

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued  
Faculté de technologie  
Département d'Hydraulique et de Génie Civil



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Génie Civil

**Spécialité :** Matériaux en Génie Civil

## **Thème**

**ETUDE THEORIQUE DE L'INFLUENCE DES SYSTEMES DES  
ISOLATIONS PARASISMIQUES SUR LE COMPORTEMENT  
DYNAMIQUE DES STRUCTURES**

Présenté par:

- Attoussi Mohamed
- Abbassi Afaf
- Yahia Ala
- Geunani Haifa

Encadreur :

KAAB Mohamed Zohair

Année Universitaire : 2022-2023

# Liste des symboles

$i$  : La masse de la structure est concentrée aux niveaux des planchers.

$ii$  : Les poutres ont une rigidité infinie.

$iii$  : La force axiale dans les poteaux n'engendre pas la déformation de la structure.

$W$  : Charge verticale transmise par l'isolateur.

$T$  : Représente la période du pont non sismiquement isolé.

$T_d$  : Désigne la période d'isolation comprise.

$S_a$  : Représente la valeur de l'accélération spectral correspondant à la période effective.

$K_1$  : La rigidité élastique.

$K_2$  : La rigidité post-élastique.

$Q$  : La résistance caractéristique des dispositifs antisismiques dans les directions longitudinales et transversales sont évalués.

$d_y$  : Désigne typiquement le déplacement qui correspond à la force d'écoulement.

$W_D$  : Désigne l'énergie de dissipation par cycle.

$R$  : Rayon de la surface de glissement sphérique.

$\mu$  : Coefficient de frottement de la surface de glissement.

$x_b$  : Déplacement de la base.

$V$  : La vitesse du piston.

$C_p$  : Le coefficient d'amortissement.

$\alpha$  ; Une constante qui dépend de la viscosité du fluide et des propriétés du piston.

$\ddot{x}_g$  : La réponse du système global.

$x_s$  et  $x_T$  : Déplacements absolus (structure primaire).

$m_s$  : Masse (structure primaire).

$m_T$  : Amortisseur TMD correspondantes.

$F^+$  et  $F^-$  : Les forces positives et négatives ainsi.

$\Delta^+$  et  $\Delta^-$  : Respectivement sont les déplacements.

$k_{eff}$  : La pente des valeurs de chargement et de déchargement de boucle d'hystérésis.

$E_{boucle}$  : Est la dissipation d'énergie selon des cycles du chargement.

$\alpha$  : Rapport de poste de rigidité limite.

$D_y$  : Déplacement limite de poste déformation d'isolation parasismique.

$F_y$  : Force limite de poste déformation d'isolation parasismique.

$Z^*$  : La composante hystérésis.

$k_b$  : Le système d'isolation possède une rigidité latérale.

$c_b$  : Coefficient d'amortissement.

$u_b$  : Le déplacement absolu de la masse de base.

$M$  : La matrice des masses.

$K$  : La matrice des coefficients de rigidité.

$\ddot{V}$ ,  $\dot{V}$  et  $V$  : Respectivement les vecteurs d'accélération relative, de vitesse relative et de déplacement relatif pour les masses.

$u$  : Vecteur de déplacement par rapport au sol.

$r$  : Vecteur d'influence.

# Liste des figures

## Chapitre I: Système de contrôle

Figure 01 : Oscillation des structures avec et sans appuis parasismique.....	2
Figure 02 : Les différents types des systèmes de contrôle.....	3
Figure 03 : Isolateur élastomérique avec des cale en acier.....	6
Figure 04 : Roulement en caoutchouc à plomb circulaire (LRB).....	6
Figure 05 : Pendules à friction.....	7
Figure 06 : Isolateur à poutres fleuronées.....	8
Figure 07 : Appuis pendulaires à glissement.....	8
Figure 08 : Poutres d'acier planaires.....	9
Figure 09 : Amortisseur à contreventement retenu par flambage (BRB).....	10
Figure 10 : Amortisseur à amortissement et rigidité supplémentaires (ADAS).....	11
Figure 11 : Amortisseurs de friction rotationnels. ....	12
Figure 12 : Amortisseur viscoélastique en diagonal : (a) L'amortisseur est libre (b) L'amortisseur est intègre à la base.....	13
Figure 13 : Schéma d'un amortisseur à fluide visqueux.....	14
Figure 14 : Amortisseur à masse accordée (TMD).....	15
Figure 15 : Amortisseur à liquide accordé: a) TLD à ballotement Yalla b) TLD poteau Ikeda et al .....	16
Figure 16 : Amortisseurs hydrauliques à orifice variable.....	16
Figure 17 : Amortisseur de colonne de liquide réglé.....	17
Figure 18 : Dispositif en forme de C (à gauche) et dispositif EDU (à droite) .....	17
Figure 19 : Structure équipée d'un câbles actifs (Tendons actifs) .....	18
Figure 20 : Structure équipée d'un câbles actifs (Tendons actifs).....	19
Figure 21 : Structure équipée d'un contreventement actif.....	20
Figure 22 : Amortisseurs hydrauliques.....	21
Figure 23: Amortisseur semi-actif à friction variable.....	21
Figure 24: (a) Présentation du système.....	22
Figure 25: (b) Agencement pour faire varier les trous d'amortisseur.....	22
Figure 26 : Amortisseur à masse accordée semi actif.....	23
Figure 27 : Amortisseur à liquide accordé semi-actif.....	24
Figure 28 : Schéma de l'amortisseur magnéto-rhéologique a échelle réelle.....	24

Figure 29 : Schéma d'un amortisseur électro-rhéologique.....	25
Figure 30 : Configuration de base d'un Amortisseur à masse accordée hybride : a) ATMD actif +ATMD actif b) TMD passif +ATMD actif.....	26
Figure 31 : Contrôle hybride d'une structure isolée à la base.....	27
Figure 32 : Structure équipée d'un isolation à la base hybride d'un amortisseurs à fluide MR sur la superstructure.....	27
Figure 33 : Exemple de système hybride : Le laminoir.....	28

## **Chapitre II : Modèle mathématique**

Figure 34 : Modèle hystérétique bilinéaire de type force-déplacement des dispositifs NRB HDRB.....	30
Figure 35: Modèle mathématique des systèmes d'isolation (NRB et HDRB).....	31
Figure 36 : Approximation bilinéaire d'une loi de comportement hystérétique exprimée en force-déplacement.....	32
Figure 37 : Modèle mathématique pour un système combiné LRB.....	33
Figure 38 : Comportement frottant exprimée en force-déplacement.....	33
Figure 39 : Modèle mathématique pour un système d'isolation en pendule glissante (FPS).....	34
Figure 40 : Comportement visqueux exprimé en force-déplacement.....	35
Figure 41 : Modèle mathématique pour un système d'isolation en fluide visqueux .....	36
Figure 42 :Modèle mathématique d'une structure équipée d'un amortisseur à masse accordée TMD.....	39
Figure 43 : Représentation dynamique d'une structure à plusieurs degrés de liberté .....	40

## **CHAPITRE III : Théorie de l'isolation parasismique**

Figure 44 : Relation entre le déplacement et la force modèle linéaire équivalent.....	42
Figure 45 : Terminologie de la structure isolée à la base .....	44
Figure 46: Esquisse d'une structure isolée à un degré de liberté.....	44
Figure 47 : SDOF fixe de base system and 2DOF base isolat de system.....	45
Figure 48 : Coupes en coupe dans le système d'isolation et la superstructure.....	46
Figure 49 : 2DOF non linéairee base isolat de mode .....	48

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Chapitre I: SYSTEMES DE CONTROLE DES VIBRATIONS</b>	
I-1-Introduction.....	02
I-2- Système de Contrôle passif.....	04
I-2-1-Isolation parasismique .....	04
I-2-1-1-Isolateurs élastomériques.....	05
I-2-1-2-Isolateur LRB (Lead Rubber Bearings).....	06
I-2-1-3-Appui à pendule de friction .....	07
I-2-1-4-Autres types.....	07
I-2-2-Mécanismes de dissipation d'énergie.....	09
I-2-2-1-Dispositifs à comportement hystérétique.....	10
I-2-2-1-1-Amortisseurs métalliques.....	10
I-2-2-1-2-Amortisseurs à frottement.....	11
I-2-2-2-Dispositifs visqueux élastique.....	12
I-2-2-2-1-Amortisseurs à solide visqueux élastique.....	12
I-2-2-2-2-Amortisseurs à liquides visqueux élastique.....	13
I-2-2-3-Absorbeur de vibration dynamique.....	14
I-2-2-3-1-Amortisseur à Masse Accordée (TMD).....	14
I-2-2-3-2 -Amortisseur à Liquide Accordé (TLD).....	15
I-2-2-4-Autres types.....	16
I-3- Système de Contrôle actif.....	17
I-3-1-Amortisseur à Masse Accordée Actif (ATMD).....	18
I-3-2-Tendons Actifs.....	19
I-3-3-Autres types.....	19

I-4-Système de Contrôle semi-actif.....	20
I-4-1-Amortisseurs hydrauliques.....	20
I-4-2-Amortisseurs à friction variable.....	21
I-4-3-Amortisseur à rigidité variable.....	22
I-4-4-Amortisseur à masse accordé (TMD) semi-actif.....	23
I-4-5-Amortisseur à liquide accordé (TLD) semi-actif.....	23
I-4-6-Amortisseurs magnéto-rhéologiques (MR).....	24
I-4-7-Amortisseurs Electro-rhéologiques (ER).....	25
I-5-Système de contrôle hybride.....	25
I-5-1-Système de Contrôle actif (semi actif) + contrôle passif.....	25
I-5-1-1-Amortisseur à mass accordée hybride.....	26
I-5-1-2-Isolation à la base hybride.....	26
I-5-1-3-Autres types.....	27
I-6-Conclusion.....	28

## **Chapitre II : Modèle mathématique**

II-1-Introduction.....	30
II-2-Equations de mouvement et représentation mathématiques.....	30
II-2 -1-Structure avec dispositif de contrôle.....	30
II-2 -1-1- Contrôle passif.....	30
II-2 -1-1-1-Modèle d'hystérésis des systèmes d'isolation (NRB et HDRB).....	30
II-2 -1-1-2-Modèle d'hystérésis du système d'isolation LRB.....	31
II-2 -1-1-3-Modèle d'hystérésis du système d'isolation FPS.....	33
II-2 -1-1-4-Modèle d'hystérésis de l'amortisseur à fluide visqueux.....	35

II-2 -1-1-5-Modèle d'hystérésis de l'amortisseur TMD.....	37
II-2 -1-1-5-1-Modèle mathématique d'une structure équipée d'un amortisseur à masse accordée.....	38
II-2 -2- Structure sans dispositif de contrôle.....	39
<b>CHAPITRE III : Théorie de l'isolation parasismique</b>	
III-1-Introduction.....	41
III-2-Comportement dynamique de l'isolation parasismique (modèle linéaire et modèle non linéaire).....	41
III-2-1-Modèle linéaire.....	41
III-2 -2-Modèle non linéaire.....	42
III-2-2-1-Modèle bilinéaire.....	42
III-2-2-2-Modèle hystérétique.....	43
III-3-Modèle isolé à base linéaire à un degré de liberté avec isolateurs linéaires.....	44
III-4-Modèle isolé à deux degrés de liberté.....	45
III-4-1- Modèle isolé à base linéaire à deux degrés de liberté avec isolateurs linéaires.....	45
III-4-2-Modèle isolé de base non linéaire à deux degrés de liberté.....	47
III-5-Modèle isolé à N degrés de liberté.....	48
III-5-1-Equation de mouvement.....	49
III-5-2-Les équations du mouvement du système combiné.....	49
<b>Conclusion générale</b> .....	51

## المخلص

في الوقت الحاضر، لا يستطيع الإنسان أن يمنع تمامًا عواقب الزلزال والكثافة الكبيرة للسكان في مناطق معينة. وأكد ذلك أهمية تشييد مبانٍ مقاومة للزلازل. وهكذا، طور الباحثون في جميع أنحاء العالم تقنيات مبتكرة مثل أنظمة التحكم السلبية والنشطة وشبه النشطة والهجينة، والتي تقلل الخسائر البشرية وتقلل من الأضرار المادية.

كان الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تسليط الضوء على تأثير أنظمة العزل الزلزالي على السلوك الديناميكي للهياكل. ولتحقيق هذا الهدف تم إجراء دراسة نظرية على أنظمة العزل الزلزالية المختلفة ودراسة سلوكها الديناميكي وصياغة معادلات الحركة للبنية المعزولة.

**الكلمات المفتاحية:** أنظمة التحكم، العزل الزلزالي، السلوك الديناميكي، الهيكل المعزول.

# Résumé

De nos jours, l'homme n'est pas en mesure de prévenir complètement les conséquences d'un séisme et la concentration importante de population dans certaines régions. Cela a souligné l'importance de la construction de bâtiments résistants aux séismes. Ainsi, des chercheurs du monde entier ont développé des techniques innovantes telles que les systèmes de contrôle passif, actif, semi-actif et hybride, qui permettent de réduire les pertes humaines et d'atténuer les dommages matériels.

L'objectif principal de ce travail était de mettre en évidence l'impact des systèmes d'isolation parasismique sur le comportement dynamique des structures. Pour atteindre cet objectif, une étude théorique a été réalisée sur les différents systèmes d'isolation parasismique, en examinant leur comportement dynamique et en formulant les équations de mouvement pour la structure isolée.

**Mots clés :** Systèmes de contrôle, Isolations parasismique, Comportement dynamique, Structure isolée.

# Abstract

Nowadays, man is not able to completely prevent the consequences of an earthquake and the significant concentration of population in certain regions. This underscored the importance of building earthquake-resistant buildings. Thus, researchers around the world have developed innovative techniques such as passive, active, semi-active, and hybrid control systems, which reduce human losses and mitigate material damage.

The main objective of this work was to highlight the impact of seismic insulation systems on the dynamic behavior of structures. To achieve this objective, a theoretical study was carried out on the different seismic isolation systems, examining their dynamic behavior and formulating the equations of motion for the isolated structure.

**Keywords:** Control systems, Seismic isolations, Dynamic behavior, Isolated structure.

# **Introduction général**

### Introduction générale :

À cause de l'augmentation des catastrophes sismiques dans le monde, les chercheurs en génie civil sont confrontés à un défi majeur pour développer des concepts technologiques innovants et assurer une meilleure protection des structures et des personnes contre les effets néfastes des mouvements sismiques.

Au cours des deux dernières décennies, les systèmes d'isolation parasismique ont été de plus en plus utilisés pour améliorer la résistance aux tremblements de terre des bâtiments. Ces systèmes consistent en des dispositifs de placement entre la sous-structure et la superstructure, qui absorbent les distorsions inélastiques et filtrent les accélérations à haute fréquence.

Cette technologie peut être appliquée à tous les types de bâtiments et de structures industriels, tels que les réservoirs de stockage de produits pétroliers et autres matières dangereuses. Il peut également être utilisé pour améliorer la résistance des structures existantes. Cette technologie a été particulièrement intégrée dans des projets très importants, tels que des hôpitaux, des centres de gestion des catastrophes, des musées et des bâtiments résidentiels.

Le travail est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente les différents systèmes d'isolation parasismique tels que les systèmes de contrôle passif, actif, semi-actif et hybride.

Le deuxième chapitre décrit les modèles mathématiques simples et la formulation des équations du mouvement.

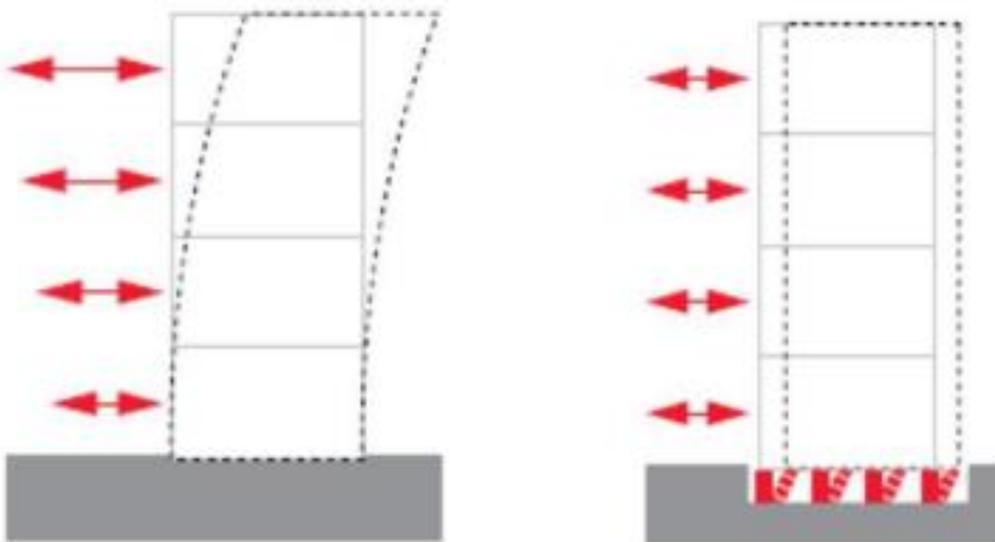
Le troisième chapitre décrit les concepts théoriques de l'isolation parasismique et la formulation des équations du mouvement pour les deux structures isolées à deux degrés de liberté et à N degrés de liberté.

A l'issue de ce travail, nous exposerons une conclusion générale pour synthétiser le travail.

# **Chapitre I : Système de contrôle**

### I-1-Introduction

Durant ces dernières décennies, plusieurs séismes de différentes intensités ont frappé plusieurs pays et ils ont occasionné des pertes considérables en vies humaines et d'importants dégâts matériels. Ces taux de dégâts ont encouragé les chercheurs dans le domaine de génie parasismique à chercher des solutions afin de réduire ce risque sismique. Le principe de base du calcul parasismique consiste essentiellement à assurer un degré de sécurité acceptable permettant de réduire les risques relatifs aux défaillances, aux catastrophes et aux pertes de vie. Parmi ces solutions innovantes de contrôle, on peut distinguer quatre approches différentes : le contrôle passif, le contrôle actif, le contrôle semi-actif et le contrôle hybride.



