

N° d'ordre : 04/2018-D/GC

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

FACULTE DE GENIE CIVIL



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de Docteur En Science

En Génie Civil

Spécialité : Structure

Par Farida ACHOUR OLIVIER

**CONTRÔLE PASSIF ET ACTIF DES STRUCTURES
SOUS EXCITATION SISMIQUE**

Soutenue publiquement le 30/09/2018 devant le Jury composé de :

Mr. D. BENOUAR	Professeur, à l'USTHB/FGC	Président
Mr. H. AFRA	Directeur de Recherche, au CNERIB	Directeur de thèse
Mr. M. HADID	Professeur, à l'ENSTP	Examineur
Mr. N. LAOUAMI	Directeur de Recherche, au CGS	Examineur
Mr. A. MEBARKI	Professeur, à l'U. Paris-Est Marne-la-Vallée	Examineur
Mr. A. BOURZAM	Maître de Conférences/A, à l'USTHB	Examineur
Mr. R. CHABOUR	Professeur, à l'U. Lorraine	Invité

Dédicaces

A mes très chers parents, vous m'avez toujours soutenue sans aucune condition

A mes frères en particulier Samir et à mes sœurs Ouiza et Lynda

A mes enfants, mes trésors Maxime et Noé

A mon cher mari, pour ta confiance, ta présence et ton soutien dans les périodes difficiles.

A mes beaux-parents papy et mamy

A mes nièces en particulier Lisa

A tous mes amis (ies)

Remerciements

A l'issue de ces années de thèse, je tiens tout particulièrement à exprimer ma plus sincère reconnaissance au professeur **H.AFRA**, Directeur Général du Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), je considère que c'est un privilège et un honneur de travailler avec lui.

J'exprime mes sincères remerciements aux personnes qui m'ont fait l'honneur d'accepter de faire parties du jury de cette thèse :

Au professeur **D. Benouar** de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Au professeur **M. Hadid** de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

Au professeur **N. Laouami** du Centre National du Génie Parasismique, pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

Au professeur **A. Mebarki** de l'université Marne-la-Vallée, pour avoir accepté d'examiner cette thèse

Au Professeur **A. Bourzam** de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

Au Professeur **R. Chabour** de l'Université de Metz, pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

Je remercie vivement le professeur **Lefkir** de l'ENSTP de m'avoir initiée à la programmation avec le langage Matlab.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Monsieur **M. Souici** du CNERIB pour m'avoir facilité l'accès aux locaux du CNERIB.

Que Melle **C. Noui** trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour son accueil et son aide lors de mes passages au CNERIB.

Enfin, mais pas du tout en dernière place, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma chère amie et collègue **Melle Hamraoui** du CNERIB, pour son aide, ses conseils et son soutien et surtout le soutien moral.

Résumé

L'application des techniques du contrôle passif et actif, dans le domaine du génie civil, offre une alternative à la méthode traditionnelle de protection parasismique des structures. Beaucoup d'efforts de recherche ont été déployés pour le développement théorique et pratique des méthodes et systèmes de contrôle. Cependant, l'élément clé pour la réussite de l'application de ces systèmes est le développement des lois et d'algorithmes de contrôle efficaces à utiliser pour le calcul de la force de contrôle à appliquer sur la structure. Un algorithme efficace est un algorithme robuste performant et stable. Beaucoup d'algorithmes ont été proposés et ils sont basés sur différentes procédures d'optimisation. Parmi ces algorithmes ou méthodes de contrôle, on trouve le régulateur linéaire quadratique (LQR). La loi de contrôle linéaire quadratique est l'un des algorithmes les plus connus, principalement pour sa simplicité et sa mise en œuvre facile mais, il souffre de la difficulté de vérification de la stabilité du système à contrôler. En effet, la stabilité et la robustesse constituent une vraie problématique pour l'application pratique d'une méthode de contrôle actif pour les structures de génie civil. Concevoir une loi de contrôle robuste et stable est possible en utilisant la méthode de Lyapunov.

Dans ce travail, une loi de contrôle basée sur la théorie de stabilité de Lyapunov a été développée pour les structures soumises aux chargements sismiques. Cette approche exige la définition d'une fonction dite de Lyapunov qui doit être définie positive, et la loi de contrôle est déterminée de manière à garder la dérivée de la fonction négative. L'importance de cette méthode est qu'elle permet l'analyse de stabilité du système à contrôler sans avoir à résoudre les équations différentielles le régissant.

Même s'il n'existe pas de méthodes standards pour la détermination des fonctions candidates de Lyapunov, la méthode basée sur la théorie de stabilité de Lyapunov est devenue aujourd'hui la méthode la plus utilisée pour l'analyse de stabilité des lois de contrôle des systèmes dynamiques.

Mots clés : chargement sismique - contrôle des structures - algorithme de contrôle - stabilité - fonctions de Lyapunov.

Abstract

The application of passive and active control techniques to mitigate the effects of seismic loads on civil engineering structures offers an appealing alternative to traditional earthquake resistant design approaches, and enhances safety of structures under extreme conditions. There has been a large amount of research effort devoted to the theoretical and practical development of structural control. Structural control can be applied to mitigate the vibration amplitudes by using appropriate devices and control techniques. The key element in successful use of these devices and techniques is an effective control algorithm to compute control loads to be applied to the structure, and it has been demonstrated that the performance of the controlled system is highly dependent on the choice of algorithm. An effective control algorithm has to be robust and functional under various dynamic conditions. Various control algorithms have been proposed, and based in different optimization procedures including linear quadratic regulator (LQR). The LQR control is among the well-known optimal algorithms mainly due to its simplicity and ease of implementation. However, for the practical application of an active control method to civil engineering structures, the problem of stability and robustness is one of the major issues. Design of a stable and robust controller is possible by using Lyapunov stability theory.

In this work, a Lyapunov based control algorithm is developed for structures subjected to a seismic ground motion. This approach requires the definition of Lyapunov function, which must be positive definite and the corresponding controller, is designed so as to make the derivative of the Lyapunov function negative. The importance of this approach is the fact that it allows the stability of the system to be controlled without solving the differential equation explicitly.

Even if, there is no standard method or systematic procedure to determine an appropriate Lyapunov function, Lyapunov's second method has today become the method of choice in determining the stability of a proposed control design for a dynamical system.

Key words: Seismic loads - structural control - control algorithm – stability - Lyapunov functions

ملخص

يوفر تطبيق تقنيات التحكم الحديثة في مجال الهندسة المدنية بديلاً للطريقة التقليدية لمقاومة الهياكل للزلازل.

تم بذل العديد من الجهود البحثية من أجل التطوير النظري والعملي لأساليب وأنظمة المراقبة.

ومع ذلك، فإن العنصر الأساسي للتطبيق الناجح لهذه الأنظمة يكمن في تطوير قوانين وخوارزميات تحكم فعالة لاستخدامها في حساب القوة التي سيتم تطبيقها على الهياكل.

فالخوارزمية الفعالة هي خوارزمية قوية ومستقرة، تم اقتراح العديد من الخوارزميات تستند إلى إجراءات تحسين مختلفة. فمن بين هذه الخوارزميات أو طرق المراقبة نجد المنظم الخطي التربيعي، يعتبر قانون التحكم التربيعي الخطي واحد من أكثر الخوارزميات المعروفة، وأساساً لبساطة وسهولة التنفيذ، لكنه يعاني من صعوبة التأكد من استقرار النظام الذي يجب التحكم فيه.

بالفعل، فإن الاستقرار والقوة يشكلان مشكلة حقيقية للتطبيق العملي لطريقة مراقبة نشطة لهياكل الهندسة المدنية، يمكن تطوير قانون تحكم قوي ومستقر باستخدام طريقة Lyapunov.

في هذا العمل، تم تطوير قانون تحكم يستند إلى نظرية استقرار Lyapunov للهياكل الخاضعة للأحمال الزلزالية. يتطلب هذا المنهج تعريف ما يسمى بدالة Lyapunov التي يجب تعريفها بشكل إيجابي ويتم تحديد قانون التحكم بطريقة تحافظ على مشتق الدالة بشكل سلبي.

تكمن أهمية هذه الطريقة في كونها تسمح بتحليل استقرار النظام الذي يجب مراقبته من دون الحاجة إلى حل المعادلات التفاضلية التي تحكمه.

على الرغم من عدم وجود طرق قياسية لتحديد دالات Lyapunov المقترحة، فإن الطريقة التي تعتمد على نظرية استقرار Lyapunov أصبحت اليوم الطريقة الأكثر استخداماً لتحليل استقرار قوانين المراقبة للأنظمة الديناميكية.

الكلمات الرئيسية: التحميل الزلزالي – التحكم في الهياكل -خوارزمية التحكم -الاستقرار – دالات Lyapunov

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1	4
STRUCTURES INTELLIGENTES ET ETAT DE L'ART DES DIFFERENTS SYSTEMES DE CONTROLE	4
1. INTRODUCTION	4
2. STRUCTURE ET STRUCTURE INTELLIGENTE	4
3. BREF HISTORIQUE DU CONTROLE DES STRUCTURES DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL	5
4. CONTROLE DES STRUCTURES	7
5. SYSTEMES DE CONTROLE PASSIF	10
5.1. Systèmes d'isolation sismique	10
5.1.1. Appuis Elastomères	10
5.1.2. Appuis Glissants	12
5.1.3. Appuis Elastomères et Glissants	12
5.2. Systèmes passifs de dissipation d'énergie	13
5.2.1. Amortisseurs à masse accordée et à liquide accordé	13
5.2.2. Amortisseurs métalliques	15
5.2.3. Amortisseurs à frottement	18
5.2.4. Amortisseurs viscoélastiques	19
5.2.5. Amortisseurs à fluide visqueux	21
5.2.6. Les amortisseurs à transformation de phase	23
6. SYSTEMES DE CONTROLE ACTIF	23
6.1. Amortisseur à masse active (<i>active mass damper</i>)	23
6.2. Systèmes de câbles actifs (<i>Active tendon system</i>)	24
6.3. Systèmes de palées actives (<i>Active brace systems</i>)	25
6.4. Systèmes générateurs d'impulsions (<i>Pulse generation systems</i>)	26
7. SYSTEMES DE CONTROLE SEMI-ACTIF	26
7.1. Amortisseurs à masse accordée semi actifs (<i>semi active tuned mass dampers</i>)	26
7.2. Amortisseurs à frottement semi actifs (<i>semi active friction dampers</i>)	27
7.3. Absorbeurs de vibrations semi actifs (<i>Semi active vibration absorbers</i>)	28
7.4. Dispositifs de contrôle de rigidité semi actifs (<i>Semi active stiffness control devices</i>)	30
7.5. Amortisseurs Electrorhéologiques (<i>Electrorheological Dampers, ER Dampers</i>)	30
7.5. Amortisseurs Magnétorhéologiques (<i>Magnetorheological Dampers</i>)	31
8. SYSTEMES DE CONTROLE HYBRIDE	32
8.1. Amortisseur à masse hybride	33
8.2. Système hybride d'isolation à la base	33
8.3. Systèmes hybrides amortisseur-actionneur pour des palées de stabilité	34
9. CONCLUSION	35
CHAPITRE 2	36
PRINCIPE DES STRUCTURES INTELLIGENTES ET LES DIFFERENTS ALGORITHMES DE CONTROLE ACTIF	36
1. INTRODUCTION	36
2. PRINCIPE DE BASE DES STRUCTURES INTELLIGENTES POUR LE CONTROLE DE LA REPONSE SISMIQUE	36
2.1. Analyse d'une structure à un seul degré de liberté	36

2.2. EXEMPLE D'APPLICATION D'UNE STRUCTURE AVEC UN SYSTEME D'ISOLATION A LA BASE.....	39
2.3. PRINCIPE DE BASE D'UN SYSTEME DE CONTROLE ACTIF ET SES ELEMENTS CONSTITUTIFS.....	43
3. CONTROLE PAR RETROACTION	45
3.1. CONTROLABILITE (COMMANDABILITE).....	45
3.2. OBSERVABILITE	46
4. ALGORITHMES DE CONTROLE ACTIF DES STRUCTURES	46
4.1. CONTROLE OPTIMAL.....	47
4.1.1. <i>Commande linéaire quadratique</i>	47
4.1.2. <i>Commande linéaire quadratique Gaussienne</i>	47
4.1.3. <i>Contrôle optimal coupé (clipped optimal control)</i>	48
4.1.4. <i>Commande bang-bang</i>	48
4.2. CONTROLE PREDICTIF.....	48
4.3. PLACEMENT DE POLES	49
4.4. CONTROLE MODAL.....	49
4.5. CONTROLE ROBUSTE.....	49
4.5.1. <i>Contrôle du mode glissant (Sliding mode control)</i>	49
4.5.2. <i>Contrôle H_{∞}</i>	50
4.5.3. <i>Contrôle basé sur la théorie de Lyapunov</i>	50
5. CONCLUSION.....	51
CHAPITRE 3.....	52
MODELISATION ET ANALYSE DES SYSTEMES DE CONTROLE	52
1. INTRODUCTION	52
2. MODELISATION DES SYSTEMES DE CONTROLE.....	52
2.1. <i>Modèles d'état</i>	53
2.2. <i>Passage d'une équation différentielle vers un modèle d'état</i>	55
2.3. <i>Solution de l'équation d'état et matrice de transition</i>	57
3. STABILITE DES SYSTEMES DYNAMIQUES.....	58
3.1. <i>Stabilité au sens de Lyapunov : méthode directe</i>	61
3.2. <i>Fonctions de Lyapunov</i>	61
4. CONCLUSION.....	63
CHAPITRE 4.....	64
LOI DE CONTROLE PAR RETOUR D'ETAT BASEE SUR LA METHODE DE LYAPUNOV..	64
1. INTRODUCTION.....	64
2. COMMANDE DANS L'ESPACE D'ETAT ET PRINCIPE DU CONTROLE PAR RETOUR D'ETAT	65
3. <i>Formulation et modélisation</i>	66
4. LOI DE CONTROLE BASEE SUR LA METHODE DIRECTE DE LYAPUNOV	67
4.1. <i>Algorithme de contrôle</i>	67
4.2. <i>PARAMETRES DE LA MATRICE DE GAIN</i>	70
4.3. <i>Programme numérique</i>	73
5. EXEMPLE D'APPLICATION ET SIMULATION NUMERIQUE.....	74
4.1. <i>Résultats et interprétation</i>	76
5. CONCLUSION.....	83
CHAPITRE 5.....	84
CONTROLE SEMI ACTIF : APPLICATION DE L'ALGORITHME DEVELOPPE POUR UN	
AMORTISSEUR MAGNETO-RHEOLOGIQUE	84
1. INTRODUCTION	84

2.	FLUIDES RHEOLOGIQUES.....	84
3.	AMORTISSEUR MAGNETO-RHEOLOGIQUE	85
3.1.	<i>Fonctionnement de l'amortisseur magnéto-rhéologique.....</i>	86
3.2.	<i>Modélisation de l'amortisseur magnéto-rhéologique</i>	86
3.2.1.	<i>Modèle de Bingham.....</i>	87
3.2.2.	<i>Modèle de Bouc- Wen.....</i>	88
3.2.3.	<i>Modèle de Bouc-Wen modifié</i>	89
4.	CHOIX DU MODELE DE L'AMORTISSEUR ET FORMULATION.....	90
4.1.	<i>Equations caractérisant le modèle choisi</i>	90
4.2.	<i>Modèle de la structure et formulation</i>	92
4.3.	<i>Détermination du voltage à appliquer</i>	93
5.	RESULTATS ET INTERPRETATION	95
6.	CONCLUSION.....	97
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	98
	ANNEXE A	101
	CONTROLE LINEAIRE QUADRATIQUE (LQR).....	101
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	105

Liste des abréviations

ADAS: Added damping and stiffness.
AMA : Amortisseur à masse accordée.
AMD: Active mass damper.
AMF: Alliage à mémoire de forme.
ASHD : Accumulated semi active hydraulic damper.
ER : Electrorheological (Electrorhéologique).
HMD : Hybrid mass damper.
LQR : Linear quadratic regulator.
MR : Magnetorheological (magnétorhéologique).
PED: Passive energy dissipation.
PGA : Peak ground acceleration.
RMS: Root mean square
SAHD: Semi active hydraulic damper.
SAVS : Semi active variable stiffness system.
SDOF: Single degree of freedom.
SMC: Sliding mode control.
TLD: Tuned liquid damper.
TMD : Tuned mass damper.

Liste des figures

- Figure 1.1** : Structure avec les différents types de contrôle.
- Figure 1.2** : Systèmes d'isolation sismique.
- Figure 1.3** : Structure avec des systèmes d'isolation à la base.
- Figure 1.4** : Portique équipé d'un système de dissipation d'énergie.
- Figure 1.5** : Structure avec un amortisseur à masse accordée.
- Figure 1.6** : Amortisseurs à liquide accordé.
- Figure 1.7** : Courbe force-déplacement d'un amortisseur métallique.
- Figure 1.8** : Amortisseur métallique.
- Figure 1.9** : Courbe force-déplacement d'un amortisseur à frottement.
- Figure 1.10** : Amortisseur à frottement.
- Figure 1.11** : Courbe force-déplacement d'un amortisseur viscoélastique.
- Figure 1.12** : Amortisseur viscoélastique.
- Figure 1.13** : Installation de l'amortisseur viscoélastique.
- Figure 1.14** : Amortisseurs à fluide visqueux.
- Figure 1.15** : Modèles comparatifs des structures avec AMD et TMD.
- Figure 1.16** : Système de câbles actifs.
- Figure 1.17** : système de palées de stabilité actives.
- Figure 1.18** : Amortisseur à masse accordée semi actif.
- Figure 1.19** : Amortisseur à frottement piézoélectrique.
- Figure 1. 20** : Schéma d'un absorber de vibrations semi actif.
- Figure 1.21** : Amortisseur hydraulique semi actif avec accumulateur.
- Figure 1.22** : Dispositif à rigidité variable semi actif.
- Figure 1.23** : Fluide et amortisseur électro rhéologiques.
- Figure 1.24** : Fluide magnéto rhéologique.
- Figure 1.25** : Amortisseur à masse hybride.
- Figure 1.26** : Système hybride avec l'isolation à la base
- Figure 1.27** : Système de palées hybride et les dispositifs de contrôle.
-
- Figure 2.1** : Accélérogramme d'El Centro.
- Figure 2.2** : Réponse en accélération du dernier niveau de la structure encastrée.
- Figure 2.3** : Réponse en déplacement du dernier niveau de la structure encastrée.
- Figure 2.4** : Réponse en accélération du dernier niveau de la structure isolée.
- Figure 2.5** : Réponse en déplacement du dernier niveau de la structure isolée.
- Figure 2.6** : Accélérations du dernier niveau de la structure avec et sans le système d'isolation.
- Figure 2.7** : Déplacements du dernier niveau de la structure avec et sans le système d'isolation.
- Figure 2.8** : Spectre de Fourier des accélérations du dernier niveau de la structure Encastrée.
- Figure 2.9** : Spectre de Fourier des accélérations du dernier niveau de la structure Isolée.
- Figure 2.10** : Déplacements inter étages du dernier niveau de la structure isolée.
- Figure 2.11** : Schéma bloc de contrôle par rétroaction.
- Figure 2.12** : Reconstruction de l'état d'un système.

Figure 3.1 : Schéma bloc d'un modèle d'état linéaire.

Figure 3.2 : Stabilité d'un état d'équilibre.

Figure 4.1 : Commande par retour d'état.

Figure 4.2 : Organigramme du programme numérique.

Figure 4.3 : Accélérogramme utilisés pour la simulation.

Figure 4.4 : Déplacement de la structure avec et sans contrôle sous le séisme d'El Centro.

Figure 4.5 : Accélération de la structure avec et sans contrôle sous le séisme d'El Centro.

Figure 4.6 : Effort tranchant de la structure avec et sans contrôle sous le séisme d'El Centro.

Figure 4.7 : Déplacement de la structure avec et sans contrôle sous le séisme le séisme de Northridge.

Figure 4.8 : Accélération de la structure avec et sans contrôle sous le séisme de Northridge.

Figure 4.9 : Effort tranchant de la structure avec et sans contrôle sous le séisme de Northridge.

Figure 4.10 : Déplacement de la structure avec et sans contrôle sous le séisme de Mexico.

Figure 4.11 : Accélération de la structure avec et sans contrôle sous le séisme de Mexico.

Figure 4.12 : Effort tranchant de la structure avec et sans contrôle sous le séisme de Mexico.

Figure 4.13 : Force de contrôle pour les deux algorithmes utilisés sous le séisme d'El Centro.

Figure 4.14 : Force de contrôle pour les deux algorithmes utilisés sous le séisme de Northridge.

Figure 4.15 : Force de contrôle pour les deux algorithmes utilisés sous le séisme de Mexico

Figure 5.1 : Fluides magnéto-rhéologiques sur une plaque de verre sans et avec un champ magnétique

Figure 5.2 : Formation des chaînes de particules ferromagnétiques dans un fluide magnéto-rhéologique.

Figure 5.3 : composition d'un amortisseur magnéto-rhéologique.

Figure 5.4 : Modèle de Bingham pour un amortisseur MR.

Figure 5.5 : Modèle proposé par Gamota and Filisko.

Figure 5.6 : Modèle de Bouc-Wen.

Figure 5.7 : Modèle de Bouc-Wen modifié proposé par Spencer et all.

Figure 5.8 : Dispositif « Wonder Box de Lord Corporation et schéma de fonctionnement.

Figure 5.9 : Force de l'amortisseur MR.

Figure 5.10 : Réponse en déplacement de la structure avec et sans l'amortisseur MR.

Figure 5.11 : Réponses en vitesse de la structure avec et sans l'amortisseur MR.

Figure 5.12 : Réponses en accélération de la structure avec et sans l'amortisseur MR.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Exemples des structures réalisées avec des systèmes de contrôle.

Tableau 2.1 : Périodes et pulsations de la structure avec et sans le système d'isolation.

Tableau 2.2 : Accélérations et déplacements maximaux de la structure avec et sans le système d'isolation.

Tableau 2.3 : Déplacements inter-étages de la structure avec et sans le système d'isolation.

Tableau 4.1 : réponses maximales en déplacement, accélération et effort tranchant.

Tableau 4.2 : Critères d'évaluation.

Tableau 4.3 : Valeur maximale de la force de contrôle pour les deux algorithmes.

Tableau 5.1 : valeurs proposées pour les paramètres du modèle de Bouc-Wen.

Tableau 5.2 : Réponses maximales de la structure : déplacement, vitesse et accélération.

Introduction générale

L'activité sismique devient de plus en plus intense et, beaucoup d'événements sismiques récents ont causé des pertes de vies humaines et des dégâts pour les structures. En effet, un séisme est un événement violent et imprévisible, il sollicite les structures d'une manière très différente des actions habituelles. Si les structures ne sont pas conçues pour cette éventualité, les sollicitations sismiques peuvent les endommager fortement jusqu'à même entraîner leur effondrement total ou partiel. Il est malheureusement certain que les séismes continueront à nous surprendre. A chaque séisme, il y a un regain d'intérêt pour la construction parasismique car, face à ce risque et à l'impossibilité de le prévoir, la seule prévention est de construire des structures parasismiques. L'approche traditionnelle consiste à concevoir des structures avec une résistance suffisante pour reprendre les charges et une capacité à se déformer d'une manière ductile. Toutefois, cette approche a montré des limites face à certains chargements dynamiques et surtout face aux exigences de confort et de fiabilité de plus en plus grandes pour une certaine catégorie de structures. Comme par exemple, la construction de ponts légers de grandes portées et des immeubles à grande hauteur nécessite l'utilisation de matériaux performants, des méthodes et des technologies innovantes pour leur permettre de s'adapter activement à la variation de la charge extérieure. Parmi ces concepts modernes, le contrôle des structures intégrant des systèmes intelligents, présente une alternative efficace pour la protection des structures de génie civil, que ce soit pour des structures neuves ou des structures à réhabiliter surtout pour les ouvrages à grande valeur historique et culturelle. Ce concept de structures intelligentes, avant d'être appliqué dans le domaine du génie civil, il a été d'abord appliqué dans les domaines de l'aérospatiale, de l'aéronautique et dans le domaine de l'industrie mécanique. Il est introduit dans le domaine de génie civil sous l'appellation de contrôle des structures (structural control).

Plusieurs méthodes de contrôle ont été développées pour la protection des structures. Selon leur nature dissipative et leur nécessité ou non de l'énergie externe pour leur fonctionnement, elles peuvent être classées en trois ou quatre catégories : les méthodes dites passives, actives et semi-actives, à celles-ci on peut ajouter les méthodes hybrides. Le contrôle passif est largement utilisé à travers le monde, il inclut l'isolation sismique et la dissipation d'énergie. Quant au contrôle actif et semi-actif, ils consistent à ajouter à la structure des dispositifs capables de modifier ses caractéristiques en temps réel ainsi que des capteurs pour mesurer la réponse de la structure et/ou l'excitation. Cependant, la

réussite de l'application de ces techniques actives dépend étroitement des algorithmes de contrôle utilisés ou ce qu'on appelle les lois de commande. Un algorithme efficace est un algorithme stable, robuste et performant :

- Un algorithme stable est un algorithme qui maintient le système à l'état de fonctionnement désiré c'est-à-dire à l'état d'équilibre,
- Un algorithme robuste est un algorithme qui tolère les perturbations et les incertitudes de modélisation dans la dynamique du système,
- Un algorithme performant est un algorithme qui répond rapidement au changement.

L'objectif de ce travail de thèse est donc de développer un algorithme de contrôle stable, robuste et performant en utilisant la théorie de stabilité de Lyapunov ou ce qu'on appelle aussi la méthode directe de Lyapunov. Cette méthode consiste à trouver une fonction définie positive appelée fonction candidate de Lyapunov, ensuite étudier sa variation. La loi de contrôle est déterminée de manière à avoir toujours la dérivée de la fonction négative.

L'utilisation des fonctions de Lyapunov contrôlées pour établir des lois de contrôle, constitue un outil fondamental puisque l'on peut réduire la recherche de lois de contrôle stabilisante à la recherche de fonctions de Lyapunov. Surtout que cette méthode de Lyapunov constitue une interface entre la théorie de contrôle mathématique et l'ingénierie de contrôle.

Pour ce faire, cette thèse est structurée en cinq chapitres comme suit :

- Le chapitre 1 est consacré à l'état de l'art des systèmes de contrôle passif, actif, semi-actif et hybride.
- Le chapitre 2 présente le principe des structures intelligentes et les différents algorithmes de contrôle actif des structures.
- Le chapitre 3 est dédié à la modélisation et à la stabilité des systèmes de contrôle. La modélisation par représentation d'état et la stabilité au sens de Lyapunov y sont présentées.
- Le chapitre 4 présente le développement analytique et numérique d'une loi de contrôle par retour d'état basée sur la théorie de stabilité de Lyapunov. Des

résultats des simulations numériques sur une structure à un seul degré de liberté sont présentés.

- Le chapitre 5 présente l'application de l'algorithme développé pour un système de contrôle semi actif à savoir l'amortisseur magnétorhéologique. Dans ce chapitre une revue succincte des modèles paramétriques des amortisseurs magnéto-rhéologiques est donnée et un modèle a été ensuite choisi pour l'application.

Enfin, la thèse s'achève par des conclusions tirées de ce travail et des perspectives de recherches futures.

Chapitre 1

Structures intelligentes et état de l'art des différents systèmes de contrôle

1. Introduction

Lors de son fonctionnement, un système mécanique donné est dépendant de son environnement. Cet environnement est caractérisé par l'ensemble des sources d'excitation, des liaisons et des effets désirables ou indésirables que produit le système. Pour protéger ce système ou pour lui conférer un comportement avec de meilleures performances, on peut lui intégrer des dispositifs qui peuvent interagir en temps réel avec la structure de base. Avec ces dispositifs intégrés, la structure est dite structure intelligente. Ces dispositifs connus sous le nom de systèmes de contrôle, sont utilisés dans des domaines aussi variés que l'instrumentation, l'automobile, l'aéronautique, l'aérospatial et aussi le domaine du génie civil.

Les systèmes de contrôle sont omniprésents dans notre vie de tous les jours, par exemple contrôler la température d'une pièce, la température de l'eau ou bien contrôler la vitesse d'une voiture en agissant sur les pédales d'accélérateur et de frein, présentent tous des systèmes de contrôle. Le principe du contrôle automatique est le même que pour ces exemples sauf que dans ce cas le contrôle se fait d'une manière automatique au lieu d'être manuel.

Dans le domaine du génie civil, il y a un intérêt croissant pour ces systèmes qui permettent d'atténuer les effets des sollicitations dynamiques sur des structures telles que des bâtiments à grande hauteur, des ponts, des plates formes offshore et des tours de contrôle, etc.

Ce chapitre est consacré aux différents types de contrôle ainsi que les différents dispositifs adaptés à chaque type.

2. Structure et structure intelligente

Une structure est un système qui supporte et/ou transmet des charges. Elle est conçue pour accomplir de telles fonctions pendant sa durée de vie sans subir de dégâts irréparables. Les charges sur une structure peuvent être statiques ou dynamiques. Les composantes de la structure, comme les poteaux, les poutres, et les voiles sont des systèmes structuraux et ils sont aussi considérés comme des structures [1]. Ce qu'on appelle réponse d'une structure à un chargement extérieur, est son comportement, qui peut être une déformation sous une charge statique ou une vibration sous une charge

dynamique. Par conséquent, la conception d'une structure doit assurer la sécurité (résistance et stabilité de la structure) et l'aptitude au service (rigidité). L'approche traditionnelle consiste donc à concevoir des structures avec une résistance suffisante pour reprendre les charges et une capacité à se déformer d'une manière ductile [1,2]. Cependant, ces structures ne peuvent pas s'adapter activement à un quelconque changement de la charge extérieure surtout les charges dynamiques telles que les charges sismiques ou les charges dues au vent. Cette adaptation active des structures à leur environnement constitue une fonctionnalité des structures intelligentes.

Une structure est dite intelligente (smart structure) quand elle peut s'auto-surveiller et s'adapter à son environnement. Une structure devient intelligente en lui associant des dispositifs, des systèmes adaptatifs et des matériaux intelligents pour son fonctionnement [3]. Ces systèmes sont capables de détecter un quelconque changement, que ce soit dans l'environnement ou dans le système lui-même, de diagnostiquer les problèmes, d'enregistrer et de traiter les données mesurées, et de développer par la suite l'action appropriée pour améliorer les performances du système et de préserver l'intégrité, la sécurité et l'aptitude en service de la structure [1].

Le concept de structures intelligentes trouve son origine dans la convergence de la recherche dans plusieurs disciplines telles que l'ingénierie des structures, l'automatique et l'intelligence artificielle. Avant d'être appliqué aux structures de génie civil, ce concept a été d'abord appliqué dans les domaines de l'aérospatiale, de l'aéronautique et dans le domaine de l'industrie mécanique. Cette nouvelle façon intelligente de concevoir des structures, intégrant des capteurs et des actionneurs pour leur bon fonctionnement, s'est développée en génie civil comme une nouvelle alternative à la méthode traditionnelle de protection des structures soumises aux charges dynamiques surtout les charges sismiques.

3. Bref historique du contrôle des structures dans le domaine du génie civil

L'idée d'intégrer des dispositifs aux structures, pour le contrôle de leur réponse dynamique, n'est pas vraiment nouvelle car elle date du début des années 1900, date à laquelle ont commencé à émerger des amortisseurs passifs [1,4]. Mais, leur commercialisation effective était à partir de 1970 et depuis, ils sont largement utilisés à travers le monde. Toutefois, le contrôle moderne et les systèmes adaptatifs n'étaient pas conceptualisés avant 1950 [1] car c'était un grand challenge de développer de tels systèmes pour des structures aussi grandes que les structures de génie civil [1, 5]. Le concept de contrôle sismique des structures est né donc en 1950 et trouve son origine dans

les travaux des deux chercheurs japonais Kobori et Minai [1,5,6]. En effet, la conclusion importante tirée de ces travaux est la suivante : puisqu'il était impossible de déterminer d'une façon fiable et précise les forces sismiques, le contrôle des structures est nécessaire et les structures doivent s'adapter activement à ces forces sismiques. Par ailleurs, Yao [7] en 1972 a apporté une contribution significative à la recherche dans le domaine de contrôle des structures aux USA avec son concept de « error-activated structural system » dont le comportement du système varie automatiquement avec les variations imprévisibles des chargements extérieurs telles que les conditions environnementales, et de cette façon la structure réagira favorablement à tous les chargements possibles. Dans un tel système, les chargements dus aux séismes ou aux vents sont repris non seulement par les éléments structuraux mais aussi par la force de contrôle [1,8]. Mais, depuis ces premiers concepts, un remarquable progrès a été réalisé pour le contrôle des structures soumises aux charges sismiques [9,10]. Le Japon est en tête par rapport aux applications pratiques des systèmes de contrôle dans les structures [9] surtout depuis la réalisation en 1989 à Tokyo de la première structure avec un amortisseur à masse active (active mass damper, AMD) [9,10,11,12]. Le tableau 1.1 donne les réalisations des structures intégrant des systèmes de contrôle de la période allant de 1989 à 1998 [9].

