \ddot{\mathbf{x}}_g + \{\mathbf{f}_u\} [F] \quad (4.3)$$

#### 4.4.2. Equations de Mouvement pour chaque masse :

1) Masse  $\mathbf{M}_b$  :

$$m_b \ddot{x}_b + (c_b + c_1) \dot{x}_b - c_1 \dot{x}_1 + (k_b + k_1) x_b - k_1 x_1 = -m_b \ddot{x}_g - F \quad (4.4)$$

2) Masse  $\mathbf{M}_1$  :

$$m_1 \ddot{x}_1 - c_1 \dot{x}_b + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 - k_1 x_b + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = -m_1 \ddot{x}_g \quad (4.5)$$

3) Masse  $\mathbf{M}_2$  :

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + (c_2 + c_3) \dot{x}_2 - c_3 \dot{x}_3 - k_2 x_1 + (k_2 + k_3) x_2 - k_3 x_3 = -m_2 \ddot{x}_g \quad (4.6)$$

4) Masse  $\mathbf{M}_3$  :

$$m_3 \ddot{x}_3 - c_3 \dot{x}_2 + (c_3 + c_4) \dot{x}_3 - c_4 \dot{x}_4 - k_3 x_2 + (k_3 + k_4) x_3 - k_4 x_4 = -m_3 \ddot{x}_g \quad (4.7)$$

5) Masse  $\mathbf{M}_4$  :

$$m_4 \ddot{x}_4 - c_4 \dot{x}_3 + (c_4 + c_5) \dot{x}_4 - c_5 \dot{x}_5 - k_4 x_3 + (k_4 + k_5) x_4 - k_5 x_5 = m_4 \ddot{x}_g \quad (4.8)$$

6) Masse  $\mathbf{M}_5$  :

$$m_5 \ddot{x}_5 - c_5 \dot{x}_4 + c_5 \dot{x}_5 - k_5 x_4 + k_5 x_5 = m_5 \ddot{x}_g \quad (4.9)$$

On écrit l'équation sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_5 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b+c_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 & c_3+c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_4+c_5 & -c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_4 & c_5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b+k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3+k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_4+k_5 & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_b \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_b \\ m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \end{bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F \quad (4.10)$$

L'équation (4.3) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\{\ddot{x}_t\} = -[M_t]^{-1} [C_t] \{\dot{x}_t\} - [M_t]^{-1} [K_t] \{x_t\} - \{\Gamma_t\} \{\ddot{x}_g\} - [M_t]^{-1} [D] \{F\} \quad (4.11)$$

$[M_t]^{-1}$  : inverse de matrice de masse

$[C_t]$  : matrice d'amortissement

$[K_t]$  : matrice de rigidité

$\{\Gamma_t\}$  : vecteur unitaire

$[D]$  : matrice d'emplacement de l'amortisseur MR

$\{F\}$  : vecteur de force généré par l'amortisseur MR

Les équations (4.4) à (4.9) peuvent être réarrangées comme suit :

1) Masse  $\mathbf{M}_b$  :

$$\ddot{x}_b = -\frac{(c_b + c_1)}{m_b} \dot{x}_b + \frac{c_1}{m_b} \dot{x}_1 + \frac{(k_b + k_1)}{m_b} x_b - \frac{k_1}{m_b} x_1 - \ddot{x}_g - \frac{F}{m_b} \quad (4.12)$$

2) Masse  $\mathbf{M}_1$

$$\ddot{x}_1 = \frac{c_1}{m_1} \dot{x}_b - \frac{(c_1 + c_2)}{m_1} \dot{x}_1 + \frac{c_2}{m_1} \dot{x}_2 + \frac{k_1}{m_1} x_b - \frac{(k_1 + k_2)}{m_1} x_1 + \frac{k_2}{m_1} x_2 - \ddot{x}_g \quad (4.13)$$

3) Masse  $\mathbf{M}_2$  :

$$\ddot{x}_2 = \frac{c_2}{m_2} \dot{x}_1 - \frac{(c_2 + c_3)}{m_2} \dot{x}_2 + \frac{c_3}{m_2} \dot{x}_3 + \frac{k_2}{m_2} x_1 - \frac{(k_2 + k_3)}{m_2} x_2 + \frac{k_3}{m_2} x_3 - \ddot{x}_g \quad (4.14)$$

4) Masse  $\mathbf{M}_3$

$$\ddot{x}_3 = \frac{c_3}{m_3} \dot{x}_2 - \frac{(c_3 + c_4)}{m_3} \dot{x}_3 + \frac{c_4}{m_3} \dot{x}_4 + \frac{k_3}{m_3} x_2 - \frac{(k_3 + k_4)}{m_3} x_3 + \frac{k_4}{m_3} x_4 - \ddot{x}_g \quad (4.15)$$

5) Masse  $\mathbf{M}_4$

$$\ddot{x}_3 = \frac{c_3}{m_3} \dot{x}_2 - \frac{(c_3 + c_4)}{m_3} \dot{x}_3 + \frac{c_4}{m_3} \dot{x}_4 + \frac{k_3}{m_3} x_2 - \frac{(k_3 + k_4)}{m_3} x_3 + \frac{k_4}{m_3} x_4 - \ddot{x}_g \quad (4.16)$$

6) Masse  $\mathbf{M}_5$

$$\ddot{x}_5 = \frac{c_5}{m_5} \dot{x}_4 - \frac{c_5}{m_5} \dot{x}_5 + \frac{k_5}{m_5} x_4 - \frac{k_5}{m_5} x_5 - \ddot{x}_g \quad (4.17)$$

L'expression précédente peut être réarrangée comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_i\} \\ \{\ddot{x}_i\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ [M_i]^{-1} [K_i] & [M_i]^{-1} [C_i] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_i\} \\ \{\dot{x}_i\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ [M_i]^{-1} \{f_u\} \end{bmatrix} [F] + \begin{bmatrix} (0) \\ -\{r\} \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (4.18)$$



L'équation de mouvement de second ordre (4.11) est écrite dans une représentation d'état de premier ordre en définissant le vecteur d'état suivant :

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Ensuite, l'équation (4.9) peut être réécrite sous la forme :

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) + E\ddot{x}_g + Hf_u(t) \\ y(t) &= Cz(t) \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

Tel que :

$$\dot{z}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M_i]^{-1}[K_i] & -[M_i]^{-1}[C_i] \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$[A(t)] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_b+k_1}{M_b} & \frac{k_1}{M_b} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{c_b+c_1}{M_b} & \frac{c_1}{M_b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{M_1} & -\frac{k_1+k_2}{M_1} & \frac{k_2}{M_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_1}{M_1} & -\frac{c_1+c_2}{M_1} & \frac{c_2}{M_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{M_2} & -\frac{k_2+k_3}{M_2} & \frac{k_3}{M_2} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_2}{M_2} & -\frac{c_2+c_3}{M_2} & \frac{c_3}{M_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_3}{M_3} & -\frac{k_3+k_4}{M_3} & \frac{k_4}{M_3} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_3}{M_3} & -\frac{c_3+c_4}{M_3} & \frac{c_4}{M_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_4}{M_4} & -\frac{k_4+k_5}{M_4} & \frac{k_5}{M_4} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_4}{M_4} & -\frac{c_4+c_5}{M_4} & \frac{c_5}{M_4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_5}{M_5} & -\frac{k_5}{M_5} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_5}{M_5} & -\frac{c_5}{M_5} \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{m_b} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$[C] = [I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

#### 4.5. Résolution numérique

Pour la résolution numérique, nous étudions l'efficacité d'une stratégie de contrôle hybride d'un bâtiment isolé à la base et équipé d'un amortisseur MR. L'équation représentant le système du bâtiment sous excitations sismiques est implémenté dans le module de simulation SIMULINK du logiciel MATLAB en utilisant la boîte à outils de la représentation d'état (*State-Space Toolbox*). Cette boîte à outils emploie le système continu pour résoudre l'équation de mouvement. L'intégration numérique est conduite en utilisant le solveur Dormand-Prince de 8<sup>ème</sup> ordre intégré à SIMULINK.

