

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie civil et Hydraulique  
Référence : ...../2020

جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية و الري  
المرجع: ...../2020



Mémoire de Master

2<sup>émé</sup> année

Conception et Calcul des structures

**Etude de l'effet de l'emplacement d'un amortisseur à  
masse accordée sur le comportement dynamique des  
structures isolées à la base.**

Etudiant :

**ABU GHAREEBEH Ahmad**

Encadreur :

**Dr. ABDEDDAIM Mahdi**

**Année : 2019-2020**



## الاهداء

ما الزمانُ وما المكانُ وما القديمُ وما الجديدُ سنكون يوماً ما نريدُ لا الرحلةُ ابتدأت ولا الدربُ انتهى وما توفيقى إلا بالله و

إلى من ركع العطاء أمام قدميها  
وأعطتنا من دمها وروحها وعمرها حبا وتصميما ودفعنا لغدٍ أجمل  
إلى الغالية التي لا نرى الأمل إلا من عينيها (أمي الحبيبة).

إلى رجلي الأول ورجلي الأخير من عندك بدأت وإليك سأعود يوماً أهدي حلمنا الصغير الكبير إليك كنت رجل مجرد  
مروره يعني مصالحة قدر (أبي).

إلى أرواح الشهداء الطاهره الزكية... ومن نعتز باسمائهم تمجيذا وتخليدا..... إلى عائلاتهم واهاليهم...

إلى الجرحى الابطال... فحلق صبرهم يعانق فجر الضياء  
إلى الاسرى المغاوير... من لا تلين لهم قناه... عزا وحرية رغم القيد والسجان  
إلى الذين هدمت بيوتهم... فتلحفوا عنان السماء شموخا... حتى تشرق شمس الاحرار  
إلى ابطالنا المطاردين .... من سكنوا الجبال... وصبروا على الليالي ويردها  
إلى الذين سبقوا... والذين لحقوا... وما هانوا وما استكانوا

إلى وطن الشهداء... ونبع العطاء  
إلى ربوع فلسطين الحبيبه... واقصانا الأسير  
إلى بلادنا العربية...بلاد الحضارة والتاريخ

إلى سندي وقوتي وملاذي بعد الله  
إلى من آثروني على أنفسهم  
إلى من علموني علم الحياة  
إلى من أظهروا لي ما هو أجمل من الحياة (إخوتي).

إلى من لا تحلو الحياة بدونه وأخذ القلب مسكنا (عبدالرحمن).

إلى من كانوا ملاذي وملجئي  
إلى من تذوقت معهم أجمل اللحظات  
إلى من سأفتقدهم ..... وأتمنى أن يفتقدوني  
إلى من جعلهم الله أخوتي ..... و من أحببتهم بالله (طلاب قسم الهندسة المدنية).

الآن تفتح الأشرعة وترفع المرساة لتنتقل السفينة في عرض بحر واسع مظلم هو بحر الحياة وفي هذه الظلمة لا يضيء إلا  
قنديل الذكريات ذكريات الأخوة البعيدة إلى الذين أحببتهم وأحبوني (أصدقائي).

## الشكر

لا بد لنا ونحن نخطو خطواتنا الأخيرة في الحياة الجامعية من وقفة نعود إلى أعوام قضيناها في رحاب الجامعة مع أساتذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين بذلك جهودا كبيرة في بناء جيل الغد لتبعث الأمة من جديد....

وقيل أن نمضي أقدم أسمى آيات الشكر والامتنان والتقدير والمحبة إلى الذين حملوا أقدس رسالة في الحياة....

إلى الذين مهدوا لنا طريق العلم والمعرفة

إلى جميع أساتذتنا الأفاضل.

وأخص بالتقدير والشكر الدكتور: عبدالدايم مهدي لاشرافه على هذا العمل

الذي نقول له بشارك قول رسول الله صلى الله عليه وسلم:

"إن الحوت في البحر ، والطير في السماء ، ليصلون على معلم الناس الخير"

كما أنني أتوجه بخالص الشكر إلى من علمنا التفاؤل والمضي إلى الأمام إلى من وقف جانبنا عندما ضللتنا الطريق

الأستاذ : أونيس عبدالحفيظ.

الدكتور : جدوي نسيم.

جزيل الشكر للجنة الموقرة لقبول مناقشة المذكرة.

الذين كانوا عوننا لنا في بحثنا هذا ونورا يضيء الظلمة التي كانت تقف أحيانا في طريقنا.

إلى من زرعو التفاؤل في دربنا وقدموا لنا المساعدات والتسهيلات والأفكار والمعلومات، ربما دون أن يشعروا بدورهم

بذلك فلهم منا كل الشكر،

## Résumé

L'approche moderne de la conception parasismique est basée sur l'idée d'introduire des systèmes de contrôle des vibrations afin de limiter les effets destructeurs des séismes. Divers moyens de contrôle des vibrations ont été considérés durant les dernières décennies. L'isolation à la base est l'un des systèmes de protection sismique les plus répandus au monde néanmoins cette technique présente quelques limites ; pour pallier cela, un système hybride est proposé dans cette étude. Il consiste en une structure isolée à la base équipée d'un amortisseur à masse accordée pour divers emplacements. Les résultats obtenus montrent une bonne performance du système hybride par rapport au système isolé à la base en termes de déplacement au sommet et déplacement inter-étage.

**Mots clés :** Isolation à la base, système hybride, amortisseur à masse accordée (TMD), action sismique, déplacement au sommet, déplacement inter-étage.

## Abstract

The modern approach for seismic design is based on the introduction of vibration control systems this aims to limit the destructive effects of earthquakes. Many vibration control devices were considered during the last decades. Base isolation is one of the most used seismic protection systems around the world. However, this technique has some disadvantages, to overcome those lacunas a hybrid system is presented in this study, it consists of an isolated structures equipped with tuned mass damper at different locations. The results obtained shows a good performance of the hybrid system compared to the base isolated one in terms of top floor displacement and inter-story displacement.

**Key words:** Base isolation, hybrid system, tuned mass damper (TMD), seismic actions, top floor displacement, inter-story displacement.

## المخلص

المقاربة العصرية للتصميم الزلزالي تستند أساساً على إدخال أنظمة مراقبة للاهتزازات بغية الحد من تأثير الزلازل المدمر. مختلف وسائل لمراقبة الاهتزازات تم اعتمادها في العقود الأخيرة. العزل القاعدي يعتبر من أنظمة الحماية الزلزالية الأكثر انتشاراً في العالم. لكن هذه التقنية أظهرت بعض السلبيات. ومن أجل التغلب على هذه السلبيات نستعمل نظام هجين. في هذه الدراسة تم اعتماد بناية معزولة من الأسفل و مزودة بمخمد بالكتلة المضبوطة في مواقع مختلفة لتشكيل نظام هجين. النتائج المحصل عليها تبين الفعالية و الاداء الجيد للنظام الهجين مقارنة بنظام العزل القاعدي من خلال الانتقال في قمة المبنى و انتقال بين الطوابق.

**كلمات مفتاحية :** العزل القاعدي ، نظام هجين ، مخمد بكتلة مضبوطة ، تأثيرات زلزالية ، انتقال في القمة ، انتقال بين الطوابق.

## Sommaire

|  |      |
|--|------|
| Sommaire.....  | VI   |
| Liste des figures.....   | VIII |
| Liste des tableaux.....  | X    |
| Liste des symbols.....   | XI   |
| Introduction générale.....   | 01   |
| <b>Chapitre 01 : les différents systèmes de contrôle des vibrations sismique</b>                           |      |
| I.1. Introduction .....  | 03   |
| I.2. Système de contrôle passif .....  | 04   |
| I.3. Système de contrôle Actif .....   | 05   |
| I.4. Système de contrôle semi-actif .....  | 07   |
| I.4.1. Les types de contrôle semi-actif .....  | 09   |
| I.5. Amortisseur à masse accordée TMD .....  | 09   |
| I.5.1. Le concept de l'amortisseur à masse accordée (TMD).....   | 10   |
| I.5.2. Implémentation du TMD dans des structures réelles.....  | 12   |
| I.6. L'isolation à la base .....   | 13   |
| I.6.1. Principe de l'isolation sismique.....   | 15   |
| I.6.2. Composantes des systèmes d'isolation sismique à la base .....                                       | 16   |
| I.6.3. Les différents types d'appuis parasismiques.....  | 17   |
| I.6.3.1. Les appuis à déformation .....  | 17   |
| I.6.3.2. Les appuis à glissement .....   | 18   |
| I.6.3.2.1. Appuis à friction .....   | 19   |
| I.6.3.2.2. Appuis à pendule glissant .....   | 19   |
| I.6.3.3. Appuis à déformation et glissement .....  | 20   |
| I.6.3.3.1. Le système d'appui TASS .....   | 21   |
| I.6.3.3.2. Appui proposé par N. Mostaghel .....  | 22   |
| I.6.4. Les appuis à roulement .....  | 22   |
| I.6.5. Les différents types d'amortisseurs parasismiques .....   | 23   |
| I.6.5.1. Amortisseurs hystérétiques .....  | 24   |
| I.6.5.2. Amortisseurs visqueux .....   | 25   |
| I.6.5.3. Amortisseurs à frottement .....   | 26   |
| I.7. Les systèmes de contrôle hybride .....  | 27   |
| I.8. Conclusion .....  | 29   |
| <b>Chapitre 02 : Formulation mathématique d'un système de contrôle hybride</b>                             |      |
| II.1. Introduction .....   | 30   |
| II.2. Comportement linéaire d'une structure isolée à la base.....  | 30   |
| II.3. Modélisation mathématique d'un appui parasismique.....   | 31   |
| II.3.1. Système d'isolation LRB .....  | 31   |
| II.3.2. Modèle mathématique du système LRB.....  | 32   |
| II.4. Formulation des équations de mouvement des structures isolées à la base par<br>analyse linéaire..... | 32   |
| II.4.1. Analyse d'une structure à deux degrés de liberté .....   | 33   |
| II.4.2. Equations de Mouvement.....  | 33   |
| II.4.3. Formulation matricielle.....   | 34   |

|  |  |    |
|--|--|----|
| II.5.  | Conception d'un amortisseur à masse accordée linéaire appliqué à une structure à 1ddl..... | 34 |
| II.5.1.  | Bâtiments équipés d'un amortisseur à masse accordée (TMD) .....                            | 36 |
| II.5.2.  | Modèle mathématique d'une structure équipée d'un amortisseur à masse accordée .....        | 39 |
| II.6.  | Conclusion.....  | 42 |
| <b>Chapitre 03 : Formulation mathématique et numérique par représentation d'état</b> |  |    |
| III.1.   | Introduction .....   | 43 |
| III.2.   | Hypothèses.....  | 43 |
| III.3.   | Formulation d'un système hybride combinant une structure isolée avec TMD.....              | 44 |
| III.4.   | Généralisation de l'équation pour un système à plusieurs degrés de liberté .....           | 45 |
| III.5.   | Equation de mouvement d'un bâtiment sous chargement extérieur.....                         | 48 |
| III.5.1.   | Solution en représentation d'état (state-space) .....                                      | 48 |
| III.5.1.1.   | La forme générale.....   | 49 |
|  | Exemple d'un système à deux degrés de libertés sous excitation sismique                    |    |
| III.5.2.   | F(t) .....   | 50 |
| III.5.2.1.   | Taille des matrices .....  | 52 |
| III.5.3.   | Exemple d'un système à plusieurs degrés de libertés (n) .....                              | 54 |
| III.6.   | Exemple d'un système pour 5 DDL .....  | 55 |
| III.6.1.   | Diagramme de corps libre pour les différentes masses .....                                 | 55 |
| III.6.2.   | Equations de mouvement .....   | 57 |
| III.6.3.   | Equations gouvernant le mouvement .....  | 58 |
| III.6.3.1.   | Représentation d'état (state-space) .....  | 59 |
| III.7.   | Résolution numérique en utilisant MATLAB .....   | 61 |
| III.8.   | Conclusion .....   | 64 |
| <b>Chapitre 04 :Résultats et discussion</b>  |  |    |
| IV.1.  | Introduction .....   | 65 |
| IV.2.  | Description de la structure .....  | 65 |
| IV.3.  | Réglage de TMD .....   | 65 |
| IV.4.  | Description des excitations sismiques .....  | 68 |
| IV.5.  | Déplacement maximum en Tête du bâtiment sans et avec TMD.....                              | 70 |
| IV.6.  | Déplacement inter-étages du bâtiment sans et avec TMD .....                                | 74 |
| IV.7.  | Déplacement maximum pour chaque étage du bâtiment sans et avec TMD .....                   | 76 |
| IV.8.  | Conclusion .....   | 77 |
|  | Conclusion générale.....   | 78 |
|  | Références bibliographiques.....   | 80 |

## Liste des figures

### Chapitre 01 : les différents systèmes de contrôle des vibrations

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Figure 1.1 :  | Systèmes de protection sismique.....                                | 03 |
| Figure 1.2 :  | Exemple de quelques dispositifs de contrôle passif.....             | 04 |
| Figure 1.3 :  | Diagramme de système de contrôle Passif.....                        | 05 |
| Figure 1.4 :  | Diagramme de système de contrôle actif.....                         | 06 |
| Figure 1.5 :  | Exemple de quelques dispositifs de contrôle actifs.....             | 07 |
| Figure 1.6 :  | Diagramme de contrôle semi-actif.....                               | 08 |
| Figure 1.7 :  | Exemple de quelques dispositifs de contrôle semi- actifs.....       | 09 |
| Figure 1.8 :  | Amortisseur de masse accordée installé sur la structure.....        | 10 |
| Figure 1.9 :  | Les types de TMD .....  | 11 |
|               | TMD pendulaire de 800 t dans un bâtiment de 508 m de hauteur        | 12 |
| Figure 1.10 : | (Taipei 101) .....  | 12 |
| Figure 1.11 : | Amortisseur à masse accordée (Bachmman, 2004) .....                 | 12 |
| Figure 1.12 : | Bâtiment d'un tribunal traité avec des isolateurs à la base.....    | 13 |
| Figure 1.13 : | Comportements des structures lors d'un séisme.....                  | 15 |
| Figure 1.14 : | Isolation parasismique-Schéma .....                                 | 15 |
| Figure 1.15 : | Localisation des isolateurs parasismiques pour les bâtiements ..... | 16 |
| Figure 1.16 : | es appuis à déformation .....                                       | 18 |
| Figure 1.17 : | Appuis groupés .....  | 18 |
| Figure 1.18 : | Appuis à glissement .....   | 19 |
| Figure 1.19 : | Appui à friction.....   | 19 |
| Figure 1.20 : | Appuis à pendule glissant .....                                     | 20 |
| Figure 1.21 : | Appuis à déformation et glissement.....                             | 21 |
| Figure 1.22 : | Le système d'appui TASS.....  | 22 |
| Figure 1.23 : | Appui proposé par N. Mostaghel.....                                 | 22 |
| Figure 1.24 : | Appui à billes.....   | 23 |
| Figure 1.25 : | Le principe de base d'un appui à billes (à roulement).....          | 23 |
| Figure 1.26 : | Amortisseur en barreau d'acier doux.....                            | 24 |
| Figure 1.27 : | Amortisseur en barreau de plomb.....                                | 24 |
| Figure 1.28 : | Amortisseurs en barres courbes en acier doux.....                   | 25 |
| Figure 1.29 : | Principe d'un amortisseur en barre de torsion.....                  | 25 |
| Figure 1.30 : | Montage d'amortisseurs visqueux en superstructures.....             | 25 |
| Figure 1.31 : | Les différents types d'amortisseurs visqueux .....                  | 26 |
| Figure 1.32 : | Les types d'amortisseur à frottement.....                           | 27 |

### Chapitre 02 : Formulation mathématique d'un système de contrôle hybride

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Figure 2.1 : | Schéma d'un système à 2 DDL avec isolation sismique à la base...   | 31 |
| Figure 2.2 : | Détails de l'appui en caoutchouc fretté avec barreau de plomb..... | 31 |
| Figure 2.3 : | Modèle mathématique pour un système d'isolation de type LRB....    | 32 |
| Figure 2.4 : | Paramètres d'une structure isolée à deux degrés de libertés .....  | 33 |
| Figure 2.5 : | Système à 2 degrés de liberté sous action sismique .....           | 39 |
| Figure 2.6 : | Diagramme de corps libre de la masse $m_s$ (structure) .....       | 40 |
| Figure 2.7 : | Diagramme de corps libre de la masse $m_{tmd}$ (TMD) .....         | 41 |

### Chapitre 03 : Formulation mathématique et numérique par représentation d'état

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Figure 3.1 : | Structure avec contrôle hybride (isolation + TMD) .....             | 44 |
| Figure 3.2 : | Structure Hybride à plusieurs degrés de liberté (NDDL) .....        | 45 |
|              | La forme générale de la représentation d'état « state space », SISO |    |
| Figure 3.3 : | ( <i>single input, single output</i> ).....                         | 50 |
| Figure 3.4 : | Système à 2 DDL .....   | 50 |
| Figure 3.5 : | Système dynamique pour plusieurs degrés de liberté.....             | 54 |
| Figure 3.6 : | Bâtiment et Modèle rhéologique pour une structure à 5 DDL.....      | 55 |
| Figure 3.7 : | Diagramme de résolution sur SIMULINK/MATLAB .....                   | 62 |
| Figure 3.8 : | Organigramme du code de calcul utilisé .....                        | 63 |

### Chapitre 04 : Résultats et discussion

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Figure 4.1 :  | Structure sans dispositif de contrôle.....  | 66 |
| Figure 4.2 :  | Structure avec dispositif de contrôle.....  | 66 |
| Figure 4.3 :  | Excitations sismiques de champ proche.....  | 69 |
| Figure 4.4 :  | Excitations sismiques de champ lointain.....  | 70 |
| Figure 4.5 :  | Déplacement en tête du bâtiment sous excitations sismiques de<br>champ proche.....          | 72 |
| Figure 4.6 :  | Déplacement en tête du bâtiment sous excitations sismiques de<br>champ lointain.....        | 73 |
| Figure 4.7 :  | Déplacement inter-étage du bâtiment sous excitations sismiques de<br>champ proche.....      | 74 |
| Figure 4.8 :  | Déplacement inter-étage du bâtiment sous excitations sismiques de<br>champ lointain.....    | 75 |
| Figure 4.9 :  | Déplacement maximum pour chaque étage sous excitations<br>sismiques de champ proche.....    | 76 |
| Figure 4.10 : | Déplacement Maximale pour chaque étage dans Excitations<br>sismiques de champ lointain..... | 77 |

## Liste de tableaux

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tab 2.1 : | Sommaire des paramètres optimaux du TMD .....   | 37 |
| Tab 4.1 : | Paramètres de la structure .....  | 65 |
| Tab 4.2 : | Paramètres de l'isolateur .....   | 65 |
| Tab 4.3 : | Fréquences naturelles de la structure isolée .....  | 67 |
| Tab 4.4 : | Paramètres des diverses variantes du TMD utilisé .....                                    | 68 |
| Tab 4.5 : | Description des excitations sismiques .....   | 69 |
| Tab 4.6 : | Déplacement maximum en tête du bâtiment pour différents<br>emplacements(m) .....          | 71 |
| Tab 4.7 : | Accélération maximum en tête du bâtiment pour différents<br>emplacements.....             | 75 |
| Tab 4.8 : | Effort tranchant maximum à la base du bâtiment pour différents<br>emplacements [kN] ..... | 76 |

## Liste des symboles

|                     |  |
|---------------------|--|
| $p_0 \sin \omega t$ | Force d'excitation externe   |
| [M]                 | Matrice de masse   |
| [K]                 | Matrice de rigidité  |
| [C]                 | Matrice d'amortissement  |
| $m_s$               | La masse de la superstructure du bâtiment                                      |
| $m_b$               | La masse de la base  |
| $m_T$               | La masse du TMD  |
| $k_s$               | La raideur de la structure   |
| $c_s$               | L'amortissement de la structure  |
| $k_b, c_b$          | La rigidité et l'amortissement de l'isolateur                                  |
| $k_T$               | La rigidité du TMD   |
| $c_T$               | L'amortissement du TMD   |
| $u_s$               | Le déplacements absolus du structure   |
| $u_b$               | Le déplacement absolu de la base   |
| $v_s$ et $v_b$      | Les déplacements relatifs (structure-base)                                     |
| $u_g$               | Le déplacement du sol  |
| $\dot{u}_s$         | La vitesse absolue de la structure   |
| $\dot{u}_b$         | La vitesse absolue de la base  |
| $\ddot{u}_s$        | L'accélération absolue de la structure   |
| $\dot{v}_s$         | La vitesse relative de la structure  |
| $\ddot{v}_s$        | L'accélération relative de la structure  |
| $\ddot{u}_g$        | L'accélération du sol  |
| $\ddot{u}_b$        | L'accélération absolue de la base  |
| $x_T$               | Le déplacement du TMD  |
| $\dot{x}_T$         | La vitesse du TMD  |
| $\ddot{x}_T$        | L'accélération du TMD  |
| $\{\Gamma\}$        | Vecteur de distribution des efforts sismiques                                  |
| $F_b$               | La force sismique à la base  |
| [A]                 | La matrice d'état ( <i>state matrix</i> )                                      |
| [B]                 | La matrice d'entrée, ( <i>input matrix</i> )                                   |
| [C]                 | La matrice de sortie ( <i>output matrix</i> )                                  |
| [D]                 | La matrice de transmission directe entre les entrées et les sorties du système |
| $\{U\}$             | Vecteur d'entrée ( <i>input</i> )  |
| $f_s$               | La première fréquence de la structure  |
| $\mu$               | Le rapport de masse  |

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Les séismes ont longtemps été considérés comme une force destructive qui a causé tant de pertes humaines et matérielles. Le développement technologique qu'a connu le monde à l'aube du 20<sup>ème</sup> siècle a permis de développer une multitude de systèmes visant à protéger les structures civiles et industrielles des effets destructeurs des séismes.

L'isolation à la base des structures est mondialement reconnue comme étant la solution la plus répandue pour protéger les structures des effets dévastateurs des séismes. Néanmoins, ce système de protection classique a montré certaines limites qui ont fait l'objet de plusieurs recherches auparavant. Ainsi, et afin de protéger les structures isolées à la base des actions sismiques, plusieurs solutions ont vu le jour. L'une des solutions les plus utilisées est celle qui consiste à utiliser un amortisseur à masse accordée (T.M.D) comme dispositif de recentrage pour limiter les grands déplacements induits par l'isolation à la base, formant ainsi un système hybride passif-passif. Dans cette stratégie de contrôle, l'emplacement de ce type de dispositif joue un grand rôle dans son efficacité de réduction de la réponse sismique. Il est donc important d'étudier l'effet de l'emplacement d'un amortisseur à masse accordée sur le comportement des structures isolées à la base.

Dans notre étude l'efficacité d'un contrôle hybride formé d'un système d'isolation à la base et d'un amortisseur à masse accordée est étudiée pour une structure de 20 étages soumise à diverses excitations sismiques. L'objectif principal de cette étude est d'observer l'effet de l'emplacement d'un amortisseur à masse accordée sur la réponse séismique d'une structure isolée, ainsi pour chaque emplacement du T.M.D les paramètres de la réponse dynamique de la structure seront évalués et comparés. L'étude nous permettra d'en ressortir avec une idée claire et précise sur le rôle de l'emplacement sur l'amélioration des performances du système d'isolation à la base.

Afin de mettre en évidence les résultats obtenus ce mémoire sera organisé en quatre chapitres agencés comme suit :

**Le premier chapitre** est une revue de la littérature des systèmes d'isolation à la base et des amortisseurs à masse accordée ainsi qu'une recherche bibliographique sur les systèmes hybrides introduits durant la dernière décade.

**Le deuxième chapitre** concerne la mise en équations du système de façon détaillée. Une présentation explicite sera donnée en premier lieu sous forme d'équations différentielles résultant des diagrammes de corps libre puis sous forme matricielle obtenue par le couplage des diverses équations et cela pour 3 configurations différentes : une structure isolée à la base, une structure avec TMD et enfin une structure avec système hybride « base isolée + amortisseur à masse accordée TMD ».

**Dans le troisième chapitre**, l'écriture matricielle des équations de mouvement des stratégies de contrôle proposée mises en place précédemment, sera résolue en utilisant la représentation d'état (*state-space*). Un exemple d'un système à deux degrés de libertés est résolu en utilisant la représentation d'état. La résolution numérique sur MATLAB/SIMULINK est aussi présentée dans ce chapitre ainsi qu'un organigramme représentant les étapes de résolution.

**Le quatrième chapitre** sera dédié à l'application numérique ; Ainsi, après la mise en place de l'algorithme, et pour la validité de la stratégie adoptée, plusieurs excitations sismiques seront appliquées à la structure tout en variant l'emplacement du TMD ainsi que ses paramètres de réglage. Enfin, les résultats obtenus en termes de déplacement au sommet, d'effort tranchant et de déplacement inter-étage seront discutés et analysés.

# CHAPITRE I

## CHAPITRE I

### LES SYSTEMES DE CONTROLE DES VIBRATIONS SISMIQUES

#### I.1. Introduction

Le contrôle des vibrations sismiques est l'un des plus grands challenges du génie civil. Au cours des dernières décennies, les scientifiques et les chercheurs ont fait de grands efforts pour réduire les effets dévastateurs et catastrophiques des séismes sur les structures et les ouvrages. Dans ce chapitre un état de l'art des divers systèmes de contrôle utilisés à travers le monde sera présenté avec une concertation sur les systèmes hybrides (passif-passif).