Tableau 1.1. Exemples de structures réalisées avec des systèmes de contrôle

Structure	Emplacement	Année de réalisation	Caractéristiques Hauteur, masse, niveaux	Système de Control utilisé
Kyobashi Seiwa	Tokyo,Japan	1989	33m, 400ton, 11stories	AMD
Kajima Research Institutue KATRI No.21 Building	Tokyo,Japan	1990	12m, 400 ton, 3 stories	Active Variable Stiffness System (6 devices)
Sendagaya INTES	Tokyo,Japan	1992	58m, 3280m,11 stories	AMD
Applause Tower	Osaka,Japan	1992	161m, 13943 ton,34 stories	HMD
Kansai Int. Airport Control Tower	Osaka,Japan	1992	86m, 2570 ton, 7 stories	HMD
Osaka Resort City	Osaka,Japan	1992	200m, 56980 ton, 50 stories	HMD
Yokohama Land Mark Tower	Yokohama,Kanagawa,Japan	1993	296m, 260610 ton, 70 stories	HMD
Long Term Credit Bank	Tokyo,Japan	1993	129m, 40000 ton, 21 stories	HMD
Ando Nishikicho	Tokyo,Japan	1993	54m, 2600 ton, 14 stories	HMD
Hotel Nikko Kanazawa	Kanazawa,Ishikawa,Japan	1994	131 m, 27000 ton, 29 stories	HMD
Structure	Emplacement	Année de réalisation	Caractéristiques	Système de Control utilisé

			Hauteur, masse, niveaux	
Hiroshima Riegha Royal Hotel	Hiroshima, Japan	1994	150m, 83000 ton, 35 stories	HMD
Shinjuku Park Tower	Tokyo, Japan	1994	227m 130000 ton, 52 stories	HMD
MHI Yokohama Bldg.	Yokohama, Kanagawa, Japan	1994	152m, 61800 ton, 34 stories	HMD
Hamamatsu ACT Tower	Hamamatsu, Shizuoka, Japan	1994	212m, 107500 ton, 46 stories	HMD
Riverside Sumida	Tokyo, Japan	1994	134m, 52000 ton, 33 stories	AMD
Hikarigaoka J-City	Tokyo, Japan	1994	110m, 29300 ton, 26 stories	HMD
Miyazaki Phoneix Hotel Ocean 45	Miyazaki, Japan	1994	154m, 83650 ton, 43 stories	HMD
Osaka WTC Bldg	Osaka, Japan	1994	252m, 80000ton, 52 stories	HMD
Dowa Kasai Phoneix Tower	Osaka, Japan	1995	145m, 26000 ton, 28 stories	HMD
Rinku Gate Tower North Bldg.	Osaka, Japan	1995	255m, 75000 ton, 56 stories	HMD
Hirobe Miyake Bldg	Tokyo, Japan	1995	31 m, 273 ton, 9 stories	HMD
Plaza Ichihara	Chiba, Japan	1995	61m, 5760 ton, 12 stories	HMD
TC Tower	Kao Hsung, Taiwan	1996	85 stories	HMD
Nanjing Tower	Nanjing, China	1997/1998	310 m	AMD

AMD: Active Mass Damper

HMD: Hybrid mass Damper

4. Contrôle des structures

Le contrôle ou la commande d'une structure consiste à lui ajouter un dispositif capable de modifier ses caractéristiques réelles. De nos jours on définit une structure active comme une structure d'ingénierie (engineering structure) contenant des capteurs et des actionneurs pouvant modifier sa réponse par rapport à son environnement [13]. On peut aussi définir une structure active ou une structure intelligente comme étant une structure mécanique ayant la capacité de modifier sa configuration, sa forme et ses caractéristiques en réponse à une évolution ou à un changement dans son environnement [3]. Pour cela, la théorie du contrôle est nécessaire pour l'analyse des propriétés de ces structures contrôlées. Ces structures sont considérées comme des systèmes dynamiques sur lesquels on peut agir au moyen d'une commande (ou contrôle). Le but est alors d'amener le système d'un état initial donné à un état final, en respectant éventuellement certains critères [14]. D'une manière générale, un système dynamique à contrôler est un processus comprenant des entrées et des sorties. Les entrées du système sont les commandes qui sont choisies de manière à optimiser un certain critère de performance. Les sorties

correspondent à des observations qui sont utilisées via un système de contrôle pour déterminer en temps réel la commande à exercer.

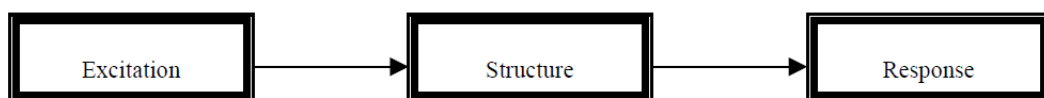
Plusieurs méthodes de contrôle ont été développées ces dernières années. Selon leur nature dissipative et leur nécessité ou non d'énergie externe pour leur fonctionnement, elles peuvent être classées en trois ou quatre catégories à savoir : les méthodes dites passives, actives et semi-actives ; à celles-ci on peut ajouter les méthodes hybrides [2,8,15].

Le contrôle passif consiste à superposer ou ajouter à la structure des dispositifs pour absorber et dissiper de l'énergie en modifiant les caractéristiques de la structure (figure 1.1b). Ce type de contrôle ne nécessite ni mesure ni apport de l'énergie externe [2].

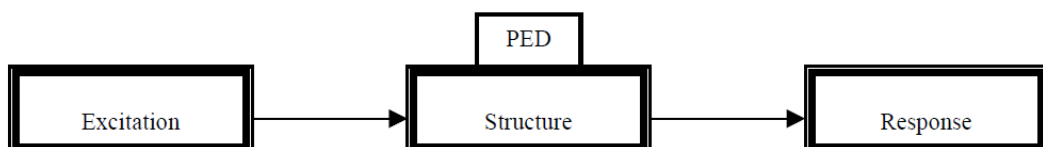
Le contrôle actif, contrairement au contrôle passif, fait usage d'éléments qu'on appelle capteurs et actionneurs (figure 1.1c) pour imposer une force de contrôle à la structure pour modifier ses caractéristiques en temps réel [3]. Pour produire et surveiller cette force, ce type de contrôle nécessite un algorithme, un calculateur en temps réel et une source d'énergie externe [2,3].

Le contrôle semi actif combine les principaux avantages des contrôles passif et actif en utilisant des dispositifs dont on peut piloter en temps réel les caractéristiques avec une infime source d'énergie externe, une batterie par exemple suffirait [2].

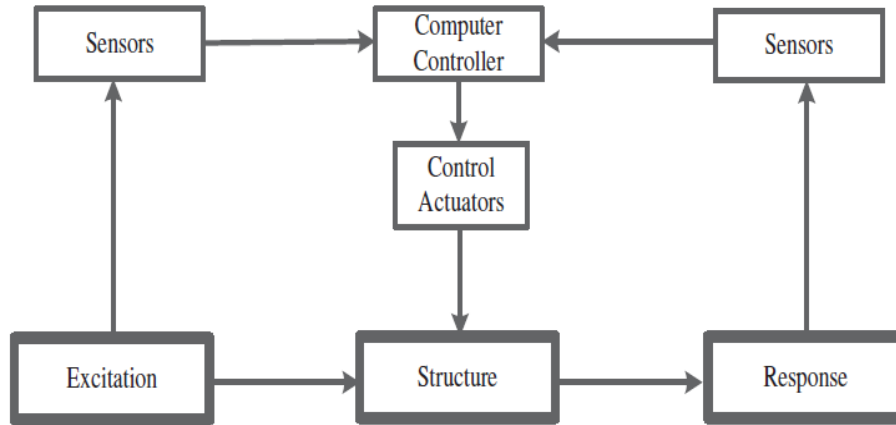
Le contrôle hybride consiste à combiner des systèmes passifs, actifs et semi actifs dans le but d'améliorer les performances et le comportement des structures [1,2,16,17].



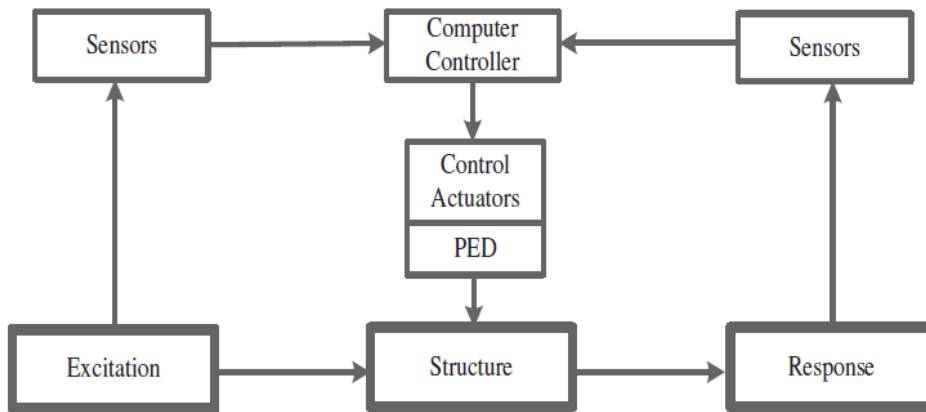
a. Structure conventionnelle



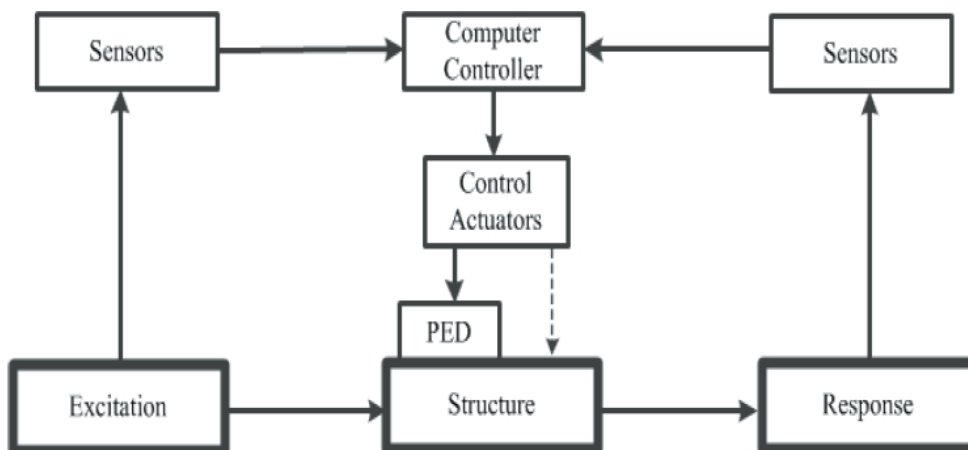
b. Structure avec dissipation passive d'énergie



c. Structure avec un contrôle actif



d. Structure avec un contrôle semi-actif



e. Structure avec un contrôle hybride

Figure 1.1. Structure avec les différents types de contrôle [6]

5. Systèmes de contrôle passif

Parmi toutes les méthodes de contrôle des structures, la méthode passive a été la première à être mise au point et elle est largement utilisée dans des régions à forte sismicité à travers le monde [18]. Cette méthode peut être réalisée soit par l'isolation sismique soit par la dissipation d'énergie [15] ou par les deux procédés en même temps. En général les systèmes passifs sont caractérisés par leur capacité de déplacer la fréquence de la structure (frequency shift) ou par leur capacité de dissiper de l'énergie [15].

L'isolation sismique consiste à filtrer l'excitation en intégrant à la structure des dispositifs ou des systèmes qu'on appelle les appuis parasismiques ou isolateurs.

La dissipation d'énergie s'obtient en ajoutant à la structure des systèmes qu'on appelle des dissipateurs d'énergie ou des amortisseurs. Ces systèmes sont basés sur des principes tels que le glissement par frottement (frictional sliding), écoulement des métaux (yielding of metals), déformation viscoélastique des solides ou des fluides et le passage des fluides à travers des orifices (fluids orificing) [15,19]

5.1. Systèmes d'isolation sismique

Le principe des systèmes d'isolation à la base est de découpler partiellement le mouvement de la structure de celui du sol [18,20, 21]. L'insertion de ces systèmes aura pour conséquence de réduire la fréquence fondamentale de la structure, c'est-à-dire d'allonger sa période de vibration, jusqu'à des valeurs situées en dessous de 0.5 Hz [21]. Il existe plusieurs types d'isolateurs sismiques et selon leur mode de fonctionnement, ils peuvent être répertoriés comme suit [18,22] :

- Appuis élastomères (Elastomeric bearings).
- Appuis glissants (Sliding bearings).
- Appuis élastomères et glissants.

5.1.1. Appuis Elastomères

Ce sont des appuis à déformation composés de couches alternées d'élastomère et de plaques d'acier appelées frettes [22], l'élastomère peut être naturel (caoutchouc) ou synthétique (Néoprène) [20]. La souplesse horizontale est assurée par les couches d'élastomère et la rigidité verticale par la présence des frettes [20].

On distingue différents types d'appuis à déformation tels que les appuis en caoutchouc fretté (Laminated rubber bearings) et les appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb (Lead rubber bearings) [22].

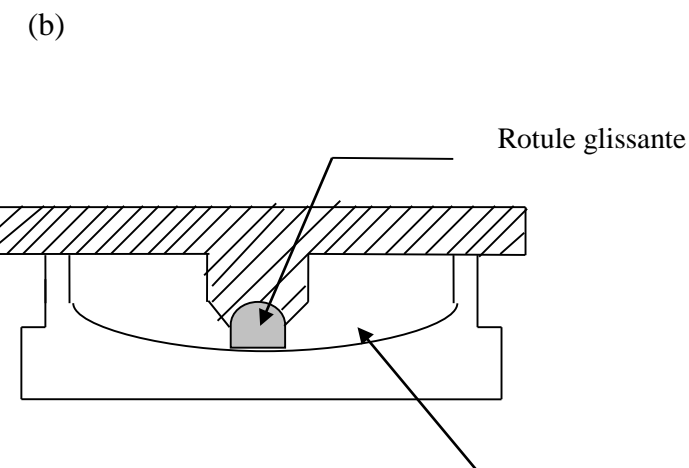
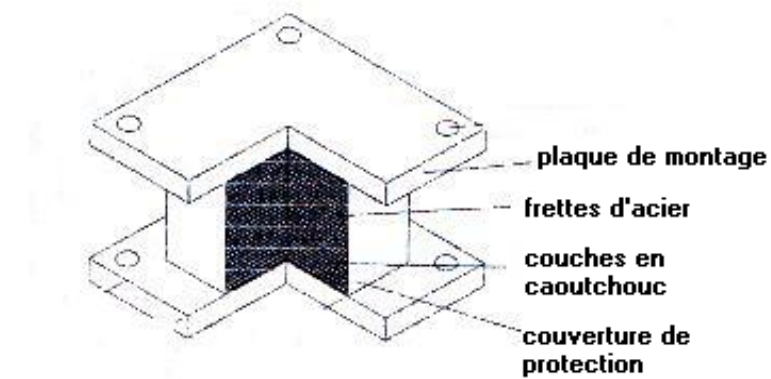
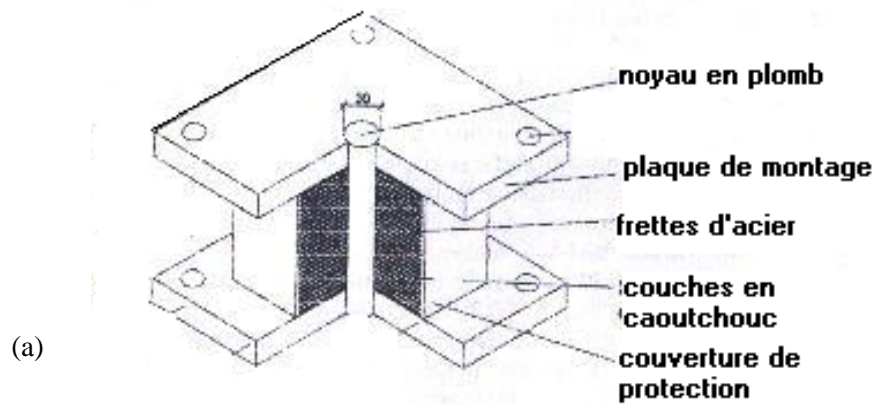


Figure 1.2. Systèmes d'isolation sismique
(a) Appuis élastomères frettés avec amortisseur en barreau de plomb
(b) Appuis élastomères frettés [20]
(c) Appui en pendule glissant

5.1.2. Appuis Glissants

Ces appuis fonctionnent par frottement. Le système le plus simple est composé d'une part de plaques solidaires de la superstructure et d'autre part de plaques fixées aux fondations et leur interface constitue le plan de glissement [22]. Parmi ces appuis on peut citer les appuis en pendules glissants qui consistent en une rotule se déplaçant sur une surface sphérique concave [20]. Un type d'appui en pendule glissant est schématisé sur la figure 1.2c.

5.1.3. Appuis Elastomères et Glissants

Ce sont des appuis résultant de l'association de plaques de glissement et des appuis élastomères ; un type de ces appuis a été utilisé par l'EDF (Electricité de France) [22], il est constitué de plaques en acier inoxydable fixées à la superstructure et des plaques en bronze au plomb solidaire des isolateurs élastomères. Un autre type très utilisé est composé de disques en acier inoxydable recouverts de Téflon sur lequel des essais ont été effectués pour déterminer les propriétés de frottement des interfaces Téflon-acier [23,24].

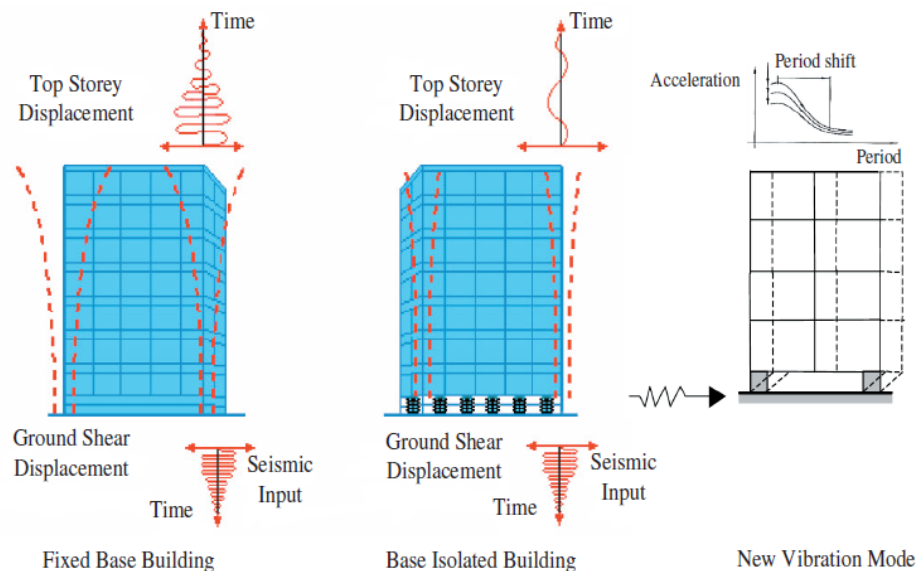


Figure 1.3. Structure avec des systèmes d'isolation à la base [6]

5.2. Systèmes passifs de dissipation d'énergie

Ce sont des dispositifs mécaniques développés pour dissiper une partie de l'énergie injectée dans la structure, réduisant ainsi la réponse de la structure lors des grands mouvements du sol. Les structures équipées de ces systèmes sont dites intelligentes car ces systèmes peuvent générer une force d'amortissement très importante si la réponse des structures est importante [1]. Mais, cette intelligence est limitée car ces systèmes sont seulement efficaces sur une petite bande de fréquences. Ils sont ajustés à la fréquence fondamentale de la structure et ils ont une capacité de contrôle limitée [1,6].

Avec ces systèmes, l'amortissement, la rigidité et la résistance de la structure se trouvent améliorés [25,19]. Ces systèmes peuvent être utilisés aussi avec les appuis parasismiques et permettent ainsi de réduire les déplacements du système d'isolation [20]. Les principaux systèmes utilisés pour la dissipation d'énergie peuvent être classés en trois ou quatre catégories à savoir les systèmes absorbeurs de vibrations, les systèmes hystérétiques, les systèmes viscoélastiques, les amortisseurs à transformation de phase et on peut ajouter aussi les systèmes de recentrage [6,19].

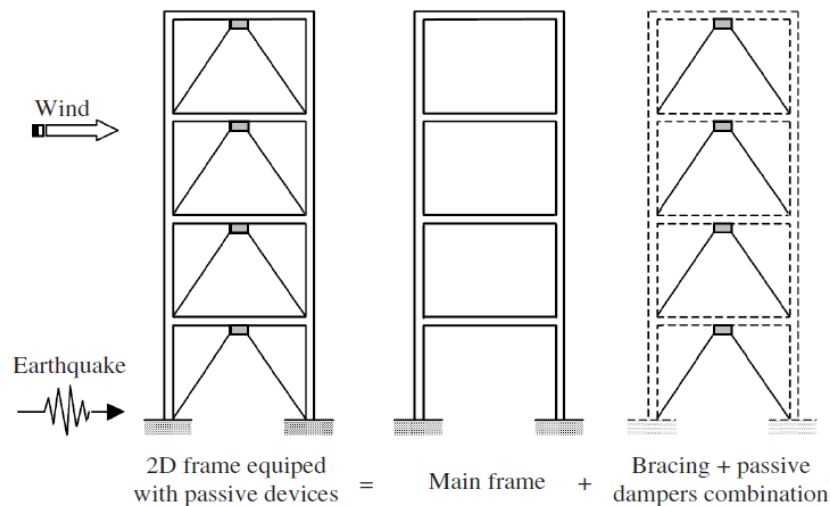


Figure 1.4. Structure équipée d'un système de dissipation d'énergie [6]

5.2.1. Amortisseurs à masse accordée et à liquide accordé

Ces deux amortisseurs sont des absorbeurs de vibrations dynamiques. Dans ce cas, la dissipation d'énergie est obtenue par le transfert d'une partie de l'énergie de vibration de la structure vers ces amortisseurs [1,6,26], d'où l'appellation d'absorbeurs de vibrations.

L'amortisseur à masse accordée, AMA (Tuned Mass Damper, TMD) dans sa forme la plus simple consiste en une masse reliée à un amortisseur et une rigidité, ce système est ancré ou attaché à la structure principale [1,26], généralement au dernier niveau de la structure pour contrebalancer son mouvement et réduire les amplitudes [1]. La fréquence de l'amortisseur est généralement ajustée à la fréquence fondamentale de la structure [1,26].

L'amortisseur à liquide accordé (Tuned Liquid Damper, TLD) est considéré comme une alternative très efficace pour le système TMD pour le contrôle des vibrations des structures [27]. Par ailleurs, le principe de base pour absorber l'énergie de vibration pour cet amortisseur est aussi le même que pour l'amortisseur TMD mais, dans ce cas l'eau ou un autre liquide sert de masse en mouvement [1,26,27]. Toutefois, la différence est dans les caractéristiques du système auxiliaire de TLD, la masse, l'amortissement et la rigidité sont générés par le liquide lui-même [1,27].

En fonction de leur mécanisme de dissipation d'énergie, ces amortisseurs peuvent être classés en deux types. Un réservoir à ballotement (liquid sloshing damper) [1,27] avec des grillages pour l'amortissement, et sa fréquence naturelle est ajustée en fonction des dimensions du réservoir ou de la hauteur du liquide. Un réservoir en colonnes sous forme de U avec un orifice pour l'écoulement du liquide (liquid column damper) [1,27], sa fréquence naturelle est ajustée en fonction de la forme des colonnes et la pression de l'air [1]. Les deux types de TLD sont schématisés sur la figure 1.6. Pour ces deux amortisseurs, le liquide se met en mouvement dès qu'il y a vibration de la structure. La turbulence de l'écoulement et les frottements entre le liquide et les parois transforment l'énergie dynamique du fluide en chaleur, ce qui fait dissiper l'énergie de vibration de la structure [1,28].

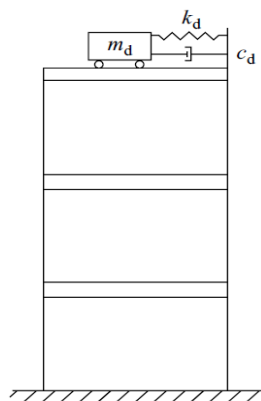


Figure 1.5. Structure avec un mortisseur à masse accordée

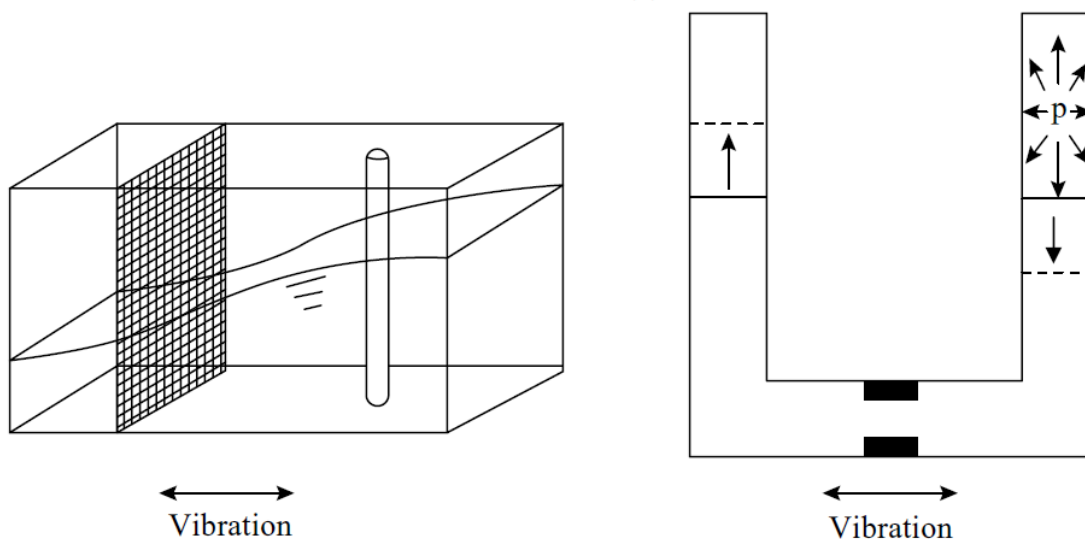


Figure 1.6. Amortisseurs à liquide accordé [1]

5.2.2. Amortisseurs métalliques

Pour la dissipation de l'énergie des vibrations dans les structures, l'un des plus efficaces mécanismes utilisés est le phénomène de déformation inélastique des métaux [1,19, 25, 28,29,30]. Dans l'approche traditionnelle des structures métalliques, la dissipation d'énergie sismique dépend de la déformation post-élastique des éléments structuraux (postyield ductility) [1,19]. Ce concept a conduit à l'idée d'installer des éléments métalliques séparés de la structure principale pour absorber l'énergie sismique [1, 30,31]. En effet, le travail de conception et d'expérimentation a alors commencé dans les années 70 avec les travaux de Kelly et Skinner [1, 19,31] et depuis, les développements analytiques et pratiques des amortisseurs métalliques n'ont pas arrêté de progresser [1].

Les amortisseurs métalliques (metallic yielding dampers) sont des pièces réalisées en matériaux très ductiles tels que l'acier, le plomb et les alliages malléables [19,31]. Ce sont des amortisseurs hystérétiques [1, 19,31], la dissipation d'énergie est obtenue à travers les déformations plastiques auxquelles ils sont soumis lors des déplacements de la structure. Parmi les amortisseurs métalliques qui ont été proposés, on peut citer les amortisseurs avec amortissement et rigidité supplémentaires ADAS (Added Damping and Stiffness) [1,30,31]. Ils sont formés de plaques d'acier en forme de X ou de forme triangulaires comme le montre la figure 1.7.

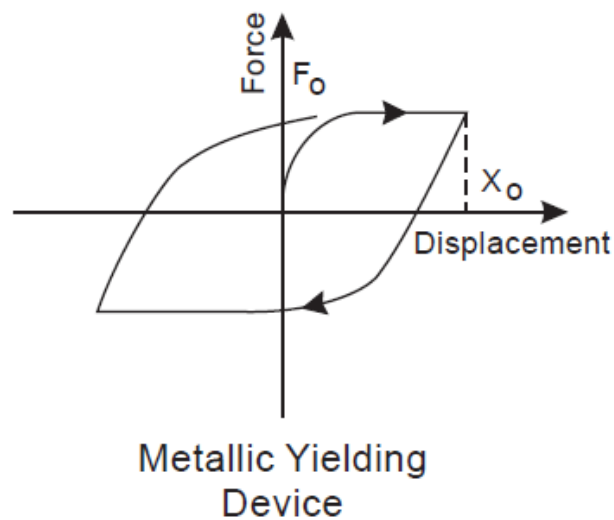
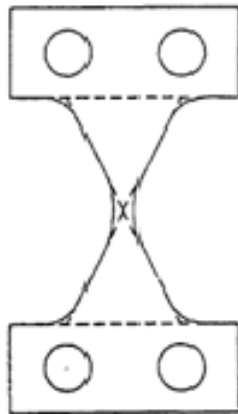
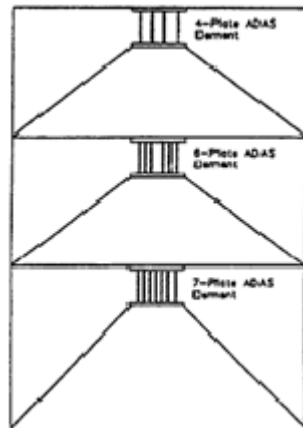
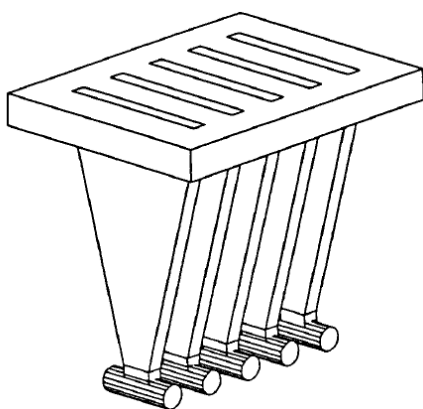
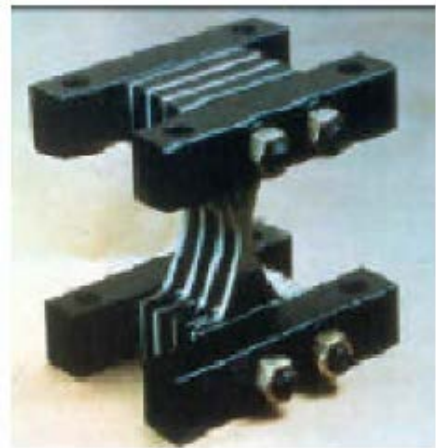


Figure 1.7. Courbe force-déplacement d'un amortisseur métallique [19]



(a)



(b)

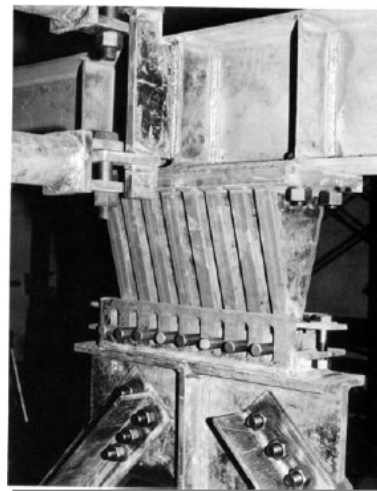


Figure 1.8. Amortisseur métallique : a) plaque en X, b) plaque triangulaire [32]

5.2.3. Amortisseurs à frottement

Un autre moyen efficace et largement appliqué pour dissiper l'énergie cinétique par sa transformation en chaleur est le phénomène de frottement [1]. Ce mécanisme est utilisé pour développer des amortisseurs à frottement. La dissipation d'énergie est obtenue par glissement à frottement de deux corps solides l'un par rapport à l'autre [1,6,19].

La plupart des systèmes à frottement génèrent des boucles d'hystérésis rectangulaires comme le montre la figure 1.9.

En général leur comportement n'est pas influencé par la fréquence du chargement ni le nombre de cycles de chargement ni la variation de température. En outre, ils présentent un bon comportement et une bonne résistance à la fatigue [25, 33].

Les différents systèmes se distinguent les uns des autres par leur complexité mécanique et par les matériaux utilisés pour les surfaces de glissement [25].

Un exemple d'amortisseur à frottement proposé par Pall et March [19,25] est schématisé sur la figure 1.10a. C'est un dispositif qui peut être placé à l'intersection des palées de stabilité dans les portiques (figure 1.10b).

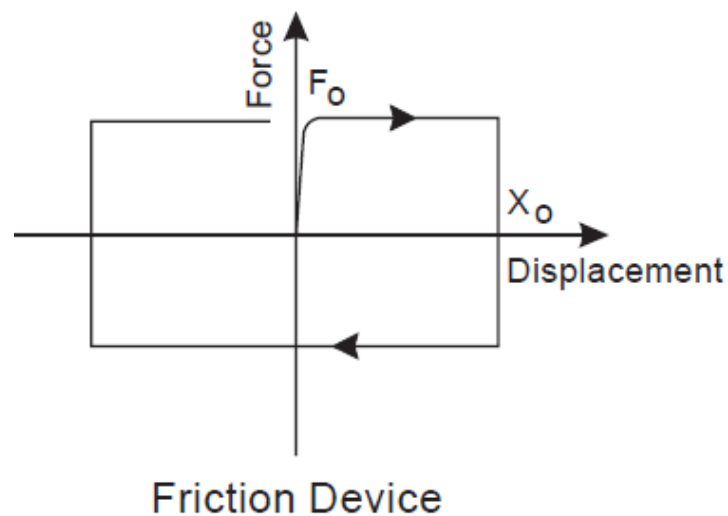


Figure 1.9. Courbe force-déplacement d'un amortisseur à frottement [19]

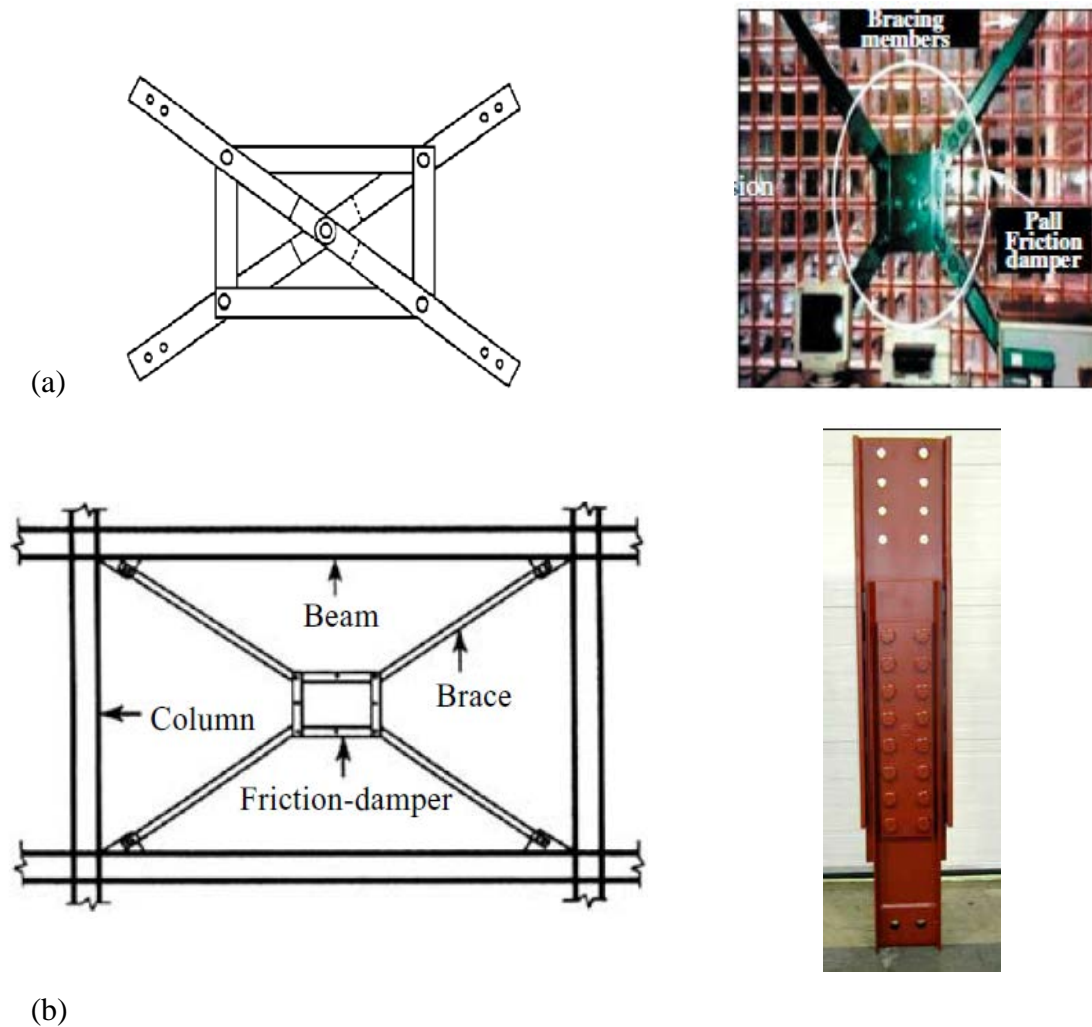


Figure 1.10. Amortisseur à frottement : (a) système pall, (b) installation de l'amortisseur [1,6]

5.2.4. Amortisseurs viscoélastiques

L'ensemble des systèmes viscoélastiques de dissipation d'énergie, comprend des systèmes avec des matériaux solides viscoélastiques, des systèmes basés sur le principe de fluide traversant un orifice (fluid orificing), et des systèmes basés sur la déformation des fluides viscoélastiques [19]. Un système visqueux pur est un cas spécial des systèmes viscoélastiques sans rigidité et des propriétés indépendantes de la fréquence [19].

