

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2022



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع...../2022

Mémoire de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Structure

Thème

L'optimisation des paramètres et de l'emplacement d'un système de contrôle passif sur la hauteur du bâtiment

Nom et Prénom de l'étudiant :
Kalfali Nadjette Seghira

Encadreur : Djedoui Nassim

Promotion: Juin 2022

Ce travail est fortement dédié à :

A mes parents, ma source de force, de conseils et d'encouragement.

***A mes chers et adorables frères que j'aime beaucoup qui ont cru en moi et qui
mont encouragé.***

A mes chers sœurs qui mont toujours soutenu.

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout dieu tout puissant de m'avoir donné la force d'accomplir ce modeste travail.

*Tout d'abord ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour Sans laide et l'encadrement de **Dr. DJEDOUI NASSIM**, je le remercie pour ses conseils judicieux, ses remarques pertinentes son soutien et son encouragement et je lui remercie pour sa disponibilité et pour le temps qu'il a pu me consacré.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à **Dr. DJEROUNI SALAH** il ma bien aidé et surtout il ma orienté avec ses précieuses remarques.*

*Un grand merci **Pr. OUNIS ABDELHAFID** pour sa générosité et son aide qu'il na jamais manqué de nous apporter.*

*Nos remerciements exceptionnels s'adressent également à **Dr. MAHDI ABDEDDAIM** pour laide qu'il a pu m'apporter.*

Enfin, mes sincères remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Récemment, de nombreuses techniques sont développées pour atténuer les vibrations des bâtiments sous excitations sismiques et leur stabilité des bâtiments, les ingénieurs s'appuient sur des systèmes de contrôle des vibrations sismiques, et parmi ces systèmes, le plus courant et le moins coûteux est le système de contrôle sismique passif, où parmi les méthodes largement utilisées c'est le système d'amortisseur à masse accordée (TMD).

Dans cette étude, nous avons opté pour l'optimisation via l'algorithme génétique des paramètres du TMD installé sur différents emplacements (étages) sur une structure de 10 étages pour objectif de réduire la réponse de cette dernière sous excitation sismique. L'optimisation a été lancée sous l'excitation sismique El Centro sous MATLAB. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de l'optimisation, ainsi l'effet de l'emplacement du TMD sur leur performance et leur caractéristique dynamiques. Les résultats obtenus sont aussi comparés aux celles obtenus par les formules analytiques.

Mots clés: Contrôle de vibration passif, amortisseurs à masse accordée (TMD), réponse sismique, algorithme génétique, valeur optimale, emplacement.

SOMMAIRE

Dédicace

Remerciements

Résumé

Sommaire

ListeDesFigures

ListeDesTableaux

Introduction Générale

Chapitre I: Les différents systèmes de contrôles des vibrations sismiques

1.1 Introduction

1.2 Système de contrôle passif

1.2.1 Isolateurs parasismiques

1.2.1.1 Isolateurs élastomériques

1.2.1.2 Isolateur élastomérique avec noyau de plomb

1.2.1.3 Isolateur élastomérique à fort taux d'amortissement

1.2.1.4 Appui à pendule de friction

1.3 Systèmes passifs à dissipation d'énergie

1.3.1 Amortisseurs viscoélastiques (VE)

1.3.2 Amortisseur à masse accordée passif TMD

1.3.3 Amortisseurs à liquide accordée TLD

1.4 Les systèmes de contrôle actif

1.4.1 Configuration de base des systèmes de contrôle actif

1.5 Conclusion

Chapitre II formulation mathématique

2.1 Introduction

2.2 Système avec TMD amorti sous chargement harmonique

2.3 Dynamique des structures et équations de mouvement

2.4 Equations de mouvement et représentation mathématiques

2.4.1 Structure sans dispositif de contrôle

2.5 Contrôle passif

2.5.1 Bâtiments équipés d'un amortisseur à masse accordée (TMD)

2.6 Installation de TMD

2.6.1 Structure n étage

2.6.1.1 Amortisseur TMD installé au dernier étage

2.6.1.2 Amortisseur TMD installé sur l'étage n

2.7 Exemple

2.7.1 Amortisseur TMD installé au premier étage

2.7.1.1 L'équation du mouvement

2.7.1.2 Les équations précédentes peuvent être écrites sous forme matricielle

2.7.2 Amortisseur TMD installé au deuxième étage

2.7.2.1 L'équation du mouvement

2.7.2.2 Les équations précédentes peuvent être écrites sous forme matricielle

2.7.3 Amortisseur TMD installé a 3 étages

2.7.3.1 L'équation du mouvement

2.7.3.2 Les équations précédentes peuvent être écrites sous forme matricielle

2.8 Conclusion

Chapitre III L'algorithme génétique

3.1 Introduction

3.2 Principe général de l'algorithme génétique

3.2.1 Codage des données

3.2.2 Génération aléatoire de la population initiale

3.2.3 Gestion des contraintes

3.2.4 Opérateur de croisement

3.2.5 Opérateur de mutation

3.2.6 Principes de sélection

3.2.7 Elitisme

3.3 L'algorithme génétique sur MATLAB

3.3.1 Aperçu de l'algorithme (sur MATLAB)

3.3.2 Critères d'arrêt de l'AG

3.4 Conclusion

Chapitre 4 Modélisation et résolution numérique: Exemple d'application

4.1 Introduction

4.2 Présentation de la structure

4.3 Solution en représentation d'état (*state-space*)

4.3.1 La forme générale

4.4 Implémentation et simulation sur MATLAB

4.5 Optimisation par l'algorithme génétique

4.6 Présentation du séisme

4.7 Réponse structurelle avec TMD optimale

4.8 Effet d'emplacement et la masse du TMD sur la réponse de la structure

4.9 Performance du TMD en fonction du rapport massique et l'emplacement

4.10 Conclusion

Liste de figure

Chapitre I: Les différents systèmes de contrôles des vibrations sismiques

Figure 1.1 Catégorisation des différents mécanismes de contrôle

Figure 1.2 isolateur élastométrique avec cales en acier.

Figure 1.3 isolateur élastométrique à barreau de lomb

Figure 1.4 isolateur élastométrique à fort taux d'amortissement fabriqué par BTR Andre

Figure 1.5 Isolateur a pendule de friction

Figure 1.6 Amortisseur viscoélastique (VE)

Figure 1.7 configuration de base d'une structure équipée d'un TMD

Figure 1.8 Amortisseur à liquide accordé

a) TLD à ballotement Yalla [25] b) TLD poteau Ikeda et al. [26]

Figure 1.9 Diagramme d'un contrôle actif

Chapitre II formulation mathématique

Figure 2.1 Schéma d'installation d'un AMA (de type pendule) dans un tour de 101 étages à Taipei

Figure 2.2 tuned mass damper

Figure 2.3 Structure + TMD

Figure 2-4 Courbes de résonance de fréquence optimale

Figure 2-5 Courbes de résonance de fréquence optimale et de réglage d'amortissement (D'après Den Hartog 1985)

Figure 2.7 représentation dynamique d'une structure à plusieurs degrés de liberté

Figure 2-8 Bâtiment à plusieurs degrés de liberté équipé par un TMD

Figure 2-9 Diagramme de corps libre – structure à NDDL avec TMD

Figure 2.10 Structure à plusieurs étages équipée d'un amortisseur TMD au installé au dernier étage

Chapitre III L'algorithme génétique

Figure 3-1 Principe de l'algorithme Génétique

Figure 3-2 Croisement

Figure 3-3 Mutation

Chapitre 4 Modélisation et résolution numérique: Exemple d'application

Figure 4.1 structure à plusieurs degrés de liberté équipée d'un TMD

Figure 4.2 La forme générale de la représentation d'état « state space », SISO (*single input, single output*)

Figure 4.3 : Diagramme de résolution sur SIMULINK/MATLAB

Figure 4.4 : Diagramme de résolution sur SIMULINK/MATLAB

Figure 4.5 : Déplacement en tête du bâtiment

Figure 4.6 : Accélération en tête du bâtiment

Figure 4.7 : L'effort tranchant à la base du bâtiment

Figure 4.8 Réduction des réponses structurelles en termes du rapport massique

Figure 4.9 Réduction du déplacement maximal en fonction de l'emplacement du TMD

Figure 4.10 Réduction de l'accélération maximal en fonction de l'emplacement du TMD

Figure 4.11 Réduction de l'effort tranchant en fonction de l'emplacement du TMD

Figure 4.12 Réduction du déplacement maximal en fonction de l'emplacement du TMD et du rapport massique

Figure 4.13 Réduction de l'accélération maximale en fonction de l'emplacement du TMD et du rapport massique

Figure 4.14 Réduction de l'effort tranchant maximal en fonction de l'emplacement du TMD et du rapport massique

Listes de tableaux

Chapitre II formulation mathématique

Tableau 2.1 : Formules d'optimisation des paramètres du TMD passif selon la littérature

Chapitre 4 Modélisation et résolution numérique: Exemple d'application

Tableau 4.1 : paramètres de l'algorithme génétique

Tableau 4.2 : Déplacement maximal du dernier étage en fonction de l'emplacement du TMD et le rapport massique

Tableau 4.3 : Paramètres du TMD utilisé obtenus via les formules et via l'optimisation

Introduction Générale :

Lors d'un tremblement de terre, une quantité importante d'énergie est appliquée à la structure. Si cette énergie n'est pas absorbée ou dissipée, elle provoque une destruction qui entraînera d'importants dommages financiers et vitaux. Dans les méthodes conventionnelles, le bâtiment présente une résistance en combinant rigidité, ductilité et dissipation d'énergie ainsi que l'inertie contre les forces dynamiques. La valeur d'amortissement dans ces structures est très faible et donc l'énergie amortie est négligeable dans le domaine de comportement élastique de la structure. Ces dernières années, de nombreux efforts ont été faits pour appliquer des dispositifs de contrôle modernes aux structures exposées aux séismes. Ces dispositifs ont un rôle de dissiper une partie d'énergie et limiter la réponse structurelle ainsi que les dommages possible sur les éléments structuraux.

Différentes dispositifs de contrôle des vibrations sont disponibles, catégorisés en quatre branches : passives, semi-actives, actives et hybrides. Divers facteurs tels que l'efficacité, le poids, le coût de l'appareil et de la mise en œuvre, la maintenance et la sécurité influencent le choix d'un type spécifique de dispositif de contrôle des vibrations.

Les amortisseurs de masse accordés (TMD) sont un type de systèmes d'amortissement passifs largement utilisés et installés sur des structures réelles, le TMD se fixe à la structure principale en tant que masse secondaire et réduisent la réponse dynamique de la structure par l'amortissement et la rigidité. Les amortisseurs de masse ont une masse d'environ 1 à 5% de la masse totale de la structure, qui est reliée par un ressort et des amortisseurs à l'emplacement de la structure qui a généralement le plus de déplacement. Les amortisseurs de masse sont généralement accordés par la fréquence du mode principal de la structure.

Cette recherche est la continuité d'un mémoire de master présentée l'année passée par l'étudiante : Assia Merabet qui avait pour but d'utiliser l'algorithme génétique afin de concevoir un TMD avec des performances optimale pour utilisation sur des structures à plusieurs degrés de liberté. Cette fois ci, et dans cette recherche l'idée est autour l'influence de l'emplacement sur les performances d'un TMD installé sur une structure à plusieurs étages. L'algorithme génétique est utilisé pour assurer que les paramètres du TMD sont choisis d'une manière optimale pour chaque emplacement. Autre facteur a été considéré, non seulement comme déjà révélé mais aussi l'effet du rapport massique sur les performances du TMD.

Cette recherche comprend la revue de la littérature liée au sujet, les équations gouvernantes des structures à plusieurs étages équipés d'un TMD, l'introduction des modèles structurels utilisés dans la recherche, une vue générale sur les bases de l'algorithme génétique, présentation du model implémenté sur MATLAB et l'exploitation des résultats.

Les résultats obtenus démontrent que l'algorithme génétique présente toujours un avantage en termes de choix des paramètres du TMD. Cependant, pour des performances optimales il est préférable de placer le TMD sur les 1/3 derniers étages de la structure avec un rapport massique approprié.

Chapitre I

Système des contrôles des vibrations

1.1 Introduction

L'inefficacité des conceptions traditionnelles pour résister aux différentes excitations a conduit à l'application de la technologie de structure intelligente innovante aux structures de génie civil. Cette technologie a progressivement gagné en popularité à mesure que les résultats de la recherche et les mises en œuvre pratique continuent de montrer que ce concept est un moyen prometteur pour protéger les structures face aux excitations dynamiques.

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

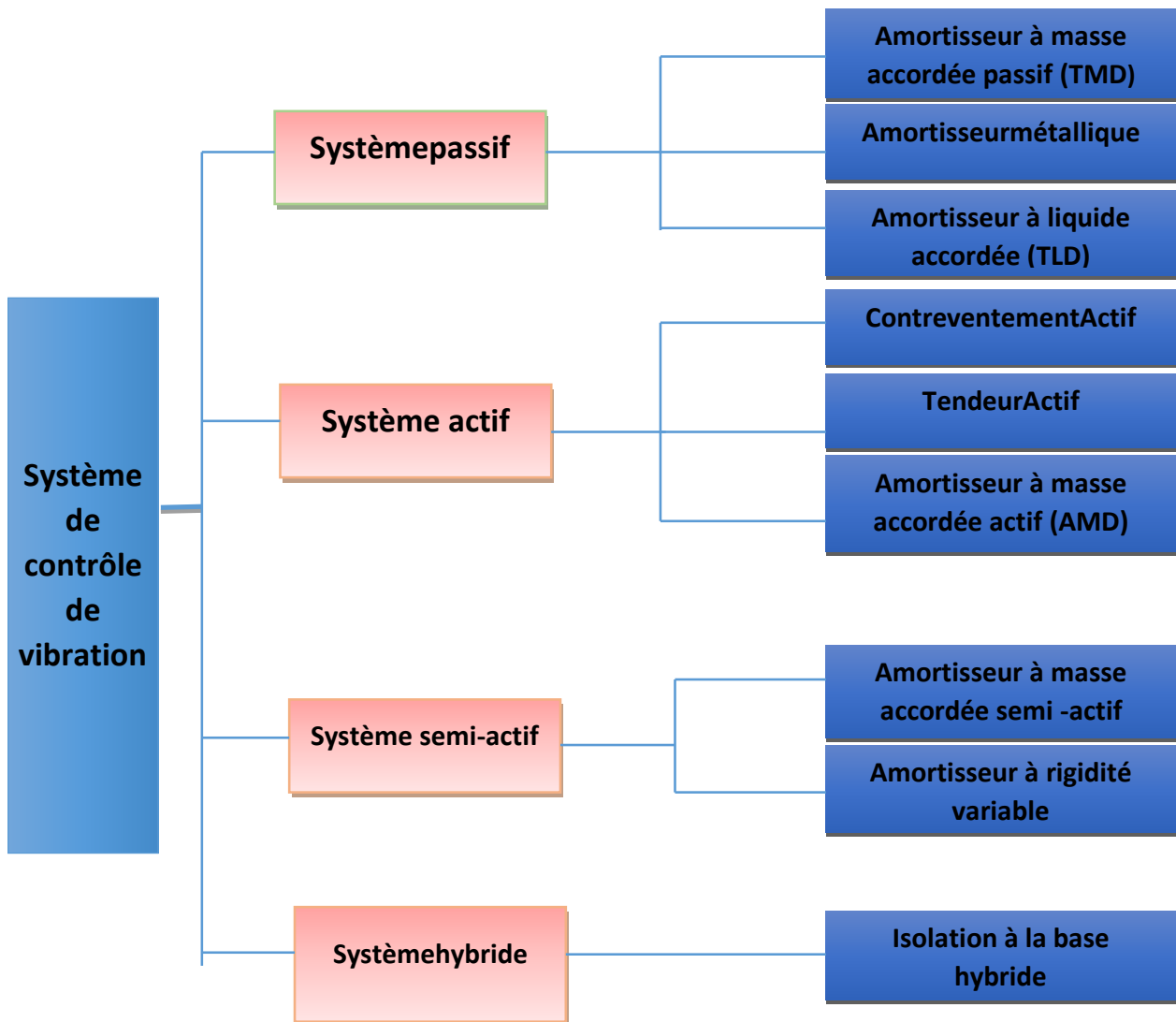


Figure 1.1 Catégorisation des différents mécanismes de contrôle

1.2 Système de contrôle passif :

Les techniques de contrôle passif sont basées sur l'augmentation artificielle de la capacité de dissipation, obtenue au moyen de l'insertion, dans des positions appropriées, de dispositifs spéciaux dont la rigidité et la résistance ont été définies afin de réduire la réponse sismique des bâtiments (déplacement, accélération...etc.).

La caractéristique la plus avantageuse des dispositifs passifs est leur autonomie. Ainsi, les dispositifs passifs ne requièrent aucune source d'énergie externe pour fonctionner. Comme exemple de dispositifs passifs, l'isolation à la base, les systèmes de dissipation d'énergie et les amortisseurs à masse accordée peuvent être cités. Dans la majorité des cas, ces systèmes ont une grande capacité à se déformer sous des chargements externes aidant ainsi la structure à dissiper une grande quantité d'énergie sismique. Une grande partie dans cette catégorie de système est réservée au système d'isolation parasismique.

1.2.1 Isolateurs parasismiques

1.2.1.1 Isolateurs élastomériques

Les isolateurs élastomériques étaient conçus du caoutchouc naturel. Plus tard leurs propriétés ont été améliorées par l'ajout des plaques en acier. Un isolateur en élastomère avec des plaques en acier est présenté schématiquement dans la figure 1.2.

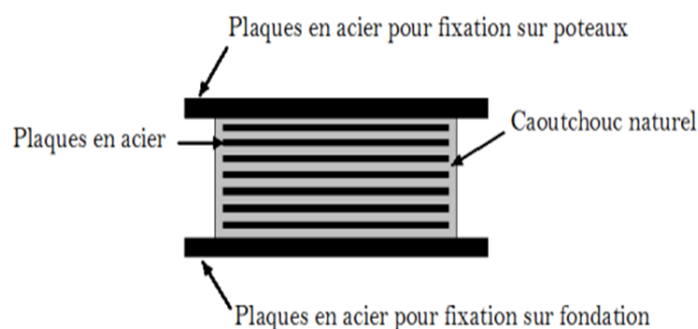


Figure 1.2 isolateur élastomérique avec cales en acier.