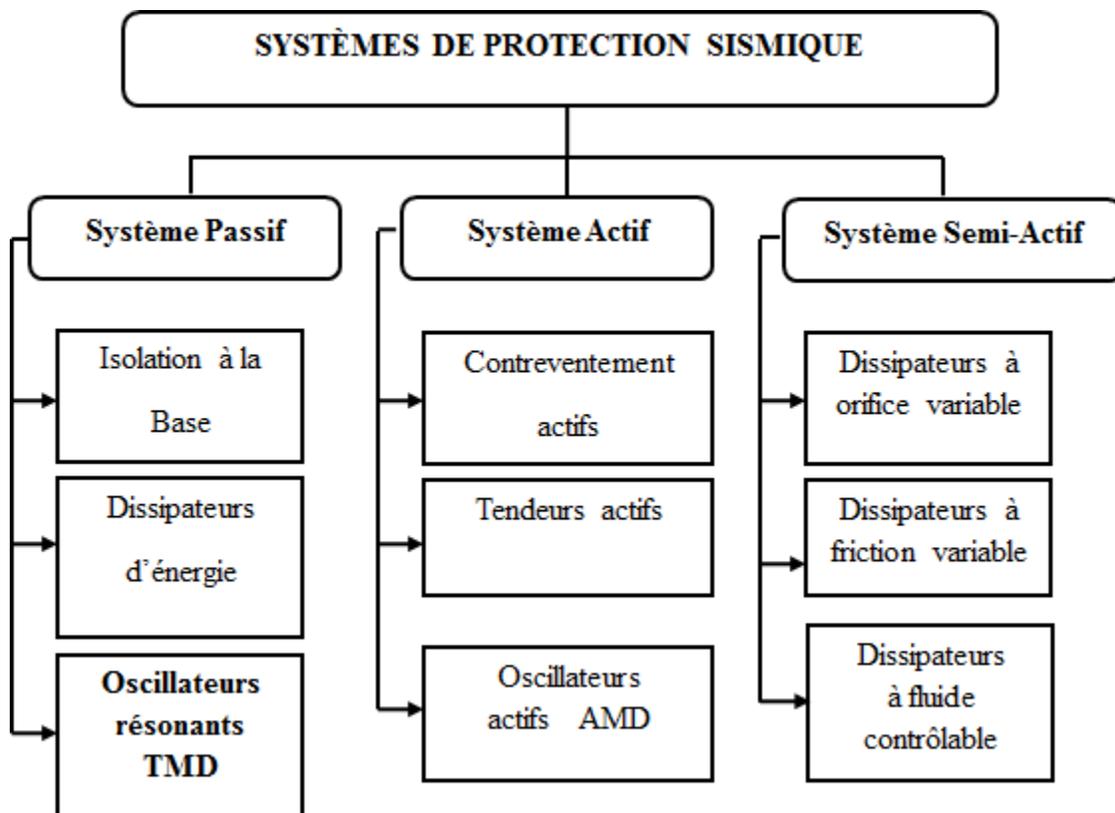


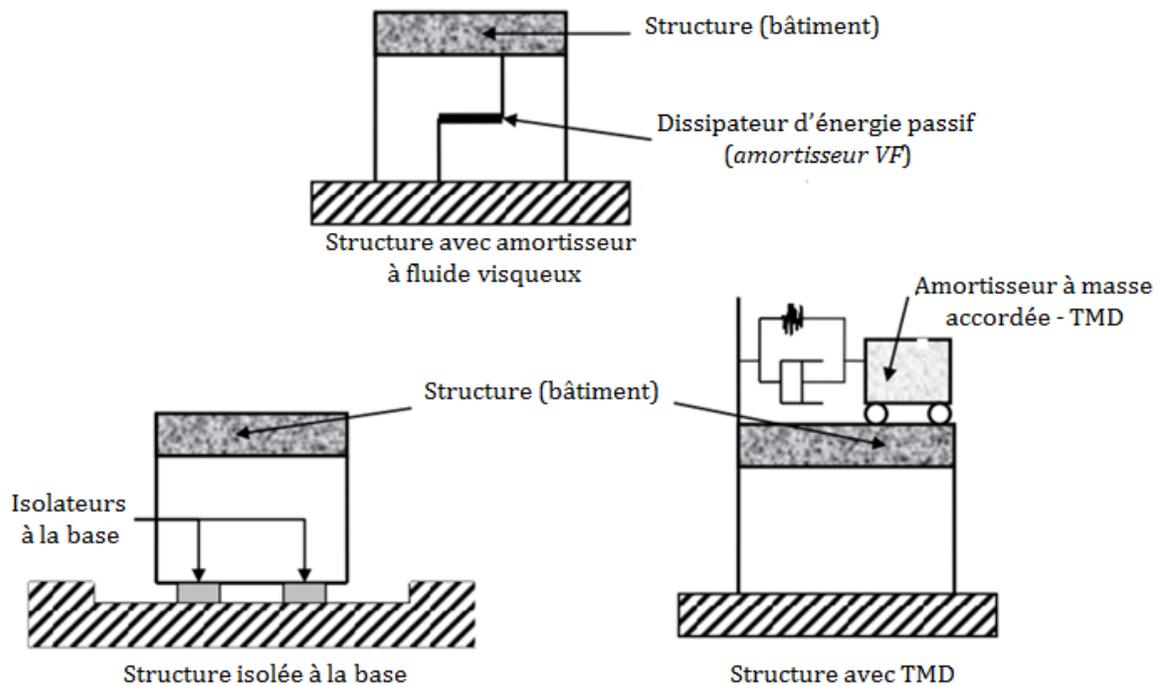
Figure 1.1 : Systèmes de protection sismique.[1]

## I.2. Système de contrôle passif

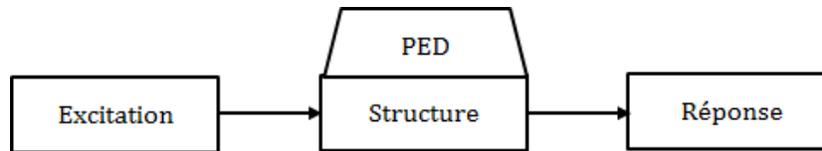
Le contrôle passif est basée principalement sur l'augmentation de la capacité de dissipation des structures en ajoutant des dissipateur additionnels qui peuvent être mis en place dans diverses positions, principalement dans des positions appropriées, et de dispositifs dont la rigidité et la résistance sont fixées afin de réduire la réponse sismique des bâtiments (déplacement, accélération...etc). [2]

Le contrôle passif consiste à superposer à la structure un dispositif qui modifie la rigidité ou l'amortissement du système structural sans apport d'une source d'énergie externe pour son fonctionnement.[2]

Ces dernières années, de sérieux efforts ont amélioré le concept des systèmes de dissipation d'énergie, et plusieurs appareils ont été installés dans des structures partout dans le monde. En général, ils sont caractérisés par leur capacité de dissiper l'énergie de vibration de la structure ou de la convertir en un autre mode de vibration ou en une autre forme d'énergie.[3]



**Figure 1.2 :** Exemple de quelques dispositifs de contrôle passif.[4]



**Figure 1.3** : Diagramme de système de contrôle Passif.[3]

### **I.3. Système de contrôle Actif**

Les dispositifs de contrôle actif sont généralement liés à des actionneurs qui produisent une force afin de dissiper une énergie sismique ou recentrer des déplacements imposés sous divers chargements dynamiques. La génération de force nécessite une énergie importante, généralement assurée par une alimentation électrique, ceci rend les systèmes actifs dépendant d'une source d'énergie importante. [2]

Cette technologie consiste, premièrement, à placer les capteurs sur la structure pour identifier, à chaque instant, la réponse ou l'excitation. Lorsque seulement la réponse de la structure est mesurée, la configuration de contrôle est connue sous le nom du contrôle à *boucle fermée* : la réponse est mesurée à chaque instant et cette information est utilisée pour la correction de la force de contrôle appliquée instantanément. Mais, lorsque seulement l'excitation est mesurée, le contrôle prend le nom de *boucle ouverte*. Par contre, si la réponse et l'excitation sont mesurées ensemble, le terme utilisé dans la littérature est le contrôle à *boucle fermée-ouverte*. En deuxième étape, il s'agit de choisir une loi de contrôle convenable qui permet, à chaque instant, à l'actionneur, un apport d'énergie de l'extérieur, de produire une force de contrôle. Par suite, lors de la conception d'un système de contrôle actif des vibrations par rétroaction, on commence par étudier le comportement dynamique de la structure à contrôler, puis on choisit une loi de contrôle de rétroaction qui répond au mieux à la problématique. Les lois des contrôles par rétroaction se définissent en fonction de l'état de la structure sur laquelle elles sont appliquées. L'efficacité de ce type de contrôle dépend des éléments suivants :

- Placement optimal des capteurs : en vue d'une discrétisation modale du déplacement d'une structure, le positionnement des capteurs est primordial pour le contrôle de la structure et l'estimation de l'état du modèle.

- Choix d'une loi de contrôle efficace : si le comportement du système n'est pas satisfaisant, l'objectif du contrôle est d'agir sur le système à travers des variables pour obtenir le comportement désiré de la réponse de la structure ou du système. Le problème de contrôle consiste donc à définir une loi de contrôle robuste afin que les réponses du système soient celles désirées.
- Placement optimal des actionneurs : comme les actions de contrôle sont localisées au niveau des actionneurs, c'est à dire que le contrôle agit sur la structure par l'intermédiaire des actionneurs, l'efficacité de contrôle dépend évidemment de la position de ces derniers. Pour un contrôle actif, l'optimisation du positionnement des actionneurs consiste à minimiser l'énergie qu'il faut fournir pour stabiliser le système. [3]

Le travail de contrôle de vibration basé sur ce type de stratégie est appelé contrôle par boucle de rétroaction (*feedback*). La deuxième opération consiste à identifier la perturbation qui crée les vibrations plutôt que la réponse de la structure. Elle consiste à annuler la perturbation en lui superposant une excitation inverse. Cette stratégie de contrôle actif est appelée contrôle par anticipation (*feedforward*).[2]

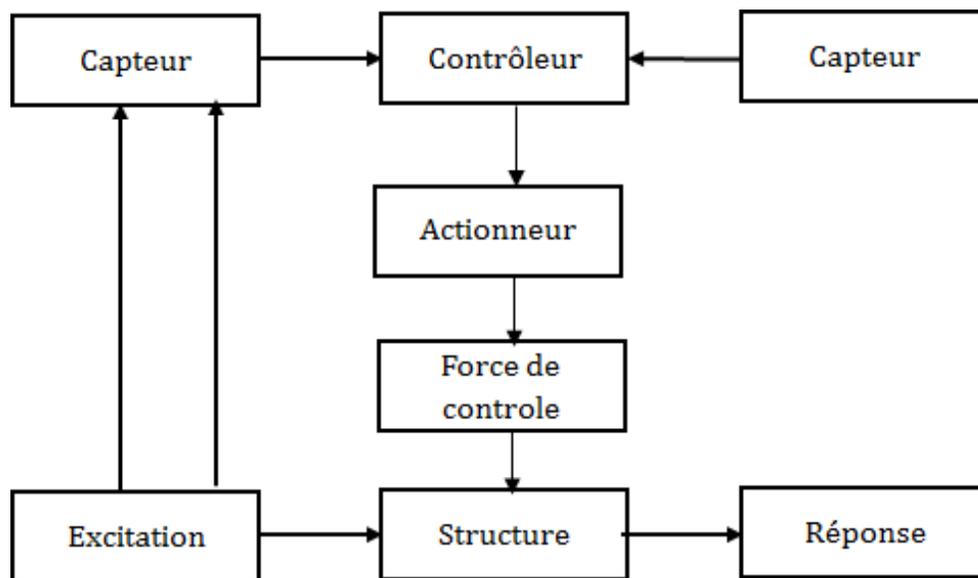
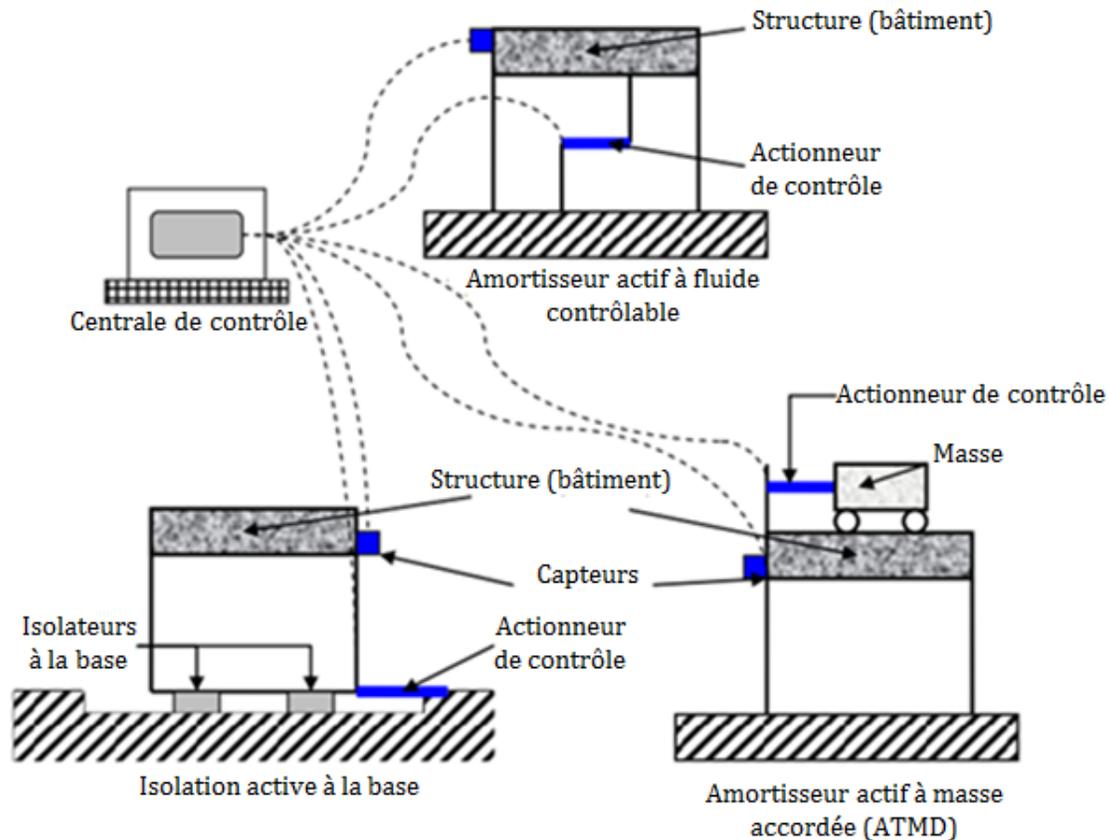


Figure 1.4 : Diagramme de système de contrôle actif.[5]



**Figure 1.5 :** Exemple de quelques dispositifs de contrôle actifs.[2]

#### I.4. Système de contrôle semi-actif

Les dispositifs de contrôle semi-actif proposent une combinaison entre les caractéristiques des systèmes passifs et ceux des systèmes actifs, ce qui induit une grande force produite nécessitant une quantité d'énergie minimale. Ainsi dans un système semi-actif, l'énergie est absorbée, contrairement aux systèmes actifs où l'énergie est apportée par un actionneur qui assure la stabilité de la structure. [2]

Ce système présente un grand avantage parce que la source d'énergie principale de la structure peut échouer pendant les événements sismiques, et l'actionneur n'a aucun potentiel nocif qui peut déstabiliser la structure. Bien que les amortisseurs semi-actifs soient un peu plus complexes que les amortisseurs passifs, ils sont faciles à fabriquer, fiables à fonctionner, et avec un meilleur amortissement.[6]

Il existe deux types de contrôle semi-actif : le premier est un contrôle dit continu, qui nécessite un dispositif de commande permettant d'ajuster (en continu) la force de contrôle, et le second est un amortisseur à deux états (amortissement fort/faible), plus facile à mettre en œuvre. Le concept de contrôle semi-actif a été introduit pour la première fois par (Karnopp D. et al. 1974)[7] où les premiers dispositifs ont été introduits dans le domaine de suspension des véhicules. Très récemment, ce type de dispositifs a été introduit dans le domaine du génie civil (Patten W.N et AL, 1993)[8]. Aujourd'hui il existe différents types d'appareils semi-actifs proposés pour contrôler les structures de génie civil.

La modalité de réglage des paramètres mécaniques est déterminée selon la base d'un choix d'algorithme de contrôle en fonction de l'excitation et/ou la réponse de la structure. Comme exemple des systèmes semi-actifs, l'amortisseur magnéto-rhéologique, l'amortisseur à masse accordée semi-actif (STMD) et l'amortisseur semi actif à rigidité variable.[6]

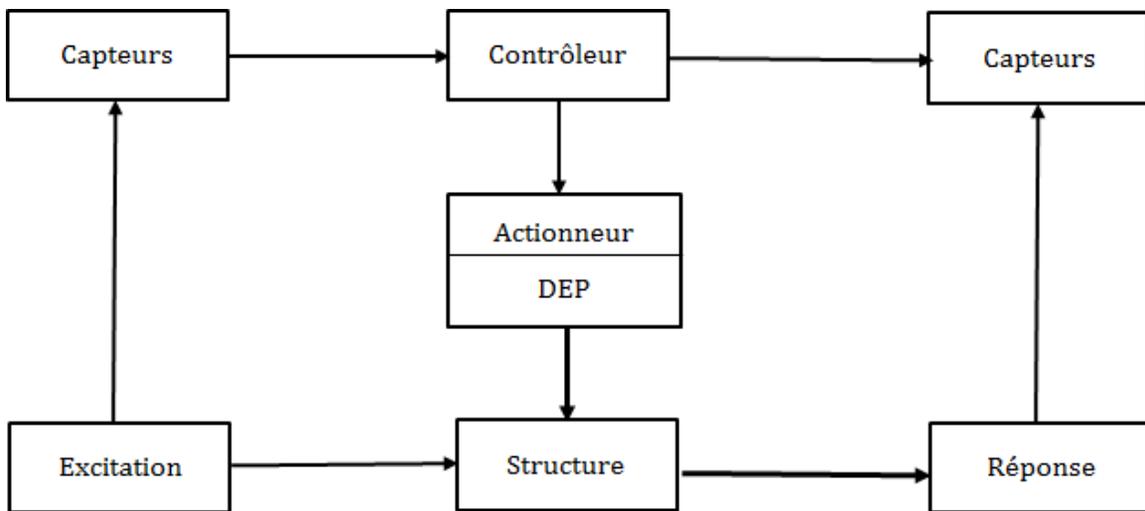
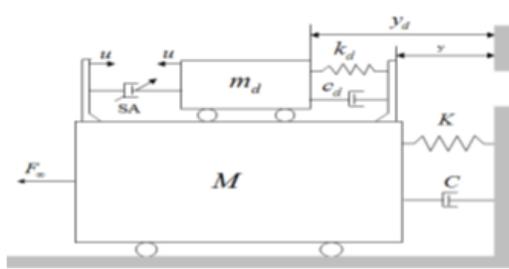
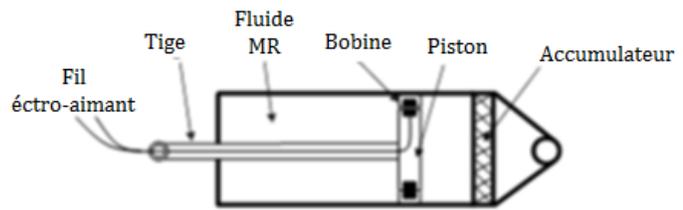


Figure 1.6 : Diagramme de contrôle semi-actif.[3]

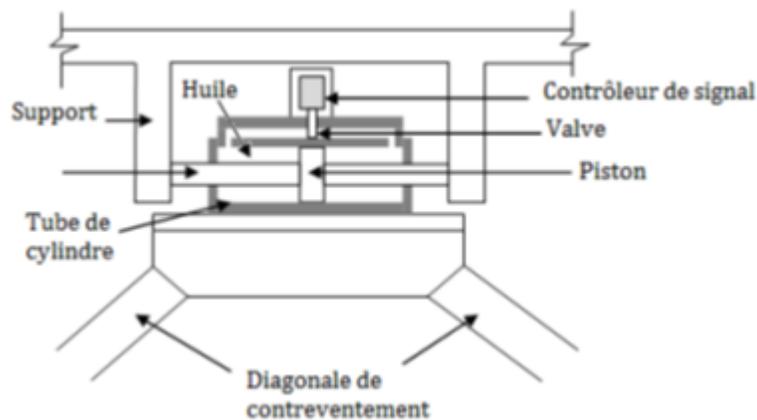
### I.4.1. Les types de contrôle semi-actif



a) Amortisseur semi-actif (STMD)



b) Amortisseur magnéto-rhéologique (MR)



c) Amortisseur semi actif à rigidité variable.

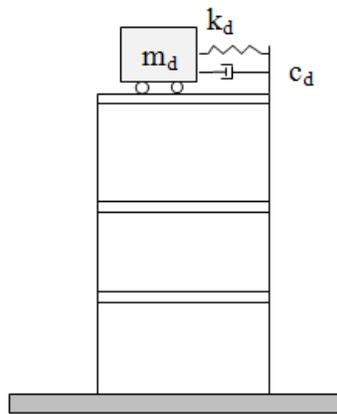
**Figure 1.7** : Exemple de quelques dispositifs de contrôle semi- actifs.[9]

### I.5. Amortisseur à masse accordée TMD

D'après la revue de la littérature des divers systèmes de contrôle, l'amortisseur à masse accordée apparaît comme un système efficace pour agir comme une force de recentrage dans une structure à moyenne et grande hauteur soumise à des excitations dynamiques, comme le vent ou les séismes. Le concept de ce système sera donné avec plus de détails dans la partie suivante.[2]

### I.5.1. Le concept de l'amortisseur à masse accordée (TMD)

Les amortisseurs de masse accordée, dans leur forme la plus simple, consistent en un système combiné « *masse-ressort-amortisseur* » formé d'une masse auxiliaire ( $m_d$ ), un ressort ( $k_d$ ) et un amortisseur ( $c_d$ ) attachés à la structure principale, généralement sur le dessus de la structure, comme le montre la (figure 1.8). Le mécanisme de base d'un TMD est un absorbeur de vibrations dynamique montré en (figure 1.9). L'absorbeur comprend une petite masse  $m_d$  et un ressort de rigidité  $k_d$ , et il est attaché à la masse principale  $M$  du bâtiment de rigidité  $K$ .



**Figure1.8** : Amortisseur de masse accordée installé sur la structure.[2]

La figure 1.9 montre quelques exemples de TMD disponibles pour la mise en place pratique.

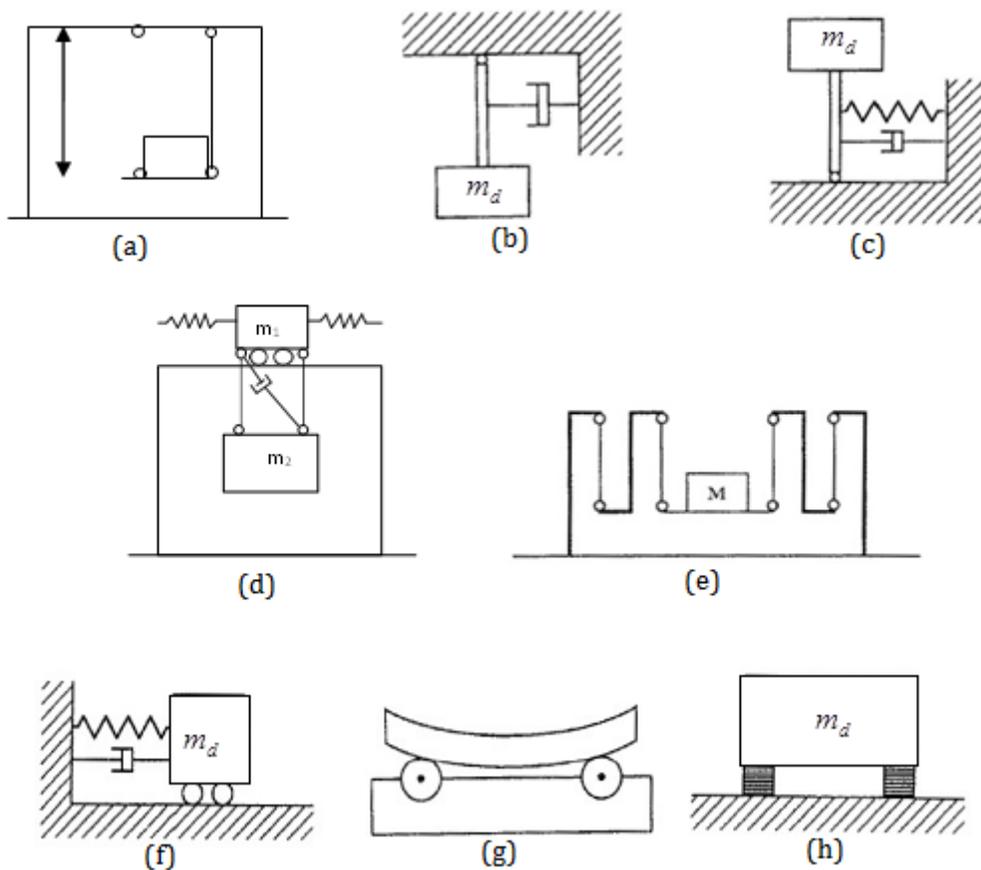
La force de restitution peut être produite différemment, comme :

- par le chargement de poids du TMD (types a, b, d, et e),
- par un ressort (types c, d, et f),
- par un appui (types g et h).

La force d'amortissement peut être réalisée par

- par un amortisseur (types b, c, d, et f)
- par HDRB appui en caoutchouc à haute dissipation d'énergie (type h). [2]

Pour le TMD du type pendule (types a et b), la période de vibration  $T$  dépend seulement de la longueur  $L$  du bras de pendule ( $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ ). L'accord de la fréquence de TMD au mode fondamental de structure exige souvent un très grand espace pour le bras de pendule. Pour sauvegarder l'espace nécessaire, ce pendule simple est modifié de telle manière que la période de pendule dépende de la longueur de bras de pendule et des autres propriétés. Par exemple, le bras de pendule peut être connecté à un ressort (le type c), un amortisseur à deux masses (type d), ou le pendule à plusieurs étages (le type e) peut être utilisé avec des suspentes Tournantes qui réduisent l'espace vertical requis et gardent le même espace horizontal occupé.[10]



**Figure 1.9** : Les types de TMD. [11]

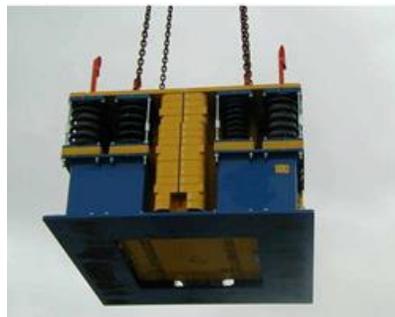
a) pendule simple, b) pendule avec amortisseur, c) pendule inversé avec amortisseur et ressort, d) amortisseur à deux-masse, e) amortisseur à plusieurs étages, f) glissant la masse avec ressort et amortisseur, g) la masse basculant sur des appuis de rotation, et h) la masse sur des appuis en caoutchouc.

### I.5.2 Implémentation du TMD dans des structures réelles

Les TMD peuvent être implémentés principalement sous deux formes [4]. La première forme est l'amortisseur à masse accordée pendulaire. L'utilisation la plus connue de ce type d'amortisseur est l'installation d'un pendule de 800 tonnes dans un bâtiment de 508 m de hauteur (Taipei 101) pour stabiliser la tour en présence d'un chargement externe d'origine tremblement de terre ou vent (figure 1.11) et la deuxième, où se limite notre étude et la plus connue est celle formée par une masse attachée à la structure principale par un ressort et un amortisseur tel que le bloc de béton qui a été installé au sommet du bâtiment Citicorp center à New York dans les années 1970 et qui se déplace sur une surface lisse lubrifiée avec de l'huile (figure 1.12).



**Figure 1.10** : TMD pendulaire de 800 t dans un bâtiment de 508 m de hauteur (Taipei 101). [11]

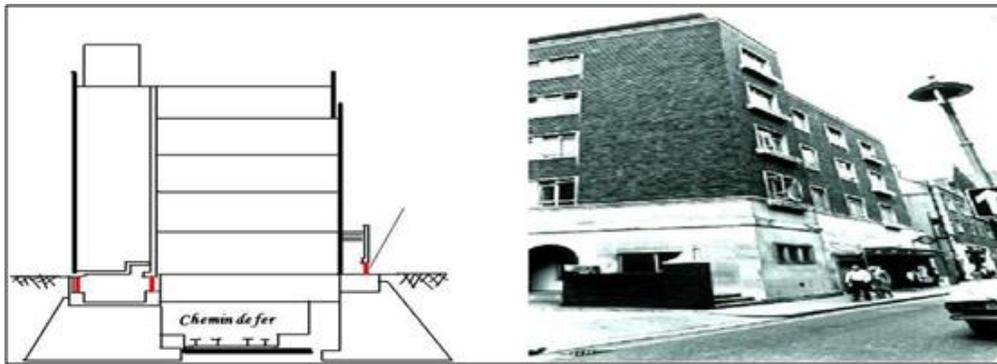


**Figure 1.11** : Amortisseur à masse accordée (Bachmman, 2004). [11]

### I.6. L'isolation à la base

L'isolation à la base est une technologie bien établie de l'approche de contrôle passif. Un bâtiment monté sur un matériau à faible rigidité latérale, tel que du caoutchouc, une base flexible. Pendant le séisme, la base flexible est capable de filtrer les hautes fréquences du mouvement du sol pour éviter que le bâtiment ne s'effondre ou soit endommagé. Par conséquent, l'isolation à la base est un outil efficace pour la protection sismique des bâtiments de faible et moyenne hauteur, car ces types de bâtiments sont caractérisés comme ayant des fréquences élevées. [10]

Le principe de l'isolation sismique n'est pas nouveau : les premières expériences remontent au début de 20<sup>ème</sup> siècle. L'idée d'isolation parasismique est intervenue après plusieurs enquêtes faites par le docteur A. Calantarientis, qui a été à l'origine d'une méthode de conception d'un bâtiment construit sur «joint libre». Cette idée simple est un exemple de stratégie parasismique de conception connu sous le nom d'isolation à la base ou isolation parasismique. La première application de la technologie moderne de l'isolation sismique a été réalisée en 1969. L'utilisation d'éléments artificiels spécifiques destinées à isoler une partie de la structure de la totalité de l'intensité d'une excitation sismique, et de dissiper une grande quantité d'énergie (Priestley, 1996). [12]



**Figure 1.12** : Bâtiment d'un tribunal traité avec des isolateurs à la base.[13]

Cette nouvelle approche de conception parasismique a été développée pour fournir une plus grande protection à la construction dans les zones dangereuses à forte sismicité. Un nombre important de dispositifs ingénieux ont été proposés pour parvenir à ce résultat, au cours des dernières années, quelques systèmes pratiques ont été implantés. Des recherches considérables sur le développement de nouvelles méthodes de conception parasismique ont été réalisées en Nouvelle-Zélande (Skinner, 1975,1976, 1982,1984) ; ce travail a abouti à un certain nombre de

concepts d'appuis parasismiques, tels que l'appui en caoutchouc laminé portant un noyau cylindrique en plomb dans le trou central du système. Actuellement quelques milliers de bâtiments et de ponts à travers le monde sont munis de systèmes d'isolation sismique (Othman Ben Mekki , 2006).

Plusieurs bâtiments ont été construits ou rénovés aux Etats-Unis en utilisant la technique d'isolation sismique à la base ; parmi lesquels on peut citer :

- Le centre de la justice de Foot Hill à San Bernardino en Californie, première nouvelle construction sur appuis parasismique de type HDRB (98 unités) en 1985
- Détecteur Mark II, Centre Accélérateur Linéaire de Stanford (Rénovation en 1987) en utilisant des isolateurs de type LRB (Lead Rubber Bearing)
- Aéroport international de San Francisco nouvelle construction sur appuis parasismique de type FPS (272 unités) en 1998.

a) Les avantages de l'isolation sismique à la base sont les suivants :

- Réduction des accélérations des étages et les déplacements inter-étages;
- Réduction des dégâts (ou presque quasi nuls) des éléments structuraux;
- Une meilleure protection des équipements et du contenu du bâtiment;
- Association du comportement non linéaire et à large déformation, en un seul groupe d'éléments (Isolateur et Amortisseur). [3]

b) Plusieurs études ont traité l'isolation à la base, ces études ont montré les limitations de cette dernière pour des structures élevées sous l'effet d'action sismique :

- Des grands déplacements de la structure
- Au delà d'une certaine hauteur on n'observe plus de réduction de la réponse sismique
- Saturation de l'amortissement effectif .