En effet, les amortisseurs viscoélastiques sont des systèmes avec des matériaux viscoélastiques. Un matériau viscoélastique se comporte à la fois comme un solide purement élastique et comme un fluide purement visqueux [34]. La dissipation d'énergie se fait à travers des déformations de cisaillement [1].

La figure 1.11 montre la courbe force-déplacement des systèmes viscoélastiques dont la rigidité et l'amortissement dépendent de la fréquence [19].

Un amortisseur viscoélastique typique, consiste en des couches viscoélastiques collées à des plaques en acier [1,6], comme le montre la figure 1.12. Quand une extrémité de l'amortisseur (steel flange) se déplace par rapport à l'autre (center plate), les couches viscoélastiques se déforment en cisaillement et l'énergie de vibration est dissipée. Mais, à la différence des amortisseurs hystérétiques qui manifestent des non linéarités de comportement, un amortisseur viscoélastique offre généralement l'avantage de se comporter linéairement [1,19,28].

A la différence aussi des amortisseurs hystérétiques, les amortisseurs viscoélastiques sont influencés par la fréquence et la variation de température [1, 19,28, 35].

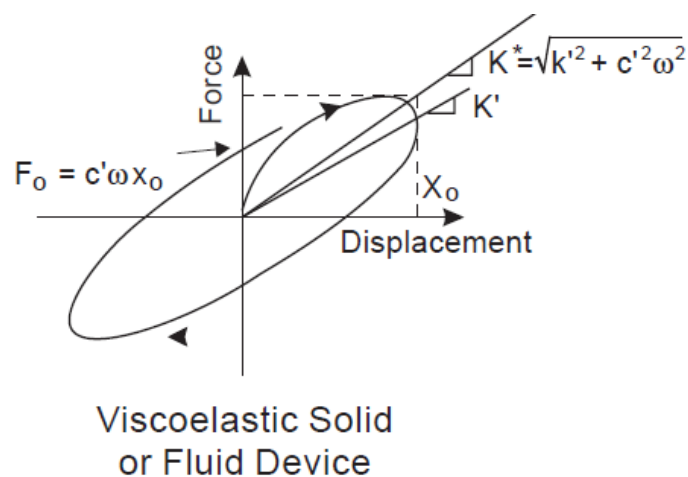


Figure 1.11. Courbe force-déplacement d'un amortisseur viscoélastique [19]

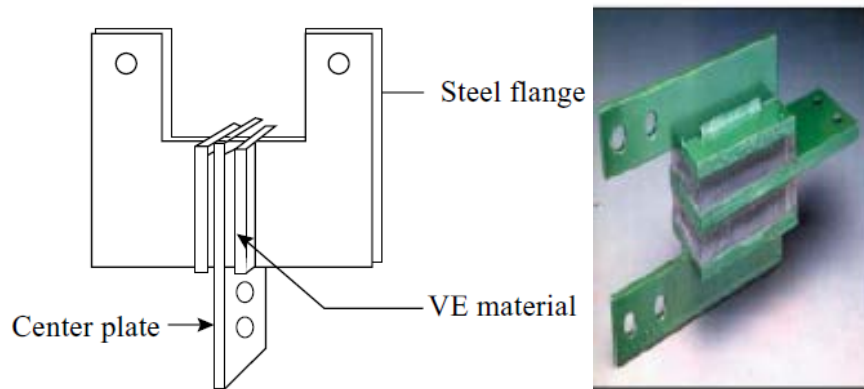


Figure 1.12. Amortisseur viscoélastique [1,6]

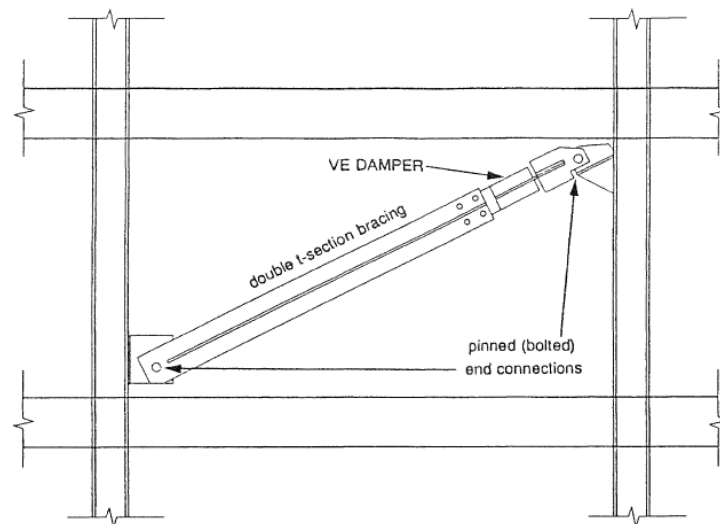


Figure 1.13. Installation de l'amortisseur viscoélastique [36]

5.2.5. Amortisseurs à fluide visqueux

Tous les amortisseurs passifs cités auparavant utilisent des matériaux solides pour améliorer la performance des structures sujettes aux charges latérales [1,6]. Cependant, les fluides peuvent aussi être utilisés pour améliorer le comportement des structures [6,19]. L'utilisation des fluides visqueux pour amortir les chocs et les vibrations est familière aux domaines militaires et de l'industrie lourde [1]. Beaucoup d'effort ont été déployés pour développer des amortisseurs à fluide visqueux pour l'ingénierie des structures [6,19] et la figure 1.14 montre plusieurs exemples : amortisseur cylindrique à fluide visqueux, paroi amortissante à fluide visqueux et amortisseur à fluide visqueux

avec des orifices. Tous ces amortisseurs dissipent de l'énergie à travers la déformation du fluide visqueux [19].

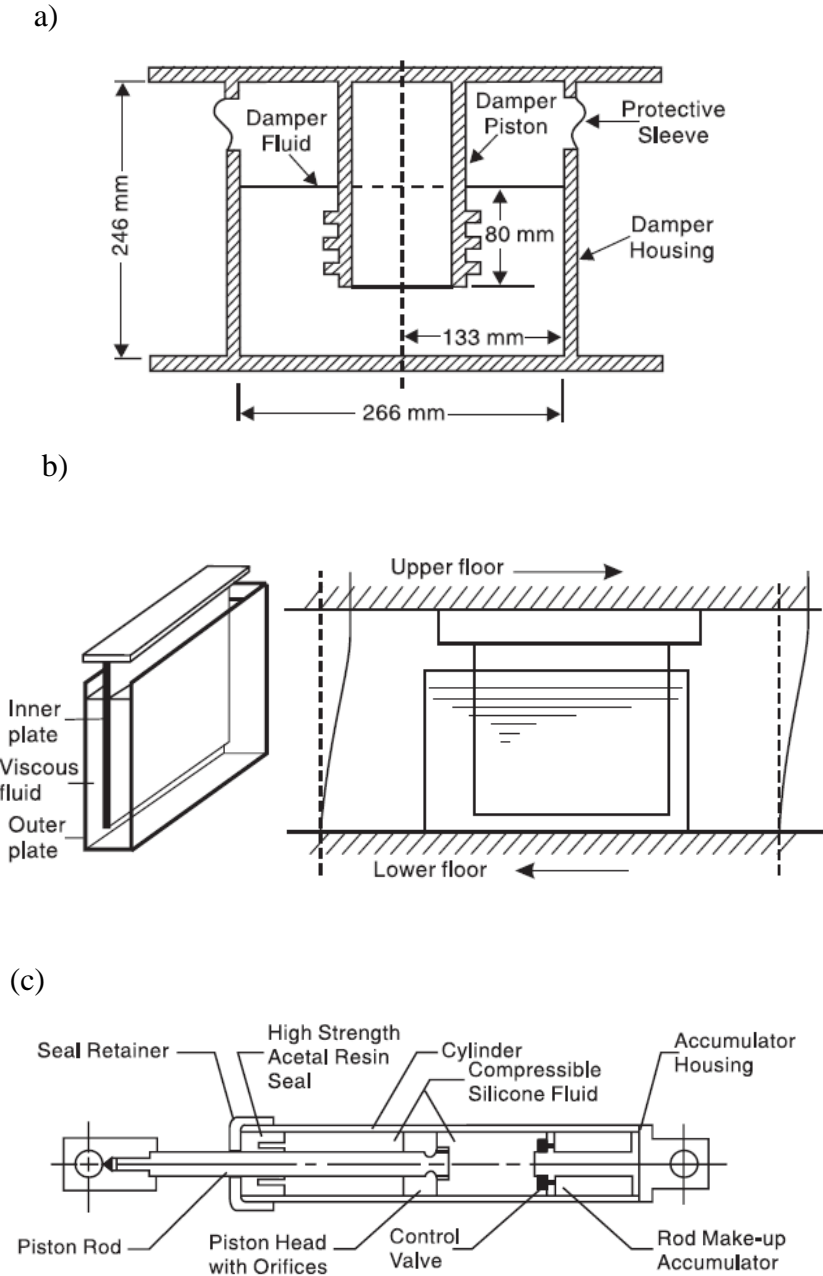


Figure 1.14. Amortisseurs à fluide visqueux

- a) Amortisseur cylindrique à fluide visqueux [1,19] b) paroi amortissante à fluide visqueux (viscous damping wall) [1,19]
c) Amortisseur à fluide visqueux avec des orifices (orificed fluid damper) [19]

5.2.6. Les amortisseurs à transformation de phase

Une nouvelle classe de matériaux, se référant aux alliages à mémoire de forme, est aussi utilisée dans les amortisseurs passifs [37,38]. L'appellation alliages à mémoire de forme (AMF) correspond à l'un des aspects du comportement complexe que présentent ces alliages [39]. Lorsqu'un alliage ordinaire subit une sollicitation supérieure à sa limite élastique, il se déforme et la déformation persiste après suppression de la charge. A la différence, un alliage à mémoire de forme peut subir une déformation plastique et récupérer intégralement sa forme initiale [37,38]. En effet les alliages à mémoire de forme sont caractérisés par deux propriétés très importantes, un effet de mémoire de forme qui est la faculté de retrouver leur forme prédéterminée par un simple chauffage [37,38,39] et la super-élasticité (superelasticity) qui est la faculté de subir des déformations plastiques et de retrouver leur forme juste avec le déchargement [37,38].

Le principe physique de base est une transformation réversible en fonction de la température, il s'agit en fait d'une modification de la structure cristalline. Ces alliages sont le plus souvent à base de nickel-titane (NiTi) avec différents éléments d'addition comme le cuivre, le fer ou l'aluminium [37,39].

6. Systèmes de contrôle actif

A la différence d'un système de contrôle passif, qui est conçu pour réduire un mode particulier de vibration, un système de contrôle actif est efficace sur une large bande de fréquences [1,40]. D'où, les systèmes du contrôle actif sont une évolution de la technologie des systèmes passifs. Ils utilisent la réponse de la structure pour déterminer la force de contrôle appropriée et modifier ainsi les caractéristiques de la structure en temps réel. Ces systèmes peuvent avoir de meilleures performances mais, ils peuvent aussi être limités par la quantité et la disponibilité de l'énergie externe nécessaire pour le développement de la force de contrôle requise [41].

Grace aux efforts de recherche dans ce domaine, de nombreux systèmes de contrôle actif ont été développés tels que l'amortisseur à masse active, système de câbles actifs, système de palées de stabilité actives (active brace system) et le système générateur d'impulsions.

6.1. Amortisseur à masse active (active mass damper)

L'amortisseur à masse active est aussi appelé actionneur à masse active (active mass driver). Il a été développé à partir de l'amortisseur à masse ajustée (TMD) avec l'introduction d'un mécanisme de contrôle actif [1]. A travers son développement, c'est le contrôle de la réponse des structures sur une large bande de fréquence qui était

recherché car l'amortisseur à masse ajustée (TMD) est seulement efficace sur les structures dont le premier mode est dominant. Une comparaison schématique entre AMD et TMD est présentée sur la figure 1.15. Pour l'amortisseur à masse active, un actionneur est placé entre le système primaire qui est la structure et le système auxiliaire qui est TMD. L'actionneur agit sur le mouvement de TMD pour améliorer l'efficacité du contrôle. Cet amortisseur à masse active a été introduit au début des années 80 [1].

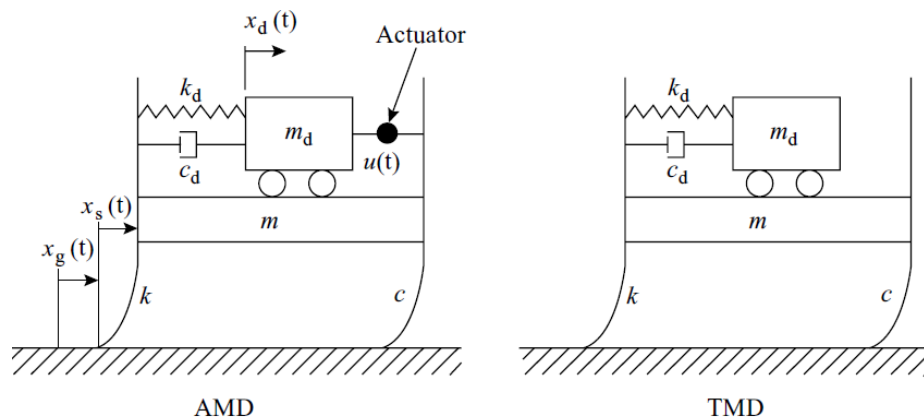


Figure 1.15 Modèles comparatifs des structures avec AMD et TMD [1]

6.2. Systèmes de câbles actifs (Active tendon system)

Un système de câbles actifs consiste en un ensemble de câbles précontraints dont la traction des câbles est contrôlée par des servomécanismes électrohydrauliques [1]. Une configuration typique d'un système de contrôle actif utilisant ces câbles est présentée sur la figure 1.16. Les câbles sont installés entre deux niveaux du bâtiment et l'actionneur cylindrique est attaché au niveau inférieur. Les extrémités du câble sont reliées l'une à l'étage supérieur et l'autre au piston de l'actionneur. Sous l'action sismique, les vibrations de la structure entraînent des déplacements inter étages qui transmettent le mouvement relatif du piston jusqu'au cylindre de l'actionneur. Ce mouvement relatif modifie la tension des câbles précontraints appliquant ainsi, une force de contrôle sur la structure pour réduire sa réponse [1].

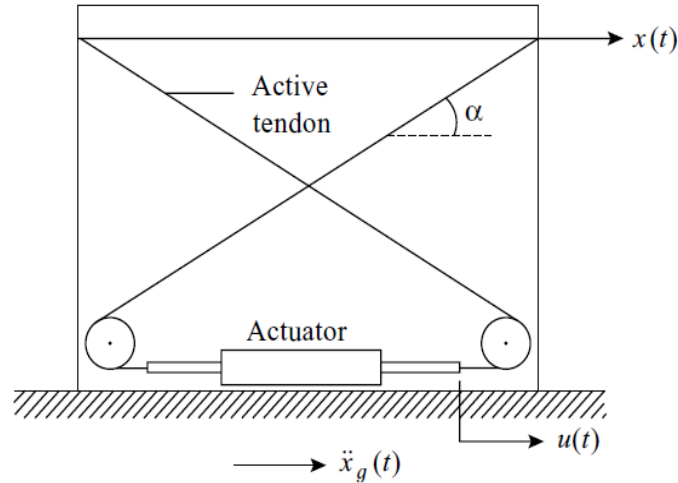


Figure 1.16. Système de câbles actifs [1]

6.3. Systèmes de palées actives (Active brace systems)

Pour ce type de système, des palées de stabilité déjà existantes sont utilisées pour installer le dispositif du contrôle actif dans la structure. Trois types de palées de stabilité peuvent être utilisés, diagonale, palée en X et en K. Ce type de système nécessite de grandes forces de contrôle à appliquer sur la structure à travers les palées de stabilité [4]. Pour générer les forces nécessaires, des actionneurs hydrauliques commandés par servovalve, sont montés sur le système de palées entre deux niveaux du bâtiment [1,4]. Un exemple de système de palée de stabilité active en forme de K avec un actionneur hydraulique est montré sur la figure 1.17 [1]. L'actionneur est fixé sur le plancher et le piston est relié au système de palées.

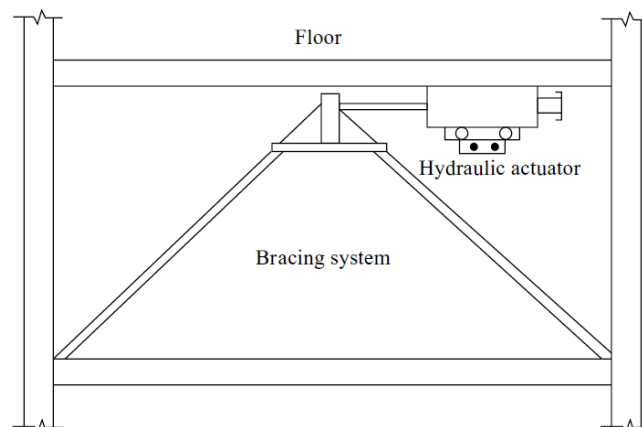


Figure 1.17. Système de palées de stabilité actives [1]

6.4. Systèmes générateurs d'impulsions (Pulse generation systems)

Pour développer la force de contrôle, ces systèmes utilisent un générateur d'impulsions au lieu d'un actionneur hydraulique. Le mécanisme est pneumatique [1,4]. A la différence d'un actionneur hydraulique qui utilise la grande pression des fluides pour produire la force de contrôle, le mécanisme pneumatique utilise de l'air comprimé pour générer des impulsions pour la force de l'actionneur [1,4].

Les générateurs d'impulsions peuvent être installés dans plusieurs endroits dans la structure. Dès qu'une vitesse relative est détectée à l'un de ces endroits, l'actionneur pneumatique se déclenche et la force de contrôle est appliquée à la structure [1,4].

7. Systèmes de contrôle semi-actif

Les systèmes de contrôle semi actif sont une évolution des systèmes de dissipation passive d'énergie. Ils sont généralement, appelés des amortisseurs contrôlables ou amortisseurs intelligents [1]. Les systèmes semi actifs, comme les systèmes actifs, comportent des capteurs, un calculateur en temps réel et des actionneurs mais, un dispositif d'amortissement passif fait aussi partie d'un système semi-actif [1]. Les capteurs mesurent l'excitation et/ou la réponse de la structure. L'ordinateur (calculateur en temps réel) traite les informations mesurées et génère le signal de contrôle qu'il transmet à l'actionneur. L'actionneur agit pour réguler le comportement de l'amortisseur passif. Il faut noter tout de même que dans ce cas, l'actionneur est utilisé pour contrôler le comportement et les propriétés de l'amortisseur passif au lieu d'appliquer la force directement sur la structure [1,6]. D'où, la nécessité de petites sources d'énergie comme des batteries par exemple [1]. Cependant, si la source d'énergie est coupée, le système se comporte comme un amortisseur passif [42]. Quelques systèmes de contrôle semi actif sont décrits dans ce qui suit.

7.1. Amortisseurs à masse accordée semi actifs (semi active tuned mass dampers)

L'amortisseur à masse accordée semi actif a été proposé en 1983 par Hrovat et al [1,43] pour le contrôle des vibrations des bâtiments à grande hauteur dues au vent. Ce système consiste en un amortisseur à masse accordée (TMD) et un actionneur installés au sommet de la structure principale. Comme le montre la figure 1.18, les caractéristiques de TMD sont sa masse m_d , son amortissement c_d et sa rigidité k_d pendant que la structure principale est représentée par ses caractéristiques m , c et k . SA désigne l'actionneur qui génère la force de contrôle u . La force de contrôle modifie constamment l'amortissement de TMD pour un quelconque changement de l'excitation. La masse de TMD, m_d est beaucoup plus

petite que la masse de la structure m , et la force de contrôle est utilisée pour modifier la force d'amortissement de TMD, d'où une petite quantité d'énergie externe est requise pour cet ajustement [1].

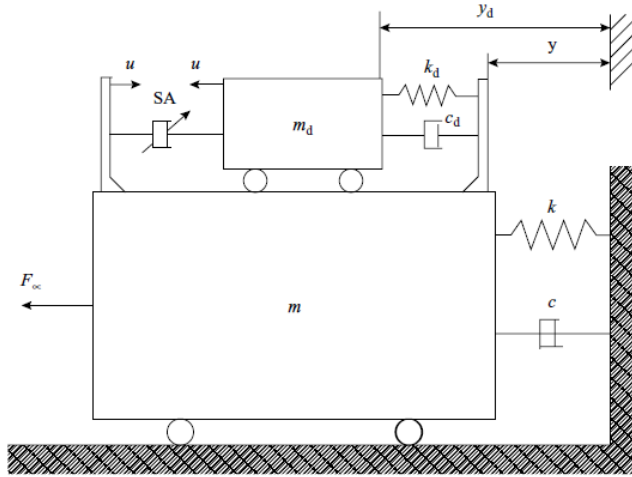


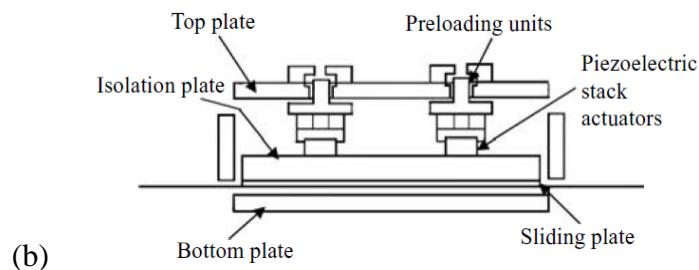
Figure 1.18. Amortisseur à masse accordée semi actif [1]

7.2. Amortisseurs à frottement semi actifs (semi active friction dampers)

Contrairement à un amortisseur à frottement passif pour lequel la charge de glissement est une valeur fixée et prédéfinie, pour un amortisseur semi actif, la charge de glissement peut être ajustée en fonction du mouvement de la structure et la charge appliquée.

D'après Cheng and all [1], le premier amortisseur à frottement semi actif a été développé par Akbay and Aktan en 1991 en utilisant un actionneur électromécanique, et un autre type a été développé par Chen et Chen avec un actionneur piézoélectrique. Dans ce dernier cas, la caractéristique intelligente des matériaux piézoélectriques est utilisée pour améliorer l'efficacité des amortisseurs à frottement passifs, ce qui a donné alors, naissance à un amortisseur à frottement piézoélectrique [1]. Ce type d'amortisseur est présenté sur la figure 1.19.

(a)



(b)

Figure 1.19. Amortisseur à frottement piézoélectrique [1]

(a) vue, (b) coupe

7.3. Absorbeurs de vibrations semi actifs (Semi active vibration absorbers)

L'une des méthodes efficaces pour obtenir un dispositif à amortissement contrôlable est l'utilisation d'une valve à orifice variable (variable orifice valve) pour réguler l'écoulement dans un amortisseur hydraulique. Ce concept a permis l'émergence des absorbeurs de vibrations semi actifs (semi active vibration absorbers), appelés aussi amortisseurs hydrauliques semi actifs (semi active hydraulic dampers, SAHD) [51]. Comme le montre la figure 1.20, de tels dispositifs permettent l'ajustement des caractéristiques de la structure, l'amortissement et la rigidité. La capacité d'amortissement est générée par le fluide visqueux, et la rigidité est ajustée par l'ouverture de la valve d'écoulement. Si la valve est fermée, l'amortisseur se comporte comme un ressort à rigidité et si la valve est ouverte, le fluide peut facilement s'écouler à travers le tube et apporte ainsi une petite rigidité à la structure [1].

Un nouveau dispositif, appelé amortisseur hydraulique semi actif avec accumulateur (Accumulated Semi active Hydraulic Damper, ASHD), est présenté sur la figure 1.21 [6]. Il consiste en un vérin hydraulique, une valve directionnelle et un accumulateur. Le taux

optimal de dissipation d'énergie est obtenu par la régulation de l'écoulement de l'huile dans le vérin hydraulique en utilisant un algorithme de contrôle [6].

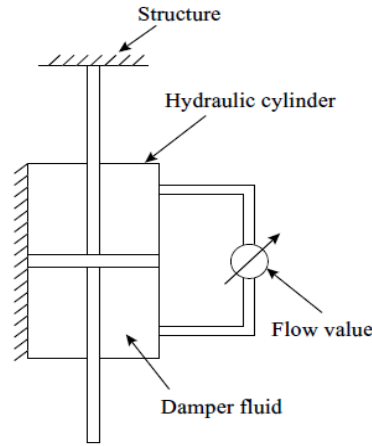


Figure 1.20 Schéma d'un absorbeur de vibrations semi actif [1]

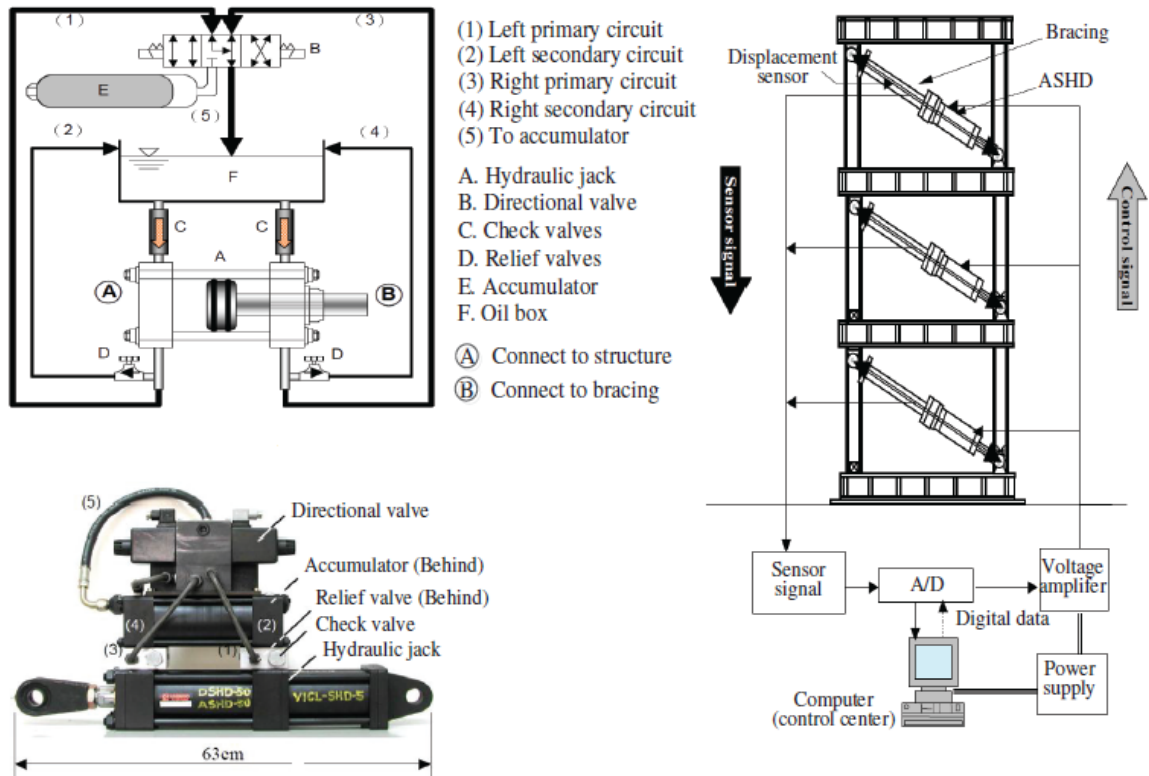


Figure 1.21 Amortisseur hydraulique semi actif avec accumulateur
 (a) Coupe, (b) vue, (c) l'installation du système [6]

7.4. Dispositifs de contrôle de rigidité semi actifs (Semi active stiffness control devices)

Un système à rigidité variable semi actif (semi active variable stiffness system, SAVS), aussi appelé dispositif à rigidité variable (a variable stiffness device) a été étudié et réalisé, d'après Cheng [1], au Japon par Kobori. Comme le montre la figure 1.22, le dispositif est monté sur un système de diagonales, il consiste en un cylindre hydraulique, une tige de piston, une valve de contrôle et un tube qui relie les deux chambres du cylindre [1,6]. La valve peut être ouverte ou fermée. Quand la valve est ouverte, l'écoulement du fluide se fait librement et la liaison de la poutre avec la diagonale est déverrouillée, d'où la rigidité diminue. Quand la valve est fermée, l'écoulement du fluide est empêché et le verrouillage de la liaison de la poutre avec la diagonale s'effectue, d'où l'augmentation de la rigidité. Avec ce mécanisme, le dispositif ajuste la rigidité des diagonales (des palées de stabilité) et empêche la résonance de la structure durant un événement sismique [1].

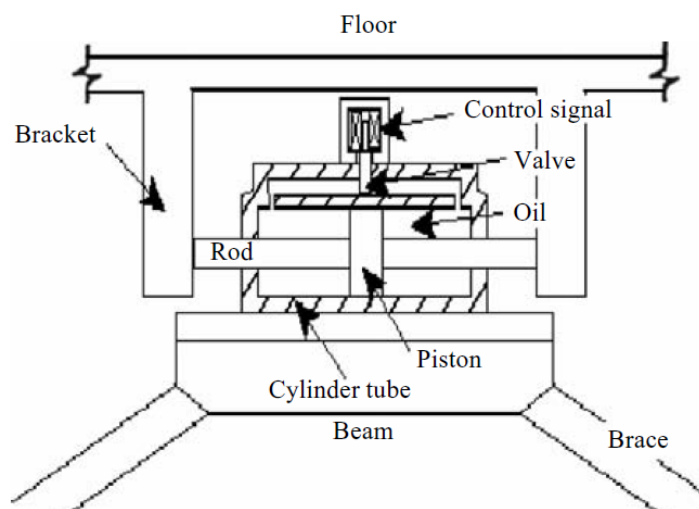


Figure 1.22 Dispositif à rigidité variable semi actif [1]

7.5. Amortisseurs Electrorhéologiques (Electrorheological Dampers, ER Dampers)

Ce type d'amortisseurs utilise les fluides électrorhéologiques (ER) qui contiennent des particules diélectriques en suspension dans un fluide isolant visqueux [1]. Lorsqu'un champ électrique est appliqué au fluide, les particules se polarisent et s'alignent en fibres le long des lignes du champ, d'où le fluide piégé entre les fibres ne peut s'écouler et revêt un comportement d'un corps solide [44]. Ce phénomène permet le changement spectaculaire et réversible de la résistance à l'écoulement du fluide. En effet, les fluides

ER ont la propriété remarquable de pouvoir se solidifier en présence d'un champ électrique, avec un temps de réponse en quelques millisecondes, puis de reprendre leur propriété initiale dès que le champ électrique est supprimé [44]. Par conséquent, la modulation du champ électrique permet le contrôle du comportement des fluides ER. Donc, cette propriété intelligente des fluides ER est utilisée dans les amortisseurs ER qui ont été proposés pour contrôler la force d'amortissement générée.

La force d'amortissement est ajustée par la variation du champ électrique appliqué selon un algorithme de contrôle prédéfini [1]. Un exemple d'amortisseur électrorhéologique est présenté sur la figure 1.23b.