**Figure 01 : Oscillation des structures avec et sans appuis parasismique.**

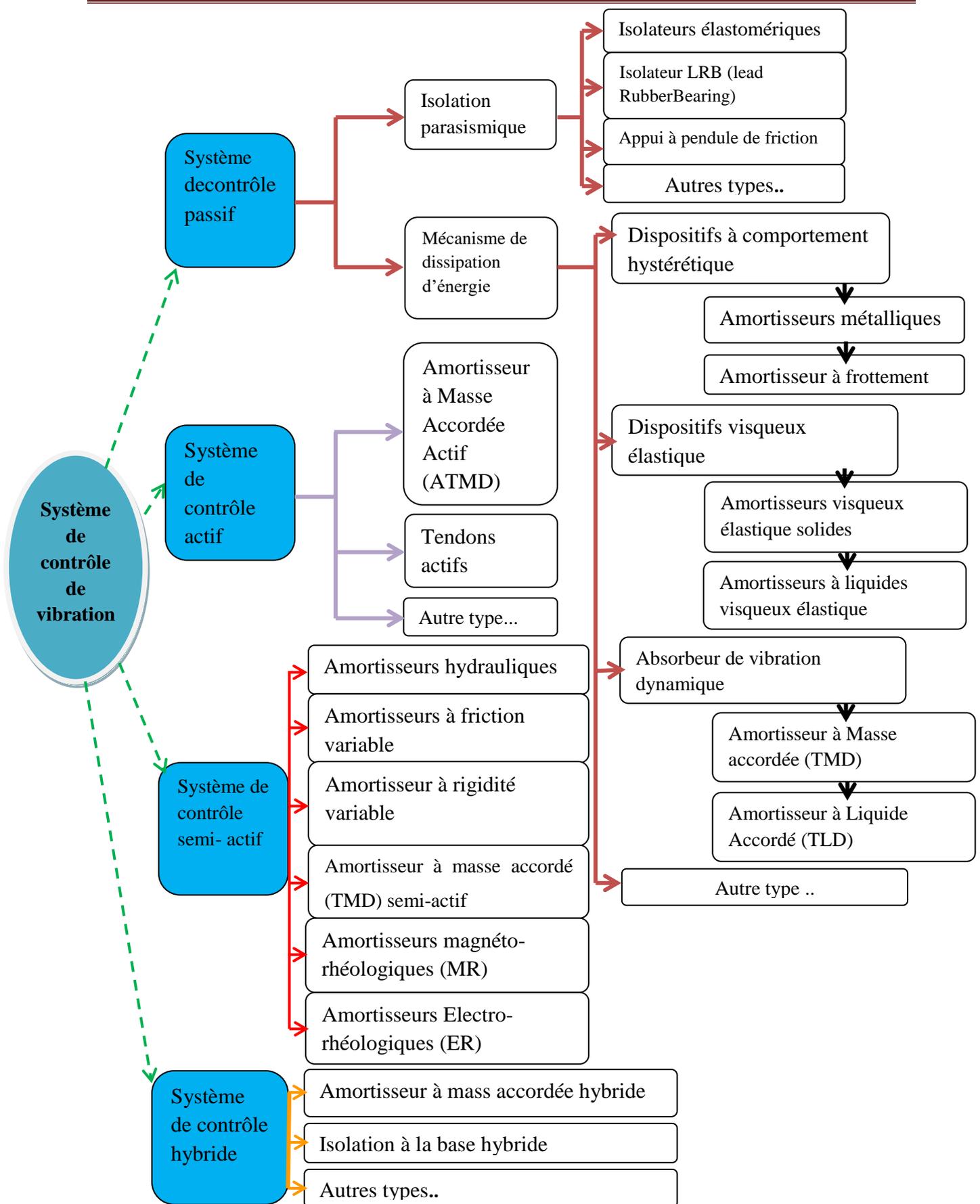


Figure 02 : Les différents types des systèmes de contrôle.

### I-2-Système de contrôle Passif :

#### I-2-1-Isolation parasismique :

L'isolation parasismique par la base est une méthode efficace pour protéger les structures (par exemple, bâtiments et équipements) contre les effets adverses des séismes. Son principe consiste à découpler partiellement le mouvement de la structure de celui du sol par l'intermédiaire de divers systèmes de contrôle.

Dans le but de réduire les forces transmises à cette dernière. Les forces sismiques exercées sur la structure isolée sont typiquement de l'ordre de 3 à 10 fois plus petites que la demande en force sur la structure non isolée. L'isolateur capte les déformations (inélastiques) et filtre les accélérations (hautes fréquences) de sorte que la superstructure isolée (au-dessus) se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et presque pas de déformations [1].

Les systèmes de contrôle passif isolent la base d'un bâtiment ou dissipent l'énergie issue du sol grâce à leurs propriétés dynamiques et mécaniques intrinsèques de l'isolateur seulement, couplés à la structure de telle façon que les vibrations de la structure soient amorties passivement [2].

D'un point de vue historique, les techniques de contrôle passif, telles que les dispositifs d'isolation de base et de contrôle passif, sont les premières mises en œuvre. De nombreuses recherches ont étudié des structures équipées de ces techniques passives et de nombreuses réalisations pratiques ont déjà été mises en œuvre dans de nombreux pays.

Un système de contrôle passif consiste en un ou plusieurs dispositifs, attachés ou intégrés à une structure, conçus pour modifier la rigidité ou l'amortissement de la structure de manière appropriée sans nécessiter une source d'alimentation externe pour fonctionner, développant les forces de commande opposées au mouvement de système structurel contrôlé [3].

Les techniques de contrôle passif se caractérisent par la mise en œuvre de dispositifs dans des structures ne nécessitant aucune source d'énergie externe pour réduire les vibrations, ce type de techniques a été largement mis en œuvre dans les structures de génie civil avec un accent particulier dans le domaine du génie parasismique [4].

La plupart des dispositifs passifs sont préparés pour faire face à des forces de grande amplitude et ont une grande capacité de dissipation d'énergie. De plus, par rapport à d'autres

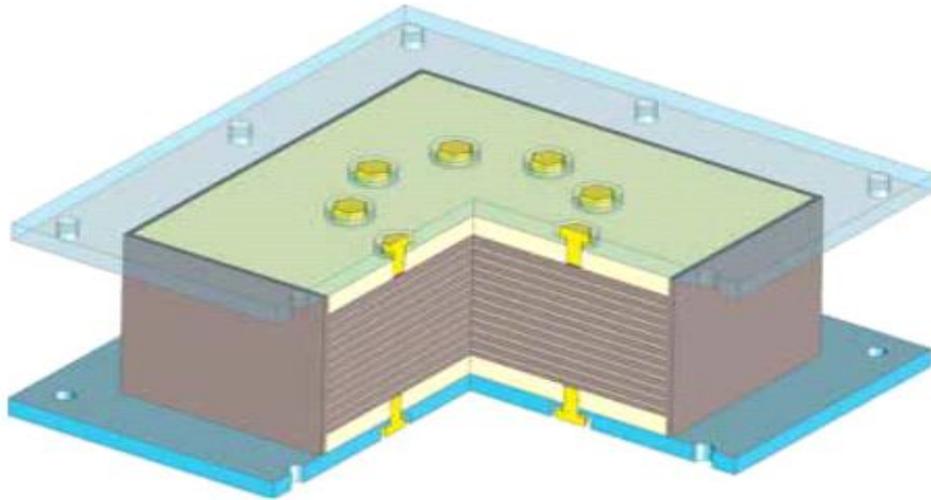
techniques, le contrôle passif est plus intéressant en termes de fiabilité, de coût et de maintenance, juste au cas où cela ne serait pas assez efficace, passez à une autre technique plus sophistiquée [5].

La mise en place de dispositifs dissipateurs passifs dans la structure peut conduire à des situations indésirables, notamment lors de la réponse transitoire. L'amortissement pour le système de contrôle passif peut dépendre du temps, de la fréquence ou de l'environnement, ainsi que d'être non linéaire [3].

Comme principal inconvénient, les systèmes passifs sont généralement moins efficaces que les systèmes actifs, en particulier dans les situations qui nécessitent une certaine adaptabilité de la force de commande en fonction de la réponse structurelle [5].

### **I-2-1-1-Isolateurs élastomériques :**

Il existe trois types d'isolateurs en élastomère : l'élastomère fretté, l'élastomère fretté avec noyau de plomb et l'élastomère fretté à amortissement élevé. Tous trois peuvent prendre une forme rectangulaire ou circulaire dans le plan, et sont composés de couches successives d'élastomère et de plaques minces en acier appelées « frettes » [6]. Les frettes d'acier permettent de supporter la charge verticale tandis que l'élastomère se déforme en cisaillement et assure l'isolation de la structure [7]. L'épaisseur de la cale en acier est d'environ 1 po et la couche de caoutchouc entre les cales en acier varie de 3 à 7,5 po. Par rapport au roulement en caoutchouc pur, l'utilisation de cales en acier réduit considérablement la déformation verticale du roulement et empêche les couches de caoutchouc de se gonfler latéralement [8]. Ces appareils d'appuis sont flexibles et assurent une dissipation d'énergie moyenne car le comportement est viscoélastique. Le seul inconvénient de cet appui est qu'il possède par nature une période fondamentale élevée, or dans le cas de séisme à très basse fréquence ou en présence de sols mous, ce type d'isolateur est susceptible de rentrer en résonance, ce qui n'est pas souhaitable [7].

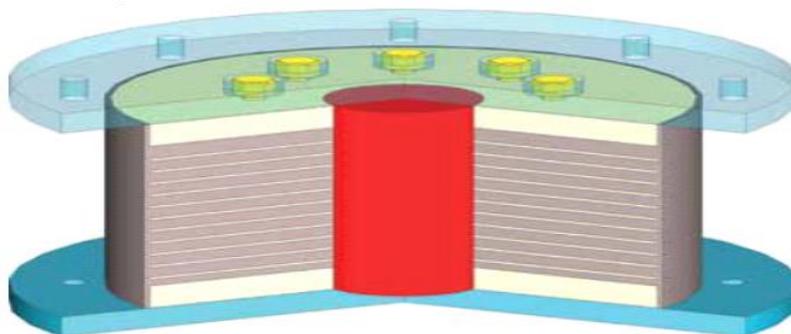


**Figure03 : Isolateur élastomérique avec des cales en acier.**

### **I-2-1-2-Isolateur LRB (Lead Rubber Bearings) :**

Cet appui il est doté en son centre d'un noyau de plomb généralement cylindrique. Le noyau de plomb permet ici de reprendre les charges mineures, et il suit l'appui selon un comportement vis colinéaire[7]. Ce noyau de plomb se déforme lorsque l'isolateur est soumis à un déplacement latéral. Il fournit ainsi une grande capacité de dissipation d'énergie et donne lieu à une plus grande rigidité sous l'effet des forces latérales statiques [6]. Ce qui veut dire qu'il les cales en acier forcent le noyau en plomb à se déformer ou à céder, et l'amortissement hystérétique est développé avec l'énergie absorbée par le noyau en plomb [8].

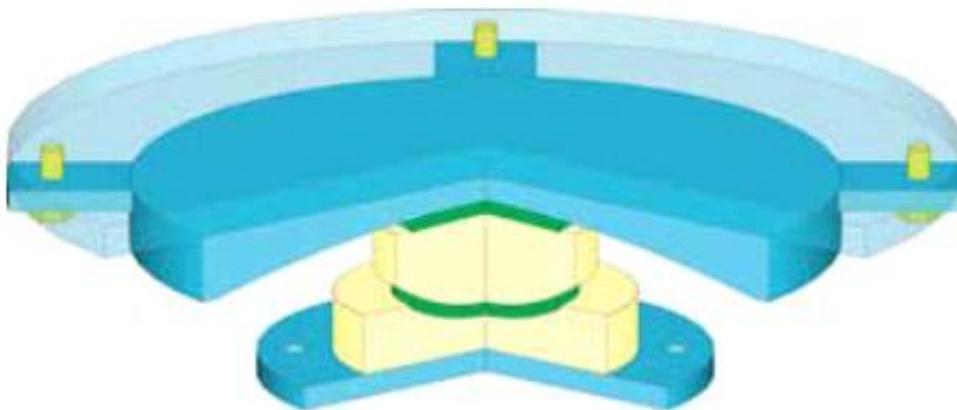
Les plaques du sommet et du rebord de l'isolateur sont généralement connectées aux plaques de fin de l'isolateur au moyen de boulons fraisés afin de s'assurer de l'isolement du noyau de plomb. Le noyau est donc compressé à l'intérieur de l'isolateur entre les cales d'acier et les plaques de fin en acier situées à ses deux extrémités. Afin de tenir dans l'isolateur [9].



**Figure 04 : Roulement en caoutchouc à plomb circulaire (LRB).**

### I-2-1-3-Appui à pendule de friction :

Les paliers pendulaires à friction sont des isolateurs sismiques en acier inoxydable constitués d'une surface concave, d'un curseur articulé et d'une plaque de recouvrement. Le curseur est recouvert d'un revêtement composite autolubrifiant (par exemple, Téflon) [10]. A un curseur articulé qui se déplace sur une surface sphérique en acier inoxydable. La face du coulisseau articulé en contact avec la surface sphérique est revêtue d'un matériau composite à faible frottement. L'autre côté du curseur est également sphérique, revêtu d'acier inoxydable et se trouve dans une cavité sphérique, également revêtue du matériau composite à faible frottement [11]. Lorsque le curseur glisse sur la surface sphérique concave, provoquant l'élévation de la masse supportée, la composante de force gravitationnelle parallèle à la surface agit comme force de rappel. Cette force de rappel fournit la rigidité de l'isolateur FPS pendant le mouvement de glissement. La force de frottement entre le matériau du roulement du curseur et la surface concave détermine l'amortissement de frottement de l'isolateur[12].



**Figure 05 : Pendules à friction.**

### I-2-1-4-Autres types :

Les autres techniques consistent habituellement à accompagner un appui sismique simple comme les appuis à friction avec des systèmes mécaniques qui vont assurer soit une dissipation d'énergie supplémentaire, soit amortir les mouvements, soit assurer une force de recentrage pour les très grands déplacements :

- Isolateurs à poutres fleuronées : Des chercheurs italiens ont développés deux types d'appareils d'appuis à friction accompagnés de poutres se déformant en flexion. Le premier type, a été développé par Carducci, et consiste en un système

élastoplastique : des poutres d'acier en arc de lune sont disposées en étoile autour de l'appui et roulées à leurs extrémités [7].

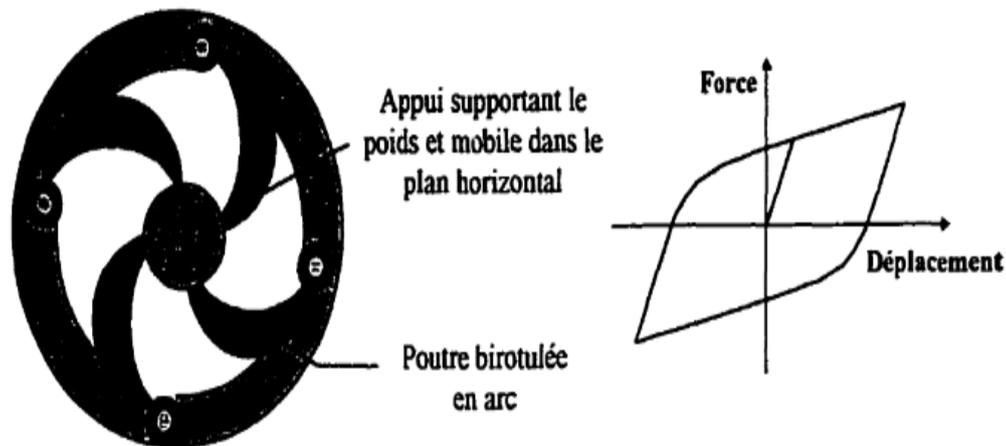


Figure06 : Isolateur à poutres fleuronées.

- Roulements glissants : Quatre paliers lisses multidirectionnels de type disque ont été utilisés. Illustré, ce roulement se composait d'une plaque inférieure qui était supportée par un disque de haute dureté et un mécanisme de restriction de cisaillement. Le disque a fourni une capacité de rotation à la plaque inférieure afin que l'interface coulissante soit toujours en contact total [13].

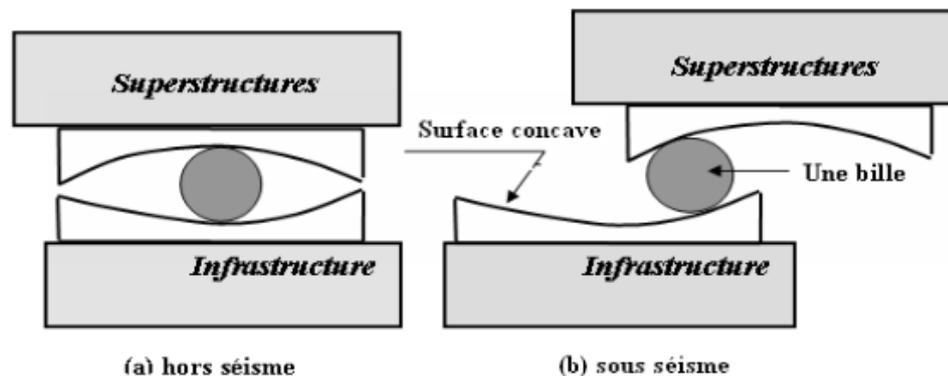
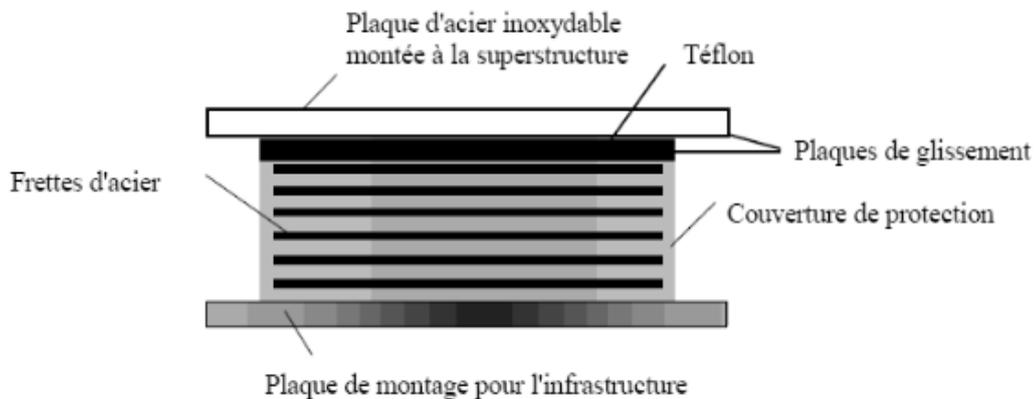


Figure 07 : Appuis pendulaires à glissement.

- Des pistons remplis de silicone au comportement super-élastique assurent un rôle similaire aux poutres décrites précédemment. Le piston joue le rôle d'amortisseur et assure le recentrage de l'isolateur par son comportement super-élastique.
- Des poutres en acier de différentes formes pouvant se déformer en flexion ou en torsion sont dissipatrices d'énergie. Ces poutres d'acier sont planaires ; elles se

déforment en flexion dissipant ainsi une partie de l'énergie sismique ; eues assurent le recentrage du système en cas de trop grands déplacements [7].



**Figure 08 : Poutres d'acier planaires.**

### I-2-2-Mécanismes de dissipation d'énergie :

Plusieurs types de dispositifs passifs de dissipation d'énergie ont été adoptés dans le monde pour protéger les structures des excitations sismiques. Selon la nature de leur comportement hystérétique, de tels dispositifs peuvent être classés en trois catégories[14] :

**1.** Dispositifs à comportement hystérétique : amortisseurs dont la force de rappel ne dépend pas du taux de variation du déplacement (c'est-à-dire la vitesse) mais uniquement de l'amplitude du déplacement et du signe de la vitesse (c'est-à-dire la direction du mouvement). Quelques exemples sont représentés par des amortisseurs métalliques et des amortisseurs à friction.

**2.** Dispositifs visqueux élastique : amortisseurs dont la force de rappel dépend, partiellement ou totalement, sur le taux de variation du déplacement (c'est-à-dire la vitesse). Des exemples de tels dispositifs sont les amortisseurs à fluide visqueux et les amortisseurs solides viscoélastiques.

**3.** autres dispositifs : registres qui ne peuvent être classés par l'un des types de base décrits ci-dessus. Quelques exemples sont des dispositifs à ressort de friction avec une capacité de recentrage et des dispositifs d'amortissement de force de restauration de fluide [15].