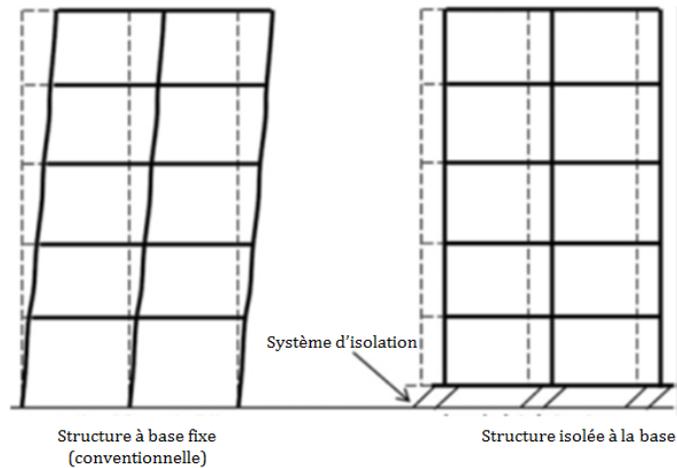


Figure 1.13 : Comportements des structures lors d'un séisme.[14]

### I.6.1. Principe de l'isolation sismique

Le principe du concept d'isolation sismique à la base est assez simple. Il s'agit de fournir une discontinuité entre la fondation et la superstructure, de sorte que l'énergie sismique ne peut pas être entièrement transmise à la superstructure ; ce résultat donne une réduction significative de l'accélération de l'étage supérieur et du déplacement inter-étage. Par conséquent, le système assure la protection des matériels et des composants du bâtiment. Pour sa grande performance, la technique d'isolation sismique a maintenant évolué dans les pays développés tels que les Etats-Unis, le Japon, l'Italie et la Nouvelle-Zélande, au point où elle est souvent destinée à la protection des bâtiments neufs ou existants.

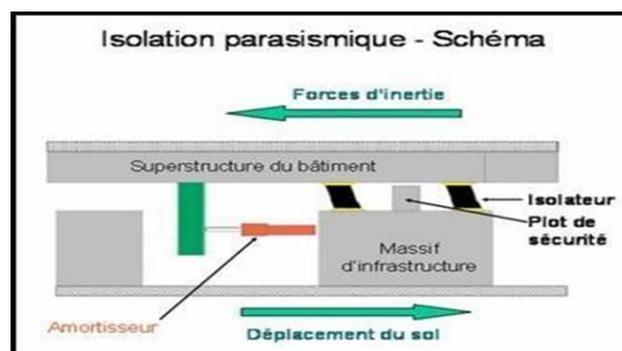


Figure 1.14 : Isolation parasismique-Schéma.

### I.6.2. Composantes des systèmes d'isolation sismique à la base

- **Un appui capable de transmettre les charges verticales (une rigidité verticale très élevée) avec une faible rigidité horizontale (dans la direction isolée) :**

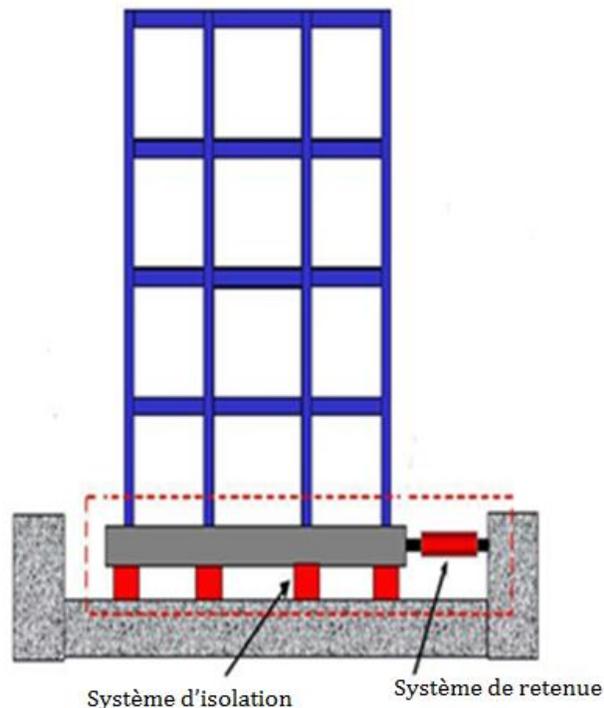
C'est le noyau de l'isolateur. La rigidité latérale de l'appui est le paramètre clé dans l'augmentation de la période et par conséquent dans la réduction de des forces sismique.

- **Un mécanisme de dissipation d'énergie (amortisseur sismique):**

Ce mécanisme peut être soit incorporé à l'appui soit installé en parallèle. Le but est de contrôler la déformation de l'isolateur et par conséquent le déplacement absolu de la superstructure située au-dessus.

- **Un système de retenue (fusible) :**

le système d'isolation doit avoir une rigidité initiale élevée afin de minimiser les déplacements sous les charges de service tel que le freinage et le vent.



**Figure 1.15** : Localisation des isolateurs parasismiques pour les bâtiments.[14]

### **I.6.3. Les différents types d'appuis parasismiques**

Ils existent plusieurs types d'appuis parasismiques. Selon leur mode de fonctionnement, ils peuvent être classés en plusieurs catégories [2], [5], [3] ; [13]:

1. Appuis à déformation;
2. Appuis à glissement;
3. Appuis à déformation et glissement
4. Appuis à roulement, etc.

#### **I.6.3.1. Les appuis à déformation**

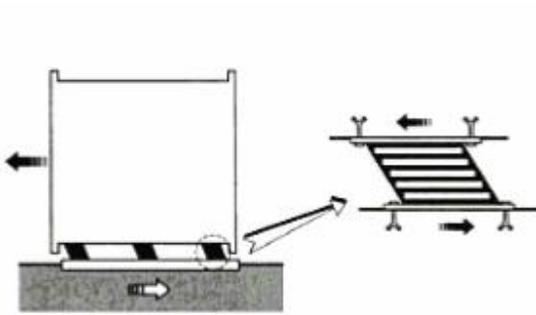
Les appuis à déformation, utilisés pour isoler les constructions des vibrations, ont toujours montré un comportement satisfaisant. Ils sont en général réalisés en élastomère fretté, c'est-à-dire en plots composés de couches alternées d'élastomère naturel (caoutchouc) ou synthétique (néoprène) et de plaques d'acier (frettes).

La déformabilité horizontale des couches d'élastomère autorise des déplacements notables de la superstructure par rapport à ces fondations (Figure 1.17). On admet en général pour l'élastomère une déformation de cisaillement de 45%. La rigidité verticale des appuis est assurée par la présence des frettes.

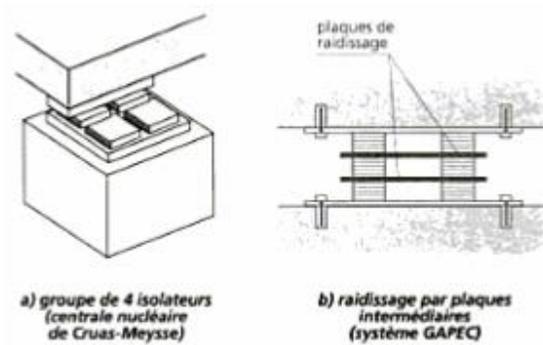
L'amortissement relatif procuré par l'élastomère varie entre 4% et 12% de l'amortissement critique. Ils existent des élastomères qui possèdent un amortissement plus élevé, mais ils sont sujets à un fluage important.

La réduction des charges sismiques croît avec la flexibilité horizontale des appuis. Or celle-ci diminue leur stabilité. Le problème d'instabilité se pose plus particulièrement dans le cas des constructions légères qui, pour être efficacement isolées des déplacements du sol, nécessitent des appuis avec une forte épaisseur d'élastomère. Il peut être résolu en couplant plusieurs isolateurs, ce qui augmente le moment d'inertie de l'appui (Figure 1-18).

Les parties métalliques des isolateurs doivent recevoir une protection contre la corrosion et contre l'incendie, assurée en général par une enveloppe en élastomère.



**Figure 1.16** : Les appuis à déformation.



**Figure 1.17** : Appuis groupés.

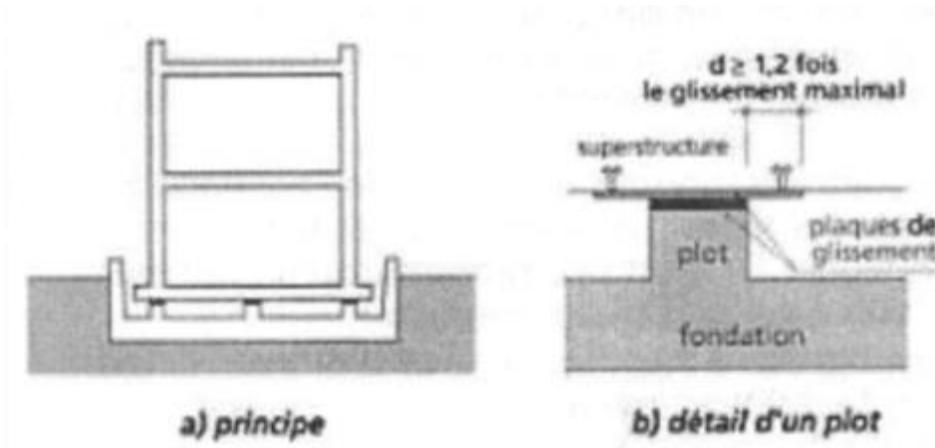
### I.6.3.2. Les appuis à glissement

Le système d'appuis à glissement est constitué d'une part de plaques solidaires de la superstructure et d'autre part de plaques fixées aux fondations. Leur interface constitue le plan de glissement et le matériau des deux séries de plaques n'est pas nécessairement le même.

Ces systèmes permettent le découplage des mouvements horizontaux et verticaux de la superstructure de ceux des éléments de fondations qui sont dûs à la différence importante des fréquences d'oscillation dans les deux directions.

Les appuis à glissement conviennent aussi bien pour les constructions sur sols durs que sur les terrains meubles car pour les faibles coefficients de frottement des plaques la réponse de la superstructure est indépendante du contenu fréquentiel du mouvement sismique.

La réponse à l'excitation sismique d'une structure reposant sur des plaques de glissement ne dépend que de sa masse et du coefficient de frottement entre les plaques. Parmi ces appuis, on peut citer :



**Figure 1.18** : Appuis à glissement.

### I.6.3.2.1 Appuis à friction

Cet appui présenté à la figure (1.20) est constitué d'une interface en acier inoxydable contre du téflon. Le comportement est purement plastique car si le coefficient de friction est faible (environ 10%), il assure une grande flexibilité et donc une réduction sensible à des sollicitations sismiques subies par les structures. L'acier inoxydable est généralement poli et le téflon peut être renforcé par des fibres de verre ou de carbone. Aucune force de rappel n'est assurée.



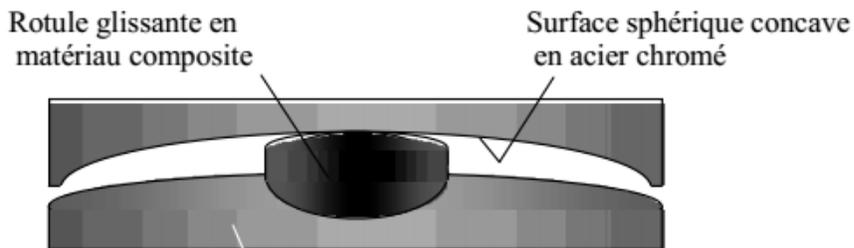
**Figure 1.19** : Appui à friction.

### I.6.3.2.2 Appuis à pendule glissant

Le système de roulement à friction présente des surfaces de glissement plates. L'inconvénient majeur du roulement à friction à plat les surfaces coulissantes est que la structure du bâtiment est incapable de revenir à son origine position après un tremblement de terre. En effet, une fois que la force latérale imposée est moins que la résistance générée par le frottement, le mouvement du bâtiment. la structure s'arrête et fait que la structure reste à une certaine distance du centre du roulement. Les répliques peuvent forcer le bâtiment à se déplacer de l'arrêt position et encore plus loin de le mouvement peut dépasser la portée du roulement et entraîner la défaillance des roulements. Pour réduire la distance au centre du roulement après un tremblement de terre, une friction un roulement à surface de glissement sphérique ou concave a été développé. Ce type du

roulement est appelé roulement pendulaire à friction et est illustré à (figure 1.21). La force latérale imposée pousse le roulement dans les directions à la fois horizontale et verticale. Une fois que la force latérale disparaît, une force de rappel est générée. Un composant de la charge verticale appliquée le long de la direction tangentielle à la surface sphérique aide le roulement à revenir au centre. Le mouvement s'arrête lorsque le frottement est égal ou supérieur à la composante de l'application de la charge verticale.

Une caractéristique notable du roulement pendulaire à friction, appelée le frottement statique, c'est que la force latérale nécessaire pour amorcer le glissement est plus grande que celle nécessaire pour maintenir le glissement. Une fois que la force imposée a surmonté la résistance du frottement, le curseur articulé est activé et se déplace le long de la surface sphérique. Le coefficient de frottement est régi par la charge verticale et la vitesse appliquée. Une charge verticale appliquée plus élevée se traduit par un coefficient de friction plus faible, tandis que le coefficient de frottement augmente fortement à grande vitesse.

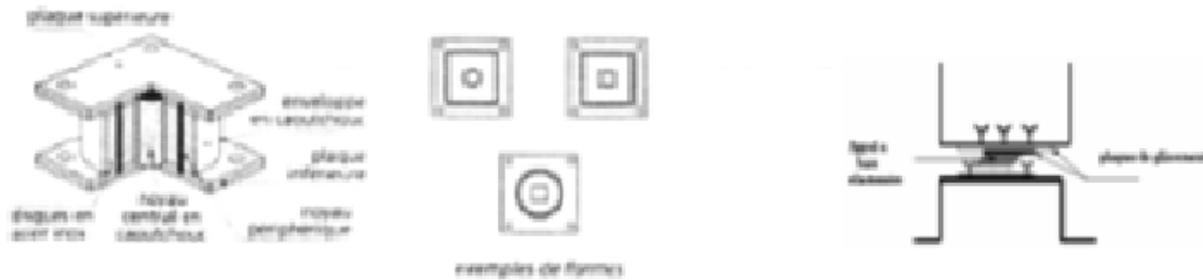


**Figure 1.20** : Appuis à pendule glissant.

### **I.6.3.3. Appuis à déformation et glissement**

L'association de plaques de glissement et des appuis à déformation (Figure 1-22) supprime l'inconvénient que présentent ces derniers la présence de sols mous. Dans un premier temps, les isolateurs se déforment latéralement grâce à la distorsion de l'élastomère. Lorsque la force nécessaire à l'accroissement de la distorsion devient supérieure à la force de frottement entre les plaques, le glissement commence. Pendant un séisme violent, il peut se produire plusieurs glissements. Ce système entraîne une réduction à la fois des accélérations et des déplacements de la superstructure et conduit ainsi à une diminution importante des efforts tranchants à la base. Ceci est partiellement avantageux dans le cas des constructions sur des fondations profondes, plus

sensibles au cisaillement que les fondations superficielles. Les appuis à déformation et glissement constituent un système de protection sismique très efficace.



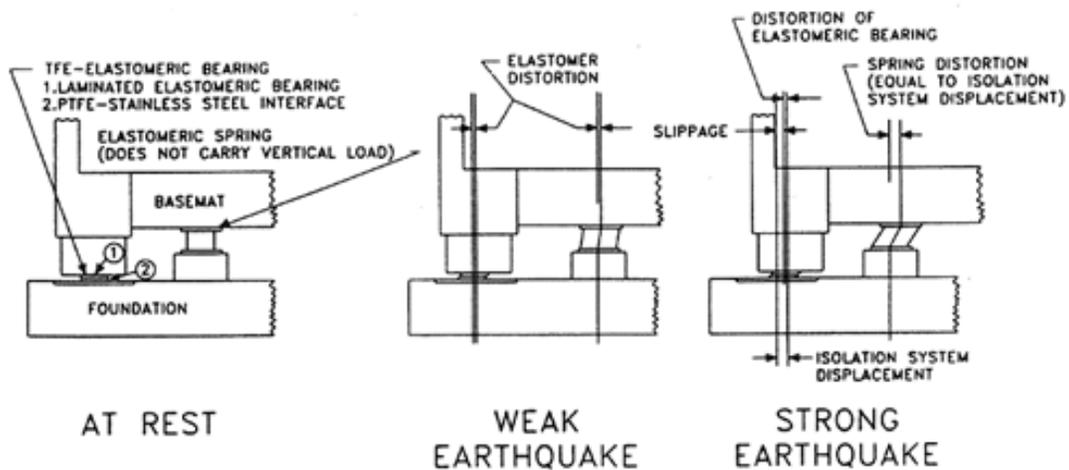
a) Appui proposé par Mostghal

(b) Appui utilisé par l'EDF.

**Figure 1.21** : Appuis à déformation et glissement

### I.6.3.3.1. Le système d'appui TASS

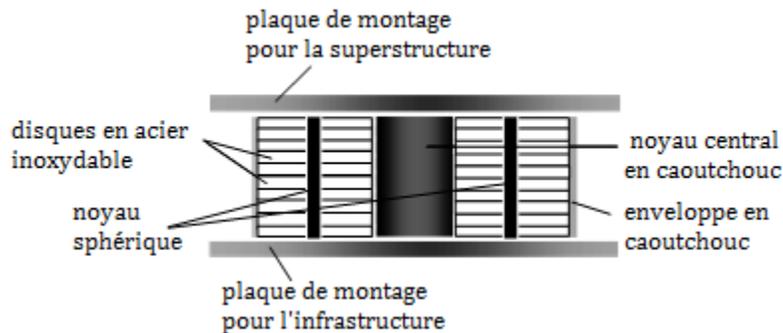
Le système d'appui TASS présenté à la (Figure 1.23) a été développé par Taisei Corporation. Il a été appliqué sur trois structures au Japon. Ce sont le bâtiment de Taisei Technology Research Center à Yokohama, le bâtiment de JAPCO Atagawa à Shizuoka et le Toho Gas Center à Mie. Ce système est composé d'une combinaison d'un appui en élastomère monté en série sur une interface de glissement d'acier inoxydable-PTFE pour supporter le poids de la structure avec un appui en néoprène pour fournir la force de recentrage pendant une excitation sismique modérée.



**Figure 1.22** : Le système d'appui TASS.

### I.6.3.3.2. Appui proposé par N. Mostaghel

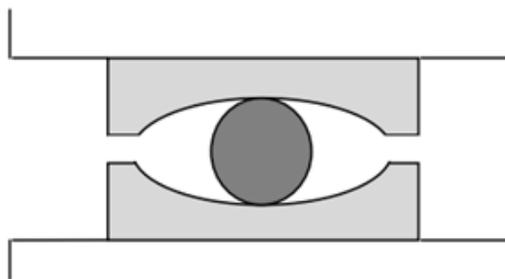
Cet appui présenté en (Figure 1.24) est composé de disques en acier inoxydable superposés, pouvant glisser les uns sur les autres. Les disques sont recouverts de téflon afin de diminuer le coefficient de frottement et sont reliés par un noyau central ou plusieurs noyaux en caoutchouc.



**Figure 1.23** : Appui proposé par N. Mostaghel.

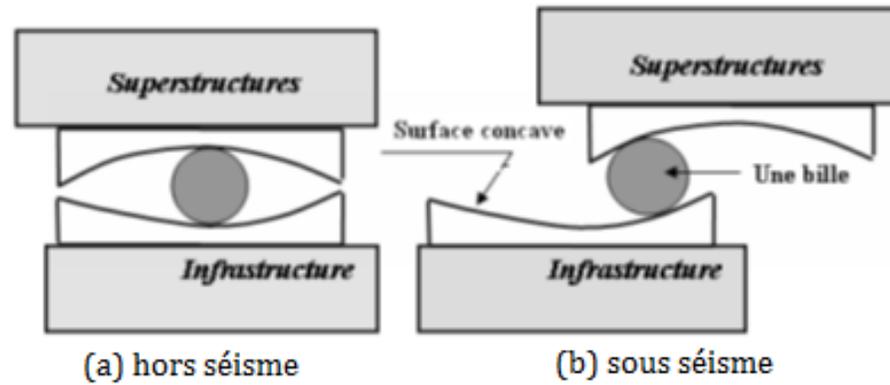
### I.6.4. Les appuis à roulement

Pour permettre des mouvements dans deux directions, on utilise des billes sphériques ou deux couches orthogonales de rouleaux cylindriques (voir Figure 1.27). Des appuis ovoïdaux ont été utilisés pour un bâtiment expérimental de 7 niveaux à Sébastopol (Ukraine). Lors de chaque déplacement, les ovoïdes entraînent un léger soulèvement de la construction qui a alors tendance à revenir à sa position initiale. Ces systèmes d'appuis peuvent être complétés par un dispositif de blocage vis-à-vis de l'action du vent ainsi que des amortisseurs peuvent être prévus afin de limiter les déplacements.



**Figure 1.24** : Appui à billes.

Bien que plusieurs systèmes d'appuis à roulement aient été proposés, il n'existe que très peu de réalisations de ce type en raison des inconvénients qu'ils comportent, dont les principaux sont le grippage après une période prolongée sans sollicitation et leur faible amortissement



**Figure 1.25** : Le principe de base d'un appui à billes (à roulement).

### **I.6.5. Les différents types d'amortisseurs parasismiques**

Les amortisseurs parasismiques sont le plus souvent hystérétiques, visqueux ou à frottement. Toutefois, d'autres types d'amortisseurs existent, par exemple un amortisseur magnétique pouvant réduire les déplacements à la base des immeubles de 20 à 30%. [3], [2], [6], [10]

#### **I.6.5.1. Amortisseurs hystérétiques**

Les amortisseurs hystérétiques sont des pièces réalisées en matériaux très ductiles : acier doux, plomb, alliages malléables, etc. La dissipation d'énergie est obtenue à travers les déformations plastiques auxquelles ils sont soumis lors des déplacements relatifs de la superstructure et des fondations. (Hystérétique est la dissipation d'énergie par plastification alternée d'éléments très ductiles).

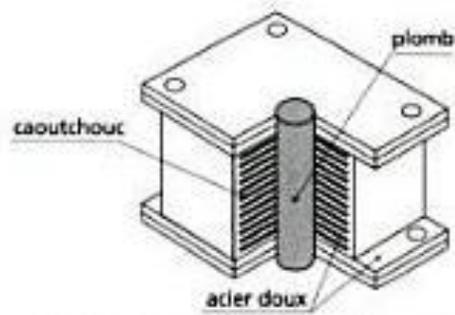
De nombreux types d'amortisseurs hystérétiques existent. Les plus simples consistent en des barreaux verticaux, placés entre la fondation et la superstructure. Des systèmes plus élaborés ont été également mis au point :

- **Barreaux d'acier doux**



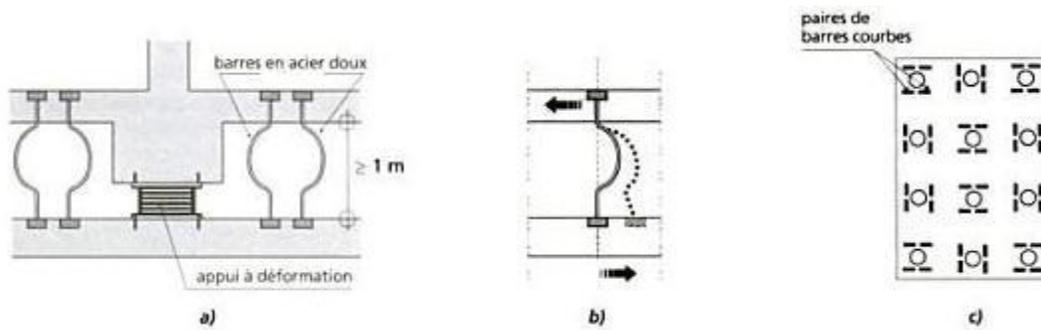
**Figure 1.26** : Amortisseur en barreau d'acier doux.

- **Barreaux de plomb**



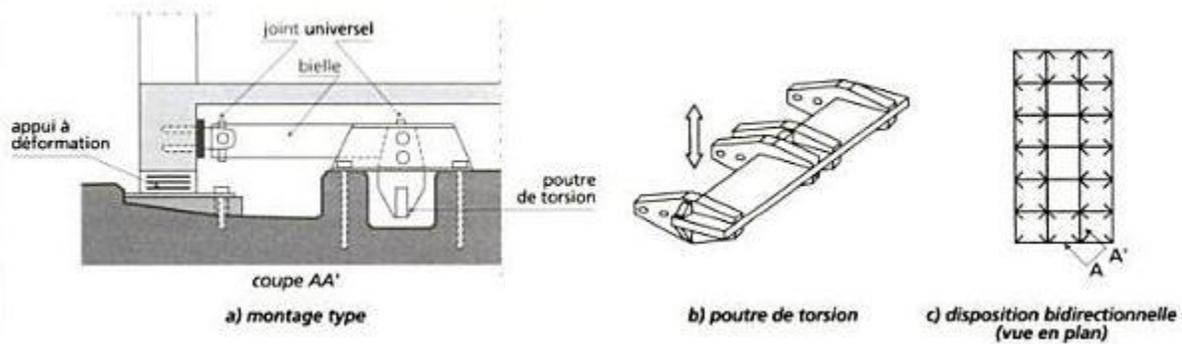
**Figure 1.27** : Amortisseur en barreau de plomb.

- **Barres courbes en acier doux**



**Figure 1.28** : Amortisseurs en barres courbes en acier doux.

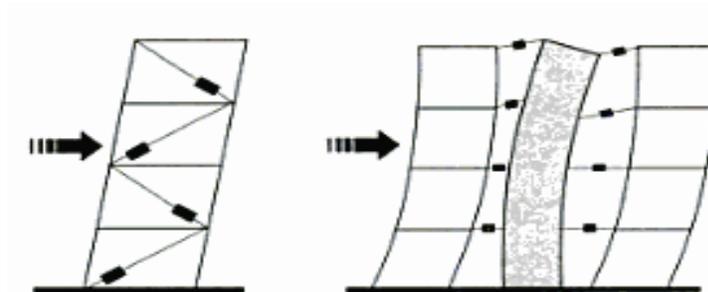
- **Poutres en aciers doux sollicitées en torsion**



**Figure 1.29** : Principe d'un amortisseur en barre de torsion.

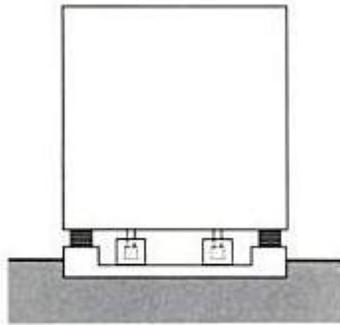
### I.6.5.2. Amortisseurs visqueux

Les amortisseurs visqueux sont également très efficaces. Ils peuvent être montés plus facilement en superstructure (Figure 1.31). Celle-ci doit autoriser les déformations indispensables à leur fonctionnement.

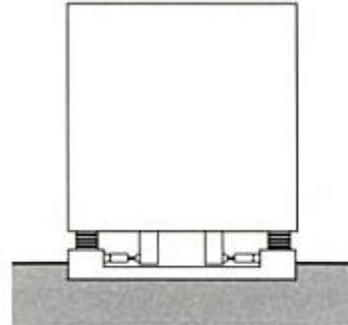


**Figure 1.30** : Montage d'amortisseurs visqueux en superstructures.

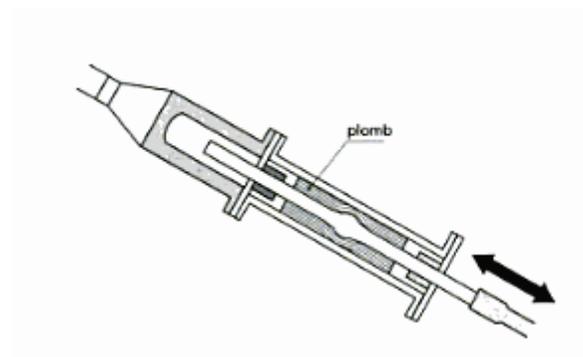
De nombreux types d'amortisseurs visqueux existent : amortisseurs à fluide visqueux et amortisseurs à extrusion de plomb. La (Figure 1.32) montre que l'amortisseur à fluide visqueux s'agit de boîtes fixées aux fondations et contenant un fluide de grande viscosité.



a) Amortisseurs à fluide visqueux.



b) Amortisseurs à huile.