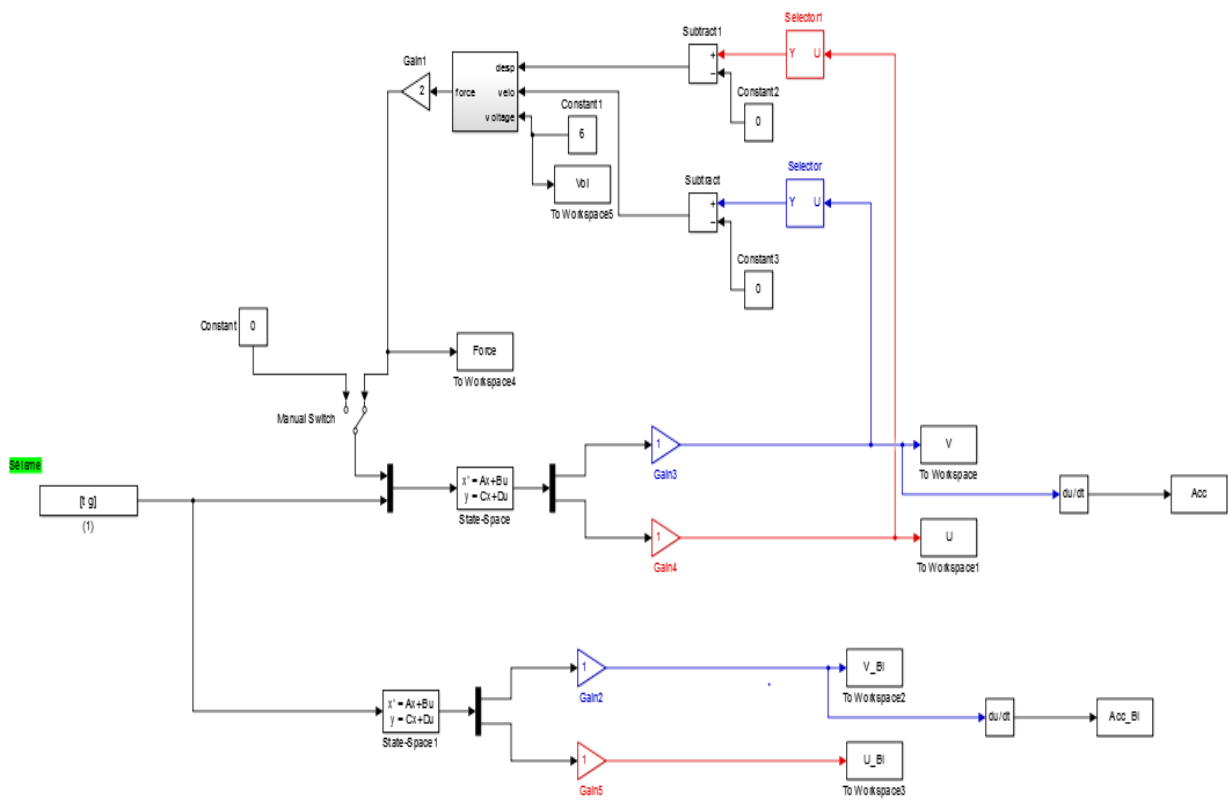


Figure 4.5 : Fichier Simulink de la représentation d'état.

Deux stratégies de contrôle sont appliquées pour la comparaison des résultats obtenus sous diverses stratégies. Il s'agit d'un contrôle PASSIF-OFF dans lequel le voltage (V) sera maintenu a une valeur nulle (0V) et d'un contrôle PASSIF-ON dans lequel le voltage (V) sera maintenu à des différentes valeurs constantes (3V, 6V, 9V et 12V), respectivement. Un interrupteur

(*switch*) manuel est ajouté au diagramme de contrôle pour le passage d'un système contrôlé à un système non contrôlé.

Les équations mathématiques régissant le comportement de l'amortisseur MR utilisées dans cette étude sont reproduites dans un schéma SIMULINK en utilisant les divers blocs de la bibliothèque proposée par SIMULINK. La figure 4.6 montre la représentation des équations (3.9) - (3.15). La force maximale que peut produire l'amortisseur MR est de 1000 kN.

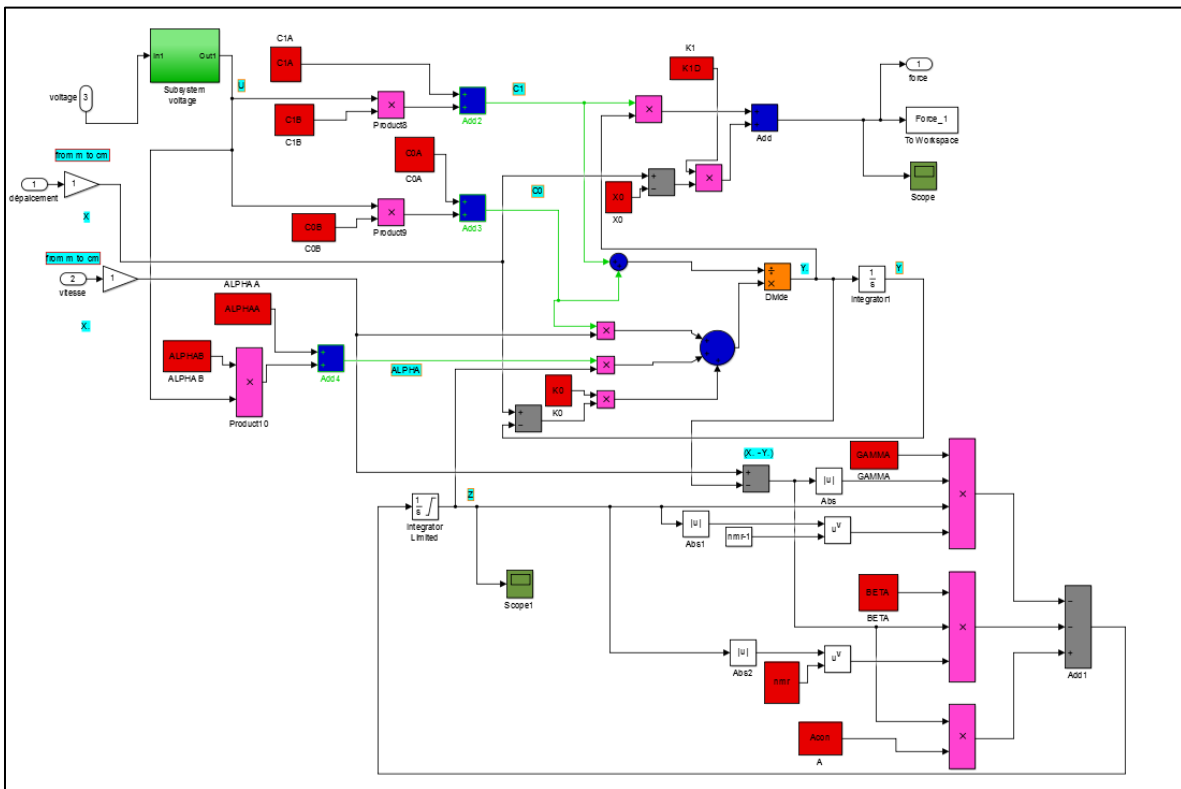


Figure 4.6 : Fichier Simulink du modèle Bouc-Wen modifié de l'amortisseur MR

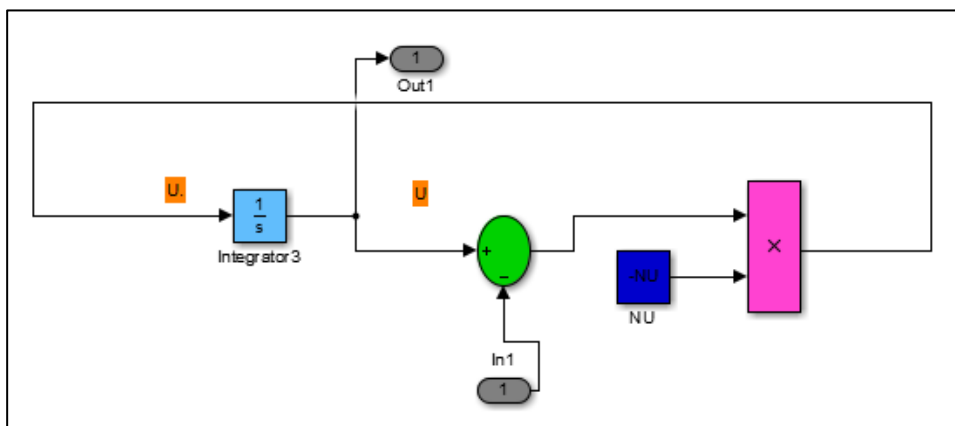


Figure 4.7 : Fichier Simulink amortisseur MR Bouc-Wen modifié, suite [30]

**Tableau 4.1:** Paramètres du modèle prototype amortisseur MR

En utilisant les constantes données par Bharti, Dumne [34]

Paramètre	Unité	Valeur
$C_{0a}$	(kN.S/m)	50.30
$C_{0b}$	(kN.S/m)	48.70
$C_{1a}$	(kN.S/m)	8106.20
$C_{1b}$	(kN.S/m .V)	7807.90
$K_0$	(kN.S/m)	0.0054
$K_1$	(kN/m)	0.0087
$\alpha_a$	(kN/m)	8.70
$\alpha_b$	(kN/m .V)	6.40
$\Gamma$	(m <sup>-2</sup> )	496
B	(m <sup>-2</sup> )	496
A	Sans	810.50
N	Sans	2
H	(S <sup>-1</sup> )	195