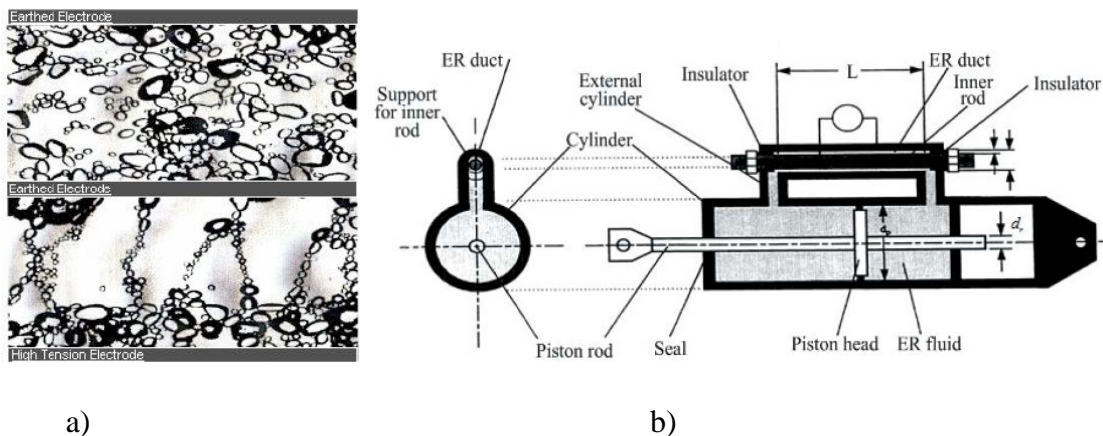


Figure 1.23 a) fluide électrorhéologique, b) coupe schématique d'un amortisseur électrorhéologique [6]

7.5. Amortisseurs Magnétorhéologiques (Magnetorheological Dampers)

Les fluides utilisés pour ce type d'amortisseurs sont magnétorhéologiques. Les fluides magnétorhéologiques (MR) sont des suspensions de particules ferromagnétiques de taille micrométrique (1 à $10\mu m$) dans un liquide non magnétique [45]. Comme dans le cas du fluide ER, lorsqu'on applique un champ magnétique à un fluide MR, les particules ferreuses s'aimantent et s'alignent en fibres le long des lignes du champ et augmentent ainsi la viscosité du fluide, ce qui donne une résistance à l'écoulement et le fluide revêt alors, un comportement viscoélastique [1]. Ainsi et compte tenu de leur comportement, les fluides MR comme les fluides ER, ils ont la propriété de se solidifier en présence d'un champ magnétique en quelques millisecondes, puis de reprendre leur propriété initiale dès que le champ magnétique est supprimé. La force de contrôle générée par l'amortisseur

MR peut être ajustée en fonction de la variation du champ magnétique selon un algorithme prédéfini [1,6]. En comparaison avec les fluides électrorhéologiques, les fluides magnétorhéologiques offrent l'avantage d'avoir la contrainte d'écoulement plus élevée qui peut atteindre 50 à 100 KPa et un comportement stable pour une large bande de températures [1].

Un exemple schématique d'un amortisseur magnétorhéologique est montré sur la figure 1.24 b.

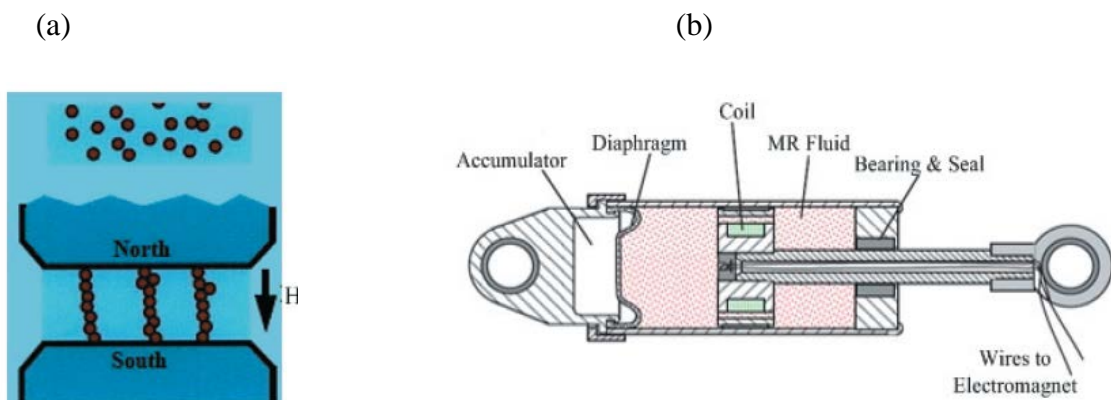


Figure 1.24 a) fluide magnétorhéologique, b) coupe schématique d'un amortisseur magnétorhéologique [6]

8. Systèmes de contrôle hybride

Les systèmes de contrôle hybride ont été développés dans le but de pallier aux inconvénients des systèmes actifs et pousser les limites des systèmes passifs et semi actifs. En effet, le contrôle hybride consiste à combiner les techniques du contrôle passif et actif. Toutefois, les trois types de contrôle, passif, actif et semi actif, peuvent aussi être utilisés en combinaisons parallèles ou en série pour obtenir les avantages de chaque type de contrôle et minimiser l'impact de leurs inconvénients quand ils sont utilisés individuellement [80]. Les systèmes de contrôle hybride sont considérés comme des solutions attractives depuis 1990 [1]. Trois systèmes hybrides typiques ont été développés : amortisseur à masse hybride (hybrid mass damper), système hybride d'isolation à la base (hybrid base isolation system) et système amortisseur-actionneur (damper-actuator system) [1].

8.1. Amortisseur à masse hybride

L'amortisseur à masse hybride consiste en l'une ou l'autre des combinaisons suivantes : (1) un amortisseur à masse ajustée (TMD) avec un actionneur de contrôle actif, (2) un amortisseur à masse active (AMD) avec un amortisseur à masse ajustée (TMD) comme le montre la figure 1.25 [1]. Le fait de lier l'amortisseur à masse active (AMD) à un amortisseur à masse ajustée (TMD) plutôt qu'à la structure principale, permet de réduire la masse de l'AMD qui sera de 10 à 15% de celle de TMD [1, 6]. La capacité d'un amortisseur HDM dépend principalement du mouvement naturel du TMD. En effet, l'actionneur génère la force de contrôle qui ajuste le TMD et augmente donc l'efficacité et la robustesse du dispositif pour la modification des caractéristiques dynamiques de la structure. En d'autres termes, l'amortisseur TMD est réglé au mode fondamental de la structure, et l'amortisseur actif AMD est conçu pour améliorer l'efficacité du contrôle pour les modes supérieurs de la structure [1]. Donc, pour les mêmes performances, l'énergie et les forces nécessaires pour le fonctionnement d'un amortisseur HMD sont de loin inférieures à celles requises pour un système AMD [1].

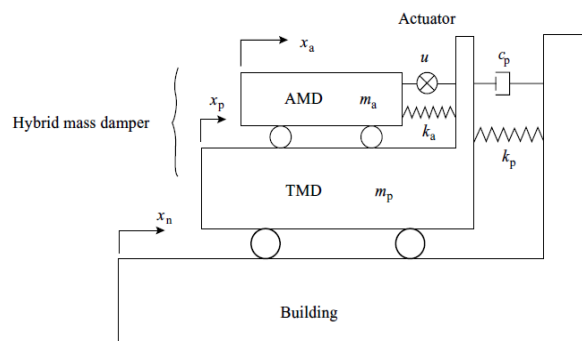


Figure 1.25 Amortisseur à masse hybride [1]

8.2. Système hybride d'isolation à la base

Un autre dispositif hybride combinant un système d'isolation à la base avec un système de contrôle actif a été proposé. Il consiste en un système de câbles actifs au niveau de la superstructure et un système d'isolation à la base entre les fondations et la superstructure [1]. Un deuxième type de système hybride d'isolation à la base a été proposé, il s'agit d'un système avec un amortisseur magnétorhéologique (MR damper) au niveau de la superstructure et il est aussi appelé système intelligent d'isolation à la base [1].

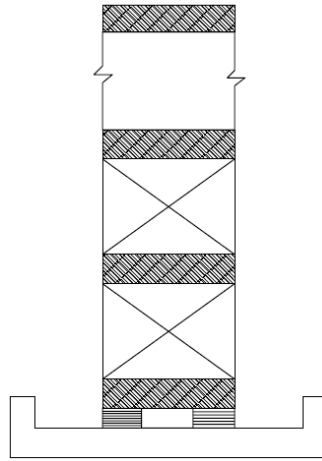
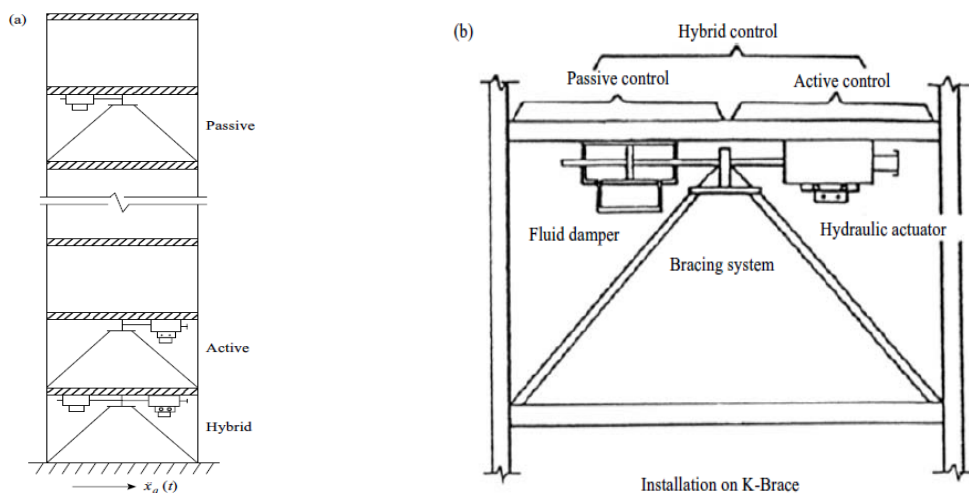


Figure 1.26 Système hybride avec l'isolation à la base et des actionneurs [1]

8.3. Systèmes hybrides amortisseur-actionneur pour des palées de stabilité

Ce type de systèmes intégrés dans des structures utilisant des palées de stabilité en K, est introduit au début des années 1990 [1,6]. Plusieurs dispositifs passifs peuvent être utilisés avec ces systèmes hybrides comme les amortisseurs à liquide accordé, les amortisseurs en ressort et les amortisseurs à fluide visqueux. Pour les dispositifs actifs, les actionneurs hydrauliques sont proposés en raison de leur capacité à générer des grandes forces de contrôle [1,6].



**Figure 1.27 Système de palées hybride et les dispositifs de contrôle
a) Configuration b) installation du dispositif [1]**

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents types de contrôle : le contrôle passif, actif, semi-actif et enfin le contrôle hybride ainsi que les différences de fonctionnement de ces types de contrôle. Par ailleurs, les différents systèmes ou dispositifs utilisés pour chaque type de contrôle sont aussi passés en revue.

Beaucoup de dispositifs sont proposés dans la littérature avec leur développement théorique mais, la contrainte économique reste un obstacle pour l'application pratique de ces dispositifs. En revanche, l'application de ces techniques modernes de contrôle, constitue une alternative à la méthode traditionnelle de protection parasismique.

Ce chapitre a été donc, une introduction pour les différents types de contrôle pour comprendre leur concept et leur fonctionnement.

Chapitre 2

Principe des structures intelligentes et les différents algorithmes de contrôle actif

1. Introduction

Un séisme est un événement violent et imprévisible qui sollicite les structures d'une manière très différente des actions habituelles. Si les structures ne sont pas conçues pour cette éventualité, elles peuvent être endommagées fortement jusqu'à leur effondrement total ou partiel. Il est malheureusement certain que les séismes continueront à nous surprendre. Face à ce risque et à l'impossibilité de le prévoir, la seule prévention est de construire des structures parasismiques. L'approche traditionnelle de la construction parasismique consiste à concevoir des structures avec une résistance suffisante pour reprendre les charges et une capacité à se déformer d'une manière ductile. Toutefois, cette approche a montré des limites surtout face à certains chargements dynamiques. En effet, pour une certaine catégorie de structures, les contraintes de confort, de fiabilité et de sécurité sont de plus en plus grandes. Pour répondre aux exigences de ces structures, de nouveaux concepts ont été développés. Parmi ces concepts, le contrôle passif et actif des structures s'impose de plus en plus comme un moyen efficace de protection des structures de génie civil.

Dans ce chapitre, on présente le principe des structures intelligentes pour le contrôle de la réponse sismique avec un exemple d'application d'une structure comportant un système d'isolation sismique à la base. Les deux approches utilisées pour le contrôle actif à savoir le contrôle par anticipation (feedforward) et le contrôle par rétroaction (feedback) sont aussi abordées et enfin les principaux algorithmes du contrôle actif sont passés en revue.

2. Principe de base des structures intelligentes pour le contrôle de la réponse sismique

2.1. Analyse d'une structure à un seul degré de liberté

Soit une structure à un seul degré de liberté (SDOF) soumise à une accélération du sol $\ddot{x}_g(t)$. L'équation du mouvement peut s'écrire comme suit :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

Où m est la masse, c est l'amortissement, k est la rigidité de la structure et x est le déplacement latéral relatif par rapport au sol. L'équation 1 peut être réécrite comme suit :

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

Où ω est la fréquence naturelle de vibration de la structure, exprimée en radians par seconde et ξ est le coefficient d'amortissement. La réponse de la structure peut être déterminée en utilisant la théorie de la dynamique des structures [46].

$$x(t) = e^{-\xi\omega t} (C_1 \cos \omega_d t + C_2 \sin \omega_d t) - \frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

Avec $\omega_d = \omega\sqrt{1-\xi^2}$ est la pseudo-pulsation ou bien la pulsation propre amortie, et C_1 et C_2 sont des constantes qui dépendent des conditions initiales.

Du moment que le mouvement du sol peut être exprimé par un développement en séries de Fourier [1], la réponse sismique de la structure peut être aussi la somme des réponses à une série d'excitations sinusoïdales. La réponse d'un système à un seul degré de liberté (SDOF) soumis à une force sinusoïdale $p_0 \sin \varpi t$ est donnée par

$$x(t) = e^{-\xi\omega t} (C_1 \cos \omega_d t + C_2 \sin \omega_d t) + \frac{p_0/k \sin(\varpi t - \phi)}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\varpi}{\omega}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{\varpi}{\omega}\right)^2}} \quad (4)$$

$$\text{Avec } \phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{2\xi\omega\varpi}{\omega^2 - \varpi^2} \right)$$

Les équations 3 et 4 montrent que, mathématiquement, trois méthodes peuvent être utilisées pour réduire la réponse sismique d'une structure :

- réduire l'accélération du sol $\ddot{x}_g(t)$,
- augmenter le coefficient d'amortissement ξ ,
- éviter le phénomène de résonance en élargissant la différence entre les deux fréquences ω et ϖ .

Ces concepts mathématiques sont réalisés en utilisant des structures dites intelligentes à travers des systèmes de contrôle des structures [1,47] :

- systèmes d'isolation à la base qui empêchent la transmission de l'énergie du mouvement du sol à la structure ou des systèmes de dissipation d'énergie,
- systèmes de contrôle actif et semi actif qui permettent de modifier les caractéristiques de la structure en temps réel.

Un système de contrôle permet d'apporter un amortissement supplémentaire à la structure et/ou de changer ses propriétés dynamiques. L'amortissement supplémentaire augmente la capacité de la structure à dissiper de l'énergie et la modification de la rigidité permet d'éviter la résonance de la structure [1].

En introduisant un système de contrôle à la structure, l'équation 1 devient :

$$(m + m_c)\ddot{x} + c\dot{x} + kx + F_c = -(m + m_c)\ddot{x}_g(t) \quad (5)$$

Avec m_c est la masse du système de contrôle, qui est généralement négligeable devant la masse de la structure m , F_c est la force de contrôle qui dépend du système de contrôle choisi. Un modèle de contrôle linéaire peut être exprimé comme suit :

$$F_c(t) = c_c\dot{x}(t) + k_c x(t) \quad (6)$$

En introduisant l'expression de la force de contrôle, l'équation 5 peut être réécrite comme suit :

$$(m + m_c)\ddot{x} + (c + c_c)\dot{x} + (k + k_c)x = -(m + m_c)\ddot{x}_g(t) \quad (7)$$

En comparant les équations 1 et 7, il ressort qu'à travers le système de contrôle, on applique une force qui modifie les propriétés de la structure pour répondre favorablement à l'action sismique de conception ou anticiper un autre mouvement de sol. Typiquement, les systèmes de contrôle qu'on ajoute à la structure sont conçus pour augmenter son amortissement c et/ou pour éviter la résonance en modifiant la rigidité k suite à quoi la réponse peut être réduite [1].

Il est important de rappeler que pour la plupart des structures de génie civil, augmenter l'amortissement est beaucoup plus pratique que modifier la masse et la rigidité du système. Ainsi, en général les systèmes de contrôle de la réponse sismique des structures sont principalement conçus pour ajouter de l'amortissement avec une légère modification de la rigidité ou de la masse de la structure [1]. Cela peut être clarifié en examinant les amplitudes des forces élastiques, d'amortissement et d'inertie du système représenté par l'équation 2.

On calcule d'abord les amplitudes de la réponse permanente (déplacement, vitesse et accélération) du système à la résonance en utilisant l'équation 4, on détermine ensuite les amplitudes des forces.

La composante permanente de la réponse du système à un seul degré de liberté représenté par l'équation 2 est donnée par :

$$x(t) = \frac{P_0/k \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (8)$$

Les amplitudes des réponses à la résonance sont données par :

$$x_m = \frac{P_0}{2\xi k} = \frac{P_0}{2\xi m \omega^2}, \quad \dot{x}_m = \frac{P_0}{2\xi m \omega}, \quad \ddot{x}_m = \frac{P_0}{2\xi m} \quad (9)$$

Les amplitudes des forces de rappel, d'amortissement et d'inertie sont données respectivement par :

$$F_R = \frac{P_0}{2\xi}, \quad F_a = P_0, \quad F_I = \frac{P_0}{2\xi} \quad (10)$$

D'après les équations 10, l'amplitude des forces de rappel F_R et d'inertie F_I est beaucoup plus grande que celle de la force d'amortissement F_a . Par exemple pour 1% d'amortissement du système, les forces de rappel et d'inertie sont 50 fois plus grandes que la force d'amortissement.

En général les structures de génie civil possèdent des amortissements faibles. Cependant, si le système de contrôle est conçu pour modifier la rigidité ou la masse de la structure, une grande force de contrôle doit être générée. Mais, si le contrôle est conçu pour apporter de l'amortissement supplémentaire à la structure alors, c'est une force de contrôle beaucoup moins importante qui sera requise [1].

2.2. Exemple d'application d'une structure avec un système d'isolation à la base

Cet exemple consiste en une analyse numérique sur une structure à trois niveaux en béton armé avec et sans système d'isolation à la base. Les réponses en déplacements, accélérations et déplacements inter étage de la structure isolée et celles de la même structure sans le système d'isolation ont été comparées.

Le système d'isolation consiste en des appuis à glissement, (sliding bearings) placés d'une façon concentrique sous chaque poteau [20].

L'enregistrement sismique considéré pour la simulation des deux structures, encadrée et isolée, est la composante NS du séisme d'El Centro avec une accélération maximale du sol de 0.3417g. L'accélérogramme de l'excitation est représenté sur la figure 2.1.

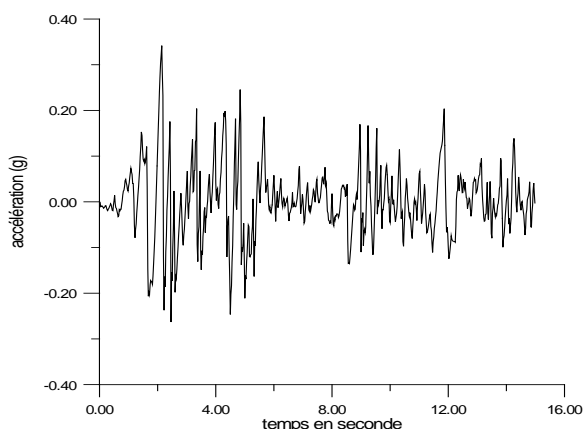


Figure 2.1. Accélérogramme d'El Centro

Résultats et interprétation

Les pulsations et les périodes, obtenues pour les deux types de structure, sont données dans le tableau 2.1. D'après ces résultats, les pulsations correspondant aux modes isolés sont réduites en moyenne de 37%, ce qui montre l'influence du système d'isolation dans l'assouplissement de la structure.

Les réponses maximales en accélération et en déplacement de la structure encastree et de la structure isolée, sont présentées dans le tableau 2.2. La comparaison de ces résultats montre que le système d'isolation a fait diminuer les accélérations et les déplacements des étages de la structure. Cette diminution d'accélération et de déplacement est de l'ordre de 57.02% et de 42.62% respectivement pour le dernier niveau.

Les figures 2.2, 2.3, 2.4 et 2.5 présentent les réponses en accélération et en déplacement respectivement du dernier niveau des structures encastree et isolée. Les superpositions de ces réponses en accélération et en déplacement sont données sur les figures 2.6 et 2.7 respectivement

Les figures 2.8 et 2.9 présentent les spectres de Fourier des accélérations du dernier niveau de la structure encastree et isolée respectivement. D'après ces figures, le système d'isolation a comme effet de réduire et de filtrer les fréquences de la structure vers les basses fréquences.

Tableau 2.1. Périodes et pulsations de la structure avec et sans le système d'isolation

	Structure encastrée		Structure isolée	
	Période	pulsation	Période	pulsation
1	0.201040	31.2534	0.269144	23.3450
2	0.169939	36.9731	0.267683	23.4724
3	0.124448	50.4886	0.205015	30.6474
4	0.065944	95.2809	0.090896	69.1249
5	0.056589	111.031	0.090022	69.7961
6	0.041601	151.033	0.062462	100.592
7	0.041052	153.054	0.058352	107.677
8	0.035767	175.672	0.057300	109.654
9	0.026429	237.742	0.037163	169.071

Tableau 2.2. Accélérations et déplacements maximaux de la structure avec et sans le système d'isolation

Niveau	Structure encastrée		Structure isolée	
	Accélération maximale (m/s^2)	Déplacement maximal (cm)	Accélération maximale (m/s^2)	Déplacement maximal (cm)
3	8.450	0.8017	3.632	0.460
2	5.635	0.6058	2.292	0.300
1	2.986	0.2890	2.3422	0.140
base				3.40

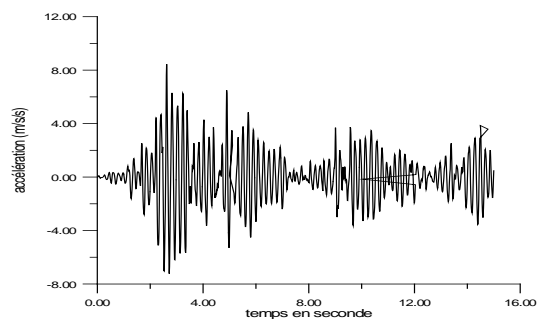


Figure 2.2. Réponse en accélération du dernier niveau de la structure encastrée

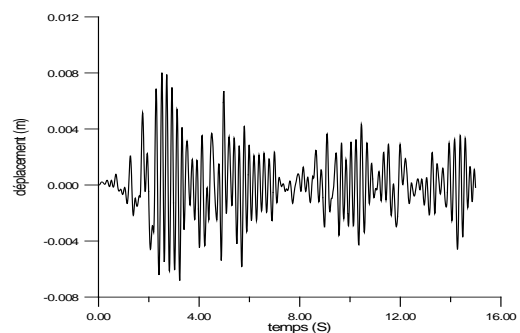


Figure 2.3. Réponse en déplacement du dernier niveau de la structure encastrée

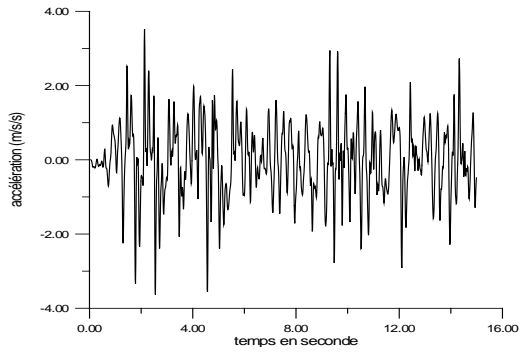


Figure 2.4. Réponse en accélération du dernier niveau de la structure isolée

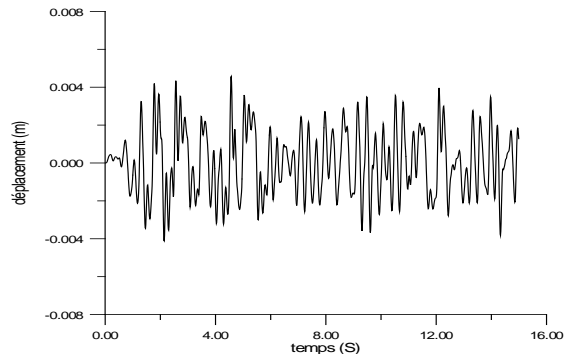


Figure 2.5. Réponse en déplacement du dernier niveau de la structure isolée

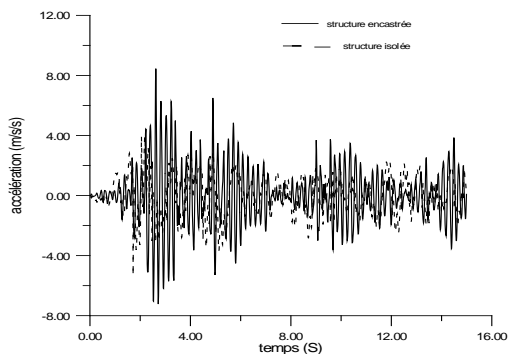


Figure 2.6. Accélérations du dernier niveau de la structure avec et sans le système d'isolation

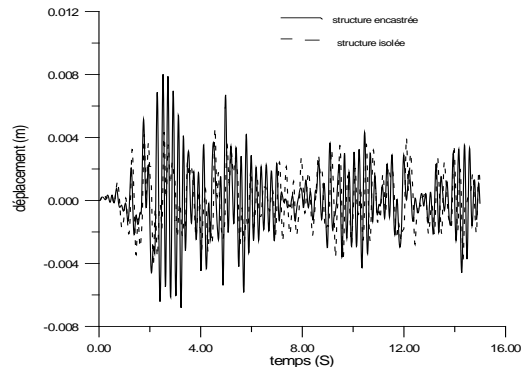


Figure 2.7. Déplacements du dernier niveau de la structure avec et sans le système d'isolation

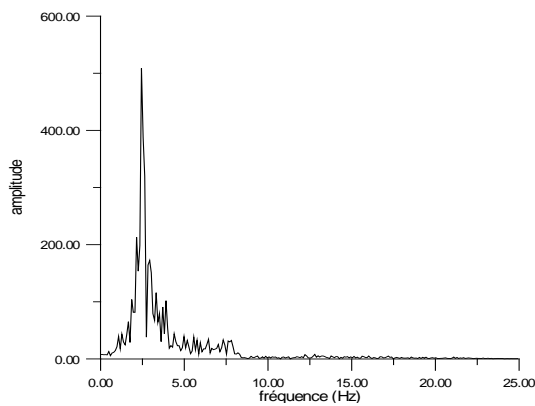


Figure 2.8. Spectre de Fourier des accélérations du dernier niveau de la structure encastrée

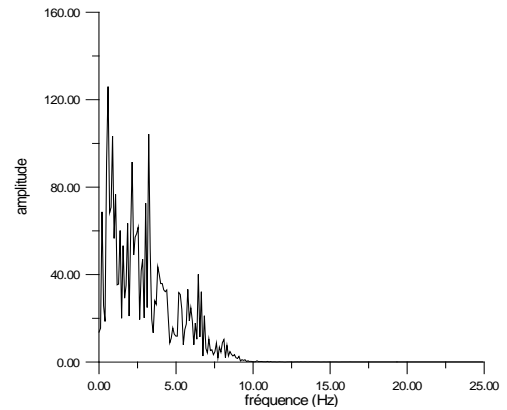


Figure 2.9. Spectre de Fourier des accélérations du dernier niveau de la structure isolée

Les déplacements inter étages pour la structure avec et sans le système d'isolation sont présentés dans le tableau 2.3. La figure 2.10 donne les déplacements inter étage du dernier niveau de la structure isolée en fonction du temps.

Tableau 2.3. Déplacements inter étages de la structure avec et sans le système d'isolation

Niveau	Structure encastree		Structure isolée	
	x (cm)	x/h %	x (cm)	x/h %
3	0.196	0.056	0.16	0.04
2	0.3168	0.09	0.16	0.04
1	0.289	0.082	0.14	0.04

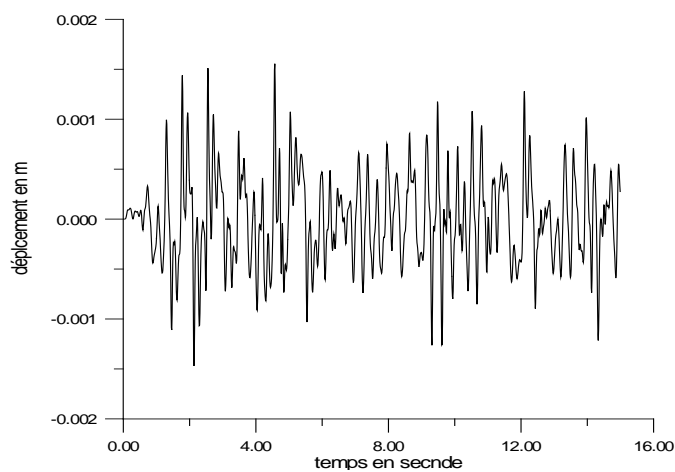


Figure 2.10. Déplacements inter étages du dernier niveau de la structure isolée

2.3. Principe de base d'un système de contrôle actif et ses éléments constitutifs

Le contrôle actif est une branche de l'engineering concernée par la conception des systèmes capables d'agir sur une structure ou un système pour le forcer à se comporter selon des consignes ou des spécifications données [43]. Le rapport entre le système et l'environnement extérieur est décrit en termes de variables d'entrées, qui représentent l'action extérieure sur le système, et des variables de sortie, qui sont les réponses mesurables et représentent le système [43]. Pour bien décrire le rapport entre les variables d'entrée et les variables de sortie, deux approches de contrôle peuvent être utilisées à savoir : le contrôle par anticipation (feedforward control) et le contrôle par réaction (feedback control) [40,48]. Le contrôle par anticipation consiste à identifier la perturbation pour l'annuler en lui superposant une action inverse [40]. Cette approche est

basée donc sur la disponibilité de l'information sur la perturbation appliquée au système. En effet dans le cas de disponibilité de cette information, on place un capteur en amont du système [48]. La deuxième approche qui est le contrôle par rétroaction, consiste à mesurer la réponse de la structure plutôt que l'excitation [40]. Les mesures effectuées sont interprétées par un contrôleur qui génère une force de contrôle qui sera appliquée sur la structure par les actionneurs.

Un système de contrôle actif comporte donc, des capteurs pour la mesure de la réponse de la structure et/ou l'excitation, et un ou plusieurs actionneurs qui génèrent la force à appliquer sur la structure selon une loi de contrôle (contrôleur) pour modifier ses caractéristiques en temps réel. Quand seulement la réponse de la structure est mesurée par les capteurs et, elle est utilisée pour déterminer la force de contrôle nécessaire, le contrôle est dit aussi à boucle fermée (closed-loop control). Dans le cas où c'est l'excitation qui est mesurée et utilisée, le contrôle est dit à boucle ouverte (open-loop control). Cependant, le contrôle est à boucle fermée-ouverte (open-closed loop control) quand la réponse et l'excitation sont utilisées pour le calcul de la force de contrôle [43,49]. Pour voir l'effet de l'application de telles forces de contrôle sur une structure sous un chargement donné, considérons toujours une structure à un seul degré de liberté soumise à un chargement dynamique extérieur et une force de contrôle. L'équation du mouvement de la structure peut s'écrire comme suit :

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) + u(t) \quad (11)$$

Avec $f(t)$ le chargement extérieur et $u(t)$ la force de contrôle.

On suppose que la configuration du contrôle utilisée est à boucle fermée-ouverte dont la force est une fonction linéaire du déplacement, de la vitesse et de l'excitation. Dans ce cas la force de contrôle est donnée sous la forme suivante :

$$u(t) = k_1 x(t) + c_1 \dot{x}(t) + E_1 f(t) \quad (12)$$

k_1, c_1, E_1 sont les gains du contrôle. En introduisant l'équation (12) dans l'équation (11), on aura :

$$m\ddot{x}(t) + (c - c_1)\dot{x}(t) + (k - k_1)x(t) = (1 + E_1)f(t) \quad (13)$$

En comparant les équations (13) et (11) avec et sans la force de contrôle respectivement, on peut constater que l'effet du contrôle à boucle fermée-ouverte est de modifier les paramètres de la structure (la rigidité et l'amortissement) de manière à ce qu'elle réponde

favorablement à l'excitation extérieure. Par contre, l'effet de la composante de la boucle ouverte est la modification de l'excitation, soit la réduire, soit l'éliminer totalement [49].

3. contrôle par rétroaction

La rétroaction ou feedback en anglais, peut être définie comme une action en retour d'un effet sur son origine et former ainsi une boucle fermée, dite boucle de rétroaction. Toutefois, en fonction de l'origine et de la nature de la contre-réaction qui est appliquée, on peut distinguer différentes lois de contrôle. La rétroaction peut être effectuée :

- à partir du vecteur d'état du modèle : dans ce cas, le contrôle est dit par retour d'état (state feedback),
- à partir du vecteur de sortie du système, le contrôle est dit par retour de sortie (output feedback).

En fonction de la nature du retour lui-même, on peut distinguer aussi un retour statique ou un retour dynamique. Dans ce travail il s'agira d'un contrôle en boucle fermée par retour d'état.

Il est toutefois intéressant de s'assurer de la commandabilité ou de la contrôlabilité d'un système avant de chercher à mettre en œuvre une loi de contrôle.

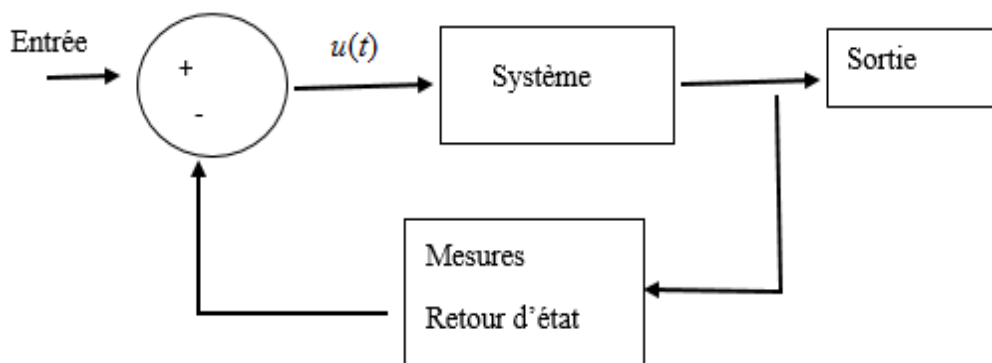


Figure 2.11. Schéma bloc de contrôle par rétroaction

3. 1. Contrôlabilité (commandabilité)

Un système est représenté par son vecteur d'état (x) et sa sortie (y), il est excité par l'entrée (u). Si l'entrée excite toutes les variables d'état, le système est dit contrôlable [50]. Autrement dit, un système est contrôlable si on peut l'amener, en temps fini, d'un état initial vers un état final prescrit [14].

La contrôlabilité mesure la capacité d'une configuration particulière d'actionneurs de contrôler l'état du système complet [40].

