

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : de génie civil est hydraulique

Ref : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة المدنية والري  
المرجع: .....

Mémoire présenté en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Magister en génie civil**

**Option : Modélisation des matériaux et structures**

**MODELISATION DE SYSTEME D'ISOLATION  
PARASISMIQUE POUR LE CONTROLE DE LA  
REPONSE DYNAMIQUE DES STRUCTURES**

Présenté par :

**DJELLOULI Lynda**

Soutenu publiquement le 22/11/2012

**Devant le jury composé de :**

<b>Dr. MELLAS Mekki</b>	<b>Professeur</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr. OUNIS Abdelhafid</b>	<b>Maître de Conf. 'A'</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr. CHEBILI Rachid</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr. HAMADI Djamel</b>	<b>Maître de Conf. 'A'</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Biskra</b>

# *Dédicace*

*A mon époux,*

*A mes chers enfants Meríam (Manína),  
Mohamed(Maníno) et Zeíneb (Syrína) (Je vous  
demande pardon),*

*A mes parents et mes frères et sœurs,*

*A mes belles mères et ma belle sœur,*

*A mes beaux frères,*

*A tous les amis que j'aime et qui m'aiment*

*Je vous dédie ce mémoire.*

*Merci pour votre Amour et votre Soutien*

## *REMERCIEMENTS*

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

*Je tiens à remercier vivement et sincèrement mon encadreur **Dr. Ounis Abdelhafid** qui a contribué et a assuré la direction de ce travail, pour tout le soutien, les orientations et la patience qu'il a manifestée durant son encadrement tout le long de la réalisation de ce mémoire.  
Un grand merci Monsieur **Ounis** pour votre humanité et votre motivation.*

*Je tiens aussi à remercier vivement et sincèrement mon enseignant **Dr. MEFTAH Fekri** qui m'a aidée et qui nous a appris et nous a pris vers l'âme de la science.*

*Je tiens aussi à remercier vivement mon collègue monsieur **ATHAMNIA Brahim** pour toutes ses orientations et sa patience afin de réaliser ce travail.*

*Je tiens à remercier vivement mon enseignant le professeur **MELLAS Mekki** qui m'a fait le grand honneur de présider mon jury.*

*Je tiens à remercier vivement mes enseignants, le professeur **CHEBILI Rachid** et **Dr HAMADI Djamel** qui m'ont fait l'honneur d'examiner mon travail.*

*Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

## ملخص:

لتوفير حماية زلزالية عالية، تم تطوير تقنيات جديدة منها " أجهزة تبديد الطاقة ". وتعتبر عملية تبديد معظم الطاقة الزلزالية المؤثرة في الهيكل الأساسي للمباني والحد من الضرر بقدر الإمكان للعناصر الهيكلية، الهدف الرئيسي من استعمال هذه الأجهزة. في إطار هذا العمل تمت نمذجة جهاز ذو سائل لزج خطي كنظام لتبديد الطاقة لمراقبة الاستجابة الديناميكية للهياكل عند تأثير الحركة الزلزالية. كما أجريت دراسة مقارنة مع هيكل تقليدي لتحليل تأثير هذا النوع من التخماد على السلوك الديناميكي للهيكل. كما درس تأثير موقع هذه الأجهزة في الهياكل على استجابتها الديناميكية.

**الكلمات المفتاحية:** هندسة الزلازل، ديناميكية الهياكل، تبديد الطاقة، جهاز تخماد ذو سائل لزج، الإستجابة الزلزالية.

## Résumé:

Pour une protection parasismique accrue, des nouvelles technologies ont été développées. Parmi lesquelles on trouve « les dispositifs de dissipation passive d'énergie ». L'absorption d'une partie majeure de l'énergie sismique entrée dans la structure primaire des bâtiments, ainsi que la diminution autant que possible des dégâts dans les éléments structuraux constitue l'objectif principal de ces dispositifs. Dans le cadre de ce travail, on a effectué la modélisation d'un dispositif de type visqueux fluide linéaire comme système de dissipation d'énergie passive afin de contrôler la réponse dynamique des structures suite à un mouvement sismique. Une étude comparative avec une structure traditionnelle est menée pour analyser l'influence de ce type d'amortissement sur le comportement dynamique de la structure. L'effet de l'emplacement de ces dispositifs dans les structures sur leurs réponses dynamiques est également étudié.

**Mots-clés :** Génie parasismique, dynamique des structures, dissipation d'énergie, amortisseur à fluide visqueux, réponse sismique.

## Abstract:

For a seismic increased protection, new technologies have been developed among which are the "passive energy dissipation devices." The absorption of most of the seismic energy input in the primary structure of buildings and reducing as much as possible damage to structural elements is the main objective of these devices. In this work, a modeling of viscous fluid linear device is performed as passive energy dissipation system to control the dynamic response of structures due to a seismic motion. A comparative study with a traditional structure is conducted to analyze the influence of this type of damping on the dynamic behavior of the structure. The effect of the location of these devices in the dynamic response of structure is also studied.

**Keywords:** seismic engineering, dynamics of structures, energy dissipation, viscous fluid damper, seismic response.

# SOMMAIRE

Dédicace .....	I
Remerciements .....	II
Résumé .....	III
Sommaire .....	IV
Liste des Tableaux .....	VII
Liste des figures .....	VIII
Liste des symboles .....	XIV
Liste des abréviations .....	XVI
<b>Introduction</b> .....	01
<b>Chapitre 1 : Vibration des systèmes à un degré de liberté</b>	
1.1 Introduction .....	04
1.2 Loi de comportement de l'oscillateur .....	04
1.3 Amortissement .....	08
1.3.1 Différents types d'amortissement .....	09
A. Amortissement visqueux .....	10
B. Amortissement hystérétique .....	12
1.4 Equation de l'équilibre dynamique .....	13
1.4.1 Méthode directe .....	13
1.4.2 Méthode des puissances virtuelles .....	14
1.4.3 Méthode énergétique .....	15
1.5 Formulation réduite de l'équation d'équilibre .....	15
1.6 Vibrations libres .....	17
1.6.1 Vibration non amorti .....	17
1.6.2 Vibration amorti .....	18
1.7 Réponse sismique du système .....	20
1.7.1 Mise en équation .....	20
<b>Chapitre 2 : Bilan énergétique dans les structures et systèmes de protection</b>	
2.1 Introduction .....	24
2.2 Bilan énergétique .....	27
2.3 Système de protection sismique .....	29
2.3.1 Système de contrôle passif .....	29
2.3.1.1 Contrôle passif avec isolation à la base (les isolateurs sismiques) .....	30
2.3.1.1.1 Isolateur en élastomère d'amortissement élevé (HDR) .....	30
2.3.1.1.2 Les Systèmes en Caoutchouc Naturel et Synthétique de Faible amortissement .....	31
2.3.1.1.3 Isolateur de base en élastomère avec barreau de plomb (LRB) .....	32
2.3.1.1.4 Isolateur en pendule de friction (FPS) .....	33
2.3.1.2 Contrôle passif avec dissipateurs d'énergie .....	34
2.3.1.2.1 Dissipateurs hystérétiques .....	35
2.3.1.2.1.1 Les amortisseurs métalliques .....	35
A- Le dispositif EDU .....	36
B- Dispositifs d'extrusion de plomb (LED) .....	36
C- Le dispositif d'amortissement et de rigidité supplémentaire (ADAS) .....	38
D- Amortisseur de plaques triangulaire (TADAS) .....	38