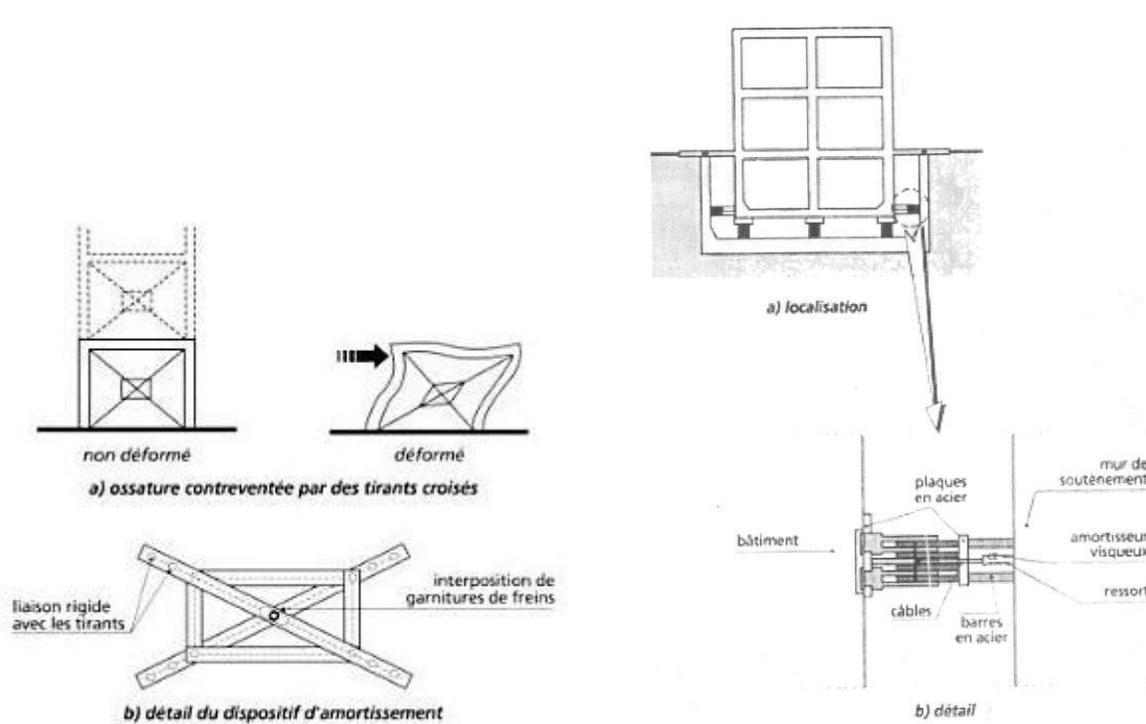
c) Amortisseur à extrusion de plomb.

**Figure 1.31** : Les différents types d'amortisseurs visqueux.

### I.6.5.3. Amortisseurs à frottement

Les amortisseurs de ce type dissipent l'énergie par frottement sec. Dans le système de la (Figure 1.33) des garnitures de freins sont fixées aux croisement des diagonales de contreventement d'une ossature métallique, boulonnées ensemble à travers un trou oblong. Les déformations de l'ossature provoquent des glissements des garnitures avant qu'une plastification des diagonales ou le flambage des poteaux ne puissent se produire. Le glissement allonge la période propre de la structure, ce qui est en général favorable.

La (Figure 1.34) montre un amortisseur à frottement proportionnel au déplacement; ce dispositif, utilisable pour les bâtiments sur appuis parasismiques, est composé de deux groupes de plaques fixées respectivement au bâtiment et à un mur de soutènement extérieur. Lors des oscillations, les plaques glissent les unes sur les autres et sont resserrées par une paire de câbles montés en série avec un amortisseur visqueux. Le serrage augmente d'une manière progressive proportionnellement au déplacement des plaques.



a) Amortisseurs à frottement.

b) Amortisseurs à frottement proportionnel au déplacement.

**Figure 1.32 :** Les types d'amortisseur à frottement.

### I.7. Les systèmes de contrôle hybride

Il est remarquable que les systèmes de contrôle actif sont introduits pour améliorer la capacité et l'intelligence limitées des amortisseurs passifs et semi actifs, mais le contrôle actif a toujours deux inconvénients. Le premier est son fonctionnement qui dépend d'une source d'énergie externe et il exige un système compliqué pour détecter les réponses et les excitations. Cette complexité limite son application et réduit la fiabilité de contrôle. Le deuxième, pour l'application de contrôle actif aux structures de génie civil, cela nécessite des grands équipements pour

produire la force de contrôle, c-à-d, des grands actionneurs sont exigés. La technologie industrielle actuelle est capable de fabriquer ces grands actionneurs mais son coût limite sévèrement son application.[6]

Tsai [15] a étudié l'effet d'un amortisseur à masse accordée sur une structure isolée de six (6) étages, le but principal de l'introduction de l'amortisseur à masse accordée et de réduire les déplacements de l'isolateur. Dans cette étude, Tsai a souligné l'importance de réglage du TMD sur la réduction de la réponse en déplacement des isolateurs.

Palazzo and Petti [16] ont étudié la réponse dynamique d'une structure isolée équipé d'un amortisseur à masse accordée au niveau de la base, la structure à plusieurs degré de liberté et sa réponse a été étudiée sous l'effet d'excitation aléatoire. Le résultat montre une amélioration de la réponse de la structure hybride par rapport à celle avec une isolation à la base seulement.

Providakis [17] a étudié une structure isolée par des isolateurs de type LRB avec un amortissement additionnel assurée par des amortisseurs visqueux fluides, les excitations auxquelles la structure a été soumise sont des excitations de champs proche. L'hybridation a donné de résultat acceptable quant à la réduction des déplacements de la base (des isolateurs).

Love, Tait [18] a présenter un système hybride pour des structure isolées à la base, basé sur l'ajout d'un amortisseur à colonne liquide, le réglage de l'amortisseur à colonne liquide est basé sur les fréquences propre de la structure afin de créer un modèle mécanique linéaire qui sera validé par une simulation qui prend en considération le comportement non linéaire. Les résultats obtenus montrent une amélioration dans le comportement de la structure hybride par rapport à celle isolée à la base uniquement.

### **I.8. Conclusion**

Au cours des 20 dernières années, des technologies innovatrices comme les dispositifs de dissipation d'énergie et d'isolation à la base ont été développées, et elles ont servi à améliorer la performance sismique des bâtiments. Les dispositifs de dissipation d'énergie comme les amortisseurs peuvent diminuer les dommages potentiels aux bâtiments en absorbant une quantité significative de l'énergie produite dans un bâtiment lors d'une secousse sismique et les isolateurs à la base jouent le rôle de couche flexible entre la fondation et le bâtiment; par conséquent, les mouvements du sol ont une faible incidence sur la structure du bâtiment.

D'après l'étude bibliographique réalisée, il s'avère que le système d'isolation à la base présente des inconvénients sous certaines conditions de chargement dynamique, ces inconvénients peuvent être traités en introduisant des dispositifs de contrôle supplémentaire pour former un système de contrôle hybride. La revue de la littérature des dispositifs de contrôle nous a conduits à proposer la combinaison entre un amortisseur à masse accordée et une structure équipée d'isolateurs afin de remédier aux inconvénients de l'isolateur.

# CHAPITRE II

## CHAPITRE II

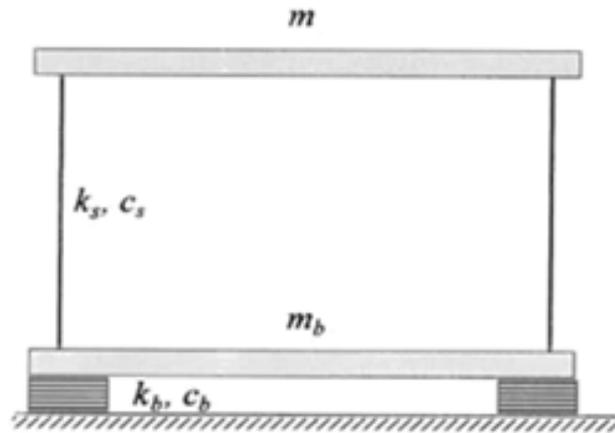
### FORMULATION MATHÉMATIQUE DU SYSTÈME DE CONTRÔLE HYBRIDE

#### II.1. Introduction

Pour chaque système de contrôle, des modèles mathématiques et les équations gouvernant le mouvement dynamique sont requis pour simuler chaque système. Afin de pouvoir résoudre des problèmes dynamiques des structures isolées à la base, un modèle mathématique du comportement de ces dernières sous excitations sismiques est nécessaire. Dans la première partie de ce chapitre, nous donnons quelques modèles mathématiques simples des principaux systèmes d'isolation parasismique qui permettent l'établissement des relations théoriques de leur comportement. Puis, on formulera les équations de mouvement pour les deux structures isolées à 2 DDL (la combinaison du système d'isolation et la superstructure) en mode linéaire; cette théorie approximative facilite le développement des matrices masse [M], amortissement [C] et rigidité [K] avec la formulation des équations de mouvement. La deuxième partie sera consacrée à la formulation mathématique des structures équipées avec un amortisseur à masse accordée (TMD) ; la formulation se fera pour un système à 2 DDL (structure + TMD). Enfin, Cela a pour but de faciliter la résolution d'un système hybride en généralisant la formulation au système à plusieurs degrés de libertés. [5] , [2].

#### II.2. Comportement linéaire d'une structure isolée à la base.

La théorie linéaire est un modèle structurel à deux degrés de liberté comme le montre la (Figure 2.1). Où  $m_s$  est la masse de la superstructure,  $k_s$  sa raideur et  $c_s$  son amortissement. La base de l'édifice a une masse  $m_b$ , une raideur  $k_b$  et un amortissement  $c_b$  [19].

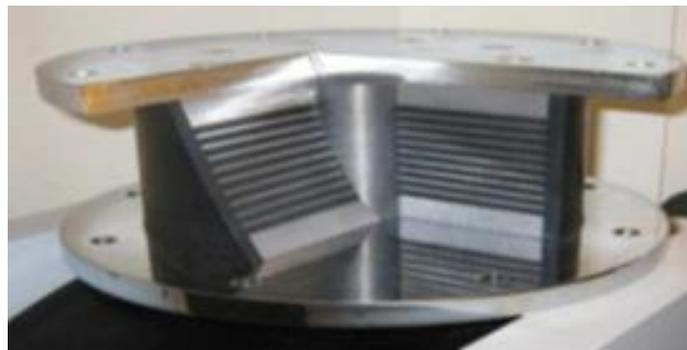


**Figure 2.1:** Schéma d'un système à 2 DDL avec isolation sismique à la base.

### II.3. Modélisation mathématique d'un appui parasismique

#### II.3.1. Système d'isolation LRB

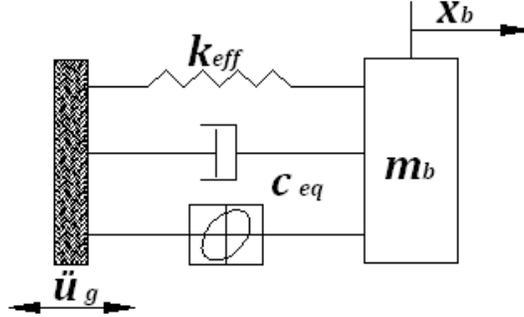
Ce type d'isolateur est constitué de couches de caoutchouc alternées et séparées par des frettes en acier autour d'un cylindre de plomb pur (figure 2.2). Les frettes métalliques confèrent à l'isolateur une grande rigidité verticale et permettent de supporter la charge verticale tandis que le cylindre en plomb contrôle les déplacements latéraux du pont et dissipe une partie de l'énergie sismique.



**Figure 2.2 :** Détails de l'appui en caoutchouc fretté avec barreau de plomb.

### II.3.2. Modèle mathématique du système LRB

Le système LRB (*Lead Rubber Bearing*) se comporte comme un amortisseur hystérétique et le modèle mathématique est donné par la figure 2.3.



**Figure 2.3 :** Modèle mathématique pour un système d'isolation de type LRB.

L'équation du mouvement du système LRB est donnée comme suit [20]:

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

$$m_b \ddot{x}_b + c_{eq} \dot{x}_b + k_{eqq} x_b = -m_b \ddot{u}_g \quad (2.2)$$

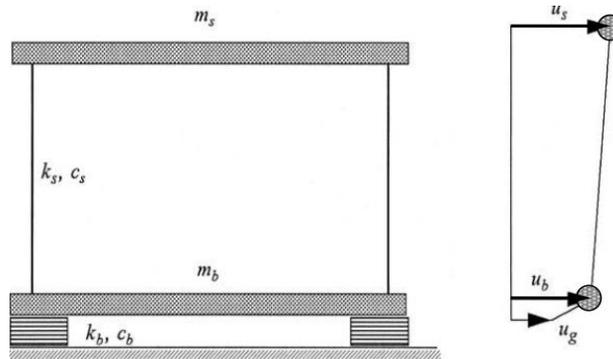
### II.4. Formulation des équations de mouvement des structures isolées à la base par analyse linéaire

La formulation des équations du mouvement pour des structures isolées par la théorie linéaire d'isolation sismique a été donnée en détail par Kelly et Naeim [19]. Cette théorie est une application directe des principes de la dynamique des structures, par conséquent ces équations permettent la détermination des propriétés modales correspondantes. Puisque la plupart des systèmes d'isolation sont intrinsèquement non linéaires, cette analyse linéaire développée par Kelly sera seulement approximative pour une telle structure isolée montée sur un système d'isolation représenté par une rigidité et amortissement équivalent.

### II-4-1- Analyse d'une structure à deux degrés de liberté

Pour comprendre le comportement d'une structure isolée à N degrés de liberté, il est utile de considérer un modèle structural simple à deux masses (figure 2.4).

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



**Figure 2.4** : Paramètres d'une structure isolée à deux degrés de liberté.

$$\begin{aligned} \text{On a :} & & v_s &= u_s - u_b \\ \text{et} & & v_b &= u_b - u_g \end{aligned}$$

Où  $u_g$  : le déplacement du sol.

### II.4.2. Equations de Mouvement

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

$$m_s \ddot{u}_s + c_s (\dot{u}_s - \dot{u}_b) + k_s (u_s - u_b) = 0 \quad (2.3)$$

$$m_b \ddot{u}_b + c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b (u_b - u_g) = 0 \quad (2.4)$$

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

$$m_s \ddot{v}_s + m_s \ddot{v}_b + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m_s \ddot{u}_g \quad (2.5)$$

$$(m_s + m_b) \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m_s + m_b) \ddot{u}_g \quad (2.6)$$

### II.4.3. Formulation matricielle

Les équations de mouvement (2.5) et (2.6) sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_b \\ x_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (2.7)$$

Avec :  $M = m_s + m_b$

L'équation (2.7) peut être écrite sous la forme générale

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{r\}\ddot{x}_g \quad (2.8)$$

avec

$$[M] = \begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \quad \{x\} = \begin{Bmatrix} x_b \\ x_s \end{Bmatrix}$$

$$\{r\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

### II.5. Conception d'un amortisseur à masse accordée linéaire appliqué à une structure à 1ddl

La conception de l'AMA remonte à 1909 lorsque **Frahm [21]** a inventé un amortisseur qui n'a pas d'amortissement propre, et ce, dans le but de réduire le mouvement des navires. L'excitation appliquée sur la structure principale est harmonique. Lorsque la fréquence de l'AMA est égale à la fréquence naturelle du système principal, le mouvement est totalement atténué au moment de production de la résonance. Par contre, l'amortisseur a subi une forte détérioration de sa performance lorsque la fréquence d'excitation s'est avérée proche aux deux nouvelles fréquences de résonance.

**Den Hartog [22]** a montré que si un taux d'amortissement est introduit dans l'AMA de Frahm, alors, la détérioration de la performance sous le changement de la fréquence de l'excitation pourra être réduite de manière significative. Den Hartog a déterminé des expressions analytiques du rapport de synchronisation et du taux d'amortissement, et ce, pour un rapport fixé de la masse de l'AMA (rapport entre la masse de l'AMA et celle de la structure principale).

Ces expressions ont été basées sur la minimisation de l'amplitude du déplacement permanent d'un système primaire non amorti soumis à une excitation harmonique. Son optimisation est fondée sur une observation qui considère que pour une structure principale sans amortissement propre, il existe deux fréquences particulières dont l'amplification dynamique est indépendante de l'amortissement de l'AMA.

**Bishop et Welbourn** [23] ont développé une méthode qui traite le cas où l'amortissement propre de la structure principale est non nul. Les paramètres optimaux ont été obtenus en appliquant un critère qui consiste à minimiser la vitesse de la structure principale.

Dans le cas où l'excitation est aléatoire, **Crandall et Mark** [24] ont déterminé la réponse quadratique moyenne d'un processus stationnaire lorsque la densité spectrale est connue. Dans ce cas, la densité spectrale est modélisée comme un bruit blanc, et de ce fait, elle est donc constante pour toutes les fréquences.

Dans le cas d'une structure amortie, il est difficile d'obtenir, pour les paramètres optimaux, des solutions sous forme analytiques. **Ioi et Ikeda** [25] ont présenté des formules empiriques des paramètres de l'AMA basés sur la minimisation de l'amplitude du déplacement maximal permanent de la structure principale, et ce, pour une structure légèrement amortie. Le rapport de synchronisation est déterminé lorsque les pics de résonance ont des amplitudes égales. L'amortissement est choisi de telle sorte que la courbe de l'amplification dynamique a une tangente horizontale au point le plus élevé. L'inconvénient de cette méthode c'est que ces paramètres sont valables uniquement lorsque le rapport de masse de l'AMA est très élevé.

**Randel et al** [26] ont développé des graphiques obtenus par l'optimisation numérique de l'amplitude du déplacement maximal permanent de la structure principale amortie. Cette étude est traitée dans le cas où une excitation harmonique est appliquée sur la masse.

**Warburton** [27] a déterminé les paramètres optimaux de l'AMA en fonction de la réponse de la structure principale à minimiser (déplacement, vitesse, accélération). La structure principale non amortie est excitée soit à sa base ou soit à la masse. L'excitation est traitée en deux types : harmonique et aléatoire. Les formules analytiques des paramètres optimaux de synchronisation et du taux d'amortissement dépendent uniquement du rapport de la masse de l'AMA.

**Sadek et al** [28] ont proposé une méthode pour la conception de l'AMA dont le but est d'avoir des taux d'amortissement modaux identiques. Ils ont appliqué cette procédure dans le cas des excitations sismiques et ils ont constaté, en utilisant un AMA optimal, une réduction dans les déplacements et les accélérations qui dépassent les 50 %.

Dans le cas où le taux d'amortissement de la structure principale est non nul, la courbe de l'amplification dynamique ne passe plus par deux points indépendants de l'amortissement de l'AMA. Dans ce contexte, **Ghosh et Basu** [29] ont présenté une expression analytique pour le rapport de synchronisation optimal de l'AMA. Cette expression est basée sur la théorie des points fixes (proposé par Den Hartog) qui est approximativement valable pour des taux d'amortissements faibles à modérés. L'expression proposée pour le paramètre de synchronisation optimal est une fonction qui dépend des deux paramètres tels que le rapport de la masse et le taux d'amortissement. Cette expression a été évaluée pour différentes valeurs de ces paramètres. Les valeurs relatives aux rapports de synchronisation optimaux proposées ont été déterminées pour être en accord étroit avec celles obtenues numériquement.

### II.5.1. Bâtiments équipés d'un amortisseur à masse accordée (TMD)

Le concept de l'amortisseur à masse accordée autrement (*Tuned Mass Damper*) est de mettre le mouvement de la masse secondaire attachée à la structure en résonance avec le mouvement de la structure sous les charges sismiques ; 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. Par conséquent, la force d'inertie créée par le mouvement de masse TMD fonctionne comme une force d'amortissement sur le système primaire **LIC** [30].

On admet les notations suivantes :

- Fréquence naturelle du système auxiliaire (TMD)  $\omega_{tmd} = \sqrt{k_{tmd}/m_{tmd}}$
- Fréquence naturelle du système primaire (structure)  $\omega_s = \sqrt{k_s/m_s}$
- Le rapport des masses  $\mu = \frac{m_{tmd}}{m_s}$

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

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 cités en littérature sont présentés au tableau (2.1)

**Tableau 2.1 : Sommaire des paramètres optimaux du TMD**

| <b>Chercheur</b>      | <b>Rapport Fréquentiel</b>  | <b>Amortissement</b>  |
|-----------------------|---|---|
| <i>Den Hartog</i>     | $\frac{1}{1+\mu}$   | $\sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}}$  |
|                       | La première équation des paramètres optimaux d'un TMD pour un système à 1DLL non amorti sous excitation harmonique. |   |
| <i>Warburton</i>      | $\frac{\sqrt{(1-\mu/2)}}{1+\mu}$  | $\sqrt{\frac{\mu(1-\mu/2)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}}$   |
|                       | Résultats basés sur une excitation whitenoise pour un système 1DLL non amorti.                                      |   |
| <i>Fujino and Abe</i> | $\frac{\sqrt{(1-\mu/2)}}{1+\mu}$  | $\frac{1}{2} * \sqrt{\frac{\mu(1-3\mu/4)}{4(1+\mu)(1+\mu/2)}}$  |
|                       | Résultats basés sur une excitation aléatoire d'un système 2DLL non amorti.  |   |
| <i>Feng et Mita</i>   | $\frac{\sqrt{(1-\mu/2)}}{1+\mu}$  | I. $\frac{1}{2} * \sqrt{(1+\mu).\gamma^4 + \gamma^2 + \frac{1-3(1+\mu)^2.\gamma^2}{(1+\mu)^3}}$<br><br>$\frac{\gamma}{2} * \sqrt{(1+\mu).\gamma^2 + 1 - \frac{1}{(1+\mu)}}$ |
|                       | Résultats basés sur excitation whitenoise pour un système 2DLL<br>I) pour déplacement<br>II) pour accélération      |   |
| <i>Sadek et al</i>    | a. $\frac{1}{1+\mu}$<br><br>b. $\frac{1}{1+\mu} (1 - \zeta_s \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}})$                             | a. $\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$<br><br>b. $\frac{\zeta_s}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$  |
|                       | Résultats basés sur excitation séismique d'un système à 30DLL<br>a) amorti<br>b) non amorti                         |   |

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Rüdinger</b>   | $\frac{\sqrt{(2+\mu)}}{2.(1+\mu)^2}$  | $\sqrt{\frac{\mu(4+3\mu)}{4(1+\mu)^3}}$   |
| Résultats basés sur une excitation white noise d'un système 1DLL amorti et non amorti ainsi que linéaire et non linéaire  |   |   |
| <b>Krenk et Hogsberg</b>  | $\frac{1}{1+\mu}$   | $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{1+\mu}}$   |
| Résultats basés sur excitation white noise et une force concentrée d'un système 2DLL non amorti.  |   |   |
| <b>Hoang et al</b>  | i. $\frac{\sqrt{(1-6\mu)(1+\mu^2)}}{1+\mu} - 0.7\zeta_s$<br>ii. $\frac{\sqrt{(1-\frac{\delta\mu}{6})}}{1+\mu} - \frac{0.7\zeta_s}{1-\frac{\mu}{2}}$<br>iii. $\frac{\sqrt{(1-\frac{\mu}{2})}}{1+\mu} - \frac{0.7\zeta_s}{1-\frac{\mu}{2}}$ | i. $\frac{\sqrt{\mu(1+2.5\mu+2\mu^2)}}{2(1+2.7\mu)}$<br>ii. $\sqrt{\frac{\mu(1-\frac{\mu}{4})}{4(1+\mu)(1-\frac{\mu}{2})}} + 0.25\mu\zeta_s$<br>iii. $\sqrt{\frac{\mu(1-\frac{\mu}{4})}{4(1+\mu)(1-\frac{\mu}{2})}} + 0.25\mu\zeta_s$ |
| Résultats basés sur excitation sismique d'un système 1DLL amorti et du rapport suivant : $\delta = \frac{W_g}{W_s}$<br>i. $\delta=1$ ; ii. $1 < \delta < 3$ ; iii. $\delta \geq 3$<br>tel que $\omega_g$ : est la fréquence dominante du séisme et $\omega_s$ est la fréquence de la structure. |   |   |

D'après les études faites par Soto et al [31]. les paramètres optimaux du TMD n'ont pas une grande influence sur la réduction de la réponse structurale, pour cela la formule connue de Krenk and Hogsberg 2008 [32] est considérée dans notre cas :

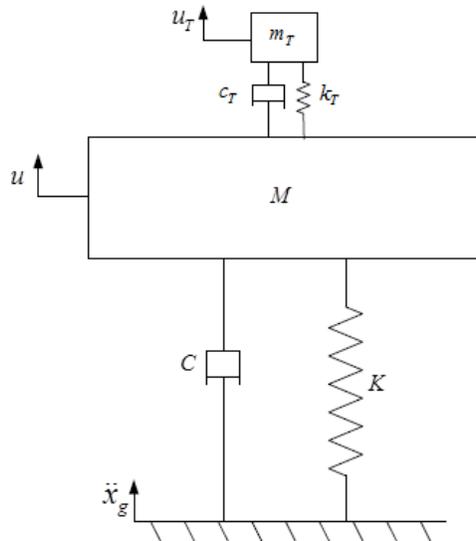
$$f_{tmd} = \frac{f_s}{\mu+1}; \quad k_{tmd} = f_{tmd}^2 \cdot m_{tmd} \quad \text{et} \quad c_{tmd} = 2 \times \chi_{tmd} \times m_{tmd} \times f_{tmd}$$

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%. [33]

### II.5.2. 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 à la figure 2.5. Le système principal a une masse  $m_s$  appuyée au sol par l'intermédiaire de ressort avec une raideur  $k_s$  et un amortisseur visqueux  $c_s$ . 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  $m_s$  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  $m_s$  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, comme illustré à la figure (2.5) [22].



**Figure 2.5** : Système à 2 degrés de liberté sous action sismique. [12]

Le déplacement relatif  $x_s$  et  $x_T$  des masses  $m_s$  et  $m_T$  par rapport au mouvement de la Terre et en conjonction avec celui-ci s'exprime comme suit :

$$x_s = x_s - x_g \quad (2.9)$$

$$x_T = x_T - x_g \quad (2.10)$$

Le calcul des vitesses et accélérations relatives, à partir des équations de l'ensemble du système donne :

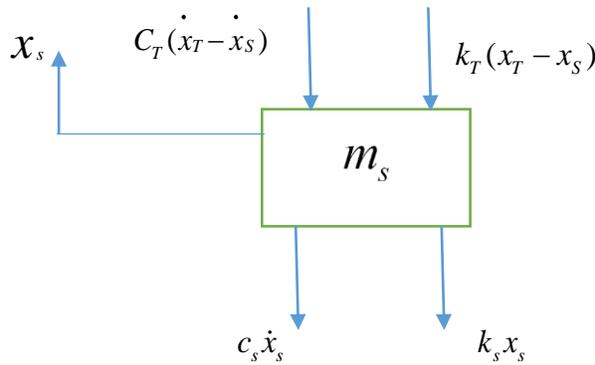
$$\dot{x}_s = \dot{x}_s - \dot{x}_g \quad (2.11)$$

$$\dot{x}_T = \dot{x}_T - \dot{x}_g \quad (2.12)$$

$$\ddot{x}_s = \ddot{x}_s - \ddot{x}_g \quad (2.13)$$

$$\ddot{x}_T = \ddot{x}_T - \ddot{x}_g \quad (2.14)$$

Afin de formuler les équations de mouvement, il est nécessaire de concevoir les diagrammes de corps libre des masses du système. Le diagramme de corps libre pour les systèmes principaux de masse  $m_s$  est indiqué dans la figure 2.6.