3. 2. Observabilité

Dans la théorie du contrôle moderne, un système dynamique à contrôler est donné par une représentation d'état. Cette approche suppose l'état connu. Quand ce n'est pas le cas, on peut essayer de reconstruire l'état à partir des mesures disponibles. On utilise pour cela un système dynamique permettant d'approximer l'état du système à contrôler, c'est ce qu'on appelle observateur d'état. On parle aussi de reconstruteur, d'estimateur, de filtre. Un système est dit observable s'il est possible de déterminer à un instant t donné son état à partir d'une observation de sa sortie [51]. Autrement dit, si toutes les variables d'état sont représentées dans la sortie, le système est dit observable [50].

L'observabilité mesure la capacité d'une configuration particulière de capteurs à fournir toutes les informations nécessaires pour estimer l'état complet du système [40].

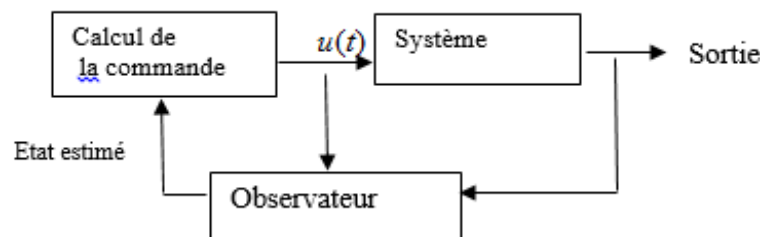


Figure 2.12. Reconstruction de l'état d'un système

4. Algorithmes de contrôle actif des structures

Le contrôle des structures de génie civil constitue toujours un domaine vaste et ouvert, surtout pour la recherche de nouvelles méthodes et de nouveaux algorithmes de contrôle. En effet, différents algorithmes de contrôle ont été développés et appliqués pour les structures de génie civil. Le choix de la loi de contrôle se fait en fonction de nombreux paramètres tels que les informations disponibles et la complexité de la structure à contrôler, les objectifs du contrôle et la possibilité d'obtenir un modèle mathématique de la structure [41]. Chaque loi de contrôle est développée pour un type de structure [41], et l'élément clé pour la réussite de l'application pratique des systèmes de contrôle reste le développement d'un algorithme efficace pour traiter les informations fournies [41,52].

Les algorithmes de contrôle actif les plus utilisés sont les algorithmes du contrôle optimal classique, les algorithmes du contrôle prédictif et les algorithmes du contrôle robuste [41]. Parallèlement à ceux-là, on trouve d'autres algorithmes comme la méthode de placement de pôles, le contrôle modal, fuzzy control, neural network control et genetic control algorithm.

4.1. Contrôle optimal

Une fois le problème de contrôlabilité résolu, on peut de plus vouloir passer de l'état initial à l'état final en minimisant un certain critère ; on parle alors d'un problème de contrôle optimal [14]. Il est considéré que cette théorie a commencé dans les années 50 avec la formulation du principe du maximum de Pontryagin [14].

Les algorithmes du contrôle optimal sont donc basés sur la minimisation d'un critère de performance qui dépend des variables du système et de la force de contrôle [41,53]. Le but est de maintenir le système à l'état désiré avec un effort minimal de contrôle [10]. Parmi les premiers algorithmes proposés pour le contrôle des structures de génie civil, plusieurs étaient basés sur les résultats de cette théorie du contrôle optimal [53]. Cependant, les principaux algorithmes sont : le régulateur linéaire quadratique (LQR), le régulateur linéaire quadratique Gaussien, contrôle optimal coupé (clipped optimal control) et le contrôle bang-bang [41].

4.1.1. Commande linéaire quadratique

La commande linéaire quadratique (LQ), appelée aussi régulateur linéaire quadratique (LQR), est l'un des algorithmes classiques utilisés pour les contrôles actif et semi actif des structures [33,41,52]. Cette technique exige que toutes les variables d'état soient mesurées, et la loi de contrôle s'exprime sous la forme d'un retour d'état :

$$U(t) = -Gx(t)$$

où $x(t)$ est le vecteur d'état et G la matrice de gain du retour d'état. Dans ce cas le système est linéaire et la commande est quadratique.

4.1.2. Commande linéaire quadratique Gaussienne

La commande linéaire quadratique Gaussienne dite LQG est une méthode qui combine le régulateur et l'estimateur (observateur) linéaires quadratiques pour calculer la matrice de gain du retour d'état [41,52]. A l'origine, cette méthode était destinée aux systèmes

perturbés par les bruits Gaussiens [48]. Cet algorithme présente un intérêt pour les systèmes dont l'état n'est pas entièrement mesuré [15]. En effet, il arrive que toutes les variables d'état d'un système ne soient pas accessibles à la mesure, et l'implémentation directe de la commande quadratique est impossible. L'idée dans ce cas est de reconstruire l'état x à partir des informations disponibles [41]. On utilise pour cela un système dynamique, permettant d'approximer x , appelé observateur ou filtre.

4.1.3. Contrôle optimal coupé (clipped optimal control)

L'un des algorithmes les plus efficaces utilisés en contrôle semi actif, est le contrôle optimal coupé (clipped optimal control). Cet algorithme consiste à déterminer une loi de contrôle optimal linéaire $G_c(s)$ qui donne la force de contrôle requise f_c sous forme d'un vecteur $f_c = [f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cn}]$ [41,54]. La détermination de cette force est basée sur la mesure de la réponse de la structure y et la force de contrôle f du dispositif de contrôle.

$$f_c \text{ est donnée comme suit [54] : } f_c = L^{-1} \left\{ -G_c(s) L \begin{Bmatrix} y \\ f \end{Bmatrix} \right\}$$

Avec $L\{\cdot\}$ est la transformée de Laplace.

4.1.4. Commande bang-bang

La commande bang-bang est une commande de contrôle optimal à temps minimal. Le critère de performance est le critère de temps minimum donné sous la forme [41] :

$$J(t_0) = \int_{t_0}^{t_f} 1 dt = t_f - t_0$$

4.2. Contrôle prédictif

Le contrôle prédictif (ou correction anticipatrice) est une technique de contrôle avancée qui a été introduite en 1974 [41]. Le principe de cette méthode est d'utiliser un modèle pour prédire et anticiper le comportement dynamique du système. La commande prédictive peut être utilisée pour des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties. Parmi les approches du contrôle prédictif on trouve le contrôle prédictif adaptatif (adaptive predictive control), le contrôle fonctionnel prédictif (predictive functional control) et le contrôle de matrice dynamique (dynamic matrix control) [41].

4.3. Placement de pôles

La méthode de placement des pôles consiste à imposer les valeurs propres de la matrice d'état du système bouclé. La matrice de gain est déterminée en fonction des pôles du système bouclé choisis à l'avance [33].

4.4. Contrôle modal

Le fait de considérer le comportement dynamique d'un système par ses réponses modales a motivé le développement des méthodes de contrôle actif des vibrations visant à contrôler les modes de la structure d'une façon indépendante, on parle alors de contrôle modal [40,53]. Cette méthode permet d'amortir chaque mode indépendamment des autres (Independent Modal Space Control), ce qui permet de résoudre des équations algébriques non couplées plutôt que l'équation matricielle de Riccati [33,40]. Cette méthode combine la décomposition modale avec une loi de contrôle linéaire quadratique (LQR) [33]. Cette méthode a l'inconvénient de nécessiter autant d'actionneurs que de modes à amortir [40]. Par la suite, il y a eu la méthode de contrôle modal modifiée (Modified Independent Modal Space Control) qui offre la possibilité d'amortir plusieurs modes en utilisant seulement quelques actionneurs [33,40].

4.5. Contrôle robuste

Dans le cas de structures présentant une dispersion de leurs caractéristiques ou soumises à un environnement variable, le contrôle linéaire ne permet pas de garantir les performances et la stabilité du système. Il peut être alors nécessaire d'utiliser un contrôle de type robuste [53]. Une commande est dite robuste si elle peut garantir un certain niveau de performances malgré la présence d'erreur (limitée) de modèle (notion d'incertitude) et des variations dynamiques [41]. Un certain nombre de méthodes du contrôle robuste ont été développées et les plus utilisées pour le contrôle des structures sont : contrôle du mode glissant (sliding mode control), la commande H_∞ et le contrôle basé sur la théorie de stabilité de Lyapunov (control based on Lyapunov stability theory).

4.5.1. Contrôle du mode glissant (Sliding mode control)

Le contrôle du mode glissant est l'un des algorithmes les plus connus du contrôle robuste [26]. Ce type de contrôle se réalise en deux parties : (1) trouver la surface de glissement adéquate (S) où le mouvement de la structure est stable [55,56] et, généralement c'est la

combinaison linéaire des états du système, (2) déterminer la force de contrôle de telle sorte que le signe de la surface (S) soit toujours opposé au signe de sa dérivée [27]. L'idée du contrôle SMC est de ramener la trajectoire de la réponse de la structure à l'intérieur de la surface de glissement [26,55,57].

4.5.2. Contrôle H_∞

La commande H_∞ est l'un des algorithmes linéaires robustes largement utilisés pour réduire les vibrations des structures [26]. Dans cet algorithme, la fonction de transfert entre l'excitation et la sortie contrôlée est minimisée par rapport à la norme ∞ [41,53]. Cette approche basée sur la minimisation de la norme ∞ garantit la robustesse et la stabilité du système [53].

4.5.3. Contrôle basé sur la théorie de Lyapunov

Le contrôle basé sur la théorie de stabilité de Lyapunov consiste à trouver une fonction définie positive, qu'on appelle fonction candidate de Lyapunov [51]. La loi de contrôle est déterminée de façon à garder la dérivée de cette fonction définie négative ou semi définie négative [41]. Selon cette théorie de stabilité de Lyapunov ou ce qu'on appelle la méthode directe de Lyapunov, l'existence d'une telle fonction est suffisant pour garantir la stabilité du système contrôlé [51,53]. Cette théorie est une traduction mathématique du concept d'énergie dans un système [58]. L'énergie est une fonction définie positive, si le système est conservatif l'énergie reste constante, et pour un système dissipatif elle décroît continument. Pour ces deux cas, le système est stable. Toutefois, si l'énergie croît, le système est instable. Ainsi, l'idée de Lyapunov est d'analyser la variation (signe de la dérivée) d'une fonction (l'énergie ou une fonction qui lui est équivalente) pour étudier la stabilité d'un système donné.

Les fonctions définies positives ayant des dérivées définies négatives sont dites des fonctions de Lyapunov strictes (Strict Lyapunov functions) et celles ayant leurs dérivées semi-définies négatives sont dites fonctions de Lyapunov non strictes (Non strict Lyapunov functions) [59].

5. Conclusion

Dans ce chapitre le principe des structures intelligentes a été donné et un exemple d'application d'une structure comportant un système de contrôle passif a été traité. Les principaux algorithmes de contrôle ont été aussi succinctement passés en revue. Par conséquent, un système de contrôle permet d'apporter un amortissement supplémentaire à la structure et/ou de changer ses propriétés dynamiques. L'amortissement supplémentaire augmente la capacité de la structure à dissiper de l'énergie et la modification de la rigidité permet d'éviter la résonance de la structure. Cela est possible en utilisant des algorithmes de contrôle ou ce qu'on appelle aussi les lois de commande. Cependant, pour les structures de génie civil augmenter l'amortissement est beaucoup plus pratique que modifier la masse et la rigidité de la structure.

Avant de développer une loi de contrôle pour une structure il faut vérifier sa contrôlabilité. Le choix d'un algorithme de contrôle se fait en fonction de nombreux paramètres tels que les informations disponibles, le modèle mathématique de la structure et les objectifs du contrôle.

Dans ce chapitre les deux approches utilisées pour le contrôle des structures, à savoir le contrôle par anticipation et le contrôle par rétroaction, ont été aussi présentées. En général, dans la littérature du contrôle sismique des structures de génie civil, ce n'est que le contrôle par rétroaction qui est traité. Le contrôle par anticipation est développé beaucoup plus dans l'acoustique mais, cette approche est aussi très utile pour le contrôle des vibrations des structures.

Chapitre 3

Modélisation et analyse des systèmes de contrôle

1. Introduction

L'analyse dynamique nécessite toujours initialement de créer un modèle de calcul représentant la structure. Aujourd'hui avec le développement des moyens de calcul, la prise en compte des modèles théoriques de plus en plus raffinés, pour le traitement des phénomènes physiques de plus en plus complexes, est désormais possible. Un modèle est une représentation mathématique d'un système physique, il est utilisé pour répondre aux questions posées via des analyses et des simulations.

Un modèle peut être utilisé soit pour décrire et analyser le comportement dynamique d'un système, soit pour appliquer des méthodes de contrôle pour améliorer son comportement dynamique lorsqu'il est soumis à des charges extérieures.

Du point de vue mathématique, un système de contrôle est un système dynamique qui dépend d'un paramètre dynamique appelé contrôle [14]. Pour le modéliser, on peut avoir recours à des équations différentielles, fonctionnelles, aux dérivées partielles, aux différences finies, etc. De même, le contrôle est une fonction du temps soumise à des contraintes, cette fonction doit :

- Assurer la stabilité : le système maintient le point de fonctionnement désiré et revient à l'état d'équilibre après une perturbation,
- Améliorer les performances : le système répond rapidement au changement,
- Garantir la robustesse : le système tolère les perturbations dans sa dynamique,

Dans ce chapitre on présente la modélisation des systèmes de contrôle par la représentation d'état et on abordera aussi la stabilité des systèmes dynamiques au sens de Lyapunov.

2. Modélisation des systèmes de contrôle

Lorsque l'on envisage la commande d'un système, la première étape consiste à le modéliser pour établir la relation entre les entrées (variables de commande) et les sorties de ce système. La modélisation est donc, une étape très importante voire essentielle dans l'analyse et la conception des systèmes de contrôle.

Suivant ce que l'on connaît des systèmes dynamiques, ils peuvent être représentés par des modèles basés soit sur des représentations internes soit sur des représentations externes.

Les modèles basés sur la représentation externe sont dits des modèles de comportement. Un modèle de comportement établit des relations entre les entrées et les sorties du système. Ces modèles sont aussi appelés modèles entrée-sortie ou modèles boîte noire (black box models).

Les modèles basés sur la représentation interne sont dits modèles de connaissance. Ils décrivent le comportement dynamique d'un système par :

- un ensemble d'équations différentielles qui régissent l'évolution de l'état du système (variables d'état) en fonction des variables d'entrée (variables de commande),
- un ensemble d'équations qui expriment les grandeurs de sortie en fonction de l'état du système (variables d'état).

Ces modèles sont aussi appelés modèles boîte blanche (white box models) ou des modèles d'état (state space models).

2.1.Modèles d'état

L'analyse par variables d'état ou ce qu'on appelle aussi la représentation d'état est une approche moderne pour l'étude des systèmes née dans les années 60 [48]. Elle est à l'origine de méthodes puissantes d'analyse et de commande des systèmes pour leur adaptation aux calculateurs numériques. La représentation d'état est aussi facilement adaptable au cas multi-variables (Multi input- Multi output, MIMO) [60].

Une représentation d'état permet de modéliser un système dynamique en utilisant des variables internes du système. Cette représentation, qui peut être linéaire ou non, continue ou discrète, permet de déterminer l'état du système à n'importe quel instant futur si l'on connaît l'état à l'instant initial et les variables d'entrée. Donc, l'idée de base des représentations d'état est que le futur d'un système dépend de son passé, de son présent et de ses entrées. Le futur peut alors être décrit à partir d'un ensemble de variables bien choisies qu'on appelle variables d'état [48,60]. Les variables d'états représentent des grandeurs temporelles nécessaires pour déterminer l'évolution future d'un système quand on connaît les entrées et les équations du système. L'ensemble des variables d'état forme le vecteur d'état.

Un modèle d'état décrit le comportement d'un système dynamique par un ensemble d'équations différentielles qui régissent l'évolution de l'état du processus (variables

d'état) en fonction des variables de commande : c'est ce qu'on appelle équation d'état, et un ensemble d'équations qui expriment les grandeurs de sortie en fonction des variables d'état : c'est ce qu'on appelle équation de sortie. Contrairement à l'analyse classique des systèmes qui fait appel à la représentation de Laplace, dans le cas des représentations d'état, l'analyse a lieu dans le domaine temporel [60].

A chaque vecteur d'état $x(t)$, on peut associer une relation de la forme [60]:

$$x(t) = \psi(t, x_0, t_0, u_{[t_0, t]}) \quad (1)$$

où x_0 décrit l'état du système à l'instant $t = t_0$ et $u_{[t_0, t]}$ désigne les valeurs prises par l'entrée $u(t)$ entre les instants t_0 et t . La fonction ψ est généralement désignée par fonction de transition. Pour les systèmes dynamiques régis par des équations différentielles, la fonction de transition est obtenue en calculant la solution de l'équation différentielle :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \\ y(t) = g(x(t), u(t), t) \end{cases} \quad (2)$$

avec $x \in \mathfrak{R}^n$, $u \in \mathfrak{R}^m$ et $y \in \mathfrak{R}^r$. Si f et g sont des fonctions indépendantes du temps t , le système est dit stationnaire ou invariant dans le temps. Si f et g sont linéaires vis-à-vis de x et u , et ne dépendent pas de t , on obtient un système dynamique linéaire stationnaire composé de deux équations, l'une est désignée par équation d'état et l'autre équation de sortie (équation d'observation).

.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (3)$$

avec

$A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$: Matrice d'état ou matrice dynamique,

$B \in \mathfrak{R}^{n \times m}$: Matrice d'entrée ou de commande,

$C \in \mathfrak{R}^{r \times n}$: Matrice de sortie ou d'observation,

$D \in \mathfrak{R}^{r \times m}$: Matrice de lien direct entrée-sortie,

n : Nombre d'états,

m : Nombre de commandes,

r : Nombre de sorties.

Le diagramme fonctionnel ou schéma-bloc d'un modèle d'état linéaire (représentation d'état) est représenté sur la figure 3.1.

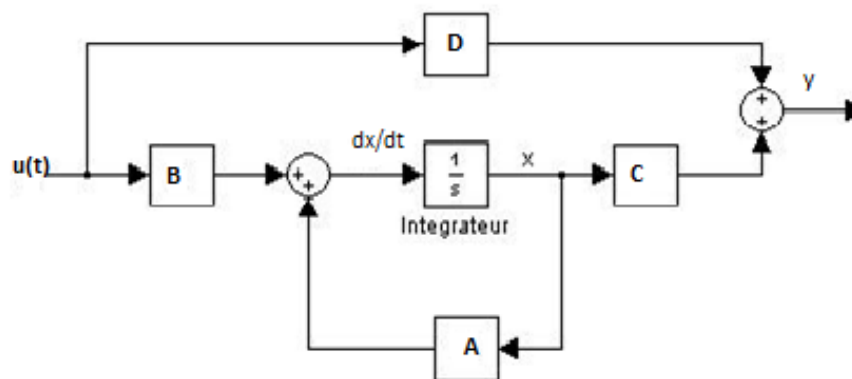


Figure 3.1. Schéma bloc d'un modèle d'état linéaire

2.2. Passage d'une équation différentielle vers un modèle d'état

Considérons le modèle général d'un système linéaire invariant représenté par une équation différentielle d'ordre n

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = u(t) \quad (4)$$

Introduisons maintenant le changement de variable suivant :

$$\begin{aligned} x_1 &= y, \\ x_2 &= \dot{y}, \\ &\vdots \\ x_n &= \frac{d^{(n-1)} y}{dt^{(n-1)}}, \end{aligned} \quad (5)$$

Ainsi que

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3, \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n, \\ \dot{x}_n &= \frac{d^n y}{dt^n}. \end{aligned} \quad (6)$$

De l'équation (4) on tire :

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} = -a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} - \dots - a_1 \frac{dy(t)}{dt} - a_0 y(t) + u(t) \quad (7)$$

En utilisant le changement de variable de l'équation (5), on aura

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} = -a_{n-1}x_n - \dots - a_1x_2 - a_0x_1 + u \quad (8)$$

En injectant l'équation (8) dans le système (6), on aura

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3, \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n, \\ \dot{x}_n &= -a_{n-1}x_n - \dots - a_1x_2 - a_0x_1 + u. \end{aligned} \quad (9)$$

Soit sous forme matricielle

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \\ -a_0 & \dots & \dots & \dots & -a_{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u \quad (10)$$

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Soit sous forme condensée

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (11)$$

L'équation (11) donne la représentation d'état de l'équation (4). Cette représentation est connue sous le nom de forme canonique de commandabilité [60].

Il est toutefois utile de signaler qu'en plus de cette forme canonique de commandabilité ou ce qu'on appelle aussi forme contrôleur, une représentation d'état peut avoir d'autres formes comme la forme canonique d'observabilité et la forme modale [60].

2.3. Solution de l'équation d'état et matrice de transition

Quelle que soit la forme de la représentation d'état adoptée pour un système linéaire invariant, ce système sera toujours décrit par un ensemble d'équations différentielles du premier ordre.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (12)$$

$$y = Cx + Du \quad (13)$$

Le problème de contrôle est de déterminer $u(t)$ afin que $x(t)$, et par conséquent $y(t)$, suive une loi prédéterminée. Il est donc nécessaire d'étudier $x(t)$ et $y(t)$. Ces deux grandeurs sont liées par l'équation algébrique (13), ainsi pour obtenir $y(t)$ il est nécessaire de résoudre l'équation différentielle du premier ordre (12), autrement dit il faut déterminer $x(t)$.

Considérons d'abord le cas scalaire. L'équation différentielle scalaire du premier ordre est :

$$\dot{x} = ax + bu \quad (14)$$

Avec la condition initiale $x(t_0)$. La solution de l'équation homogène, $\dot{x} = ax$ est donnée par :

$$x(t) = x(t_0) e^{a(t-t_0)} \quad (15)$$

Pour la solution de l'équation avec second membre, on utilise la méthode de la variation de la constante et on aura une solution donnée comme suit :

$$x(t) = x(t_0) e^{a(t-t_0)} + \int_{t_0}^t e^{a(t-\tau)} bu(\tau) d\tau \quad (16)$$

Pour le cas vectoriel nous allons, comme pour le cas scalaire, résoudre l'équation homogène.

L'équation homogène associée à l'équation d'état (équation (12)) s'écrit :

$$\dot{x} = Ax \quad (17)$$

Sa solution est exponentielle

$$x = x(t_0) e^{A(t-t_0)} \quad (18)$$

Avec $t = t_0$ est l'instant initial. En posant $x(t_0) = x_0$, la solution s'écrit

$$x = x_0 e^{A(t-t_0)} \quad (19)$$

La matrice $e^{A(t-t_0)}$ est désignée sous le nom de matrice de transition car elle établit la correspondance entre l'état du système à un instant t et l'état initial à l'instant t_0 [60]. Cette matrice joue un rôle très important dans la théorie des systèmes dynamiques linéaires [48,60].

La solution donnée par l'équation (19) décrit le comportement libre du système. Le comportement forcé est décrit par la solution de l'équation complète.

La solution complète de l'équation avec second membre est donnée par la solution du régime libre et la contribution des entrées $u(t)$ (convolution) comme suit :

$$x(t) = x_0 e^{A(t-t_0)} + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (20)$$

La stabilité du système est conditionnée par celle de la matrice de transition d'état e^{At} . En effet, La stabilité du système est liée aux propriétés des valeurs propres de la matrice d'état.

La matrice de transition converge si et seulement si les valeurs propres de la matrice A sont à partie réelle strictement négative [40].

3. Stabilité des systèmes dynamiques

La notion de stabilité constitue une problématique majeure dans plusieurs domaines tels que les mathématiques, la physique ainsi que le domaine du contrôle. Assurer la stabilité des systèmes en boucle fermée, même en présence d'incertitudes, est essentiel pour garantir leur fonctionnement. En effet, l'un des objectifs de la théorie du contrôle est de déterminer des rétroactions qui stabilisent les systèmes en un état particulier.

Physiquement parlant, un système est dit stable, si déplacé de sa position d'équilibre, il tend à y revenir, et instable s'il tend à s'en écarter davantage.

La stabilité d'un système consiste à vérifier que sa trajectoire ou son évolution dans le temps reste proche du point d'équilibre, à l'intérieur d'un certain voisinage, qui est le domaine de stabilité. Dans ce cas, on parle de stabilité simple. En revanche, on parle de stabilité asymptotique, si en plus de la condition précédente, le système revient au point d'équilibre en temps infini. La stabilité asymptotique est la propriété qui est généralement recherchée en pratique. On peut citer aussi la stabilité exponentielle qui exige non seulement le caractère asymptotique mais aussi la rapidité de convergence [61].

En utilisant donc, le langage mathématique on peut donner les définitions suivantes [58,59] :

Equilibre

On appelle un point d'équilibre (état d'équilibre), un point x_0 tel que, si l'équation différentielle représentant le système est initialisée en ce point, alors le système reste en ce point pour tous les temps futurs. Pour un système linéaire décrit par l'équation

$$\dot{x}(t) = f(x, t) \quad (21)$$

x_0 est dit point ou état d'équilibre de l'équation (21) si $f(x_0, t) = 0$ quel que soit $t \geq 0$. Physiquement, un système est en équilibre lorsqu'il conserve son état en absence de forces externes.

Stabilité

Définition 3.1. stabilité de l'état d'équilibre

Soit x_e un état d'équilibre d'un système. Ce système est écarté de cette position d'équilibre et abandonné à lui-même à $t = t_0$ avec les conditions initiales $x(t_0)$. Le système est stable si, pour tout $\varepsilon > 0$, il existe $\delta > 0$ tel que

$$\|x(t_0) - x_e\| < \delta$$

Et après un certain temps t , on aura :

$$\|x(t) - x_e\| < \varepsilon, \quad \forall t \geq t_0$$

Si cette condition n'est pas satisfaite, l'équilibre est instable.

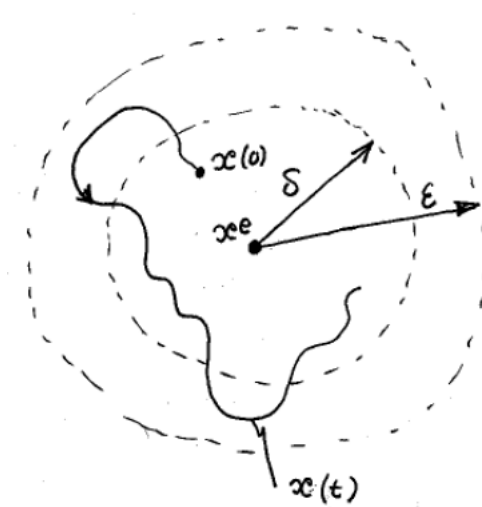


Figure 3.2. Stabilité d'un état d'équilibre [62]

Définition 3.2. Stabilité asymptotique de l'état d'équilibre

L'état d'équilibre est dit asymptotiquement stable s'il est stable (définition 3.1) et en plus quel que soit t_0 , il existe δ_1 tel que

$$\|x(t_0) - x_e\| < \delta_1 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_e$$

Cette définition ne donne aucun renseignement sur la vitesse de convergence vers l'équilibre. C'est pourquoi, une autre notion, qui est la stabilité exponentielle est introduite pour caractériser cette vitesse.

Définition 3.3. Stabilité exponentielle

L'état d'équilibre est dit exponentiellement stable si

$$\forall \varepsilon > 0 \exists a > 0, b > 0 \text{ et } \delta > 0 \text{ tel que}$$

$$\|x(t_0) - x_e\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_e\| \leq a \|x(t_0) - x_e\| e^{-bt} \quad \forall t \geq t_0$$

La stabilité exponentielle implique la stabilité asymptotique mais l'inverse n'est pas nécessairement vrai.

Dans le cas des systèmes linéaires on peut confondre la stabilité du système avec la stabilité de l'équilibre.

Définition 3.4. Fonction définie positive

Une fonction scalaire $V(x)$ continument dérivable (par rapport à x) est dite définie positive dans une région Ω autour de l'origine si :

- $V(0) = 0$,
- $V(x) > 0$ pour tout $x \in \Omega / x \neq 0$.

Si la deuxième condition est remplacée par $V(x) \geq 0$, alors la fonction est dite définie semi-positive.

Définition 3.5. Fonction quadratique définie positive

La fonction quadratique $V(x) = x^T Q x$ est dite définie positive si $V(x) = x^T Q x > 0$ pour tout $x \in \mathbb{R}^n / x \neq 0$ avec Q est une matrice réelle symétrique.

La définition 3.5 est équivalente au fait que toutes les valeurs propres de la matrice Q soient strictement positives. Une telle matrice est dite définie positive.

Les fonctions quadratiques sont souvent utilisées dans l'analyse des systèmes dynamiques (surtout comme fonctions de Lyapunov).

3.1. Stabilité au sens de Lyapunov : méthode directe

La méthode directe de Lyapunov ou la deuxième méthode de Lyapunov, permet d'analyser la stabilité d'un système sans avoir à résoudre explicitement les équations différentielles le régissant.

La stabilité au sens de Lyapunov est une traduction mathématique du concept d'énergie dans un système [58]. L'énergie est une fonction définie positive, si le système est conservatif l'énergie reste constante, et pour un système dissipatif elle décroît continuellement alors ce système tend à se ramener à un état d'équilibre. Pour ces deux cas, le système est stable. Toutefois, si l'énergie croît le système est instable. Ainsi, l'idée de Lyapunov est d'analyser la variation (signe de la dérivée) d'une fonction (l'énergie ou une fonction qui lui est équivalente) pour étudier la stabilité d'un système donné. Donc cette méthode est basée sur la définition d'une fonction particulière, notée $V(x)$ et dite fonction candidate de Lyapunov, qui est décroissante le long des trajectoires du système.

Théorème 1. Théorème de stabilité

L'état d'équilibre x_0 est stable s'il existe une fonction continument dérivable $V(x)$ telle que :

- (1) $V(x_0) = 0$,
- (2) $V(x) > 0 \quad \forall x \neq x_0, x \in \Omega$,
- (3) $\dot{V}(x) \leq 0 \quad \forall x \neq x_0, x \in \Omega$

Avec $\dot{V}(x)$ est la dérivée par rapport au temps de la fonction $V(x)$ et Ω est une région autour de x_0 . Si de plus (3) est remplacé par $\dot{V}(x) < 0 \quad \forall x \neq x_0, x \in \Omega$ alors l'état d'équilibre est asymptotiquement stable.

La fonction $V(x)$ est appelée fonction de Lyapunov.

Ce théorème est une condition suffisante de stabilité mais ne permet pas de guider l'utilisateur dans le choix de la fonction de Lyapunov et ne permet pas non plus de conclure si on ne trouve pas une telle fonction [58].

3.2. Fonctions de Lyapunov

Dans le cas général, même pour des systèmes simples, le choix de la fonction de Lyapunov n'est pas simple. Il n'existe pas de méthodes ni de règles générales permettant de trouver les fonctions candidates de Lyapunov [59]. La méthode directe de Lyapunov est une condition suffisante de stabilité, mais elle ne permet ni de guider l'utilisateur pour

le choix de la fonction ni de conclure si on ne trouve pas une telle fonction [58,59,62]. L'étude des méthodes qui permettent de construire une fonction candidate pour un système donné a motivé une littérature très abondante. Ainsi, un point d'équilibre d'un système est stable si une fonction qui vérifie les conditions imposées au voisinage de ce point peut être trouvée. Cependant, il existe des familles de fonctions de Lyapunov souvent utilisées, et dont l'adoption dépend de la nature du système à étudier (systèmes linéaires, systèmes avec incertitudes, systèmes à retard,...). Les formes quadratiques sont les plus utilisées pour l'analyse des systèmes dynamiques. Dans ce cas on parle de stabilité quadratique.

Le choix le plus classique consiste donc à choisir une fonction de Lyapunov sous forme quadratique :

$$V(x) = x^T(t) P x(t) \quad (22)$$

Avec:

P matrice symétrique définie positive ($P > 0$)

$x(t)$ est la solution de l'équation d'état.

La dérivée par rapport au temps de la fonction $V(x)$ est :

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T(t) P x(t) + x^T(t) P \dot{x}(t) \quad (23)$$

Pour un système linéaire régi par l'équation différentielle $\dot{x} = Ax$, la dérivée de la fonction devient :

$$\dot{V}(x) = A^T x^T(t) P x(t) + x^T(t) P A x(t)$$

$$\Rightarrow \dot{V}(x) = x^T(t) (A^T P + P A) x(t)$$

$$\Rightarrow \dot{V}(x) = x^T(t) Q x(t) \quad (24)$$

$$A^T P + P A = -Q, \quad (25)$$

L'équation (25) est dite équation algébrique de Lyapunov. Si cette équation admet une solution Q définie positive, alors la fonction V sera bien une fonction candidate de Lyapunov pour le système.

4. Conclusion

La modélisation des systèmes est une étape essentielle dans le processus de contrôle. Suivant ce que l'on connaît des systèmes dynamiques, ils peuvent être représentés par des modèles basés soit sur des représentations internes soit sur des représentations externes. Les modèles basés sur la représentation interne sont dits modèles d'état (state space models). Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation des systèmes de contrôle par la représentation d'état. Le passage d'une équation différentielle vers un modèle d'état est aussi abordé.

Dans ce chapitre, il a été question aussi de l'étude de la stabilité des systèmes dynamique. La théorie de stabilité de Lyapunov est présentée. Cette méthode permet d'analyser la stabilité des systèmes sans avoir à résoudre explicitement les équations différentielles le régissant.

Les fonctions de Lyapunov sont un outil puissant aussi bien pour les systèmes linéaires que pour les systèmes non linéaires, surtout pour établir des lois de contrôle puisque l'on peut réduire la recherche de lois de contrôle stabilisante à la recherche de fonctions de Lyapunov.