Les isolateurs en élastomère ont été utilisés avec succès dans les bâtiments et autres structures comme les ponts. Ils sont bien fonctionnés pendant plus de 50 ans de service. Les isolateurs en élastomère sont également appelés isolateurs à faible amortissement faciles à fabriquer et le coût de fabrication et d'entretien est relativement bas comparé à d'autres types d'isolateurs. De plus, leurs propriétés mécaniques sont indépendantes de la température et du vieillissement[1].

1.2.1.2 Isolateur élastomérique avec noyau de plomb

L'inconvénient des propriétés de faible amortissement l'isolateur en élastomère peut être surmené en insérant un noyau de plomb dans l'isolateur. Un trou préformé, légèrement plus petit que le noyau de plomb, est généralement situé au centre de l'élastomère. Une fois que la fiche de plomb est bien ajustée dans le trou préformé, les deux parties deviennent une unité et forment un palier plomb-bouchon comme le montre la figure 1.3. Les performances de l'appui plomb-bouchon dépendent de la force latérale imposée[2].

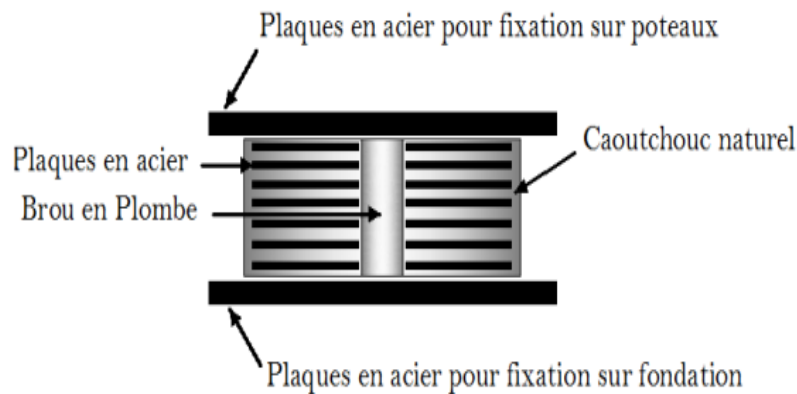


Figure 1.3 isolateur élastomérique à barre de plomb

1.2.1.3 Isolateur élastomérique à fort taux d'amortissement

Une autre méthode efficace pour augmenter l'amortissement du isolateur consiste à modifier les mélanges de caoutchouc, qu'il s'agisse de caoutchouc naturel ou synthétique. Par exemple, ajouter du noir de carbone ou d'autres types de charges au caoutchouc naturel modifie les propriétés du caoutchouc et entraîne un amortissement plus élevé. L'isolateur en caoutchouc à amortissement élevé est uniquement composé de cales en caoutchouc et en acier, mais il possède la flexibilité nécessaire ainsi que les capacités de dissipation d'énergie. La figure 1.4

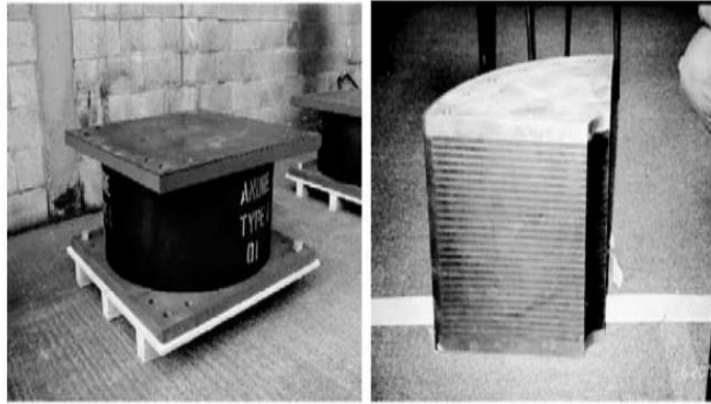


Figure 1.4 isolateur élastomérique à fort taux d'amortissement fabriqué par BTR Andre

Les propriétés mécaniques de l'isolateur en caoutchouc à haut amortissement sont en quelque sorte affectée par les effets du vieillissement, de la température. Aussi, la sélection de la rigidité et de l'amortissement du isolateur est limité grâce mélange de caoutchouc lui-même [3].

1.2.1.4 Appui à pendule de friction

L'isolateur à friction d'origine présente des surfaces de glissement plates. La fore latérale imposée est résistée par le produit du coefficient de frottement et de la charge verticale appliquée sur l'isolateur. L'inconvénient majeur ce type d'isolateur est que la structure du bâtiment est incapable de revenir à son état d'origine position après un mouvement. En effet, une fois que la force latérale imposée est inférieure à la résistance générée par le frottement, le mouvement de la structure du bâtiment s'arrête et fait que la structure reste à une certaine distance du centre de l'isolateur. Par conséquent, le mouvement du bâtiment peut dépasser la portée de l'isolateur et entraîner la défaillance de l'isolateur.

Pour réduire la distance au centre de l'isolateur après un tremblement de terre, un isolateur à friction avec une surface de glissement sphérique ou concave a été développé. Ce type de isolateur est appelé isolateur pendulaire à friction et est illustré à la figure 1.5.

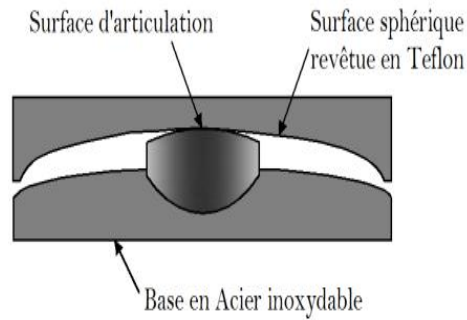


Figure 1.5 Isolateur a pendule de friction

L'isolateur a friction pendulaire a l'avantage de nécessiter peu d'entretien. Le revêtu de téflon sur l'acier inoxydable protège efficacement la surface de glissement de corrosion[4].

1.3 Systèmes passifs à dissipation d'énergie

Les systèmes passifs de dissipation d'énergie utilisent des dispositifs mécaniques pour dissiper une partie de l'énergie structurelle, réduisant ainsi la réponse structurelle et les éventuels dommages structurels. Ils ont été utilisés pour atténuer les vibrations structurelles causées par le vent et les excitations sismiques. Les systèmes passifs typiques sont des amortisseurs de masse accordés (TMD), amortisseurs à liquide accordés (TLD), dispositifs de friction, dispositifs de rendement métalliques, amortisseurs visqueux-élastiques et amortisseurs à fluide visqueux.

1.3.1 Amortisseurs viscoélastiques (VE)

Les amortisseurs viscoélastiques (VE) utilisent des matériaux avec un amortissement élevé pour dissiper énergie par déformation de cisaillement. Ces matériaux comprennent le caoutchouc, les polymères et substances vitreuses. Un amortisseur VE typique se compose de couches liées à des plaques d'acier comme illustré à la Figure 1.6. Les composants de l'amortisseur VE sont montés sur la structure diagonalement dans le cas générale[5].

Une déformation par cisaillement se produit et l'énergie est dissipée lorsque la vibration structurelle induit un mouvement relatif entre l'extérieur brides en acier et la plaque centrale.

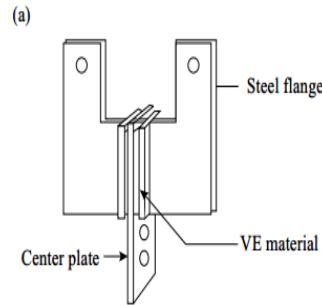


Figure 1.6 Amortisseur viscoélastique (VE)

1.3.2 Amortisseur à masse accordée passif TMD

Les amortisseurs de masse accordée, consistent en leur simple forme en un système auxiliaire (secondaire) de masse md et d'un ressort de rigidité k et un amortisseur cd fixé sur la structure principale, généralement au sommet de la structure, comme le montre la figure 1.7,[6]. Les Amortisseurs dynamiques sont largement utilisés dans les systèmes mécaniques. L'application d'un amortisseur à masse accordée TMD dans le domaine du génie civil est plus complexe car les structures sont lourdes; comme les ponts et les bâtiments. Les vibrations de la structure principale entraînent le mouvement du TMD, une partie de l'énergie se transfère à l'énergie de vibration du TMD. L'amortissement du TMD dissipe son énergie de vibration, et réciproquement, les vibrations de la structure sont atténuées par amortissement TMD.

Si la fréquence propre du système auxiliaire est proche de celui du système primaire, le mouvement de la masse TMD a environ 90° de retard de phase de la vibration du système primaire.

La capacité d'absorption d'énergie du TMD est liée au rapport massique du TMD à la structure principale, au rapport de rigidité du TMD à la structure, autrement dit la fréquence naturelle de réglage (*tuning frequency*) du TMD à la structure,[7-9]. L'effet de TMD peut être considéré comme équivalent à changer le rapport d'amortissement de la structure elle-même à une plus grande valeur. Pour les réponses des structures légèrement amorties avec un mode dominant, le TMD peut réduire efficacement la réponse maximale. Compte tenu de cette caractéristique, les TMD sont de plus en plus utilisés pour les structures sensibles au vent afin de limiter les mouvements excessifs du bâtiment et d'assurer le confort des occupants. Les structures suivantes

sont équipées d'un TMD : la tour CN à Toronto, la tour John Hancock à Boston, et le centre Citicorp à New York.

L'applicabilité des TMD est encore limitée par trois facteurs. Premièrement, les TMD ne sont efficaces que pour un seul mode, ce qui les rend moins adaptés au contrôle de la réponse sismique. Deuxièmement, ils sont sensibles au dérèglement de la fréquence. Troisièmement, ils occupent un espace relativement important. À mesure que la technologie industrielle progresse, les configurations de TMD sont améliorées pour répondre à ces limitations. Un développement intéressant est d'ajouter un actionneur actif au TMD de sorte qu'il peut être efficace pour de multiples modes de réponse sismique

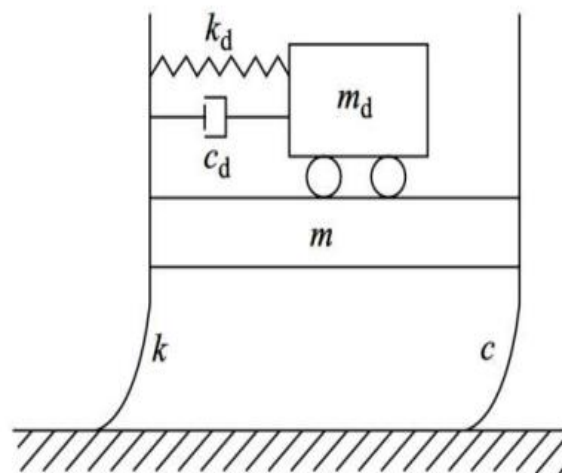


Figure 1.7 configuration de base d'une structure équipée d'un TMD

1.3.3 Amortisseurs à liquide accordée TLD

Un autre type d'absorbeur dynamique pour le contrôle des vibrations structurelles est le TLD. Dans un TLD, l'eau ou un autre liquide sert comme masse en mouvement, et la force de rappel est générée par la gravité. La vibration structurelle secoue le TLD et induit le mouvement du liquide à l'intérieur du conteneur. La turbulence du flux de liquide et le frottement entre le liquide et le récipient convertit l'énergie dynamique de fluide en chaleur, absorbant ainsi l'énergie de vibration structurelle. Notons qu'un TLD a le même principe de base qu'un TMD pour absorber l'énergie de vibration structurelle, et qu'aucun d'entre eux n'a de mécanismes complexes. La différence est que toutes les caractéristiques du système auxiliaire d'un TLD comme la masse,

l'amortissement et la rigidité sont fournies par le liquide lui-même.

Les TLD sont initialement appliqués à bord des navires et leur application pour le contrôle des vibrations des structures de génie civil a commencé dans les années 1980. La figure 1.8 montre deux types typiques de TLD. L'amortisseur de ballottage place des mailles ou des tiges dans le liquide pour fournir une capacité d'amortissement, les TLD ont été utilisés pour atténuer les vibrations causées par le vent des structures élancées, telles que les tours d'aéroports et les gratte-ciels [10]. Les TLD ont deux avantages. Un seul TLD peut être efficace dans n'importe quelle direction de vibrations latérale, et l'eau utilisée pour TLD peut servir à une double fonction dans le cadre de l'approvisionnement en protection d'incendie du bâtiment. Tandis que, les TLD ont deux propriétés défavorables. Ils nécessitent plus d'espace car les liquides ont une masse volumique plus faible que les matériaux pour TMD, tels que le béton ou l'acier. Les TLD présentent également une réponse hautement non linéaire due au ballottage. Cette non-linéarité inhérente complique l'analyse et le processus de conception des systèmes TLD

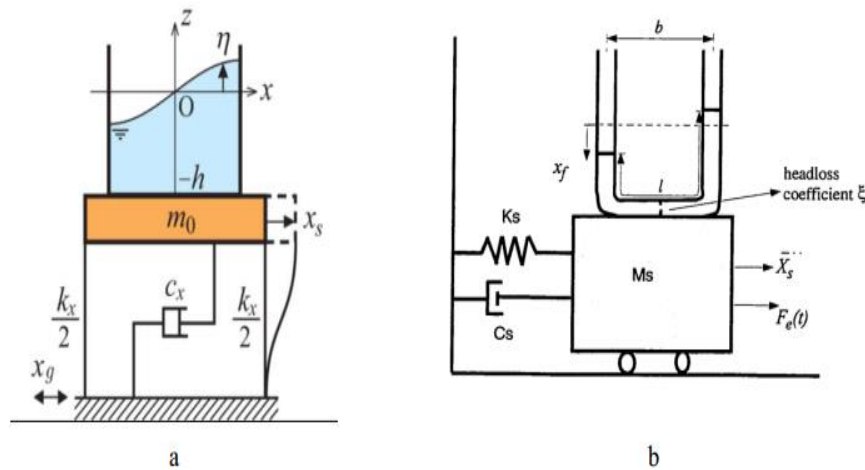


Figure 1.8 Amortisseur à liquide accordé
a) TLD à ballottage Yalla [25] b) TLD poteau Ikeda et al. [26]

1.4 Les systèmes de contrôle actif

Les sections 1.4 et 1.5 ont discuté des structures intelligentes utilisant des systèmes de contrôle. Les deux systèmes sont rentables et fiables, mais leur capacité et/ou l'intelligence sont limitées pour le contrôle structurel de la réponse sismique. Les systèmes passifs ont des mécanismes simples et sont faciles à fabriquer, mais ils ne s'adaptent pas suffisamment aux excitations

externes en constante évolution car ils ne détectent ni l'excitation ni la réponse ni n'utilisent d'alimentation externe. Certains d'entre eux, tels en tant que TMD et TLD, ne sont efficaces que pour la suppression des réponses structurelles avec un mode dominant, comme les vibrations de structure induites par le vent. Semi actif les amortisseurs ont un système adaptatif incorporé, mais ils ne peuvent fonctionner que dans la capacité maximale des dispositifs passifs sur lesquels ils reposent. Ainsi, il y a clairement un besoin pour un système adaptatif plus puissant pour protéger les structures des vibrations excessives et des dommages causés par de forts tremblements de terre où plusieurs les modes sont significatifs dans la réponse structurelle. Cela a conduit à l'émergence de structures intelligentes avec contrôle actif de la réponse sismique. Cette technique innovante utilise des dispositifs spéciaux, tels que des actionneurs électro hydrauliques, pour générer les structures intelligentes requises: systèmes innovants pour le contrôle de la réponse sismique contrôler la force contre la charge sismique en renvoyant la structure mesurée réponse. Cette force de contrôle peut servir d'amortissement supplémentaire, réduisant ainsi vibrations sous les excitations de la circulation, du vent et des tremblements de terre. Les systèmes de contrôle actif ont été largement utilisés pour supprimer les bruits et les vibrations structurelles dans les industries mécaniques et aérospatiales. Leur application aux grands les structures de génie civil est un domaine innovant en recherche et développement [11]. Le contrôle actif de la réponse sismique a reçu l'attention ces dernières années.

1.4.1 Configuration de base des systèmes de contrôle actif

Un système de contrôle actif est entièrement adaptatif. Les structures intelligentes utilisant des systèmes de contrôle actifs utilisent une alimentation externe pour générer la force de contrôle, qui est directement appliquée à la structure pour réduire sa réponse. Étant donné que les structures des bâtiments sont généralement grandes, d'énormes équipements générateurs de force et de grandes alimentations externes sont nécessaires pour contrôle actif de la réponse sismique. Ainsi, un système de contrôle actif de la réponse sismique est généralement conçu principalement pour augmenter l'amortissement structurel avec des modifications mineures de la rigidité structurelle Figure 1.9schématiquement illustre la configuration de base d'un tel système, qui se compose de trois types d'éléments : capteur(s), actionneur(s) et un contrôleur avec une commande prédéterminée algorithme. Il existe plusieurs type de contrôle actif qui peuvent être installés sur la structure. On peut citer : le système à tendon actif, système à contreventement actif et amortisseur à masse accordée actif (ATMD)[12].

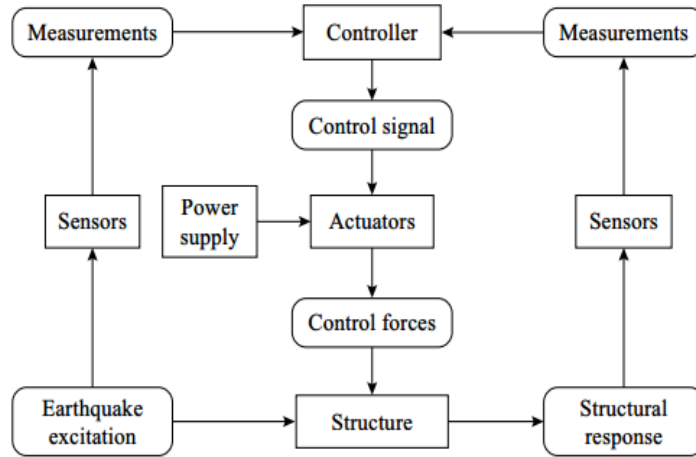


Figure 1.9 Diagramme d'un contrôle actif

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a cité des différents mécanismes de contrôle pour les structures en génie civil, à savoir : le système passif, actif, semi-actif et hybride, en notant que le choix du système de contrôle doit se faire selon un objectif bien défini prenant en compte le coût et l'efficacité. Parmi les avantages de système passif c'est leur cout est pas chers mais avec un certain inconvénient comme la limite de performance qui peut être compensée par un système actif intermédiaire qui augmente la capacité globale malgré que ce dernier dépend d'une source d'énergie importante.