### I-2-2-1-Dispositifs à comportement hystérétique :

Les modèles hystérétiques sont des modèles mathématiques capables de simuler le comportement non linéaire complexe caractérisant les systèmes mécaniques et les matériaux utilisés dans différents domaines de l'ingénierie [16]. Ils sont de deux types :

#### I-2-2-1-1-Amortisseurs métalliques :

Ce type de dispositifs de dissipation d'énergie utilise le comportement hystérétique des métaux dans la plage inélastique. La force de résistance des amortisseurs dépend donc des caractéristiques de contrainte-déformation non linéaires du matériau. Différents dispositifs utilisant la flexion, le cisaillement ou la déformation en extension dans la gamme plastique ont été développés. Les avantages de ce type d'amortisseurs sont leur comportement stable, leur fiabilité à long terme et leur bonne résistance aux conditions environnementales et thermiques. De plus, les amortisseurs métalliques sont capables de fournir aux bâtiments une rigidité, une résistance et une capacité de dissipation d'énergie accrues [17].

Deux principaux types d'amortisseurs métalliques sont les amortisseurs à contreventement retenu par flambage (BRB) et les amortisseurs à amortissement et rigidité supplémentaires (ADAS). Un amortisseur BRB se compose d'un contreventement en acier ayant généralement une faible limite d'élasticité avec une section transversale cruciforme qui est entourée d'un tube en acier rigide. La région entre le tube et le contreventement est remplie d'un matériau semblable au béton et un revêtement spécial est appliqué sur le contreventement pour l'empêcher de se lier au béton.

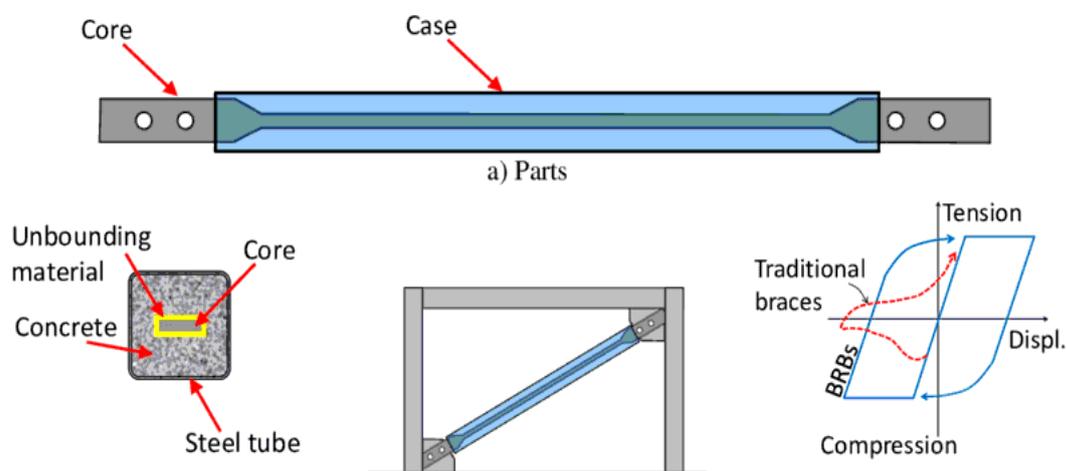
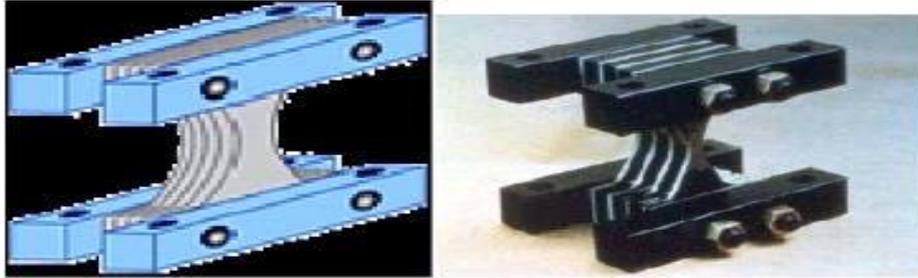


Figure09 : Amortisseur à contreventement retenu par flambage (BRB).

Un deuxième type d'amortisseur métallique est l'ADAS. Ce dispositif se compose d'une série de plaques d'acier dans lesquelles le bas des plaques est fixé au haut d'un agencement de contreventement en chevron et le haut des plaques est fixé au niveau du sol au-dessus du contreventement [14].



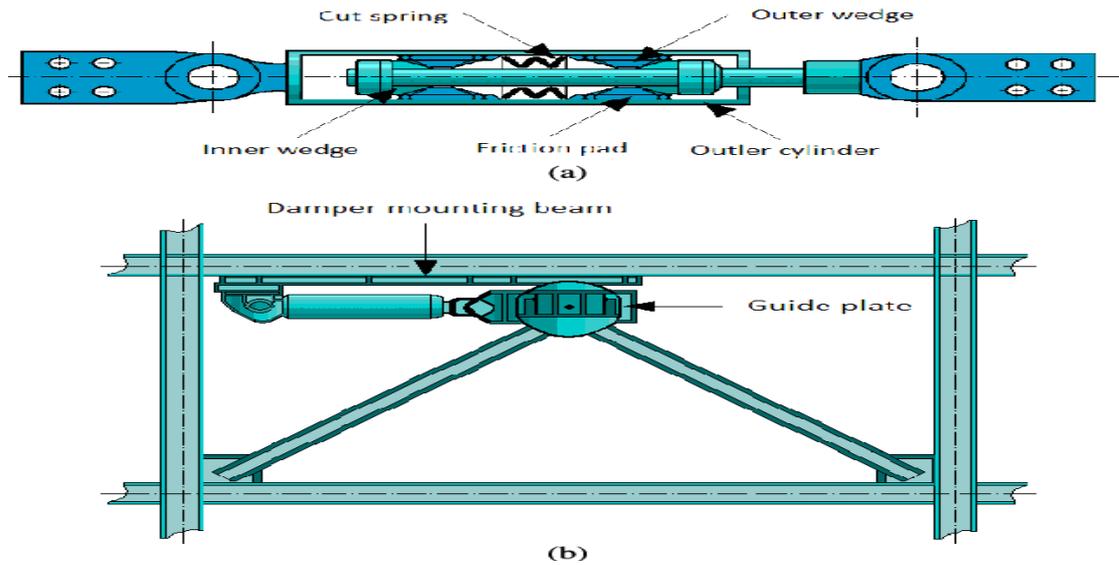
**Figure 10 : Amortisseur à amortissement et rigidité supplémentaires (ADAS).**

### **I-2-2-1-2-Amortisseurs à frottement :**

Les amortisseurs à friction utilisent le mécanisme de friction solide qui se développe entre deux corps solides glissant l'un par rapport à l'autre pour fournir la dissipation d'énergie souhaitée. Plusieurs types d'amortisseurs à friction ont été développés dans le but d'améliorer la réponse sismique des structures [18]. De plus, ces dispositifs ont une grande résistance à la fatigue. Les dispositifs diffèrent par leur complexité mécanique et par les matériaux utilisés pour les surfaces de glissement [17].

Si les contreventements diagonaux d'une structure à contreventement ordinaire étaient conçus pour ne pas flamber en compression, un simple joint de friction pourrait être inséré dans chaque diagonale. Dans ce cas, chaque joint coulissant agirait indépendamment de l'autre. Les croisillons étant assez fins, ils sont conçus pour être efficaces uniquement en traction.

L'absorption d'énergie serait relativement faible puisque l'attelle ne glisserait plus tant qu'elle n'aurait pas été étirée au-delà de la longueur allongée précédente [19].



**Figure 11 : Amortisseurs de friction rotationnels.**

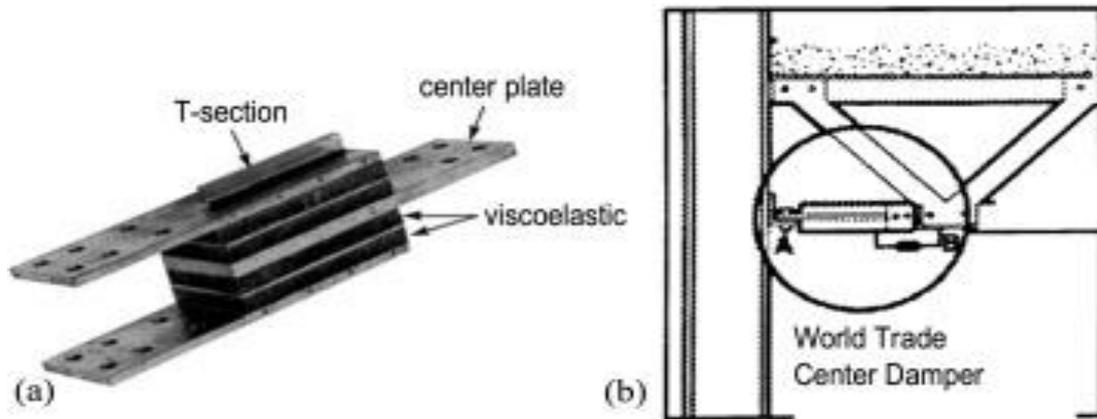
### **I-2-2-2-Dispositifs visqueux élastique :**

L'utilisation de dispositifs élastiques visqueux est une solution constructive pour les systèmes dissipatifs qui, une fois introduits dans un système structurel, peuvent modifier la réponse de la structure à d'éventuelles actions dynamiques en augmentant la rigidité totale du système[20].

Les amortisseurs visqueux sont des dispositifs de dissipation d'énergie largement utilisés qui améliorent la dissipation d'énergie structurelle. Un amortisseur visqueux typique se compose d'un cylindre et d'une tige de piston en acier inoxydable à haute résistance[21]. Ils sont de deux types :

#### **I-2-2-2-1-Amortisseurs à solide visqueux élastique :**

Les amortisseurs solides viscoélastiques sont généralement constitués de coussinet élastomères solides en matériau viscoélastique collés à des plaques d'acier. Les plaques d'acier sont fixées à la structure à l'aide de chevrons ou de contreventements diagonaux. Lorsqu'une extrémité de l'amortisseur se déplace par rapport à l'autre, le matériau viscoélastique est cisailé, entraînant le développement de chaleur qui est dissipée dans l'environnement [22].



**Figure 12 : Amortisseur viscoélastique en diagonal :**

**(a) L'amortisseur est libre**

**(b) L'amortisseur est intégré à la base**

#### **I-2-2-2-2-Amortisseurs à liquides visqueux élastique :**

Les caractéristiques de dissipation d'énergie dépendant de la fréquence des amortisseurs à fluide peuvent être décrites en considérant la réponse de l'amortisseur à un déplacement harmonique imposé [23]. Il est composé d'une tige de piston reliée à un cylindre et d'une fluide silicone compressible avec des chambres et une soupape de commande.

Les amortisseurs de fluide fonctionnent par écoulement de fluide à travers des orifices. Lorsqu'un fluide visqueux s'écoule dans un tuyau lisse, l'énergie sera dissipée et une chute de pression existera le long du tuyau [24].

Ces dispositifs ont été utilisés dans les systèmes d'isolation contre les chocs et les vibrations du matériel militaire et aérospatial, comme amortisseurs de vent, comme tampons de grue et ont récemment été étudiés comme dispositifs de dissipation d'énergie dans les bâtiments et les ponts [25].

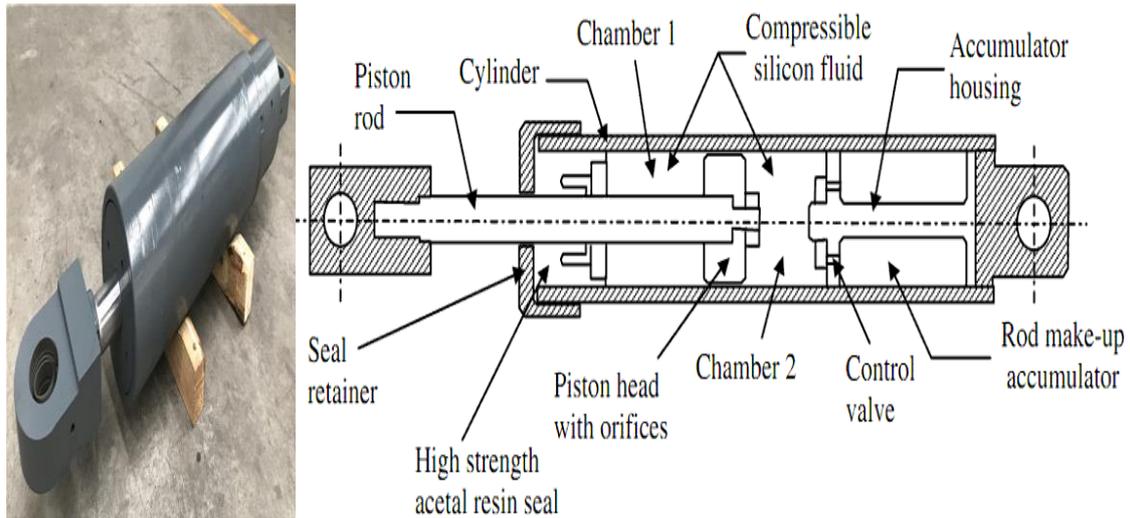


Figure 13 : Schéma d'un amortisseur à fluide visqueux.

### I-2-2-3-Absorbeur de vibration dynamique :

L'idée des matériaux poreux est de laisser le son se réfléchir de multiples reprises contre les parois des pores et ainsi rallonger son trajet. Sa dissipation est alors largement amplifiée.

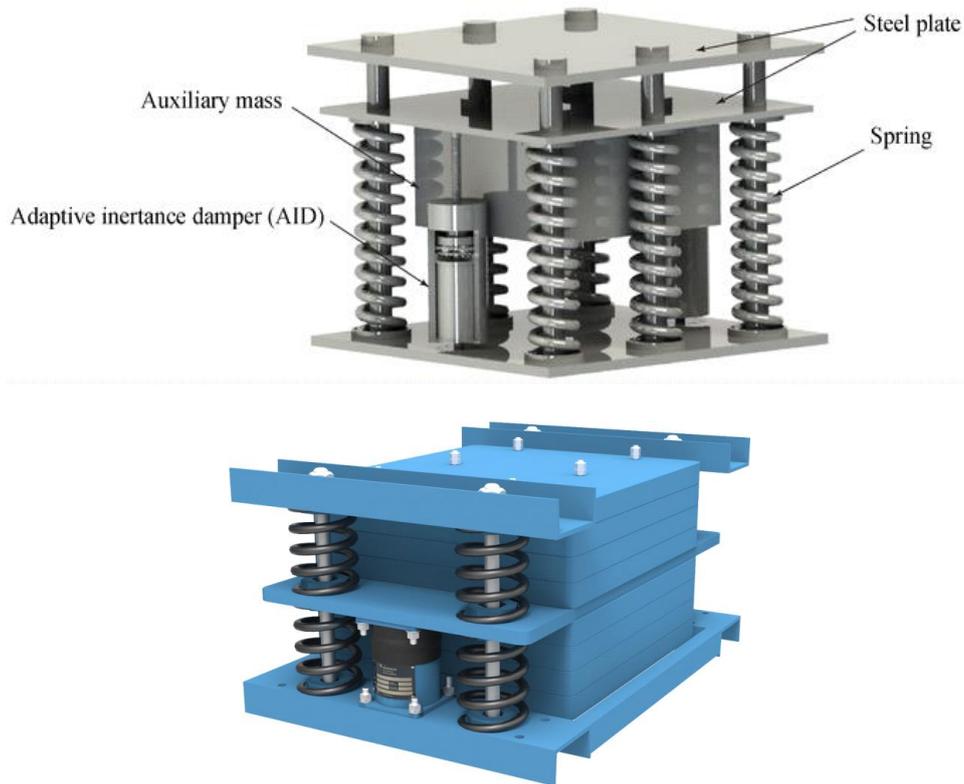
En acoustique, les absorbeurs dynamiques linéaires accordés utilisent le principe du résonateur de Helmholtz. Sa conception constituée d'un col suivi d'un volume fermé lui permet de se comporter comme un oscillateur mécanique masse-ressort. Il a donc une fréquence de résonance bien précise. Ce type d'absorbeur est pleinement efficace pour atténuer, voire faire disparaître une résonance précise au phénomène d'anti-résonance [26].

Sont souvent définis comme les vibrations causées et entretenues par une excitation périodique[27].

#### I-2-2-3-1-Amortisseur à Masse Accordée (TMD) :

Un amortisseur de masse accordé (TMD) est un dispositif passif de dissipation d'énergie, composé d'une masse, d'un ressort et d'un amortisseur visqueux, attaché à la structure et améliore la réponse de la structure induite par les vents ou les charges sismiques[28].

La raideur et la masse d'un tel système sont choisies pour que l'oscillateur ainsi constitué dissipe le maximum d'énergie de l'ouvrage qu'on souhaite lui réduire sa réponse dynamique. Un inconvénient majeur, dans la conception de ce type de système est la masse importante à mobiliser pour l'amortisseur et qui constitue une surcharge pour la structure [29].



**Figure 14 : Amortisseur à masse accordée (TMD).**

### **I-2-2-3-2-Amortisseur à Liquide Accordé (TLD) :**

C'est un dispositif d'amortissement qui se composait de récipients hémisphériques à deux couches, partiellement remplis d'eau[30].

Récipient convertit l'énergie dynamique de fluide en chaleur, absorbant ainsi l'énergie de vibration structurelle[31].Repose sur le mouvement d'un liquide peu profond à l'intérieur d'un réservoir rigide pour modifier les caractéristiques dynamiques d'une structure et dissiper son énergie vibratoire[32]. L'amortisseur à liquide accordé (TLD) présente des avantages, tels qu'un réglage simple de la fréquence naturelle, une installation facile et une maintenance réduite [33].Le mécanisme de TLD est fondamentalement similaire à celui de TMD[32].La différence est que toutes les caractéristiques du système auxiliaire d'un TLD comme la masse, l'amortissement et la rigidité sont fournies par le liquide lui-même [31].

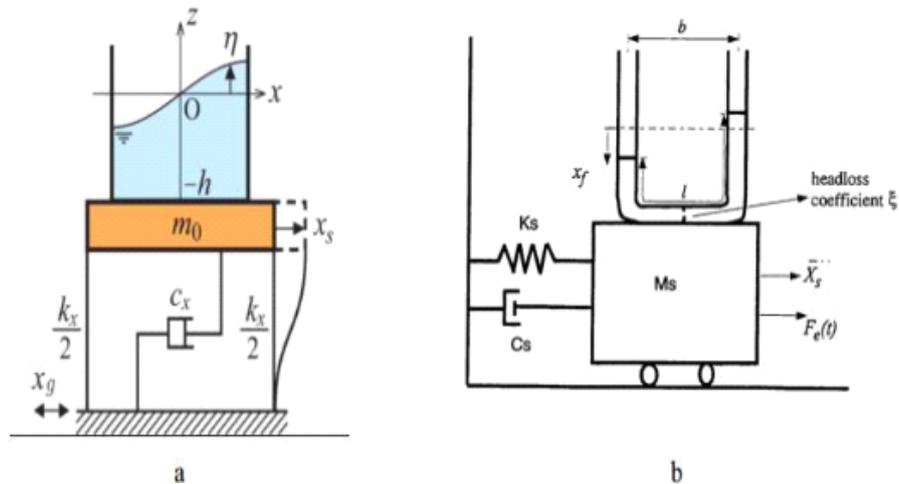


Figure 15 :Amortisseur à liquide accordé :

a) TLD à ballotement Yalla b) TLD poteau Ikeda et al.