Chapitre 4

Loi de contrôle par retour d'état basée sur la méthode de Lyapunov

1. Introduction

L'application des techniques de contrôle moderne sur des structures de génie civil soumises aux charges dynamiques, offre une alternative très attractive par rapport à la méthode traditionnelle. Cependant, l'élément clé pour la réussite de l'utilisation des techniques et des dispositifs de contrôle moderne est le développement de lois et d'algorithmes de contrôle efficaces pour le calcul de la force à appliquer sur la structure [54]. Un algorithme efficace est un algorithme robuste, performant et stable. Beaucoup d'algorithmes ont été proposés et ils sont basés sur différentes procédures d'optimisation. Parmi ces algorithmes ou méthodes de contrôle, on trouve le régulateur linéaire quadratique (LQR) [63,64]. La loi de contrôle linéaire quadratique est parmi les algorithmes les plus connus, principalement pour sa simplicité et sa mise en œuvre facile. En effet, le contrôle linéaire quadratique constitue la base de la théorie du contrôle moderne [64]. Toutefois, même s'il peut être utilisé pour réduire les vibrations, il souffre de quelques inconvénients, comme la sensibilité à l'incertitude des paramètres et les erreurs de modèle. Un autre inconvénient est la difficulté de l'étude et la vérification de la stabilité [64]. La stabilité et la robustesse constituent une vraie problématique pour l'application d'une méthode de contrôle actif pour les structures de génie civil [57]. Concevoir une loi de contrôle robuste et stable est désormais possible en utilisant la théorie de stabilité de Lyapunov. Cette approche exige la définition d'une fonction dite de Lyapunov qui doit être définie positive [57,65].

Dans ce chapitre, un développement analytique d'une loi de contrôle robuste basée sur la théorie de stabilité de Lyapunov a été effectué. Une mise en œuvre numérique de la formulation analytique a été réalisée avec le langage Matlab. Des simulations numériques, sur une structure à un seul degré de liberté soumise à trois chargements sismiques, ont été aussi réalisées pour tester l'efficacité de l'algorithme développé. La comparaison est faite avec des résultats obtenus sur la même structure avec un contrôle linéaire quadratique (LQR) sous les mêmes chargements sismiques.

2. Commande dans l'espace d'état et principe du contrôle par retour d'état

La commande par retour d'état est un moyen de modifier le comportement en boucle fermée d'un système représenté dans l'espace d'état. Cette approche suppose l'état connu. Le principe du contrôle par retour d'état est de déterminer une commande en fonction de l'état du modèle afin d'améliorer le comportement d'un système ou de le stabiliser s'il est instable en boucle ouverte [51]. En revanche, dans le domaine de génie civil, les structures sont généralement stables avant d'introduire le système de contrôle. L'objectif du contrôle est plutôt d'améliorer leurs réponses vis-à-vis des charges dynamiques et d'assurer la stabilité de l'ensemble, la structure et le système de contrôle [5].

La loi de contrôle consiste à déterminer un retour d'état linéaire sous la forme suivante :

$$u(t) = -Gx(t) \quad (1)$$

où G est une matrice qu'on appelle matrice de gain ou bien matrice de retour d'état. Soit la représentation d'état suivante d'un système linéaire

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2)$$

En boucle fermée le système devient

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A - BG)x(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3)$$

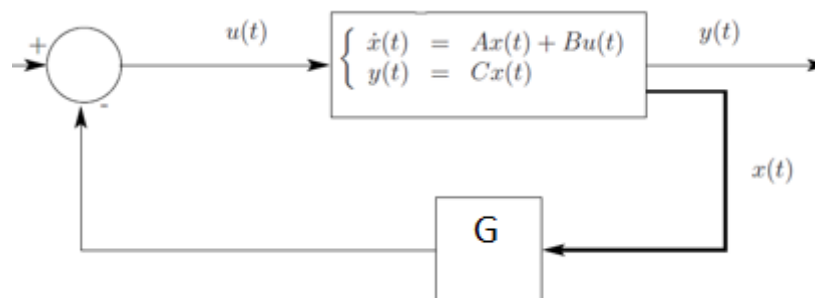


Figure 4.1. Commande par retour d'état

La matrice de retour d'état ou la matrice de gain G peut être déterminée par plusieurs méthodes, entre autres la méthode linéaire quadratique (LQ), la méthode de placement de pôles et la méthode directe de Lyapunov.

3. Formulation et modélisation

Soit une structure à un seul degré de liberté (SDOF) soumise à une excitation sismique. L'équation du mouvement peut s'écrire comme suit :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

Où m est la masse, c est l'amortissement, k est la rigidité de la structure, x est le déplacement latéral relatif par rapport au sol et $\ddot{x}_g(t)$ est l'accélération du sol. Supposons maintenant qu'on applique une force de contrôle $u(t)$ à la structure, l'équation du mouvement devient

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g(t) + u(t) \quad (5)$$

En simplifiant les deux membres de l'équation par la masse, l'équation (5) peut être réécrite comme suit :

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x + \frac{c}{m}\dot{x} = \frac{1}{m}u(t) - \ddot{x}_g(t) \quad (6)$$

On peut exprimer l'accélération de la structure pour faciliter le passage à la représentation d'état de l'équation différentielle (6).

$$\ddot{x} = -\frac{k}{m}x - \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{1}{m}u(t) - \ddot{x}_g(t) \quad (7)$$

En utilisant le modèle de représentation d'état, l'équation (7) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (8)$$

L'équation (8) devient

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + B_u u(t) + B_r \ddot{x}_g(t) \quad (9)$$

L'équation (9) est l'équation d'état du système représentant la structure.

Avec :

$Z(t)$ est le vecteur d'état donné par :

$$Z(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix} \quad (10)$$

A est la matrice d'état du système donnée par :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \quad (11)$$

B_u est le vecteur de commande ou de contrôle donné par :

$$B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \quad (12)$$

B_r est le vecteur d'influence de l'excitation donné par :

$$B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

La force de contrôle $u(t)$ est déterminée en utilisant la théorie de stabilité de Lyapunov.

4. Loi de contrôle basée sur la méthode directe de Lyapunov

Cette partie est consacrée à la détermination d'une loi de contrôle par retour d'état basée sur la méthode directe de Lyapunov. Une fonction quadratique définie positive est proposée comme fonction candidate de Lyapunov. Cette fonction est une forme quadratique du vecteur d'état de la structure. La matrice du retour d'état (la matrice de gain) est déterminée de manière à avoir la variation de la fonction toujours décroissante (signe de sa dérivée négatif).

4.1. Algorithme de contrôle

Supposons une loi de contrôle sous forme d'un retour d'état comme suit :

$$u(t) = -GZ(t) = -[g_d \quad g_v] \begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix} \quad (14)$$

Avec :

G est la matrice de gain,

$\begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix}$ est le vecteur d'état.

Pour une boucle fermée, l'équation (9) devient :

$$\dot{Z}(t) = A_c Z(t) + B_r \ddot{x}_g(t) \quad (15)$$

Avec :

$$A_c = A - (B_u G) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} - \frac{g_d}{m} & -\frac{c}{m} - \frac{g_v}{m} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Pour la fonction candidate de Lyapunov, on considère une fonction de forme quadratique symétrique :

$$V = Z^T P Z \quad (17)$$

Où P est une matrice symétrique définie positive solution de l'équation algébrique de Lyapunov

$$A^T P + P A = -Q \quad (18)$$

Où Q est une matrice définie positive

La fonction de Lyapunov est donc donnée comme suit :

$$V(z_1, z_2) = \left(\frac{\beta^2}{4} + \alpha \right) z_1^2 + \left(z_2 + \frac{\beta z_1}{2} \right)^2 \quad (19)$$

Où :

$$\begin{cases} z_1 = x(t) \\ z_2 = \dot{x}(t) \end{cases} \quad (20)$$

Avec

$$P = \begin{bmatrix} (\beta^2/2) + \alpha & \beta/2 \\ \beta/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Et pour des raisons de simplification, on définit α et β comme suit :

$$\begin{aligned} \alpha &= \omega^2 + G_d \\ \beta &= 2\xi\omega + G_v \end{aligned} \quad (22)$$

Avec :

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (23)$$

$$2\xi\omega = \frac{c}{m} \quad (24)$$

$$G_d = \frac{g_d}{m} \quad (25)$$

$$G_v = \frac{g_v}{m} \quad (26)$$

Pour la fonction candidate de Lyapunov donnée par l'équation (19), la dérivée par rapport au temps est définie par :

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial t} = \dot{z}_1 \frac{\partial V}{\partial z_1} + \dot{z}_2 \frac{\partial V}{\partial z_2} \quad (27)$$

Avec :

$$\frac{\partial V}{\partial z_1} = 2 \left(\frac{\beta^2}{4} + \alpha \right) z_1 + (2z_2 + \beta z_1) \frac{\beta}{2} \quad (28)$$

$$\frac{\partial V}{\partial z_2} = 2 \left(z_2 + \frac{\beta}{2} z_1 \right) \quad (29)$$

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (30)$$

$$\dot{z}_2 = -(\omega^2 + G_d) z_1 - (2\xi\omega + G_v) z_2 - a(t) \quad (31)$$

$$a(t) = \ddot{x}_g(t) \quad (32)$$

En substituant les équations (28) à (32) dans l'équation (27), on obtient l'expression de la dérivée comme suit :

$$\dot{V} = -\beta \left(z_2 + \frac{a(t)}{\beta} \right)^2 - \alpha \beta \left(z_1 + \frac{a(t)}{2\alpha} \right)^2 + \frac{a^2(t)}{\beta} + \frac{\beta a^2(t)}{4\alpha} \quad (33)$$

A partir de cette équation (33), on peut facilement vérifier que la dérivée de la fonction de Lyapunov est négative pour les valeurs de α et β positives, $\dot{V} < 0$ si $\alpha, \beta > 0$. Aussi, la fonction donnée par l'équation (19) est définie positive si les valeurs de α sont positives, $V > 0$ si $\alpha > 0$.

La force de contrôle dépend donc des paramètres α et β . Ces paramètres seront déterminés dans la section suivante.

4.2. Paramètres de la matrice de gain

Pour déterminer la matrice de gain ou la matrice de retour d'état G , les paramètres α et β doivent être déterminés. Pour cela mettons la dérivée égale à zéro, $\dot{V}=0$

$$\dot{V}=0 \Rightarrow \beta \left(z_2 + \frac{a(t)}{\beta} \right)^2 + \alpha \beta \left(z_1 + \frac{a(t)}{2\alpha} \right)^2 = \frac{a^2(t)}{\beta} + \frac{\beta a^2(t)}{4\alpha} \quad (34)$$

Cette équation (34), peut être remplacée par deux inéquations comme suit :

$$\left(z_1 + \frac{a(t)}{2\alpha} \right)^2 \leq \frac{1}{\alpha\beta} \left(\frac{a^2(t)}{\beta} + \frac{\beta a^2(t)}{4\alpha} \right) \quad (35)$$

$$\left(z_2 + \frac{a(t)}{\beta} \right)^2 \leq \frac{1}{\beta} \left(\frac{a^2(t)}{\beta} + \frac{\beta a^2(t)}{4\alpha} \right) \quad (36)$$

Après un réarrangement, l'équation (35) devient :

$$\left(z_1 + \frac{a(t)}{2\alpha} \right)^2 \leq a^2(t) \left(\frac{1}{\alpha\beta^2} + \frac{1}{4\alpha^2} \right) \quad (37)$$

$$-|a(t)| \sqrt{\frac{1}{\alpha\beta^2} + \frac{1}{4\alpha^2}} \leq \left(z_1 + \frac{a(t)}{2\alpha} \right) \leq |a(t)| \sqrt{\frac{1}{\alpha\beta^2} + \frac{1}{4\alpha^2}} \quad (38)$$

$$-|a(t)| \sqrt{\frac{1}{\alpha\beta^2} + \frac{1}{4\alpha^2}} - \frac{a(t)}{2\alpha} \leq z_1 \leq |a(t)| \sqrt{\frac{1}{\alpha\beta^2} + \frac{1}{4\alpha^2}} - \frac{a(t)}{2\alpha} \quad (39)$$

Pour des raisons de simplification aussi, on pose : $D_1 = \frac{1}{\alpha\beta^2} + \frac{1}{4\alpha^2}$, par conséquent, l'inéquation (39) devient :

$$-|a(t)| \sqrt{D_1} - \frac{a(t)}{2\alpha} \leq z_1 \leq |a(t)| \sqrt{D_1} - \frac{a(t)}{2\alpha} \quad (40)$$

L'accélération du sol peut être exprimée en fonction de son signe :

$$a(t) = |a(t)| \operatorname{sgn} a(t) \quad (41)$$

Avec :

$$\operatorname{sgn} a(t) = +1 \text{ si } a(t) > 0, \text{ et } \operatorname{sgn} a(t) = -1 \text{ si } a(t) < 0$$

En injectant l'équation (41) dans l'inéquation (40), on obtient comme résultat :

$$\frac{-|a(t)| \operatorname{sgn} a(t)}{2\alpha} - |a(t)| \sqrt{D_1} \leq z_1 \leq |a(t)| \sqrt{D_1} - \frac{|a(t)| \operatorname{sgn} a(t)}{2\alpha} \quad (42)$$

$$|a(t)| \left(-\frac{\operatorname{sgn} a(t)}{2\alpha} - \sqrt{D_1} \right) \leq z_1 \leq |a(t)| \left(\sqrt{D_1} - \frac{\operatorname{sgn} a(t)}{2\alpha} \right) \quad (43)$$

Par conséquent, en fonction du signe de $a(t)$, l'inéquation (43) peut être développée comme suit :

$$a(t) > 0$$

$$\Rightarrow |a(t)| \left(-\frac{1}{2\alpha} - \sqrt{D_1} \right) \leq z_1 \leq |a(t)| \left(\sqrt{D_1} - \frac{1}{2\alpha} \right) \quad (44)$$

$$a(t) < 0$$

$$\Rightarrow |a(t)| \left(\frac{1}{2\alpha} - \sqrt{D_1} \right) \leq z_1 \leq |a(t)| \left(\sqrt{D_1} + \frac{1}{2\alpha} \right) \quad (45)$$

D'après les expressions (44) et (45), on déduit que quel que soit le signe de $a(t)$, on aura toujours

$$|a(t)| \left(-\frac{1}{2\alpha} - \sqrt{D_1} \right) \leq z_1 \leq |a(t)| \left(\sqrt{D_1} + \frac{1}{2\alpha} \right) \quad (46)$$

En suivant la même procédure et le même développement pour l'expression (36), on obtient :

$$|a(t)| \left(-\frac{1}{\beta} - \sqrt{D_2} \right) \leq z_2 \leq |a(t)| \left(\sqrt{D_2} + \frac{1}{\beta} \right) \quad (47)$$

Avec D_2 défini comme suit :

$$D_2 = \frac{1}{\beta^2} + \frac{1}{4\alpha} \quad (48)$$

Les inéquations (46) et (47) peuvent être réécrites comme suit :

$$-|a(t)| \left(+\frac{1}{2\alpha} + \sqrt{D_1} \right) \leq z_1 \leq |a(t)| \left(\sqrt{D_1} + \frac{1}{2\alpha} \right) \quad (49)$$

$$-|a(t)|\left(\frac{1}{\beta} + \sqrt{D_2}\right) \leq z_2 \leq |a(t)|\left(\sqrt{D_2} + \frac{1}{\beta}\right) \quad (50)$$

En utilisant l'accélération maximale du sol (PGA), le déplacement maximal et la vitesse maximale de la structure $z_{1\max}$ et $z_{2\max}$ respectivement, les inéquations (49) et (50) peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} a_{\max} \left(\frac{1}{2\alpha} + \sqrt{D_1} \right) = z_{1\max} \\ a_{\max} \left(\frac{1}{\beta} + \sqrt{D_2} \right) = z_{2\max} \end{cases} \quad (51)$$

Le système (51) est réarrangé pour avoir un système d'équations algébriques avec α et β comme inconnues :

$$\begin{cases} a_{\max} z_{1\max} \beta^2 - z_{1\max}^2 \alpha \beta^2 + a_{\max}^2 = 0 \\ a_{\max}^2 \beta - 4z_{2\max}^2 \alpha \beta + 8a_{\max} z_{2\max} \alpha = 0 \end{cases} \quad (52)$$

A partir de la première équation du système (52), on obtient l'expression du paramètre α

$$\alpha = \frac{a_{\max}^2 \beta}{4z_{2\max}^2 \beta - 8a_{\max} z_{2\max}} \quad (53)$$

En injectant l'équation (53) dans la deuxième équation du système (52), on obtient une équation algébrique du troisième degré en fonction de β donnée par

$$a\beta^3 + b\beta^2 + c\beta + d = 0 \quad (54)$$

Avec :

$$a = a_{\max}^2 z_{1\max}^2 - 4z_{2\max}^2 z_{1\max} a_{\max}$$

$$b = 8a_{\max}^2 z_{1\max} z_{2\max}$$

$$c = -4a_{\max}^2 z_{2\max}^2$$

$$d = 8a_{\max}^3 z_{2\max}$$

Connaissant les paramètres α et β de la matrice de retour d'état, on détermine la loi de contrôle.

4.3. Programme numérique

La mise en œuvre numérique de la formulation analytique de la loi de contrôle, a été réalisée à travers un programme informatique en utilisant le langage MATLAB [65]. Ce programme est composé d'un programme principal, le script et des sous programmes, les fonctions. Ce programme numérique est structuré selon l'organigramme suivant :

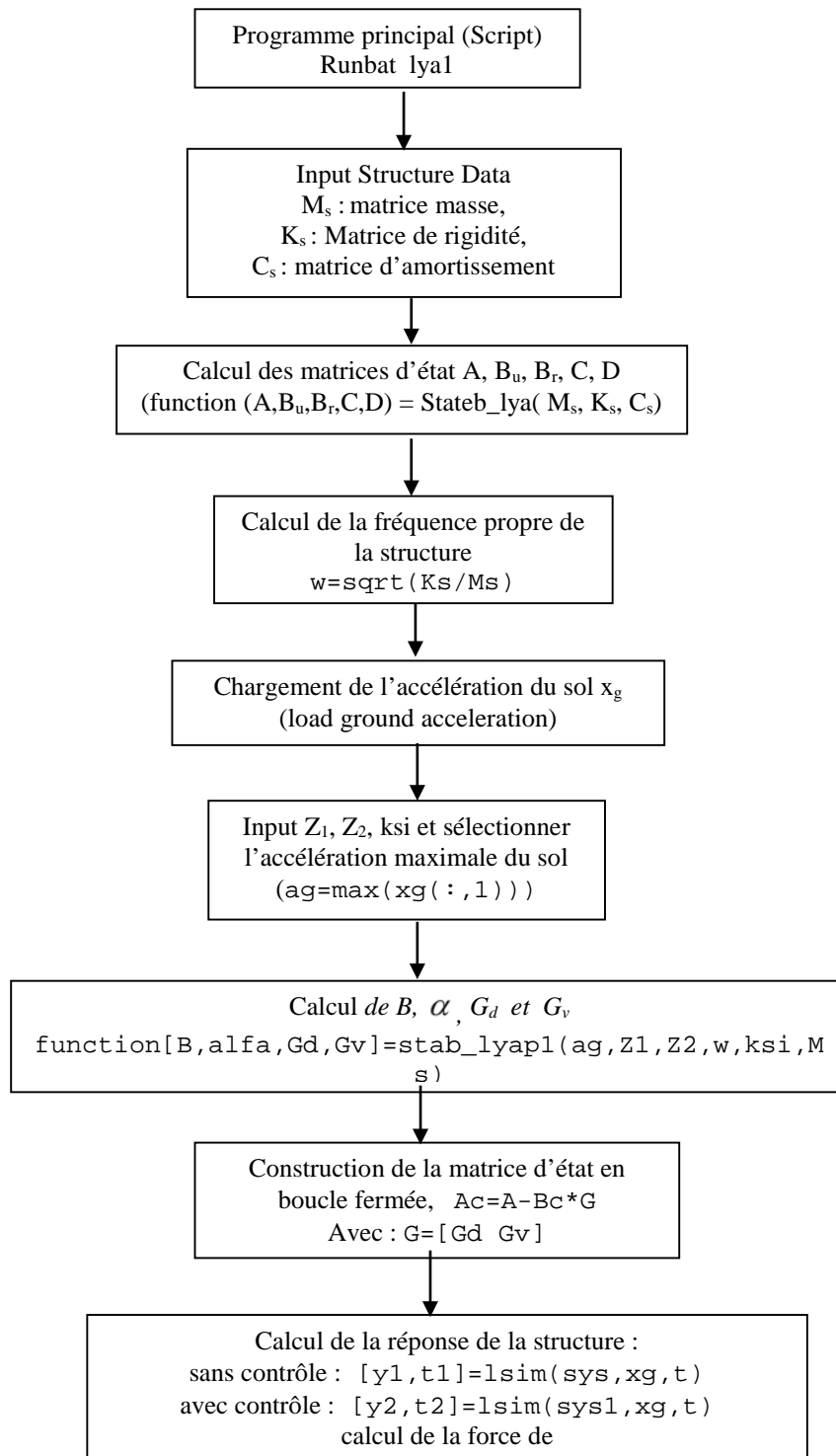


Figure 4.2. Organigramme du programme numérique

5. Exemple d'application et simulation numérique

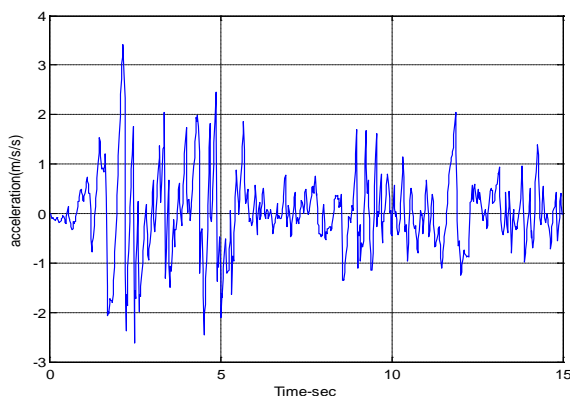
Pour notre exemple numérique, on a opté pour la structure à un seul degré de liberté utilisée par Aldemir and Bakioglu [62]. Le comportement de la structure est analysé d'abord sans contrôle et puis pour les deux cas : en utilisant la commande linéaire quadratique (LQR) et en utilisant notre algorithme basé sur la théorie de stabilité de Lyapunov.

Pour le cas de la commande linéaire quadratique, le principe de l'application est donné dans l'annexe A.

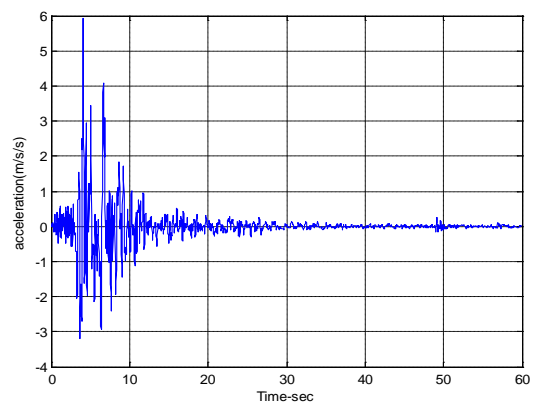
La structure considérée pour les simulations comme il a été déjà mentionné, est une structure à un seul degré de liberté modélisée en console. La masse, la rigidité et le coefficient d'amortissement sont : $m= 50$ tonnes, $k= 47000$ kN/m, $c=90$ kN s/m.

Les simulations ont été effectuées en utilisant trois enregistrements sismiques, avec un contenu fréquentiel différent :

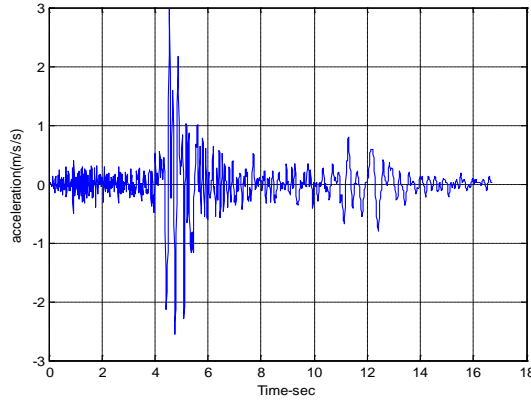
- L'accélérogramme d'El Centro 1940 avec une accélération maximale du sol (PGA) de 3.417m/s^2
- L'accélérogramme de Northridge 1994 avec une accélération maximale du sol (PGA) de 5.926 m/s^2
- L'accélérogramme de Mexico 1978 avec une accélération maximale du sol (PGA) de 2.993 m/s^2 .



(a) El Centro ground motion



b) Northridge ground motion



C) Mexico ground motion

Figure 4.3. Accélérogrammes utilisés pour la simulation

Pour évaluer cet algorithme en termes de réductions des réponses maximales, les critères d'évaluation [66,67] suivants sont considérés :

1. Rapport des déplacements d'étage (Story displacement ratio)

$$J_1 = \frac{\max|y_c|}{\max|y_u|}$$

Avec :

y_c est le déplacement contrôlé,

y_u est le déplacement non contrôlé.

1. Rapport des accélérations d'étage (Story acceleration ratio)

$$J_2 = \frac{\max|\ddot{y}_c|}{\max|\ddot{y}_u|}$$

Avec :

\ddot{y}_c est l'accélération contrôlée

\ddot{y}_u est l'accélération non contrôlée.

1. Root mean square (RMS) story displacement ratio

$$J_3 = \frac{\bar{y}_c}{\bar{y}_u}$$

\bar{y}_c , \bar{y}_u sont calculés à partir de la formule :

$$\bar{y} = \text{std}(y) * \sqrt{(T_s / T_f)}$$

Avec :

T_s est le temps d'échantillonnage (sampling time),

T_f est la durée totale de l'excitation

std est l'écart type

4. Root mean square (RMS) story acceleration ratio

$$J_4 = \frac{\bar{\bar{y}}_c}{\bar{\bar{y}}_u}$$

$\bar{\bar{y}}_c, \bar{\bar{y}}_u$ sont calculés à partir de la formule :

$$\bar{\bar{y}} = std(\ddot{y}) * \sqrt{(T_s / T_f)}$$

5.1. Résultats et interprétation

Le tableau 4.1 donne les réponses maximales de la structure pour les trois cas : sans contrôle, avec le contrôle linéaire quadratique (LQR) et le contrôle basé sur la méthode de Lyapunov. Les réponses sont obtenues sous les trois chargements sismiques considérés. Il est clair qu'à partir de ces résultats, on peut constater une réduction dans le déplacement maximal de la structure sans contrôle par rapport au cas de la structure avec le régulateur linéaire quadratique (LQR) de 36.58%, 25.25% et 13.63% sous les enregistrements d'El Centro, Northridge et Mexico respectivement. Par ailleurs, les réductions correspondantes au cas du contrôle basé sur la méthode de Lyapunov sont de 69.51%, 80.80% et 80.30% respectivement.

Pour les accélérations maximales, la réduction par rapport au cas de LQR est de 31.75%, 23.85% et 11.94% sous les enregistrements d'El Centro, Northridge et Mexico respectivement. Par rapport au cas de Lyapunov, la réduction est de 54.33%, 36.95% et 49.84%.

La réduction de l'effort tranchant à la base, sous les enregistrements d'El Centro, Northridge et Mexico est de 36%, 25.52% et 14.35% respectivement en comparaison aux résultats obtenus avec le contrôle LQR. Cette réduction est de 69.44%, 81.30% et 80.38% avec le contrôle basé sur la méthode de Lyapunov.

D'après ces résultats, l'algorithme proposé montre un meilleur comportement de la structure sous les enregistrements du mouvement du sol considérés.

Tableau 4.1. Réponses maximales en déplacement, accélération et effort tranchant

	Displacement (cm)	Acceleration (m/s ²)	Base Shear (kN)
El-Centro 1940			
Uncontrolled	0.82	7.62	384.25
LQR control	0.52	5.20	245.95
Lyapunov based control	0.25	3.48	117.42
Northridge 1994			
Uncontrolled	0.99	9.39	465.29
LQR control	0.74	7.15	346.53
Lyapunov based control	0.19	5.92	86.99
Mexico 1978			
Uncontrolled	0.66	6.28	311.90
LQR control	0.57	5.53	267.13
Lyapunov based control	0.13	3.15	61.180

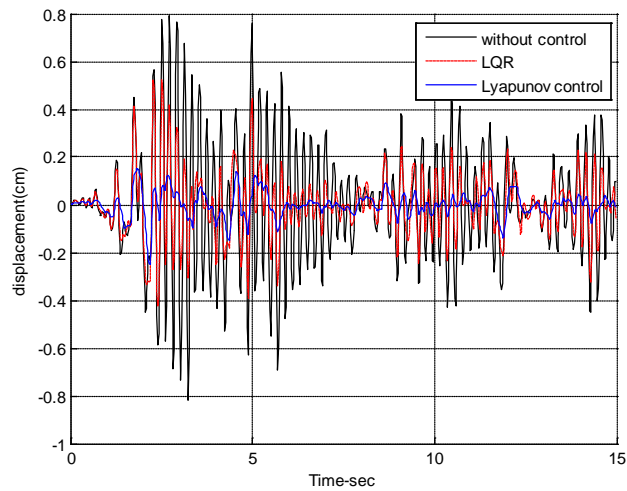
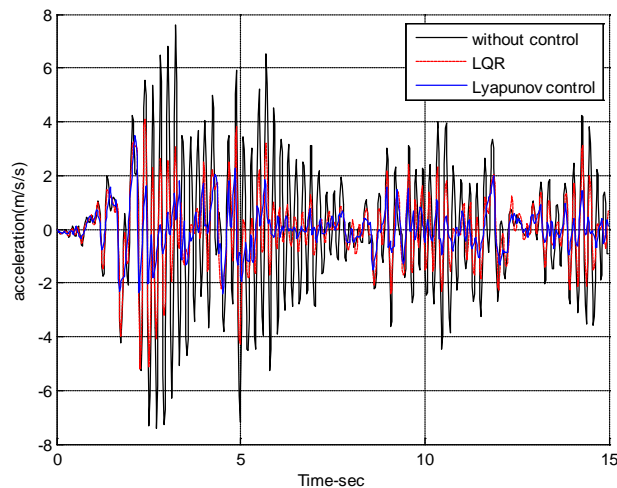
Les résultats de la comparaison des critères d'évaluation pour les cas du contrôle par le régulateur linéaire quadratique et la méthode de Lyapunov sont présentés dans le tableau 2.2. Comme on peut le constater à la lecture de ce tableau, tous les rapports correspondant au cas du contrôle par l'algorithme proposé qui est basé sur la méthode de Lyapunov, sont réduits par rapport à ceux obtenus par la méthode linéaire quadratique et cela pour les trois enregistrements considérés. La réduction est de 52.25%, 33.05%, 60.74% and 38.52% en déplacement, accélération, RMS displacement and RMS acceleration, respectivement sous l'enregistrement d'El Centro. Les réductions sous l'enregistrement de Northridge sont de 74.89%, 17.10%, 73.25% et 29.68%. Enfin, sous l'enregistrement de Mexico, les réductions sont de 77.09%, 43.03%, 63.79% et 36.33%.

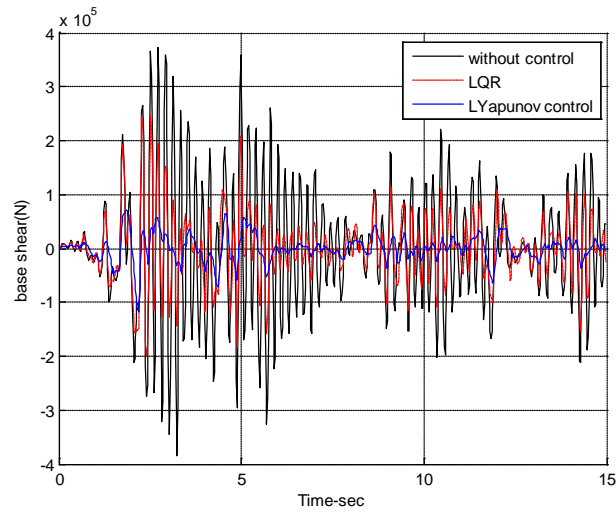
Les réponses de la structure pour les trois cas : sans contrôle, avec le contrôle linéaire quadratique (LQR) et le contrôle de Lyapunov, en termes de déplacement, accélération et effort tranchant à la base sous les trois enregistrements sismiques sont présentées sur les figures 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12.

Les figures montrent bien la réduction des réponses pour les deux algorithmes de contrôle. Toutefois, la réduction est bien significative dans le cas de contrôle avec l'algorithme proposé, c'est-à-dire le contrôle basé sur la méthode de Lyapunov, et cela pour les trois enregistrements sismiques.