Chapitre II

Formulation mathématique

2.1 Introduction

Les TMD sont implémentés généralement sous deux formes. La première forme représentée dans la figure (2.1) est l'amortisseur à masse accordée pendulaire. Les ingénieurs ont utilisé ce système dans une structure de 508m de hauteur (Taipei 101) [13] ou ils ont choisi d'ajouter une boule d'acier de 800 tonnes dans le bâtiment pour stabiliser la tour en présence d'excitation externe (séismes ou vents), la deuxième est connue sous forme d'une masse attachée à la structure principale par un ressort et un amortisseur tel que le bloc de béton et la masse installée au sommet du bâtiment sur une surface lisse lubrifiée avec de l'huile se déplace en combinaison Citicorp center à New York dans les années 1970. Dans ce chapitre une présentation des différentes équations dynamiques des bâtiments avec et sans TMD sous excitation sismique ainsi que la théorie du TMD.

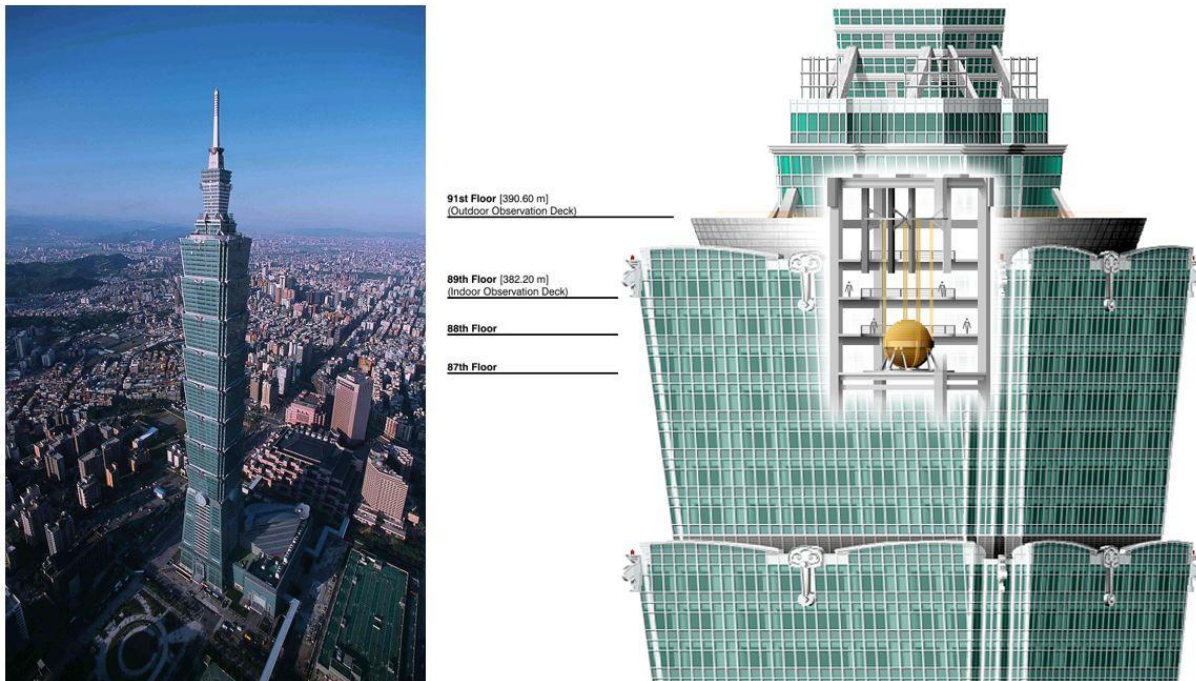


Figure 2.1 Schéma d'installation d'un TMD (de type pendule) dans un tour de 101 étages à Taipei



Figure 2.2 Tuned mass damper pendulaire de la tour Taipei 101

2.2 Système avec TMD amorti sous chargement harmonique

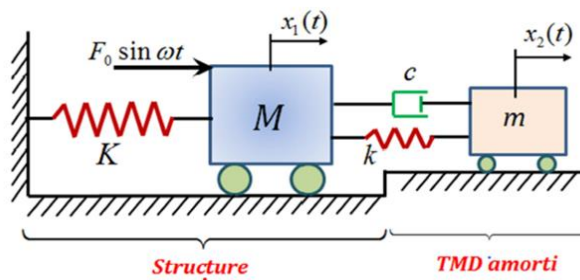


Figure 2.3 Structure + TMD

Pour ce système, l'entrée est la force $F_0(t)$ et la sortie est le déplacement $x_1(t)$. En utilisant la deuxième loi de Newton, l'équilibre dynamique des forces pour le diagramme de corps libre de la figure 1.3 donne l'équation différentielle ordinaire de second ordre suivante :

$$M\ddot{x}_1 + Kx_1 - k(x_2 - x_1) - c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = F_0 \sin \omega t \quad (2.1)$$

Et pour la masse accordée :

$$m\ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) = 0 \quad (2.2)$$

On s'intéresse par la solution des vibrations forcées en régime permanent et on ne considère pas la force transitoire de vibration libre. x_1 comme x_2 sont des mouvements harmoniques à une fréquence ω et peuvent être représentés par :

$$x_1 = Ae^{i\omega t}$$

$$x_2 = Be^{i\omega t}$$

Où A et B sont des constantes d'intégration qui dépendent des conditions initiales du mouvement[3].

Nous voulons déterminer l'amplitude de la masse principale :

$$x_1 = Ae^{i\omega t} \dot{x}_1 = Ai\omega e^{i\omega t} \ddot{x}_1 = -A\omega^2 e^{i\omega t}$$

$$x_2 = Be^{i\omega t} \dot{x}_2 = Bi\omega e^{i\omega t} \ddot{x}_2 = -B\omega^2 e^{i\omega t}$$

Recevant maintenant les équations 2.1 et 2.2 en remplaçant les termes précédents :

$$-MA\omega^2 e^{i\omega t} + (K + k)Ae^{i\omega t} - kB e^{i\omega t} + Ai\omega e^{i\omega t} - Bi\omega e^{i\omega t} = F_0 \sin \omega t$$

$$-mB\omega^2 e^{i\omega t} + KAe^{i\omega t} - kB e^{i\omega t} + cAi\omega e^{i\omega t} - cBi\omega e^{i\omega t} = 0$$

$$A(-M\omega^2 + K + k + i\omega c) - B(k + i\omega c) = F_0 \quad (2.3)$$

$$B(-m\omega^2 + k + i\omega c) - A(k + i\omega c) = 0 \quad (2.4)$$

D'après l'équation (2.4) on trouve :

$$B = \frac{k + i\omega c}{(-m\omega^2 + k + i\omega c)} \quad (2.5)$$

En remplaçant l'équation (2.5) dans (2.3) on trouve :

$$A(-M\omega^2 + K + ki\omega c) - A \frac{(k + i\omega c)^2}{(-m\omega^2 + k + i\omega c)} = F_0$$

$$A = F_0 \frac{(-m\omega^2 + k + i\omega c)}{(-M\omega^2 + K + k + i\omega c)(-m\omega^2 + k + i\omega c) - (k + i\omega c)}$$

$$A = F_0 \frac{(k - m\omega^2) + i\omega c}{[(-M\omega^2 + K)(-m\omega^2 + k) - m\omega k] + i\omega c[-M\omega^2 + K + k - m\omega^2]} \quad (2.6)$$

$$A_1 = F_0(B_1 + iB_2) \quad (2.7)$$

$$|A_1| = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} \quad (2.8)$$

$$A = F_0 \frac{C + iD}{H + iG} \quad (2.9)$$

$$C = (k - m\omega^2)$$

$$D = \omega * c$$

$$H = [(-M\omega^2 + K)(-m\omega^2 + k) - m\omega k]$$

$$G = \omega * c * [-M\omega^2 + K + k - m\omega^2]$$

L'amplitude A_1 peut s'écrire sous forme :

$$\frac{|A_1|}{F_0} = \sqrt{\left(\frac{CH + DG}{H^2 + G^2}\right)^2 + \left(\frac{DH - CG}{H^2 + G^2}\right)^2}$$

$$\frac{|A_1|}{F_0} = \sqrt{\frac{C^2H^2 + D^2G^2 + D^2H^2 + C^2G^2}{(H^2 + G^2)^2}}$$

$$\frac{|A_1|}{F_0} = \sqrt{\frac{C^2(H^2 + G^2) + D^2(H^2 + G^2)}{(H^2 + G^2)^2}}$$

$$\frac{|A_1|}{F_0} = \sqrt{\frac{C^2 + D^2}{H^2 + G^2}} \quad (2.10)$$

On substitue les valeurs de l'équation (1-8) dans l'équation (1-10) donne une expression de l'amplitude de la réponse de la masse principale M.

$$\frac{|A_1|}{F_0} = \sqrt{\frac{(k - m\omega^2)^2 + (\omega c)^2}{[(-M\omega + K)(-m\omega^2 + k) - m\omega K] + \omega^2 c^2[-M\omega^2 + K + k - m^2]}}$$

$\mu = \frac{m}{M} = \frac{\text{masseTMD}}{\text{massestructure}}$: rapport massique.

$\omega_n^2 = \frac{K}{M}$: fréquence naturelle de structure.

$\omega_a^2 = \frac{k}{m}$: fréquence naturelle de TMD.

$f = \frac{\omega_a}{\omega_n}$: rapport fréquence TMD/structure.

$g = \frac{\omega}{\omega_n}$: rapport fréquence de forçage.

Après quelques transformations algébriques, on peut écrire :

$$\frac{|A_1|}{x_{st}} = \sqrt{\frac{\left(2\frac{c}{c_c}g\right)^2 + (g^2 - f^2)^2}{\left(2\frac{c}{c_c}g\right)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + [\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)]^2}} \quad (2.11)$$

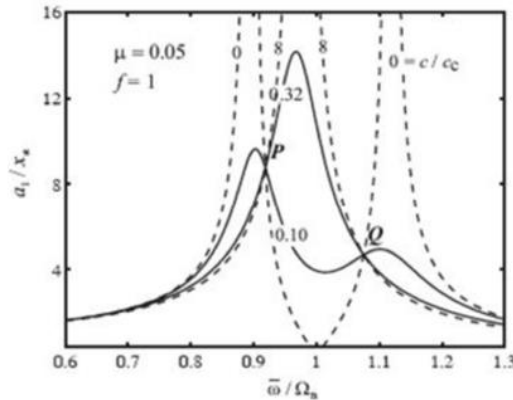


Figure 2-4 Courbes de résonance de fréquence optimale

D'abord les deux points P et Q sont localisés. On peut réécrire l'équation (2.11) comme suit :

$$\frac{|A_1|}{x_{st}} = \sqrt{\frac{A\left(\frac{c}{c_c}\right)^2 + B}{C\left(\frac{c}{c_c}\right)^2 + D}} \quad (2.12)$$

Tel que:

$$A = 2g^2$$

$$B = (g^2 - f^2)^2 \quad (2.13)$$

$$C = (2g^2)(g^2 - 1 + \mu g^2)$$

$$D = [\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)]^2$$

Si $\frac{A}{C} = \frac{B}{D}$ l'équation (2.12) devient indépendante de l'amortissement. Cette condition est donnée par :

$$\left(\frac{1}{(g^2 - 1 + \mu g^2)^2} \right)^2 = \left(\frac{g^2 - f^2}{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)} \right)^2 \quad (2.14)$$

Pour enlever le carré dans chaque terme de l'équation (2.17), nous devons introduire le signe (\pm) devant chacun des deux termes de l'équation. Avec le signe moins, la solution est triviale puisqu'on trouve $g^2=0$, ce qui veut dire que la réponse statique est indépendante de l'amortissement.

La seconde alternative est le signe plus qui mène à :

$$g^2 - 2g^2 * \frac{1+f^2+\mu f^2}{2+\mu} + \frac{2f^2}{2+\mu} = 0 \quad (2.15)$$

L'équation (2.15) est quadratique en g^2 , donnant deux racines (g_1 et g_2) représentant les coordonnées des points fixes P et Q. Ces racines sont fonction de μ et f .

Pour ajuster la fréquence de réglage telle que les points P et Q soient égaux, les racines de l'équation (2.15) sont déterminées et substituées dans l'équation (2.14). Lorsque les expressions de P et Q sont égalisées, une relation simple entre m et f est alors obtenu :

$$f = \frac{1}{1+\mu} \quad (2.16)$$

Notons que $\frac{c}{c_c}$ disparaît puisque les amplitudes des points P et Q sont indépendantes de l'amortissement.

À présent, pour déterminer l'amortissement optimal $(\frac{c}{c_c})_{opt}$ (2.16) est substitué dans l'équation (2.11).

L'équation qui résulte est différentiée par rapport à g et mise égale à zéro, alors qu'une des deux racines obtenues dans l'équation (2.15) est également remplacée dans l'équation (2.11). À partir de ce calcul, nous obtenons pour un optimum à point P.

$$\left(\frac{c}{c_c}\right)_{opt-P} = \frac{\mu \left(3 + \sqrt{\frac{\mu}{\mu+2}}\right)}{8(1+\mu)^3} \quad (2.17)$$

Alternativement, si la dérivée est égale à zéro au point Q, nous obtenons aussi :

$$\left(\frac{c}{c_c}\right)_{opt-Q} = \frac{\mu \left(3 + \sqrt{\frac{\mu}{\mu+2}}\right)}{8(1+\mu)^3} \quad (2.18)$$

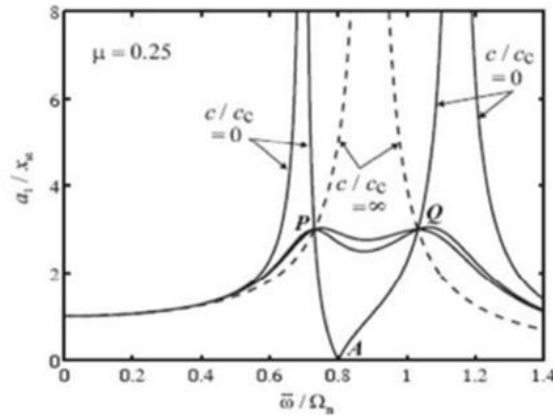


Figure 2-5 Courbes de résonance de fréquence optimale et de réglage d'amortissement (D'après [6])

En pratique, pour un réglage optimal, on utilise la valeur moyenne des équations (2.17) et (2.18), soit :

$$\left(\frac{c}{c_c}\right)_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (2.19)$$

Plusieurs formules ont été proposées ultérieurement pour les paramètres optimaux du TMD passif en utilisant différents critères et approches. Un sommaire des paramètres optimaux du TMD est présenté sur le Tableau 2.6.

Tableau 2.1 : Formules d’optimisation des paramètres du TMD passif selon la littérature

Chercheur	Rapport fréquentiel	Amortissement	Remarque
Den Hartog[6]	$\frac{1}{1+\mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(\mu+1)^3}}$	Premières équations pour les paramètres de réglage optimaux d'un TMD et d'un système SDOF non amorti sous une excitation harmonique.
Sadek et al [14]	$\frac{1}{1+\mu}$	$\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$	Basées sur une excitation sismique pour des systèmes non amorties et amorties.
Warburton [15]	$\frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu}$	$\frac{\sqrt{\mu(1-\mu/4)}}{\mu(1+\mu)(1-\mu/2)}$	Résultats basés sur une excitation aléatoire d'un système 2ddl non amorti
Sadek et al [14]	$a. \frac{1}{1+\mu}$ $b. \frac{1}{1+\mu} \left[1 - \xi_s \cdot \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right]$	$a. \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$ $b. \frac{\xi_s}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$	Résultats basée sur une excitation séismique d'un système a 30 dll a . Amorti b .non amorti

2.3 Dynamique des structures et équations de mouvement

La réponse dynamique des structures peut être obtenue en utilisant l'analyse statique ou dynamique. Ainsi, la réponse peut être obtenue par une analyse statique dans laquelle la charge dynamique due aux perturbations externes est remplacée par une charge statique horizontale appliquée au plancher du bâtiment. Bien que l'analyse statique soit encore permise dans certains codes du bâtiment, l'analyse dynamique, où le comportement des bâtiments peut être approprié dans une caractéristique plus complète, est une approche plus raisonnable.

Pour une structure à plusieurs degrés de liberté soumise à une accélération sismique (\ddot{x}_g) et pour l'analyse dynamique, non seulement la matrice de rigidité, mais aussi les matrices de masse et d'amortissement sont explicitement impliquées dans l'équation de mouvement. Dans ce cas, les équations du mouvement peuvent être écrites comme suit [16]:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -[m]\{\ddot{x}_g\} \quad 2.20$$

Avec :

$[M]$ est la matrice de masse, $[C]$ est la matrice d'amortissement et $[K]$ la matrice de rigidité.

2.4 Equations de mouvement et représentation mathématiques

2.4.1 Structure sans dispositif de contrôle

La plupart des bâtiments à plusieurs étages peuvent être modélisés comme des systèmes à plusieurs degrés de liberté (NDDL) comme le montre la figure 2.7. Dans ce cas, on suppose que:

- la masse de la structure est concentrée aux niveaux des planchers.
- les poutres ont une rigidité infinie.
- la force axiale dans les poteaux n'engendre pas la déformation de la structure.