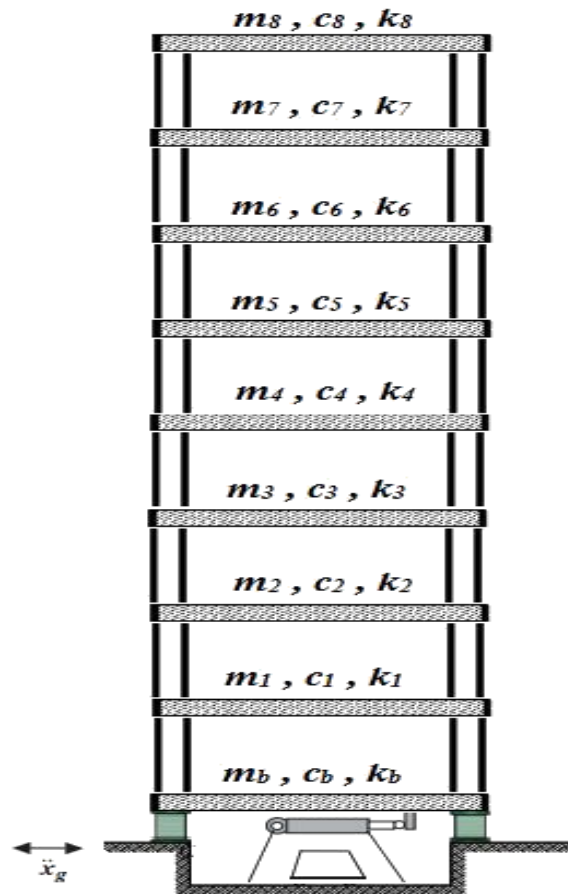
Le déplacement et la vitesse relative entre les deux étages connectés sont calculés à l'aide du sélecteur qui détermine la valeur à sélectionner parmi le vecteur des états sortant du bloc de la représentation d'état. Une fois calculés, les déplacements et vitesses relatives sont envoyés vers le modèle de l'amortisseur MR afin de déterminer la force générée par ce dernier.

#### 4.5.1 Description de la structure

La structure utilisée dans cette étude est un bâtiment à 8 étages en portique en modélisation bidimensionnelle (figure 4.8) utilisée par Yang [51]. Les paramètres structurels de la structure sont présentés dans le tableau 4.2. La structure est équipée d'un isolateur à la base, dont les caractéristiques et paramètres sont présentés dans le tableau 4.3.

**Tableau 4.2:** Paramètres de la structure étudiée

Niveau	Masse [ton/ml]	Rigidité [kN/m]	Amortissement [kN.s/m]
base	$m_b$	$k_b$	$c_b$
1	345.6	$3.4 \times 10^5$	490
2	345.6	$3.26 \times 10^5$	467
3	345.6	$2.85 \times 10^5$	410
4	345.6	$2.69 \times 10^5$	386
5	345.6	$2.43 \times 10^5$	348
6	345.6	$2.07 \times 10^5$	298
7	345.6	$1.69 \times 10^5$	243
8	345.6	$1.37 \times 10^5$	196



**Figure 4.8:** Modèle bidimensionnel de la structure étudiée

#### 4.5.2. Description de l'isolateur

Il s'agit d'un isolateur en élastomère à noyau de plomb de type LRB (Lead Rubber bearing), dont les paramètres sont présentés dans le tableau 4.3

**Tableau 4.3:** Paramètres de l'isolateur

Masse [ton/ml]	Rigidité [kN/m]	Amortissement [kN.s/m]
$m_b$	$k_b$	$c_b$
450	$18050 \times 10^{-5}$	26.17

#### 4.5.3. Description des excitations sismiques

Le bâtiment considéré dans cette analyse sera soumis aux excitations sismiques suivantes :

- Séisme Northridge 1994 d'une magnitude 6.7 et d'une accélération maximale du sol avec un PGA de 0.82g.
- Séisme Kobe, 1995 d'une magnitude de 6.9 et d'une accélération maximale du sol avec un PGA de 0.62g
- Séisme Chi-Chi, d'une magnitude de 7.7 d'une accélération maximale du sol avec un PGA de 0.56
- Séisme Impavall, d'une magnitude de 6.5 et d'une accélération maximale du sol avec un PGA de 0.46

Le choix de ces quatre enregistrements est motivé par leurs natures, Northridge et Kobe sont considérés dans la littérature comme des séismes de champ lointain, alors que Chi-Chi et Imperial Valey sont considérés comme des séismes de champs proche.

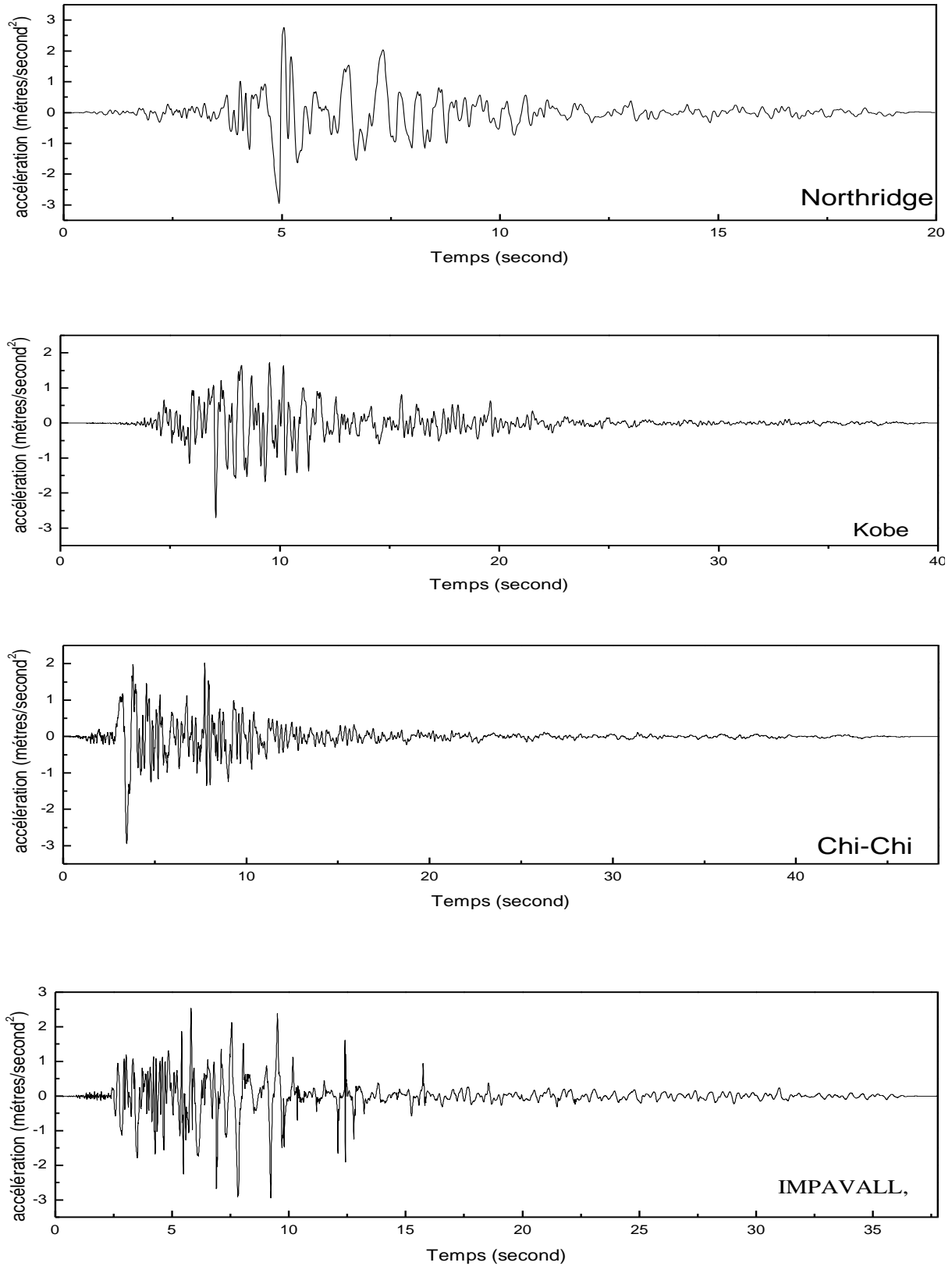
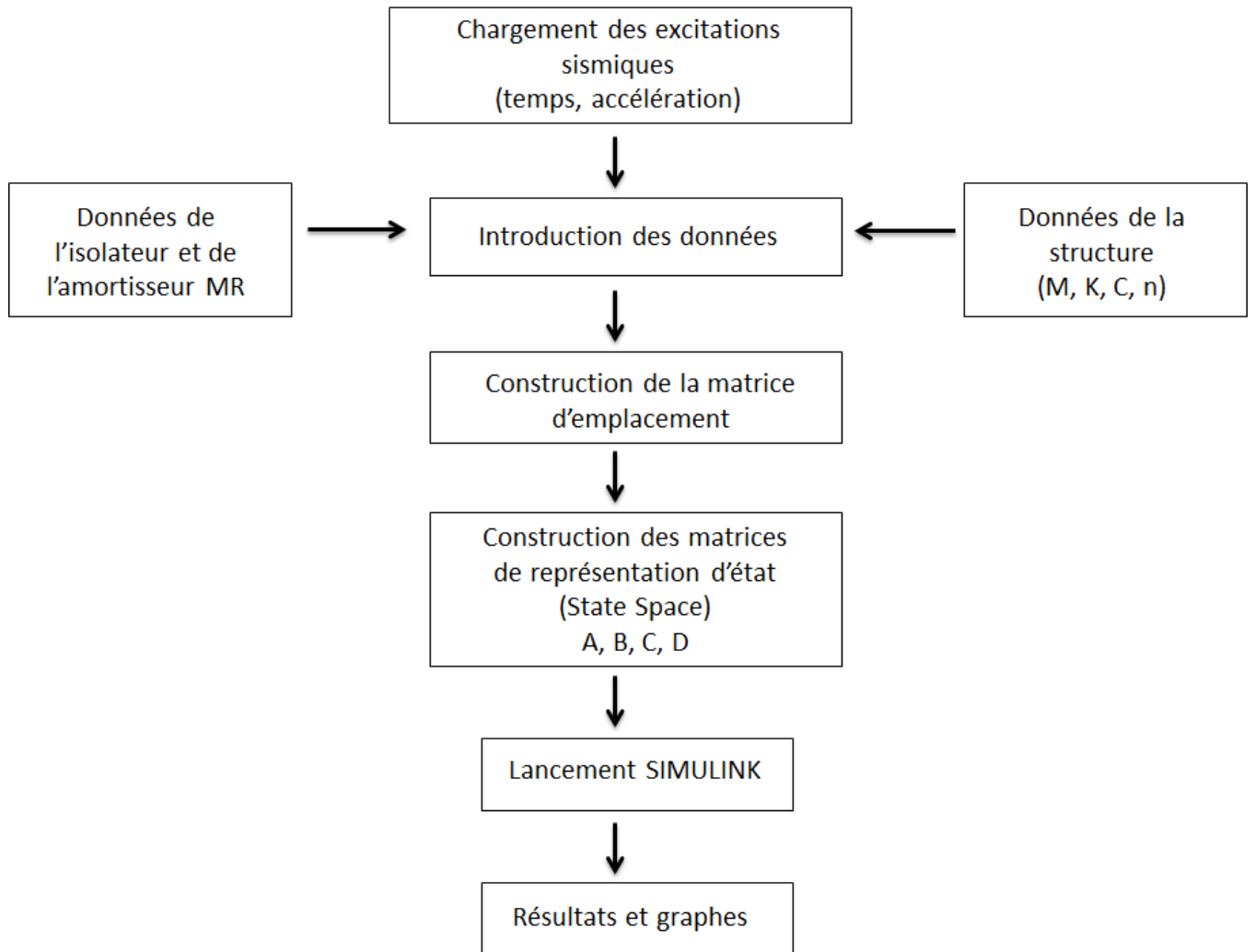