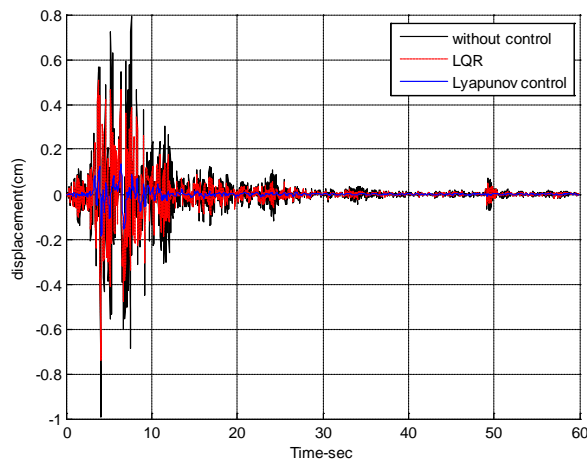
Tableau 4. 2. Critères d'évaluation

	J1	J2	J3	J4
El-Centro 1940				
LQR control	0.6401	0.6830	0.5474	0.5664
Lyapunov based control	0.3056	0.4573	0.2149	0.3482
Northridge 1994				
LQR control	0.7448	0.7616	0.7367	0.7596
Lyapunov based control	0.1870	0.6313	0.1970	0.5341
Mexico 1978				
LQR control	0.8565	0.8810	0.7621	0.7916
Lyapunov based control	0.1962	0.5019	0.2759	0.5040

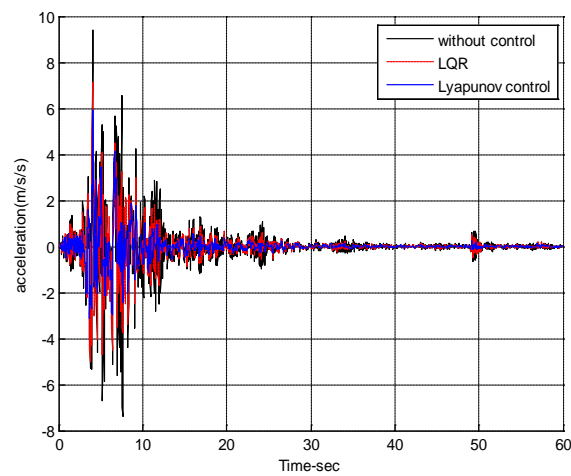
**Figure 4.4. Déplacement de la structure avec et sans contrôle
Sous le séisme d'El Centro****Figure 4.5. Accélération de la structure avec et sans contrôle
Sous le séisme d'El Centro**



**Figure 4.6. Effort tranchant de la structure avec et sans contrôle
Sous le séisme d'El Centro**



**Figure 4.7. Déplacement de la structure avec et sans contrôle
sous le séisme de Northridge**



**Figure 4.8. Accélération de la structure avec et sans contrôle
sous le séisme de Northridge**

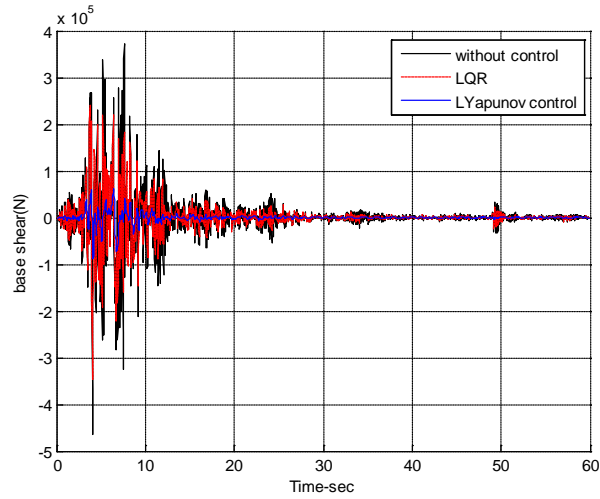


Figure 4.9. Effort tranchant de la structure avec et sans contrôle sous le séisme de Northridge

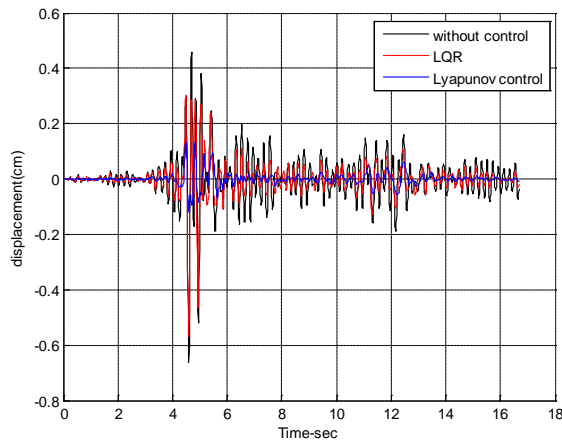


Figure 4.10. Déplacement de la structure avec et sans contrôle sous le séisme de Mexico

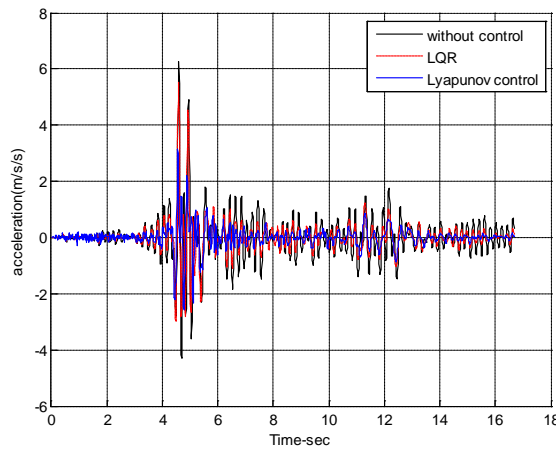
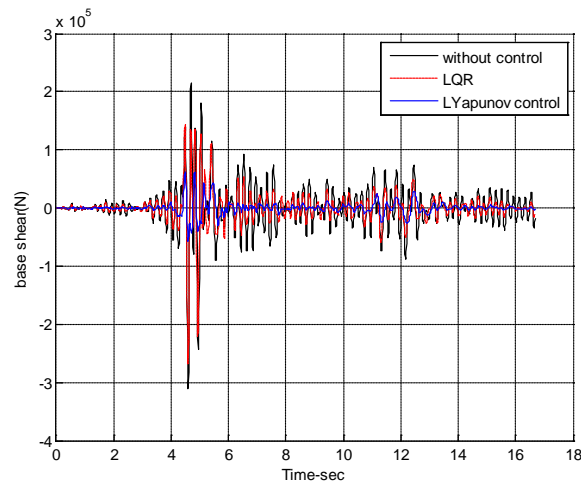


Figure 4.11. Accélération de la structure avec et sans contrôle sous le séisme de Mexico



**Figure 4.12. Effort tranchant de la structure avec et sans contrôle
Sous le séisme de Mexico**

La valeur maximale de la force de contrôle, pour chacun des algorithmes utilisés, est donnée dans le tableau 4.3. La comparaison de la force de contrôle pour les deux algorithmes, est donnée pour les trois chargements sismiques, El Centro, Northridge et Mexico sur les figures 4.13, 4.14 et 4.15 respectivement.

D'après le tableau et les figures, la force de contrôle dans le cas de l'algorithme basé sur la méthode de Lyapunov est réduite par rapport au cas du régulateur linéaire quadratique (LQR).

Tableau 4. 3. Valeur maximale de force de contrôle pour les deux algorithmes

Force de contrôle (KN)	
El-Centro 1940	
LQR control	108.45
Lyapunov based control	91.788
Northridge 1994	
LQR control	115.48
Lyapunov based control	113.27
Mexico 1978	
LQR control	129.12
Lyapunov based control	91.35

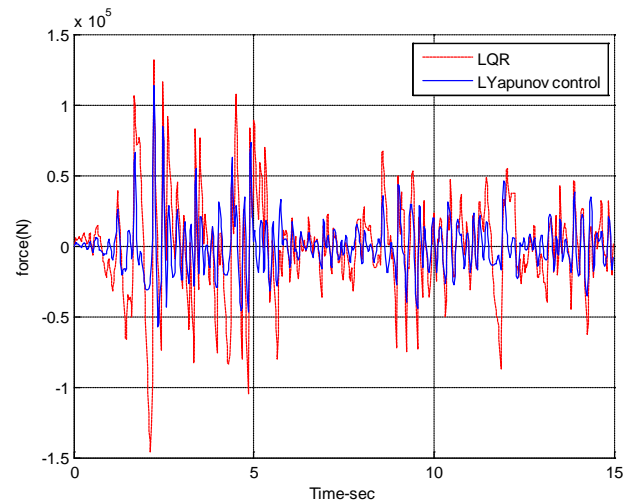


Figure 4.13. Force de contrôle pour les deux algorithmes utilisés sous le séisme d'El Centro

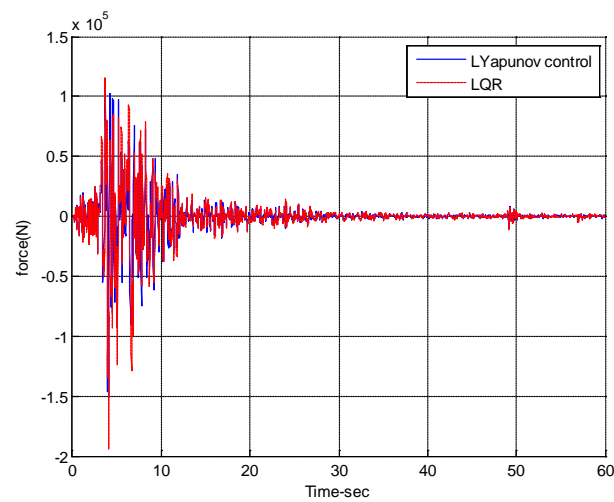


Figure 4.14. Force de contrôle pour les deux algorithmes utilisés sous le séisme de Northridge

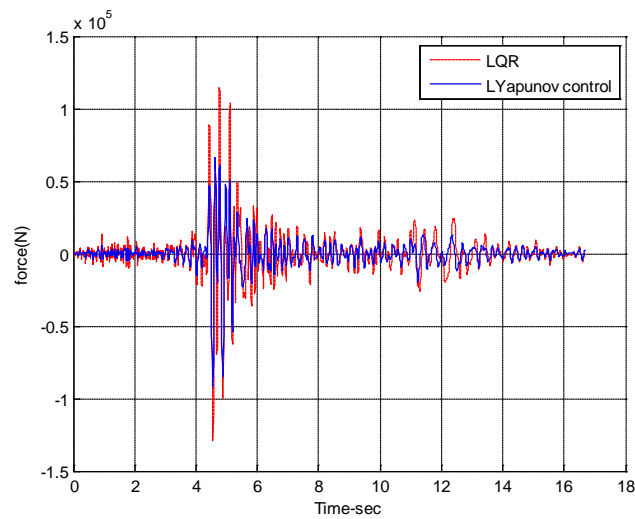


Figure 4.15. Force de contrôle pour les deux algorithmes sous le séisme de Mexico

5. Conclusion

Dans cette étude, un nouvel algorithme de contrôle basé sur la théorie de stabilité de Lyapunov a été proposé pour des structures à un seul degré de liberté soumises à un chargement sismique. Pour l'application de la méthode de Lyapunov, une fonction quadratique a été utilisée pour développer cette loi de contrôle. La performance de cette loi a été prouvée par des simulations numériques sur une structure à un seul degré de liberté soumise à trois chargements sismiques à savoir les enregistrements d'El Centro 1940 avec une accélération maximale du sol (PGA) de 3.417 m/s^2 , de Northridge de 1994 avec un PGA de 5.926 m/s^2 et de celui de Mexico de 1978 avec un PGA de 2.993 m/s^2 .

Les résultats des simulations et les critères d'évaluation ont montré l'efficacité de cette loi de contrôle pour réduire considérablement le déplacement et l'accélération de la structure avec une force de contrôle réduite. Par ailleurs, une réduction de l'effort tranchant a été aussi obtenue. Un autre avantage de cette méthode de contrôle est la stabilité du système et de la structure. Cette stabilité peut être vérifiée sans avoir à résoudre explicitement l'équation différentielle du système.

Chapitre 5

Contrôle semi actif : application de l'algorithme développé pour un amortisseur magnéto-rhéologique

1. Introduction

Le contrôle semi actif qui date des années 70 a déjà remporté un large succès aussi bien dans le domaine de l'automobile que dans le domaine du génie civil. Ce type de contrôle utilise des systèmes dont les propriétés mécaniques sont contrôlables, mais qui, contrairement aux systèmes actifs, ne nécessitent pas de l'énergie externe pour leur fonctionnement, ainsi, ils n'introduisent pas de l'énergie dans la structure à contrôler.

Ce chapitre a pour objet l'adaptation de l'algorithme qui a été développé en se basant sur la théorie de stabilité de Lyapunov, pour un amortisseur magnéto-rhéologique. Pour cela, une mise en œuvre numérique de la formulation analytique a été développée en utilisant le langage MATLAB [66]. Cet amortisseur est considéré comme un système semi actif fait toujours l'objet d'une attention particulière. Cela est dû principalement à ses caractéristiques, à savoir la simplicité mécanique, une basse alimentation électrique, une grande capacité de force et de robustesse.

2. Fluides rhéologiques

Les fluides rhéologiques sont considérés comme des matériaux intelligents, leurs caractéristiques peuvent être contrôlées par l'application d'un champ magnétique ou électrique. Ces fluides comportent des suspensions de microparticules qui agissent sous l'effet de ces champs extérieurs. Ces particules s'alignent selon les lignes de champ dans la zone soumise au champ. Ce phénomène est dit magnéto-rhéologique dans le cas de l'application d'un champ magnétique et électro-rhéologique dans le cas d'un champ électrique [45]. L'alignement des particules rend le fluide plus visqueux, et cette viscosité peut être exploitée pour dissiper de l'énergie. La quantité de l'énergie dissipée est alors fonction de l'intensité du champ appliqué [45].

Ces fluides rhéologiques sont utilisés dans des amortisseurs semi actifs. Mais, les fluides magnéto-rhéologiques sont plus intéressants que les fluides électro-rhéologiques. Les fluides magnéto-rhéologiques sont contrôlés par des tensions de l'ordre de dizaine de volt avec des courants de quelques ampères, alors que les fluides électro-rhéologiques

nécessitent des tensions de l'ordre du kilovolt avec des courants de quelques milliampères [45].

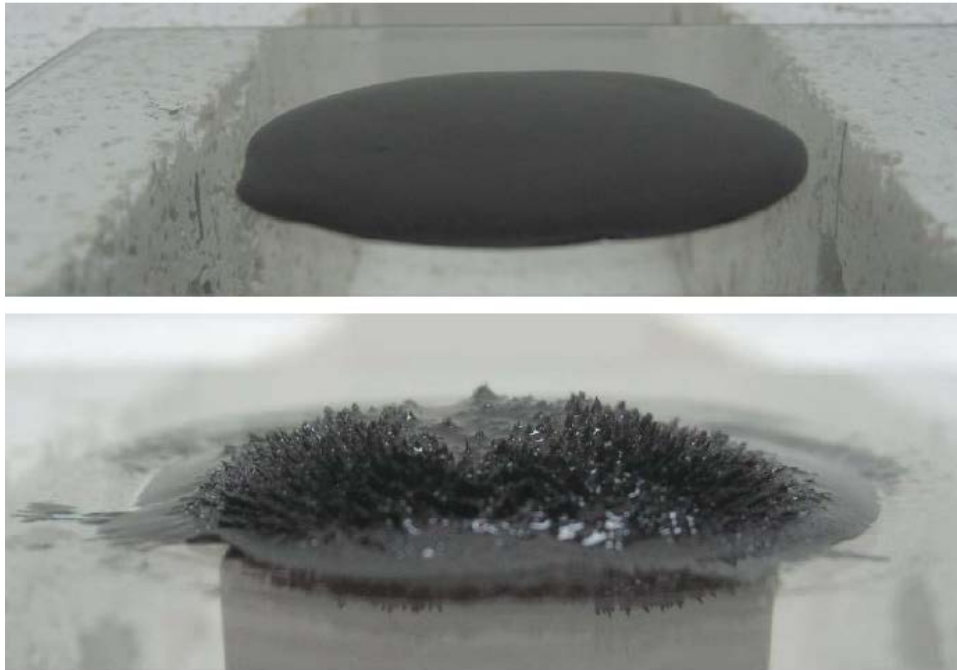


Figure 5.1 Fluides magnéto-rhéologiques sur une plaque de verre Sans et avec un champ magnétique [68]

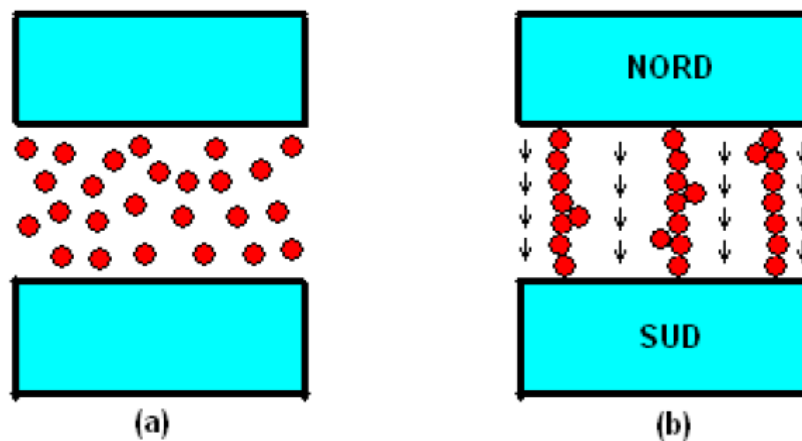


Figure 5.2 Formation des chaînes de particules ferromagnétiques dans un fluide magnéto-rhéologique [47]

- (a) Sans champ magnétique
- (b) Avec champ magnétique

3. Amortisseur magnéto-rhéologique

Parmi les dispositifs de contrôle semi-actifs, on trouve l'amortisseur magnéto-rhéologique qui est très prometteur pour le domaine du génie civil. En général, cet

amortisseur consiste en un cylindre hydraulique avec un piston à l'intérieur, des bobines magnétiques et un fluide magnéto-rhéologique qui comporte des particules ferromagnétiques de taille micrométrique [70]. En l'absence du champ magnétique l'amortisseur magnéto-rhéologique fonctionne comme un amortisseur passif mais, quand un champ magnétique est appliqué sur le fluide MR, l'amortisseur devient semi actif [70].

3.1. Fonctionnement de l'amortisseur magnéto-rhéologique

A la différence d'un amortisseur hydraulique qui nécessite une valve mécanique pour contrôler le flux, l'amortisseur magnéto-rhéologique comporte des orifices permettant la circulation du fluide MR. Tout près de ces orifices se trouvent les bobines magnétiques. Le courant électrique dans les bobines génère un champ magnétique qui influe sur le débit du fluide à travers les orifices. Plus le courant électrique est grand, plus la viscosité du fluide augmente [47]. L'amortisseur présenté sur la figure 5.3 comporte un accumulateur sous forme d'une chambre à gaz comprimé (le nitrogène est souvent utilisé) qui permet le changement du volume interne du cylindre lors du mouvement du piston [47]. Cet amortisseur a été développé par Lord Corporation. Les longueurs minimale et maximale sont respectivement 155 mm et 208 mm, ce qui donne au piston une course de 53 mm [47].

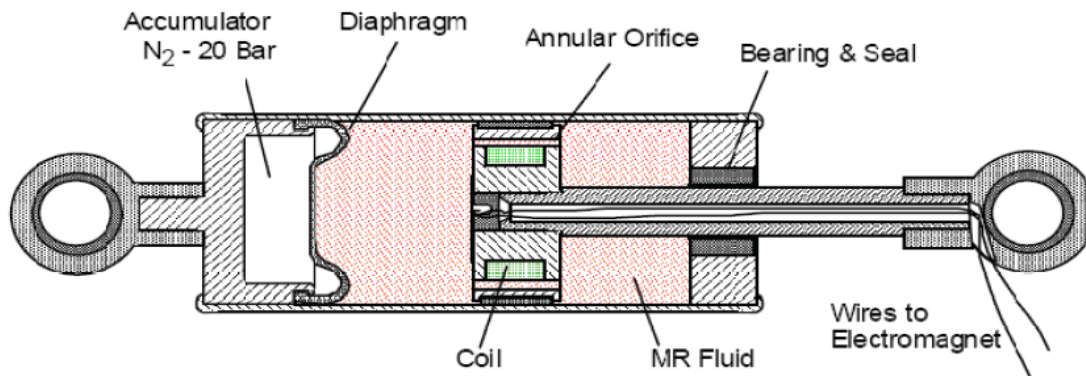


Figure 5.3 Composition d'un amortisseur magnéto-rhéologique [47]

3.2. Modélisation de l'amortisseur magnéto-rhéologique

Les phénomènes à l'origine du comportement des amortisseurs magnéto-rhéologiques sont extrêmement complexes. Néanmoins, plusieurs modèles ont été développés et proposés dans la littérature pour décrire le comportement de ces amortisseurs. On se

propose dans cette partie de donner une revue succincte des modèles paramétriques des amortisseurs MR.

Un modèle paramétrique consiste en une association d'éléments mécaniques, tels que des ressorts et des dash-pots pour simuler le comportement de l'amortisseur [70].

3.2.1. Modèle de Bingham

L'un des premiers modèles paramétriques développé pour décrire l'amortisseur magnétorhéologique (MR) est le modèle de Bingham, il se compose d'un élément de frottement de coulomb en parallèle avec un dash-pot comme le montre la figure 5.4 [70]. Ce modèle est proposé par Stanway pour un amortisseur électrorhéologique (ER) et il a été adapté pour un amortisseur MR par Spencer et al [59,70]. La force générée par l'amortisseur est donnée par :

$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_o \quad (1)$$

avec c_0 est le coefficient d'amortissement, f_c est la force de frottement qui est liée à la contrainte d'écoulement du fluide, \dot{x} est la vitesse du piston et f_o est intégrée pour tenir compte de la présence de l'accumulateur. Il faut noter que f_c et c_0 dépendent du voltage appliqué (tension électrique).

D'après Spencer et al [59], ce modèle même s'il reproduit correctement la courbe expérimentale force-déplacement, en examinant les courbes force-vitesse et la variation de la force avec le temps, le comportement de l'amortisseur n'est pas bien cerné.

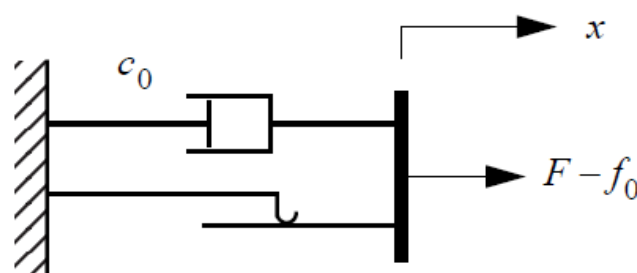


Figure 5.4. Modèle de Bingham pour un amortisseur MR [59]

Il y a eu par la suite une version étendue du modèle de Bingham qui a été proposée par Gamota and Filisko [59,70]. Ce modèle est présenté sur la figure 5.5 et il est composé du modèle de Bingham en série avec un modèle de référence d'un solide linéaire (standard linear solid model). Les équations caractérisant ce modèle sont données comme suit :

$$F = \begin{cases} k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_0 \\ c_0\dot{x}_1 + f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) + f_0 \\ k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{cases} \quad \text{abs}(F) > f_c \quad (2)$$

$$F = \begin{cases} k_1(x_2 - x_1) + c_1\dot{x}_2 + f_0 \\ k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{cases} \quad \text{abs}(F) \leq f_c \quad (3)$$

On peut noter : quand $\text{abs}(F) \leq f_c$, $\dot{x}_1 = 0$.

Ce modèle offre une meilleure prédiction de la réponse force-déplacement, aussi la courbe force-vitesse s'approche mieux de la courbe expérimentale [59]. Cependant, les équations caractérisant ce modèle sont lourdes, ce qui rend leur traitement numérique difficile [59]. La résolution numérique de ces équations est longue pour un contrôle en temps réel.

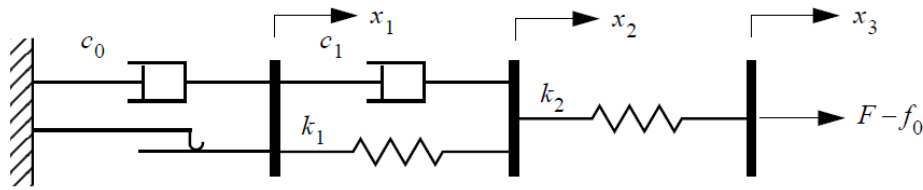


Figure 5.5. Modèle proposé par Gamota and Filisko [4]

3.2.2. Modèle de Bouc- Wen

Le modèle le plus utilisé pour modéliser les comportements hystérétiques est le modèle de Bouc-Wen [59,70]. Ce modèle est polyvalent et peut être utilisé pour simuler une grande variété de comportements hystérétiques ; il offre aussi l'avantage de résolution numérique des équations le régissant. Le modèle est présenté sur la figure 5.6, et la force de l'amortisseur est donnée comme suit :

$$F = c_o \dot{x} + k_o (x - x_0) + \alpha z \quad (4)$$

x_0 est le déplacement initial du ressort, ce qui permet de prendre en compte la force initiale due à l'accumulateur.

La variable z décrit le comportement hystérétique de l'amortisseur et elle est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A_d \dot{x} \quad (5)$$

A_d , β , γ et n sont des paramètres qui contrôlent le comportement du modèle et déterminent la forme de la courbe d'hystérésis.

α est un coefficient associé à la variable z

α et c_0 dépendent de la tension électrique appliquée (le voltage).

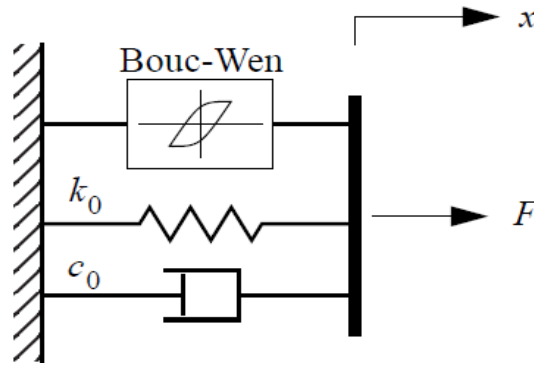


Figure 5.6. Modèle de Bouc-Wen [4]

D'après Spencer et al [59], pour ce modèle la représentation de la courbe force-déplacement est satisfaisante. En revanche, la courbe force-vitesse, même si elle est proche de la courbe expérimentale, elle n'est pas représentative pour la partie non linéaire.

3.2.3. Modèle de Bouc-Wen modifié

Pour pallier aux insuffisances du modèle de Bouc-Wen, Spencer et al [59] ont proposé une version améliorée de ce modèle, et cela en lui ajoutant un ressort en parallèle et un dash-pot en série. Le modèle est présenté sur la figure 5.7. Dans ce cas la force générée par l'amortisseur est donnée par :

$$F = \alpha z + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0 (x - y) + k_1 (x - x_o) \quad (6)$$

Ou d'une façon équivalente, la force est donnée par :

$$F = c_1 \dot{y} + k_1 (x - x_o) \quad (7)$$

Donc, on a :

$$c_1 \dot{y} = \alpha z + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0 (x - y) \quad (8)$$

A partir de l'équation 8, on déduit \dot{y} :

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y)] \quad (9)$$

Avec

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A_d(\dot{x} - \dot{y}) \quad (10)$$

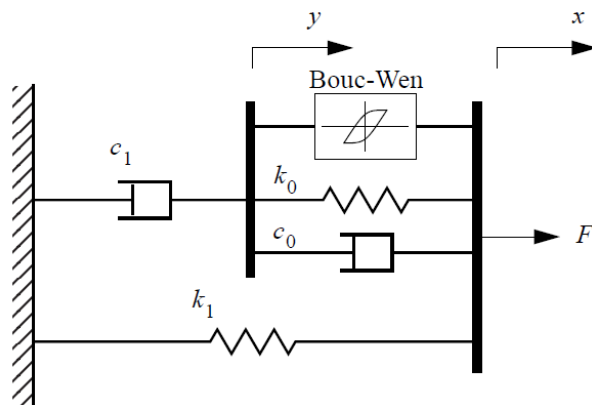


Figure 5.7. Modèle de Bouc-Wen modifié proposé par Spencer et al [59]

En comparant les résultats obtenus avec ce modèle et les résultats expérimentaux, Spencer et al [59] ont constaté la concordance des résultats sur toutes les parties des courbes, force-déplacement et force-vitesse. Par conséquent, le comportement de l'amortisseur est bien décrit par ce modèle. Cependant, même si les résultats de ce modèle convergent mieux, la résolution numérique des équations reste très coûteuse [70].

4. Choix du modèle de l'amortisseur et Formulation

Dans la référence [70], l'auteur a proposé un modèle basé sur le modèle de Bouc-Wen avec des paramètres optimisés pour des applications de contrôle sismique. Les valeurs des paramètres sont données dans le tableau 5.1.

Notre choix est donc, porté sur ce modèle (figure 5.6) pour l'application de notre algorithme car l'utilisation de modèles simples avec un faible temps de calcul est une nécessité dans le cas du contrôle en temps réel.

4.1. Equations caractérisant le modèle choisi

La force de l'amortisseur est donnée par :

$$F = c_o \dot{x} + k_o(x - x_0) + \alpha z \quad (11)$$

La dérivée de la variable z est donnée par :

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A_d\dot{x} \quad (12)$$

Les paramètres α , k_0 et c_0 sont dépendants de la tension électrique appliquée et ils sont donnés par les équations suivantes [59,70] :

$$\begin{aligned}\alpha(v_c) &= \alpha_a + \alpha_b v_c \\ k_0(v_c) &= k_{0a} + k_{0b} v_c \\ c_0(v_c) &= c_{0a} + c_{0b} v_c\end{aligned}\quad (13)$$

La résistance et l'inductance présentes dans le circuit introduit une dynamique dans le système qui est prise en compte par le filtre du premier ordre sur l'entrée de la tension électrique (voltage) [60,71] comme suit :

$$\dot{v}_c = -\eta(v_c - v_a) \quad (14)$$

avec η est une constante de temps associée au filtre du premier ordre et v_a est la tension électrique appliquée à l'amortisseur.

Bien que le champ magnétique soit une fonction de l'intensité, dans le domaine du contrôle, les commandes sont données très souvent en tension par des cartes d'acquisition [47]. Pour l'amortisseur RD-1005-3, par exemple qui est un produit de LORD Corporation, on utilise un dispositif appelé Wonder Box fournie aussi par LORD Corporation [47,70]. Ce dispositif est muni de deux entrées A et B et une sortie C vers l'amortisseur. Alimenté à l'entrée A par une source électrique de 12 Volts, il génère à sa sortie C une intensité constante. Mais, la valeur de la sortie C dépend de la tension du signal de commande à l'entrée B (voir figure 5.8).

Tableau 5.1. Valeurs proposées pour les paramètres du modèle de Bouc-Wen [70]

MR Damper Parameter Values for Seismic Application

Parameter	Value	Parameter	Value
α_a	$1.9504 \times 10^5 \text{ N m}^{-1}$	α_b	$1.57336 \times 10^5 \text{ N m}^{-1} \text{ V}^{-1}$
c_{0a}	$8.666 \times 10^2 \text{ N sec m}^{-1}$	c_{0b}	$1.6580 \times 10^3 \text{ N sec m}^{-1} \text{ V}^{-1}$
k_{0a}	$7.5140 \times 10^2 \text{ N sec m}^{-1}$	k_{0b}	$1.384 \times 10^3 \text{ N sec m}^{-1} \text{ V}^{-1}$
n	2	γ	2.85 m^{-1}
A	12.26	β	5.42 m^{-1}
η	190 s^{-1}	V_{max}	5 V

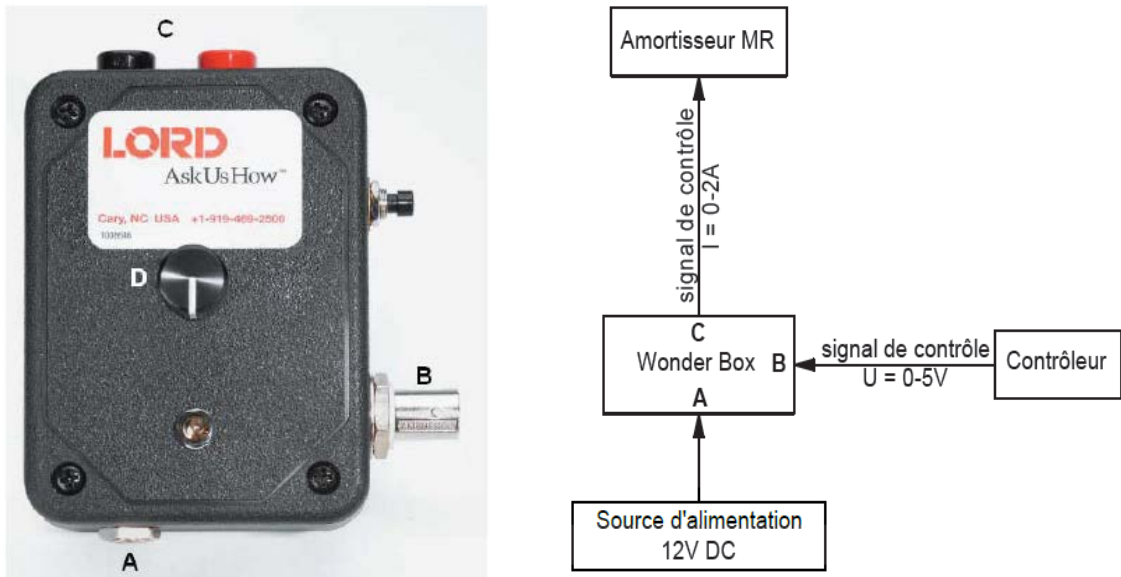


Figure 5.8. Dispositif « Wonder Box » de Lord Corporation et schéma de fonctionnement [47]

4.2. Modèle de la structure et formulation

Soit une structure à un seul degré de liberté soumise à une excitation sismique et contrôlée avec un amortisseur magnéto-rhéologique. L'équation du mouvement de la structure est donnée comme suit :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + F_{MR} = -m\ddot{x}_g(t) \quad (15)$$

Où m est la masse, c est l'amortissement, k est la rigidité de la structure et x est le déplacement de la structure. F_{MR} est la force de l'amortisseur magnéto-rhéologique donnée par l'équation (11). En cas d'absence de courant électrique, l'amortisseur se comporte comme un système passif.

En utilisant la représentation d'état, l'équation (15) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix} F_{MR} + \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (16)$$

Sous forme condensée, on aura :

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + B_u F_{MR}(t) + B_r \ddot{x}_g(t) \quad (17)$$

Avec :

$$Z(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \quad B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \quad B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

En substituant l'équation (11) dans l'équation (15), on aura :

$$\ddot{x} = -\frac{(k+k_0)}{m}x - \frac{(c+c_0)}{m}\dot{x} - \frac{\alpha}{m}z - \ddot{x}_g(t) \quad (18)$$

Avec z est donnée par l'équation (12). En effectuant le changement de variable suivant :

$$\begin{cases} x = x_1 \\ \dot{x} = x_2 \\ z = x_3 \end{cases}$$

L'équation (18) peut se mettre sous forme d'une représentation d'état comme suit :

$$\dot{X}(t) = A_c X(t) + E + B_r \ddot{x}_g(t) \quad (19)$$

Avec

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{(k+k_0)}{m} & -\frac{(c+c_0)}{m} & \frac{\alpha}{m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A_d\dot{x} \end{bmatrix} \quad B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

4.3. Détermination du voltage à appliquer

Cette étape consiste à déterminer la tension électrique à appliquer sur l'amortisseur pour qu'il génère la force de contrôle demandée ou désirée. En effet, il faut déterminer v_a pour que la force de l'amortisseur F_{MR} soit égale à la force de contrôle calculée par l'algorithme développé dans le chapitre 4. Elle peut aussi être proche de cette force avec une erreur très minime. La valeur de v_a varie de 0 à V_{max} et V_{max} est la tension électrique (voltage) maximale choisie en fonction de la capacité du dispositif. Pour ce calcul on peut procéder de deux méthodes :

Première méthode

La fonction de Lyapunov est donnée par :

$$V = Z^T P Z \quad (21)$$

La dérivée de cette fonction est

$$\dot{V} = \dot{Z}^T P Z + Z^T P \dot{Z} \quad (22)$$

Et $\dot{Z}(t)$ est donnée par l'équation (17). En substituant donc l'équation (17) dans l'équation (22), on aura :

$$\dot{V} = Z^T (A^T P + P A) Z + 2Z^T P B_u F_{MR} + 2Z^T P B_r \ddot{x}_g \quad (23)$$

D'après l'équation (23), le seul terme qui peut être directement affecté par le voltage est le terme comportant la force F_{MR} . La dérivée de la fonction de Lyapunov doit être négative, donc le voltage est donné par :

$$v_a = V_{\max} H(-2Z^T P B_u F_{MR}) \quad (24)$$

$H(\cdot)$ est la fonction Heaviside (Heaviside function). La matrice P est celle déterminée dans le chapitre 4.