2.3.1.2.1.2 Les amortisseurs de friction .....	39
A- L'amortisseur de Sumitomo .....	40
B- L'amortisseur de Pall .....	40
C- Amortisseur boulonné encoché (Slotted-bolted damper) .....	41
D- La contrainte de dissipation d'énergie (EDR) .....	42
2.3.1.2.2 Amortisseur visqueux élastique .....	43
2.3.1.2.2.1 Amortisseur visqueux élastique fluide .....	44
2.3.1.2.2.2 Amortisseur visqueux élastique solide .....	45
2.3.1.2.3 Amortisseur à fluide visqueux .....	46
2.3.1.3 Contrôle passif avec système inertiel couplé (Tuned Mass Damper) .....	48
2.3.2 Systèmes de contrôle actifs .....	52
2.3.2.1 Amortisseur de contreventement actif .....	53
2.3.2.2 Amortisseur de tendeur actif .....	53
2.3.2.3 Amortisseur de masse active (AMD) .....	54
2.3.3 Système de contrôle hybride .....	56
2.3.3.1 Isolation de base hybride (Hybrid Base Isolation) .....	57
2.3.3.2 Amortisseur de masse hybride (HMD) .....	58
2.3.4 Système de contrôle semi active .....	59
2.3.4.1 Amortisseur à orifice variable .....	60
2.3.4.2 Amortisseur à friction variable .....	61
2.3.4.3 Amortisseur à fluide contrôlable .....	61
<b>Chapitre 3 : Dissipateur d'énergie à fluide visqueux</b>	
3.1 Introduction .....	64
3.2 Description du dissipateur d'énergie à fluide visqueux .....	67
3.3 Réponse dynamique du dissipateur d'énergie à fluide visqueux .....	71
3.4 Dimensionnement du dissipateur d'énergie .....	77
3.5 Système structural avec dissipateurs d'énergie .....	79
3.5.1 Système à un degré de liberté .....	79
3.5.2 Système à plusieurs degrés de liberté .....	80
<b>Chapitre 4 : Contrôle de la réponse dynamique des structures</b>	
4.1 Introduction .....	84
4.2 Élément LINK .....	84
4.3 Description des structures .....	85
4.4 Modélisation des amortisseurs à fluide visqueux .....	86
4.5 Emplacement des amortisseurs à fluide visqueux .....	87
4.6 Excitations sismiques .....	89
4.7 Réponses sismiques .....	91
4.7.1 Structure à cinq niveaux .....	91
4.7.1.1 Déplacements .....	91
4.7.1.2 Effet du coefficient d'amortissement sur le déplacement du dernier niveau .....	93
4.7.1.3 Vitesses .....	95
4.7.1.4 Accélérations .....	97
4.7.1.5 Efforts tranchants à la base .....	100
4.7.1.6 Comportement hystérétique .....	103
4.7.2 Structure à dix niveaux .....	105
4.7.2.1 Déplacements .....	105
4.7.2.2 Efforts tranchants à la base .....	113
4.7.2.3 Comportement hystérétique .....	114

4.7.3 Structure à vingt niveaux .....	117
4.7.3.1 Déplacements .....	117
4.7.3.2 Vitesses .....	123
4.7.3.3 Accélérations .....	125
4.7.3.4 Efforts tranchants à la base .....	127
4.7.3.5 Comportement hystérétique .....	130
4.7.4 Interprétation des résultats .....	133
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>135</b>
<b>Référence bibliographique</b> .....	<b>138</b>
<b>Annexe</b> .....	<b>143</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Dimensionnement du dissipateur d'énergie à fluide visqueux .....	78
Tableau 4.1 : Sections des poteaux des différentes structures .....	85
Tableau 4.2 : Pourcentage de réductions des résultats du dernier niveau de la structure avec et sans amortisseur à fluide visqueux .....	99
Tableau 4.3 : Pourcentages de réduction des efforts tranchants à la base pour différents taux d'amortissement effectif .....	102
Tableau 4.4 : Effet de l'emplacement des dissipateurs sur le déplacement du dernier niveau pour un taux d'amortissement effectif $\xi_{eff}=20\%$ sous différents enregistrements sismiques .....	113
Tableau 4.5 : Effet de l'emplacement des dissipateurs sur les efforts tranchants à la base pour un taux d'amortissement effectif $\xi_{eff}=20\%$ sous différents enregistrements sismiques .....	114
Tableau 4.6 : Pourcentage de réductions des résultats du dernier niveau de la structure avec et sans amortisseurs à fluide visqueux .....	127
Tableau 4.7 : Pourcentages de réduction des efforts tranchants à la base pour différents taux d'amortissement effectif .....	128
Tableau 4.8 : Effet de l'emplacement des dissipateurs sur les efforts tranchants à la base sous les différents enregistrements sismiques .....	130



## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Système à un degré de liberté .....	04
Figure 1.2 : Relation force-déplacement .....	05
Figure 1.3 : Vibration libre avec amortissement .....	05
Figure 1.4 : Amortissement équivalent .....	07
Figure 1.5 : Cycle elliptique (force en fonction du déplacement) .....	09
Figure 1.6 : Cycle de structure à comportement non linéaire (élastoplastique – glissement) .....	12
Figure 1.7 : Force appliqué au système .....	14
Figure 1.8 : Système linéaire .....	16
Figure 1.9 : vibration libre d'un système avec amortissement critique, sur critique et sous critique .....	20
Figure 1.10 : Système sous excitation sismique .....	21
Figure 1.11 : Forces appliquées sur le système .....	21
Figure 2.1 : Les catégories des systèmes de protection sismique .....	29
Figure 2.2 : photo et schéma d'un isolateur en élastomère d'amortissement élevé (HDR)	31
Figure 2.3 : Isolateur de base en élastomère avec barreau de plomb (LRB) .....	32
Figure 2.4 : isolateur en pendule de friction (FPS) .....	33
Figure 2.5 : principes de fonctionnement d'un isolateur FPS .....	34
Figure 2.6 : Les boucles idéalisées de force-déplacement du dispositif hystérétique.....	35
Figure 2.7 : Dispositif en forme de C (à gauche) et dispositif EDU (à droite) .....	36
Figure 2.8 : Deux exemples des Dispositifs d'extrusion de plomb .....	37
Figure 2.9 : Amortisseur ADAS .....	38
Figure 2.10 : Amortisseur TADAS, a) les plaques triangulaires b) les plaques soudées....	39
Figure 2.11 : L'amortisseur de Sumitomo .....	40
Figure 2.12 : L'amortisseur de Pall et son installation .....	41
Figure 2.13 : Amortisseur boulonné encoché (Connection de Fitzgerald (1989)) .....	42
Figure 2.14 : Vues extérieure et intérieure de la contrainte de dissipation d'énergie .....	43
Figure 2.15 : La boucle force-déplacement d'un dissipateur d'énergie visqueux-élastique	43
Figure 2.16 : Modèle de Maxwell .....	44
Figure 2.17 : a) amortisseur à fluide de récipient cylindrique b) le mur d'amortissement visqueux .....	45
Figure 2.18 : Amortisseur visqueux élastique solide .....	46
Figure 2.19 : Modèle de kelvin .....	46
Figure 2.20 : Amortisseur à fluide visqueux .....	47