I-2-2-4-Autres types :

- Amortisseurs hydrauliques à orifice variable : Une classe importante des systèmes dissipatifs à caractéristiques variables est celle des amortisseurs dits d'amortissement variable. Un dispositif d'amortissement variable se comporte comme un amortisseur visqueux (linéaire) avec un coefficient d'amortissement réglable [2].

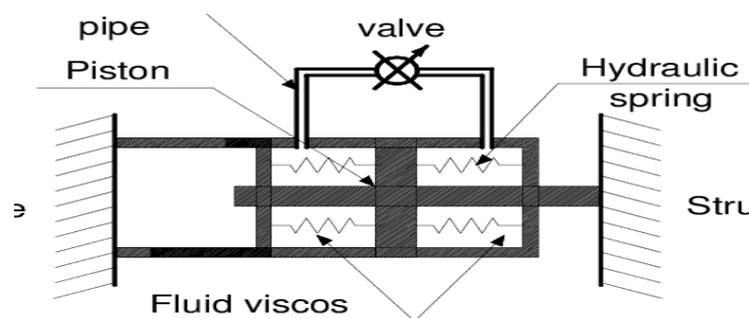
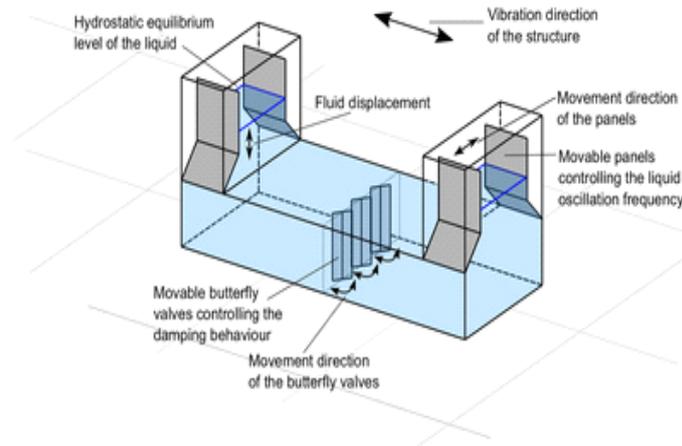


Figure 16 :Amortisseurs hydrauliques à orifice variable.

- Amortisseur de colonne de liquide réglé : Il se compose de panneaux, de vannes de régulation et d'un guide de mouvement. L'énergie vibratoire est absorbée par le mouvement d'un récipient rigide excitant le liquide contenu dans un TLCD, et dissipée par l'interaction visqueuse entre un récipient TLCD rigide et le liquide [34].



**Figure 17 : Amortisseur de colonne de liquide réglé.**

- Le dispositif EDU : Le dispositif EDU est un dispositif multi-composé constitué avec des dissipateurs d'énergie élémentaires en forme de C, ils sont combinés de telle manière qu'ils sont forcés de déformer anti-symétriquement, c.-à-d. pour chacun en compression, un autre est en traction. Il absorbe beaucoup plus d'énergie que n'importe quel autre système. Il montre des propriétés d'auto-recentrage pour des effets thermiques et de petits tremblements de terre. En outre, il a de faibles coûts [35].



**Figure 18 : Dispositif en forme de C (à gauche) et dispositif EDU (à droite).**

### I-3-Système de Contrôle actif :

Les systèmes de contrôle actif ont été largement utilisés pour éliminer les bruits et les vibrations structurelles dans les industries mécaniques et aérospatiales. Et Leur application aux grands ouvrages de génie civil est un domaine novateur en recherche et développement. Cette technique innovante utilise des dispositifs spéciaux, tels que des actionneurs électro hydrauliques pour générer la force de contrôle requise contre la charge sismique en renvoyant la réponse structurale mesurée[36].

Les systèmes de contrôle actifs comprennent des amortisseurs de masse à réglage actif, des actionneurs distribués, des systèmes de tendons actifs et des systèmes de construction couplés actifs [37].

La méthode de contrôle actif est effectuée par un dispositif activé de l'extérieur, pour modifier la réponse. L'activation de la force externe est basée sur la mesure de la perturbation externe et de la réponse structurelle [38]. Le contrôle actif est composé de trois éléments principaux : capteur(s), actionneur(s) et un contrôleur avec un algorithme de contrôle détecté [36]. Des capteurs sont utilisés à des fins de mesure et, à l'aide d'ordinateurs, le signal numérique active la force externe requise [38].

### I-3-1-Amortisseur à Masse Accordée Actif (ATMD) :

Un amortisseur de masse à réglage actif (ATMD) est utilisé pour amortir les vibrations, où la force de l'actionneur supplémentaire est contrôlée à l'aide de la rétroaction du déplacement et de la vitesse relative de la masse de l'amortisseur.

Un facteur limitant de la conception de l'ATMD est le déplacement de la masse de l'amortisseur qui, pour l'ATMD, augmente pour compenser la réduction de masse [39].

L'ATMD est constitué d'une masse actionnée par un moteur à courant continu. À l'aide de la rétroaction d'un accéléromètre placé au dernier étage, un contrôleur de gain proportionnel est implémenté via LabVIEW pour contrôler le mouvement de la masse [40].

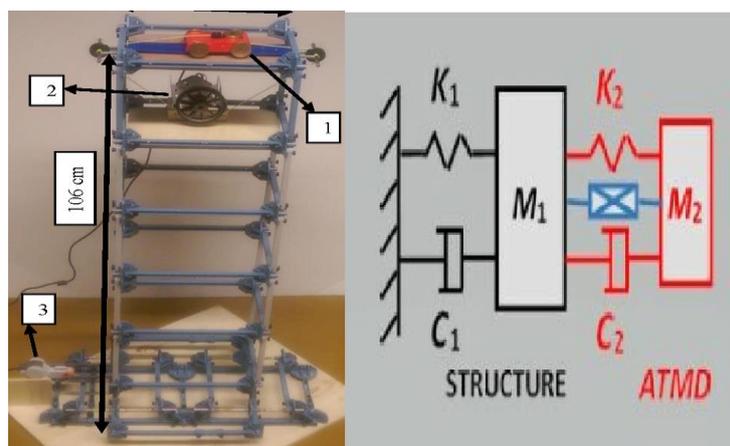


Figure 19 : Amortisseur de masse à réglage actif (ATMD).

### I-3-2-Tendons Actifs :

Les tendons actifs sont composés d'un capteur et d'un actionneur piézoélectriques et leur contrôle est indépendant du contrôle de trajectoire, ce qui en fait un dispositif modulaire, qui peut être installé au choix sur un ou plusieurs câbles [41].

Les tendons actifs sont installés entre deux étages d'une structure de bâtiment. Le vérin d'actionnement est fixé au plancher sous-jacent. Une extrémité du tendon est reliée au plancher supérieur et l'autre extrémité au piston de l'actionneur. Sous l'excitation du séisme, la vibration structurale induit un déplacement entre étages qui entraîne le mouvement relatif du piston d'actionnement vers le vérin d'actionnement. Ce mouvement relatif modifie la tension des tendons précontraints, appliquant ainsi une force de contrôle dynamique à la structure pour réduire sa réponse sismique [36].

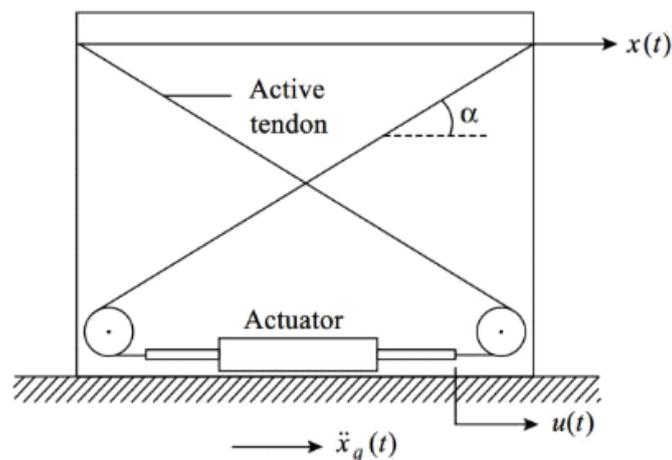
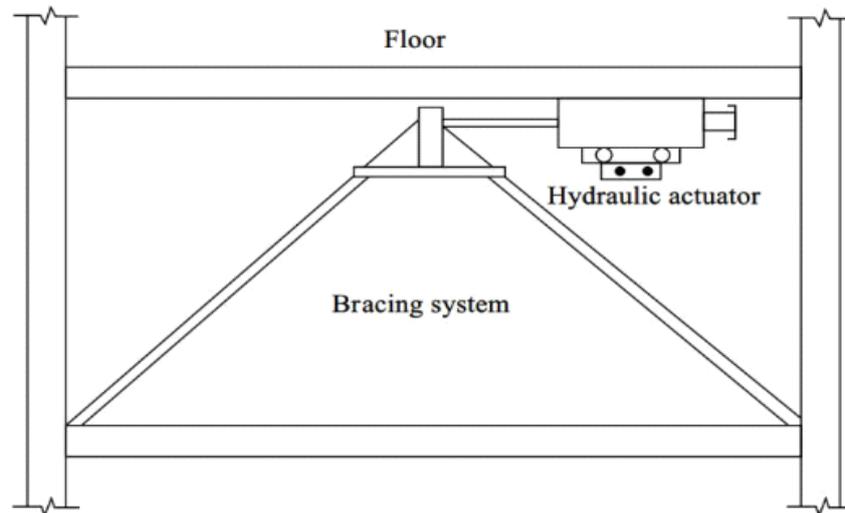


Figure 20 : Structure équipée d'un câble actif (Tendons actifs).

### I-3-3-Autres types :

Amortisseur de 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[36]. Le système de contreventement actif peut se servir des éléments structurels existants et donc de minimiser les additions ou les modifications étendues d'une structure construite. Le système de contrôle permet l'expansion et la contraction longitudinales des entretoises par des actionneurs hydrauliques. Insérés entre les éléments de contreventement et formant une partie interne du système de contreventement.

Le système de contrôle inclut également une force d'alimentation hydraulique, un contrôleur analogique et numérique et des capteurs analogiques [2].



**Figure 21 : Structure équipée d'un contreventement actif.**

### **I-4-Système de Contrôle semi-actif :**

#### **I-4-1-Amortisseurs hydrauliques :**

L'amortisseur hydraulique se compose d'un système cylindre-piston avec une vanne dans le tuyau de dérivation reliant les deux côtés du cylindre. Il peut être utilisé à la fois comme dispositif de contrôle passif et semi-actif soit en ouvrant ou en fermant la vanne dans la dérivation du cylindre, soit en augmentant/diminuant la taille de l'orifice dans la dérivation du cylindre.

L'amortisseur assure la rigidité de la structure en raison du module de compressibilité du fluide dans le cylindre lorsque la vanne est fermée, et assure l'amortissement de la structure en raison de la perte de charge lors du mouvement du fluide lorsque la vanne est ouverte. Dans l'application réelle, lorsque la vanne est toujours ouverte ou fermée, l'amortisseur hydraulique fonctionne en mode passif [42].

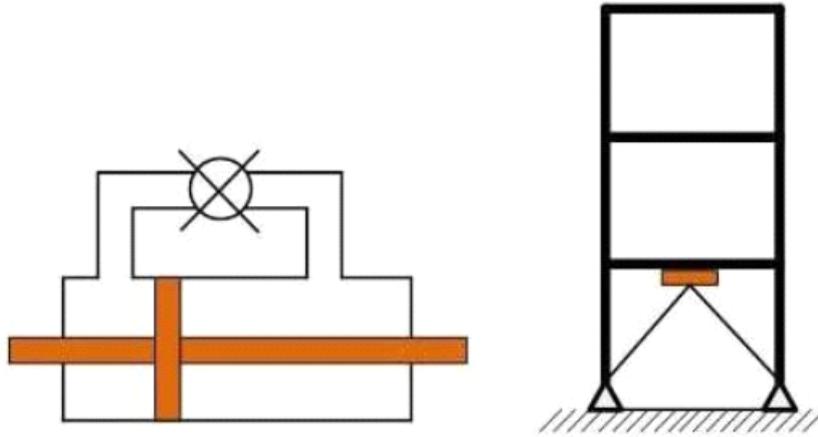


Figure 22 : Amortisseurs hydrauliques.

**I-4-2-Amortisseurs à friction variable :**

Utilise les forces générées par le frottement de surface pour dissiper l'énergie vibratoire dans un système structurel.

Qui consiste en un arbre de friction relié rigidement au contreventement structurel.

La force à l'interface de frottement a été ajustée en permettant un glissement en quantités contrôlées. De plus, un roulement à fluide semi-actif contrôlable par friction a été utilisé en parallèle [43].

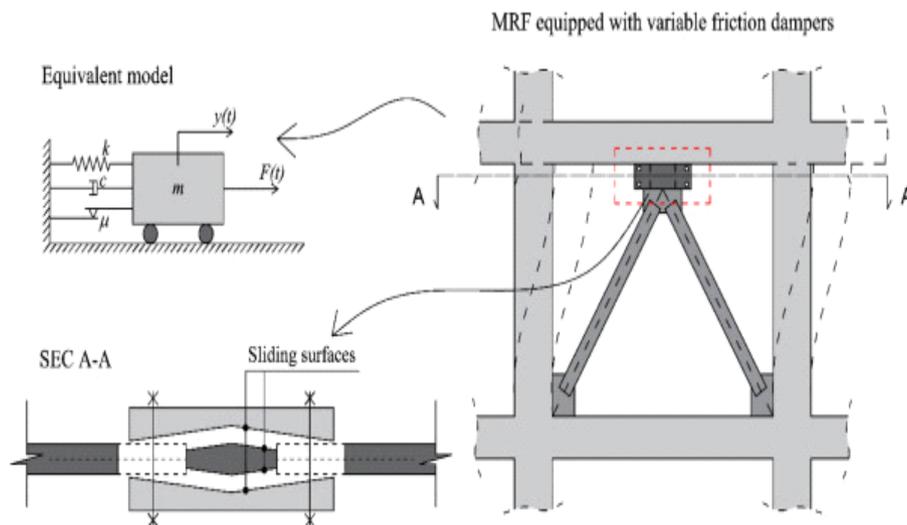


Figure 23 : Amortisseur semi-actif à friction variable.

### I-4-3-Amortisseur à rigidité variable :

Sont des amortisseurs semi-actifs typiques, se compose de deux ressorts et d'un amortisseur à fluide réglable.

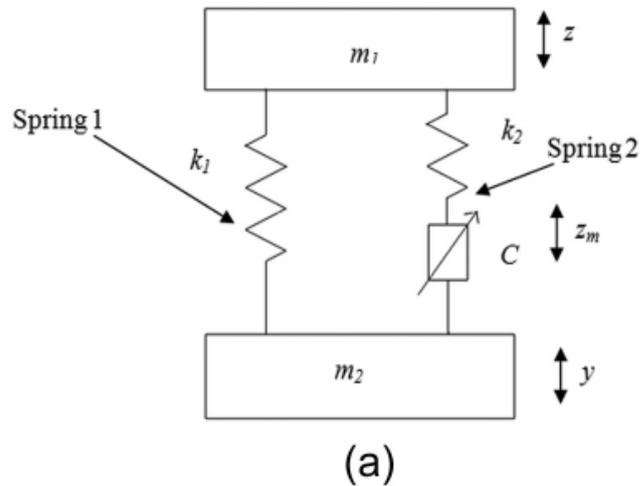


Figure 24 :(a) Présentation du système.

La zone d'écoulement au niveau du registre réglable peut être modifiée en changeant la position de la pièce de couverture, comme illustré sur la figure 25.

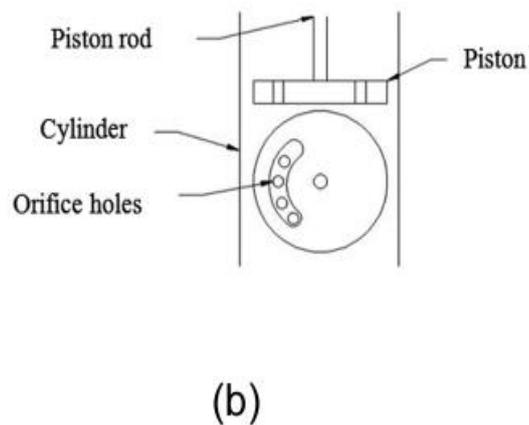


Figure 25 : (b) Agencement pour faire varier les trous d'amortisseur.

Il y a huit trous d'orifice dans le piston. La position de la pièce de couverture peut être modifiée pour faire varier le nombre de trous actifs dans l'orifice du piston de 0 à 8. La modification du nombre de trous d'orifice actifs modifie le coefficient d'amortissement "C" de l'amortisseur de fluide[44].

### I-4-4-Amortisseur à masse accordé (TMD) semi-actif :

Est un dispositif de contrôle structurel qui se compose d'une masse, d'un amortisseur et d'une masse attachée à une structure primaire pour contrôler les vibrations excessives de la structure primaire en dissipant l'énergie. La principale caractéristique d'un TMD est que sa fréquence est réglée sur une fréquence structurelle particulière pour atténuer les vibrations lorsque cette fréquence est excitée [45].

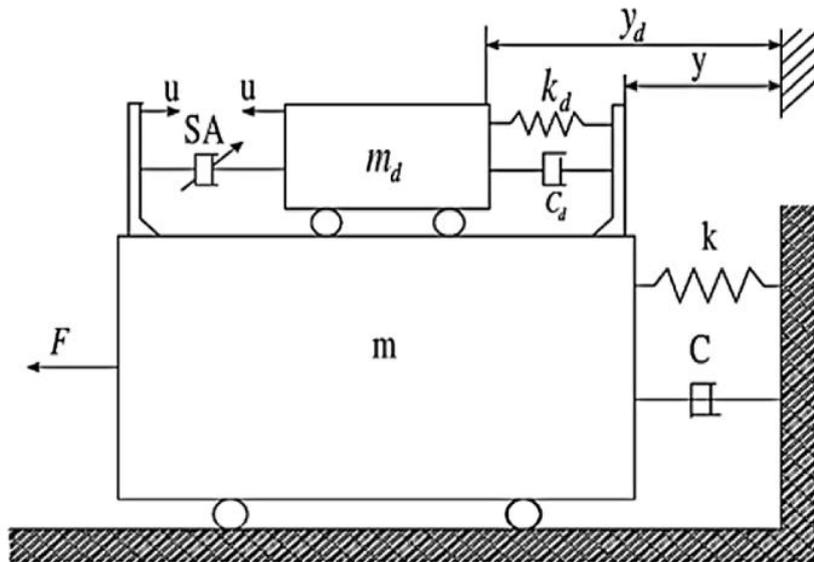


Figure 26 : Amortisseur à masse accordée semi actif.

### I-4-5-Amortisseur à liquide accordé (TLD) semi-actif :

Le TLD est un réservoir rigide et rectangulaire contenant de l'eau peu profonde. Sa fréquence de ballonnement linéaire fondamentale est accordée à la fréquence naturelle de la structure. Le TLD est plus efficace pour réduire la réponse structurelle à mesure que le niveau d'excitation du sol augmente. En effet, il dissipe alors plus d'énergie en raison du ballonnement et du déferlement des vagues [46].