Figure 4.9 : Accélérogramme des excitations sismiques





**Figure 4.10 :** Diagramme de résolution par MATLAB

#### 4.6. Conclusion

Le code écrit en MATLAB sera exécuté afin d'obtenir les réponses sismiques de la structure sous les différentes excitations sismiques considérées dans cette étude. Les résultats obtenus seront détaillés et interprétés dans le chapitre suivant.

# **Chapitre V**

## **Résultats**

## Chapitre V Résultats

### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre l'efficacité d'une stratégie de contrôle hybride (isolation à la base + amortisseur MR) sera étudiée en considérant plusieurs valeurs de voltage de l'amortisseur MR. Les résultats obtenus seront discutés et interprétés pour plusieurs paramètres dynamiques soigneusement choisis. Les résultats seront donnés en termes de déplacements en tête et à la base du bâtiment, effort tranchant à la base et déplacement inter-étages.

### 5.2 Déplacement en tête

L'analyse effectuée pour la structure isolée à la base avec et sans amortisseur MR nous a permis de comparer les résultats des déplacements en tête du bâtiment étudié sous les excitations sismiques considérées, à savoir : Northridge, Kobe, Chichi et Imperial Valley. Ces résultats sont représentés dans les tableaux et les figures ci-dessous.

**Tableau 5.1** Déplacement en tête du bâtiment sous diverses stratégies de contrôle

Séisme	Structure à base isolée	Structure à base isolée + MR (système hybride)			
		MR 0VOL	MR 3VOL	MR 6VOL	MR 9VOL
Northridge	0.1741	0.1631 (6.28%)	0.1399 (19.62%)	0.1203 (30.90%)	0.1030 (40.79%)
Kobe	0.1646	0.1415 (14.02%)	0.1223 (25.69%)	0.1080 (34.37%)	0.0961 (41.58%)
Chichi	0.1251	0.1038 (16.98%)	0.0978 (21.84%)	0.0941 (24.73%)	0.0921 (26.36%)
Impavall	0.1694	0.1650 (2.60%)	0.1536 (9.30%)	0.1440 (14.97%)	0.1355 (20.01%)

Sur le tableau 5.1 nous remarquons que l'introduction de l'amortisseur MR dans une structure équipée d'isolateurs à la base permet de réduire les déplacements en tête du bâtiment. Cette réduction est proportionnelle à la force générée par l'amortisseur MR.

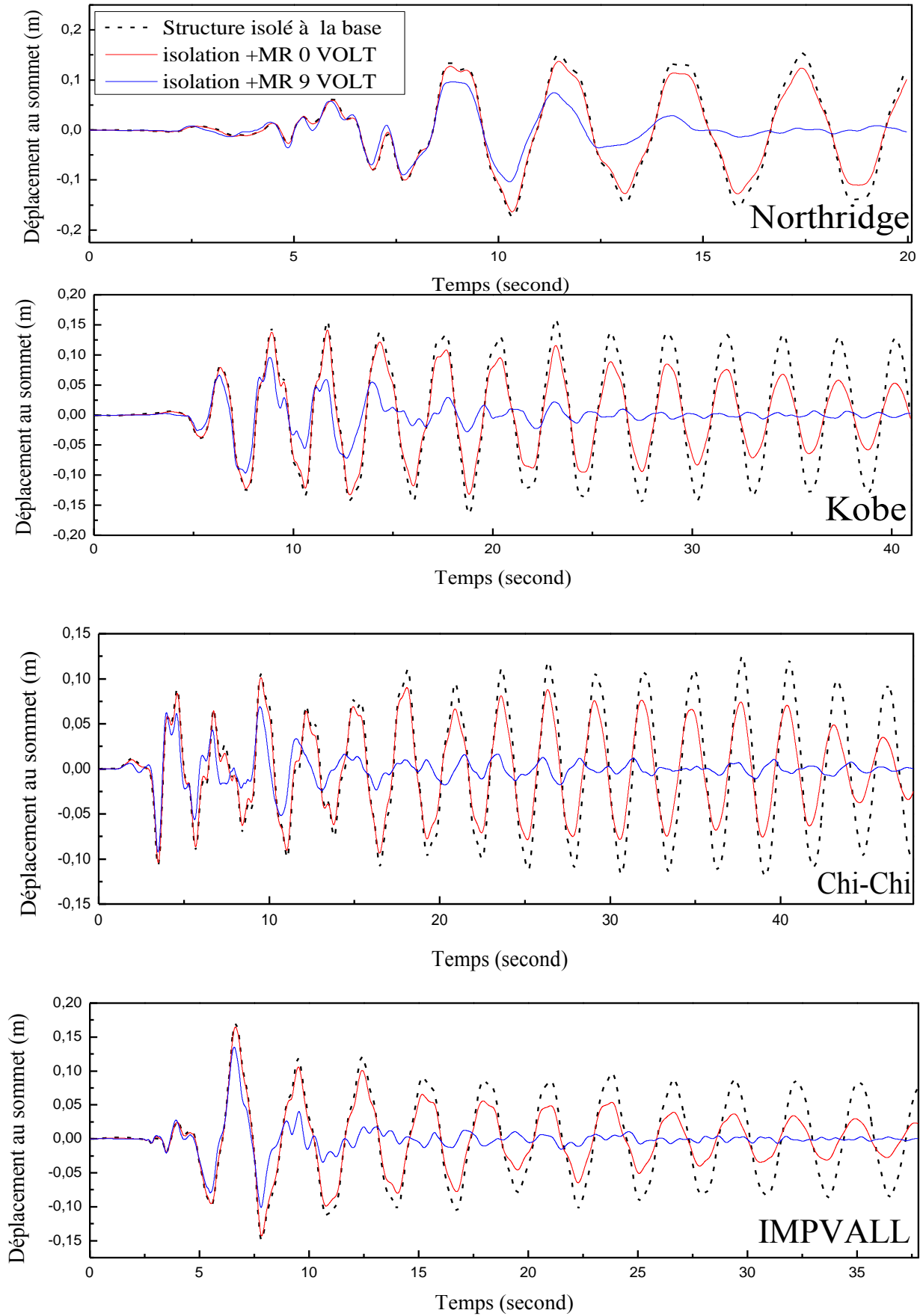


Figure 5.1 Déplacement en tête du bâtiment sous diverses stratégies de contrôle

La figure 5.1 vient conforter les résultats montrés dans le tableau 5.1. On observe clairement que les déplacements de la structure isolée ont une allure oscillatoire ; cette oscillation est fortement réduite en présence d'un amortisseur MR ce qui démontre l'efficacité d'un contrôle hybride pour la réduction des déplacements en tête des bâtiments de moyenne hauteur.