**Figure 2.6** : Diagramme de corps libre de la masse  $m_s$ .

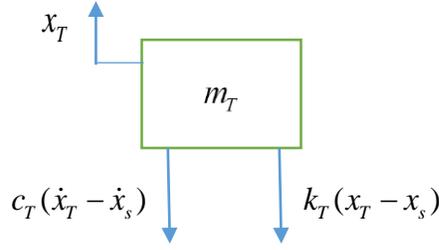
L'équation de mouvement est obtenue par application de la seconde loi de Newton, soit :

$$m_s \ddot{x}_s = -k_T (x_s - x_T) - c_T (\dot{x}_s - \dot{x}_T) - k_s x_s - c_s \dot{x}_s \quad (2.15)$$

En substituant les équations des déplacements relatifs, des vitesses relatives et des accélérations relatives dans l'équation, on obtient l'équation de mouvement suivante :

$$m_s \ddot{x}_s + (c_s + c_T) \dot{x}_s + (k_s + k_T) x_s - c_T \dot{x}_T - k_T x_T = -m_s \ddot{x}_g \quad (2.16)$$

Le diagramme du corps libre pour les systèmes secondaires de masse  $m_t$  est comme suit :



**Figure 2.7** : Diagramme de corps libre de la masse  $m_T$  du TMD.

En appliquant la seconde loi de Newton, l'équation de mouvement pour la masse est :

$$m_T \ddot{x}_T = -k_T(x_T - x_s) - c_T(\dot{x}_T - \dot{x}_s) \quad (2.17)$$

En substituant les équations des déplacements relatifs, vitesses relatives et des accélérations relatives dans l'équation, on obtient l'équation de mouvement suivante :

$$m_T \ddot{x}_T + c_T \dot{x}_T + k_T x_T - c_T \dot{x}_s - k_T x_s = -m_T \ddot{x}_g \quad (2.18)$$

Ensuite, les équations de mouvement qui décrivent l'ensemble du système sont données avec des équations qui peuvent être écrites sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_T & -c_T \\ -c_T & c_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_t & -k_t \\ -k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ x_t \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_s \\ m_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (2.19)$$

En introduisant les vecteurs de déplacement relatifs, de vitesse et d'accélération du système, on écrit :

$$x = \begin{bmatrix} x_s \\ x_T \end{bmatrix}, \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_T \end{bmatrix}, \quad \ddot{x} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_T \end{bmatrix}$$

Les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité:

$$M = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_T \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_s + c_T & -c_T \\ -c_T & c_T \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k_s + k_T & -k_T \\ -k_T & k_T \end{bmatrix}$$

et le vecteur  $L$

$$L = M\Gamma = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Nous permettent d'écrire le système d'équation de mouvement sous la forme suivante :

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = -M\Gamma \cdot \ddot{x}_g \quad (2.21)$$

## II.6. Conclusion

Il est clair que les bâtiments qui ont plusieurs degrés de liberté et sont munis d'isolateurs à la base et d'amortisseur à masse accordée, sont gouvernés par des équations de mouvement complexes difficiles à résoudre par des méthodes classiques, d'où le recours aux méthodes numériques précises devient nécessaire voire même indispensable.

# CHAPITRE III

## CHAPITRE III

### MODELISATION ET RESOLUTION NUMERIQUE

#### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous expliquerons la combinaison entre un modèle mathématique d'une structure isolée à la base et équipée d'un amortisseur à masse accordée sera formulée et mise en place pour obtenir un modèle à 3 DDL (isolateur + structure + TMD) et aussi la forme générale des équations de mouvement pour plus de deux degrés de liberté. Étant donné que la formulation d'équations mathématiques pour des systèmes à plusieurs degrés de liberté est des équations différentielles complexes dont la solution analytique est difficile, et pour ce type d'équations complexes, nous utilisons des fonctions de transport telles que la représentation de la zone d'état, la transformation de Laplace, etc. Nous utiliserons la formule de transfert basée sur la représentation d'état pour réduire les équations différentielles d'ordre (n) aux équations différentielles de premier ordre.

#### III.2. Hypothèses de calcul

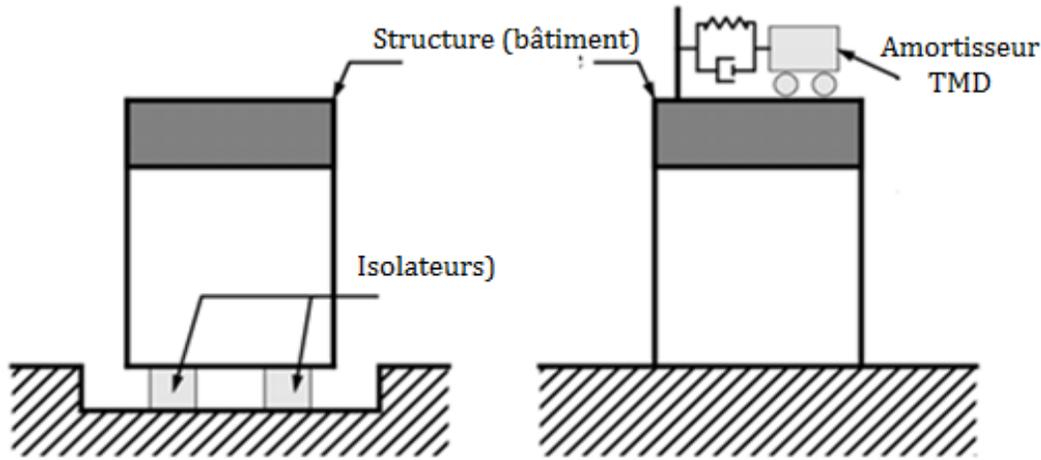
Pour analyser la réponse sismique d'un bâtiment équipé avec des dispositifs de contrôle, quelques hypothèses sont introduites [34] :

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

fondations ne sont pas massives (fondations superficielles, par exemple).

### III.3. formulation d'un système hybride combinant une structure isolée avec TMD

Dans notre cas d'étude, le système hybride passif est constitué d'un isolateur parasismique et un TMD passif. Le but de l'installation du TMD est d'améliorer l'efficacité du système d'isolation à la base. Pendant les fortes excitations sismiques, les bâtiments peuvent subir des déplacements importants à la base. En installant le TMD, on s'attend à ce que le déplacement de la base puisse être réduit tout en préservant un déplacement inter-étage réduit. La Figure (3.1) montre une structure à 1 DLL équipée d'un isolateur à la base et d'un TMD au sommet, le tout formant un système à 3 DLL.



**Figure 3.1** : structure avec contrôle hybride (isolation + TMD).

L'écriture de l'équation de mouvement dynamique de cette structure se fera en combinant les équations de mouvement de la structure isolée et celle de la structure équipée d'un TMD. Le tout résultera dans l'équation suivante [35] :

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 \\ 0 & M_s & 0 \\ 0 & 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b + c_s & -c_s & 0 \\ -c_s & c_s + c_t & -c_t \\ 0 & -c_t & c_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_s \\ \dot{x}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b + k_s & -k_s & 0 \\ -k_s & k_s + k_t & -k_t \\ 0 & -k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_b \\ x_s \\ x_t \end{Bmatrix} \\
 & = - \begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 \\ 0 & M_s & 0 \\ 0 & 0 & m_t \end{bmatrix} \{\Gamma\} \{\ddot{x}_g\}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

### III.4. Généralisation de l'équation pour un système à plusieurs degrés de liberté

L'équation d'un bâtiment isolé à la base et équipé d'un TMD passif installé au dernier étage illustré sur la Figure (3.2) peut s'écrire comme suit [35, 36], [37]:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = -M \Gamma \ddot{x}_g \quad (3.2)$$

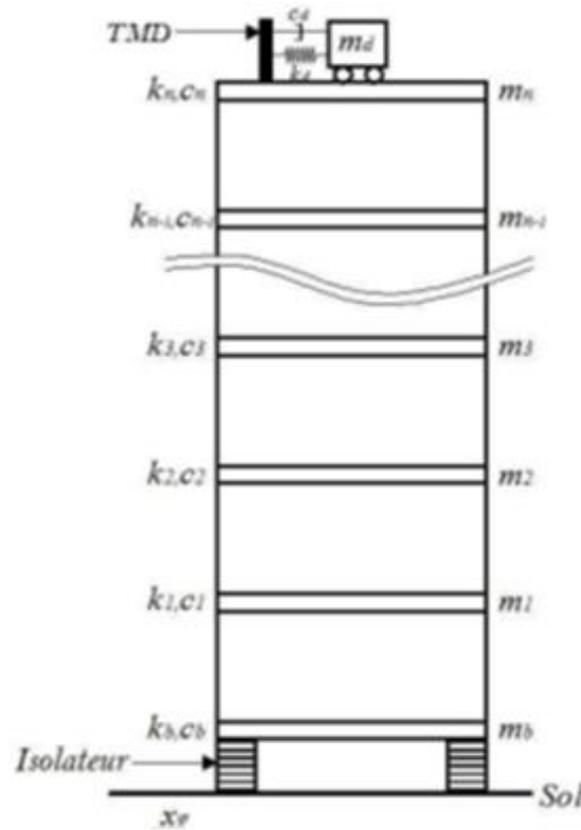
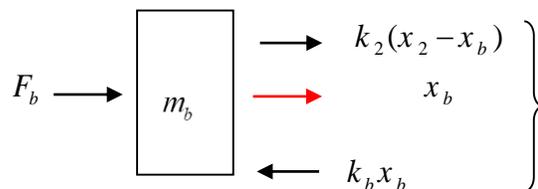


Figure 3.2 : Structure Hybride à plusieurs degrés de liberté (NDDL). [5]

❖ Pour le 1<sup>er</sup> niveau (l'isolation à la base) en appliquant la seconde loi de Newton :

$$\sum F = m_b \ddot{x}_b \quad (3.3)$$



on a

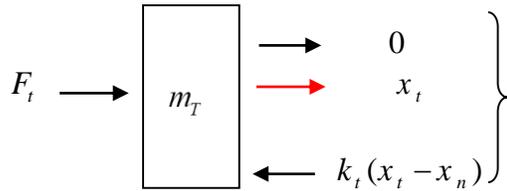
$$m_b \ddot{x}_b = F_b - k_b x_b + k_2 (x_2 - x_b) \quad (3.4)$$

$$F_b = m_b \ddot{x}_b + k_b x_b - k_2 (x_2 - x_b) \quad (3.5)$$

$$F_b = m_b \ddot{x}_b + (k_b + k_2) x_b - k_2 x_2 \quad (3.6)$$

❖ Pour le n<sup>ème</sup> niveau (dernier étage de la structure)

$$\sum F = m_t \ddot{x}_t \quad (3.7)$$



$$m_t \ddot{x}_t = F_t - k_t x_{t-1} + k_t x_t \quad (3.8)$$

$$F_4 = m_4 \ddot{x}_4 + k_4 x_3 - k_4 x_4 \quad (3.9)$$

$$F_4 = m_4 \ddot{x}_4 - k_4 x_3 + k_4 x_4 \quad (3.10)$$

On écrit les équations sous la forme suivante :

$$m_b \ddot{x}_b + (k_b + k_2) x_b - k_2 x_2 = F_b \quad (3.11)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_b + (k_2 + k_3) x_2 - k_3 x_3 = F_2 \quad (3.12)$$

$$m_n \ddot{x}_n - k_n x_{n-1} + (k_n + k_t) x_n - k_t x_t = F_n \quad (3.13)$$

$$m_t \ddot{x}_t - k_t x_n + k_t x_t = F_t \quad (3.14)$$

En simplifiant ces équations sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_2 \\ . \\ . \\ \ddot{x}_n \\ \ddot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_n & k_n + k_t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ x_2 \\ . \\ . \\ x_n \\ x_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_b \\ F_2 \\ . \\ . \\ F_n \\ F_t \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

➤ L'équation générale

$$[M]\ddot{x} + [K]x = F$$

De la même manière, on introduit l'amortissement et on écrit l'équation de mouvement du bâtiment pour une vibration forcée amortie comme le montre l'équation (3.16).

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_2 \\ . \\ . \\ \ddot{x}_n \\ \ddot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_n & c_n + c_t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_2 \\ . \\ . \\ \dot{x}_n \\ \dot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_n & k_n + k_t & -k_t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ x_2 \\ . \\ . \\ x_n \\ x_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_b \\ F_2 \\ . \\ . \\ F_n \\ F_t \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

➤ L'équation générale est la suivante :

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F \quad (3.17)$$

**2<sup>ème</sup> cas :**

On prend en considération l'accélération du sol :

$$m_b(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) + (k_b + k_2)x_b - k_2x_2 = 0 \quad (3.18)$$

$$m_2(\ddot{x}_2 + \ddot{x}_g) - k_2x_b + (k_2 + k_3)x_2 - k_3x_3 = 0 \quad (3.19)$$

$$m_n(\ddot{x}_n + \ddot{x}_g) - k_nx_2 + (k_n + k_t)x_n - k_tx_t = 0 \quad (3.20)$$

$$m_t(\ddot{x}_t + \ddot{x}_g) - k_tx_n + k_tx_t = 0 \quad (3.21)$$



$$m_b\ddot{x}_b + (k_b + k_2)x_b - k_2x_2 = -m_b\ddot{x}_g$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_b + (k_2 + k_3)x_2 - k_3 x_3 = -m_2 \ddot{x}_g$$

$$m_n \ddot{x}_n - k_n x_2 + (k_n + k_t)x_n - k_t x_t = -m_n \ddot{x}_g$$

$$m_t \ddot{x}_t - k_t x_n + k_t x_t = -m_t \ddot{x}_g$$

On écrit les équations sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_2 \\ . \\ . \\ \ddot{x}_n \\ \ddot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_n & k_n + k_t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ x_2 \\ . \\ . \\ x_n \\ x_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_b \\ m_2 \\ . \\ . \\ m_n \\ m_t \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

L'équation générale du mouvement pour un degré de liberté :

$$M\ddot{x} + Kx = -M \{1\} \ddot{x}_g \tag{3.22}$$

### III.5. Equation de mouvement d'un bâtiment sous chargement extérieur

#### III.5.1. Solution en représentation d'état (state-space)

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

Par la représentation d'état (*state-space*), une équation différentielle du 2<sup>ème</sup> ordre est écrite sous forme de deux équations différentielles du 1<sup>er</sup> ordre.

D'une manière générale, une équation différentielle du n<sup>ème</sup> ordre est transformée en n équations du premier ordre (l'ordre des équations différentielles devient donc le nombre d'équations différentielles du premier ordre).Data [35]

### III.5.1.1. La forme générale

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

$$\{\dot{X}\} = [A]\{X\} + [B]\{U\} \quad (3.23)$$

$$\{Y\} = [C]\{X\} + [D]\{U\} \quad (3.24)$$

Dans la formulation par représentation d'état « *state space* » on considère quatre matrices : **[A]**, **[B]**, **[C]**, **[D]**[35, 38].

avec:

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

**[B]** : La matrice d'entrée, (*input matrix*) ; elle dépend des entrées (*inputs* : toute force extérieur agissant sur le système dynamique), elle est directement liée à  $\dot{X}$  et  $U$  comme le montre l'équation (3.1).

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

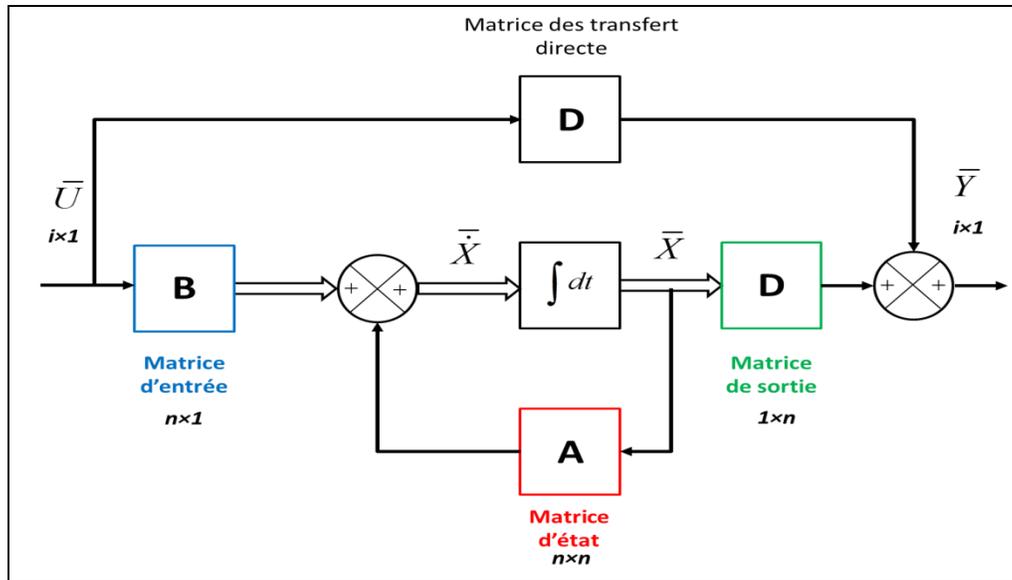
**[D]** : la matrice de transmission directe entre les entrées et les sorties du système (*outputs* et *inputs*) dans les problèmes de dynamique cette matrice est généralement nulle.

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

**i** : nombre des entrées *inputs*

**j** : nombre des sorties *outputs*

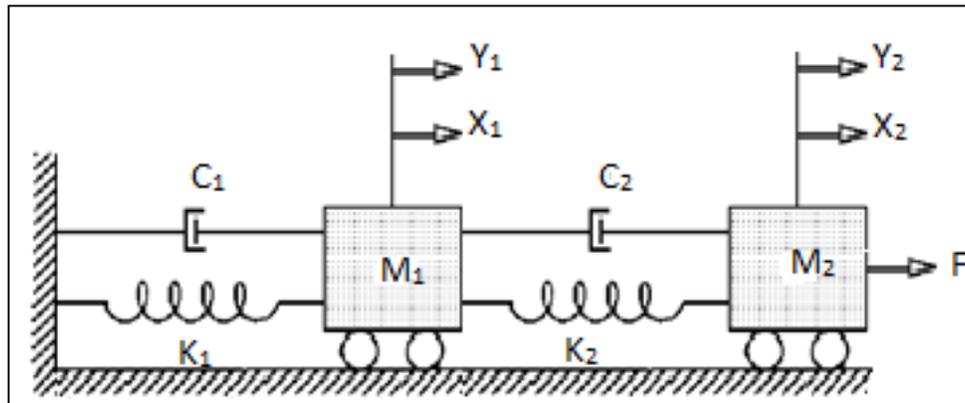
$\{U\}$  : Vecteur d'entrée (*input*)



**Figure 3.3** : La forme générale de la représentation d'état « state space », SISO (*single input, single output*)[38, 39]

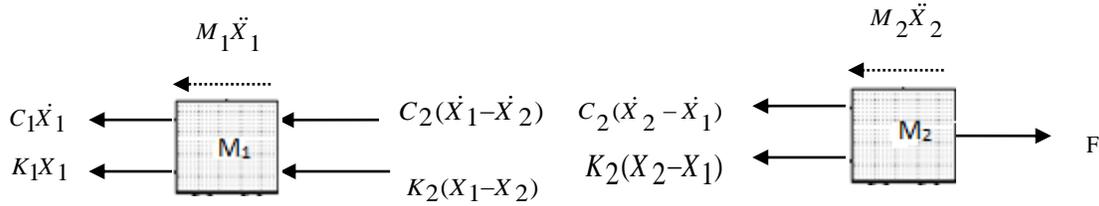
### III.5.2. Exemple d'un système à deux degrés de libertés sous excitation sismique $F(t)$

Dans ce travail, nous étudions un système mécanique « MRA » (masse-ressort-amortisseur) à deux degrés de liberté (2DDL), pour la mise en œuvre de la résolution mathématique par la représentation d'état « *state space* ».



**Figure 3.4** : Système à 2 DDL

Diagramme de corps libre de chaque masse



**1<sup>er</sup> étape de solution**

Après l'application de la loi de Newton, on trouve :

$$\sum F_x = M \times \ddot{X} \tag{3.25}$$

**2<sup>émé</sup> étape de solution**

L'équation de mouvement globale du système est donnée par :

$$[M_s]\{\ddot{X}_s\} + [C_s]\{\dot{X}_s\} + [K_s]\{X_s\} = F \tag{3.26}$$

où,  $[M_s]$  ,  $[K_s]$  ,  $[C_s]$  sont respectivement la matrice masse, la matrice de rigidité et la matrice d'amortissement du système,  $\{\ddot{X}_s\}$  ,  $\{\dot{X}_s\}$  ,  $\{X_s\}$  sont respectivement le vecteur d'accélération, le vecteur de vitesse et le vecteur de déplacement globaux du système.

**3<sup>émé</sup> étape de solution**

**a- Equation d'équilibre dynamique pour la masse  $M_1$  :**

$$M_1\ddot{X}_1 + C_1\dot{X}_1 + C_2(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_1X_1 + K_2(X_1 - X_2) = 0 \tag{3.27}$$

Posant :

$$\dot{X}_1 = X_3 = V_1 \Leftrightarrow \ddot{X}_1 = \dot{X}_3 \tag{3.28}$$

$$\dot{X}_2 = X_4 = V_2 \tag{3.29}$$

Après réarrangement, l'équation devient:

$$M_1\dot{X}_3 + C_1X_3 + C_2(X_3 - X_4) + K_1X_1 + K_2(X_1 - X_2) \tag{3.30}$$

$$M_1\dot{X}_3 = -C_1X_3 - C_2(X_3 - X_4) - K_1X_1 - K_2(X_1 - X_2) \tag{3.31}$$



$$Y_1(t) = 1 \times X_1(t) + 0 \times X_2(t) + 0 \times X_3(t) + 0 \times X_4(t) \quad (3.40)$$

$$Y_2(t) = 0 \times X_1(t) + 1 \times X_2(t) + 0 \times X_3(t) + 0 \times X_4(t) \quad (3.41)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} j \times 2n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \times 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

**d) Taille de matrice de transmission directe [D] :** la taille de matrice de transmission directe est ( $j \times 2n$ )

$$[D] = \begin{bmatrix} j \times i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \times 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

**e) Taille de vecteur d'entrée {U} :** la taille de vecteur d'entrée est ( $i \times 1$ )

$$\{U\} = \begin{pmatrix} i \times 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \times 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

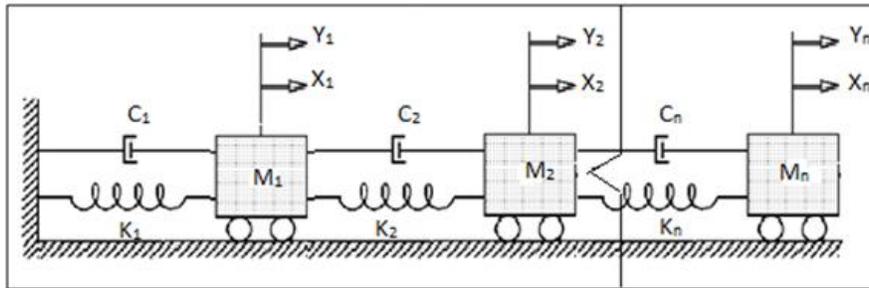
Alors la solution mathématique de l'exemple précédent par la représentation d'état « *State space* », sur forme matricielle comme suit :

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-K_1 - K_2}{M_1} & \frac{K_2}{M_1} & \frac{-C_1 - C_2}{M_1} & \frac{C_2}{M_1} \\ \frac{K_2}{M_2} & \frac{-K_2}{M_2} & \frac{C_2}{M_2} & \frac{-C_2}{M_2} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

### III.5.3. Exemple d'un système à plusieurs degrés de libertés (n)

La solution générale par représentation d'état « *state space* » pour un système à NDDL montré en figure (3.6) est donnée sous forme matricielle comme suit :



**Figure 3.5** : Système dynamique pour plusieurs degrés de liberté (NDDL).

$$\begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \vdots \\ \dot{X}_n \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \times \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{ni} \end{pmatrix} \times \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \end{Bmatrix} \quad (3.47)$$

### III.6. Exemple d'un système pour 5 DDL

Dans cet exemple, nous étudions un système avec contrôle hybride (isolation à la base + TMD)

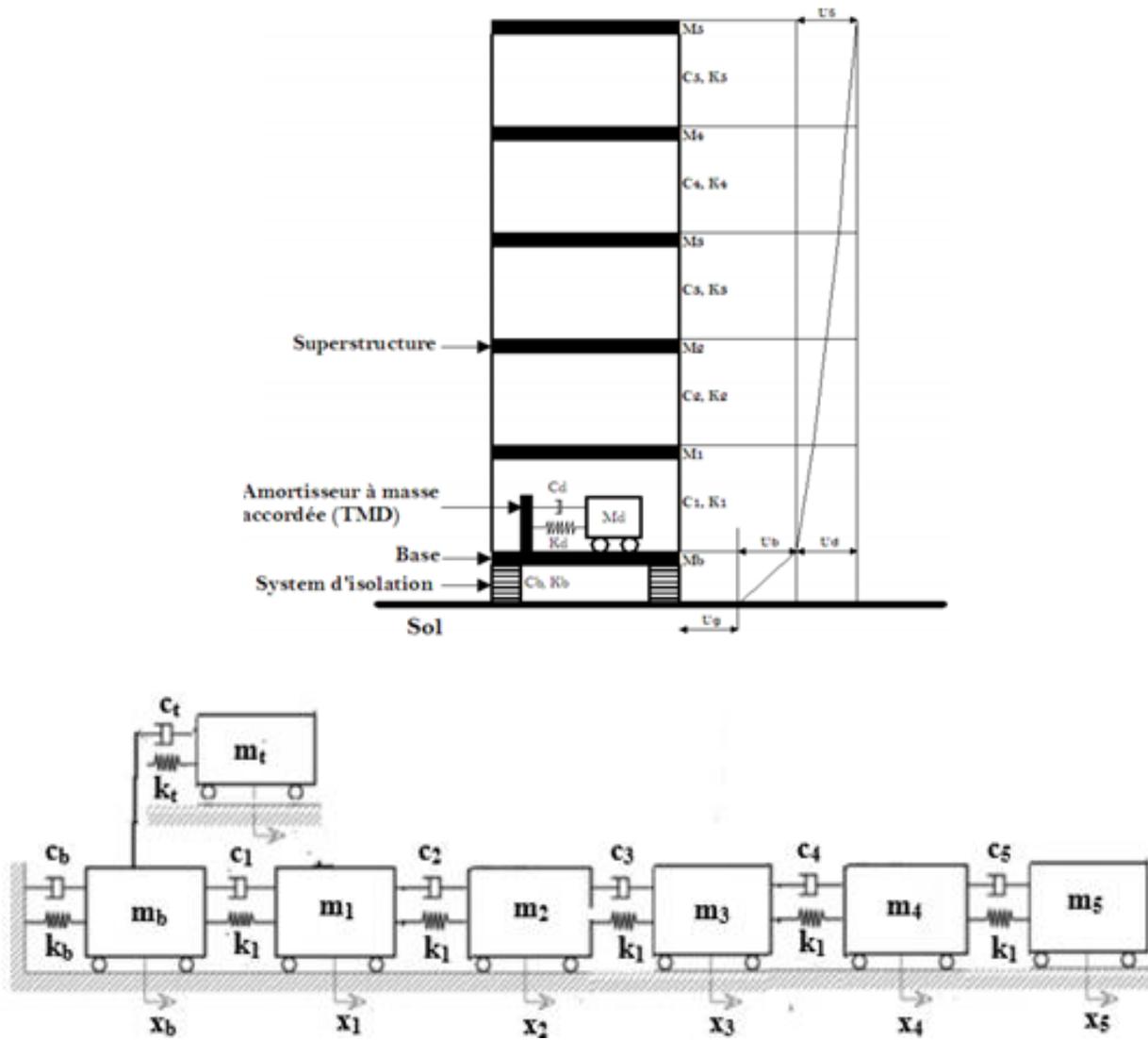
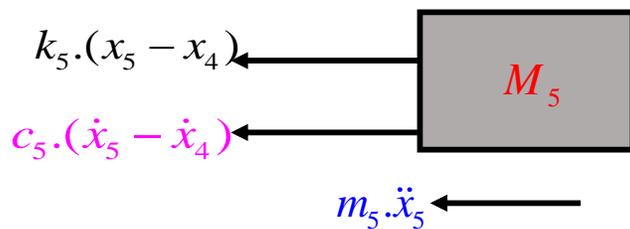


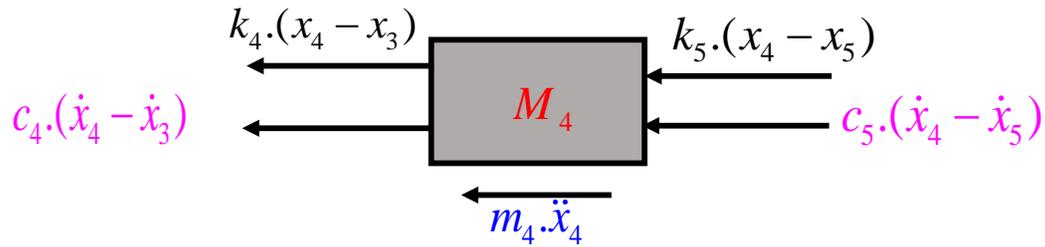
Figure 3.6 : Bâtiment et Modèle rhéologique pour une structure à 5 DDL.