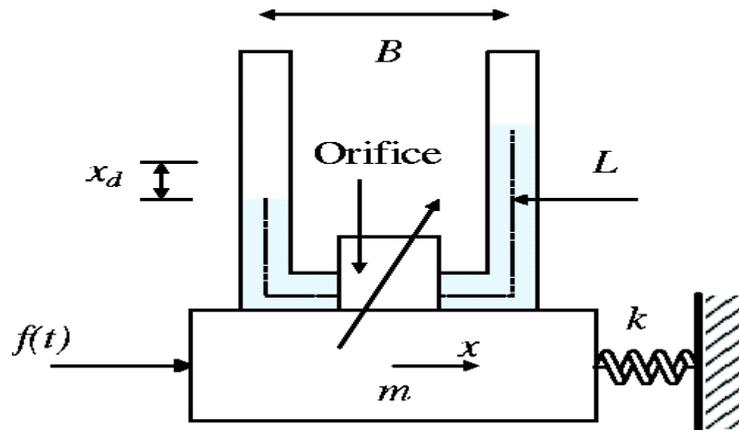


Figure 27 : Amortisseur à liquide accordé semi-actif.

#### I-4-6-Amortisseurs magnéto-rhéologiques (MR) :

Les amortisseurs utilisent des fluides MR pour produire des amortisseurs contrôlables.

Fluides MR sont généralement constitués de particules magnétiquement polarisables de la taille d'un micron dispersées dans un milieu porteur tel qu'une huile minérale ou de silicone.

La caractéristique essentielle des fluides MR est leur capacité à passer de manière réversible d'un fluide visqueux linéaire à écoulement libre à un semi-solide en quelques millisecondes lorsqu'il est exposé à un champ magnétique.

La limite d'élasticité réalisable des fluides MR est d'un ordre de grandeur supérieur à son homologue ER, et les fluides MR ne sont pas sensibles aux impuretés telles qu'elles sont couramment rencontrées lors de la fabrication et de l'utilisation. De plus, les dispositifs utilisant le fluide MR peuvent être contrôlés. Avec une faible puissance (par exemple, moins de 50 watts) [47].

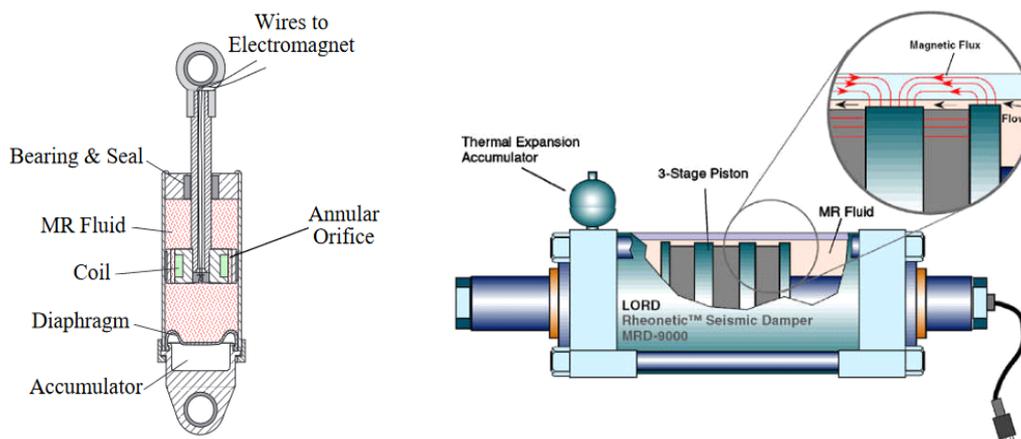


Figure 28 : Schéma de l'amortisseur magnéto-rhéologique a échelle réelle.

### I-4-7-Amortisseurs Electro-rhéologiques (ER) :

Les fluides ER sont souvent des suspensions de particules fines diélectriques dans un liquide isolant.

On peut utiliser ces fluides dans des conditions extrêmes grâce à leur durée de vie élevée et leur capacité à fonctionner dans un grand intervalle de température. Ils peuvent être employés pour le contrôle et l'atténuation de vibrations, sous l'application d'un champ haute électrique [48].

Ils peuvent aussi changer de manière réversible des fluides visqueux linéaires à écoulement libre vers les semi-solides avec une limite d'élasticité contrôlable en millisecondes [36].

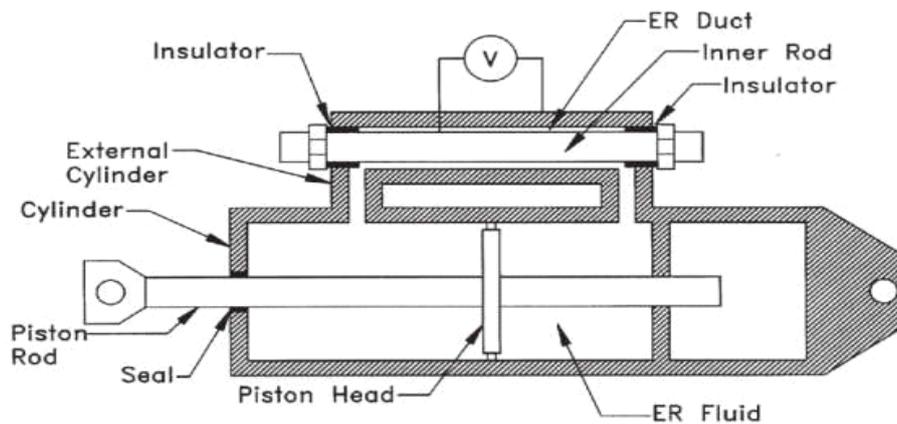


Figure 29 : Schéma d'un amortisseur électro-rhéologique.

### I-5-Système de contrôle hybride :

#### I-5-1-Système de Contrôle actif (semi actif) + contrôle passif :

Les appareils hybrides ont une capacité et une efficacité supérieures à celles des systèmes passifs et coûtent moins cher. De plus, ils sont plus fiables et nécessitent moins d'énergie que les appareils actifs [49]. Les performances du contrôle hybrides résultent d'une diminution du déplacement et d'accélération à la base [36].

Les systèmes de contrôle actifs sont utilisés pour compenser la capacité et l'intelligence restreintes des amortisseurs passifs et semi-actifs. Leur fonctionnement dépend principalement d'une alimentation externe, ce qui limite leurs applications, nécessite une détection compliquée, nécessite un système de traitement du signal, ce qui réduit la fiabilité de la commande, et enfin nécessite des équipements générateurs d'efforts importants, ce qui

ne peut être réalisé à des coûts raisonnables. . Pour ces raisons, les trois principaux groupes de systèmes de contrôle (passifs, actifs, semi-actifs) peuvent être regroupés en combinaisons en série ou en parallèle afin de sélectionner le meilleur avantage de chaque groupe pour donner le quatrième groupe, appelés dispositifs de contrôle hybrides [50].

### I-5-1-1-Amortisseur à mass accordée hybride :

Les amortisseurs de masse hybrides combinent un TMD passif et un actionneur de contrôle actif, ou ils ajoutent un AMD à un TMD. Un AMD est attaché à un TMD au lieu de la structure afin que l'AMD puisse être petit ; sa masse est de 10 à 15 % de celle du TMD [8].

La capacité de ce dispositif à réduire les réponses structurelles repose principalement sur le mouvement naturel du TMD. Les forces de l'actionneur de commande sont employées pour augmenter l'efficacité du HMD et pour augmenter sa robustesse aux changements des caractéristiques dynamiques de la structure [18].

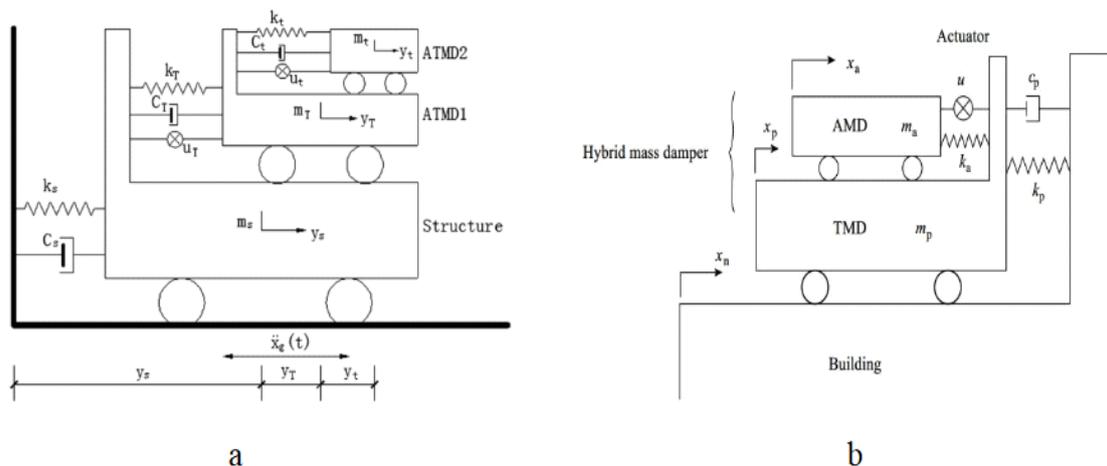


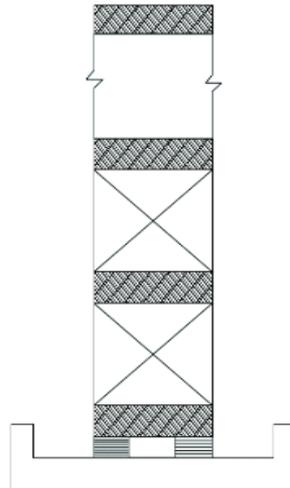
Figure 30 : Configuration de base d'un Amortisseur à masse accordée hybride :

a) ATMD actif +ATMD actif.

b) TMD passif +ATMD actif.

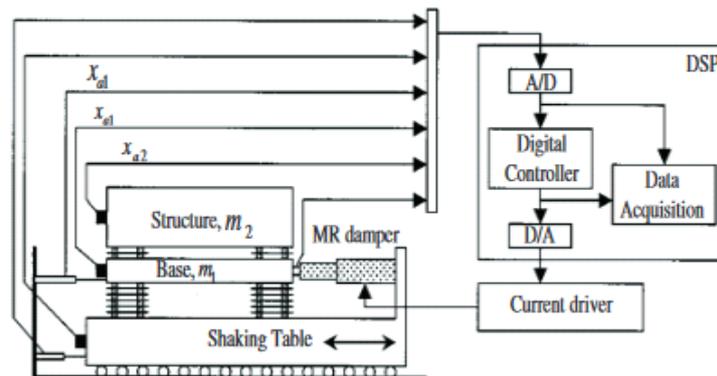
### I-5-1-2-Isolation à la base hybride :

Cette classe de systèmes peut être subdivisée en deux types. Le premier type utilise des amortisseurs à fluide MR sur la superstructure au lieu du tendon actif utilisé dans les systèmes du second type.



**Figure 31 : Contrôle hybride d'une structure isolée à la base.**

Le deuxième type consiste en une unité d'isolation de base positionnée entre la fondation et la structure, et un système de contrôle actif des tendons sur la superstructure [49].



**Figure 32 : Structure équipée d'une isolation à la base hybride d'un amortisseur à fluide MR sur la superstructure.**

### I-5-1-3-Autres types :

- Le laminoir : est un système industriel permettant de convertir les blocs métalliques en tôles.
- La logique (séquence) d'opérations, définie est implémentée dans l'automate programmable (Programmable Logic Controller), qui constitue ainsi la partie séquentielle.
- Les autres composants du système (Servomoteur, contrôleur d'ouverture, moteur d'induction, rouleaux et contrôleur de température) constituent la partie continue.

- Un ensemble de capteurs (sen sors) permettent d'obtenir des informations sur le processus [51].

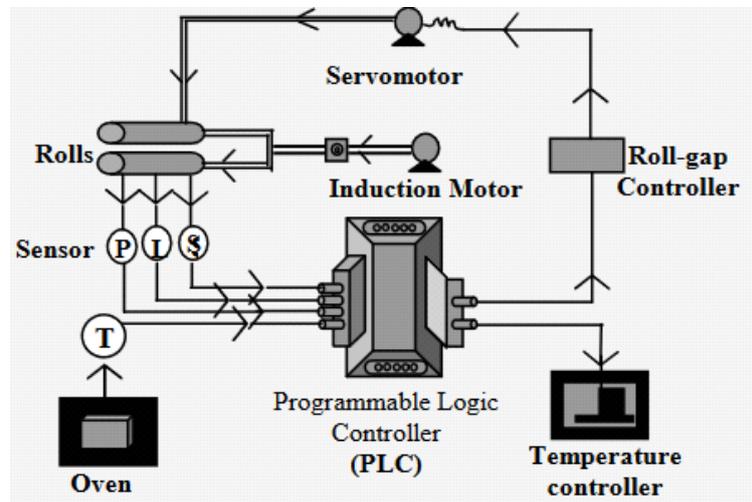


Figure 33 : Exemple de système hybride le laminoir.

### I-6-Conclusion :

Ils existent deux catégories de systèmes d'isolation largement utilisées. La première catégorie englobe la famille des appuis en élastomère, dans laquelle on trouve le système d'appui fretté en élastomère à haut taux d'amortissement HDRB (High Dumping Rubber Bearing system), le système d'appui en élastomère fretté avec amortisseur en barreau de plomb LRB (Lead Rubber Bearing system) et d'autres systèmes. Dans cette catégorie, le bâtiment ou la structure est dissociée des composantes horizontales du mouvement sismique en interposant une couche de faible rigidité horizontale entre la structure et sa fondation[52].

D'après Kelly J. M. et al [53], les exigences de base d'un système d'isolation sismique sont les suivantes :

- Les appuis doivent supporter la charge propre de la structure, et ils doivent posséder une grande rigidité verticale.
- Le système des appuis d'isolation sismique doit empêcher tout mouvement excessif de l'immeuble.

Tous les systèmes d'isolation sismique qui existent peuvent satisfaire les exigences ci-dessus.

Conceptuellement, ces systèmes doivent accomplir les objectifs de performance suivants :

- Flexibilité.

## Chapitre I : Système de contrôle

---

- Amortissement.
- Résistance aux charges de service.

**Chapitre II :**  
**Modèle**  
**mathématique**

### II-1-Introduction :

Un modèle mathématique est une traduction de la réalité pour pouvoir lui appliquer les outils, les techniques et les théories mathématiques, puis généralement, en sens inverse, la traduction des résultats mathématiques obtenus en prédictions ou opérations dans le monde réel [54].

### II-2-Equations de mouvement et représentation mathématiques :

#### II-2-1-Structure avec dispositif de contrôle :

##### II-2-1-1-Contrôle passif :

##### II-2-1-1-1-Modèle d'hystérésis des systèmes d'isolation Roulement en caoutchouc normal (NRB) et Roulement en caoutchouc à amortissement élevé (HDRB) :

La rigidité effective des isolations sismiques est estimée par la relation suivante :

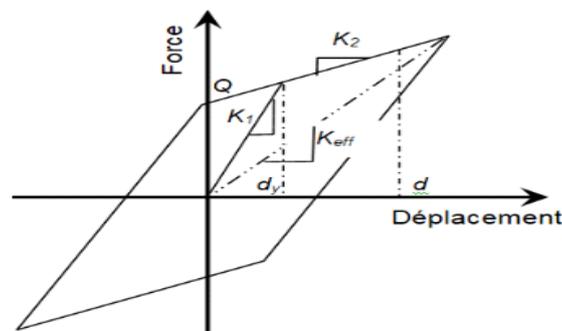
$$K_{\text{eff}} = \frac{W}{g} \left( \frac{2\pi}{T_d} \right)^2 \quad (01)$$

Où  $T_d$  désigne la période d'isolation comprise entre  $3T$  et  $3\text{sec.}$ , où  $T$  représente la période du pont non sismiquement isolé,  $W$  est la charge totale supporté par le système d'isolation .[55]

Le déplacement cible de conception parasismique est déduit par l'équation:

$$d = \frac{S_a T_d^2}{4\pi^2} \quad (02)$$

Où  $S_a$  représente la valeur de l'accélération spectral correspondant à la période effective  $T_d$  et l'amortissement effective du système d'isolation.



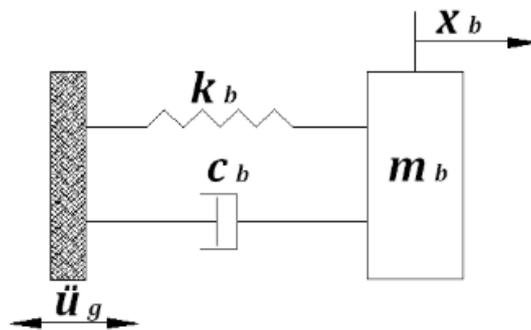
**Figure 34: Modèle hystérétique bi-linéaire de type force-déplacement des dispositifs NRB HDRB**

## Chapitre II : Modèle mathématique

Où  $K_1$  la rigidité élastique et  $K_2$  la rigidité post-élastique et  $Q$  la résistance caractéristique des dispositifs antisismiques dans les directions longitudinales et transversales sont évaluées. [55]  
La résistance caractéristique ( $Q$ ) du modèle hystérétique bi-linéaire HDRB est estimée par la relation suivante :

$$Q = \frac{K_2 d^2 \cdot \pi \cdot \xi_{\text{eff}}}{(2 - \xi_{\text{eff}} \cdot \pi) \cdot d - 2 \cdot d_y} \quad (03)$$

Dans cette relation,  $d_y$  désigne typiquement le déplacement qui correspond à la force d'écoulement, en général c'est une quantité a priori inconnue, estimée approximativement de 0.05 à 0.1 fois la hauteur totale des élastomères [56].



**Figure 35: Modèle mathématique des systèmes d'isolation (NRB et HDRB).**

On utilise le modèle bilinéaire de la courbe caractéristique.

L'équation du mouvement du système NRB est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} m_b(\ddot{x}_b + \ddot{u}_g) + C_b \dot{x}_b + K_b x_b &= 0 \\ m_b \ddot{x}_b + C_b \dot{x}_b + K_b x_b &= -m_b \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (04)$$

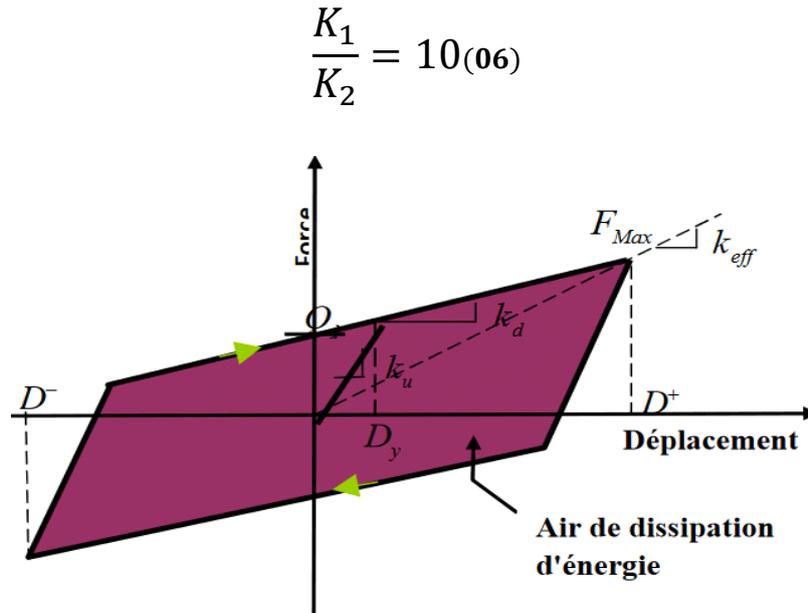
### II-2-1-1-2-Modèle d'hystérésis du système d'isolation LRB :

Le comportement hystérétique de l'isolateur parasismique LRB est idéalisé par la relation bilinéaire de type force-déplacement et caractérisé par les paramètres suivants : [57-58]

$$W_D = 2\pi \cdot K_{\text{eff}} \cdot d^2 \cdot \xi_{\text{eff}} \quad (05)$$

Où  $W_D$  désigne l'énergie de dissipation par cycle.