### 5.3 Déplacement à la base

L'un des problèmes les plus récurrents dans les structures à base isolée sont les grands déplacements de la base sous les excitations sismiques, ce qui nous conduit à étudier de près ce paramètre dynamique.

**Tableau 5.2 : déplacement à la base du bâtiment**

Séisme	Structure à Base isolée	Structure à base isolée + MR (système hybride)			
		MR 0VOL	MR 3VOL	MR 6VOL	MR 9VOL
Northridge	0.1252	0.1176 (6.06%)	0.1065 (14.95%)	0.0972 (22.34%)	0.1030 (29.02%)
Kobe	0.1201	0.1072 (10.75%)	0.0982 (18.17%)	0.0903 (24.74%)	0.0961 (30.27%)
Chichi	0.0972	0.0815 (16.20%)	0.0729 (24.97%)	0.0681 (29.94%)	0.0647 (33.42%)
Impavall	0.1190	0.1152 (3.17%)	0.1057 (11.14%)	0.0977 (17.90%)	0.0906 (23.88%)

Le tableau 5.2 montre une nette réduction dans les déplacements à la base du bâtiment équipé d'un système de contrôle hybride (isolateur + MR) par rapport à celui équipé uniquement d'un isolateur à la base. L'ordre de la réduction obtenue varie de 23% à 33 % selon la nature de la source sismique. Ainsi, pour des séismes de champ lointain la réduction est plus importante que pour ceux de champ proche.

Afin de mieux exprimer l'importance des résultats obtenus, la figure 5.2 montre les déplacements de la base du bâtiment étudié sous diverses excitations sismiques. Le mouvement oscillatoire caractéristique du bâtiment isolé à la base est bien visible sur la figure 5.2 ; sous l'effet de la présence d'un amortisseur MR cette oscillation est considérablement réduite.

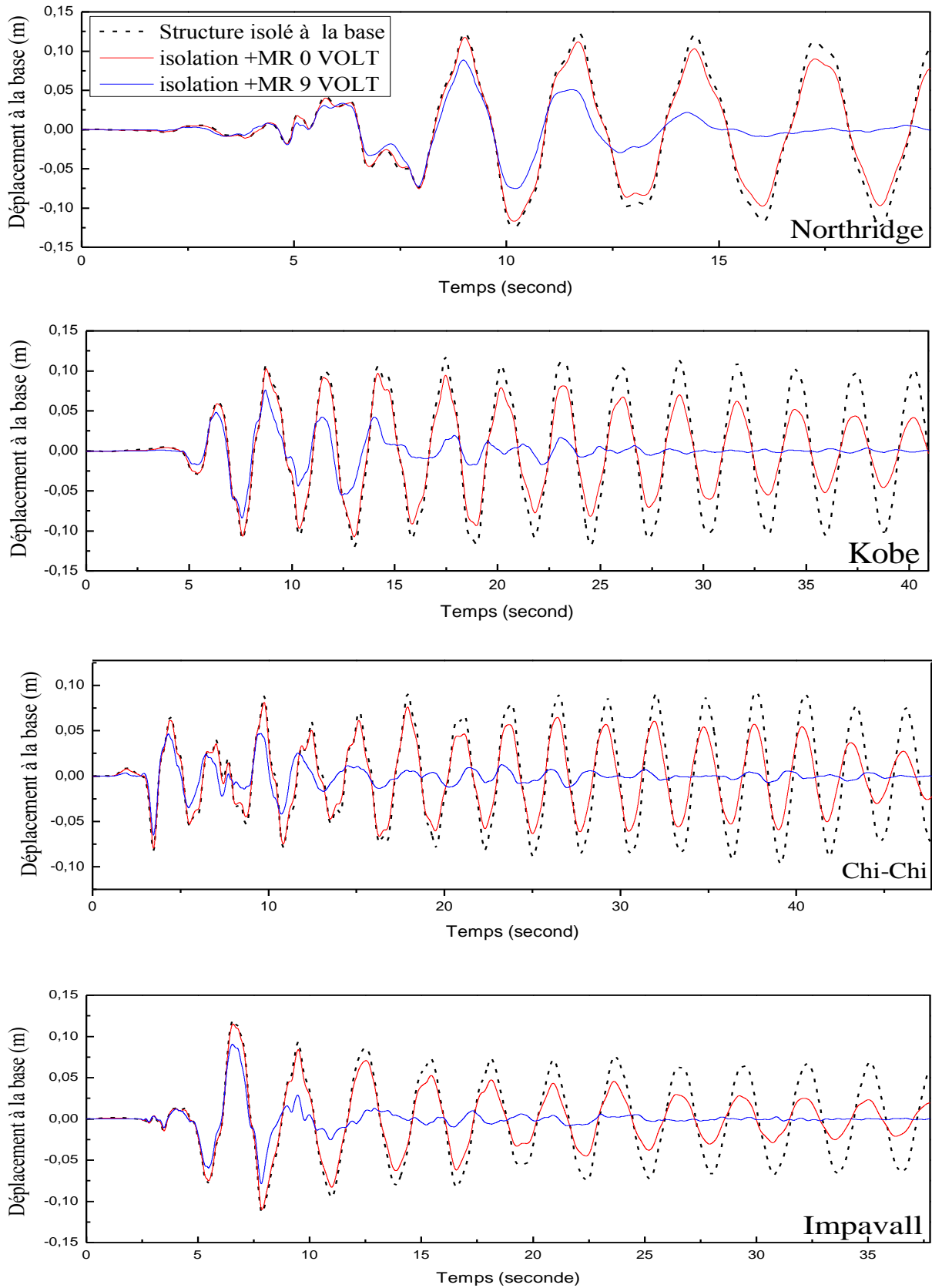


Figure 5.2 Déplacement à la base du bâtiment sous diverses stratégies de contrôle

### 5.4 Effort tranchant à la base

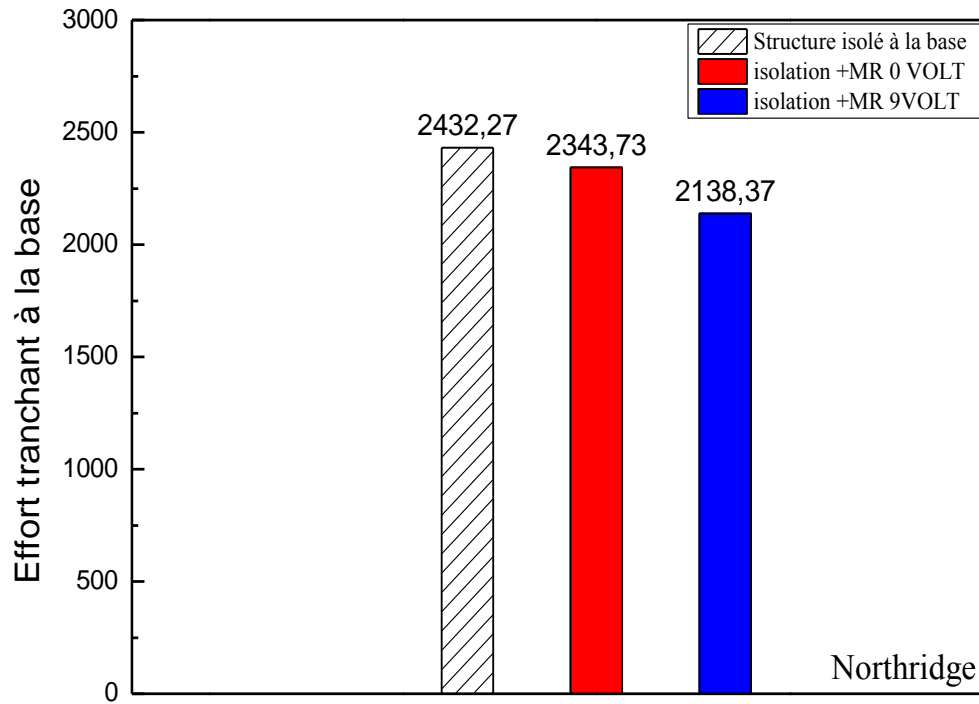
L'effort tranchant à la base du bâtiment doté d'un système hybride (isolateur + MR) est étudié pour divers voltage de l'amortisseur MR. Les résultats obtenus sont comparés à ceux d'une structure avec seulement des isolateurs à la base. Ces résultats sont montrés dans le tableau 5.3