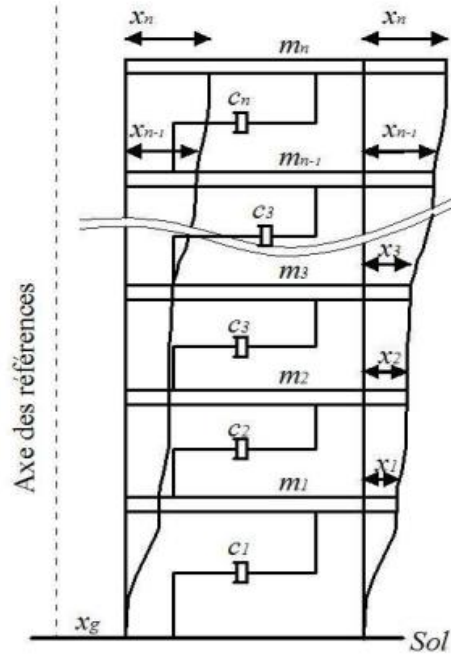


Figure 2.7 représentation dynamique d'une structure à plusieurs degrés de liberté

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

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

Les équations précédentes peuvent être écrites sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{array}{cccc} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & m_3 & \\ & & & \ddots \\ & & & & m_{n-1} \\ & & & & & m_n \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \vdots \\ \ddot{x}_{n-1} \\ \ddot{x}_n \end{array} \right\} + \left[\begin{array}{ccccccc} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & & \\ & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & & & \\ & & -c_4 & \ddots & \ddots & & \\ & & & \ddots & c_{n-1} + c_n & -c_n & \\ & & & & -c_n & c_n & \end{array} \right] \\
& + \left\{ \begin{array}{c} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{array} \right\} \\
& + \left[\begin{array}{ccccccc} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & & \\ & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & & & \\ & & -k_4 & \ddots & \ddots & & \\ & & & \ddots & k_{n-1} + k_n & -k_n & \\ & & & & -k_n & k_n & \end{array} \right]
\end{aligned}$$

2.5 Contrôle passif

2.5.1 Bâtiments équipés d'un amortisseur à masse accordée (TMD)

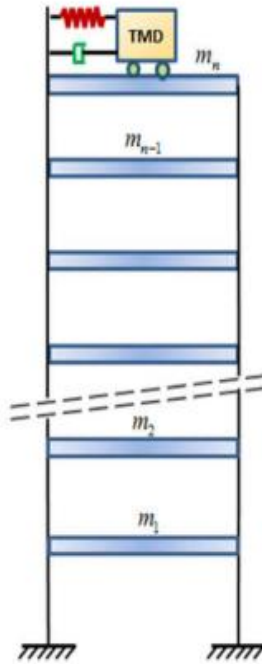


Figure 2-8 Bâtiment à plusieurs degrés de liberté équipé par un TMD

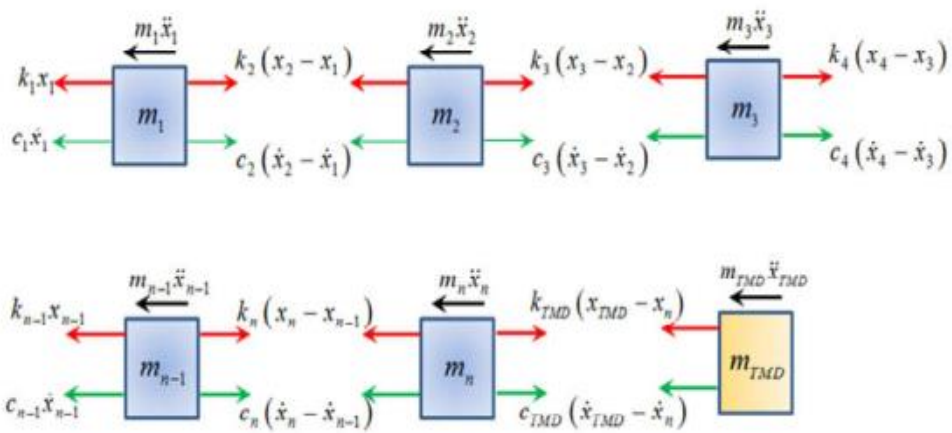


Figure 2-9 Diagramme de corps libre – structure à NDDL avec TMD

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° 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 [12].

On admet les notations suivantes:

$$\text{Fréquence naturelle du système auxiliaire (TMD)} \quad \omega_{md} = \sqrt{\frac{k_{md}}{m_{md}}}$$

$$\text{Fréquence naturelle du système primaire (structure)} \quad \omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}$$

$$\text{Le rapport des masses } \mu = \sqrt{\frac{m_{md}}{m_s}}$$

Où

m_{md} 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 sur le Tableau 2.6

$$f_{md} = \frac{f_s}{\mu + 1}$$

$$k_{md} = f_{md}^2 \times m_{md}$$

$$c_{md} = \frac{3\mu}{8(\mu + 1)^3}$$

Plus grand est le rapport massique μ 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 μ est pris égal à 3% [17].

2.6 Installation de TMD

2.6.1 Structure à n étage

2.6.1.1 Amortisseur TMD installé au dernier étage

Les équations de mouvement d'une structure équipée d'un TMD au dernier étage illustrée sur la figure 2.10 Sont données sous forme matricielle, par l'expression suivante :

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -[m]\{\ddot{x}_g\} \quad 2.20$$

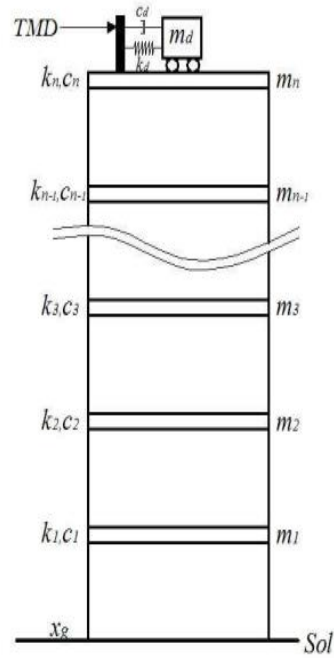


Figure 2.10 Structure à plusieurs étages équipée d'un amortisseur TMD au installé au dernier étage

L'indice t désigne l'emplacement de l'amortisseur TMD au dernier étage de la structure. La matrice de masse $[M_t]$, la matrice d'amortissement $[C_t]$ et la matrice de rigidité $[k_t]$]présentées. Dans l'équation (2.20), sont données comme suit :

$$M_t = \begin{bmatrix} m_1 & & & & & & & & \\ & m_2 & & & & & & & \\ & & m_3 & & & & & & \\ & & & \ddots & & & & & \\ & & & & m_{n-1} & & & & \\ & & & & & m_n & & & \\ & & & & & & m_{imd} & & \end{bmatrix}$$

$$C_t = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & & & & \\ & -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & & & \\ & & -c_3 & c_3 + c_4 + c_{imd} & -c_4 & & & & -c_{imd} \\ & & & -c_4 & \ddots & \ddots & & & \\ & & & & \ddots & c_{n-1} + c_n & -c_n & & \\ & & & & & -c_n & c_n & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & -c_{imd} & & & & c_{imd} \end{bmatrix}$$

$$K_t = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & & & & \\ & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & & & \\ & & -k_3 & k_3 + k_4 + k_{imd} & -k_4 & & & & -k_{imd} \\ & & & -k_4 & \ddots & \ddots & & & \\ & & & & \ddots & k_{n-1} + k_n & -k_n & & \\ & & & & & -k_n & k_n & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & k_{imd} \end{bmatrix}$$

Dans l'équation (2.20), $\{r\}$ est un vecteur unitaire ($1 \times n$), $\{x_t\}$, $\{\dot{x}_t\}$ et $\{\ddot{x}_t\}$ représentent le vecteur de déplacement relatif, le vecteur de vitesse et le vecteur d'accélération de la structure équipée d'un TMD :

$$\left\{ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \\ x_{imd} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \\ \dot{x}_{imd} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \vdots \\ \ddot{x}_{n-1} \\ \ddot{x}_n \\ \ddot{x}_{imd} \end{matrix} \right\}$$

2.7 Exemple

Une structure à trois étages équipée d'un TMD installé sur un étage (dans ce cas : premier étage)

2.7.1 Amortisseur TMD installé au premier étage

Les équations de mouvement peuvent s'écrire sur la forme :

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2 (x_2 - x_1) + c_d (\dot{x}_1 - \dot{x}_d) + k_d (x_1 - x_d) = -m_1 \ddot{x}_g$$

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

$$m_3 \ddot{x}_3 + c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_3 (x_3 - x_2) = -m_3 \ddot{x}_g$$

$$m_d \ddot{x}_d + c_3 (\dot{x}_d - \dot{x}_3) + k_3 (x_d - x_3) = -m_d \ddot{x}_g$$

Les équations précédentes peuvent être écrites sous forme matricielle :

$$M \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & m_3 & \\ & & & m_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} c_1 + c_2 + c_d & -c_2 & & -c_d \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \\ & -c_3 & c_3 & \\ -c_d & & & c_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_d & -k_2 & & -k_d \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \\ & -k_3 & k_3 & \\ -k_d & & & k_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

2.7.2 Amortisseur TMD installé sur le deuxième étage

Les équations de mouvement peuvent s'écrire sur la forme :

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

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

$$m_3 \ddot{x}_3 + c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_3 (x_3 - x_2) = -m_3 \ddot{x}_g$$

$$m_d \ddot{x}_d + c_3 (\dot{x}_d - \dot{x}_3) + k_3 (x_d - x_3) = -m_d \ddot{x}_g$$

Les équations précédentes peuvent être écrites sous forme matricielle

$$\begin{matrix}
M \\
K
\end{matrix}
\begin{bmatrix}
m_1 & & & \\
& m_2 & & \\
& & m_3 & \\
& & & m_d
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\ddot{x}_1 \\
\ddot{x}_2 \\
\ddot{x}_3 \\
\ddot{x}_4
\end{bmatrix}
+ C
\begin{bmatrix}
c_1 + c_2 & -c_2 & & \\
-c_2 & c_2 + c_3 + c_d & -c_3 & -c_d \\
& -c_3 & c_3 & \\
& -c_d & & c_d
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\dot{x}_1 \\
\dot{x}_2 \\
\dot{x}_3 \\
\dot{x}_4
\end{bmatrix}
+
\begin{bmatrix}
k_1 + k_2 & -k_2 & & \\
-k_2 & k_2 + k_3 + k_d & -k_3 & -k_d \\
& -k_3 & k_3 & \\
& -k_d & & k_d
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
x_1 \\
x_2 \\
x_3 \\
x_4
\end{bmatrix}$$

2.7.3 Amortisseur TMD installé sur le troisième étage

Les équations de mouvement peuvent s'écrire sur la forme :

$$\begin{aligned}
m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2 (x_2 - x_1) &= -m_1 \ddot{x}_g \\
m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) - c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - k_3 (x_3 - x_2) &= -m_2 \ddot{x}_g \\
m_3 \ddot{x}_3 + c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_3 (x_3 - x_2) + c_d (\dot{x}_3 - \dot{x}_d) + k_d (x_3 - x_d) &= -m_3 \ddot{x}_g \\
m_d \ddot{x}_d + c_3 (\dot{x}_d - \dot{x}_3) + k_3 (x_d - x_3) &= -m_d \ddot{x}_g
\end{aligned}$$

Les équations précédentes peuvent être écrites sous forme matricielle

$$\begin{matrix}
M \\
K
\end{matrix}
\begin{bmatrix}
m_1 & & & \\
& m_2 & & \\
& & m_3 & \\
& & & m_d
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\ddot{x}_1 \\
\ddot{x}_2 \\
\ddot{x}_3 \\
\ddot{x}_4
\end{bmatrix}
+ C
\begin{bmatrix}
c_1 + c_2 & -c_2 & & \\
-c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \\
& -c_3 & c_3 + c_d & -c_d \\
& & -c_d & c_d
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\dot{x}_1 \\
\dot{x}_2 \\
\dot{x}_3 \\
\dot{x}_4
\end{bmatrix}
+
\begin{bmatrix}
k_1 + k_2 & -k_2 & & \\
-k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \\
& -k_3 & k_3 + k_d & -k_d \\
& & -k_d & k_d
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
x_1 \\
x_2 \\
x_3 \\
x_4
\end{bmatrix}$$

2.8 Conclusion

Après la résolution des modèles mathématiques d'une structure à N DDL équipée d'un dispositif de contrôle (TMD), les résultats obtenus donnent des équations différentielles dynamiques complexes difficiles à résoudre par les méthodes classiques, il est donc nécessaire d'avoir recours aux méthodes de résolution numérique.

Chapitre III

L'algorithme génétique

3.1 Introduction:

Le design des systèmes mécaniques est parfois une tâche délicate. Les ingénieurs sont souvent confrontés au défi de choisir entre différents facteurs afin d'obtenir les résultats souhaités. Cette tâche devient délicate notamment si le design processus est borné par des contraintes et surtout si ces systèmes sont complexes.

L'optimisation est le processus consistant à choisir ces facteurs de la « meilleure » manière. La notion de « différents facteurs » signifie qu'il existe différentes solutions possibles, et la notion d'« atteindre les résultats souhaitables » signifie qu'il existe un objectif de recherche d'amélioration sur la façon de trouver la meilleure solution. Par conséquent, dans un problème d'optimisation, différentes solutions candidates sont comparées et contrastées. De nombreux problèmes d'ingénierie peuvent être définis comme des problèmes d'optimisation, par ex. conception de processus, transport, logistique, production, ordonnancement, réseau de télécommunications, recherche d'une trajectoire optimale pour un bras de robot, épaisseur d'acier dans les récipients sous pression, conception d'échangeurs de chaleur, optimisation des paramètres d'un isolateur parasismique, etc.

Les solutions de tels problèmes ne sont généralement pas faciles à obtenir car elles ont de grandes espaces de recherche. En pratique, ces problèmes d'optimisation réels sont très « difficiles » à résoudre car il est impossible de trouver la solution optimale, en échantillonnant chaque point de l'espace de recherche dans un temps de calcul acceptable. Pour remédier à cela, des techniques d'optimisation sont adoptées pour afin de pouvoir gérer d'une manière facile la complexité des systèmes à traiter. Dans la littérature, différentes approches d'optimisation sont proposées, soit mathématiquement, par des méthodes itératives et aussi par des algorithmes d'optimisation.

Ce chapitre est consacré pour présenter la théorie de l'algorithme génétique AG. L'AG est utilisée dans notre étude pour maximiser les performances d'un mécanisme de contrôle passif (TMD) installée sur un bâtiment à plusieurs étages sous excitations sismiques avec différents emplacements et masse ratio. En revanche, une brève description de l'algorithme génétique et

abordée en premier lieu afin de se familiariser avec les notions ultérieurement utilisées dans ce chapitre.

3.2 Principe général de l'algorithme génétique :

L'algorithme génétique (AG) est une procédure d'optimisation itérative, initiés dans les années 1970 par John Holland. L'AG fonctionne avec un certain nombre de solutions collectivement appelés population à chaque itération au lieu de travailler avec une seule solution à chaque itération. Un organigramme du principe de travail d'un AG simple est illustré à la figure 3.1. L'AG commence sa recherche à partir d'une population aléatoire de solutions. Comme le montre la figure, une solution dans un AG est représentée en utilisant un codage de chaîne de longueur fixe. Si un critère de terminaison n'est pas satisfait, trois opérateurs différents reproduction, croisement, mutation et évaluation sont appliqués pour mettre à jour la population de chaînes. Une itération de ces trois opérateurs est appelée génération dans le langage de l'AG.

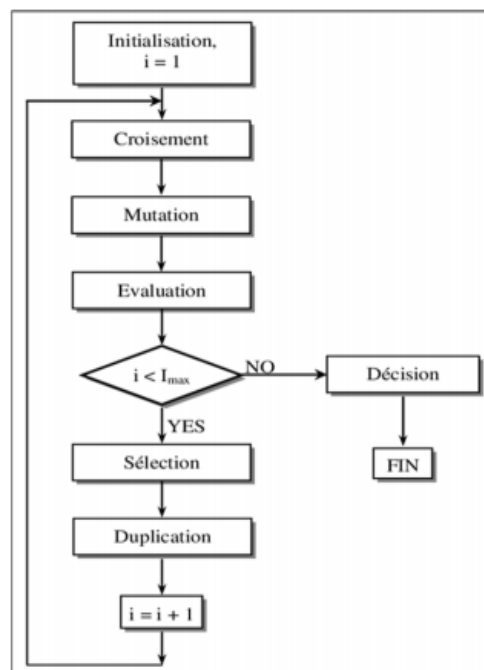


Figure 3.1 Principe de l'algorithme Génétique

Pour se familiariser plus avec le langage du AG on doit d'abord définir les termes suivants :

3.2.1 Codage des données

Historiquement, le codage utilisé par les algorithmes génétiques était représenté sous forme de chaînes de bits contenant toute l'information nécessaire à la description d'un point dans l'espace d'état. Ce type de codage a pour intérêt de permettre de créer des opérateurs de croisement et de mutation simples. C'est également en utilisant ce type de codage que les premiers résultats de convergence théorique ont été obtenus.

Prenant l'exemple de trois paramètres x_1 ; x_2 et x_3 à optimiser chaque paramètres est codé à 4bits :

$$x_1 = 0011$$

$$x_2 = 1010$$

$$x_3 = 0100$$

La séquence totale 'Chromosome' serait la suivante:

Cependant, ce type de codage n'est pas toujours bon;

– deux éléments voisins en termes de distance de Hemming ne codent pas nécessairement deux éléments proches dans l'espace de recherche. Cet inconvénient peut être évité en utilisant le codage de Grey.

– Pour des problèmes d'optimisation dans des espaces de grande dimension, le codage binaire peut rapidement devenir mauvais. Généralement, chaque variable est représentée par une partie de la chaîne de bits et la structure du problème n'est pas bien reflétée, l'ordre des variables ayant une importance dans la structure du chromosome, alors qu'il n'en a pas forcément dans la structure du problème. Les algorithmes génétiques utilisant des vecteurs réels [17] évitent ce problème en conservant les variables du problème dans le codage de l'élément de population, sans passer par le codage binaire intermédiaire. Certains les appellent RCGA (Real Code Génétique Algorithmes), d'autres parlent d'algorithmes évolutionnaires. La structure du problème est conservée dans le codage.

3.2.2 Génération aléatoire de la population initiale :

Le choix de la population initiale d'individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace d'état est totalement inconnue, il est naturel d'engendrer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associés aux composantes de l'espace d'état, en veillant à ce que les individus

produits respectent les contraintes [18]. Si par contre, des informations a priori sur le problème sont disponibles, il paraît bien évidemment naturel d'engendrer les individus dans un sous-domaine particulier afin d'accélérer la convergence. Dans l'hypothèse où la gestion des contraintes ne peut se faire directement, les contraintes sont généralement incluses dans le critère à optimiser sous forme de pénalités.