Figure 2.21 : La boucle force-déplacement d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux	47
Figure 2.22 : L'amortisseur de Citicorp (New York)	49
Figure 2.23 : Le bâtiment de Citicorp	49
Figure 2.24 : TMD pendulaire de la tour de Taipei101	50
Figure 2.25 : Amortisseur à mass accordé sur une structure	51
Figure 2.26 : Structure avec control actif	53
Figure 2.27 : Amortisseur de tendeur actif	54
Figure 2.28 : Conception du système de contrôle AMD	55
Figure 2.29 : Schéma de Constitution des systèmes de contrôle (a) AMD et (b) HMD	55
Figure 2.30 : Bâtiment de Kyobashi Seiwa avec le système AMD	56
Figure 2.31 : Le bâtiment de Sendagaya	58
Figure 2.32 : Structure avec contrôle semi actif	59
Figure 2.33 : Amortisseur à orifice variable	60
Figure 2.34 : Première exécution à grande échelle du contrôle de construction aux Etats-Unis	60
Figure 2.35 : Photo et schéma d'un actionneur piézo-électrique	61
Figure 2.36 : Amortisseur à fluide contrôlable	62
Figure 2.37 : Amortisseur électro- rhéologique (ER)	62
Figure 2.38 : Amortisseur magnéto- rhéologique (MR)	62
Figure 3.1 (a-b): Relation Force-Déplacement pour l'amortisseur visqueux fluide	66
Figure 3.2 : Dissipateur d'énergie à fluide visqueux	68
Figure 3.3 : Fonctionnement d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux	69
Figure 3.4 : Dissipateurs visqueux, reliant les diagonales avec les poteaux en forme de V inversé	70
Figure 3.5 : Dissipateurs visqueux, situés sur la diagonale	71
Figure 3.6 : Dissipateurs visqueux, situés à la base de l'ouvrage	71
Figure 3.7 : Relation vitesse-force d'amortissement	72
Figure 3.8 : Déphasage de la vitesse par rapport au déplacement	73
Figure 3.9 : Réponse d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux linéaire pour différentes valeurs de la constante d'amortissement ( $C_D$ )	74
Figure 3.10: Réponse d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux non linéaire pour différentes valeurs de ( $\lambda$ ) et la même valeur de ( $C_D$ )	75
Figure 3.11: Réponse d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux non linéaire, pour différentes valeurs de ( $\lambda$ ) et de ( $C_D$ ) tel que la force reste la même	76
Figure 3.12 : Réponse d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux linéaire en considérant une vitesse limite	77
Figure 3.13 : Amortisseur à fluide visqueux de Taylor	78
Figure 3.14 : Système de 1DDL avec amortisseur à fluide visqueux	79
Figure 3.15 : Système à NDDL avec amortisseur à fluide visqueux	81
Figure 4.1 : Vue en plan des structures	86
Figure 4.2 : Modèle de Maxwell	87
Figure 4.3 : Structure avec amortisseur visqueux fluide en diagonal	87
Figure 4.4 : Vue en plan de la structure avec l'emplacement des dissipateurs	87
Figure 4.5 : Vue en 3D de la structure à 5 niveaux : a) sans dissipateurs et b) avec dissipateurs	88

Figure 4.6 : Vue en 3D de la structure à 10 niveaux: a) sans dissipateurs et b) avec dissipateurs .....	88
Figure 4.7 : Vue en 3D de la structure à 20 niveaux: a) sans dissipateurs et b) avec dissipateurs .....	89
Figure 4.8 : Accélérogramme de la composante 140° du séisme d'El Centro avec un PGA= 0.376g .....	89
Figure 4.9 : Accélérogramme de la composante 230° du séisme d'El Centro avec un PGA= 0.436 g .....	90
Figure 4.10 : Accélérogramme de la composante 0° du séisme de Loma-Prieta avec un PGA= 0.369 g .....	90
Figure 4.11 : Accélérogramme de la composante 90° du séisme de Loma-Prieta avec un PGA= 0.178 g .....	90
Figure 4.12 : Déplacements des différents niveaux de la structure dans les deux directions sous les deux séismes, a) El Centro b) Loma Prieta .....	91
Figure 4.13 : Déplacements des différents niveaux de la structure avec et sans dissipateurs sous le séisme d'El Centro, a) sens X b) sens Y.....	92
Figure 4.14 : Déplacements des différents niveaux de la structure avec et sans dissipateurs sous le séisme de Loma-Prieta, a) sens X b) sens Y.....	92
Figure 4.15 : Comparaison des déplacements du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique d'El Centro a) sens X, b) sens Y.....	93
Figure 4.16 : Comparaison des déplacements du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique de Loma Prieta a) sens X, b) sens Y.....	94
Figure 4.17 : Effet de la variation d'amortissement du dissipateur à fluide visqueux sur le déplacement maximal du dernier niveau sous différents enregistrements sismiques .....	94
Figure 4.18 : Comparaison des vitesses du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique d'El Centro a) sens X, b) sens Y.....	95
Figure 4.19 : Comparaison des vitesses du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique de Loma Prieta a) sens X, b) sens Y.....	96
Figure 4.20 : Comparaison des accélérations du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique d'El Centro a) sens X, b) sens Y.....	97
Figure 4.21 : Comparaison des accélérations du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique de Loma-Prieta a) sens X, b) sens Y.....	98
Figure 4.22 : Comparaison des efforts tranchants à la base pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique d'El-Centro a) sens X, b) sens .....	100
Figure 4.23 : Comparaison des efforts tranchants à la base pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique de Loma- Prieta a) sens X, b) sens .....	101
Figure 4.24 : Effet de la variation du taux d'amortissement du dissipateur à fluide visqueux sur l'effort tranchant à la base sous différents enregistrements sismiques.....	102

Figure 4.25 : Boucles hystérétiques du 3 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, a) $\xi_{eff}=20\%$ et b) $\xi_{eff}=25\%$ .....	103
Figure 4.26 : Boucles hystérétiques du 3 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour a) $\xi_{eff}=20\%$ et b) $\xi_{eff}=25\%$ .....	103
Figure 4.27 : Boucles hystérétiques du 5 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour a) $\xi_{eff}=20\%$ et b) $\xi_{eff}=25\%$ .....	104
Figure 4.28 : Boucles hystérétiques du 5 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour a) $\xi_{eff}=20\%$ et b) $\xi_{eff}=25\%$ .....	104
Figure 4.29 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif Sous le séisme d'El-Centro: a) sens X, b) sens Y	105
Figure 4.30 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif Sous le séisme de Loma-Prieta : a) sens X, b) sens Y.....	105
Figure 4.31 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour $\xi_{eff}=5\%$ et $\xi_{eff}=35\%$ Sous le séisme d'El-Centro : a) sens X, b) sens Y .....	107
Figure 4.32 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour $\xi_{eff}=5\%$ et $\xi_{eff}=35\%$ sous le séisme de Loma-Prieta : a) sens X, b) sens Y .....	107
Figure 4.33 : Deuxième proposition de la structure : a) vue en 3D b) vue en plan .....	108
Figure 4.34 : Coupes du deuxième proposition de la structure : a) Coupes A-A et A'-A' b) Coupe B-B et B'-B'.....	109
Figure 4.35 : Troisième proposition de la structure : a) vue en 3D b) vue en plan.....	109
Figure 4.36 : Coupes du Troisième proposition de la structure : a) Coupes A-A et A'-A' b) Coupe B-B et B'-B'.....	110
Figure 4.37 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif Sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y	110
Figure 4.38 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y .....	111
Figure 4.39 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif Sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y ..	112
Figure 4.40 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y .....	112
Figure 4.41 : Effet de l'emplacement des dissipateur sur les efforts tranchants à la base pour un taux d'amortissement effectif $\xi_{eff}=20\%$ sous différents enregistrements sismiques.....	114
Figure 4.42 : Boucles hystérétiques du 1 <sup>er</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2 <sup>ème</sup> proposition b) 3 <sup>ème</sup> proposition.....	115
Figure 4.43 : Boucles hystérétiques du 1 <sup>er</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour $\xi_{eff}=20\%$ a) 2 <sup>ème</sup> proposition b) 3 <sup>ème</sup> proposition.....	115
Figure 4.44 : Boucles hystérétiques du 10 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2 <sup>ème</sup> proposition b) 3 <sup>ème</sup> proposition.....	115
Figure 4.45 : Boucles hystérétiques du 10 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2 <sup>ème</sup> proposition b) 3 <sup>ème</sup> proposition.....	116
Figure 4.46 : Boucles hystérétiques du 10 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2 <sup>ème</sup> proposition b) 3 <sup>ème</sup> proposition.....	116