**Tableau 5.3 : Effort tranchant à la base**

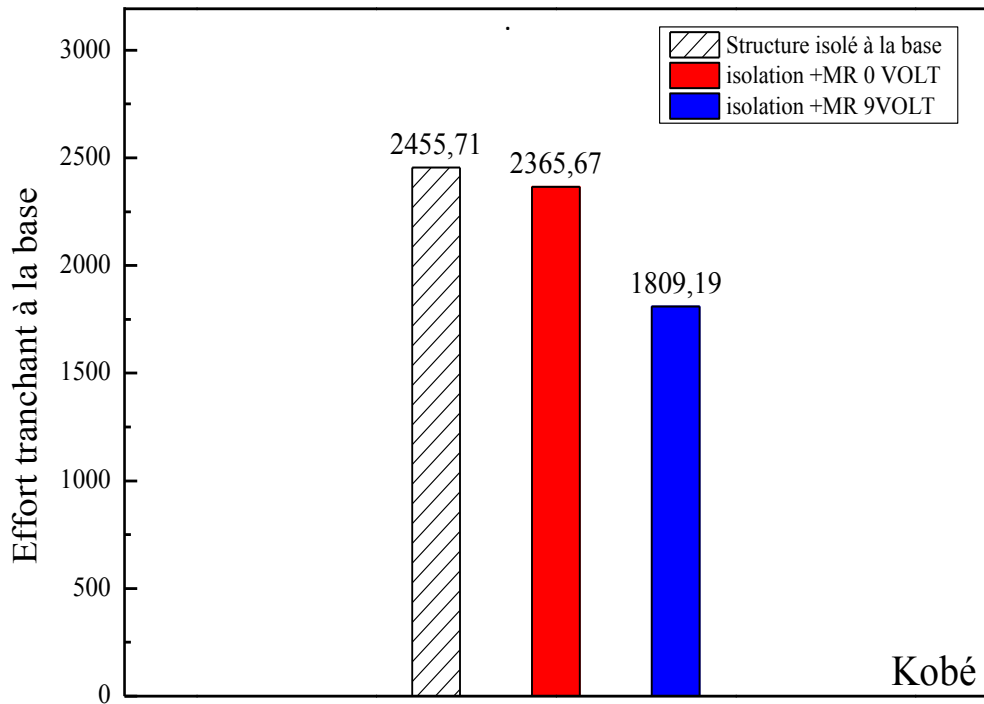
Séisme	Structure à Base isolée	Structure à base isolée + MR (système hybride)			
		MR 0VOL	MR 3VOL	MR 6VOL	MR 9VOL
Northridge	2.4323e+03	2.3437e+03 (3.64%)	2.2524e+03 (7.39%)	2.1918e+03 (9.88%)	2.1384e+03 (12.08%)
Kobe	2.4557e+03	2.3657e+03 (3.66%)	2.1314e+03 (13.20%)	1.8980e+03 (22.70%)	1.8092e+03 (26.32%)
Chichi	1.7538e+03	1.2652e+03 (7.73%)	0.2651 (17%)	0.2532 (26.58%)	0.2484 (27.86%)
Impavall	4.5196e+03	4.2646e+03 (5.64%)	3.7316e+03 (17.43%)	3.4010e+03 (24.75%)	3.2715e+03 (27.61%)

Le tableau 5.3 montre la réduction de l'effort tranchant. On remarque que cette réduction est assez faible. Ceci est dû principalement au fait que l'isolation à la base réduit considérablement l'effort tranchant par rapport à une structure à base fixe ce qui occulte l'effet de l'amortisseur MR sur ce paramètre.

Sur les figures 5.3-5.6, on remarque la variation de l'effort tranchant à la base pour les séismes de Northridge, Kobe, Chi-Chi et Impvall. Ces figures confortent les résultats montrés dans le tableau 4.3, ainsi la réduction de l'effort tranchant à la base pour une structure hybride n'est pas aussi importante par rapport à l'effort tranchant dans une structure à base isolée uniquement.

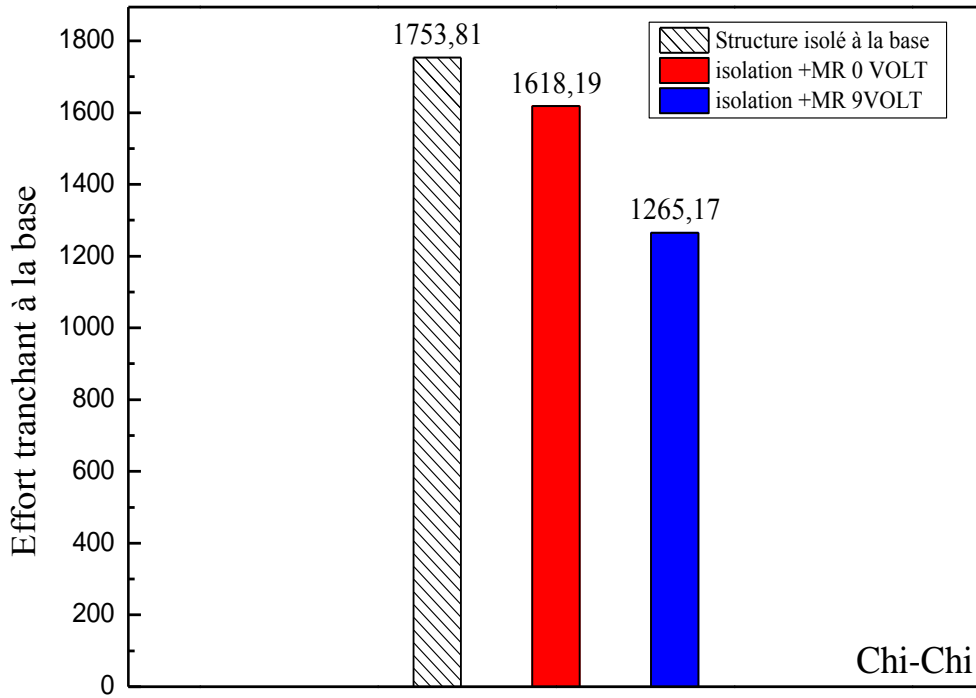


**Figure 5.3 :** Effort tranchant à la base du bâtiment soumis au séisme Nothridge, sous divers voltages de l'amortisseur MR

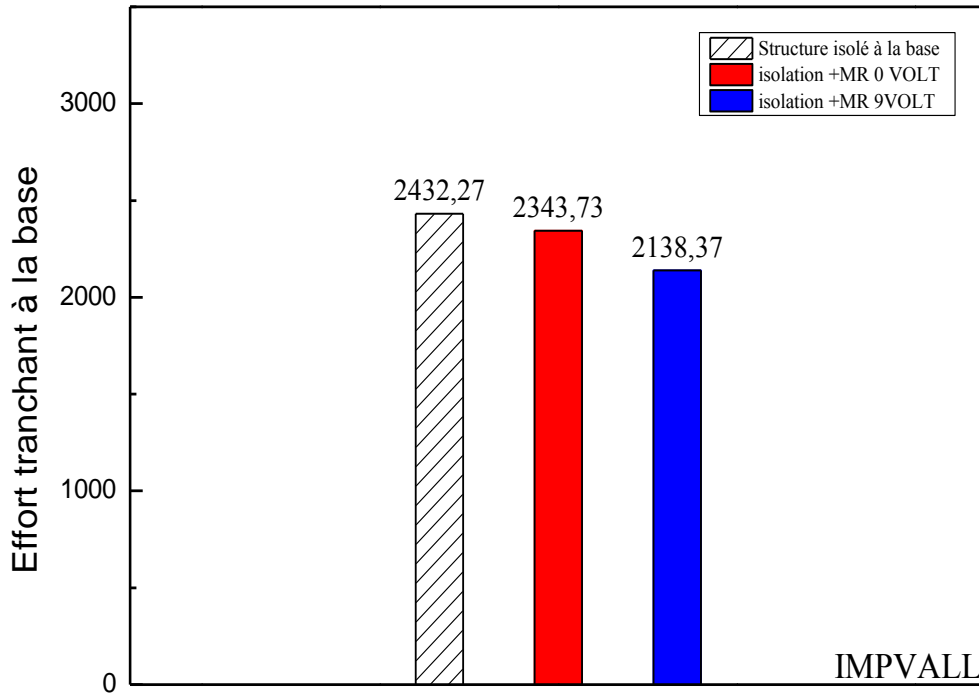


**Figure 5.4 :** Effort tranchant à la base du bâtiment soumis au séisme Kobe, sous divers voltages de l'amortisseur MR





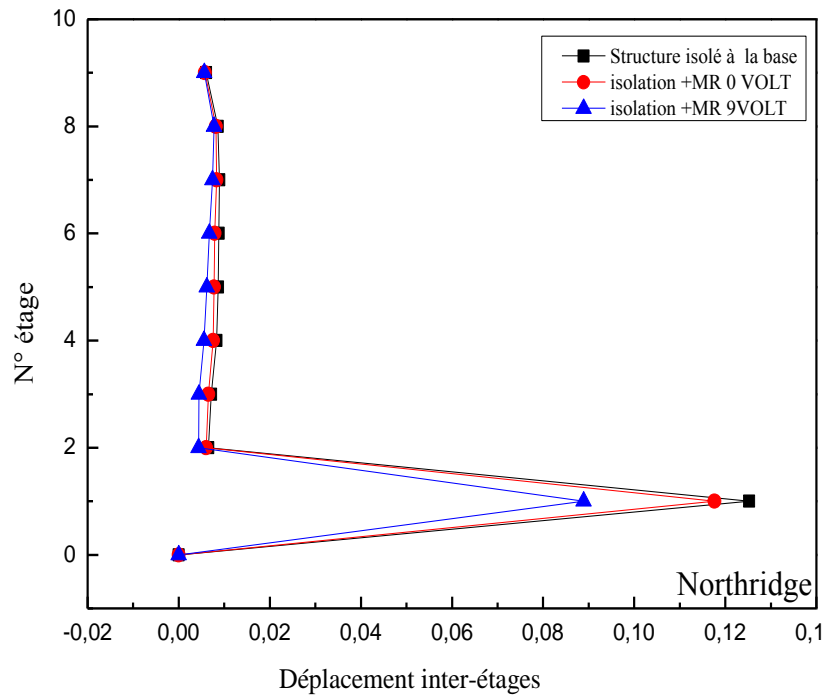
**Figure 5.5 :** Effort tranchant à la base du bâtiment soumis au séisme Chi-Chi, sous divers voltages de l'amortisseur MR