#### III.6.1. Diagramme de corps libre pour les différentes masses

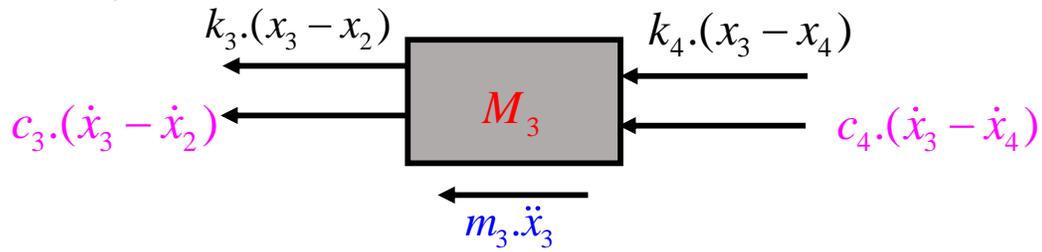
##### 1. Masse $M_5$



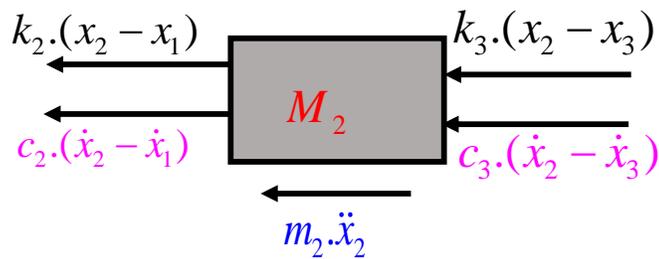
2. Masse  $M_4$



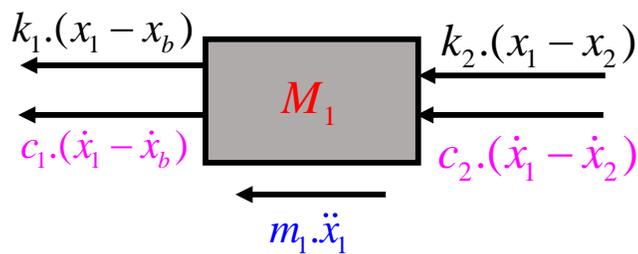
3. Masse  $M_3$



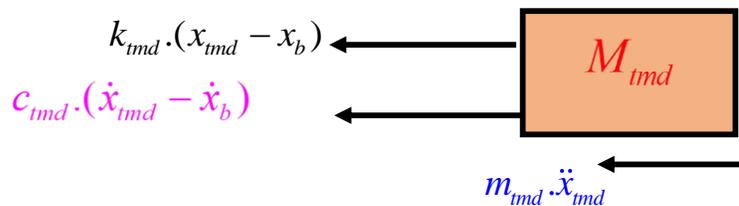
4. Masse  $M_2$

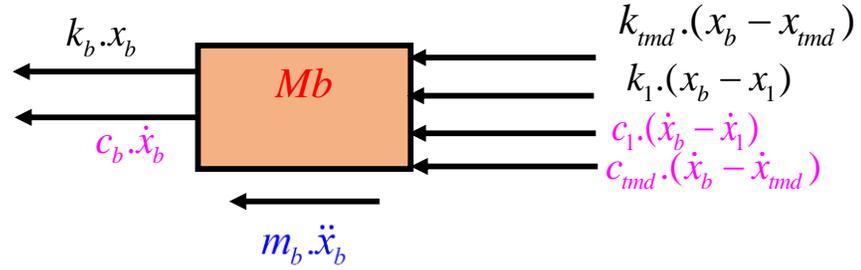


5. Masse  $M_1$



6. Masse  $M_{tmd}$



7. Masse  $M_b$ 


## III.6.2. Equations de mouvement

$$m_{tmd}.\ddot{x}_{tmd} + c_{tmd}.\dot{(x}_{tmd} - \dot{x}_b) + k_{tmd}.(x_{tmd} - x_b) = 0 \quad (3.48)$$

$$m_5.\ddot{x}_5 + c_5.\dot{(x}_5 - \dot{x}_4) + k_5.(x_5 - x_4) = 0 \quad (3.49)$$

$$m_4.\ddot{x}_4 + c_4.\dot{(x}_4 - \dot{x}_3) + k_4.(x_4 - x_3) + c_5.\dot{(x}_4 - \dot{x}_5) + k_5.(x_4 - x_5) = 0 \quad (3.50)$$

$$m_3.\ddot{x}_3 + c_3.\dot{(x}_3 - \dot{x}_2) + k_3.(x_3 - x_2) + c_4.\dot{(x}_3 - \dot{x}_4) + k_4.(x_3 - x_4) = 0 \quad (3.51)$$

$$m_2.\ddot{x}_2 + c_2.\dot{(x}_2 - \dot{x}_1) + k_2.(x_2 - x_1) + c_3.\dot{(x}_2 - \dot{x}_3) + k_3.(x_2 - x_3) = 0 \quad (3.52)$$

$$m_1.\ddot{x}_1 + c_1.\dot{(x}_1 - \dot{x}_b) + k_1.(x_1 - x_b) + c_2.\dot{(x}_1 - \dot{x}_2) + k_2.(x_1 - x_2) = 0 \quad (3.53)$$

$$m_b.\ddot{x}_b + c_b.\dot{x}_b + k_b.x_b + c_{tmd}.\dot{(x}_b - \dot{x}_{tmd}) + k_{tmd}.(x_b - x_{tmd}) + c_1.\dot{(x}_b - \dot{x}_1) + k_1.(x_b - x_1) = 0 \quad (3.54)$$

➤ Les équations peuvent être réarrangées comme suit :

$$m_{tmd}.\ddot{x}_{tmd} + c_{tmd}.\dot{x}_{tmd} - c_{tmd}.\dot{x}_b + k_{tmd}.x_{tmd} - k_{tmd}.x_b = 0 \quad (3.55)$$

$$m_5.\ddot{x}_5 + c_5.\dot{x}_5 - c_5.\dot{x}_4 + k_5.x_5 - k_5.x_4 = 0 \quad (3.56)$$

$$m_3.\ddot{x}_3 - c_4.\dot{x}_4 + (c_4 + c_3).\dot{x}_3 - c_3.\dot{x}_2 - k_4.x_4 + (k_4 + k_3).x_3 - k_3.x_2 = 0 \quad (3.57)$$

$$m_2.\ddot{x}_2 - c_3.\dot{x}_3 + (c_3 + c_2).\dot{x}_2 - c_2.\dot{x}_1 - k_3.x_3 + (k_3 + k_2).x_2 - k_2.x_1 = 0 \quad (3.58)$$

$$m_1.\ddot{x}_1 - c_2.\dot{x}_2 + (c_2 + c_1).\dot{x}_1 - c_1.\dot{x}_b - k_2.x_2 + (k_2 + k_1).x_1 - k_1.x_b = 0 \quad (3.59)$$

$$m_b.\ddot{x}_b - c_1.\dot{x}_1 - c_{tmd}.\dot{x}_{tmd} + (c_1 + c_{tmd} + c_b).\dot{x}_b - k_1.x_1 - k_{tmd}.x_{tmd} + (k_1 + k_{tmd} + k_b).x_b = 0 \quad (3.60)$$

### III.6.3. Equations gouvernant le mouvement

➤ Le vecteur de déplacement relatif est le suivant :

$$\mathbf{X}^T = [x_{imdi}, x_5, x_4, x_3, x_2, x_1, x_b]$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{imd} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{imd} \\ \ddot{x}_5 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_b \end{bmatrix}$$

(3.61)

$$C = \begin{bmatrix} c_{imd} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{imd} \\ 0 & c_5 & -c_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_5 & c_5 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_3 & c_3 + c_2 & -c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_2 & c_2 + c_1 & -c_1 \\ -c_{imd} & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & c_b + c_{imd} + c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_{imd} \\ \dot{x}_b \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{imd} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{imd} \\ 0 & k_5 & -k_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_5 & k_5 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_3 & k_3 + k_2 & -k_2 & -k_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & k_2 + k_1 & 0 \\ -k_{imd} & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_1 & k_b + k_{imd} + k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_5 \\ x_4 \\ x_3 \\ x_2 \\ x_1 \\ x_{imd} \\ x_b \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

## III.6.3.1 Représentation d'état (state-space)

$$\ddot{x}_{imd} = -\frac{c_{imd}}{m_{imd}} \dot{x}_{imd} + \frac{c_{imd}}{m_{imd}} \dot{x}_b - \frac{k_{imd}}{m_{imd}} x_{imd} + \frac{k_{imd}}{m_{imd}} x_b \quad (3.64)$$

$$\ddot{x}_5 = -\frac{c_5}{m_5} \dot{x}_5 + \frac{c_5}{m_5} \dot{x}_4 - \frac{k_5}{m_5} x_5 + \frac{k_5}{m_5} x_4 \quad (3.65)$$

$$\ddot{x}_4 = \frac{c_5}{m_4} \dot{x}_5 - \frac{(c_5 + c_4)}{m_4} \dot{x}_4 + \frac{c_4}{m_4} \dot{x}_3 + \frac{k_5}{m_4} x_5 - \frac{(k_5 + k_4)}{m_4} x_4 + \frac{k_4}{m_4} x_3 \quad (3.66)$$

$$\ddot{x}_3 = \frac{c_4}{m_3} \dot{x}_4 - \frac{(c_4 + c_3)}{m_3} \dot{x}_3 + \frac{c_3}{m_3} \dot{x}_2 + \frac{k_4}{m_3} x_4 - \frac{(k_4 + k_3)}{m_3} x_3 + \frac{k_3}{m_3} x_2 \quad (3.67)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{c_3}{m_2} \dot{x}_3 - \frac{(c_3 + c_2)}{m_2} \dot{x}_2 + \frac{c_2}{m_2} \dot{x}_1 + \frac{k_3}{m_2} x_3 - \frac{(k_3 + k_2)}{m_2} x_2 + \frac{k_2}{m_2} x_1 \quad (3.68)$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{c_2}{m_1} \dot{x}_2 - \frac{(c_2 + c_1)}{m_1} \dot{x}_1 + \frac{c_1}{m_1} \dot{x}_b + \frac{k_2}{m_1} x_2 - \frac{(k_2 + k_1)}{m_1} x_1 + \frac{k_1}{m_1} x_b \quad (3.69)$$

$$\ddot{x}_b = \frac{c_1}{m_b} \dot{x}_1 + \frac{c_{imd}}{m_b} \dot{x}_{imd} - \frac{(c_1 + c_{imd} + c_b)}{m_b} \dot{x}_b + \frac{k_1}{m_b} x_1 + \frac{k_{imd}}{m_b} x_{imd} - \frac{(k_1 + k_{imd} + k_b)}{m_b} x_b \quad (3.70)$$

## A : Matrice d'état du système de dimension (14,14)

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{(k_1 + k_{imd} + k_b)}{m_b} & \frac{k_{imd}}{m_b} & \frac{k_1}{m_b} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{(c_1 + c_{imd} + c_b)}{m_b} & \frac{c_{imd}}{m_b} & \frac{c_1}{m_b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{imd}}{m_{imd}} & -\frac{k_{imd}}{m_{imd}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{imd}}{m_{imd}} & -\frac{c_{imd}}{m_{imd}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{m_1} & 0 & -\frac{(k_2 + k_1)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_1}{m_1} & 0 & -\frac{(c_2 + c_1)}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_2}{m_2} & -\frac{(k_3 + k_2)}{m_2} & \frac{k_3}{m_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{(c_3 + c_2)}{m_2} & \frac{c_3}{m_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_3}{m_3} & -\frac{(k_4 + k_3)}{m_3} & \frac{k_4}{m_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_3}{m_3} & -\frac{(c_4 + c_3)}{m_3} & \frac{c_4}{m_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_4}{m_4} & -\frac{(k_5 + k_4)}{m_4} & \frac{k_5}{m_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_4}{m_4} & -\frac{(c_5 + c_4)}{m_4} & \frac{c_5}{m_4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_5}{m_5} & -\frac{k_5}{m_5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_5}{m_5} & -\frac{c_5}{m_5} \end{bmatrix}$$

**B : Matrice d'état du système de dimension (14,1)**

$$[B] = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

**C: Matrice d'état du système de dimension (14,14)**

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**D : Matrice d'état du système de dimension (14,14)**

$$[D] = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

**III.7. Résolution numérique en utilisant MATLAB**

Ce travail étudie l'efficacité d'une stratégie de contrôle hybride d'un bâtiment isolé à la base et équipé d'un amortisseur TMD au niveau du dernier étage. L'équation de mouvement représentant le système du bâtiment sous excitations sismique est implémenté dans le module de simulation SIMULINK du logiciel MATLAB en utilisant la boîte à outils de la représentation d'état (*State-SpaceToolbox*). Cette boîte à outils emploie le système continu pour résoudre l'équation de mouvement. L'intégration numérique est conduite en utilisant le solveur Dormand -Prince de 8<sup>ème</sup> ordre intégré à SIMULINK.

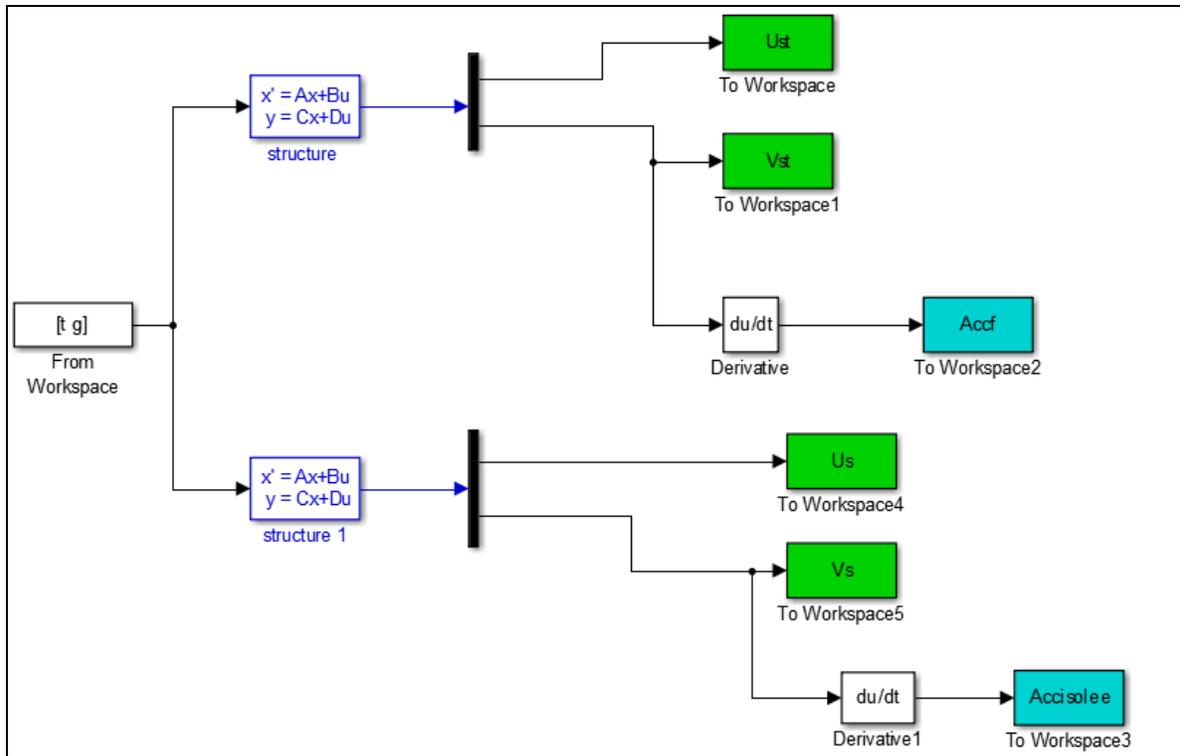


Figure 3.7 : Diagramme de résolution sur SIMULINK/MATLAB

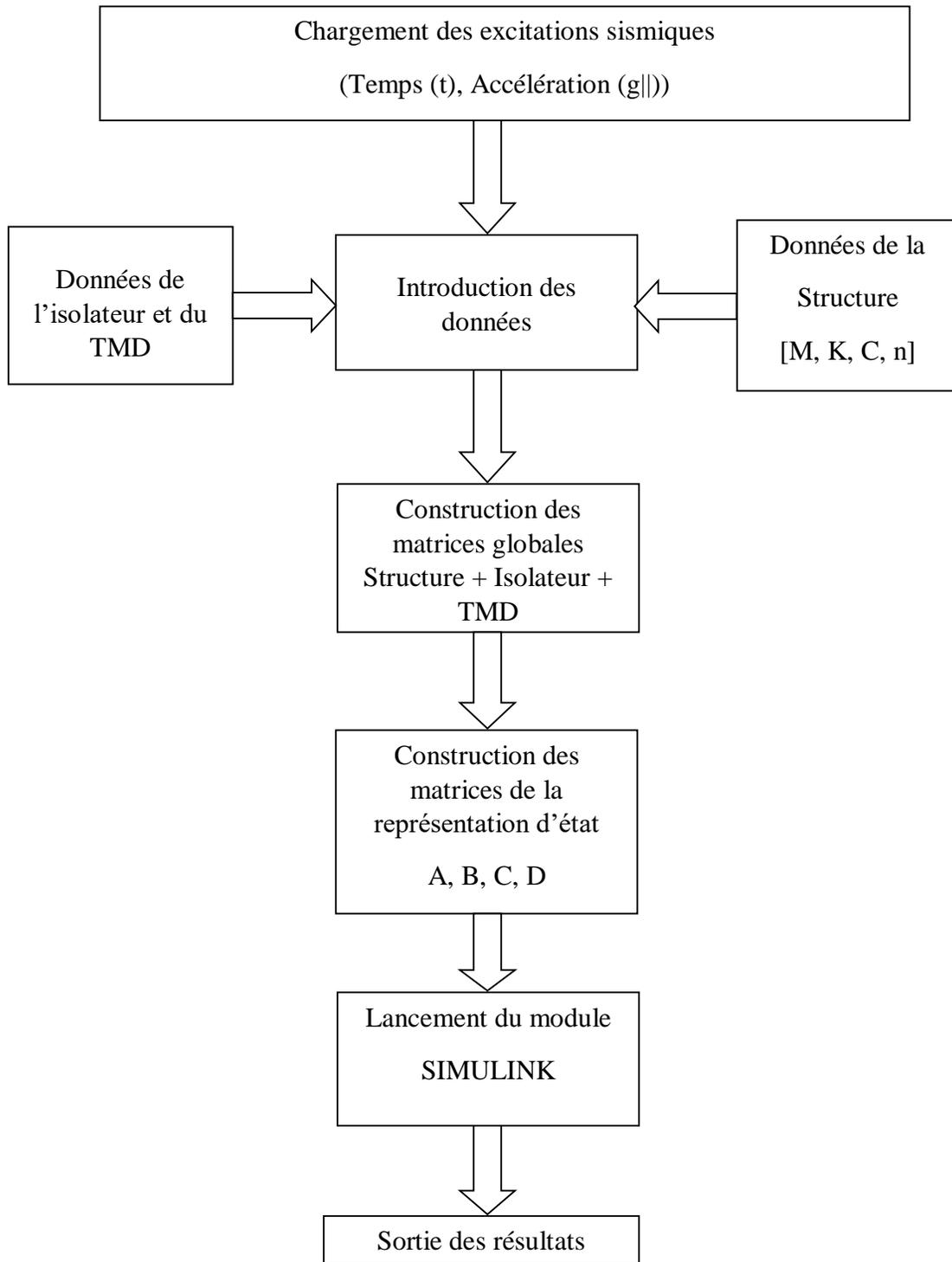


Figure 3.8 : Organigramme du code de calcul utilisé.

### **III.8. Conclusion**

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

# **CHAPITRE IV**

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, la structure, l'isolateur et l'amortisseur à masse accordée seront décrits en premier. Ensuite, l'effet de l'emplacement du TMD dans une structure isolée à la base sera étudié. Les résultats obtenus seront discutés et interprétés pour plusieurs paramètres dynamiques soigneusement choisis. Les paramètres étudiés seront les déplacements en tête et l'accélération en tête du bâtiment, le déplacement inter-étage, le déplacement maximum de tous les étages et l'effort tranchant à la base, cela sous diverses excitations sismiques.

### IV.2. Description de la structure et emplacement du TMD

La structure utilisée dans cette étude est un bâtiment à 20 étages isolé à la base et modélisé en portique bidimensionnel, cette structure a été utilisée par Yang, Danielians [40] comme une modèle de référence (*Benchmark*). Les paramètres structurels de la structure sont présentés dans le tableau (4.1). Cette structure est équipée d'un isolateur à la base. Les caractéristiques de l'isolateur sont présentées au tableau (4.2). La figure (4.1) représente la structure isolée à la base sans dispositif de contrôle, la figure (4.2) représente la structure équipée de TMD à divers emplacement (i.e. à la base, au 5ème étage, au 10ème étage, au 15ème étage et au dernier étage).

**Tableau 4.1 :** Paramètres de la structure

| N° étage | Masse [ton/ml] | Rigidité [kN/m] | Amortissement [kN.s/m] |
|----------|----------------|-----------------|------------------------|
| 1        | 300            | $10^6$          | 2261                   |
| 2        | 300            | $10^6$          | 2261                   |
| -        | -              | -               | -                      |
| 20       | 300            | $10^6$          | 2261                   |

**Tableau 4.2 :** Paramètres de l'isolateur

| Caractéristiques de l'isolateur | $m_b$ [Ton/ml] | $k_b$ [kN/m] | $c_b$ [kN.s/m] |
|---------------------------------|----------------|--------------|----------------|
|                                 | 400            | 40000        | 90,44          |

### IV.3. Réglage de l'amortisseur à masse accordée (TMD)

Pour former le système hybride, un amortisseur TMD est placé au divers emplacement de la structure. L'ajustement ou le réglage du TMD est mis en place en suivant la procédure proposée par Den Hartog, Sadek et Krenk and Hogsberg. Les équations ci-dessous donnent la procédure de

réglage. Il est important de noter que l'amortisseur TMD est réglé par rapport à la première fréquence naturelle de la structure, les 5 premières fréquences naturelles de la structure sont montrées dans le tableau (4.3).

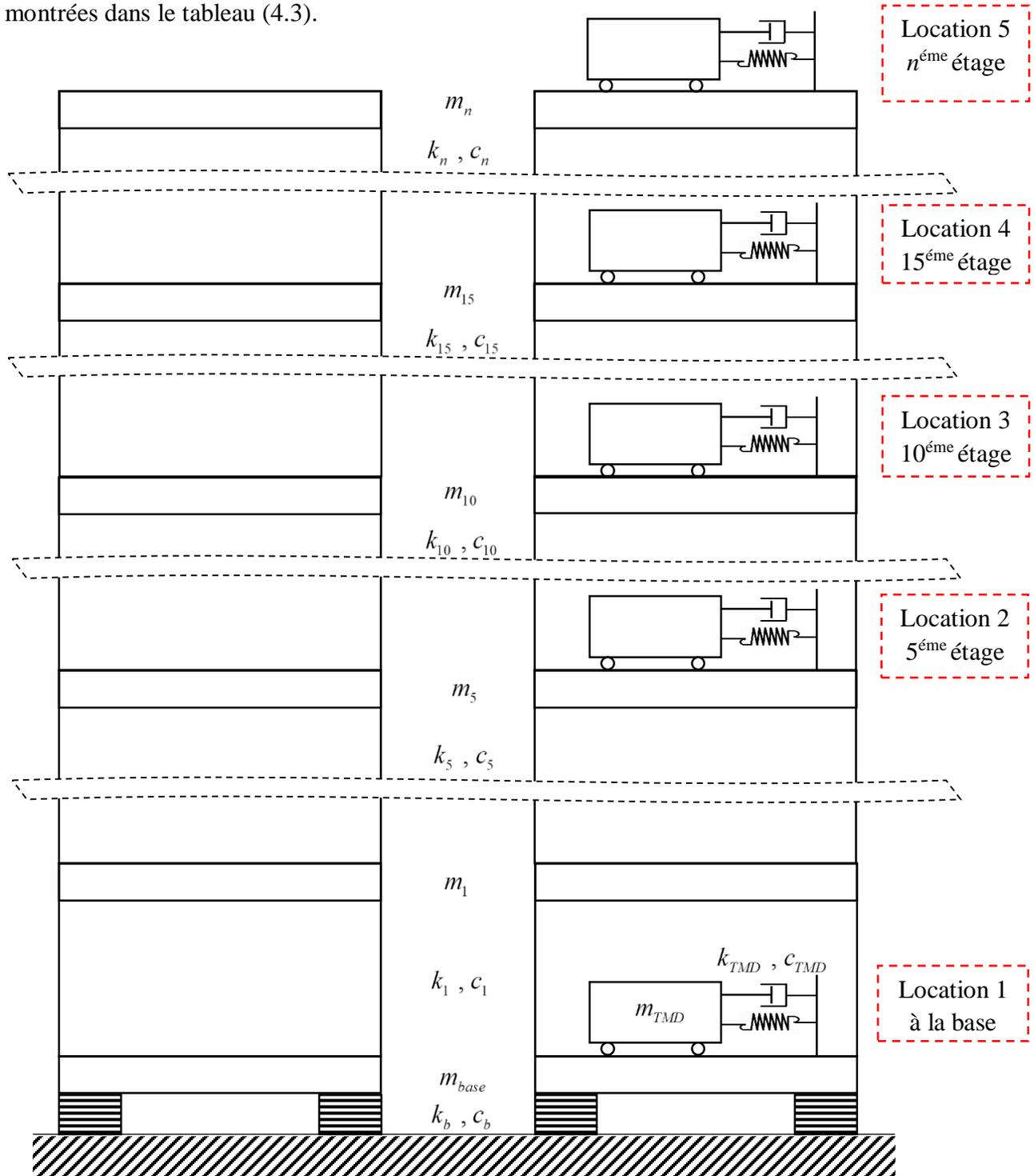


Figure 4.1: Structure sans dispositif de contrôle    Figure 4.2: Structure avec dispositif de contrôle

**Tableau 4.3 :** Fréquences naturelles de la structure isolée

| N°                    | 1 <sup>ère</sup> | 2 <sup>ème</sup> | 3 <sup>ème</sup> | 4 <sup>ème</sup> | 5 <sup>ème</sup> |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>Fréquence (Hz)</b> | 0.35             | 1.46             | 2.75             | 4.06             | 5.36             |

L'accord de l'amortisseur TMD sera dérivé du ratio de masse choisi  $\mu$  selon le processus de calcul proposé par :

- Den Hartog (1959) noté réglage 1 pour le reste de ce chapitre

$$m_{tmd} = \mu \times \sum_{i=1}^n m_i \quad (4.1)$$

$$f_{tmd} = \frac{f_s}{(\mu + 1)} \quad (4.2)$$

$$k_{tmd} = f_{tmd}^2 \times m_{tmd} \quad (4.3)$$

$$\xi_{tmd} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(\mu + 1)^3}} \quad (4.4)$$

- Sadek (1997) noté réglage 2 pour le reste de ce chapitre

$$m_{tmd} = \mu \times \sum_{i=1}^n m_i \quad (4.5)$$

$$f_{tmd} = (f_s / (u + 1)) \times (1 - 0.05 \times \sqrt{(u / (u + 1))}) \quad (4.6)$$

$$k_{tmd} = (f_{tmd}^2) \times m_{tmd} \quad (4.7)$$

$$\xi_{tmd} = (0.05 / (u + 1)) + \sqrt{(u / (u + 1))} \quad (4.8)$$

- Krenk and Hogsberg (2008) noté réglage 3 dans le reste de ce chapitre

$$m_{tmd} = \mu \times \sum_{i=1}^n m_i \quad (4.9)$$

$$f_{tmd} = \frac{f_s}{(\mu + 1)} \quad (4.10)$$

$$k_{tmd} = f_{tmd}^2 \times m_{tmd} \quad (4.11)$$

$$\xi_{tmd} = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{\mu}{(\mu+1)}} \quad (4.12)$$

Où  $m_{tmd}$  est la masse du TMD,  $f_s$  est la première fréquence de la structure et  $f_{tmd}$  la fréquence du TMD.

Pour le cas du TMD, le rapport de masse  $\mu$  sera pris égal à 5% de la masse totale de la structure étudiée.

$k_{tmd}$  et  $c_{tmd}$ , sont respectivement la rigidité et le pourcentage d'amortissement du dispositif TMD.

Le tableau (4.4) présente les paramètres du dispositif TMD pour différents réglages.

**Tableau 4.4** : Paramètres des réglages du TMD utilisés.

| Paramètres du TMD                        | Réglage 01           | Réglage02            | Réglage 03           |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Ratio de masse</b>                    | $\mu = 05\%$         |                      |                      |
| <b>Fréquence du TMD (Hz)</b>             | 2.1163               | 2.0932               | 2.1163               |
| <b>Masse du TMD [Ton/ml]</b>             | 320                  | 320                  | 320                  |
| <b>Rigidité du TMD [kN/m]</b>            | $1.4332 \times 10^3$ | $1.4021 \times 10^3$ | $1.4332 \times 10^3$ |
| <b><math>c_{tmd}</math> TMD [kN.s/m]</b> | 172.38               | 356.1363             | 147.78               |

- Le rapport de masse  $\mu$  sera pris égal à 5% de la masse totale de la structure étudiée pour les trois réglages cela explique pourquoi la valeur de masse du TMD n'a pas changé.
- Notant la seule différence entre le premier réglage et le troisième réglage dans le pourcentage d'amortissement du dispositif TMD ( $\xi_{tmd}$ ).
- Notez également que les valeurs (Fréquence du TMD, Rigidité du TMD et pourcentage d'amortissement du TMD) change dans le deuxième réglage par rapport au premier et au troisième.