Le rapport ( $K_1 / K_2$ ) dépend des caractéristiques physiques de l'isolateur, estimées d'une valeur de 10 par les études expérimentales.



**Figure 36 : Approximation bilinéaire d'une loi de comportement hystérétique exprimée en force-déplacement.**

Un algorithme itératif est établi en vue d'appréhender les paramètres non linéaires du modèle hystérétique de LRB :

1. le déplacement  $D_y$  correspondant à la force d'écoulement  $F_y$ :

$$Q = F_y - K_2 D_y \quad (07)$$

2. la résistance caractéristique  $Q$  par la relation suivante :

$$Q = \frac{W_D}{4(d - d_y)} \quad (08)$$

3. la rigidité post-élastique  $K_2$  :

$$K_2 = K_{eff} - \frac{Q}{d} \quad (09)$$

4. La rigidité élastique ( $K_1$ ) est déduite de l'équation (10)

5. recalcule le déplacement élastique  $d_y$  :

$$d_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (10)$$

Les étapes de calcul sont répétées sautant de fois jusqu'à la convergence du déplacement  $d_y$ .

Le système LRB se comporte comme un amortisseur hystérétique.

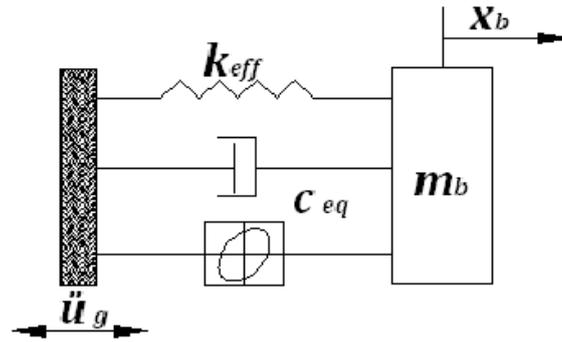


Figure 37: Modèle mathématique pour un système combiné LRB.

Et pour déterminer les propriétés du système LRB (la rigidité effective et l'amortissement équivalent), on utilise le modèle bilinéaire de la courbe caractéristique.

L'équation du mouvement du système LRB est donnée comme suit:

$$\begin{aligned}
 m_b(\ddot{x}_b + \ddot{u}_g) + C_{eq}\dot{x}_b + K_{eff}x_b &= 0 \\
 m_b\ddot{x}_b + C_{eq}\dot{x}_b + K_{eff}x_b &= -m_b\ddot{u}_g
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

### II-2-1-1-3-Modèle d'hystérésis du système d'isolation FPS :

Le glissement des interfaces confère à ce dispositif un comportement frottant important [59-11-60]. Ce comportement frottant peut être représenté par l'approximation bilinéaire :

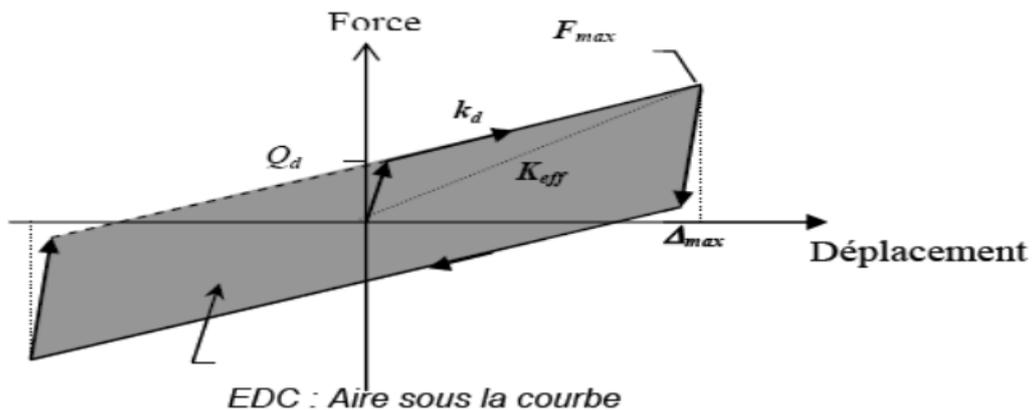


Figure 38: Comportement frottant exprimée en force-déplacement.

## Chapitre II : Modèle mathématique

Les paramètres de l'approximation bilinéaire exprimant le comportement frottant sont les suivants:

$W$ : Charge vertical transmise par l'isolateur.

$R$ : Rayon de la surface de glissement sphérique.

$\mu$ : Coefficient de frottement de la surface de glissement.

La rigidité effective de l'isolateur  $K_{eff}$  est donnée par la formule suivante:

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \quad (12)$$

L'énergie dissipée par cycle  $W_D$  correspondant au déplacement de conception  $D$ , elle est donnée par la formule suivante:

$$W_D = 4\mu W D \quad (13)$$

Le pourcentage d'amortissement effectif du système d'isolation est exprimé comme suit:

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (14)$$

La rotule développe une force de résistance latérale qui est égale à l'effet combiné d'une force de frottement dynamique et d'une force de rappel de la gravité. Ce la assure l'amortissement nécessaires à l'absorption de l'énergie sismique.

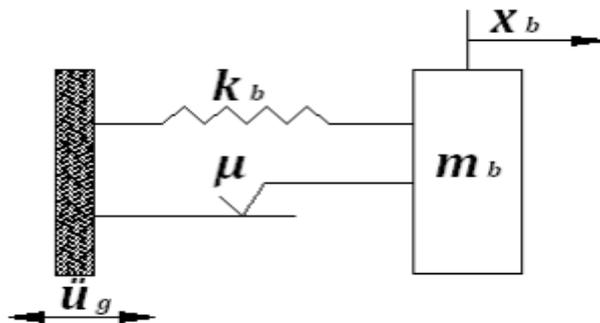


Figure 39: Modèle mathématique pour un système d'isolation en pendule à glissement (FPS).

La force la téra le développée dans le système d'isolation est donnée comme suit:

$$F = \frac{W}{R} x_b + \mu \cdot W \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) \quad (15)$$

$x_b$ : Déplacement de la base.

Où la fonction  $\operatorname{sgn} x_b$  représente le signe de la direction de la vitesse du système d'isolation.

Le système sous l'accélération du sol  $u$  est représenté par l'équation de mouvement suivante:

$$m_b(\ddot{x}_b + \ddot{u}_g) + F = 0 \quad (16)$$

En remplaçant l'équation (14) dans l'équation (15), on aura:

$$m_b \ddot{x}_b + \left(\frac{W}{R}\right)_b + \mu \cdot W \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) = -m_b \ddot{u}_g \quad (17)$$

### II-2-1-1-4-Modèle d'hystérésis du amortisseur à fluide visqueux:

Ce système présente une force de résistance  $F$  qui dépend de la vitesse du mouvement, de la viscosité du fluide et de la grosseur des orifices dans le piston [61].

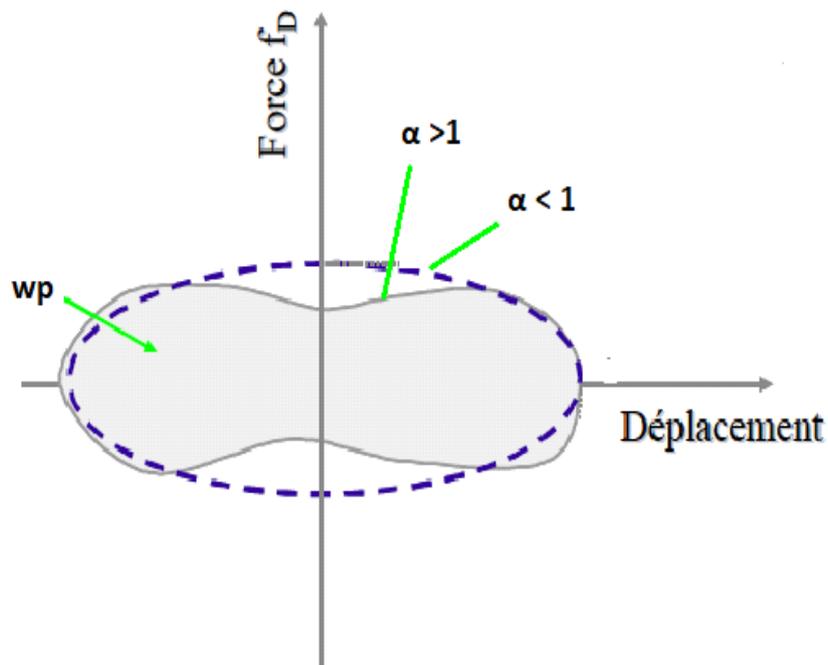


Figure 40 : Comportement visqueux exprimé en force-déplacement.

La valeur de  $F$  est donnée par :

$$F = C_p V^\alpha \quad (18)$$

L'énergie dissipée par l'amortisseur due à la force  $F_D$  est donnée par l'équation suivante :

$$W_D = \int F_D du \quad (19)$$

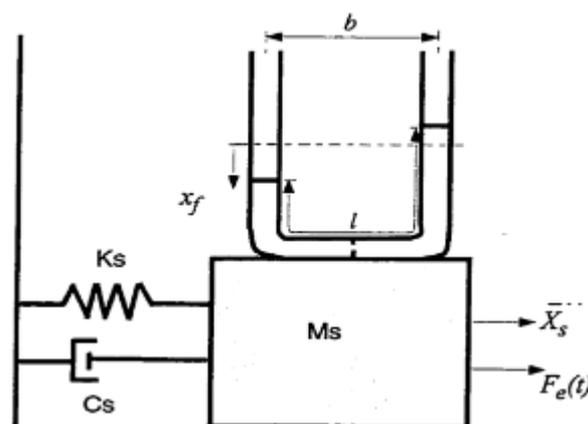
Où  $V$  est la vitesse du piston,  $C_p$  est le coefficient d'amortissement, et  $\alpha$  est une constante qui dépend de la viscosité du fluide et des propriétés du piston.

Une constante  $\alpha$  de valeur inférieure ou égale à **1** est propre au comportement d'un amortisseur visqueux.

On parle d'un amortisseur visqueux linéaire lorsque  $\alpha = 1$  et d'un amortisseur visqueux non-linéaire pour  $\alpha < 1$ . Une valeur de  $\alpha > 1$  est propre à un comportement de transmetteur de chocs sismiques.

Plus la valeur de  $\alpha$  est petite, plus la quantité d'énergie dissipée dans un cycle n'est grande.

Les amortisseurs visqueux non-linéaire sont une force qui devient Presque constante pour des vitesses élevées, ce qui donne lieu à un système ayant une limite élastique effective et fait en sorte que la force de cisaillement transmise aux piles et culées est limitée.



**Figure 41 : Modèle mathématique pour un système d'isolation en fluide visqueux.**

L'équation du mouvement du système VF est donnée comme suit :

$$m_s(\ddot{x}_s + \ddot{u}_g) + c_s \dot{x}_s + k_s x_s + F_e = 0 \quad (20)$$

$$m_s \ddot{x}_s + C_s \dot{x}_s + K_s x_s - F_e = -m_s \ddot{u}_g$$

Où  $c_s$  est le coefficient visqueux,  $k_s$ , le coefficient de raideur,  $x_s$  le déplacement initial du ressort, il a été incorporé dans le modèle pour présenter un accumulateur.

### II-2-1-1-5-Modèle d'hystérésis du amortisseur TMD :

Le dispositif est généralement placé au dernier étage.

Si la fréquence propre du système secondaire est proche de celle du système primaire, le mouvement de la masse TMD est en déphasage d'environ  $90^\circ$  du système primaire [62].

On a dm et les notations suivantes :

- Fréquence naturelle du système auxiliaire (TMD)

$$\omega_{std} = \sqrt{k_{tmd}/m_{tmd}} \quad (21)$$

- Fréquence naturelle du système primaire (structure)

$$\omega_s = \sqrt{k_s/m_s} \quad (22)$$

- Le rapport des masses

$$\mu = \frac{m_{tmd}}{m_s/m_s} \quad (23)$$

Où  $m_{tm}$  est la masse du TMD et  $m_s$  est la masse de la structure.

Est considérée dans notre cas :

$$f_{tmd} = \frac{f_s}{\mu + 1}; k_{smd} = f_{smd}^2 \cdot m_{smd} \text{ et } c_{tmd} = 2 \times \eta_{tmd} \times m_{tmd} \times f_{tmd} \quad (24)$$

Plus grand est le rapport massique, plus performant est le TMD. En revanche et pour des raisons économiques, la masse du TMD est prise entre 1% et 10% de la masse totale de la structure, et plus généralement le rapport massique est pris égal à 5% [63].

## Chapitre II : Modèle mathématique

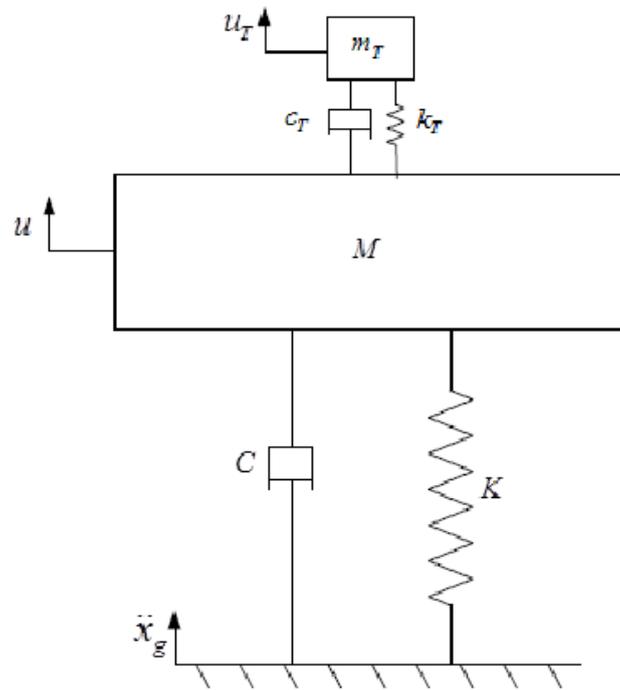
Plusieurs formules ont été proposées pour les paramètres optimaux du TMD passif en utilisant différents critères et approches. Un sommaire des paramètres optimaux du TMD est présenté sur le tableau :

Chercheur	Rapport fréquentiel	Amortissement	Remarque
Den Hartog	$\frac{1}{1+u}$	$\sqrt{\frac{3u}{8(u+1)^3}}$	La première équation des paramètres optimaux d'un TMD pour un système à 1 DDL non amorti.
Sadek et al	$\frac{1}{1+u}$	$\sqrt{\frac{u}{1+u}}$	Résultats basés sur excitation sismique d'un système à 30 DDL
Krenk et Hogsberg	$\frac{1}{(\mu+1)}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{(\mu+1)}}$	

**Tableau 1 : Formules d'optimisation des paramètres du TMD passif**

### II-2-1-1-5-1-Modèle mathématique d'une structure équipée d'un amortisseur à masse accordée :

Le système à 1 DDL (système principal) avec un TMD (système secondaire) est illustré. Le système principal a une masse  $m$  appuyée au sol par l'intermédiaire de ressort avec une raideur  $k$  et un amortisseur visqueux  $c$ . Le système secondaire peut également être considéré comme un oscillateur à 1 DDL qui se compose d'un corps de masse  $m_T$  attachée à la masse principale  $m$  par un ressort de raideur  $k_T$  et un amortissement visqueux  $C_T$ . La masse  $m_T$  du TMD est beaucoup plus petite que la masse  $m$  du système principal et elle joue un rôle prépondérant dans l'atténuation de la vibration de masse  $m_s$  quand toute la structure est soumise à l'excitation de base  $\ddot{x}_g(t)$ . La réponse du système global est décrite par les déplacements absolus  $x_s$  et  $x_T$  des masses  $m_s$  (structure primaire) et  $m_T$  (amortisseur TMD) correspondantes [62].



**Figure 42 : Modèle mathématique d'une structure équipée d'un amortisseur à masse accordée TMD**

### II-2 -2-Structure sans dispositif de contrôle:

La plupart des bâtiments à plusieurs étages peuvent être modélisés comme des systèmes à plusieurs ddl.

Dans ce cas, on suppose que: (i) la masse de la structure est concentrée aux niveaux des planchers, (ii) les poutres ont une rigidité infinie et (iii) la force axiale dans les poteaux n'engendre pas la déformation de la structure ((i) degrés de liberté) [36].

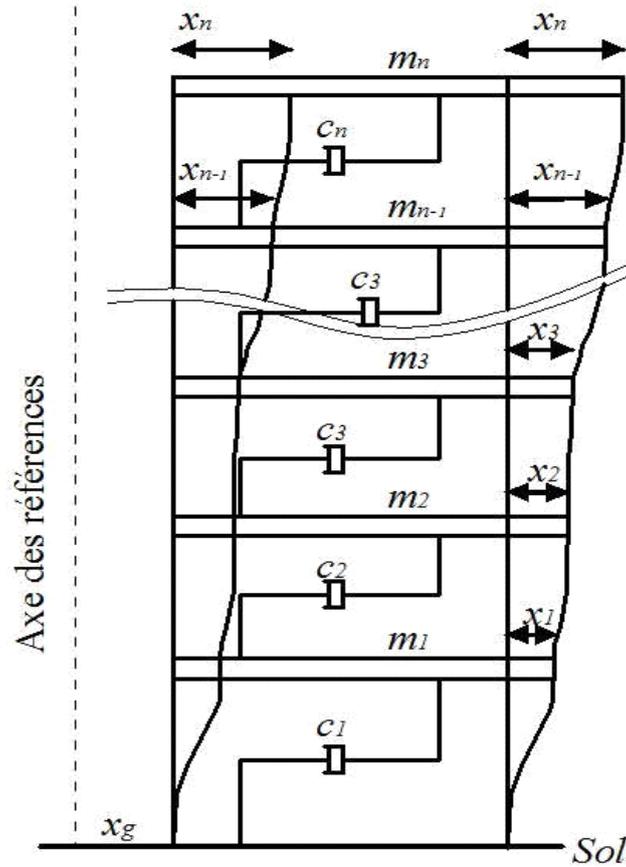


Figure 43 : Représentation dynamique d'une structure à plusieurs degrés de liberté

L'équation du mouvement de chaque masse peut être écrite comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2 (x_2 - x_1) = -m_1 \ddot{x}_g \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) - c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - k_3 (x_3 - x_2) = -m_2 \ddot{x}_g \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_3 (x_3 - x_2) - c_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3) - k_4 (x_4 - x_3) = -m_3 \ddot{x}_g \\ \vdots \\ m_{n-1} \ddot{x}_{n-1} + c_{n-1} (\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_{n-2}) + k_{n-1} (x_{n-1} - x_{n-2}) - c_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) - k_n (x_n - x_{n-1}) = -m_{n-1} \ddot{x}_g \\ m_n \ddot{x}_n + c_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + k_n (x_n - x_{n-1}) = -m_n \ddot{x}_g \end{array} \right. \quad (25)$$

**CHAPITRE III :**  
**Théorie de l'isolation**  
**parasismique**

### III-1-Introduction :

Dans la formulation mathématique liée à la modélisation des bâtiments équipés de dispositifs de contrôle, certaines hypothèses sont nécessaires:

- La structure est modélisée comme un système linéaire à plusieurs degrés de liberté, où la masse est concentrée au niveau de chaque étage, avec une rigidité effective donnée.
- La variation spatiale du mouvement du sol et tout effet dû à interaction sol-structure sont négligés.
- Les poteaux et les poutres sont inextensibles et en apesanteur, fournissant uniquement la rigidité latérale [64].