Figure 4.47 : Boucles hystérétiques du 10 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2 <sup>ème</sup> proposition b) 3 <sup>ème</sup> proposition.....	116
Figure 4.48 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y...	117
Figure 4.49 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y	117
Figure 4.50 : La structure avec la nouvelle distribution de dissipateur : a) vue en 3D, b) vue en plan.....	119
Figure 4.51 : Coupes de La structure avec la nouvelle distribution des dissipateurs : a) Coupes A-A et A'-A', b) Coupe B-B et B'-B'.....	119
Figure 4.52 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y....	120
Figure 4.53 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y .....	120
Figure 4.54 : Déplacements du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y .....	121
Figure 4.55 : Déplacements du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y .....	122
Figure 4.56 : Déplacement du dernier niveau de la structure sous les différentes excitations sismiques et pour différents taux d'amortissement effectif.....	122
Figure 4.57 : Effet de la variation d'amortissement du dissipateur à fluide visqueux sur le déplacement maximal du dernier niveau sous différents enregistrements sismiques.....	123
Figure 4.58 : vitesses du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y .....	123
Figure 4.59 : vitesses du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y .....	124
Figure 4.60 : Vitesse du dernier niveau sous les différentes excitations et pour différents taux d'amortissement effectif.....	124
Figure 4.61 : Accélération du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y .....	125
Figure 4.62 : Accélération du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y .....	125
Figure 4.63 : Accélération du dernier niveau sous différentes excitations sismique et pour différents taux d'amortissement .....	126
Figure 4.64 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans dissipateurs sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y .....	127
Figure 4.65 : Efforts tranchants à la base de la structure avec et sans dissipateurs sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y .....	128
Figure 4.66 : Efforts tranchants à la base sous les différentes excitations sismique et pour différents taux d'amortissement.....	129
Figure 4.67 : Effet de la variation d'amortissement du dissipateur à fluide visqueux sur l'effort tranchant à la base sous différents enregistrements sismiques.....	129
Figure 4.68 : Boucles hystérétiques du 5 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour a) $\xi_{eff}=20\%$ et b) $\xi_{eff}=25\%$ .....	130
Figure 4.69 : Boucles hystérétiques du 5 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour a) $\xi_{eff}=20\%$ et b) $\xi_{eff}=25\%$ .....	131
Figure 4.70 : Boucles hystérétiques du 10 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour a) $\xi_{eff}=20\%$ et b) $\xi_{eff}=25\%$ .....	131

Figure 4.71 : Boucles hystérétiques du 10 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour a) $\xi_{eff}=20\%$ et b) $\xi_{eff}=25\%$ .....	131
Figure 4.72 : Boucles hystérétiques du 20 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour a) $\xi_{eff}=20\%$ et b) $\xi_{eff}=25\%$ .....	132
Figure 4.73 : Boucles hystérétiques du 20 <sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour a) $\xi_{eff}=20\%$ et b) $\xi_{eff}=25\%$ .....	132

## LISTE DES SYMBOLES

$p(t)$ :	La force extérieure appliquée (qui caractérise la sollicitation) (KN).
$f_I$ :	La force d'inertie (KN)
$f_S$ :	La force de rappel (KN)
$f_D$ :	La force d'amortissement (KN)
$m$ :	La masse de la structure (kg)
$k$ :	La rigidité du système élastique (N/m)
$c$ :	Le coefficient d'amortissement visqueux
$\omega$ :	La pulsation propre (radian/sec)
$\xi$ :	Le pourcentage d'amortissement critique
$f$ :	La fréquence propre (hertz)
$T$ :	La période propre (s)
$\rho$ :	L'amplitude de la réponse
$\theta$ :	La phase de la réponse (radian)
$F_D$ :	Force d'amortissement de l'appareil (la force du dissipateur d'énergie (N)
$E_D$ :	L'énergie dissipée par l'amortisseur (Joule)
$C_D$ :	Coefficient d'amortissement de l'appareil
$x$ :	Déplacement relatif entre les extrémités de l'appareil (m)
$\dot{x}$ :	Vitesse relative entre les extrémités de l'appareil (m/s)
$\ddot{x}$ :	Accélération relative entre les extrémités de l'appareil (m/s <sup>2</sup> )
$\lambda$ :	Paramètre de la vitesse (exposant)
$\ddot{u}_g$ :	L'accélération du sol (m/s <sup>2</sup> ).
$I_D$ :	le vecteur d'influence du dispositif
$u$ :	le vecteur de déplacement de la structure (m)
$\dot{u}$ :	Le vecteur de vitesse de la structure (m/s)
$\ddot{u}$ :	Le vecteur d'accélération de la structure (m/s <sup>2</sup> )
$E$ :	La matrice d'influence du mouvement du sol
$M$ :	La matrice de masse de la structure d'ordre $n \times n$ ,
$C$ :	La matrice de coefficient d'amortissement de la structure d'ordre $n \times n$ ,
$K$ :	La matrice de rigidité de la structure d'ordre $n \times n$ ,
$\xi_{eff}$	Taux d'amortissement effectif
$E_s$ :	Energie sismique d'entrée (Joule)
$E_c$ :	Energie cinétique (Joule)
$E_e$ :	Energie de déformation élastique (Joule)