Deuxième méthode

Cette méthode consiste à déterminer v_a pour que la force de l'amortisseur soit égale à la force de contrôle calculée. Soit $u(t)$ la force de contrôle déterminée auparavant et $F_{MR}(t_i)$ la force de l'amortisseur donnée à $t = t_i$:

$$F_{MR}(t_i) = c_o \dot{x}_i + k_o x_i + \alpha z_i \quad (25)$$

En substituant les équations (13) dans l'équation(25), on aura :

$$F_{MR}(t_i) = (c_{0b} \dot{x}_i + k_{0b} x_i + \alpha_b z_i) v + (k_{0a} x_i + c_{0a} \dot{x}_i + \alpha_a z_i) \quad (26)$$

En égalant $F_{MR}(t_i)$ à la force de contrôle nécessaire $u(t)$, on aura :

$$v(t_{i+1}) = \frac{u(t) - (k_{0a} x_i + c_{0a} \dot{x}_i + \alpha_a z_i)}{(c_{0b} \dot{x}_i + k_{0b} x_i + \alpha_b z_i)} \quad (27)$$

La mise en œuvre numérique de la formulation analytique a été effectuée en utilisant MATLAB [65].

5. Résultats et interprétation

Les simulations sont effectuées sous l'enregistrement d'El Centro 1940 avec une accélération maximale du sol (PGA) de 3.417m/s^2 (figure 4.3 (a)). Les réponses maximales de la structure en déplacement, vitesse et accélération avec et sans l'amortisseur MR sont présentées dans le tableau 5.2

Tableau. 5.2. Réponses maximales en déplacement, vitesse et accélération

	Displacement (cm)	Velocity (m/s)	Acceleration (m/s^2)
Uncontrolled	0.82	0.2292	7.62
With MR damper	0.78	0.2259	7.37

La force de l'amortisseur en fonction du temps est donnée sur la figure (5.9). La valeur maximale de cette force est de 8.2122 KN.

Les réponses de la structure avec et sans l'amortisseur MR, en déplacement, vitesse et accélération sont présentées sur les figures 5.10, 5.11 et 5.12 respectivement.

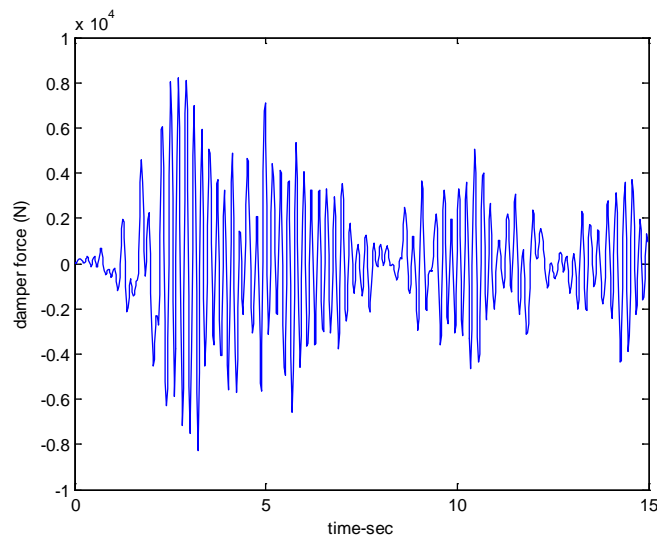


Figure 5.9. Force de l'amortisseur MR

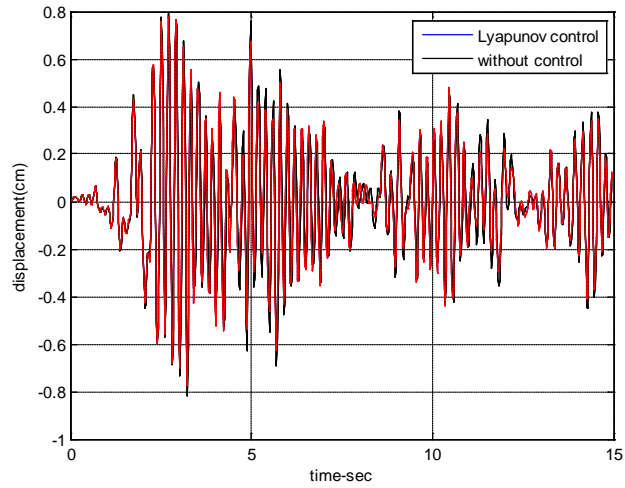


Figure 5.10. Réponse en déplacement de la structure avec et sans l'amortisseur MR

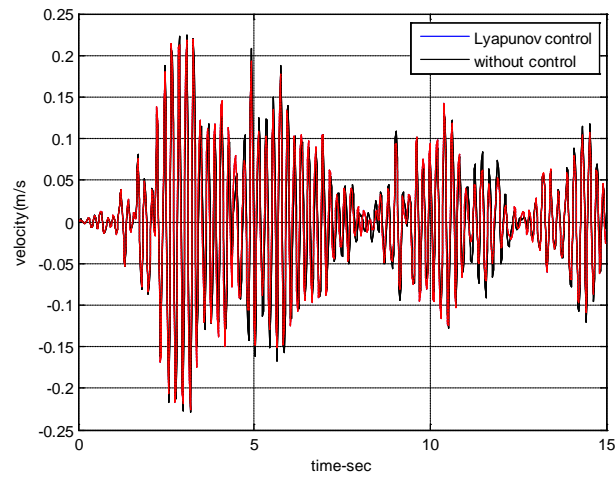


Figure 5.11. Réponse en vitesse de la structure avec et sans l'amortisseur MR

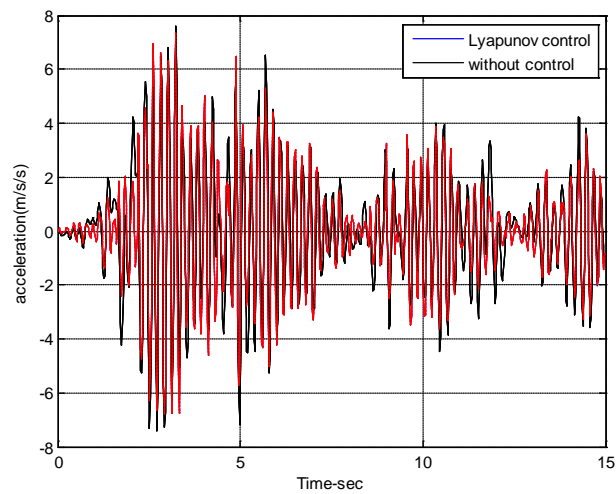


Figure 5.12. Réponse en accélération de la structure avec et sans l'amortisseur MR

D'après les résultats du tableau 5.2, la réduction de la réponse maximale en déplacement, accélération et vitesse est de 4.87%, 3.28% et 1.44% respectivement.

On peut noter que cette réduction des réponses obtenue avec l'amortisseur MR est moins importante par rapport à la réduction des réponses obtenue avec l'algorithme développé sans tenir compte des caractéristiques des systèmes de contrôle. Néanmoins, on peut expliquer cette baisse de réduction en fonction de la valeur du courant électrique appliqué et les caractéristiques de l'amortisseur. En effet, pour obtenir ces résultats on a appliqué la première méthode donnée pour la détermination de la tension électrique (voltage) à appliquer sur l'amortisseur et, il se trouve que pour cette méthode, le voltage à appliquer est, soit le voltage maximal V_{max} , soit 0. D'après l'équation (23), le terme entre parenthèses est toujours négatif, donc le voltage ou bien la tension électrique à appliquer est de 0. Alors que, jusqu'à la saturation magnétique, la force dans l'amortisseur augmente proportionnellement avec le courant électrique.

En comparant la force de contrôle obtenue dans le chapitre 4 avec la force de l'amortisseur obtenue avec un voltage minimal (voltage 0), on constate que dans le premier cas, la force est plus importante. La valeur maximale de la force dans le premier cas est de 91.788 KN, alors que dans le second cas elle est de 8.2122 KN.

6. Conclusion

Ce chapitre, est une application de l'algorithme de Lyapunov pour un cas de contrôle semi actif en utilisant l'amortisseur magnéto-rhéologique. Pour cette application, le modèle de Bouc-Wen avec des paramètres optimisés proposés par Ali Farauque [81] a été choisi.

L'application de la méthode de Lyapunov pour l'amortisseur magnéto-rhéologique est intéressante mais, une comparaison avec d'autres résultats obtenus avec d'autres algorithmes de contrôle serait encore plus intéressant.

Le choix de la méthode à utiliser pour la détermination de la tension électrique à appliquer pour que l'amortisseur génère la force de contrôle nécessaire est important.

Conclusions et Perspectives

La conception d'une structure doit assurer la sécurité (équilibre, résistance et stabilité) et l'aptitude au service (rigidité) sous l'effet des charges qui lui sont appliquées. Les charges appliquées sur une structure, pendant sa durée de vie, peuvent être statiques ou dynamiques. Par conséquent, la réponse de la structure peut être une déformation ou une vibration respectivement, en fonction de la nature de la charge appliquée. Pour leur protection, avec l'approche traditionnelle, les structures sont conçues avec une résistance suffisante, pour reprendre les charges, et une capacité à se déformer d'une manière ductile. Cependant, face à certains chargements dynamiques et aux exigences de confort et de fiabilité de plus en plus grandes, surtout pour certaines catégories de structures, cette approche a montré ses limites. Ces dernières années ont vu l'émergence de nombreux développements dans le domaine des structures dites intelligentes, c'est-à-dire des structures intégrant des capteurs et des actionneurs couplés à un ordinateur en temps réel pour réagir aux charges extérieures. Ce concept est connu dans le domaine du génie civil sous l'appellation de contrôle des structures. Cette innovation offre une alternative à la méthode traditionnelle pour la protection dynamique des structures. Cependant, l'élément clé pour la réussite de l'application technique de ce concept est le développement d'algorithmes efficaces de contrôle.

L'objectif principal de ce travail de thèse était de développer un algorithme de contrôle qui répond aux critères de performance, de robustesse et de stabilité en se basant sur la méthode de Lyapunov.

Le premier chapitre de cette thèse a été consacré à un descriptif des différents systèmes utilisés pour les différents types de contrôle. Selon leur nature dissipative et leur nécessité ou non d'énergie externe pour leur fonctionnement, ces systèmes sont classés en quatre types : passif, actif, semi actif et hybride. Pour reprendre les charges extérieures, ces systèmes s'y opposent de manière contrôlée en produisant des forces adaptées.

Les systèmes passifs sont caractérisés par leur capacité de déplacer la fréquence de la structure ou par leur capacité de dissiper de l'énergie par plusieurs mécanismes comme la déformation plastique des métaux et le phénomène de frottement. Ces systèmes développent des forces de contrôle aux points de leur attachement dont l'amplitude et la direction sont déterminées par le mouvement relatif de ces points d'attache. En revanche, l'amplitude et la direction des forces développées par les systèmes actifs sont déterminées

par le contrôleur en fonction des informations enregistrées par les capteurs et l'algorithme de contrôle.

Les analyses effectuées dans le chapitre 2 montrent que :

- les systèmes de contrôle peuvent réduire la réponse sismique d'une structure par l'un des concepts suivants :
 - réduire l'accélération du sol $\ddot{x}_g(t)$,
 - augmenter le coefficient d'amortissement ξ ,
 - éviter le phénomène de résonance en élargissant la différence entre la fréquence de la structure ω et celle du chargement ϖ .
- L'effet du contrôle est d'apporter de l'amortissement et de la rigidité à la structure, c'est-à-dire modifier les paramètres de la structure.

Du point de vue mathématique, un système de contrôle est un système dynamique qui dépend d'un paramètre dynamique qui est le contrôle. Pour le modéliser, on peut utiliser les représentations d'état, traitées dans le chapitre 3. Un modèle d'état décrit le comportement d'un système dynamique par un ensemble d'équations différentielles et l'analyse a lieu dans le domaine temporel.

Un autre point qui a été traité aussi dans le chapitre 3 est la stabilité des systèmes de contrôle. La notion de stabilité constitue une problématique majeure dans plusieurs domaines tels que les mathématiques, la physique ainsi que le domaine du contrôle.

Une structure de génie civil est généralement stable avant d'introduire le système de contrôle. En revanche, il faut assurer la stabilité du système en boucle fermée.

Pour un contrôle par retour d'état, la stabilité du système est caractérisée par les valeurs propres du système en boucle fermée (A-BG). Toutefois cette méthode nécessite la résolution de l'équation différentielle régissant le système, chose qui n'est pas toujours facile.

Pour l'analyse de la stabilité, on s'est référé dans ce travail à la théorie de Lyapunov connue sous le nom de méthode directe car elle ne nécessite pas la résolution de l'équation différentielle.

Cette méthode est basée sur la définition d'une fonction définie positive, appelée fonction candidate de Lyapunov qui est décroissante.

Dans le cas général, le choix de la fonction de Lyapunov n'est pas simple, Il n'existe pas de méthodes constructives pour des fonctions de Lyapunov. En général, les formes quadratiques sont les plus utilisées.

La méthode directe de Lyapunov donne une condition suffisante de stabilité mais elle ne permet pas de guider l'utilisateur dans le choix de la fonction et ne permet pas non plus de conclure si on ne trouve pas une telle fonction.

L'utilisation des fonctions de Lyapunov se révèle être un atout pour le développement des lois de contrôle stabilisantes.

Dans ce travail de thèse, on a développé une loi de contrôle par retour d'état basée sur la méthode directe de Lyapunov, objet du chapitre 4. Cette loi de contrôle s'applique sur des structures à un seul degré de liberté soumise à une excitation sismique.

Une fonction quadratique définie positive a été proposée comme fonction candidate de Lyapunov. La loi de contrôle a été déterminée de manière à garder la dérivée de la fonction candidate toujours négative.

La mise en œuvre numérique de la formulation de la loi de contrôle a été réalisée avec le langage Matlab.

A travers des simulations numériques sur un exemple de structure soumis à des chargements sismiques, on a testé l'efficacité de l'algorithme. Pour la validation de l'algorithme développé, nous avons fait une comparaison des résultats obtenus avec d'autres résultats obtenus sur la même structure contrôlée avec un algorithme qui a déjà fait ses preuves. Cet algorithme de comparaison est l'algorithme linéaire quadratique (LQR)

Dans le chapitre 5, l'application de cet algorithme pour un amortisseur semi actif qui est l'amortisseur magnéto-rhéologique a été réalisée. Le modèle choisi pour la simulation du comportement de l'amortisseur est le modèle de Bouc-Wen.

Perspectives

A l'issue de ce travail, plusieurs perspectives peuvent être dégagées :

- Application de cette loi de contrôle sur d'autres systèmes semi actifs et actifs,
- Faire l'extension de la fonction de Lyapunov, par conséquent de la loi de contrôle à une structure à deux degrés de liberté et puis à plusieurs degrés de liberté,
- L'implémentation pratique de cet algorithme à une structure à échelle réduite
- Application au cas du contrôle stochastique.

ANNEXE A

Contrôle linéaire quadratique (LQR)

Soit un système décrit par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (\text{A1})$$

Avec $x(t)$ vecteur d'état, $u(t)$ vecteur de force de contrôle.

Le but de cet algorithme est de déterminer la matrice de gain pour un contrôle linéaire donné sous la forme suivante :

$$u(t) = -Gx(t) \quad (\text{A2})$$

Qui minimise le critère quadratique :

$$J = \frac{1}{2}x^T(t_f)Sx(t_f) + \frac{1}{2}\int_0^{t_f} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)R(t)u(t))dt \quad (\text{A3})$$

t_f est la durée de l'excitation, S et Q sont des matrices réelles symétriques semi définies positives et R est une matrice réelle symétrique définie positive. Il est supposé que les vecteurs d'état et de contrôle ne sont pas bornés. En revanche, on suppose que le vecteur d'état final $x(t_f)$ est libre et le temps final est fixé.

Rappel

Avant de continuer, il est nécessaire de rappeler les expressions de l'Hamiltonien et les conditions aux limites qui consistent en une condition de transversalité [57].

Soit un système dynamique dont le comportement est définie par une équation différentielle d'ordre un :

$$\dot{x}(t) = F(x(t), u(t), t) \quad (\text{A1}')$$

En général, le critère de performance à minimiser (ou à maximiser) pour le système définie par l'équation (A1') est donné comme suit :

$$J = h(x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} g(x(t), u(t), t) dt \quad (\text{A2}')$$

L'Hamiltonien pour les équations (A1') et (A2') est donné comme suit :

$$H = g(x(t), u(t), t) + \lambda^T [F(x(t), u(t), t)] \quad (\text{A3}')$$

La condition de transversalité est donnée par :

$$\left[\frac{\partial h}{\partial x} (x^*(t_f), t_f) - \lambda^*(t_f) \right]^T \delta x_f + [H(x^*(t_f), u^*(t_f), \lambda^*(t_f), t_f) + \frac{\partial h}{\partial t} (x^*, t_f)] \delta t_f = 0 \quad (\text{A4}')$$

Pour plus de détails, on peut se référer à la référence [58].

Les conditions nécessaires pour le régulateur linéaire quadratique sont obtenues par l'introduction de l'Hamiltonien des équations (A1) et (A3) [57].

$$H = \frac{1}{2} \left(x^T(t) Q(t) x(t) + u^T(t) R(t) u(t) \right) + \lambda^T(t) (A(t) x(t) + B(t) u(t)) \quad (\text{A4})$$

avec $\lambda(t)$ est le vecteur des multiplicateurs de Lagrange qui est appelé aussi vecteur coétat (costate vector) [58].

Les conditions nécessaires pour l'optimalité pour l'Hamiltonien :

$$\dot{x}^*(t) = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = A(t) x^*(t) + B(t) u^*(t) \quad (\text{A5})$$

$$\dot{\lambda}^*(t) = -\frac{\partial H}{\partial x} = -Q(t) x^*(t) - A^T(t) \lambda^*(t) \quad (\text{A6})$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0 = R(t) u^*(t) + B^T(t) \lambda^*(t) \quad (\text{A7})$$

Il faut noter que pour un temps final fixé, les variations finales correspondantes sont nulles ($\delta t_f = 0$), et le premier terme de la condition de transversalité (équation A4') devient donc comme suit :

$$\lambda^*(t_f) = \frac{\partial h}{\partial x} (x^*(t_f), t_f) = S x^*(t_f) \quad (\text{A8})$$

A partir de l'équation (A7), on peut avoir l'expression du contrôle optimal en fonction du vecteur coétat :

$$u^*(t) = -R^{-1}(t) B^T(t) \lambda^*(t) \quad (\text{A9})$$

D'après la condition finale (équation A8), le retour d'état complet pour le contrôle est déterminé en supposant que la solution du vecteur coétat est sous la forme suivante :

$$\lambda^*(t) = P(t) x^*(t) \quad (\text{A10})$$

Avec $P(t)$ est une matrice, qui varie en fonction du temps, à déterminer.

En dérivant l'équation (A10) par rapport au temps, on aura :

$$\dot{\lambda}^*(t) = \dot{P}(t)x^*(t) + P(t)\dot{x}^*(t) \quad (\text{A11})$$

En substituant les équations (A5), (A6), (A9) et (A10) à l'équation (A11), on aura l'équation différentielle matricielle de Riccati (matrix differential Riccati equation) [38] comme suit :

$$\dot{P}(t) = -A^T(t)P(t) - P(t)A(t) + P(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)P(t) - Q(t) \quad (\text{A12})$$

La solution $P(t)$ (une matrice symétrique semi définie positive) appelée matrice de Riccati, est sujette à la condition limite de l'équation (A8) suivante :

$$P(t_f) = S \quad (\text{A13})$$

En substituant l'équation (A10) à l'équation (A9), on aura la force du contrôle optimal

$$\begin{aligned} u^*(t) &= -R^{-1}(t)B^T(t)P(t)x(t) \\ &= -G(t)x(t) \end{aligned} \quad (\text{A14})$$

Il faut noter que les mesures (estimations) de toutes les variables d'état sont nécessaires pour la réalisation de la loi de contrôle optimal. Pour cette raison, une telle loi est connue sous l'appellation de loi de contrôle par retour d'état complet [58].

Cas particulier

Le cas spécial le plus important du problème du régulateur linéaire est celui vérifiant les conditions suivantes :

- Le système est complètement contrôlable,
- Les matrices A , B , Q et R sont des matrices constantes (ne dépendent pas du temps),
- La matrice de pondération de l'erreur de l'état final est nulle, $S = 0$,
- Le temps final t_f est infini.

Le problème consiste alors à trouver une loi de contrôle optimal qui minimise le critère de performance suivant :

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (\text{A15})$$

Pour un système représenté par l'équation du mouvement suivante :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(t_0) = x_0 \quad (\text{A16})$$

Dans ce cas, la loi de contrôle minimisant le critère quadratique pour une durée de temps infini est stationnaire, et la matrice de gain est constante [58],

$$\begin{aligned} u^*(t) &= -Gx(t) \\ G &= -R^{-1}B^T P \end{aligned} \tag{A17}$$

La matrice P , solution de l'équation algébrique non linéaire suivante :

$$A^T P + PA - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \tag{A18}$$

Cette équation est dite équation algébrique de Riccati (algebraic Riccati equation, ARE)

Références Bibliographiques

- [1] **Franklin Y. Cheng, Hongping Jiang, kangyu Lou**, Smart structures: innovative systems for seismic response control, (2008) *CRC Press*.
- [2] **M. D. Symans, M. C. Constantinou**, Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state of the art review, *Engineering Structures* (1999), 21, 469-487.
- [3] **N. R. Fisco, H. Adeli**, Smart structures: Part I: Active and semi-active control, *Scientia Iranica (2011), Transaction A: Civil Engineering*, 18(3), 275-284.
- [4] **S.F. Mirfakhraei**, Active toggle and scissor jack damper brace systems for structural vibration control, *PhD thesis (November 2015)*, RMIT University.
- [5] **Y. Arfiadi**, Optimal passive and active control mechanisms for seismically excited buildings, (2000), doctoral thesis, *University of Wollongong*
- [6] **Tarek Edrees Saaed**, Structural control and identification of civil engineering structures, doctoral thesis, *Lulea University of technology* (March 2015) (www.ltu.se/sbn).
- [7] **J. T. P. Yao**, Concept of structural control, *Journal of Structural Division, ASCE* (1972), 98(7), 1567-1574.
- [8] **A. Yanik, U. Aldemir, M. Bakioglu**, Energy-based evaluation of seismic response of structures with passive and active systems, *Earthquake Resistant Engineering Structures, WIT Transactions on the Built Environment* (2011), 120, 67-78
- [9] **Nishtani A, Inoue Y**, Overview of the application of active/semi active control to building structures in Japan, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (2001), 30, 1565-1574, DOI:10.1002/eqe.81.
- [10] **S. Y. Chu, T. T. Soong, A. M. Reinhorn, R.J. Helgeson, M.A. Riley**, Integration issues in implementation of structural control systems, *Journal of Structural Control* (2002), 9, 31-58, DOI: 10.1002/stc.2
- [11] **T. Kobori, N. Koshika, K. Yamada, Y. Ikeda**, Seismic response controlled structure with mass driver system. Part I: Design, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (1991), 20, 133-149.
- [12] **T. Kobori, N. Koshika, K. Yamada, Y. Ikeda**, Seismic response controlled structure with mass driver system. Part II: Verification, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (1991), 20, 151-166.
- [13] **S. Korkmaz**, A review of active structural control: challenges for engineering informatics (2011), *Computers and Structures* 89, 2113-2132.
doi: 10.1016/j.compstruc.2011.07.010
- [14] **E. Trélat**, Contrôle optimal : théorie et applications, Vuibert (2008), ISBN-10 :2711722198
- [15] **N. G. Pnevmatikos, C. J. Gantes**, Control strategy for mitigating the response of structures subjected to earthquake actions, *Journal of Engineering Structures* (2010), 32, 3616-3628, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.08.006

- [16] **TT Soong, BF Spencer, JR,** Active, semi-active and hybrid control of structures, 12WCEE (2000) *12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [17] **N. R. Fisco, H. Adeli,** Smart structures: Part II: Hybrid control and control strategies, *Scientia Iranica* (2011), Transaction A: Civil Engineering, 18(3), 285-295.
- [18] J. M. Kelly, *Earthquake-resistant design with rubber* (1997), Springer, ISBN 3-540-76131-4
- [19] **M.C. Constantinou, T.T. Soong, G.F. Darguch,** Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit, Monograph Series, *MCEER* (1998). ISBN 0-9656682-1-5(<http://mceer.eng.buffalo.edu>).
- [20] **F. Achour,** Influence des isolateurs sismiques sur la réponse dynamique des bâtiments, *Mémoire de Magister* (2004), Ecole Nationale Supérieure des travaux Publics (ENSTP).
- [21] **C. S. Teodorescu,** Commande de systèmes d'isolation antisismique mixte, Thèse de Doctorat (2013), *Université Paris-Sud*, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00904280>
- [22] **L. Su, G. Ahmadi, I. G. Tadjbakhsh,** Comparative study of base isolation systems, *Journal of Engineering Mechanics* (1989), 115(9), 1976-1991.
- [23] **A. Mokha, M.C. Constantinou, A.M. Reinhorn,** Teflon bearings in aseismic base isolation: experimental studies and mathematical modeling, (1988), Technical report NCEER-88-00-38, University at Buffalo.
- [24] **A. Mokha, M.C. Constantinou, A.M. Reinhorn,** Teflon bearings in base isolation, part I: Testing, *Journal of Structural Engineering, ASCE* (1990), 116 (2), 438-454.
- [25] **F. Sadek, B. Mohraz, A. W. Taylor and R. M. Chung,** Passive energy dissipation devices for seismic applications, (NISTIR 5923), Building and Fire Research laboratory (November 1996), *Gaithersburg, Maryland 20899*.
- [26] **S. Thenozhi, W. Yu,** Advances in modeling and vibration control of building structures, *Annual Reviews in Control* (2013), 37, 346-364, <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2013.09.012>
- [27] **S. Chakraborty, R. Debbarma, G. C. Marano,** Performance of tuned liquid column dampers considering maximum liquid motion in seismic vibration control of structures, *Journal of Sound and Vibration* (2012), 331, 1519-1531. Doi:10.1016/j.jsv.2011.11.029
- [28] **Kambiz Esteki,** Developing new analytical and numerical models for MR fluid dampers and their application to seismic design of buildings, A ph.D thesis, *Concordia University*, Montréal Canada (June 2014).
- [29] **Gang Li, Hong-Nan Li,** Experimental study and applications in steel structure of dual functions metallic damper, *Journal of Advanced Steel Construction* (2013), 9(3), 247-258.

- [30] **Hong-Nan Li, Gang Li, Su-Yan Wang**, Study and application of metallic yielding energy dissipation devices in buildings, *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering*, July 21-25, 2014, Anchorage, Alaska.
- [31] **L.M. Moreschi**, seismic design of energy dissipation systems for optimal structural performance, *Doctoral thesis* (2000), Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [32] **Bahman Farokhi, Ramin Ghoochi**, Retrofitting steel special moment frame using ADAS metallic yielding dampers, *Nature and Science* (2014), 12(1), 106-113.
<http://www.sciencepub.net/nature>
- [33] **Anissa Allani**, Conception et optimisation d'amortisseurs à masse accordée pour les structures du génie civil, thèse de doctorat (novembre 2015), *Université Paris-Est*.
- [34] **Benjamin Morin**, Modélisation de liaisons flexibles amortissantes en élastomères pour la prédiction du comportement dynamique de systèmes complexes, thèse de doctorat (novembre 2016), *Conservatoire national des Arts et Métiers*.
- [35] **M. D. Symans, F. A. Charney, A. S. Whittaker, M. C. Constantinou, C. A. Kircher, M. W. Johnson, R. J. McNamara**, Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments, *Journal of Structural Engineering, ASCE* (2008), 134 (1) DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(13)
- [36] **I. D. Aiken, D. K. Nims, J. M. Kelly**, Comparative study of four passive energy dissipation systems, *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering* (september 1992), 25(3).
- [37] **M. Dolce, R. Marnetto**, Passive seismic devices based on shape memory alloys, *12WCEE* (2000) *12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [38] **G. Song, N. Ma, H. N. Li**, Applications of shape memory alloys in civil structures, *Journal of Engineering Structures* (2006), 28, 1266-1274, doi: 10.1016/j.engstruct.2005.12.010
- [39] **Fatma Jemal Ellouze**, Modélisation du comportement thermomécanique d'un alliage à mémoire de forme à base de fer type Fe-Mn-Si, thèse de doctorat (novembre 2009), *Université Nancy I*.
- [40] **O. Ben Mekki**, Amortissement semi actif des structures flexibles, (mai 2006), thèse de doctorat, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*,
<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00002570>
- [41] **Rodolfo Villamizar Mejia**, Robust control of systems subjected to uncertain disturbances and actuator dynamics, doctoral thesis (March 2005), *Universitat de Girona*.
- [42] **Hongjin Kim, M. S.**, Wavelet-based adaptive control of structures under seismic and wind loads, doctoral thesis (2002), *Ohio State University*.
- [43] **L. R. Barroso**, Performance evaluation of vibration controlled steel structures under seismic loading, *PhD thesis (march 1999)*, Stanford University
- [44] **J. N. Foulc, F. Ayela, O. Tillement**, Les fluides électro-rhéologiques, 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes (septembre 2005).

- [45] **J. Lozada, M. Hafez, X. Boutillon**, Les fluides magnéto-rhéologiques en tant que frein haptique : application au rendu de toucher de piano, matériau et Technique (2009) 97, 75-80, DOI : 10.1051/mattech/2009015, www.mattech-journal.org
- [46] **A. K. Chopra**, Dynamics of structures – Theory and applications to Earthquake Engineering (1995), Prentice – Hall, Inc, ISBN 0-13-855214-2.
- [47] **P. Khac Haoan**, vulnérabilité et spectres de plancher des structures sismiquement isolées, *thèse de doctorat (septembre 2010)*, Ecole Polytechnique
- [48] **K. J. Astrom, R. M. Murray**, Feedback systems: An introduction for scientists and Engineers (2008), *Princeton University press*.
- [49] **T.T. Soong, M. EERI, S.F. Masri and G.W. Housner, H.M. EERI**, An overview of active structural control under seismic loads, *Earthquake Spectra* (1991), 7 (3), 483-505.
- [50] **W. K. Gawronski**, Advanced structural dynamics and active control of structures (2004), Springer, ISBN 0-387-40649-2
- [51] **D.J. Inman**, Vibration with control, *John Wiley (2006)*, ISBN: 0-470-01051-7
- [52] **E. E. Matheu**, Active and semi active control of civil structures under seismic excitation, *PhD thesis (1997)*, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [53] **Jansen LM, Dyke SJ**, Semi active control strategies for MR dampers: comparative study, *Journal of Engineering Mechanics* (2000), 126(8): 795-803.
- [54] **F. Amini, R. Vahdani**, Modern control design of seismically excited tall buildings with uncertain dynamic characteristics, *International Journal of Civil engineering* (2007) 5(3).
- [55] **M.S. Nengmou Wang**, Modified sliding mode control algorithm for vibration control of linear and nonlinear civil structures, *master thesis (2011)* Ohio State University.
- [56] **Lee SH, Min KW, Lee YC**, Modified sliding mode control using a target derivative of the Lyapunov function, *Engineering Structures* (2005), 27, 49-59, DOI:10.1016/j.engstruct.2004.08.010.
- [57] **J. L. Junkins, Y. Kim**, Introduction to Dynamics and control of flexible structures, (1993), *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. Publisher*, ISBN 1-56347-054-3
- [58] **M. Malisoff, F. Mazenc**, Constructions of strict Lyapunov Functions, *Springer (2009)*, ISSN 0178-5354, ISBN 978-1-84882-534-5, DOI: 10.1007/978-1-84882-535-2
- [59] **M. Jungers, Y. Chitour**, Commande des processus : Représentations d'état, Notes de cours, *version provisoire de novembre 2005, Master IST1 et IFIPSEI2- UE majeures 421-422*, Université Paris-Sud 11-ENS de Cachan.
- [60] **N. Yeganefar**, Définitions et analyse de stabilité pour les systèmes à retard non linéaires, *thèse de doctorat (2006)*, *Ecole Centrale de Lille*.
- [61] **M. Corless**, Introduction to dynamic systems, *network mathematics graduate programme, July 2011*, School of Aeronautics and Astronautics, Perdue University West Lafayette Indiana, corless@perdue.edu

- [62] **Ünal ALDEMIR, Mehmet BAKIOGLU**, Semi active control of earthquake-excited structures, *Turk Journal Eng Environ Sci* (2000), 24, 237-246.
- [63] **Arfiadi Y, Hadi MNS**, Continuous bounded controllers for active control of structures, *Computer and Structures* (2006), 84, 798-807, DOI:10.1016/j.compstruc.2006.01.001.
- [64] **Zaccarian L, Nesic D, Teel A R**, Analytical and numerical Lyapunov functions for SISO linear control systems with first order reset elements, *International Journal of Robust and Nonlinear control*, (2011), 21, 1134-1158.
- [65] MATLAB, the language of technical computing, the Mathworks Inc (2009).
- [66] **Djajakesukma SL, Samali B, Nguyen H**, Study of A semi-active stiffness damper under various earthquake inputs. *Earthquake Engineering and Structural dynamics*, (2002), 31, 1757-1776, DOI:10.1002/eqe.181
- [67] **Ohtori Y, Christenson RE, Spencer Jr Bf, Dyke SJ**, Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, (2004), 130(4), 366- 385, DOI: 10.1061/ (ASCE) 0733-9399(2004)130:4(366).
- [68] **C. Wu, Y. Lin, D. S. Hsu**, performance test and mathematical model simulation of MR damper, *The 14th world Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008*, Beijing, China.
- [69] **Y. Kim, R. Langari, S. Hurlebaus**, Semi active nonlinear control of building with a magnetorheological damper system, *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing* (2009), 23, 300-315, doi: 10.1016/j.ymssp.2008.06.006
- [70] **Shaikh Faruque Ali**, Semi active control of earthquake induced vibrations in structures using MR dampers: Algorithm development, experimental verification and Benchmark applications, *PhD thesis (2008)*, Indian Institute of science, BANGALORE-560012.