3.2.3 Gestion des contraintes

Un élément de population qui viole une contrainte se verra attribuer une mauvaise fitness et aura une probabilité forte d'être éliminé par le processus de sélection. Il peut cependant être intéressant de conserver, tout en les pénalisant, les éléments non admissibles car ils peuvent permettre de générer des éléments admissibles de bonne qualité. Pour de nombreux problèmes, l'optimum est atteint lorsque l'une au moins des contraintes de séparation est saturée, c'est-à-dire sur la frontière de l'espace admissible. Gérer les contraintes en pénalisant la fonction fitness est difficile, un "dosage" s'impose pour ne pas favoriser la recherche de solutions admissibles au détriment de la recherche de l'optimum ou inversement. Disposant d'une population d'individus non homogène, la diversité de la population doit être entretenue au cours des générations, afin de parcourir le plus largement possible l'espace d'état. C'est le rôle des opérateurs de croisement et de mutation.

3.2.4 Opérateur de croisement :

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants. Initialement, le croisement associé au codage par chaînes de bits est le croisement à découpage de chromosomes (*slicingcrossover*). Pour effectuer ce type de croisement sur des chromosomes constitués de M gènes, on tire aléatoirement une position dans chacun des parents. On échange ensuite les deux sous-chaînes terminales de chacun des deux chromosomes, ce qui produit deux enfants A5 et A6.

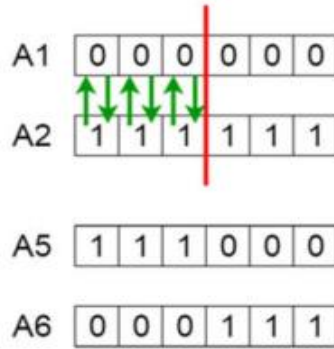


Figure 3-2 Croisement

3.2.5 Opérateur de mutation :

L'opérateur de mutation apporte aux algorithmes génétiques la propriété d'ergodicité de parcours d'espace. Cette propriété indique que l'algorithme génétique sera susceptible d'atteindre tous les points de l'espace de l'état sans pour autant les parcourir tous dans le processus de résolution. Ainsi en toute rigueur, l'algorithme génétique peut converger sans croisement, et certaines implémentations fonctionnent de cette manière [19]. Les propriétés de convergence des algorithmes génétiques sont donc fortement dépendantes de cet opérateur sur le plan théorique. Pour les problèmes discrets, l'opérateur de mutation consiste généralement à tirer aléatoirement un gène dans le chromosome et à le remplacer par une valeur aléatoire.

Si la notion de distance existe, cette valeur peut être choisie dans le voisinage de la valeur initiale. Dans les problèmes continus, on procède un peu de la même manière en tirant aléatoirement un gène dans le chromosome, auquel on ajoute un bruit généralement gaussien. L'écart-type de ce bruit est difficile à choisir a priori.

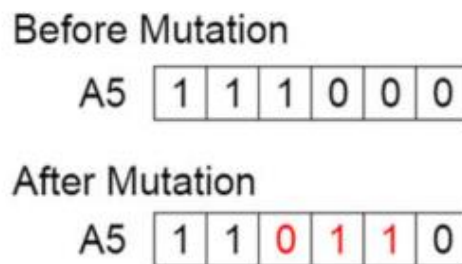


Figure 3-3 Mutation

Dans certains nouveaux descendants formés, certains gènes peuvent être soumis à une mutation avec une faible probabilité aléatoire. Cela implique que certains des bits de la chaîne de bits ‘chromosome’ peuvent être inversés. La mutation se produit pour maintenir la diversité au sein de la population et empêcher une convergence prématurée.

3.2.6 Principes de sélection :

A l’inverse d’autres techniques d’optimisation, les algorithmes génétiques ne requièrent pas d’hypothèse particulière sur la régularité de la fonction objective. L’algorithme génétique n’utilise notamment pas ses dérivées successives, ce qui rend très vaste son domaine d’application. Aucune hypothèse sur la continuité n’est non plus requise. Néanmoins, dans la pratique, les algorithmes génétiques sont sensibles à la régularité des fonctions qu’ils optimisent. Le peu d’hypothèses requises permet de traiter des problèmes très complexes. La fonction à optimiser peut ainsi être le résultat d’une simulation. La sélection permet d’identifier statistiquement les meilleurs individus d’une population et d’éliminer les mauvais. On trouve dans la littérature un nombre important de principes de sélection plus ou moins adaptés aux problèmes qu’ils traitent. Les deux principes de sélection suivants sont les plus couramment utilisés :

- *Roulette wheel selection* [20];
- *Stochastic remainder without replacement selection*

Le principe de *Roulette wheel selection* consiste à associer à chaque individu un segment dont la longueur est proportionnelle à sa fitness. On reproduit ici le principe de tirage aléatoire utilisé dans les roulettes de casinos avec une structure linéaire. Ces segments sont ensuite concaténés sur un axe que l’on normalise entre 0 et 1. On tire alors un nombre aléatoire de distribution uniforme entre 0 et 1, puis on “regarde” quel est le segment sélectionné. Avec ce système, les grands segments, c’est-à-dire les bons individus, seront plus souvent choisis que les petits. Lorsque la dimension de la population est réduite, il est difficile d’obtenir en pratique l’espérance mathématique de sélection en raison du peu de tirages effectués. Un biais de sélection plus ou moins fort existe suivant la dimension de la population.

3.2.7 Elitisme :

Une technique très souvent utilisée avec l'algorithme génétique est l'élitisme. L'élitisme est la conservation du meilleur individu dans la génération suivante. Après le croisement, on compare le meilleur individu de la nouvelle génération avec le meilleur individu de la génération précédente. Le meilleur individu est conservé et l'autre est détruit. Cette technique permet de s'assurer que la fonction objective augmente (diminue) toujours si on maximise (minimise) une fonction.

3.3 L'algorithme génétique sur MATLAB :

L'algorithme génétique est implémenté sur MATLAB, on peut utiliser le *toolbox Optimisation* ou bien d'écrire le code qui fait appel à l'AG sur un script.

3.3.1 Aperçu de l'algorithme (sur MATLAB) :

Voici à nouveau un résumé des procédures de l'algorithme génétique avec les terminologies du MATLAB.

Les étapes suivantes résument le fonctionnement de l'algorithme génétique :

1. L'algorithme commence par créer une population initiale aléatoire.
2. L'algorithme crée alors une chaîne de nouvelles populations. À chaque étape, l'algorithme utilise les individus de la génération actuelle pour créer la population suivante.

Pour créer la nouvelle population, l'algorithme effectue les étapes suivantes :

- 2.1 Calculer pour chaque membre de la population actuelle sa valeur de fitness. Ces valeurs sont appelées scores de fitness initiaux.
- 2.2 Met à l'échelle les scores de fitness bruts pour les convertir en valeurs utilisables. Ces valeurs mises à l'échelle sont appelées valeurs attendues.
- 2.3 Sélectionne les membres, appelés parents, en fonction de leurs espérance (valeurs attendues).
- 2.4 Certains des individus de la population actuelle qui ont une valeur de fitness minimale sont choisis comme élite. Ces élites sont ensuite transmis à la population suivante.
- 2.5 Produit des enfants des parents, les enfants sont produits soit en apportant des modifications aléatoires à un seul parent (mutation), soit en combinant les entrées vectorielles d'une paire de parents (croisement).

2.6 Remplacer la population actuelle par les enfants pour former la prochaine génération.

2.7 L'algorithme s'arrête lorsque l'un des critères d'arrêt est rempli

3.3.2 Critères d'arrêt de l'AG :

L'algorithme génétique s'arrête si l'un des conditions suivantes est satisfais :

- *MaxGenerations*— l'algorithme s'arrête si le nombre des générations atteint le nombre maximal de générations définis sur *MaxGenerations*.
- *MaxTime*—l'algorithme s'arrête si le temps de calcul dépasse le temps définis sur *MaxTime*.
- *FitnessLimit*- l'algorithme s'arrête si la valeur de la fonction objective (fitness) de la population actuelle est inférieure ou égale à la valeur définis sur *FitnessLimit*.
- *MaxStallGenerations*—l'algorithme s'arrête si la variation de valeur de la fonction objective dans *MaxStallGenerations* est inférieure à celle définis sur *Functiontolerance*.
- *MaxStallTime*- l'algorithme s'arrête si aucune amélioration de valeur de la fonction objective n'est constatée, égale à la valeur définis sur *MaxStallTime*.
- *FunctionTolerance*—l'algorithme continue le calcul jusqu'à que la moyenne du changement de la valeur de la fonction objective est supérieur a celle définie *MaxStallGenerations* ou bien inférieure à *Functiontolerance*.
- *ConstraintTolerance*— la *ConstraintTolerance* n'est pas utilisée comme un critère d'arrêt cependant, elle est utilisée pour déterminer le respect de la population choisie vis à vis la tolérance des contraintes du problème.[21]

3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases de l'algorithme génétique. Cette présentation n'est absolument pas exhaustive, mais elle montre les grandes lignes de cette méthode. Les paramètres et les opérateurs utilisés par cet algorithme ont été définis. La méthode était conçue initialement pour l'optimisation continue, contrairement à la plupart autres méthodes heuristique. Plusieurs chercheurs se sont intéressés depuis peu à l'adaptation de cette méthode pour résoudre des problèmes d'optimisation discrète et les résultats obtenus sont prometteurs.

Chapitre IV

Modélisation et résolution numérique: Exemple d'application

4.1 Introduction :

Les paramètres optimaux des amortisseurs de masse accordée (TMD) ainsi que l'effet de l'emplacement et la masse ratio sont investigués dans ce chapitre. Le TMD sera installé sur différents étages avec différents masse ratios, les paramètres du TMD sont optimisés en utilisant l'algorithme génétique afin de réduire le déplacement maximale de la structure sous excitation sismique. L'étude valide les résultats précédents (performance de l'algorithme génétique) en choisissant un dispositif TMD efficace ainsi de montrer le meilleur emplacement du TMD sur une structure à plusieurs étages.

4.2 Présentation de la structure :

Afin d'étudier le comportement dynamique des bâtiments équipés d'amortisseur de type TMD optimisé par algorithme génétique, une structure de dix (10) étage est modélisé en utilisant la formulation mathématique présentée dans le chapitre 3. Cette structure a été introduite par [22], les paramètres de la structure sont les suivants pour chaque étage :

- Masse: 360 Tonne
- Rigidité: 650000 (KN/m)
- L'amortissement : 6200 (KN s/m)

Les trois et la dernière fréquence naturelle ω (rad/s) de la structure en question et sans dispositif de contrôle sont les suivants : 6,350, 18,910, 31,048 et 84,034. Le TMD sera placé sur différents étages et avec différents masse ratios comme montré sur la figure 4-1.

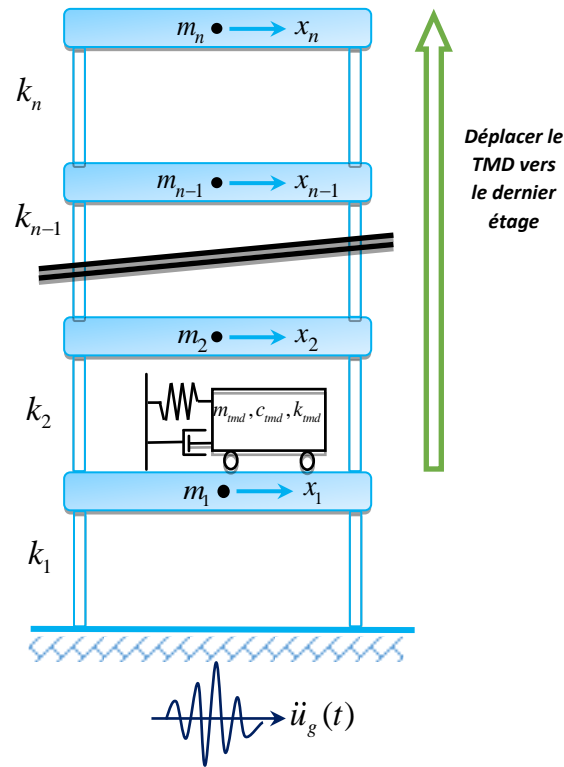


Figure 4.1 structure à plusieurs degrés de liberté équipée d'un TMD

4.3 Solution en représentation d'état (*state-space*) :

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

Si une équation différentielle est du 2^{ème} ordre → elle est écrite sous forme de deux équations différentielles du 1^{er} ordre.

D'une manière générale, une équation différentielle du n^{ième} ordre est transformée en n équations du premier ordre (l'ordre des équations différentielles devient donc le nombre d'équations différentielles du premier ordre) [16].

4.3.1 La forme générale

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

$$\begin{aligned}\{\dot{X}\} &= [A]\{X\} + [B]\{U\} \\ \{Y\} &= [C]\{X\} + [D]\{U\}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Dans la formulation par représentation d'état « *state-space* » on considère quatre matrices

$[A]$, $[B]$, $[C]$ et $[D]$ 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 extérieure agissant sur le système dynamique), elle est directement liée à X et U comme le montre l'équation (4.1)

$[C]$: La matrice de sortie (output matrix) elle est généralement unitaire

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

n : Nombre de degrés de liberté DDL

i : Nombre des entrées – inputs

j : Nombre des sorties – outputs

$\{U\}$: Vecteur d'entrée (input)

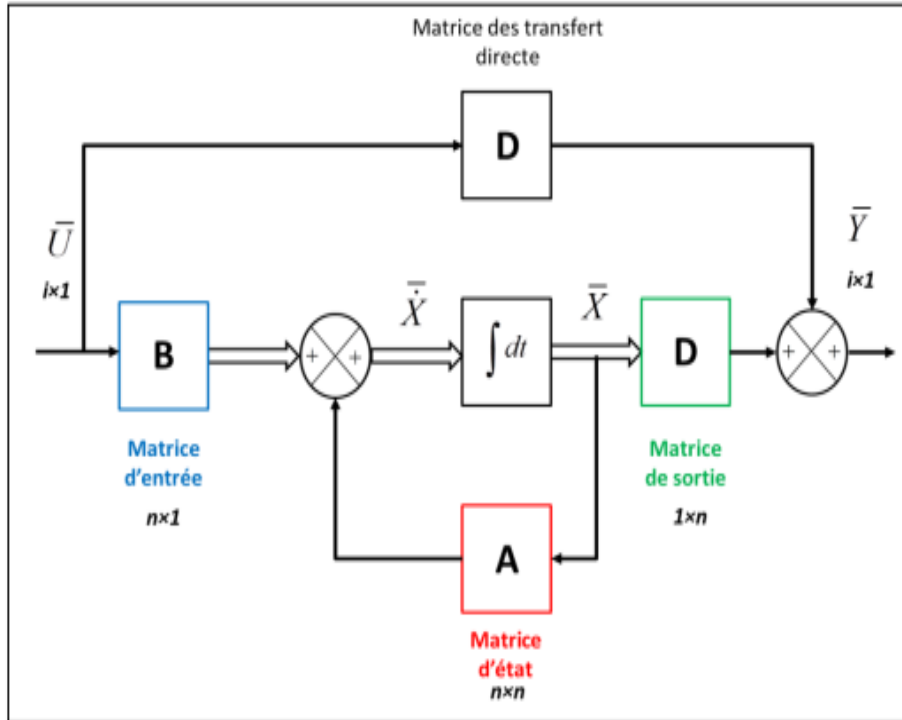


Figure 4.2 La forme générale de la représentation d'état « state space », SISO (*single input, single output*)

4.4 Implémentation et simulation sur MATLAB :

Après avoir formulé notre problème sous forme d'un *state-space*, le block de ce dernier et d'autres blocks sont implémentés sur Simulink voir figure 4.5. En parallèle, un code script contenant les données et les informations est lancé pour commander l'ensemble des opérations d'exécution. Pour l'optimisation une fonction nommée objective et un programme principal nommé *Main* est créé pour contrôler le processus de l'optimisation. La fonction objective est traduite par la valeur objective à minimiser afin de maximiser les performances du TMD. La valeur objective est dans notre cas le déplacement maximum du dernier étage, le choix de la fonction objective est généralement un processus **délicat**. Rappelant qu'un bon choix de la fonction objective garantira des meilleurs résultats d'optimisation. Le but de l'optimisation dans ce cas, est de maximiser les performances de la TMD en diminuant les réponses de cette dernière en termes de déplacement, vitesse et accélération. Il est évident de rappeler que ces trois grandeurs de réponse sont reliées en terme de temps (la vitesse est le dérivé du déplacement), cependant, faire diminuer le pic du déplacement entrainera sans aucun doute la

diminution de la vitesse et de l'accélération. Le code écrit en MATLAB sera exécuté afin d'obtenir les résultats et sous l'excitation sismique choisi ' El Centro' excitations sismique. L'ensemble des résultats obtenus seront détaillés et interpréter.