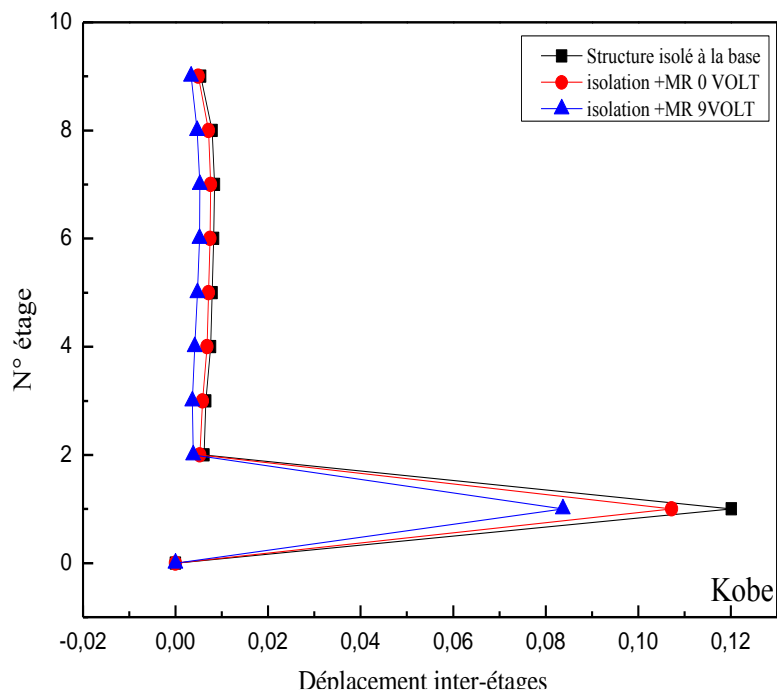
**Figure 5.6 :** Effort tranchant à la base du bâtiment soumis au séisme Impvall, sous divers voltages de l'amortisseur MR

### 5.5 Déplacement inter-étages

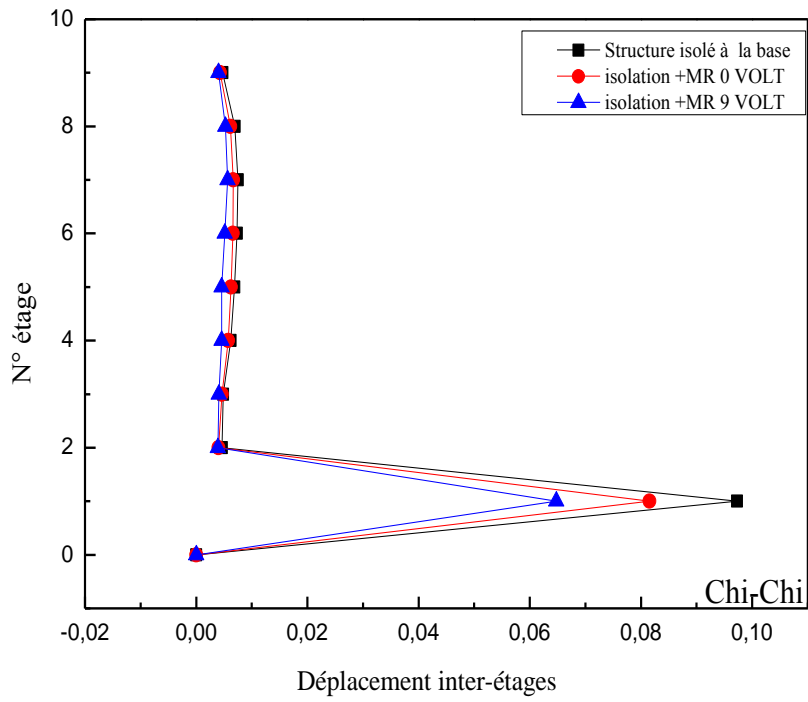
Les figures 5.7 à 5.10 montrent la variation des déplacements inter-étages maximums du bâtiment étudié à tous les niveaux sous les quatre excitations sismiques utilisées.



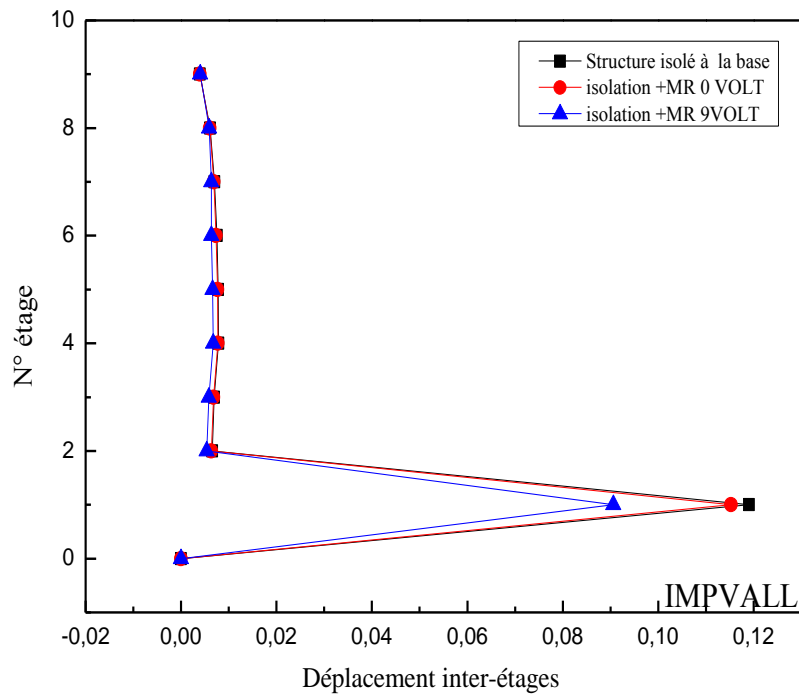
**Figure 5.7 :** Déplacement inter-étage du bâtiment soumis au séisme de Northridge, pour divers voltages de l'amortisseur MR



**Figure 5.8 :** Déplacement inter-étage du bâtiment soumis au séisme de Kobe, pour divers voltages de l'amortisseur MR



**Figure 5.9** : Déplacement inter-étage du bâtiment soumis au séisme de Chi-Chi, pour divers voltages de l'amortisseur MR



**Figure 5.10** : Déplacement inter-étage du bâtiment soumis au séisme de Impvall, pour divers voltages de l'amortisseur MR

Les figures 5.7 à 5.10 montrent une importante réduction du déplacement inter-étages au niveau de la base du bâtiment équipé d'un contrôle hybride par rapport au bâtiment isolé à la base. La réduction au niveau des autres étages est presque la même pour la structure à base isolée. Cela est principalement dû à l'effet de l'isolation qui permet à la structure de se déplacer en bloc rigide éliminant ainsi tout déplacement inter-étages d'où la présence de l'amortisseur MR n'affecte pas l'effet de l'isolation à la base.

## 5.6 Conclusion

D'après les résultats obtenus pour divers voltages de l'amortisseur magnéto-rhéologique les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La présence d'un amortisseur magnéto-rhéologique MR à la base d'un bâtiment avec isolation à la base permet de former un système hybride qui réduit considérablement les vibrations dues au séisme
- L'effet de la force de contrôle générée par l'amortisseur MR sur la structure à base isolée est transmis jusqu'au sommet du bâtiment réduisant ainsi les déplacements de la structure.
- L'augmentation du voltage de l'amortisseur MR permet d'obtenir plus de réduction en terme de déplacement en tête et à la base du bâtiment.
- L'effort tranchant n'a pas une réduction importante du fait qu'elle soit déjà effectuée par l'isolation à la base
- Les déplacements inter-étages ne sont pas affectés par la présence de l'amortisseur MR car le bâtiment se déplace en bloc rigide sous l'effet de l'isolation à la base réduisant ainsi les déplacements inter-étages.
- La réduction des réponses étudiées est relative à la nature de la source sismique, ainsi pour des séismes de champ lointain une bonne réduction peut être obtenue devant une réduction assez moyenne pour des séismes de champ proche.