$E_a$	Energie d'amortissement (Joule)
$E_d$	Energie ductilité (déformation inélastique). (Joule)
$K_1$	La rigidité du stockage (KN.m)
$K_2$	La rigidité de la perte (KN.m)
$u_{\max}$	Le déplacement max (m)
$E_c$	L'énergie dissipée au cours d'un cycle par l'amortisseur linéaire
$c_{eq}$	L'amortisseur équivalent
$\eta$	Le coefficient de perte
$E_{dparcycle}$	L'énergie dissipée au cours d'un cycle (Joule)
$E_{p\max}$	L'énergie potentielle maximum (Joule)
$\beta$	L'amortissement réduit
$\delta\hat{u}$	Vitesse virtuelle (m/s)
$P_e(\delta\hat{u})$	La puissance virtuelle des efforts extérieurs (Watt)
$P_i(\delta\hat{u})$	La puissance virtuelle des efforts intérieurs (Watt)
$A\delta\hat{u}$	La puissance virtuelle des quantités d'accélération (Watt)
$\delta W_{nc}$	Le travail des forces non conservatives
$\omega_D$	La pulsation propre amortie (radian/sec)
$R$	Le rayon de la surface concave (m)
$W$	Le poids de la structure (kg)
$f_{c28}$	La résistance du béton (MPA)
$E_{ij}$	Le module d'élasticité du béton (MPA)
$\nu$	Le coefficient de Poison



## LISTE DES ABREVIATIONS

- ADAS : Added Damping and Stiffness
- AMD : Active Masse Damper
- ATMD : Active Tuned Masse Damper
- DDL : Degré De Liberté
- EDR : Energy Dissipating Restraint
- ER : Electro Rheological
- ETABS : Extended Three Dimensional Analysis Building Systems
- FEMA : Federal Emergency Management Agency
- FPS : Friction Pendulum System
- HDR : High Damping Rubber
- HMD : Hydride Masse Damper
- LDRB : Low Damping Rubber Bearing
- LED : Lead Extrusion Devices
- LRB : Lead Rubber Bearing
- MPA : Méga pascal
- MR : Magneto Rheological
- PGA : Pic Ground Accélération
- SAP : Structural Analysis Program
- TADAS : Triangular plate Added Damping and Stiffness
- TMD : Tuned Masse Damper

# **Introduction**

## INTRODUCTION

En raison de la vulnérabilité sismique de notre pays, le développement des concepts technologiques innovateurs pour une protection accrue des structures et des personnes constitue un véritable challenge pour le chercheur de génie civil vis-à-vis des effets préjudiciables générés lors de mouvements sismiques.

Les ingénieurs de structure ne peuvent pas être inconscients des dégâts provoqués par les séismes sur les plans humains et matériels dont a souffert notre pays, ce qui explique la nécessité de considérer le défi de l'intégration de nouvelles technologies comme systèmes de protection parasismique.

L'approche traditionnelle dans la conception parasismique est basée sur la combinaison de la résistance avec la ductilité pour pallier aux sollicitations sismiques. Pour cela, l'ingénieur s'appuie sur la ductilité fournie par les matériaux afin d'éviter les catastrophes et garantir la stabilité de la structure devant de graves séismes. Des dégâts structuraux sont souvent provoqués par les déformations plastiques dont souffre la structure à cause du niveau élevé de l'énergie générée durant un mouvement sismique. Pour une protection parasismique, de nouvelles technologies ont été développées parmi lesquelles on trouve les « dispositifs de dissipation passives d'énergie ».

L'incorporation des « dispositifs de dissipation d'énergie » a pour objectif principal l'absorption d'une partie importante de l'énergie sismique et la diminution, autant que possible, des dégâts dans les éléments structuraux. Parmi les dispositifs de dissipation passive d'énergie, nous trouvons le dissipateur visqueux fluide. Ces dispositifs sont utilisés avec succès dans les nouveaux bâtiments ainsi que dans la réhabilitation des structures existantes. Comme exemple d'utilisation de ces dispositifs, qui s'avère être une méthode efficace de protection parasismique, nous pouvons citer le San Francisco Civic Center (Etats-Unis), le Raikai Hospital (Japon) et la tour Mayor (Mexique).

L'objectif de ce travail est la modélisation d'un dispositif de dissipation d'énergie de type visqueux fluide linéaire comme système de protection parasismique afin de contrôler la réponse dynamique des structures durant les mouvements sismiques.

Ce travail se compose de quatre chapitres dont les contenus sont brièvement décrits ci-dessous :

L'introduction mentionne l'importance de ces appareils dans l'analyse sismique des bâtiments et les considérations qui sont généralement prises en compte autant leur capacité à réduire les dommages est importante.

Le premier chapitre présente les connaissances de base de la dynamique des structures pour un système à un degré de liberté et les différents types d'amortissement. La mise en équation du mouvement vibratoire ainsi que les méthodes de résolution sont également présentées dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre est divisé en deux parties : La première donne un aperçu des structures soumises à des séismes, du point de vue énergétique. La deuxième est une revue de la littérature sur les systèmes de protection parasismique.

Le troisième chapitre fait une description du dissipateur d'énergie à fluide visqueux ; une classe très importante des dispositifs de dissipation d'énergie ainsi que sa réponse dynamique lors d'une excitation sismique. On a présenté le dimensionnement d'un amortisseur à fluide visqueux de Taylor avec l'équation de mouvement d'une structure avec dissipateur d'énergie et sa résolution pour un système à un degré de liberté et pour un système à plusieurs degrés de libertés.

Le quatrième chapitre vise à montrer l'effet du dissipateur d'énergie sur la réponse dynamique de différents types de structures (rigide, semi rigide, flexible) soumises à des excitations sismique pour différents taux d'amortissement ainsi que l'influence de l'emplacement de ces dispositifs dans les structures.

Enfin une conclusion générale qui synthétise le travail.

# **Chapitre 1**

## **Vibration des systèmes à un degré de liberté**

## VIBRATION DES SYSTEMES A UN DEGRE DE LIBERTE

### 1.1 Introduction

Le système à 1 degré de liberté est constitué d'un bloc rigide, de masse  $m$  connecté à un support. La figure 1.1 présente un tel système, sollicité par une force  $p(t)$  variable dans le temps. Le seul mouvement autorisé pour l'oscillateur est le déplacement horizontal,  $u(t)$ , de la masse. Le système en vibration est connecté à son support par un élément qui développe une force  $F(u, \dot{u})$ , fonction du déplacement et de la vitesse de la masse  $m$ . La relation  $F(u, \dot{u})$  caractérise le comportement de l'oscillateur; la force  $p(t)$  caractérise la sollicitation [1].

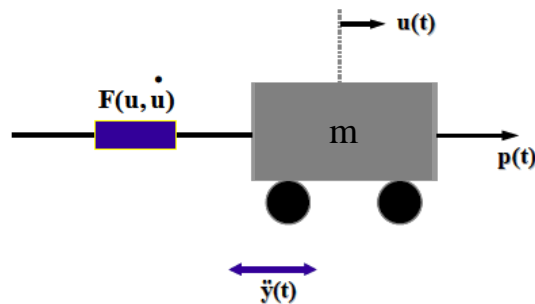


Figure 1.1 : Système à un degré de liberté

### 1.2 Loi de comportement de l'oscillateur

Cette loi de comportement dépend dans le cas le plus général du déplacement  $u(t)$  de la masse et de sa vitesse  $\dot{u}(t)$  par rapport au support. La force de rappel  $F$  peut ne dépendre que du déplacement  $u(t)$  (figure 1.2). Si à tout instant il y a proportionnalité entre la force et le déplacement (figure 1.2a), l'oscillateur est élastique linéaire. Ce cas est typiquement celui d'un ressort.