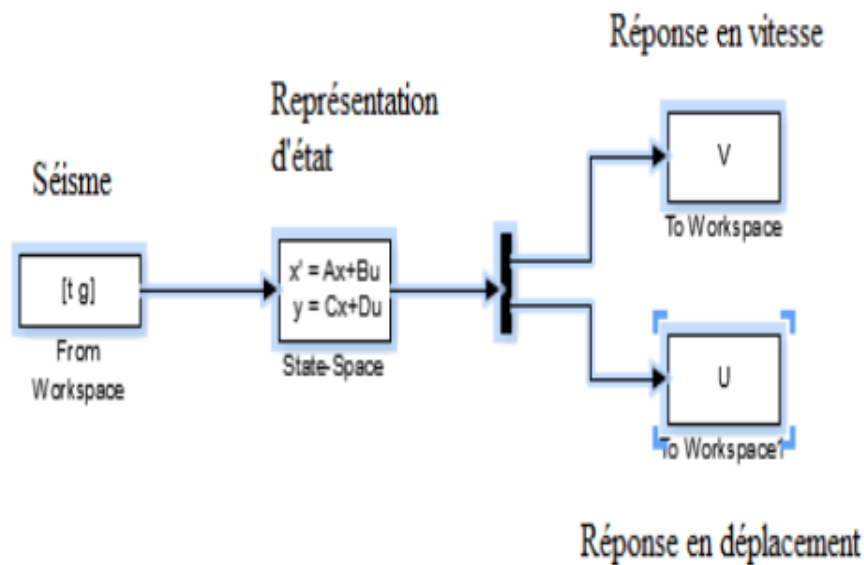


Figure 4.3 : Diagramme de résolution sur SIMULINK/MATLAB

4.5 Optimisation par l'algorithme génétique :

Les paramètres du TMD en l'occurrence le taux d'amortissement de TMD ξ_{TMD} et la rigidité de TMD k_{TMD} seront optimisés par l'algorithme génétique pour chaque emplacement. A chaque fois, le TMD est placé dans un étage et les résultats sont sauvegardés et ultérieurement affichés et interprétés. La motivation derrière le changement de l'emplacement du TMD est de montrer l'effet de ce dernier 'emplacement' sur les paramètres du TMD ainsi que sur leur performance. Sur la figure 4.1 schématise l'allure d'emplacement adopte dans notre cas. Le TMD est placé en partant du premier étage jusqu'au dernier étage et l'optimisation a pour but noté ici-après 'objective function' de réduire le déplacement maximal de la structure en dernier étage. Le processus d'optimisation est accompli pour des rapports massiques u_{TMD} qui varient de 1% jusqu'à 5%. Les deux paramètres à optimiser sont les suivants :

$$x(1) = \xi_{TMD}$$

$$x(2) = k_{TMD}$$

Les valeurs limites supérieures et limite inférieures de la rigidité sont définies à 0 et 4000kN/m, tandis que les valeurs limites supérieures et inférieures de l'amortissement sont fixées à 0 et 1000 kN-s/m, respectivement. Le Tableau 4.1 représente les paramètres de l'algorithme génétique. Autres paramètres ne figurent pas sur le Tableau 4.1 ont les valeurs par défaut déjà définies sur le manuel de l'algorithme génétique dans MATLAB.

Tableau 4.1 : paramètres de l'algorithme génétique

Paramètres	valeur
MaxGénération	150
MaxTime	infinie
Fonctiontolérance	10^{-3}

4.6 Présentation du séisme :

Le processus d'optimisation est exécuté selon le protocole décrit dans la section précédente sous le séisme Imperial Valley 1940 connu sous le nom El Centro. L'accélération de ce séisme est dessinée dans la figure 4.4. Cette enregistrement sismique est largement utilisée comme excitation référence pour des problèmes d'analyse est d'optimisation sous chargements sismique. El Centro séisme est considéré comme excitation de champ proche.

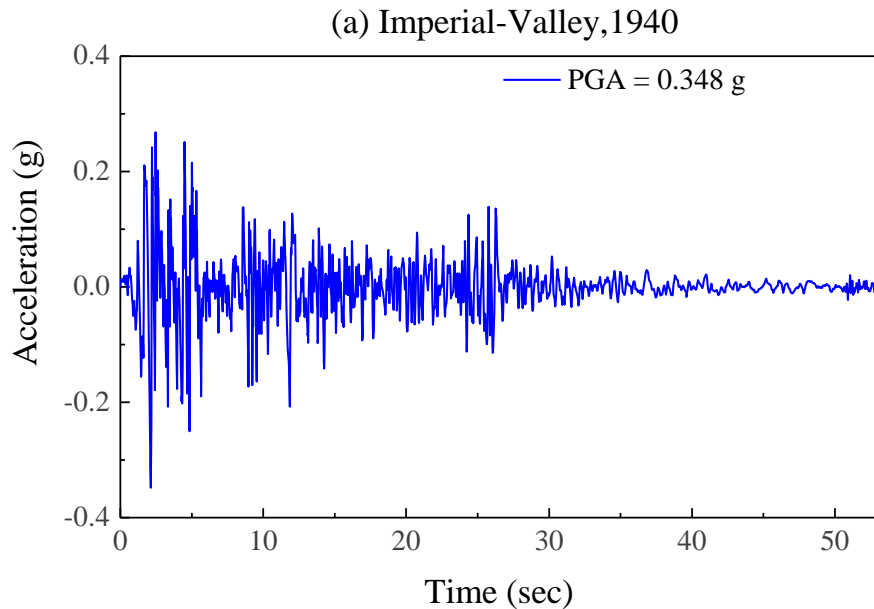


Figure 4.4 : l'allure de l'accélération du séisme El Centro

Avec une PGA (Accélération maximale) d'une valeur égale à 0.348 g. Afin de tester l'efficacité du TMD avec les paramètres obtenus après le processus d'optimisation, le même enregistrement sismique est utilisé pour obtenir les résultats.

4.7 Réponse structurelle avec TMD optimale :

Les figures 4.5 jusqu'à 4.7 représentent la réponse de la structure sans TMD, avec un TMD en utilisant les formules analytiques et avec un TMD avec les paramètres optimaux obtenus après l'optimisation par le GA. La réponse de la structure est présentée en termes de déplacement, accélération du dernier étage ainsi que l'effort tranchant à la base pour les trois configurations citées auparavant, les résultats obtenus dans ces figures sont pour un rapport massique $u_{TMD}=3\%$ et les TMD sont installés au dernier étage.

D'après les figures 4.5 jusqu'à figure 4.7 on constate que la réponse de la structure en termes de déplacement, accélération et effort tranchant équipée avec un TMD avec des paramètres optimaux est meilleure que celle de la structure équipée d'un TMD avec des paramètres obtenus par les formules analytiques à l'instar de Den Hartog, Warburton et Sadek.

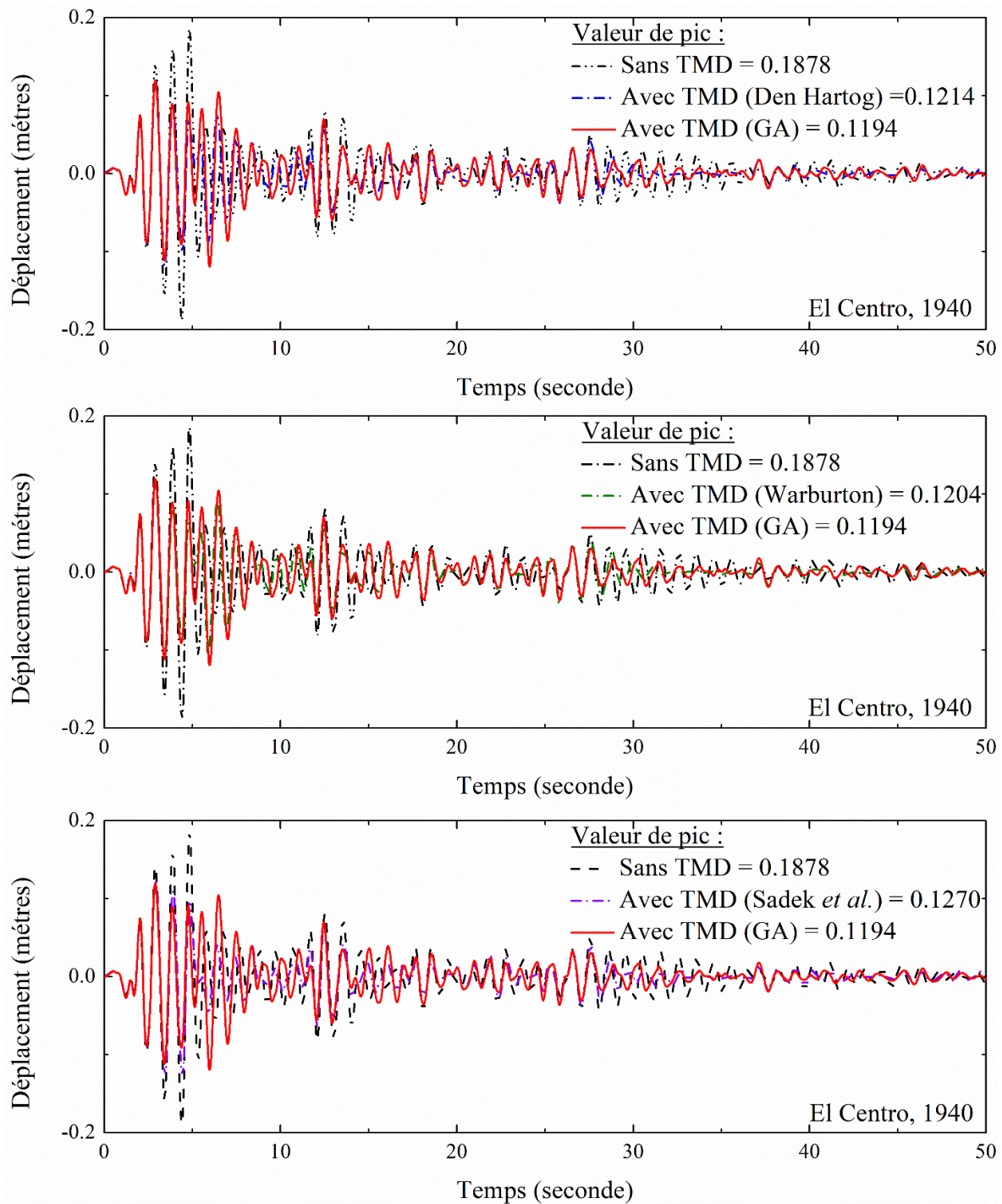


Figure 4.5 :Déplacement en tête du bâtiment

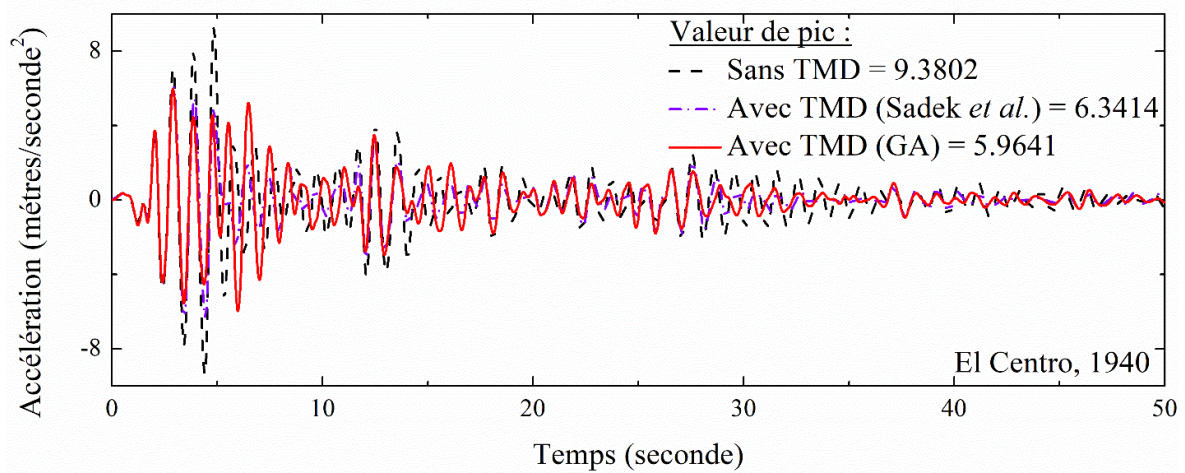
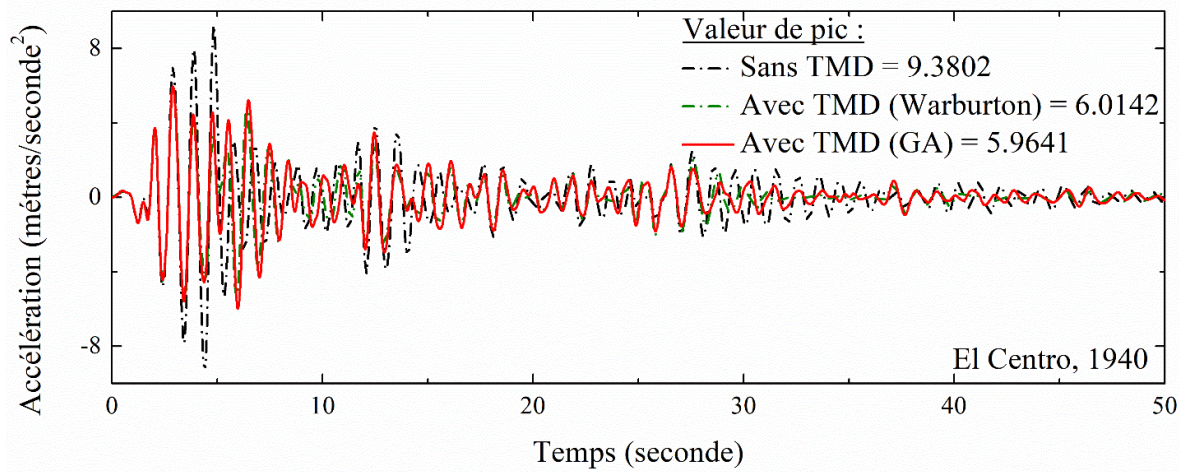
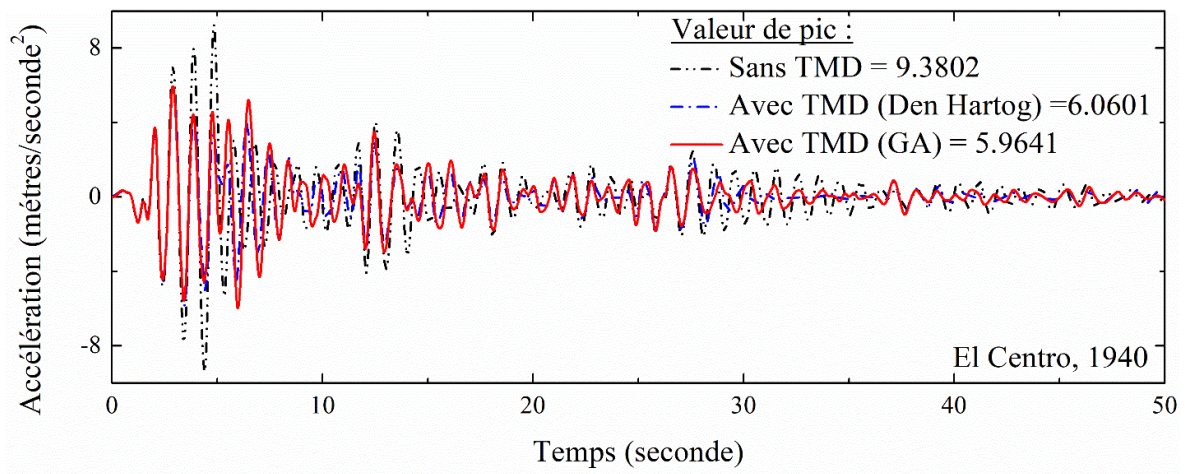


Figure 4.6 : Accélération en tête du bâtiment

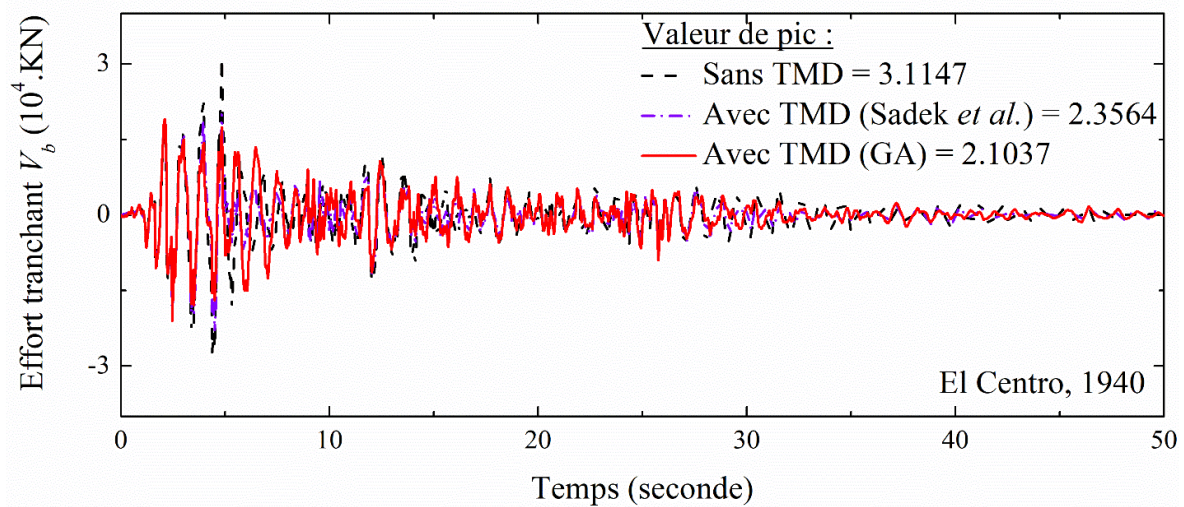
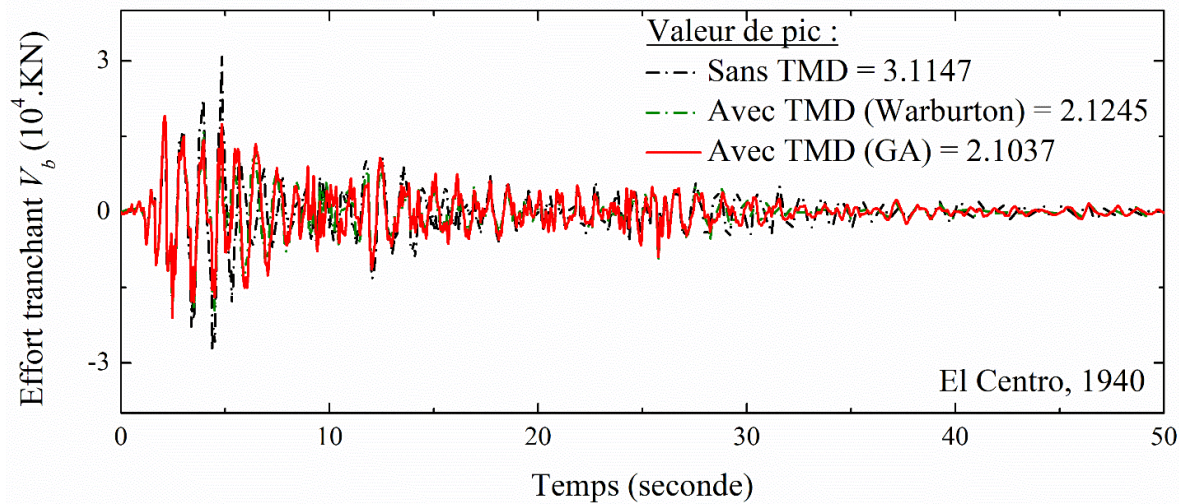
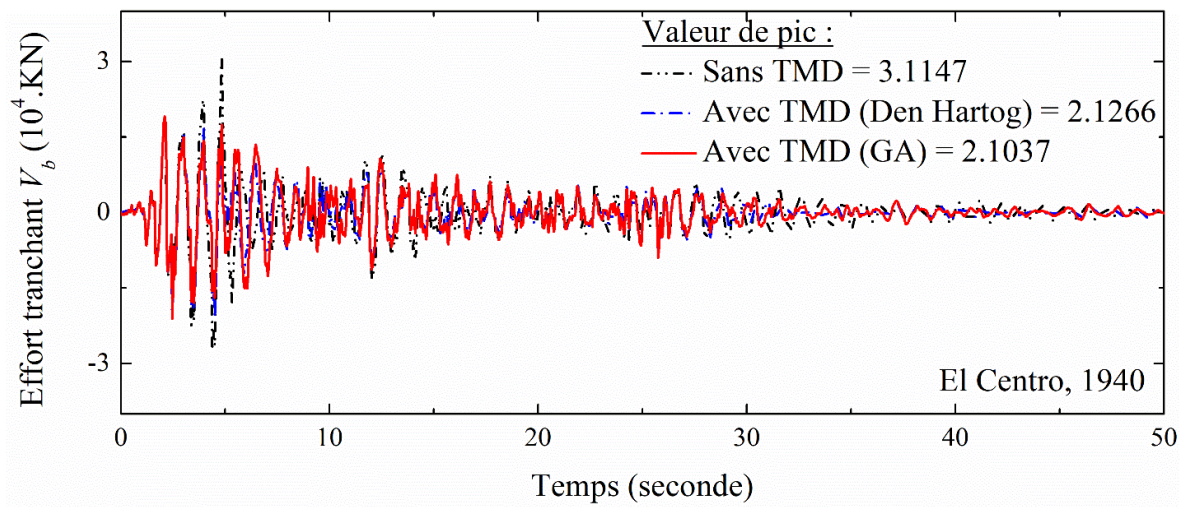