### III-2-Comportement dynamique de l'isolation parasismique (modèle linéaire et modèle non linéaire) :

Généralement, les systèmes d'isolation caractérisés par un comportement viscoélastiques linéaires ou non linéaires. Dans la pratique tous les systèmes d'isolation peuvent être modélés par les modèles non linéaires, sauf les systèmes basés élastomère sont généralement modélés par un modèles viscoélastique linéaires. Par conséquent la représentation du comportement se traduit par des boucles d'hystérésis en fonction des forces et les déplacements [65].

#### III-2-1-Modèle linéaire :

L'isolation parasismique peut être représentée par un modèle linéaire équivalent caractérisé par la rigidité élastique et l'amortissement visqueux effectif. La rigidité élastique linéaire équivalente pour chaque cycle du chargement est déterminée à partir de la courbe expérimentalement obtenue en fonction des forces et les déformations de l'isolateur parasismique, et elle est présentée comme suit [65] :

$$k_{eff} = \frac{(F^+ + F^-)}{(\Delta^+ - \Delta^-)} \quad (01)$$

Où  $F^+$  et  $F^-$  sont les forces positives et négatives ainsi  $\Delta^+$  et  $\Delta^-$  respectivement sont les déplacements,  $k_{eff}$  est la pente des valeurs de chargement et de déchargement de boucle d'hystérésis.

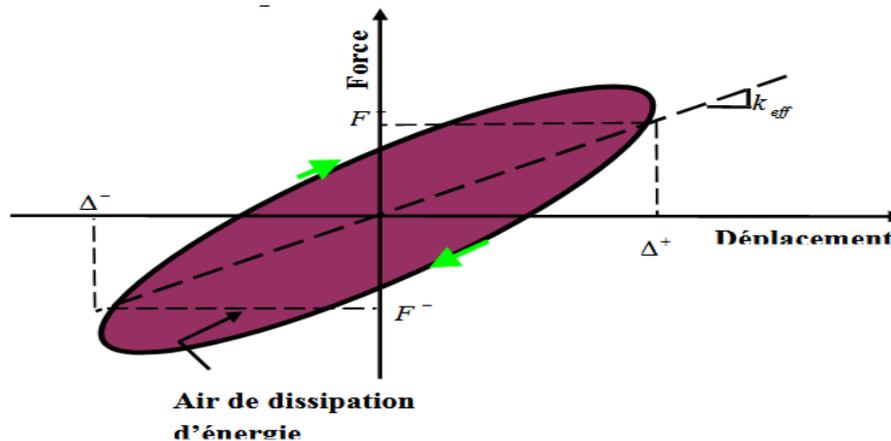


Figure 44 : Relation entre le déplacement et la force modèle linéaire équivalent.

La constante d'amortissement visqueuse effective de l'isolation déterminée pour chaque cycle du chargement, est exprimée comme suit :

$$\beta_{eff} = \frac{2E_{boucle}}{[\pi k_{eff} (|\Delta^+| - |\Delta^-|)^2]} \quad (02)$$

Où  $E_{boucle}$  est la dissipation d'énergie selon des cycles du chargement.

### III-2-2-Modèle non linéaire :

Le comportement dynamique pour un modèle non linéaire peut être regardé en deux cas suivants :

#### III-2-2-1-Modèle bilinéaire :

Le modèle bilinéaire peut être employé pour tous les systèmes d'isolation utilisés dans la pratique.

En fait, ce modèle bilinéaire représente approximativement la boucle par hystérétique non linéaire déterminé par les caractéristiques des systèmes d'appui en barreaux de plomb, d'appui en caoutchouc naturel – amortissement fort et des systèmes de pendule de glissement.

Le modèle d'isolation est donc basée sur les trois paramètres ; (1) la rigidité d'élastique  $K_u$ , (2) la rigidité latérale  $K_d$ , (3) la force d'écoulement caractérisée par  $Q_d$  qui a une relation avec la force du barreau de plomb et le coefficient de frottement du système d'isolation de glissement [65].

(Les équations ont été mentionnées dans le premier chapitre).

## CHAPITRE III : Théorie de l'isolation parasismique

---

### III-2-2-2-Modèle hystérétique :

Les systèmes d'isolation parasismique, tels que les appuis en caoutchouc avec barreau de plomb, les appuis en caoutchouc naturel-fort amortissement, et les appuis de glissement, sont caractérisés par le comportement non linéaire produit par la force et le déplacement [65].

L'équation non linéaire est donnée par :

$$F(t) = \alpha \frac{F_y}{D_y} u(t) + (1 - \alpha) F_y j(t) \quad (03)$$

Où :

Partie linéaire équivalente :  $\alpha \frac{F_y}{D_y} u(t)$

La partie non linéaire :  $(1 - \alpha) F_y z(t)$

$\alpha$ : Rapport de poste de rigidité limite.

$D_y$ : Déplacement limite de poste déformation d'isolation parasismique.

$F_y$ : Force limite de poste déformation d'isolation parasismique.

$Z^*$ : La composante hystérésis, définit comme suit :

$$D_y Z^* = \mu |u^*| z |z|^{\eta-1} - \beta u^* |z|^\eta + a u^* \quad (04)$$

Où :

$\beta, \mu$  et  $a$  : sont des constantes adimensionnelles, correspondent à la forme de la courbe d'hystérésis.

$\eta$  = nombre entier qui commande la légèreté du passage de l'élastique au plastique.

La combinaison des paramètres non linéaires de l'équation (03) donne une valeur maximale de la force de reconstitution ; elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{max} = \left[ \frac{A}{\mu + \beta} \right]^{\frac{1}{\eta}} \quad (05)$$

### III-3-Modèle isolé à base linéaire à un degré de liberté avec isolateurs linéaires :

Le mouvement d'une structure de bâtiment isolée sismiquement peut être exprimé par une équation de mouvement à un seul degré de liberté en supposant que la structure au-dessus de l'interface d'isolation est extrêmement rigide et que le mouvement du système structurel se produit principalement à sa base ou à système d'isolement[66].

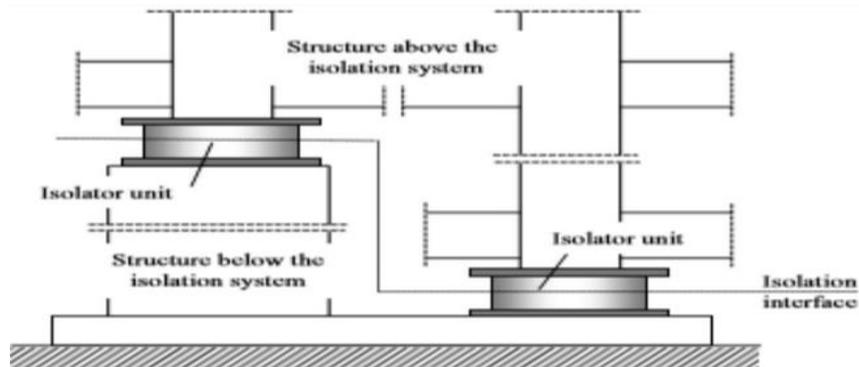


Figure 45: Terminologie de la structure isolée à la base.

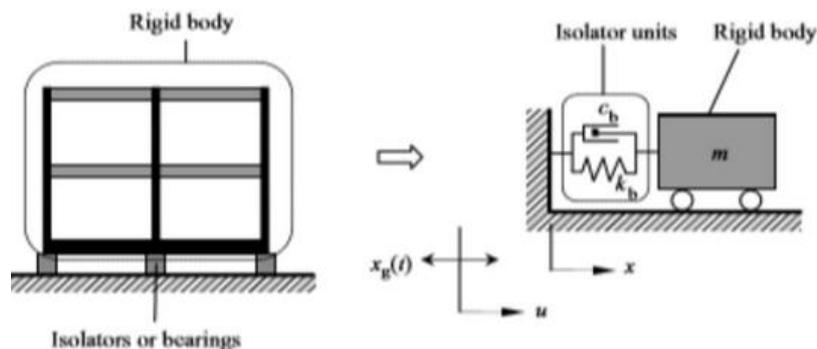


Figure 46 : Esquisse d'une structure isolée à un degré de liberté.

La structure au-dessus ou au-dessous du système d'isolation, sont illustrés graphiquement dans la (figure 42). L'esquisse d'une structure à un degré de liberté isolé à la base est montrée dans la (figure 43). Un corps rigide avec une masse  $m$  représente la structure du bâtiment au-dessus de l'interface d'isolation. Le système d'isolation possède une rigidité latérale  $k_b$ , et coefficient d'amortissement  $c_b$ . Le mouvement du système d'isolation et le mouvement du sol sont exprimés respectivement  $u(t)$  et  $x_g(t)$ . En utilisant des notations simplifiées de  $u$  et  $x_g$  pour représenter  $u(t)$  et  $x_g(t)$ , l'équation du mouvement est donnée comme suit [66] :

$$m\ddot{u} + c_b(\dot{u} - \dot{x}_g) + k_b(u - x_g) = 0 \quad (06)$$

III-4-Modèle isolé à deux degrés de liberté :

III-4-1-Modèle isolé à base linéaire à deux degrés de liberté avec isolateurs linéaires :

Le modèle structure la planaire bidimensionnel utilisé dans cette étude a été établi en étendant le système de base fixe SDOF en un système isolé de base 2DOF (Kelly, 1997). La rigidité et le taux d'amortissement équivalent du système SDOF ont été définis en fonction de la période de base fixe cible. L'hypothèse du rapport d'amortissement équivalent de la superstructure a été faite sur la base que la superstructure reste linéaire sous le mouvement du sol sismique lorsqu'elle est étendue à un système isolé de base [67].

Une masse de base supplémentaire et un système d'isolation ont été ajoutés au système de base fixe. Les diagrammes schématiques du système de base fixe SDOF et du système isolé de base 2DOF sont illustrés à la figure 44.

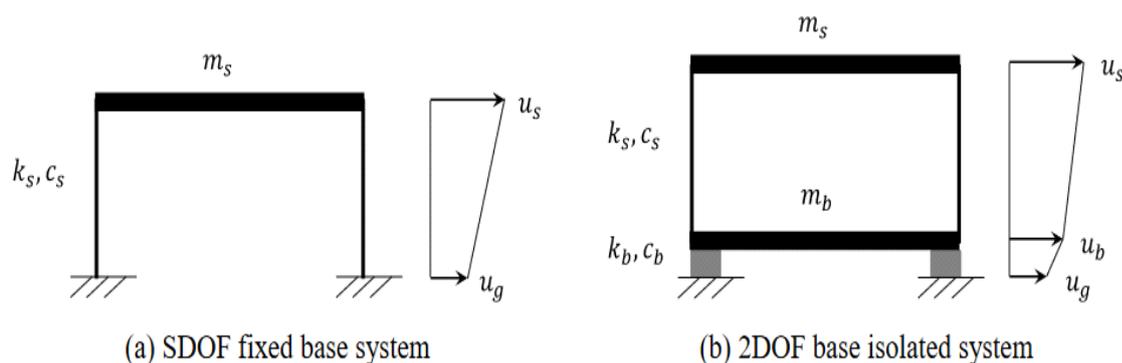


Figure 47 : SDOF fixe de base system and 2DOF base isolat de system.

Plusieurs hypothèses ont été faites lors de l'établissement des systèmes à base fixe et à base isolée.

Parmi eux, il n'y a pas de degré de liberté de rotation (DOF) pour les masses et les éléments de châssis (colonnes) sont supposés inextensibles. En conséquence, il n'y a qu'un seul DOF dans la direction horizontale pour chaque masse. Pour le cas du système SDOF, l'approche se réduit à l'amortissement visqueux linéaire pour un taux d'amortissement donné [67].

L'équation de mouvement pour le système SDOF illustré à la figure 45 (a) soumis à une excitation du sol  $\ddot{u}_g$ , où  $u_s$  est le déplacement absolu de la masse de la superstructure, tel que

$$u_s = v_s + u_g \text{ est :}$$

$$m_s \ddot{u}_g = -c_s \dot{v}_s - k_s v_s$$

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

La réécriture de la dernière équation en regroupant les termes avec des variables inconnues,  $\ddot{v}_s$ ,  $\dot{v}_s$  et  $v_s$ , sur le côté gauche et les termes avec un paramètre connu  $\ddot{u}_g$  sur le côté droit de l'équation donne l'équation 07.

$$m_s \ddot{v}_s + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m_s \ddot{u}_g \quad (07)$$

Où  $m_s$ ,  $c_s$  et  $k_s$  sont respectivement la masse, le coefficient d'amortissement et le coefficient de rigidité de la superstructure  $\ddot{v}_s$ ,  $\dot{v}_s$  et  $v_s$  sont respectivement l'accélération relative, la vitesse relative et le déplacement relatif de la masse par rapport à la base.

L'équation de mouvement pour le système 2DOF illustré à la figure 45 (b) soumis à une excitation du sol  $\ddot{u}_g$  est dérivée ci-dessous, en considérant deux coupes de section, c'est-à-dire respectivement dans le système d'isolation et la superstructure, comme illustré à la figure 45.

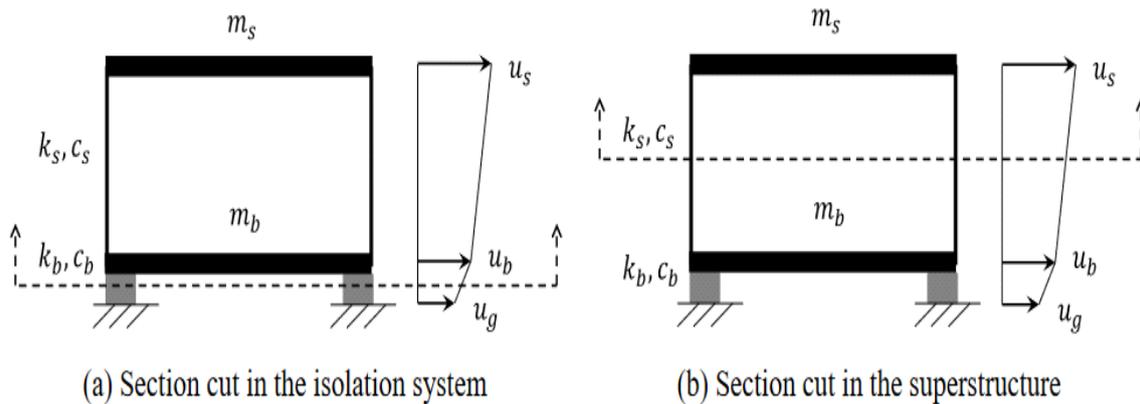


Figure 48 : Coupes en coupe dans le système d'isolation et la superstructure.

L'équation du mouvement des masses pour la déformation par rapport à la base du système basée sur la figure 45 (a) est :

$$m_s \ddot{u}_s + m_b \ddot{u}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = 0$$

Où  $u_b$  est le déplacement absolu de la masse de base,  $u_b = v_b + u_g$  et  $u_s$  est le déplacement absolu de la superstructure,  $u_s = v_s + u_b$ .

$$m_s(\ddot{v}_s + \ddot{u}_b) + m_b(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = 0$$

$$m_s \ddot{v}_s + m_s(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + m_b \ddot{v}_b + m_b \ddot{u}_g + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = 0$$

$$m_s \ddot{v}_s + m_s \ddot{v}_b + m_s \ddot{u}_g + m_b \ddot{v}_b + m_b \ddot{u}_g + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = 0$$

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

L'équation du mouvement des masses pour la déformation par rapport à la base du système en termes de déplacements relatifs est présentée dans l'équation 8 :

$$(m_s + m_b) \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m_s + m_b) \ddot{u}_g \quad (08)$$

L'équation de mouvement de la masse de la superstructure  $m_s$ , pour la déformation par rapport à la masse de base  $m_b$ , basée sur la figure 45 (b) est :

$$\begin{aligned} m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{v}_s + k_s v_s &= 0 \\ m_s (\ddot{v}_s + \ddot{u}_b) + c_s \dot{v}_s + k_s v_s &= 0 \\ m_s \ddot{v}_s + m_s (\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + c_s \dot{v}_s + k_s v_s &= 0 \end{aligned}$$

L'équation du mouvement de la masse pour la déformation par rapport à la masse de base est indiquée dans l'équation (09).

$$m_s \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m_s \ddot{u}_g \quad (09)$$

Réécrire l'équation (08) et l'équation (09) sous forme de matrice et définir la masse isolée  $m_t$ , comme  $m_t = m_s + m_b$ , donne l'équation (10).

$$\begin{aligned} m_t \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b &= -m_t \ddot{u}_g \\ m_s \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_s \dot{v}_s + k_s v_s &= -m_s \ddot{u}_g \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} m_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_b \\ v_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g$$

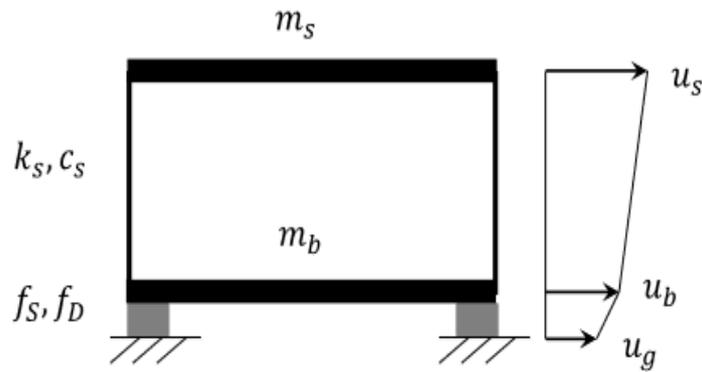
$$M\ddot{V} + C\dot{V} + KV = -Mr\ddot{u}_g \quad (10)$$

Où  $M$  est la matrice des masses,  $C$  est la matrice des coefficients d'amortissement,  $K$  est la matrice des coefficients de rigidité,  $\ddot{V}$ ,  $\dot{V}$  et  $V$  sont respectivement les vecteurs d'accélération relative, de vitesse relative et de déplacement relatif pour les masses,  $r$  est le vecteur d'influence de la force et  $\ddot{u}_g$  est l'accélération du sol mise à l'échelle.