La relation entre la force développée dans la liaison et le déplacement relatif  $u$  des deux extrémités de cette liaison s'écrit simplement :

$$F = ku \quad (1.1)$$

La dépendance de la force sur le déplacement peut cependant être non linéaire (figure 1.2b); initialement il y a proportionnalité entre force et déplacement (oscillateur élastique linéaire)

puis, au-delà d'un certain seuil de déplacement, la relation cesse d'être linéaire; par ailleurs la décharge peut s'effectuer suivant un trajet distinct de la charge. C'est le cas par exemple d'une liaison masse-support constituée d'un assemblage en série d'éléments de ressorts linéaires et de frotteurs de Coulomb (éléments rigides en-deçà d'un certain seuil d'effort puis développant un effort constant au-delà du seuil).

Il est possible que la décharge s'effectue le long de la même courbe que la charge; l'oscillateur est alors élastique non linéaire. Dans tous les cas, l'oscillateur est dit non linéaire et la relation force-déplacement s'écrit de façon symbolique :

$$F = f(u) \quad (1.2)$$

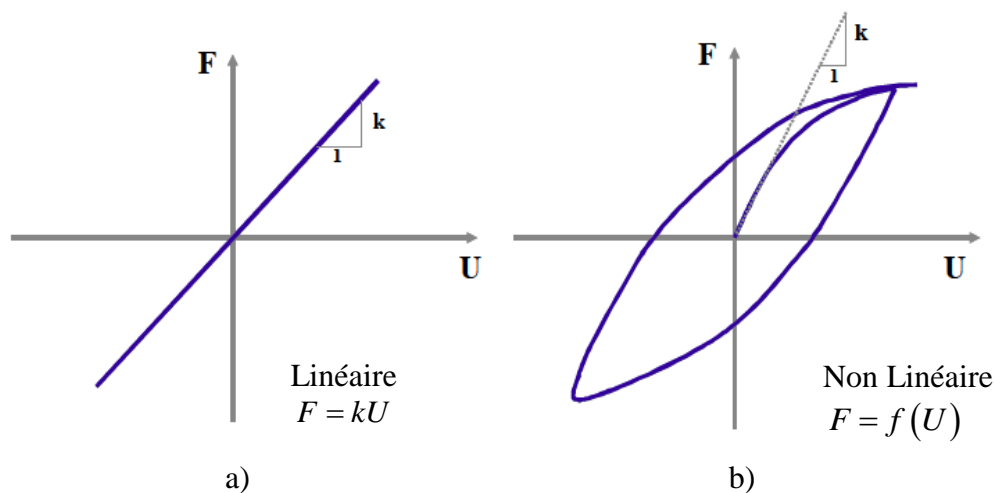


Figure 1.2 : Relation force-déplacement [1]

Dans la pratique, on constate que l'amplitude décroît au cours du temps et que la masse retrouve au bout d'un certain temps une position d'équilibre (figure 1.3).

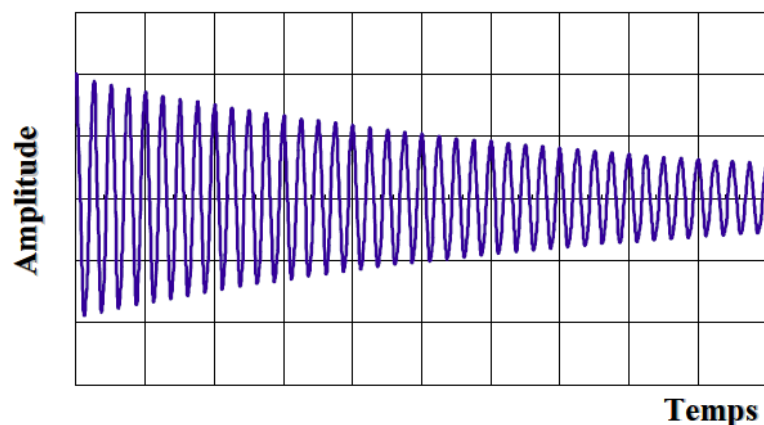


Figure 1.3 : Vibration libre avec amortissement [1]

Une partie de l'énergie élastique emmagasinée dans le ressort est dissipée au cours du temps; ce phénomène est dénommé de façon générique **amortissement**.

En fait, l'amortissement peut résulter de différents mécanismes. Il peut s'agir d'un amortisseur physique (par exemple un amortisseur hydraulique) auquel on peut avoir recours dans les problèmes d'isolation vibratoire. La dissipation d'énergie peut également provenir d'effets thermiques liés au chargement répété du matériau, de frottements internes dans le matériau (glissements entre grains dans un assemblage de particules par exemple), de déformations d'origine plastique....

En règle générale, et sauf cas exceptionnel, l'amortissement ne peut être calculé à partir des propriétés physiques du système. Par exemple dans le cas d'un bâtiment soumis à une sollicitation sismique significative, les sources de dissipation d'énergie sont multiples : fissuration du béton, plastification des aciers, glissements relatifs entre la structure porteuse et les éléments secondaires (cloisons, baies vitrées...). Dans la pratique, les phénomènes de dissipation d'énergie sont donc caractérisés de façon très simplifiée en considérant qu'ils proviennent d'un amortisseur visqueux linéaire.

Un amortisseur visqueux linéaire est caractérisé par une relation linéaire entre la force développée dans l'amortisseur et la vitesse relative des deux extrémités de celui-ci :

$$F = c\dot{u} \quad (1.3)$$

La constante de proportionnalité '  $c$  ', caractéristique de l'amortisseur, a pour unités une masse par unité de temps. La description des phénomènes de dissipation d'énergie à l'aide d'un amortisseur équivalent est obtenue en écrivant que l'énergie dissipée dans un cycle de vibration du système est égale à l'énergie dissipée dans un amortisseur linéaire pour un cycle de même amplitude de déplacement.

En se référant à la figure 1.4, considérons un système soumis à un cycle caractérisé par une amplitude maximale du déplacement égale à  $u_{\max}$ . Si au cours de ce cycle on mesure la force nécessaire pour déformer la structure, le diagramme force-déplacement peut être représenté par la courbe limitant l'aire hachurée de la figure 1.4.



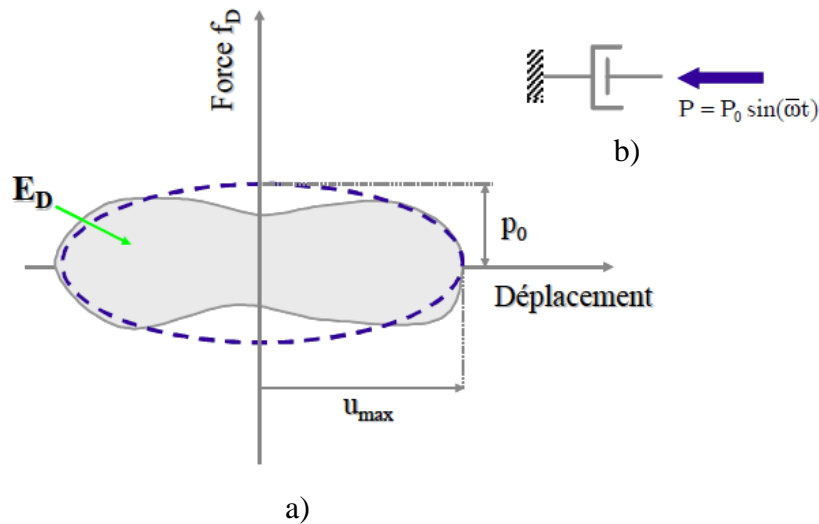


Figure 1.4 : Amortissement équivalent [1]

L'aire de la boucle représente l'énergie  $E_D$  dissipée par la structure au cours d'un cycle de sollicitation.