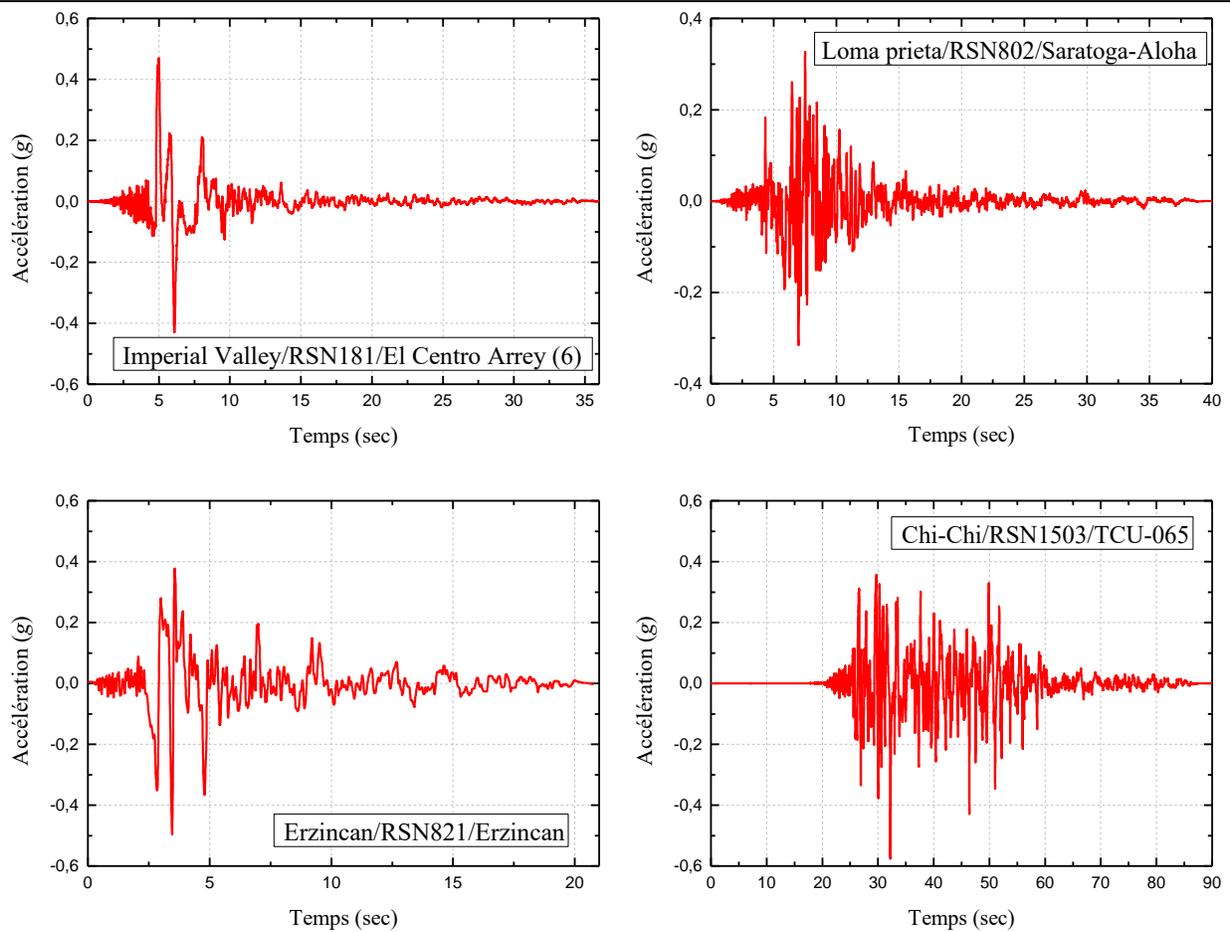
#### IV.4. Description des excitations sismiques

Dans le cadre de notre étude, 8 enregistrements sismiques ont été choisis ; ces enregistrements sont présentés au tableau (4.5), ces enregistrements ont été sélectionnés en utilisant la base de données de l'agence fédérale américaine du management des urgences (Federal Emergency Management

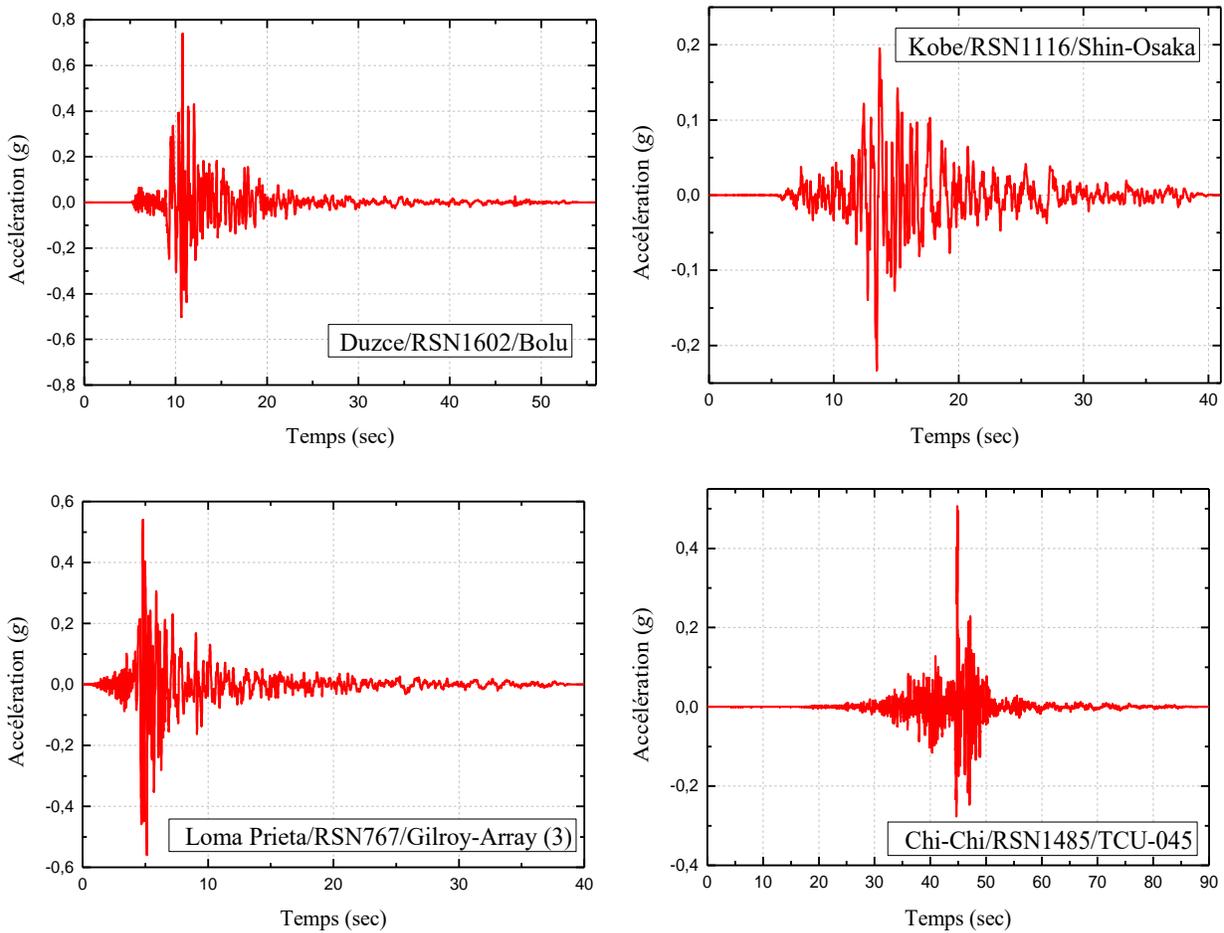
Agency FEMA). Le fascicule FEMA P659 dans cette annexe A donné en détaille les caractéristiques de 100 séismes utiliser dans l'élaboration du fascicule.[41]

**Tableau 4.5** : Excitations sismiques.

| N°             | 1                   | 2                | 3        | 4       | 5       | 6          | 7                | 8       |
|----------------|---------------------|------------------|----------|---------|---------|------------|------------------|---------|
| <b>Séismes</b> | Imperial Valley     | Loma Prieta      | Erzincan | Chi-Chi | Duzce   | Kobe       | Loma Prieta      | Chi-Chi |
| <b>RSN</b>     | RSN181              | RSN802           | RSN821   | RSN1503 | RSN1602 | RSN1116    | RSN767           | RSN1485 |
| <b>Année</b>   | 1979                | 1989             | 1992     | 1999    | 1999    | 1995       | 1989             | 1999    |
| <b>Station</b> | El Centro Array (6) | Saratoga – Aloha | Erzincan | TCU065  | Bolu    | Shin-Osaka | Gilroy Array (3) | TCU045  |
| <b>PGA (g)</b> | 0.469               | 0.326            | 0.496    | 0.575   | 0.739   | 0.233      | 0.559            | 0.506   |



**Figure 4.3** : Excitations sismiques de champ proche.



**Figure 4.4 :** Excitations sismiques de champ lointain.

Le choix de ces huit enregistrements est motivé par leurs natures. Les séismes 1, 2, 3 et 4 sont considérés dans la littérature comme des séismes de champs proche, alors que 5, 6, 7 et 8 sont considérés comme des séismes de champ lointain.

#### **IV.5. Déplacement maximum en sommet du bâtiment « sans TMD / avec TMD ».**

L'analyse effectuée pour les structures isolées à la base avec et sans TMD nous a permis de comparer les résultats des déplacements en tête du bâtiment sous les excitations sismiques considérées et récapitulé dans le tableau (4.5). L'analyse est effectuée pour plusieurs emplacements du TMD. Ces résultats sont représentés dans le tableau (4.6) et les figures (4.5) et (4.6).

**Tableau 4.6 :** Déplacement maximum en tête du bâtiment pour différents emplacements (m).

| Séisme<br>(N°)           | Sans<br>TMD | Réglage | Avec TMD [m] (%)                   |                      |       |       |                       |
|--------------------------|-------------|---------|------------------------------------|----------------------|-------|-------|-----------------------|
|                          |             |         | Niveau d'emplacement du dispositif |                      |       |       |                       |
|                          |             |         | Base                               | 5                    | 10    | 15    | 20                    |
| Imperial Valley<br>(1)   | 1.313       | 1       | 1.120                              | 1.085                | 1.050 | 1.027 | 1.020                 |
|                          |             | 2       | 1.115                              | 1.130                | 1.106 | 1.090 | 1.086                 |
|                          |             | 3       | 1.113                              | 1.077                | 1.040 | 1.016 | <b>1.00 (23.17%)</b>  |
| Loma Prieta<br>(2)       | 0.776       | 1       | 0.415                              | 0.371                | 0.350 | 0.343 | 0.340                 |
|                          |             | 2       | 0.484                              | 0.448                | 0.412 | 0.388 | 0.378                 |
|                          |             | 3       | 0.401                              | 0.360                | 0.346 | 0.338 | <b>0.336 (56.64%)</b> |
| Erzincan<br>(3)          | 1.096       | 1       | 0.614                              | 0.599                | 0.583 | 0.573 | 0.569                 |
|                          |             | 2       | 0.705                              | 0.625                | 0.600 | 0.519 | 0.588                 |
|                          |             | 3       | 0.613                              | 0.597                | 0.581 | 0.570 | <b>0.566 (48.37%)</b> |
| Chi-Chi<br>(4)<br>TCU065 | 1.849       | 1       | 0.976                              | 0.887                | 0.835 | 0.817 | 0.814                 |
|                          |             | 2       | 1.221                              | 1.119                | 1.035 | 0.992 | 0.978                 |
|                          |             | 3       | 0.927                              | 0.842                | 0.799 | 0.789 | <b>0.789 (57.30%)</b> |
| Duzce<br>(5)             | 0.639       | 1       | 0.393                              | 0.384                | 0.376 | 0.369 | 0.367                 |
|                          |             | 2       | 0.448                              | 0.409                | 0.385 | 0.380 | 0.379                 |
|                          |             | 3       | 0.393                              | 0.384                | 0.376 | 0.369 | <b>0.365 (42.81%)</b> |
| Kobe<br>(6)              | 0.173       | 1       | 0.106                              | <b>0.099 (42.7%)</b> | 0.105 | 0.108 | 0.111                 |
|                          |             | 2       | 0.119                              | 0.112                | 0.104 | 0.101 | 0.101                 |
|                          |             | 3       | 0.104                              | 0.102                | 0.109 | 0.114 | 0.116                 |
| Loma Prieta<br>(7)       | 0.285       | 1       | 0.159                              | 0.151                | 0.144 | 0.139 | 0.137                 |
|                          |             | 2       | 0.169                              | 0.163                | 0.158 | 0.155 | 0.153                 |
|                          |             | 3       | 0.157                              | 0.149                | 0.141 | 0.136 | <b>0.133 (53.06%)</b> |
| Chi Chi<br>(8)<br>TCU045 | 0.226       | 1       | 0.138                              | 0.134                | 0.131 | 0.129 | 0.128                 |
|                          |             | 2       | 0.152                              | 0.148                | 0.146 | 0.144 | 0.143                 |
|                          |             | 3       | 0.135                              | 0.131                | 0.128 | 0.125 | <b>0.124 (44.92%)</b> |

- Dans le tableau (4.6) on observe une réduction du déplacement maximum en tête du bâtiment isolé à la base et équipé d'un TMD par rapport a celui isolé à la base seulement. La réduction de la réponse varie selon la nature de l'excitation sismique, l'emplacement du TMD et le réglage de ce dernier.
- On observe clairement que le meilleur emplacement du TMD pour réduire le déplacement maximum en tête du bâtiment et au dernier étage, aussi le meilleur réglage et le 3ème réglage (Krenk and Hogsberg), suite à cela les figures (4.5) et (4.6) représenteront la réduction avec un TMD placé au dernier étage et réglé en utilisant la formule de Krenk and Hogsberg (réglage 3).

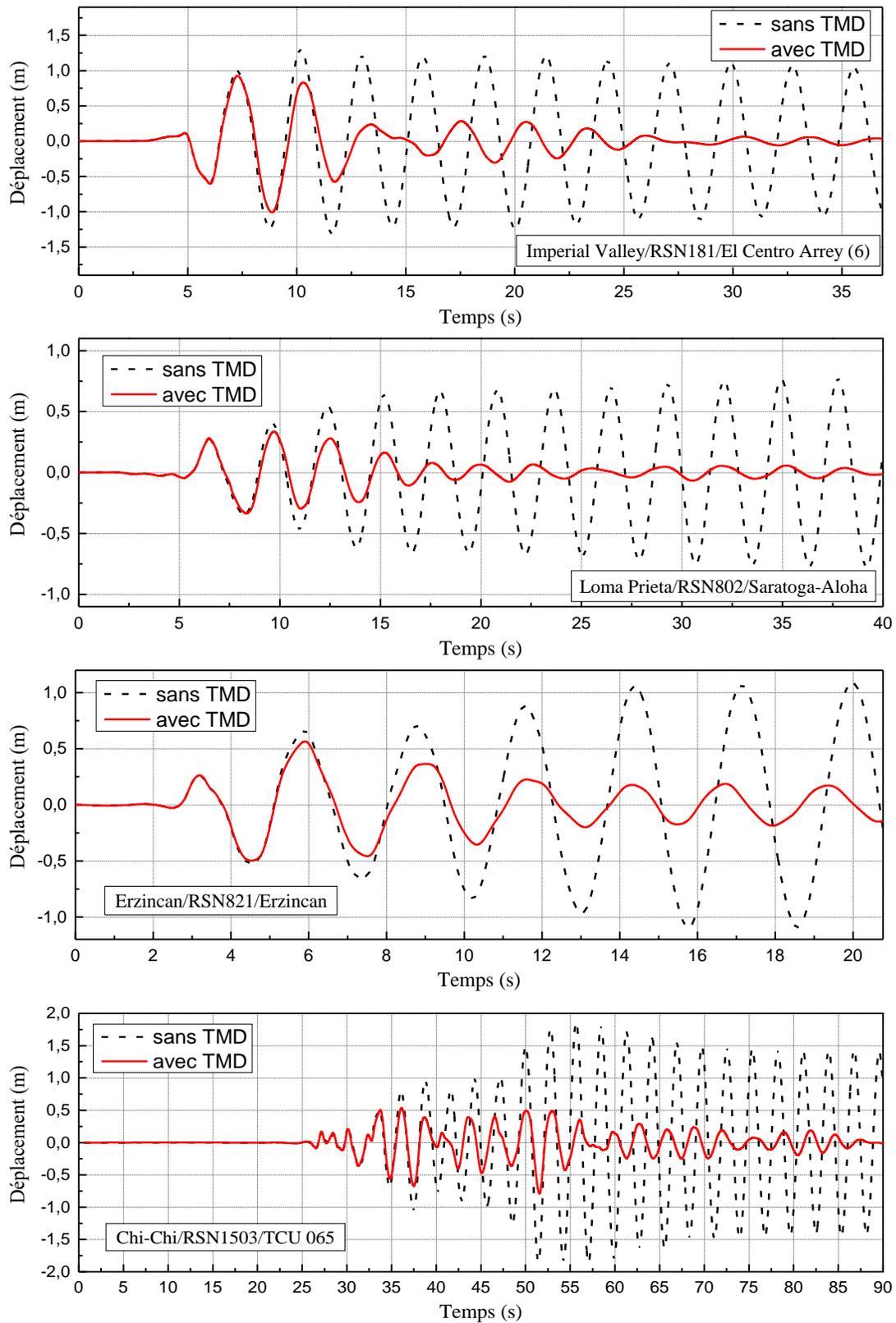


Figure 4.5 : Déplacement en tête du bâtiment sous excitations sismiques de champ proche.

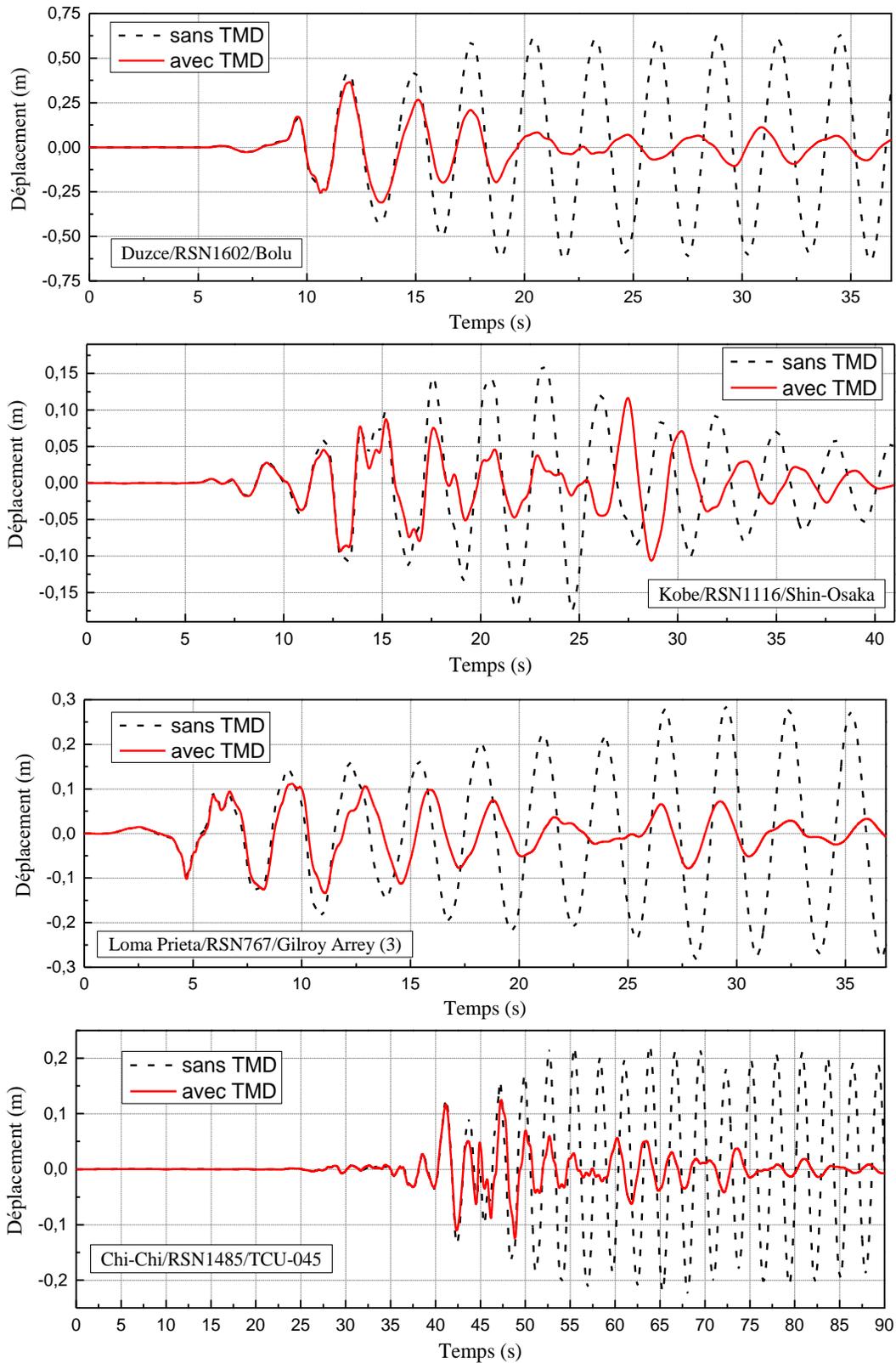
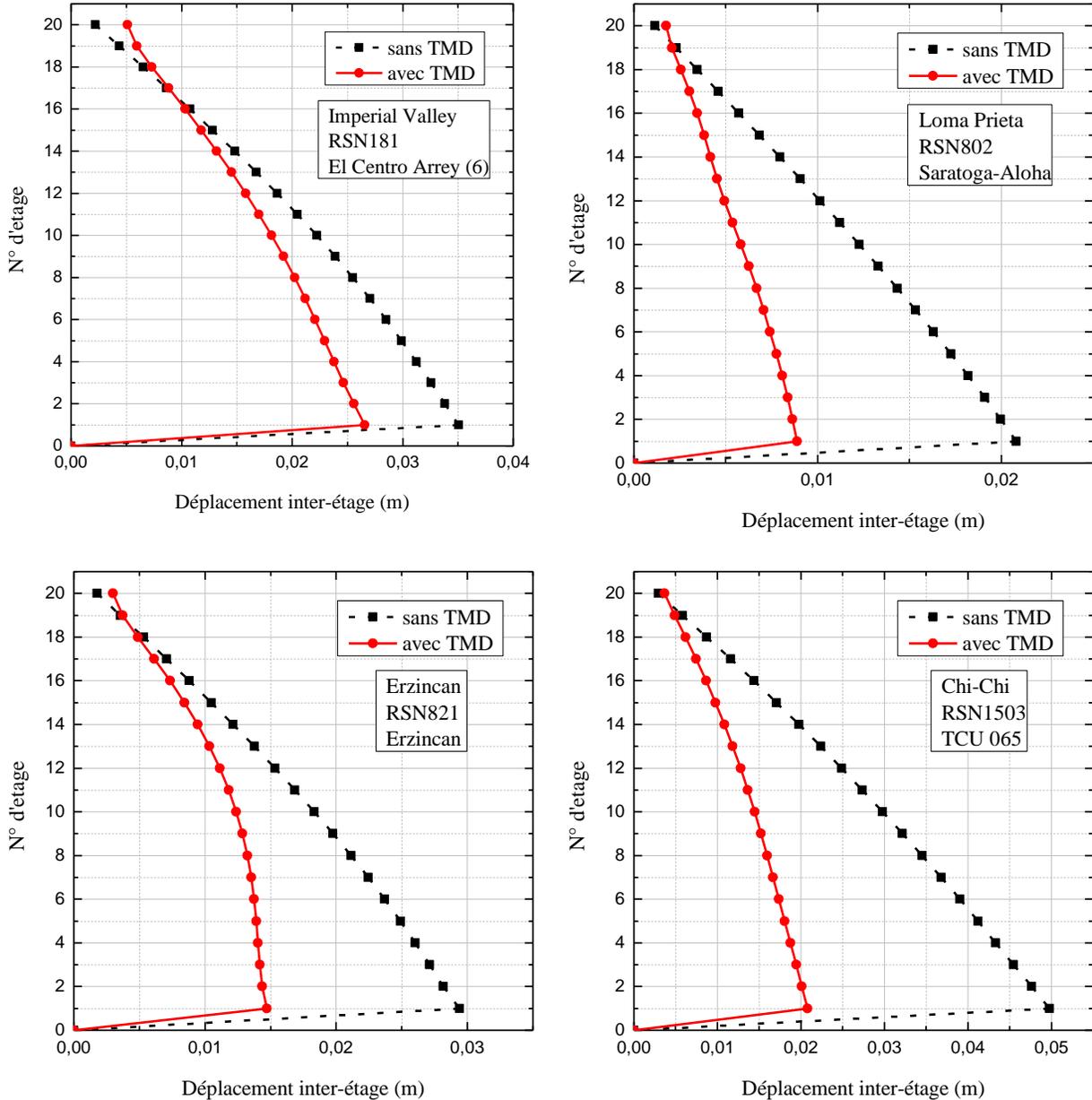


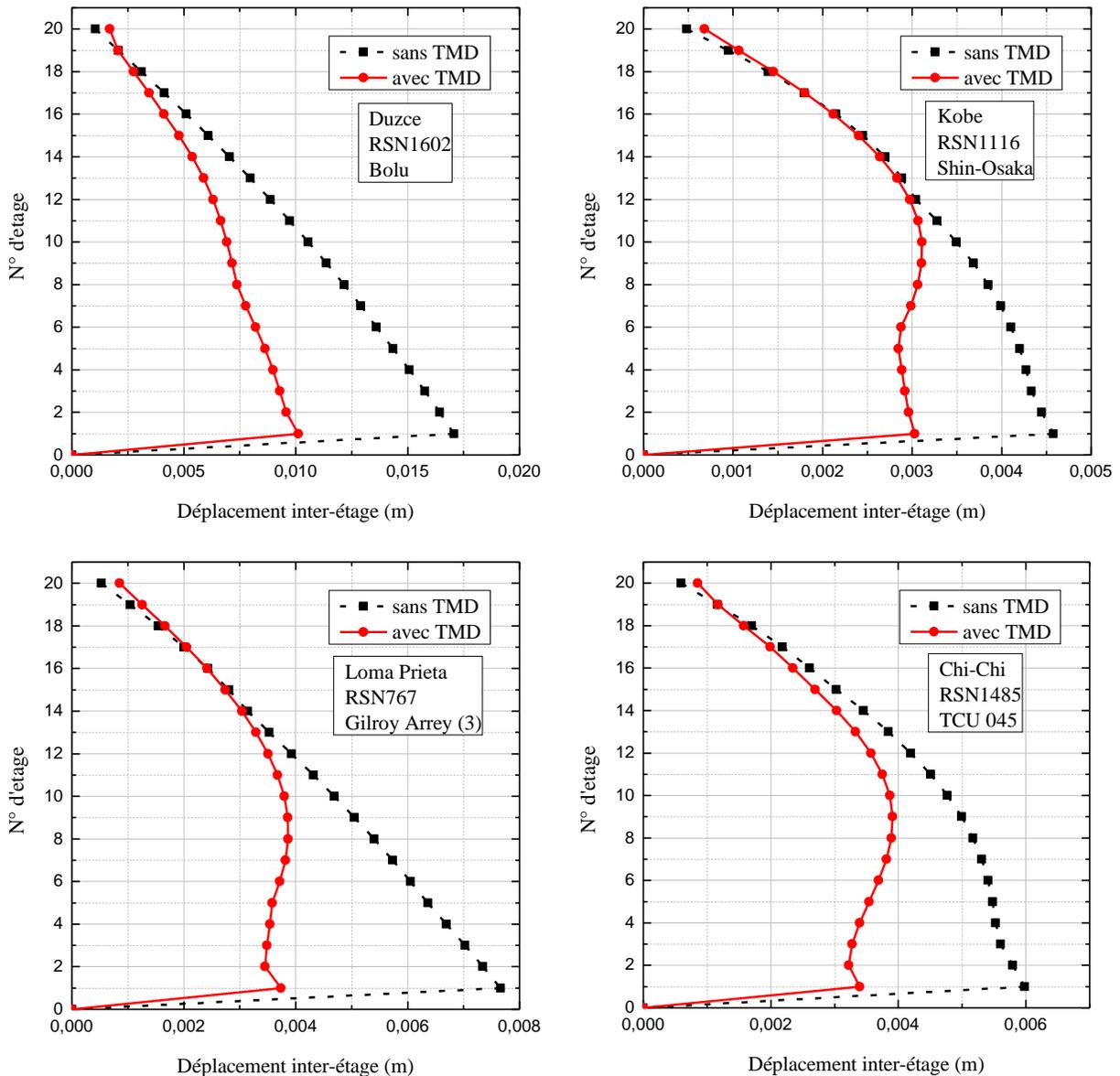
Figure 4.6 : Déplacement en tête du bâtiment sous excitations sismiques de champ lointain.