#### III-4-2-Modèle isolé de base non linéaire à deux degrés de liberté :

Le modèle isolé de base linéaire 2DOF peut être étendu à un modèle d'isolateur de base non linéaire en définissant les composantes de la force du ressort et de la force de l'amortisseur à l'aide de la force du ressort,  $f_s(v_b, \dot{v}_b)$ , et de la force de l'amortisseur,  $f_D(v_b, \dot{v}_b)$ ,

respectivement, à la place du coefficient de rigidité de l'isolateur,  $k_b$  et du coefficient d'amortissement de l'isolateur,  $c_b$ . En conséquence, la définition du système isolé de base 2DOF illustré à la figure 45 (b) est modifiée à la figure 46 où  $f_s$  est la fonction de force du ressort et  $f_D$  est la fonction de force d'amortissement[67].



**Figure 49 : 2DOF non linéaire base isolat de mode.**

L'équation de mouvement du modèle isolé de base linéaire est étendue pour prendre en compte la non-linéarité des fonctions de force d'amortissement du système d'isolation.

$$\begin{bmatrix} m_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_b \\ v_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_s \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_D \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g$$

Où  $v_b$ ,  $v_s$  et  $m_t$  sont tels que défini précédemment.

L'équation matricielle du mouvement pour le système isolé de base non linéaire est illustrée dans l'équation 11 :

$$M\ddot{V} + C\dot{V} + KV + F_S + F_D = -Mr\ddot{u}_g \quad (11)$$

L'équation de mouvement sous la forme montrée dans l'équation 11 permet n'importe quelle forme arbitraire de fonctions de force d'amortissement.

#### III-5-Modèle isolé à N degrés de liberté:

La théorie linéaire approximative pour la structure isolée à deux degrés de liberté peut être étendue à des structures à N degrés de liberté.

Pour une structure classique (encastrée) à la base à NDDL soumise à l'accélération du sol  $\ddot{u}_g$ , l'équation du mouvement sous la forme matricielle est donnée comme suit :

$$[M_0]\ddot{u} + [C_0]\dot{u} + [K_0]u = -[M_0]r\ddot{u}_g \quad (12)$$

## CHAPITRE III : Théorie de l'isolation parasismique

---

Avec :

$u$ : Vecteur de déplacement par rapport au sol.

$r$ : Vecteur d'influence.

$[M_0]$ ,  $[C_0]$  et  $[K_0]$  : représentent respectivement la matrice de masse, la matrice d'amortissement et la matrice de rigidité d'ordre (N x N).

### III-5-1-Equation de mouvement:

Le modèle structural à N DDL est superposé à sa base par un système d'isolation avec une masse  $m_b$  (la masse du plancher au-dessus du système d'isolation), une rigidité  $k_b$  et un amortissement  $c_b$ .

L'équation de la base représentée par la masse  $m_b$ :

$$m_b \ddot{u}_b + m_1 \ddot{u}_1 + m_2 \ddot{u}_2 + \dots + m_N \ddot{u}_N + c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b (u_b - u_g) = 0 \quad (13)$$

Nous avons:

$$u_b = u_g + v_b, \quad u_1 = u_b + v_1, \quad u_2 = u_b + v_2, \quad u_N = u_b + v_N$$

L'équation (13) de la masse  $m_b$  devient:

$$(m_b + m_1 + \dots + m_N) \ddot{v}_b + (m_1 \ddot{v}_1 + \dots + m_N \ddot{v}_N) + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m_b + m_1 + \dots + m_N) \ddot{u}_g \quad (14)$$

Equation de la masse  $m_i$ :

$$\begin{aligned} m_i \ddot{u}_i + c_i (\dot{u}_i - \dot{u}_b) + k_i (u_i - u_b) &= 0 \\ m_i (\ddot{u}_g + \ddot{v}_b + \ddot{v}_i) + c_i \dot{v}_i + k_i v_i &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Donc: } m_i \ddot{v}_b + m_i \ddot{v}_i + c_i \dot{v}_i + k_i v_i = m_i \ddot{u}_g \quad (15)$$

$$\text{Avec: } c_i = \sum_{j=1}^N c_{ij} \quad \text{et} \quad k_i = \sum_{j=1}^N k_{ij}$$

### III-5-2-Les équations du mouvement du système combiné:

Les équations du mouvement du système combiné (système d'isolation avec la structure à N DDL) sous forme matricielle sont données par:

$$[M^*] \{\ddot{V}^*\} + [C^*] \{\dot{V}^*\} + [K^*] \{V^*\} = -[M_0] r^* \ddot{u}_g \quad (16)$$

Avec:

$$[M^*] = \begin{bmatrix} m_b + M & r^T [M_0] \\ [M_0]r & [M_0] \end{bmatrix}, [C^*] = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & [C_0] \end{bmatrix}, [K^*] = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & [K_0] \end{bmatrix}$$

$$M = m_1 + m_2 + \dots + m_N, \{V^*\} = \begin{Bmatrix} v_b \\ v_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ v_N \end{Bmatrix}, r^* = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{Bmatrix}, r = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{Bmatrix}.$$

On pose :  $\{V^*\} = \begin{Bmatrix} v_b \\ V \end{Bmatrix}$ , avec  $v^T = (v_1 \dots v_N)$ .

L'équation (08) peut s'écrire :

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_b + M & r^T [M_0] \\ [M_0]r & [M_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{V} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & [C_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{V} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & [K_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ V \end{Bmatrix} \\ & = - \begin{bmatrix} m_b + M & r^T [M_0] \\ [M_0]r & [M_0] \end{bmatrix} r^* \ddot{u}_g \end{aligned}$$

$$\begin{cases} (m_b + M)\ddot{v}_b + r^T [M_0]\ddot{V} + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m_b + M)\ddot{u}_g & (17) \\ [M_0]r\ddot{v}_b + [M_0]\ddot{V} + [C_0]\dot{V} + [K_0]V = -[M_0]r\ddot{u}_g & (18) \end{cases}$$

### Conclusion générale

Pendant longtemps, les experts ont eu du mal à prévenir efficacement les retombées du tremblement de terre d'un côté, ainsi qu'à gérer les fortes densités de population dans certaines zones de l'autre côté. Cela a mis en évidence la nécessité de construire des structures parasismiques. Pour répondre à ce besoin, des chercheurs du monde entier ont développé des technologies innovantes telles que des systèmes de contrôle passifs, actifs, semi-actifs et hybrides, qui visent à réduire les blessures humaines et à atténuer les dommages physiques.

L'objectif principal de ce travail était de mettre en évidence l'effet des systèmes d'isolation parasismique sur le comportement dynamique des structures. Pour atteindre cet objectif, une étude théorique a été réalisée sur les systèmes d'isolation parasismique afin de mieux comprendre leurs influences sur le comportement dynamique des structures.

Donc, les résultats de cette étude théorique nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les périodes d'oscillations sont augmentées et les pulsations réduites pour la structure isolée par rapport à la structure encastrée. Ceci montre que le système d'isolation a pour effet de rendre la structure isolée plus souple.
- Le système d'isolation décale la fréquence vers une zone à faible excitation sismique.
- Une structure isolée se déplace sur ses supports comme un corps rigide, ce qui réduit considérablement l'accélération maximale et le déplacement relatif à tous les niveaux par rapport à une structure à base fixe.
- Les déplacements maximaux de la structure isolée sont concentrés au niveau de la base dans le système d'isolation parasismique.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

- [1] Guizani, Lotfi. "Isolation sismique et technologies parasismiques pour les ponts au Québec: Mise au point." 14e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art. 2007.
- [2] DJELLOULI, Lynda. Modélisation de système d'isolation parasismique pour le contrôle de la réponse dynamique des structures. Diss. Université Mohamed Khider–Biskra, 2012.
- [3] Luca, Septimiu-George, Florentina Chira, and V. O. Rosca. "Passive, active and semi-active control systems in civil engineering." *Constructil Arhitectura* 3.4 (2005)
- [4] Soong, T. & Dargush, G. – "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons, 1997.
- [5] C Moutinho, Á Cunha, E Caetano - "Implementation of active and passive control systems in laboratorial and real structures." - S3T, 2010 - repositorio-aberto.up.pt
- [6] Dion, Cassandra. Etude numérique et expérimentation du comportement dynamique des ponts avec isolateurs et amortisseurs sismiques. Diss. École Polytechnique de Montréal, 2010.
- [7] Bondonet, Gaël. Élaboration d'un isolateur à la base original pour les ponts et viaducs au Canada. École polytechnique de Montréal, 1997.
- [8] Cheng, Franklin Y., Hongping Jiang, and Kangyu Lou. *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. CRC press, 2008.
- [9] Maret, Alexis. Étude du comportement thermodynamique d'appuis isolateurs sismiques sous chargements cycliques à basses températures. Diss. École de technologie supérieure, 2016.
- [10] Wang, Yen-Po. "Fundamentals of seismic base isolation." International training programs for seismic design of building structures hosted by National Center of Research on Earthquake Engineering, Taiwan (2002).
- [11] Naeim, Farzad, and James M. Kelly. *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons, 1999.
- [12] Al-Hussaini, Tahmeed M., Michalakis C. Constantinou, and Victor A. Zayas. *Seismic isolation of multi-story frame structures using spherical sliding isolation systems*. National Center for Earthquake Engineering Research, 1994.

## Bibliographie

---

- [13] Tsopelas, P., and Michalakis C. Constantinou. NCEER-Taisei corporation research program on sliding seismic isolation systems for bridges: experimental and analytical study of a system consisting of sliding bearings and fluid restoring force/damping devices. No. NCEER-94-0014. Buffalo, NY: National Center for Earthquake Engineering Research, 1994.
- [14] Symans, M. D., et al. "Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments." *Journal of structural engineering* 134.1 (2008): 3-21.
- [15] Vaiana, Nicolo, Ciro Napolitano, and Luciano Rosati. "Some recent advances on the modeling of the hysteretic behavior of rate-independent passive energy dissipation devices." *Proceedings of the Proceedia ECCOMAS of 8th ECCOMAS Conference on Computational Methods in Structural Dynamics, Athens, Greece. 2021.*
- [16] Vaiana, Nicolò, Mariacristina Spizzuoco, and Giorgio Serino. "Wire rope isolators for seismically base-isolated lightweight structures: experimental characterization and mathematical modeling." *Engineering Structures* 140 (2017): 498-514.
- [17] Sadek, Fahim, et al. *Passive energy dissipation devices for seismic applications.* US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 1996.
- [18] Soong, T. T., and B. F. Spencer Jr. "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice." *Engineering structures* 24.3 (2002): 243-259.
- [19] Filiatrault, André, and S. Cherry. "Performance evaluation of friction damped braced steel frames under simulated earthquake loads." *Earthquake spectra* 3.1 (1987): 57-78.
- [20] Scheaua, F. D. "Coupling methods and optimal use of modern anti-seismic insulation systems at building and bridge construction structures." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* Vol. 1182. No. 1. IOP Publishing, 2021.
- [21] Ataei, H., M. Mamaghani, and K. Kalbasi Anaraki. "Seismic response study of degraded viscous damping systems for tall buildings in China." *Structures Congress 2017.* 2017.
- [22] Bisht, Yuvraj, and Saraswati Setia. "Seismic behaviour of a soft storey building with & without viscous dampers." *International Journal of Engineering Research and Applications,* AET-29th March (2014).

## Bibliographie

---

- [23] Symans, M. D., and M. C. Constantinou. "Passive fluid viscous damping systems for seismic energy dissipation." *ISET Journal of Earthquake Technology* 35.4 (1998): 185-206.
- [24] Zuo, Lei. Conception d'éléments et de systèmes pour l'isolation active et passive des vibrations. Insulter. Institut de technologie du Massachusetts, 2004
- [25] Constantinou, M. C. Passive energy dissipation development in US. Springer Vienna, 1994.
- [26] Bellet, Romain. Vers une nouvelle technique de contrôle passif du bruit: absorbeur dynamique non linéaire et pompage énergétique. Diss. Université de Provence-Aix-Marseille I, 2010.
- [27] Tse, Francis Sing, Ivan E. Morse, and Rolland Theodore Hinkle. Mechanical vibrations. Boston: Allyn and Bacon, 1963.
- [28] Kamrani-Moghaddam, Babak, Mohammad Rahimian, and Amir K. Ghorbani- Tanha. "Performance of Tuned Mass Dampers for Response Reduction of Structures under near-Field and Far-Field Seismic Excitations." 4th International Conference on Earthquake Engineering. 2006.
- [29] Belaidi, Sabah, Damien Assane Nerambaye, and Nouredine Bourahla.  
"Performance sismique d'une tour utilisant ses étages supérieurs comme système à masse accordée (TMD)."
- [30] Chen, Jun-Ling, and Christos T. Georgakis. "Spherical tuned liquid damper for vibration control in wind turbines." *Journal of Vibration and Control* 21.10 (2015): 1875-1885.
- [31] Seghira, Kalfali Nadjette. "L'optimisation des paramètres et de l'emplacement d'un système de contrôle passif sur la hauteur du bâtiment."
- [32] Fujino, Yozo, et al. "Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures." *Journal of Engineering Mechanics* 118.10 (1992): 2017-2030.
- [33] Ju, Young-Kyu. "Structural behaviour of water sloshing damper with embossments subject to random excitation." *Canadian Journal of Civil Engineering* 31.1 (2004): 120-132.

## Bibliographie

---

- [34] Hitchcock, PA, et al. "Caractéristiques des absorbeurs de vibrations à colonne de liquide (LCVA) - I." *Ouvrages d'art* 19.2 (1997): 126-134
- [35] BEKADDOUR, Karima, and Maria BENYAMINA. Réponse dynamique des structures métalliques équipées d'un dispositif de dissipation d'énergie. Diss. FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL, 2021.
- [36] Djedoui, Nassim. Modélisation et analyse du contrôle hybride (actif-passif) des vibrations des bâtiments sous sollicitations sismiques en champ proche. Diss. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2018.
- [37] Fisco, N. R., and H. Adeli. "Smart structures: part I—active and semi-active control." *Scientia Iranica* 18.3 (2011): 275-284.
- [38] Datta, T. K. "A state-of-the-art review on active control of structures." *ISET Journal of earthquake technology* 40.1 (2003): 1-17.
- [39] Brodersen, Mark L., Ann-Sofie Bjørke, and Jan Høgsberg. "Active tuned mass damper for damping of offshore wind turbine vibrations." *Wind Energy* 20.5 (2017): 783-796.
- [40] Mondal, Jitaditya, et al. "Active tuned mass damper." 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). IEEE, 2015.
- [41] Lacaze, Florian. Conception et contrôle vibratoire d'un robot parallèle à câbles pour l'impression 3D. Diss. Université de Lyon, 2021.
- [42] Agrawal, Anil K., Young-Jin Cha, and Zhou Xu. "SEMI-ACTIVE CONTROL OF STRUCTURAL SYSTEMS."
- [43] Spencer Jr, B. F., and S. Nagarajaiah. "State of the art of structural control." *Journal of structural engineering* 129.7 (2003): 845-856.
- [44] Jugulkar, Lalitkumar Maikulal, Shankar Singh, and Suresh Maruti Sawant. "Analysis of suspension with variable stiffness and variable damping force for automotive applications." *Advances in Mechanical Engineering* 8.5 (2016): 1687814016648638.
- [45] Hemmati, Arash, and Erkan Oterkus. "Semi-active structural control of offshore wind turbines considering damage development." *Journal of Marine Science and Engineering* 6.3 (2018): 102.

## Bibliographie

---

- [46] Banerji, Pradipta, et al. "Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures." *Earthquake engineering & structural dynamics* 29.5 (2000): 587-602.
- [47] Dyke, S. J., et al. "Experimental verification of semi-active structural control strategies using acceleration feedback." *Proc. of the 3rd Intl. Conf. on Motion and Vibr. Control*. Vol. 3. 1996.
- [49] Edrees, Tarek. *Structural control and identification of civil engineering structures*. Diss. Luleå tekniska universitet, 2015.
- [50] Saaed, Tarek Edrees, et al. "A state-of-the-art review of structural control systems." *Journal of Vibration and Control* 21.5 (2015): 919-937.
- [51] Tanyi, Emmanuel, and Marcellin Nkenlifack. "Modélisation Unifiée Hybride et Simulation des Systèmes de Contrôle." *Revue des Sciences et Technologies de l'Automatique* 8: 31-43.
- [52] Yeong-Bin Yang, Kuo-Chun Chang and Jong-Dar Yau, *Base Isolation*. *Earthquake Engineering Handbook*, by Wai-Fan Chen, Charles Scawthorn. C, CRC Press LCC, 2003.
- [53] James M. Kelly, Mehmet Celebi *Verification Testing of prototype Bearing for a Base Isolated Building*. UCB/SESM N° 84/01, *Structural Engineering and Structural Mechanics*, Department of civil of engineering, University of California, Berkeley, 1984.
- [53] Maache, M. (2005). *Dépôt et Caractérisation de Couches Minces de ZnO par Spray Pyrolyse* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-BISKRA).
- [54] Désilets, L. H. *MYTHE OU RÉALITÉ? LA MESURE DES DIMENSIONS D'UNE PLAIE*.
- [55] AASHTO LRFD, *Bridge Design Specifications*. 8th ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA, 2017.
- [56] FEMA 356/ASCE, *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, American Society of Civil Engineers ASCE Federal Emergency Management Agency Washington, D.C., USA, 2000.

## Bibliographie

---

- [57] Khatteb, Ouanani, M., Performance des dispositifs d'isolation sismique dans les bâtiments. Mémoire de Master, Département de Génie Civil, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université de Djelfa, 2011
- [58] Asif, H., Min-Se, K., Thang, DD. and Jin- Hoon, J., Effect of Lead Rubber Bearing Characteristics on the Response of Seismic- isolated Bridges. KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.12, n°3, 2008.
- [59] Matsagar V.A. , Jangid R.S.(2003)," Seismic response of base-isolated structures during impact with adjacent structures", Engineering Structures,Vol.25, No.10, pp. 1311–1323.
- [60] Park K.S., Jung H. J., Lee I. W. (2002),"A comparative study on aseismic performances of base isolation systems for multi-span continuous bridge", Engineering Structures, Vol.24, pp. 1001–1013.
- [61] Dion, Cassandra. Etude numérique et expérimentation du comportement dynamique des ponts avec isolateurs et amortisseurs sismiques. Diss. École Polytechnique de Montréal, 2010.
- [62] Li, C., Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000. 29(9): p. 1405-1421
- [63] Belaidi, S., D.A. Nerambaye, and N. Bourahla, Performance sismique d'une tour utilisant ses étages supérieurs comme système à masse accordée (TMD)
- [64] Maache, M. (2005). Dépôtet Caractérisation de Couches Minces de Zone par Spray Pyrolyse (Doctoral dissertation, Universite Mohamed Khider-BISKRA).
- [65] Brahim, ATHAMNIA MODELISATION ET ANALYSE DES STRUCTURES AVEC SYSTEMES D'ISOLATION PARASISMIQUE.
- [66] MEHRAZ, KOUSSILA, and REDOUANE AKKOUCHE. La technique d'isolation sismique est son influence sur la réponse dynamique d'un bâtiment en béton armé. Université Akli Mouhend-Oulhadj de Bouira, 2018.
- [67] Lee, Jiang Jun. The Potential Application of Strain-Induced Stiffening in Base Isolation System. University of California, Berkeley, 2018