Considérons maintenant l'amortisseur linéaire de la figure 1.4 b) soumis à une force harmonique de pulsation  $\bar{\omega}$

$$P = P_0 \sin(\bar{\omega}t) \quad (1.4)$$

Pour ce système, la constante de l'amortisseur  $c$  est donnée par :

$$c = \frac{f_{D\max}}{\dot{u}_{\max}} = \frac{P_0}{\bar{\omega} u_{\max}} \quad (1.5)$$

La courbe effort-déplacement décrite par ce système est représentée par une ellipse, figurée en trait pointillé sur la figure 1.4.

L'énergie dissipée au cours d'un cycle par l'amortisseur linéaire est donnée par:

$$E_c = \oint f_D du = \int_0^{2\pi} (\bar{c} \dot{u}) \dot{u} dt = \pi \bar{c} \bar{\omega} u_{\max}^2 \quad (1.6)$$

Ecrivant que cette énergie est égale à l'énergie  $E_D$  dissipée par le système, la constante d'amortisseur est donnée par :

$$c_{eq} = \frac{E_D}{\pi \bar{\omega} u_{\max}^2} \quad (1.7)$$

On notera que l'amortisseur équivalent est inversement proportionnel à la pulsation de la sollicitation. La modélisation de l'énergie dissipée dans un système par un amortisseur équivalent se révèle très utile dans la pratique. Tant que les cycles de sollicitations sont d'amplitudes faibles à modérées, l'approximation se révèle satisfaisante. Lorsque l'amplitude de la déformation croît, cette modélisation se révèle inappropriée car les mécanismes de dissipation mis en jeu ont pour origine les déformations plastiques du système et sont très éloignés d'une dissipation visqueuse. La seule représentation fiable de la dissipation d'énergie s'obtient alors à partir de la description de la courbe effort-déplacement décrite lors des cycles de chargement.

### 1.3. Amortissement

Le mouvement des structures soumises à des forces variables au cours du temps dépend, en particulier, des propriétés d'amortissement, c'est à dire, de la dissipation d'énergie dans les matériaux constitutifs de la structure et dans les liaisons des différents éléments de structure entre eux et avec le milieu environnant.

Les valeurs d'amortissement à introduire dans les calculs de tenue au séisme sont depuis longtemps un sujet d'étude. De nombreux documents, des conférences, ont traité ce problème depuis plusieurs années

Les phénomènes physiques à introduire dans cette dissipation d'énergie sont nombreux : frottements, chocs, viscosité et plasticité des matériaux, rayonnement, etc. leurs lois sont souvent mal connues : il n'est donc pas possible en général d'introduire l'amortissement dans les calculs sous une forme mathématique strictement représentative de la physique des phénomènes. C'est pourquoi les modèles utilisés sont souvent des modèles simples, permettant de reproduire à l'échelle macroscopique les principaux effets sur les structures, et dont les paramètres sont déduits de résultats expérimentaux.

#### 1.3.1. Différents types d'amortissement

Selon les phénomènes physiques mis en cause on distingue plusieurs types d'amortissement, par exemple :

- L'amortissement visqueux pour lequel la force est proportionnelle à la vitesse ;
- L'amortissement hystérétique pour lequel la force d'amortissement est proportionnelle au déplacement et de signe opposé à celui de la vitesse ;

- L'amortissement de Coulomb, qui correspond à un amortissement de frottement : la force d'amortissement est proportionnelle à la force de réaction normale à la direction du déplacement et de signe opposé à celui de la vitesse.

Dans la suite de ce chapitre, deux coefficients reliés à l'amortissement seront utilisés, c'est pourquoi ils seront définis au préalable.

**Le coefficient de perte**, coefficient adimensionnel caractéristique de l'effet amortisseur, est donné par le rapport de l'énergie dissipée au cours d'un cycle à l'énergie potentielle maximum multipliée par  $2\pi$  :

$$\eta = \frac{\text{énergie dissipée au cours d'un cycle}}{2\pi \times \text{énergie potentielle maximum}}$$

$$\eta = \frac{E_d \text{ par cycle}}{2\pi E_p \text{ max}}$$

Dans le cas particulier d'un cycle de forme elliptique, l'expression de ce coefficient de perte est simple (figure 1.5).

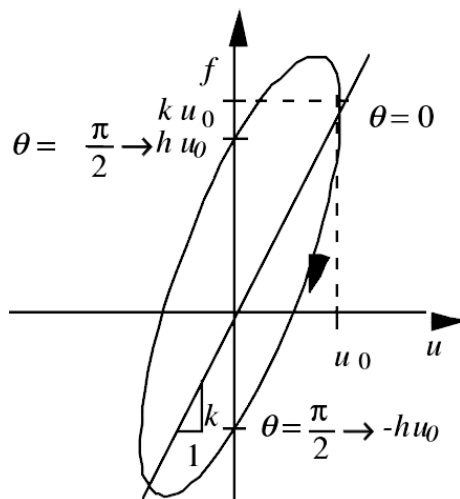


Figure 1.5 : Cycle elliptique (force en fonction du déplacement)

Si la force extérieure appliquée est  $F$ , le déplacement  $x = u_0 \cos \theta$ , la force de rappel  $ku_0 \cos \theta$  et la force d'amortissement  $-hu_0 \sin \theta$  : l'équilibre des forces conduit à :

$$F = ku_0 \cos \theta - hu_0 \sin \theta \quad (1.8)$$

L'énergie dissipée au cours d'un cycle est égale à :

$$E_{d \text{ par cycle}} = \int_0^{2\pi} (-hu_0 \sin \theta) . d(u_0 \cos \theta) = \pi hu_0^2 \quad (1.9)$$

L'énergie potentielle maximum est :

$$E_{p \text{ max}} = \int_{\pi/2}^0 (ku_0 \cos \theta) . d(u_0 \cos \theta) = \frac{ku_0^2}{2} \quad (1.10)$$

Et le coefficient de perte est donné par :

$$\eta = \frac{h}{k} \quad (1.11)$$

Par définition, *l'amortissement réduit* est égal à la moitié du coefficient de perte :

$$\beta = \frac{\eta}{2} \quad (1.12)$$

## A. Amortissement visqueux

### A.1. Phénomènes physiques

Les dispositifs amortisseurs classiques fournissent par laminage d'un fluide visqueux à travers des orifices étroits des forces résistantes proportionnelles à la vitesse du mouvement et de signe opposé. Au cours d'un cycle, le travail de ces forces est positif : c'est l'amortissement visqueux.

On peut, en outre, signaler que l'effet de dissipation d'énergie par rayonnement, observé en particulier lors du mouvement d'une structure posée sur un sol semi-infini, est assimilable pour des mouvements à basse fréquence à un amortissement visqueux.

### A.1.1. Modèle mathématique

La relation d'équilibre entre la force extérieure appliquée et les forces de rappel  $kx$  et d'amortissement  $c\dot{x}$  s'écrit :

$$F = kx + c\dot{x} \quad (1.13)$$

Dans le cas d'un cycle de pulsation  $\omega$ , pour lequel le déplacement est sinusoïdal ( $x = a \cos \omega t$ ) la force extérieure est :  $F = ku_0 \cos \omega t - c\omega u_0 \sin \omega t$ .