➤ Sur les figures (4.5) et (4.6) on remarque l'efficacité du TMD dans l'atténuation de la réponse sismique en termes de déplacement du bâtiment isolé à la base. Les résultats montrés dans les figures (4.5) et (4.6) confirment les résultats obtenus dans le tableau (4.5).

#### IV.6. Déplacement inter-étage du bâtiment sans et avec TMD (m)



**Figure 4.7 :** Déplacement inter-étage du bâtiment sous excitations sismiques de champ proche avec un TMD au sommet réglé selon Krenk and Hogsberg (réglage 3).



**Figure 4.8** : Déplacement inter-étage du bâtiment sous excitations sismiques de champ lointain avec un TMD au sommet réglé selon Krenk and Hogsberg (réglage 3).

- Les figures (4.7 et 4.8) montrent une importante réduction du déplacement inter-étage au niveau de la base du bâtiment isolé à la base et équipé d'un TMD au sommet, par rapport au bâtiment isolé à la base seulement. La réduction au niveau des autres étages est presque la même pour la structure à base isolée. Cela est principalement dû à l'effet de l'isolation qui permet à la structure de se déplacer en bloc rigide éliminant ainsi tout déplacement inter-étage d'où la présence du TMD n'affecte pas l'effet de l'isolation à la base.

IV.7. Déplacement maximum pour chaque étage du bâtiment sans et avec TMD (m)

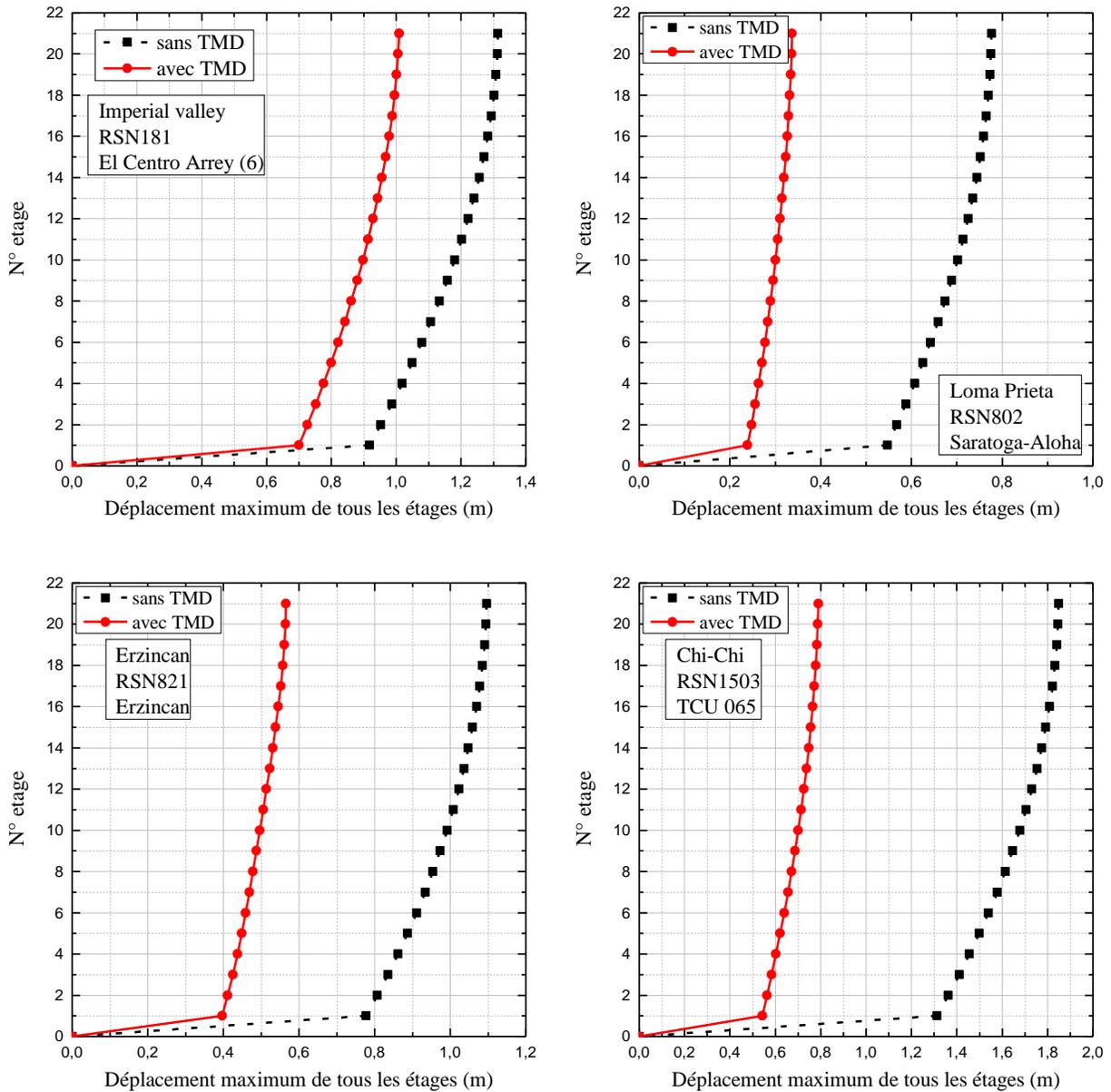
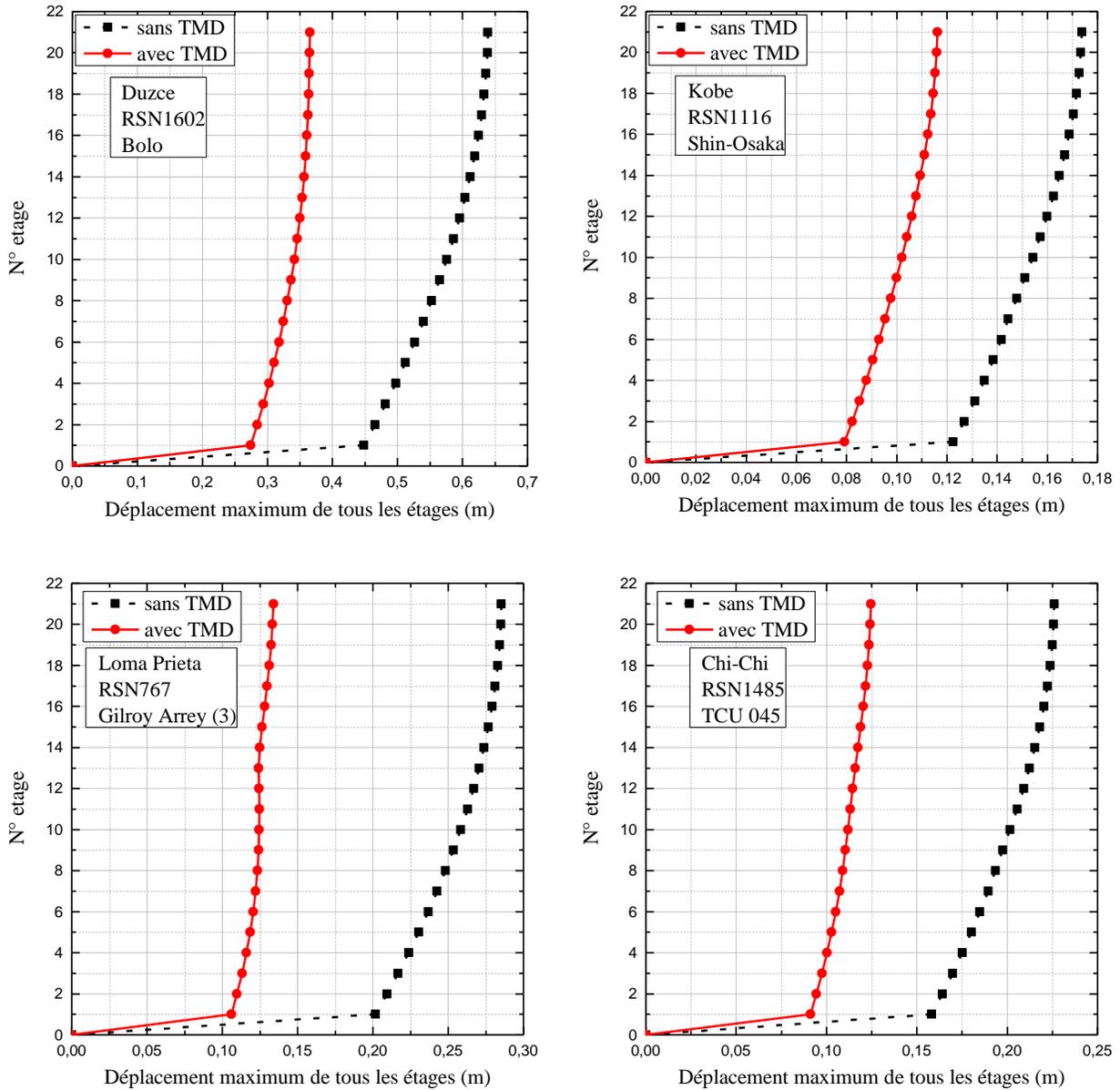


Figure 4.9 : Déplacement maximum pour chaque étage sous excitations sismiques de champ proche avec un TMD au sommet réglé selon Krenk and Hogsberg (réglage 3).



**Figure 4.10** : Déplacement Maximale pour chaque étage dans Excitations sismiques de champs lointain.

- Les figures (4.9 et 4.10) montrent une illustration parfaite du rôle de l'amortisseur à masse accordée (TMD) comme force de recentrage. La réduction est d'un ordre croissant de la base au sommet c'est principalement lié à l'emplacement du TMD au sommet mais aussi à l'amplitude de mouvement du bâtiment.
- On observe que l'ordre de réduction est plus important sous des séismes de champ proche ceci est principalement due à la nature retro-active du TMD plus le déplacement du bâtiment est grand plus la force de recentrage du TMD est grande et plus la réduction est importante.

**Tableau 4.7 :** Accélération maximum absolue en tête du bâtiment pour différents emplacements .

| Séisme<br>(N°)            | Sans<br>TMD | Réglage | Avec TMD [m/s <sup>2</sup> ] (%)   |        |                     |                      |                      |
|---------------------------|-------------|---------|------------------------------------|--------|---------------------|----------------------|----------------------|
|                           |             |         | Niveau d'emplacement du dispositif |        |                     |                      |                      |
|                           |             |         | Base                               | 5      | 10                  | 15                   | 20                   |
| Imperial<br>Valley<br>(1) | 8.255       | 1       | 8.147                              | 8.139  | 8.129               | 8.111                | 8.076                |
|                           |             | 2       | 8.115                              | 8.123  | 8.140               | 8.120                | <b>8.054 (2.43%)</b> |
|                           |             | 3       | 8.152                              | 8.141  | 8.127               | 8.109                | 8.079                |
| Loma<br>Prieta<br>(2)     | 4.012       | 1       | 3.979                              | 3.976  | 3.973               | 3.968                | 3.957                |
|                           |             | 2       | 3.977                              | 3.972  | 3.968               | 3.963                | <b>3.952 (1.49%)</b> |
|                           |             | 3       | 3.979                              | 3.977  | 3.974               | 3.969                | 3.958                |
| Erzincan<br>(3)           | 6.260       | 1       | 6.188                              | 6.151  | 6.076               | 6.065                | 6.080                |
|                           |             | 2       | 6.174                              | 6.157  | 6.098               | 6.095                | 6.086                |
|                           |             | 3       | 6.189                              | 6.150  | 6.073               | <b>6.061 (3.17%)</b> | 6.079                |
| Chi-Chi<br>(4)<br>TCU065  | 12.56       | 1       | 8.604                              | 8.213  | 7.897               | 7.875                | 7.958                |
|                           |             | 2       | 9.944                              | 9.468  | 8.930               | 8.779                | 8.793                |
|                           |             | 3       | 8.317                              | 7.962  | <b>7.711(38.6%)</b> | 7.730                | 7.829                |
| Duzce<br>(5)              | 6.519       | 1       | 6.429                              | 6.424  | 6.434               | 6.412                | 6.379                |
|                           |             | 2       | 6.419                              | 6.419  | 6.444               | 6.417                | <b>6.373 (2.23%)</b> |
|                           |             | 3       | 6.430                              | 6.424  | 6.433               | 6.411                | 6.379                |
| Kobe<br>(6)               | 2.931       | 1       | 2.857                              | 2.837  | 2.826               | 2.808                | 2.799                |
|                           |             | 2       | 2.865                              | 2.850  | 2.851               | 2.832                | 2.819                |
|                           |             | 3       | 2.856                              | 2.835  | 2.822               | 2.804                | <b>2.795 (4.61%)</b> |
| Loma<br>Prieta<br>(7)     | 5.174       | 1       | 5.173                              | 5.174  | 5.172               | 5.172                | 5.172                |
|                           |             | 2       | 5.170                              | 5.173  | 5.168               | <b>5.168(0.10%)</b>  | 5.168                |
|                           |             | 3       | 5.173                              | 5.175  | 5.173               | 5.173                | 5.173                |
| Chi Chi<br>(8)<br>TCU045  | 4.328       | 1       | 4.399↑                             | 4.426↑ | 4.477↑              | 4.490↑               | 4.490↑               |
|                           |             | 2       | 4.420↑                             | 4.441↑ | 4.486↑              | 4.495↑               | 4.505↑               |
|                           |             | 3       | 4.394↑                             | 4.421↑ | 4.472↑              | 4.486↑               | 4.485↑               |

- Sur le tableau (4.7) on note une légère réduction des valeurs de l'accélération voir même une augmentation de cette dernière le symbole (↑) dans le tableau (4.7) signifie une augmentation de la valeur maximale de l'accélération en tête du bâtiment, cette légère réduction et augmentation est principalement due à la masse additionnelle du TMD.

- Cette légère réduction est due principalement à la présence de l'isolation à la base qui réduit significativement l'accélération du sol transmise à la structure, ainsi l'ajout d'un TMD n'influence pas d'une manière néfaste sur l'accélération du bâtiment déjà réduite par l'isolateur.

**Tableau 4.8 :** Effort tranchant maximum à la base du bâtiment pour différents emplacements [kN]

| Séisme<br>(N°)            | Sans<br>TMD<br>10 <sup>4</sup> [kN] | Réglage | Avec TMD 10 <sup>4</sup> [kN] (%)  |       |       |       |                                |
|---------------------------|-------------------------------------|---------|------------------------------------|-------|-------|-------|--------------------------------|
|                           |                                     |         | Niveau d'emplacement du dispositif |       |       |       |                                |
|                           |                                     |         | Base                               | 5     | 10    | 15    | 20                             |
| Imperial<br>Valley<br>(1) | 3.703                               | 1       | 3.218                              | 3.103 | 2.980 | 2.889 | 2.839                          |
|                           |                                     | 2       | 3.321                              | 3.232 | 3.135 | 3.063 | 3.024                          |
|                           |                                     | 3       | 3.199                              | 3.080 | 2.953 | 2.858 | <b>2.806</b><br><b>(24.2%)</b> |
| Loma<br>Prieta<br>(2)     | 2.190                               | 1       | 1.211                              | 1.109 | 1.098 | 1.088 | 1.082                          |
|                           |                                     | 2       | 1.407                              | 1.300 | 1.193 | 1.117 | 1.107                          |
|                           |                                     | 3       | 1.171                              | 1.106 | 1.094 | 1.084 | <b>1.078</b><br><b>(50.7%)</b> |
| Erzincan<br>(3)           | 3.112                               | 1       | 1.810                              | 1.770 | 1.730 | 1.698 | 1.679                          |
|                           |                                     | 2       | 2.035                              | 1.800 | 1.760 | 1.727 | 1.705                          |
|                           |                                     | 3       | 1.806                              | 1.766 | 1.726 | 1.694 | <b>1.675</b><br><b>(46.1%)</b> |
| Chi-Chi<br>(4)<br>TCU065  | 5.286                               | 1       | 2.843                              | 2.568 | 2.382 | 2.293 | 2.246                          |
|                           |                                     | 2       | 3.487                              | 3.179 | 2.928 | 2.780 | 2.707                          |
|                           |                                     | 3       | 2.716                              | 2.449 | 2.280 | 2.205 | <b>2.163</b><br><b>(58.9%)</b> |
| Duzce<br>(5)              | 1.816                               | 1       | 1.609                              | 1.600 | 1.590 | 1.583 | 1.580                          |
|                           |                                     | 2       | 1.617                              | 1.607 | 1.597 | 1.592 | 1.589                          |
|                           |                                     | 3       | 1.608                              | 1.598 | 1.588 | 1.582 | <b>1.578</b><br><b>(13.0%)</b> |
| Kobe<br>(6)               | 0.514                               | 1       | 0.374                              | 0.358 | 0.355 | 0.354 | <b>0.353</b><br><b>(31.2%)</b> |
|                           |                                     | 2       | 0.408                              | 0.392 | 0.379 | 0.365 | 0.353                          |
|                           |                                     | 3       | 0.366                              | 0.358 | 0.356 | 0.354 | 0.354                          |
| Loma<br>Prieta<br>(7)     | 0.807                               | 1       | 0.647                              | 0.646 | 0.644 | 0.643 | 0.642                          |
|                           |                                     | 2       | 0.648                              | 0.647 | 0.646 | 0.646 | 0.647                          |
|                           |                                     | 3       | 0.647                              | 0.646 | 0.644 | 0.642 | <b>0.642</b><br><b>(20.5%)</b> |
| Chi Chi<br>(8)<br>TCU045  | 0.633                               | 1       | 0.572                              | 0.566 | 0.558 | 0.554 | 0.551                          |
|                           |                                     | 2       | 0.593                              | 0.592 | 0.588 | 0.585 | 0.584                          |
|                           |                                     | 3       | 0.567                              | 0.559 | 0.551 | 0.546 | <b>0.543</b><br><b>(14.2%)</b> |

- Le tableau (4.3) montre la réduction de l'effort tranchant à la base du bâtiment, on observe une réduction acceptable de l'effort tranchant à la base de bâtiment isolé à la base et équipé d'un TMD à divers emplacements et sous divers réglages.
- D'une manière similaire à celle du déplacement en tête du bâtiment on observe une plus grande réduction quand le TMD est placé au sommet du bâtiment.
- Le réglage N°3 est le réglage permettant d'obtenir la meilleure réduction. L'ordre de la réduction varie de 13.0% à 58.9%

#### **IV.8. Conclusion**

D'après les résultats obtenus pour divers emplacements de l'amortisseur à masse accordée les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- 1- La présence d'un amortisseur à masse accordée (TMD) dans bâtiment avec isolation à la base permet de former un système hybride qui réduit considérablement les vibrations dues au séisme.
- 2- L'emplacement idéal d'un TMD est au sommet du bâtiment et cela permet d'obtenir la plus grande réduction en termes de déplacement au sommet et d'effort tranchant à la base.
- 3- Plusieurs réglages peuvent être utilisés pour déterminer les paramètres d'un TMD, dans notre cas le réglage proposé par Krenk and Hogsberg s'est avéré être le plus efficace.
- 4- La nature rétroactive du fonctionnement du TMD nécessite des déplacements relativement grands pour générer une force de recentrage efficace.
- 5- L'effet du TMD est visible sur plusieurs paramètres dynamiques tel que le déplacement inter-étages et le déplacement maximum de tous les étages, ainsi le TMD permet de réduire les déplacements inter-étages et les déplacements maximum de tous les étages.
- 6- La réduction des réponses étudiées est relative à la nature de la source sismique, l'intensité du séisme et le contenu fréquentiel de ce dernier.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'isolation à la base est l'un des systèmes classiques les plus répandus pour la protection des structures. Le développement rapide des technologies des constructions a accéléré l'apparition des gratte-ciels et des bâtiments de moyennes et grandes hauteurs et des études ont prouvé plusieurs inconvénients dans l'isolation à la base sismiques dont le plus important est le grand déplacement de la structure.

Dans notre étude, nous avons étudié l'efficacité d'un contrôle hybride composé d'une structure à base isolée et un amortisseur à masse accordée (TMD, de l'anglais Tuned Mass Damper) .

L'objectif principal de cette étude est :

- de limiter les grands déplacements au sommet et à la base de la structure isolée en utilisant l'amortisseur à masse accordée (TMD) comme force de recentrage.
- Étudier l'effet des paramètres de l'amortisseur TMD (emplacement et réglage) sur la réponse dynamique de la structure isolée à la base.

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'une structure isolée à la base. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La présence d'un amortisseur à masse accordée (TMD) dans un bâtiment avec isolation à la base permet de former un système hybride qui réduit considérablement les vibrations dues au séisme.
- L'amortisseur TMD est plus performant lorsqu'il est installé au sommet des bâtiments et cela permet d'obtenir la plus grande réduction en termes de déplacement au sommet et d'effort tranchant à la base.
- Plusieurs réglages peuvent être utilisés pour déterminer les paramètres d'un TMD ; dans notre cas le réglage proposé par Krenk and Hogsberg s'est avéré être le plus efficace.
- La nature rétroactive du fonctionnement du TMD nécessite des déplacements relativement grands pour générer une force de recentrage efficace.
- L'effet du TMD est visible sur plusieurs paramètres dynamiques tel que le déplacement inter-étages et le déplacement maximum de tous les étages ; ainsi le TMD permet de réduire les déplacements inter-étages et les déplacements maximum de tous les étages.
- La réduction des réponses étudiées est relative à la nature de la source sismique, l'intensité du séisme et le contenu fréquentiel de ce dernier.

En perspective de cette étude, nous pouvons affirmer qu'un système hybride (structure isolée à la base + TMD) est une solution avantageuse pour les bâtiments à grande hauteur et l'implémentation d'un amortisseur à masse accordée actif (AMD) est aussi possible pour réduire considérablement les effets des séismes en champ proche et lointain.

## Références bibliographiques

1. Spencer Jr, B. and S. Nagarajaiah, *State of the art of structural control*. Journal of structural engineering, 2003. 129(7): p. 845-856.
2. Zouheir, G., *Contrôle des vibrations d'un bâtiment isolé à la base avec TMD*. Université Mohamed khider – Biskra 2017.
3. Ounis, H.M., *Conception des systèmes d'isolation parasismiques des ouvrages en génie civil*, 2014, Université Mohamed Khider Biskra.
4. Soong, T.T. and G.F. Dargush, *Passive energy dissipation systems in structural engineering* 1997: Wiley.
5. Djedoui, N., *Modélisation et analyse du contrôle hybride (actif-passif) des vibrations des bâtiments sous sollicitations sismiques en champ proche*, 2018, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
6. KAAB, M.Z., *CONCEPTION PARASISMIQUE DES PONTS EQUIPES DE SYSTEMES D'ISOLATION AVEC PRISE EN COMPTE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE*, 2018, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
7. Karnopp, D. and M. Crosby, *System for controlling the transmission of energy between spaced members*, 1974, Google Patents.
8. Patten, W., et al. *Seismic motion control using semi-active hydraulic force actuators*. in *Proceedings of ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, San Francisco, CA. 1993.
9. [http://elearning.univ-biskra.dz/moodle/pluginfile.php/4183/mod\\_resource/content/3/co/Chapitre\\_I\\_4.html](http://elearning.univ-biskra.dz/moodle/pluginfile.php/4183/mod_resource/content/3/co/Chapitre_I_4.html)
10. Cheng, F.Y., H. Jiang, and K. Lou, *Smart structures: innovative systems for seismic response control* 2008: CRC press.
11. ; Available from:  
[https://www.google.com/search?q=Les+types+du+TMD&rlz=1C1SQJL\\_enJO860DZ869&sxsrf=AaXVQMNw2GjHbCMVbG86p22Pur8zYwS4K9:1583183536792&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiDkcyi2vznAhUixIUKHZEqD8MQ\\_AUoAXoECAwQAw&biw=1517&bih=730#imgrc=fBseSIJQmT-oPM](https://www.google.com/search?q=Les+types+du+TMD&rlz=1C1SQJL_enJO860DZ869&sxsrf=AaXVQMNw2GjHbCMVbG86p22Pur8zYwS4K9:1583183536792&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiDkcyi2vznAhUixIUKHZEqD8MQ_AUoAXoECAwQAw&biw=1517&bih=730#imgrc=fBseSIJQmT-oPM).
12. BENAYAD, K., *Comportement dynamique des ouvrages sur isolateurs de base*, 2013.
13. DJELLOULI, L., *Modélisation de système d'isolation parasismique pour le contrôle de la réponse dynamique des structures*, 2012, Université Mohamed Khider–Biskra.
14. Pham, K.H., *Vulnérabilité et spectres de plancher des structures sismiquement isolées*, 2010.
15. Tsai, H.-C., *The effect of tuned-mass dampers on the seismic response of base-isolated structures*. International journal of solids and structures, 1995. 32(8-9): p. 1195-1210.
16. Palazzo, B. and L. Petti. *Response of base isolated systems equipped with hybrid mass dampers to random excitation*. in *Proc. Eleventh World Conf. on Earthquake Engineering (11WCEE)*. 1996.
17. Providakis, C., *Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations*. Engineering Structures, 2008. 30(5): p. 1187-1198.
18. Love, J., M. Tait, and H. Toopchi-Nezhad, *A hybrid structural control system using a tuned liquid damper to reduce the wind induced motion of a base isolated structure*. Engineering structures, 2011. 33(3): p. 738-746.
19. Naeim, F. and J.M. Kelly, *Design of seismic isolated structures: from theory to practice* 1999: John Wiley & Sons.
20. KAAB, M.Z., *INFLUENCE DE L'AMORTISSEMENT SUR LA REPOSE DYNAMIQUE DES STRUCTURES AVEC SYSTEMES D'ISOLATION PARASISMIQUE*, 2010, Université Mohamed Khider-Biskra.
21. Frahm, H., *Device for damping vibrations of bodies* US Patent# 989958. 1911.

22. Den Hartog, J. and M. *Vibrations*, McGraw-Hill Book Co. New York, 1947.
23. Bishop, R. and D. Welbourn, *The problem of the dynamic vibration absorber*. Engineering, London, 1952. 174: p. 769.
24. Crandall, S.H., *Perturbation techniques for random vibration of nonlinear systems*. The Journal of the Acoustical Society of America, 1963. 35(11): p. 1700-1705.
25. IOI, T. and K. IKEDA, *On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system*. Bulletin of JSME, 1978. 21(151): p. 64-71.
26. Randall, S., D. Halsted III, and D. Taylor, *Optimum vibration absorbers for linear damped systems*. 1981.
27. Warburton, G., *Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1982. 10(3): p. 381-401.
28. Sadek, F., et al., *A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997. 26(6): p. 617-635.
29. Ghosh, A. and B. Basu, *Alternative approach to optimal tuning parameter of liquid column damper for seismic applications*. Journal of structural engineering, 2007. 133(12): p. 1848-1852.
30. 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.
31. Soto, M.G. and H. Adeli, *Optimum tuning parameters of tuned mass dampers for vibration control of irregular highrise building structures*. Journal of Civil Engineering and Management, 2014. 20(5): p. 609-620.
32. Krenk, S. and J. Hogsberg. *Tuned mass absorbers on damped structures*. in *7th European Conference on Structural Dynamics*. 2008.
33. Belaidi, S., D.A. Nerambaye, and N. Bourahla, *Performance sismique d'une tour utilisant ses étages supérieurs comme système à masse accordée (TMD)*.
34. Alqado, T.E., G. Nikolakopoulos, and L. Dritsas, *Semi-active control of flexible structures using closed-loop input shaping techniques*. Structural Control and Health Monitoring, 2017. 24(5): p. e1913.
35. Datta, T.K., *Seismic analysis of structures*2010: John Wiley & Sons.
36. Chopra, A.K., *Dynamics of structures (Vol. 3, p. 339)*, 1995, New Jersey: Prentice Hall.
37. Humar, J., *Dynamics of structures*2012: CRC press.
38. Ogata, K., *Modern Control Engineering*2010: Prentice Hall.
39. Rowell, D., *State-space representation of LTI systems*. URL: <http://web.mit.edu/2.14/www/Handouts/StateSpace.pdf>, 2002.
40. Yang, J., A. Danielians, and S. Liu, *Aseismic hybrid control systems for building structures*. Journal of engineering mechanics, 1991. 117(4): p. 836-853.
41. Council, A.T., *Quantification of building seismic performance factors*2009: US Department of Homeland Security, FEMA.