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié l'efficacité d'un contrôle hybride composé d'une structure à base isolée et un amortisseur magnéto-rhéologique pour la réduction de la réponse sismique. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un système simplement isolé à la base. Les conclusions suivantes peuvent être tirées.

1. Le contrôle hybride (passif-semi actif) réduit les déplacements en tête et à la base du bâtiment étudié.
2. L'emplacement des amortisseurs utilisés joue un grand rôle dans l'ordre de la réduction
3. La force produite par l'amortisseur est proportionnelle à l'intensité du séisme.
4. La présence de l'amortisseur MR à la base de la structure n'altère pas les effets de l'isolation à la base (réduction du cisaillement à la base, déplacement en bloc rigide et réduction des déplacements inter-étages).
5. Il existe une corrélation directe entre les forces produites par l'amortisseur magnéto-rhéologique et la tension (voltage), où plus la tension est élevée, plus la réduction est importante

**Références Bibliographique**

- [1] **Naeim, F. and J. M. Kelly (1999)**. *Design of seismic isolated structures : from theory to practice*, John Wiley & Sons.
- [2] **Pecker, A. (2007)**. *Dynamique des structures*.
- [3] **Chopra, A. K. (2001)**. "Dynamics of structures: Theory and applications."
- [4] **Aiken, I.D., D. Nims, and J.M. Kelly**, *Comparative study of four passive energy dissipation systems*. Bull. New Zealand Nat. Soc. For Earthquake Engrg, 1992. 25(3): p. 175-192.
- [5] **Pall, A.S. and C. Marsh**, *Response of friction damped braced frames*. Journal of Structural Engineering, 1982. 108(9) : p. 1313-1323
- [6] **Crosby, P., J. Kelly, and J. Singh**. *Utilizing visco-elastic dampers in the seismic retrofit of a thirteen story steel framed building*. In *Structures Congress XII*. 1994
- [7] **Soong, T.T. and G.F. Dargush**, *Passive energy dissipation systems in structural engineering* 1997: Wiley.
- [8] **Chang, K., et al.**, *Seismic behavior of steel frame with added viscoelastic dampers*. Journal of Structural Engineering, 1995. 121(10): p. 1418-1426.
- [9] **Taylor, D.P.**, *History, design, and applications of fluid dampers in structural engineering*. Taylor Devices Inc, 2002.
- [10] **Den Hartog, J.P.**, *Mechanical vibrations* 1985: Courier Corporation.
- [11] **Chang, J.C. and T.T. Soong**, *Structural control using active tuned mass dampers*. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1980. 106(6): p. 1091-1098.
- [12] **Yalla, S.**, *Liquid Dampers for Mitigation of Structural Response*. Theoretical Development and Experimental Validation, Ph. D. Thesis, University of Notre Dame, 2001
- [13] **Cheng, F.Y.** *Response control based on structural optimization and its combination with active protection*. In *Proc. Of the World Conference on Earthquake Engineering, TokyoKyoto*. 1988.
- [14] **Cheng, F.Y. and C.P. Pantelides**, *Combining Structural Optimization and structural control* 1988: National Center for Earthquake Engineering Research.
- [15] **Cheng, F. and S. Suthiwong**. *Active control of building structures on mat foundation embedded in unbounded soil*. in *Proceedings of 5th US national conference on earthquake engineering, Earthquake Engineering Research Institute*. 1994.
- [16] **Meirovitch, L.**, *Dynamics and Control of Structures* 1990: Wiley.
- [17] **Soong, T. and B. Spencer Jr** **Reviewer**, *Active structural control: theory and practice*. Journal of Engineering Mechanics, 1992. 118(6) : p. 1282-1285.
- [18] **Yang, J.N.**, *Control of tall building under earthquake excitation*. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1982. 108(5) : p. 833-849

- [19] **Sonmez, E., et al.**, *A study on semi-active tuned liquid column dampers (sTLCDs) for structural response reduction under random excitations*. Journal of Sound and Vibration, 2016. 362 : p. 1-15.
- [20] **Kobori, T., et al.**, *Seismic response controlled structure with active variable stiffness system*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1993. 22(11): p. 925-941.
- [21] **Cheng, F.Y., et al.**, *Theoretical and experimental studies on hybrid control of seismic structures*. 1996.
- [22] **Yoshioka, H., J. Ramallo, and B. Spencer Jr**, “*Smart*” *base isolation strategies employing magnetorheological dampers*. Journal of Engineering Mechanics, 2002. 128(5): p. 540-551.
- [23] **Yang, J., A. Danielians, and S. Liu**, *Aseismic hybrid control systems for building structures*. Journal of Engineering Mechanics, 1991. 117(4): p. 836-853.
- [24] **Yoshino, H., J. Ramallo, and B. Spencer Jr**, “*Smart*” *base isolation strategies employing magnetorheological dampers*. Journal of Engineering Mechanics, 2002. 128(5): p. 540-551.
- [25] **BENZINA, F.**, *Contribution à l'étude des structures intelligentes*, 2014.
- [26] **DJELLOULI, L.**, *Modélisation de système d'isolation parasismique pour le contrôle de la réponse dynamique des structures*. 2013.
- [27] **BENAYAD, K.**, *comportement dynamique des ouvrages sur isolateurs de base*, 2013.
- [28] **HOAN, P.K.**, *vulnérabilité et spectres de plancher des structures sismiquement isolées, 2010, école nationale supérieure de techniques avancées*.
- [29] **OUNIS. H.M**, (17 juin 2014). *Conception des systèmes d'isolation parasismique des ouvrages en génie civil*. Faculté des sciences et de la technologie, université mohamed khi der–Biskra. Doctorat en science : génie civil : 283.
- [30] **KAAB, M.Z.**, *influence de l'amortissement sur la reponse dynamique des structures avec systèmes d'isolation parasismique*, 2010, université mohamed khider-biskra.
- [31] **NAEIM, F. and J.M. KELLY**, *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. 1999 : John Wiley & Sons
- [32] **Qu, W. and Y. Xu**, *Semi-active control of seismic response of tall buildings with podium structure using ER/MR dampers*. The structural design of tall buildings, 2001. 10(3) : p. 179-192.
- [33] **Xu, Y., et al.**, *Semiactive seismic response control of buildings with podium structure*. Journal of Structural Engineering, 2005. 131(6) : p. 890-899.
- [34] **Bharti, S., S. Dumne, and M. Shrimali**, *Seismic response analysis of adjacent buildings connected with MR dampers*. Engineering Structures, 2010. 32(8) : p. 2122- 2133.
- [35] **Truong, D. and K. Ahn**, *MR fluid damper and its application to force sensorless damping control system*. 2012: INTECH Open Access Publisher.

- [36] **Rabinow, J.**, The magnetic fluid clutch. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1948. 67(2): p. 1308-1315.
- [37] **Winslow, W.M.**, Method and means for translating electrical impulses into mechanical force, 1947, Google Patents.
- [38] **Sleiman, H.** (2010). Systèmes de suspension semi-active à base de fluide magnéto rhéologique pour l'automobile, Arts et Métiers ParisTech.
- [39] **Abdeddaim, M.** (25/05/2017). Contribution à la réduction du risque d'entrechoquement des bâtiments adjacents sous séisme de forte intensité. Génie civil et hydraulique. Faculté des Sciences et de la technologie, Université Mohamed Khider – Biskra.
- [40] **Billie, F., et al.** *Smart" dampers for seismic protection of structures : A full-scale étude.* in Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Jun.-Jul. 1998.
- [41] **Yang, G., et al.** Large-scale MR fluid dampers : dynamic performance considerations. In Proceedings of International Conference on Advances in Structure Dynamics. 2000
- [42] **Stanway, R., J. Sproston, and N. Stevens**, *Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper.* Journal of Electrostatics, 1987. 20(2): p. 167-184.
- [43] **Gamota, D. and F. Filisko**, *Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: moderate frequencies.* Journal of rheology, 1991. 35(3): p. 399-425.
- [44] **Bouc, R.**, *A mathematical model for hysteresis.* Acta Acustica united with Acustica, 1971. 24(1): p. 16-25
- [45] **Wen, Y.-K.**, *Method for random vibration of hysteretic systems.* Journal of the engineering mechanics division, 1976. 102(2): p. 249-263
- [46] **Spencer Jr, B., et al.**, *Phenomenological model for magnetorheological dampers.* Journal of engineering mechanics, 1997
- [47] **Jung, H., et al.**, *State-of-the-art of semiactive control systems using MR fluid dampers in civil engineering applications.* Structural Engineering and Mechanics, 2004. 17(3\_4): p. 493-526.
- [48] **Datta, T.K.**, *Seismic analysis of structures.* 2010: John Wiley & Sons.
- [49] **Ogata, K.**, *Modern Control Engineering.* 2010: Prentice Hall.
- [50] **Rowell, D.**, *State-space representation of LTI systems.* URL: <http://web.mit.edu/2.14/www/Handouts/StateSpace.pdf>, 2002.
- [51] **J. N. Yang**, stable controllers for instantaneous optimal control