Figure 4.7 : L'effort tranchant à la base du bâtiment

4.8 Effet d'emplacement et la masse du TMD sur la réponse de la structure :

Le Tableau 4.2 indique l'effet du l'emplacement ainsi que l'effet du rapport massique du TMD sur la réponse de la structure. La réponse de la structure est mesurée par le déplacement maximal au dernier étage. Les résultats obtenus montrent que plus grand est le rapport massique plus efficace est le TMD tandis que le TMD avec des paramètres obtenus par le GA est plus efficace en termes de réduction du déplacement au sommet de la structure d'une part. D'autre part, les mêmes performances de du TMD peuvent être obtenus par l'installation de ce dernier sur l'et 8 et 9.

Tableau 4.2 : Déplacement maximal du dernier étage en fonction de l'emplacement du TMD et le rapport massique

Rapport massique	Étage	Sans TMD	Avec TMD			
			Den Hartog	Warburton	Sadek	GA
$\mu = 1\%$	1	0,0306	0,0242	0,0240	0,0259	0,0222
	2	0,0598	0,0473	0,0467	0,0506	0,0433
	3	0,0869	0,0685	0,0676	0,0734	0,0626
	4	0,1113	0,0875	0,0863	0,0942	0,0805
	5	0,1329	0,1042	0,1028	0,1123	0,0968
	6	0,1511	0,1182	0,1165	0,1275	0,1107
	7	0,1658	0,1294	0,1275	0,1397	0,1219
	8	0,1768	0,1378	0,1357	0,1489	0,1303
	9	0,1842	0,1435	0,1412	0,1552	0,1357
	10	0,1878	0,1465	0,1441	0,1587	0,1381
$\mu = 2\%$	1	0,0306	0,0200	0,0196	0,0228	0,0203
	2	0,0598	0,0389	0,0383	0,0444	0,0391
	3	0,0869	0,0562	0,0556	0,0646	0,0561
	4	0,1113	0,0720	0,0712	0,0828	0,0712
	5	0,1329	0,0869	0,0860	0,0986	0,0856
	6	0,1511	0,0998	0,0987	0,1118	0,0981
	7	0,1658	0,1105	0,1092	0,1229	0,1086
	8	0,1768	0,1189	0,1175	0,1314	0,1168
	9	0,1842	0,1247	0,1236	0,1372	0,1224
	10	0,1878	0,1279	0,1268	0,1404	0,1253
$\mu = 3\%$	1	0,0306	0,0187	0,0186	0,0204	0,0185
	2	0,0598	0,0366	0,0364	0,0398	0,0362
	3	0,0869	0,0532	0,0528	0,0579	0,0525
	4	0,1113	0,0681	0,0676	0,0742	0,0672
	5	0,1329	0,0813	0,0808	0,0882	0,0805
	6	0,1511	0,0933	0,0927	0,1005	0,0928
	7	0,1658	0,1036	0,1029	0,1104	0,1031
	8	0,1768	0,1121	0,1114	0,1180	0,1111
	9	0,1842	0,1182	0,1174	0,1237	0,1166
	10	0,1878	0,1214	0,1204	0,1270	0,1194
$\mu = 4\%$	1	0,0306	0,0179	0,0169	0,0185	0,0199
	2	0,0598	0,0350	0,0335	0,0362	0,0384
	3	0,0869	0,0508	0,0493	0,0526	0,0552
	4	0,1113	0,0650	0,0639	0,0675	0,0698
	5	0,1329	0,0776	0,0769	0,0807	0,0822
	6	0,1511	0,0890	0,0881	0,0926	0,0923
	7	0,1658	0,0988	0,0972	0,1027	0,1012
	8	0,1768	0,1069	0,1039	0,1108	0,1097

	9	0,1842	0,1127	0,1083	0,1168	0,1152
	10	0,1878	0,1158	0,1099	0,1202	0,1172

Note: les valeurs en gras représentent les meilleures valeurs.

Les paramètres du TMD obtenus par les formules analytiques et l’algorithme génétique GA pour différents rapport massique sont reportées sur le Tableaux 4.3, on note ici que le TMD dans cette cas est installé sur le dernier étage. Il est clair que la valeur de l’amortissement obtenu via l’algorithme génétique est minimale par rapport aux formules analytiques. Il est aussi clair que pour les rapports massique $\mu = 4\%$ et $\mu = 5\%$, la valeur de la rigidité choisie par le GA touche la valeur supérieur de l’intervalle choisi au début, la valeur de la rigidité dans ce cas doit être autour de 6500 KN/m cependant, les résultats obtenus dans des deux cas ne sont pas optimales la raison pour laquelle les résultats de $\mu = 5\%$ ne sont présentés sur le tableau précédant.

Tableau 4.3 : Paramètres du TMD utilisé obtenus via les formules et via l’optimisation

Paramètres		Paramètres du TMD			
		Den Hartog	Warburton	Sadek	GA
$\mu = 1\%$	m_{md} (tonne)	36	36	36	36
	k_{md} (KN / m)	1423,3826	1416,2656	1403,3241	1524,8478
	c_{md} (KN.s / m)	28,1410	22,6074	66,9841	1,2713
$\mu = 2\%$	m_{md} (tonne)	72	72	72	72
	k_{md} (KN / m)	2791,2199	2763,3077	2735,6746	2353,9391
	c_{md} (KN.s / m)	79,9878	63,2302	167,8029	20,8195
$\mu = 3\%$	m_{md} (tonne)	108	108	108	108
	k_{md} (KN / m)	4105,9268	4044,3379	4005,9684	3545,3047
	c_{md} (KN.s / m)	147,6656	114,8677	288,3709	75,7526
$\mu = 4\%$	m_{md} (tonne)	144	144	144	144
	k_{md} (KN / m)	5369,7950	5262,3991	5218,9883	3823,1018
	c_{md} (KN.s / m)	228,4471	174,8841	423,3871	170,9066
$\mu = 5\%$	m_{md} (tonne)	180	180	180	180
	k_{md} (KN / m)	6585,0004	6420,3754	6378,4106	3999,9283

	$c_{md} (KN.s/m)$	320,7958	241,6946	569,6889	362,9728
--	-------------------	----------	----------	----------	-----------------

4.9 Performance du TMD en fonction du rapport massique et l'emplacement :

Le pourcentage de réduction du déplacement, l'accélération au sommet de la structure ainsi que l'effort tranchant à la base de la structure équipée d'un TMD installée au dernier étage sont illustrées sur la figure 4.8. Il est évident de signaler que le TMD avec des paramètres optimaux est plus performante en comparant avec les formules analytiques ceci est valide pour comme déjà signale sauf pour les rapports massique $\mu = 4\%$ et $\mu = 5\%$.

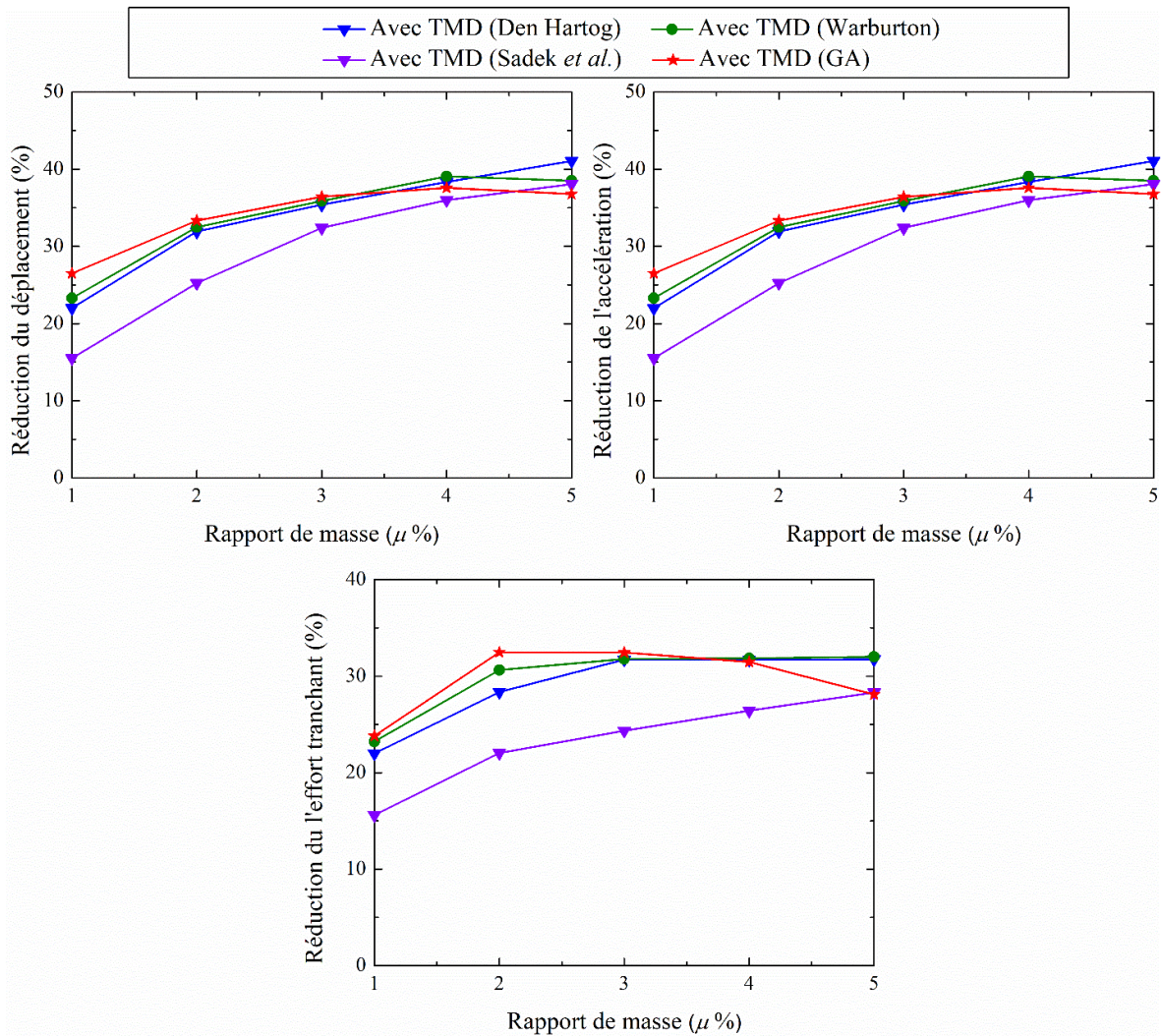


Figure 4.8 Réduction des réponses structurelles en termes du rapport massique

En ce qui concerne l'effet de l'emplacement du TMD sur leurs performances, la figure 4.9 montre la réduction du déplacement maximal de la structure pour un TMD avec un emplacement différent, ces résultats sont pour un rapport massique $\mu = 3\%$. La figure 4.9 montre que le TMD reste effective en matière de la réduction de la réponse de la structure qui peut aller jusqu'à 35% en choisissant le 7,8 ou bien le 9 et le dernier étage. La réduction du déplacement maximal n'atteint que 27% pour un TMD installée sur l'étage 5 et cette réduction tend qu'à diminuer en allant vers les étages inférieur.

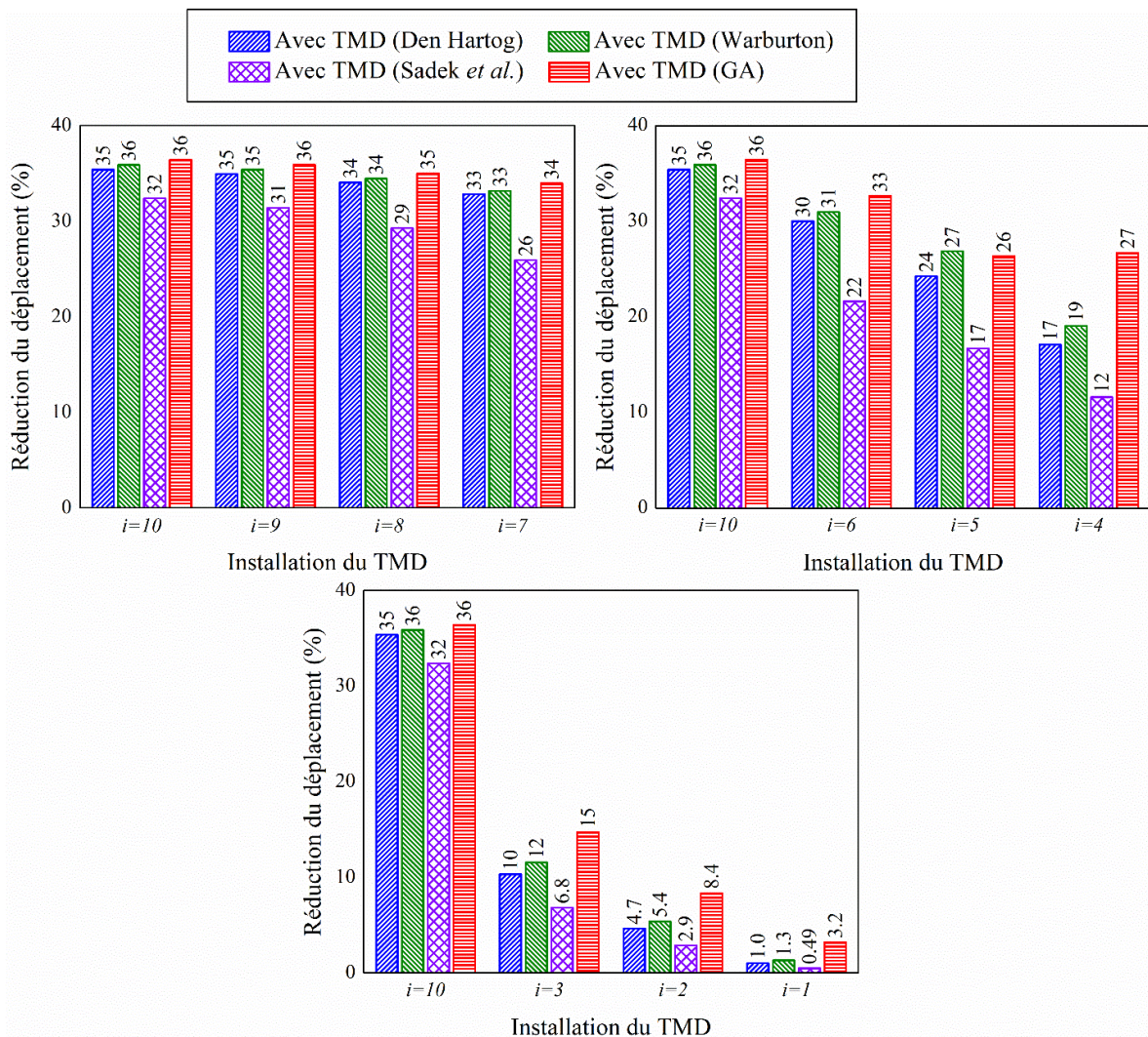


Figure 4.9 Réduction du déplacement maximal en fonction de l'emplacement du TMD

Les figures 4.9 et 4.10 représentent l'effet de l'emplacement de du TMD sur le taux de réduction de la réponse structurale cette fois-ci en termes de l'accélération maximale et l'effort tranchant. Ces résultats sont obtenus pour un rapport massique $\mu = 3\%$. Les résultats sur ces deux dernières figures valident les résultats obtenus dans la figure 4.8, les meilleures performances du TMD sont abouties seulement si le TMD est installé sur les trois derniers étages.

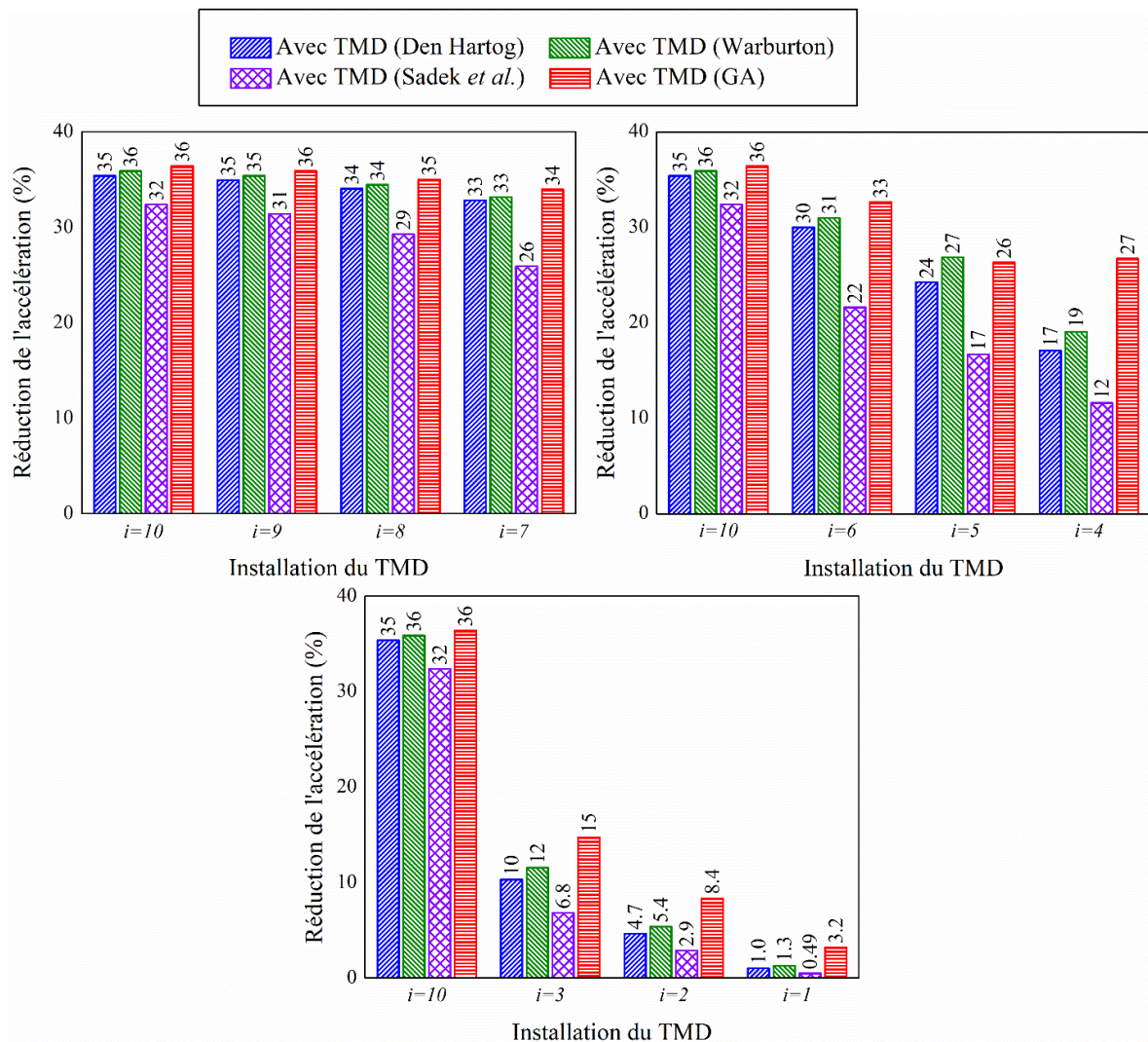


Figure 4.10 Réduction de l'accélération maximal en fonction de l'emplacement du TMD

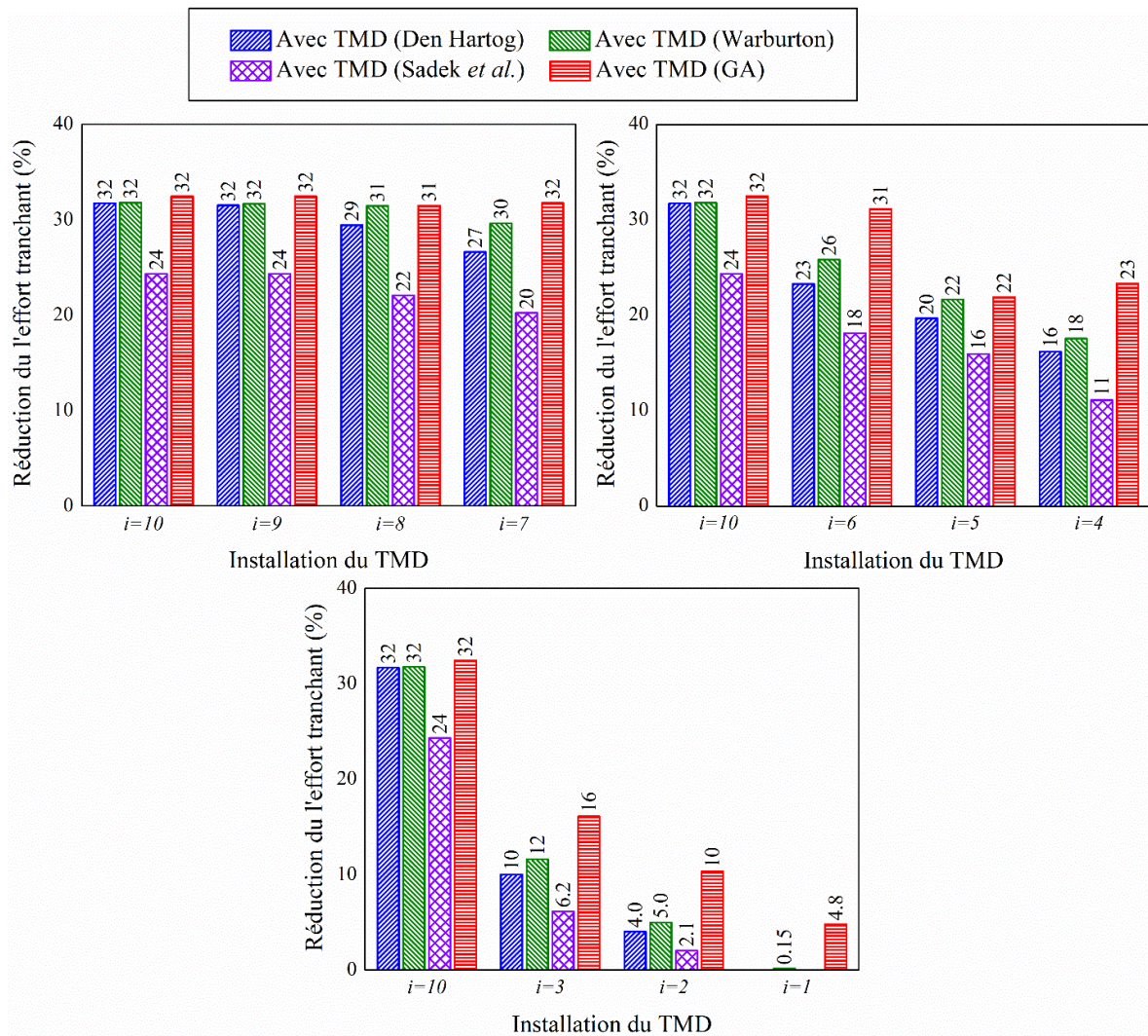


Figure 4.11 Réduction de l'effort tranchant en fonction de l'emplacement du TMD

Les figures 4.12 jusqu'à figures 4.14 représentent l'effet de l'emplacement de du TMD et le rapport massique sur la réduction de la réponse structurale (déplacement, accélération et effort tranchant). Ces résultats sont obtenus toujours pour un rapport massique $\mu = 3\%$. Les résultats sur ces graphes valident les résultats obtenus auparavant. Autrement dit, pour des structures à plusieurs étages et pour des résultats optimaux du TMD il est préférable d'installer ce dispositif aux 3 derniers étages. En ce qui concerne le rapport massique, plus que le rapport massique est grand plus efficace est le TMD. En outre, un TMD avec des paramètres optimaux dans ce cas avec l'algorithme génétique est plus efficace qu'un TMD conçu par les formules analytiques.

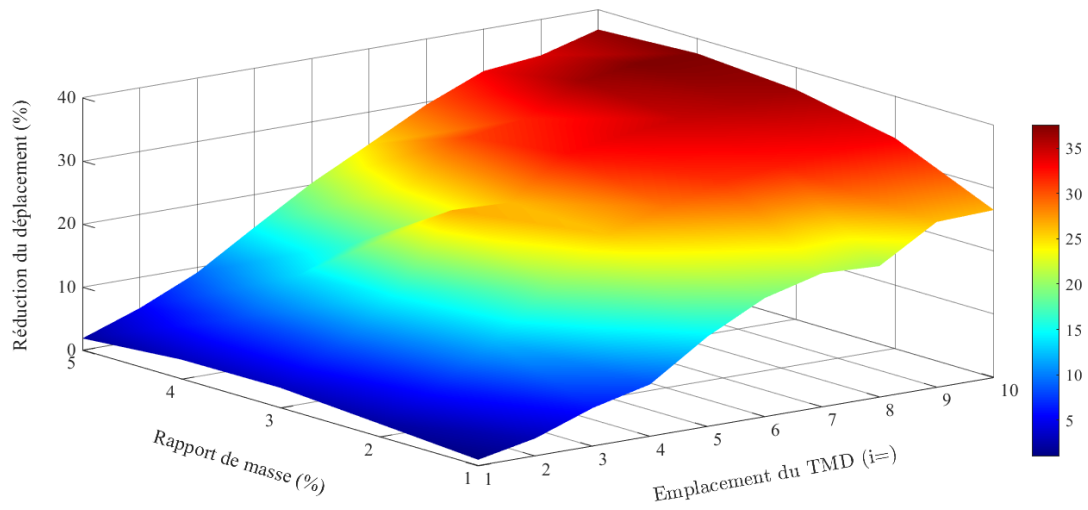


Figure 4.12 Réduction du déplacement maximal en fonction de l'emplacement du TMD et du rapport massique

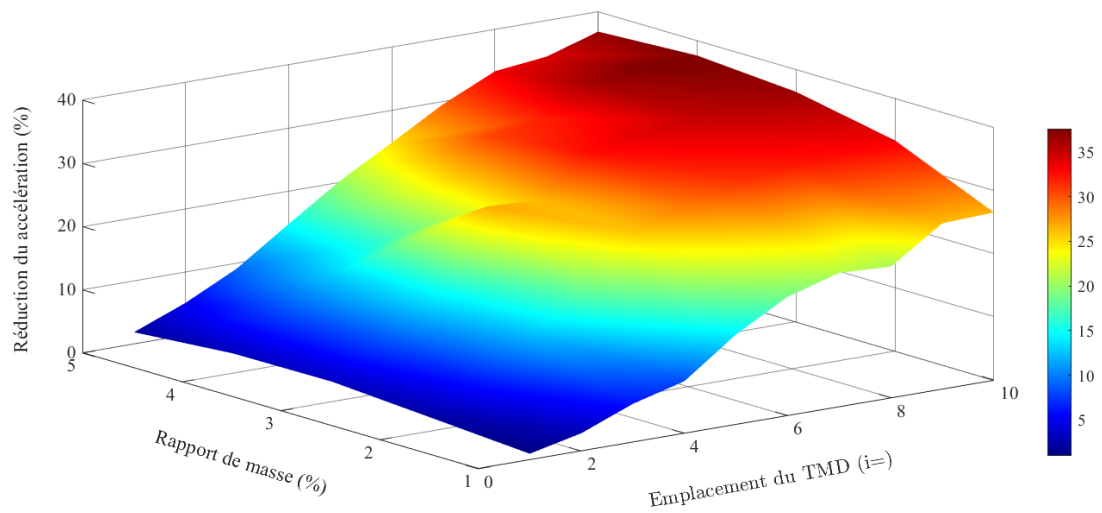


Figure 4.13 Réduction de l'accélération maximale en fonction de l'emplacement du TMD et du rapport massique

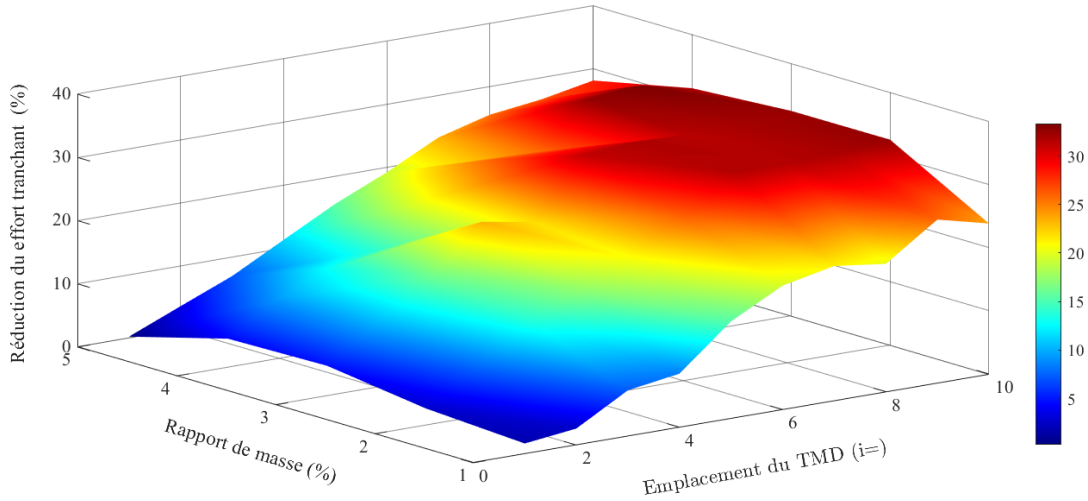


Figure 4.14 Réduction de l'effort tranchant maximal en fonction de l'emplacement du TMD et du rapport massique

4.10 Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre on a adopté la résolution numérique par présentation d'état (*state-space*) sur une structure non contrôlée et contrôlée pour avoir le vecteur de déplacement, accélération et effort tranchant. Les paramètres de TMD en l'occurrence de sa rigidité et amortissement sont optimisés en fonction de l'emplacement du TMD et du rapport massique et les résultats obtenus sont comparés avec celles d'un TMD conçu par les formules analytiques. Les résultats obtenus ont montrées l'effet de l'emplacement du TMD sur leur performance ainsi que l'utilité d'opter pour un algorithme d'optimisation pour des problèmes similaires.

Conclusion générale :

Dans ce mémoire nous avons utilisé l'algorithme génétique pour concevoir un TMD installé sur une structure à 10 étages. L'emplacement du TMD est chaque fois changé afin de démontrer l'effet de l'emplacement du TMD sur leur performance. L'optimisation a été faite aussi pour des rapports massiques différents. Les conclusions tirées de cette étude peuvent être énumérées comme suit :

1. Le choix de la fonction objective est une étape primordiale, le choix de cette dernière n'est aboutie qu'après plusieurs tentatives
 2. Les paramètres du TMD sont aussi affectés par leur emplacement, contrairement aux formules analytiques où les paramètres du TMD n'ont aucune relation avec l'emplacement.
 3. L'utilisation de l'algorithme génétique pour optimiser les paramètres du TMD nous a permis de un bon choix des trois paramètres du TMD (masse, rigidité et amortissement) en considérant tout sort de variation en réponse dynamique de cette structure ainsi que l'effet de l'emplacement du TMD.
 4. L'amortissement choisi par l'algorithme génétique est minimale en comparant avec les formules analytiques.
 5. L'optimisation par l'algorithme génétique est un processus efficace et rentable, garantissant un TMD optimale avec des performances très élevées.
- Cependant, les futurs travaux de recherche pourront améliorer l'utilisation de l'algorithme génétique sur d'autres mécanismes de contrôle.

Références bibliographiques

1. Naeim, F. and J.M. Kelly, *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice* 1999: Wiley.
2. Center, H.I.T.E., *Evaluation Findings for Skellerup Base Isolation Elastomeric Bearings: Technical Evaluation Report* 1998: American Society of Civil Engineers.
3. Center, H.I.T.E., *Guidelines for Testing Large Seismic Isolator and Energy Dissipation Devices* 2002: American Society of Civil Engineers.
4. Clark, P.W., J.M. Kelly, and B.E.E.R.C. University of California, *Experimental Testing of the Resilient-friction Base Isolation System* 1990: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
5. Soong, T.T. and M.C. Costantinou, *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering* 2014: Springer Vienna.
6. Den Hartog, J.P., *Mechanical Vibrations* 1934: McGraw-Hill Book Company, Incorporated.
7. Tyler, R., *Further notes on a steel energy-absorbing element for braced frameworks*. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1985. **18**(3): p. 270-279.
8. Luft, R.W., *Optimal tuned mass dampers for buildings*. Journal of the Structural Division, 1979. **105**(12): p. 2766-2772.
9. Fujino, Y. and M. Abé, *Design formulas for tuned mass dampers based on a perturbation technique*. Earthquake engineering & structural dynamics, 1993. **22**(10): p. 833-854.
10. Fujino, Y., et al., *Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures*. Journal of Engineering Mechanics, 1992. **118**(10): p. 2017-2030.
11. Soong, T.T., *Active Structural Control: Theory and Practice* 1990: Longman Scientific & Technical.
12. Nishimura, I., et al., *Active tuned mass damper*. Smart Materials and Structures, 1992. **1**(4): p. 306.
13. Kourakis, I., *Structural systems and tuned mass dampers of super-tall buildings: case study of Taipei 101*, 2007, Massachusetts Institute of Technology.
14. 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.
15. Warburton, G.B., *Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters*. Earthquake engineering & structural dynamics, 1982. **10**(3): p. 381-401.
16. Datta, T.K., *Seismic analysis of structures* 2010: John Wiley & Sons.
17. Janocha, H., *Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design, and Applications* 2013: Springer Berlin Heidelberg.
18. Michalewicz, Z. and C.Z. Janikow. *Handling constraints in genetic algorithms*. in *Icga*. 1991.
19. Husbans, P., et al., *Artificial evolution: A new path for artificial intelligence?* Brain and cognition, 1997. **34**(1): p. 130-159.
20. Goldberg, D.E., et al., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning* 1989: Addison-Wesley Publishing Company.

21. Venkataraman, P., *Applied Optimization with MATLAB Programming* 2009: Wiley.
22. Özsarıyıldız, Ş.S. and A. Bozer, *Finding optimal parameters of tuned mass dampers*. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2015. **24**(6): p. 461-475.