Le coefficient de perte, qui est proportionnel à la fréquence de mouvement, est égal à :

$$\eta = \frac{c\omega}{k}$$

### A.1.2. Oscillateur harmonique avec amortissement visqueux

L'équation d'équilibre s'écrit dans ce cas :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1.14)$$

Si  $x$  est le déplacement de la masse.

La fréquence de résonance sans amortissement est donnée par  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

$$\nu_0 = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.15)$$

Le mouvement obtenu après un lâcher est :

$$x = e^{-\beta\omega_0 t} \cos \omega_0^* t \quad (1.16)$$

Avec  $\omega_0^* = \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}$

Le coefficient  $\beta$  est égal à la moitié du coefficient de perte à la fréquence  $\nu_0$ , c'est l'amortissement réduit :

$$\beta = \frac{\eta\nu_0}{2} = \frac{c\omega_0}{2m\omega_0^2} \quad (1.17)$$

On écrit souvent  $\beta$  sous la forme :

$$\beta = \frac{c}{c_0} \quad \text{si} \quad c_0 = 2\sqrt{km}$$

Dans ce mouvement de lâcher, le niveau relatif de deux maxima, fonction de l'amortissement réduit, est  $(e^{-2\pi\beta})$  et le coefficient  $\xi = 2\pi\beta$  est appelé décrément logarithmique.

## B. Amortissement hystérétique

### B.1. Phénomènes physiques

Lorsqu'on applique une force variant sinusoïdalement au cours de temps à une structure à comportement élastoplastique, ou présentant des phénomènes de glissement avec frottement, on obtient des courbes force-déplacement qui dépendent peu de la durée du cycle, et qui sont de la forme présentée sur la figure 1.6.

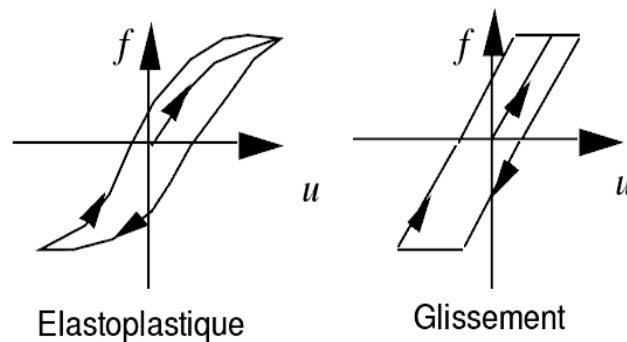


Figure 1.6 : Cycle de structure à comportement non linéaire (élastoplastique – glissement)

Au cours d'un cycle, un travail positif est fourni par la force extérieure, correspondant à une énergie dissipée dans la structure : c'est l'amortissement par effet d'hystérésis.

### B.2. Modèle mathématique

La force d'amortissement est proportionnelle à l'amplitude du mouvement et la relation d'équilibre s'écrit comme dans (1.8)

$$F = kx \cos \theta - hx \sin \theta \quad (1.18)$$

le coefficient de perte est  $\eta = \frac{h}{k}$ .

Pour un cycle sinusoïdal en temps ( $\theta = \omega t$ ), le coefficient de perte est indépendant de la fréquence du cycle.

### B.2.1. Oscillateur harmonique avec amortissement hystérétique

L'équation du mouvement au cours du temps d'un oscillateur harmonique en présence d'un amortissement de type hystérétique s'écrit sous une forme simple en variables complexes dans le cas de relation force-déplacement représentée par une ellipse

$$(k + ih)x_c + m\ddot{x}_c = F_c(t) \quad (1.19)$$

$x_c(t)$  est le déplacement complexe (la partie réelle de  $x_c(t)$  est le déplacement de la masse de l'oscillateur,  $F_c(t)$  est la force extérieure complexe).

Après transformation de Fourier, la fonction de transfert est donnée par :

$$\tilde{x}(v) = \frac{F_c(v)}{\left[ m\omega_0^2 \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) + ih \right]} \quad (1.20)$$

## 1.4 Equations de l'équilibre dynamique

L'équation d'équilibre dynamique peut être obtenue à partir de trois méthodes : méthode directe, méthode énergétique et principe des puissances virtuelles. Ces trois méthodes sont illustrées ci-après :

### 1.4.1 Méthode directe

Les forces s'exerçant sur le système de la figure 1.7 sont :

- la force extérieure appliquée  $p(t)$ ,
- la force de liaison  $f_s$ , reliée au déplacement  $u$  de la masse; dans le cas d'un système linéaire, cette force est donnée par l'équation (1.1),
- la force de liaison  $f_D$  reliée à la vitesse  $\dot{u}$  de la masse; dans le cas d'un amortisseur visqueux linéaire, cette force est donnée par l'équation (1.3),
- les forces d'inertie  $f_I$  s'exerçant sur la masse  $m$  égales au produit de celle-ci par l'accélération  $\ddot{u}$  de la masse.

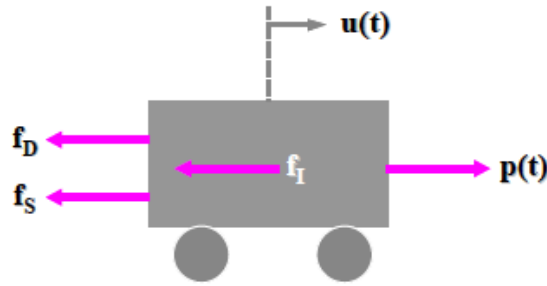


Figure 1.7 : Force appliqué au système

En écrivant que la résultante de toutes ces forces est nulle :

$$f_S + f_D = p(t) - f_I \quad (1.21)$$

Dans cette équation, on reconnaît le principe d'Alembert; les forces extérieures sont égales aux forces directement appliquées à la masse,  $p(t)$ , diminuées des forces d'inertie  $f_I$ .

Ces forces extérieures sont égales aux forces "intérieures",  $(f_S + f_D)$ , se développant dans la liaison. Pour un système visco-élastique linéaire, l'équation (1.21) devient en tenant compte des équations (1.1) et (1.3):

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (1.22)$$

#### 1.4.2. Méthode des puissances virtuelles

Considérons une vitesse virtuelle  $\delta\hat{u}$  pour la masse  $m$ . La puissance virtuelle des efforts extérieurs est :

$$P_e(\delta\hat{u}) = p(t)\delta\hat{u} \quad (1.23)$$

La puissance virtuelle des efforts intérieurs est :

$$P_i(\delta\hat{u}) = -f_I\delta\hat{u} - f_D\delta\hat{u} \quad (1.24)$$

et la puissance virtuelle des quantités d'accélération est :

$$A(\delta\hat{u}) = m\ddot{u}\delta\hat{u} \quad (1.25)$$

En écrivant le principe des puissances virtuelles, il vient :

$$(-f_S - f_D + p(t))\delta\hat{u} = M\ddot{u}\delta\hat{u} \quad (1.26)$$

valable pour toute vitesse virtuelle  $\delta\hat{u}$ . La relation (1.21) en découle de manière triviale.



### 1.4.3 Méthode énergétique

L'énergie cinétique du système de la figure 1.1 est donnée par :

$$T = \frac{1}{2} m \dot{u}^2 \quad (1.27)$$

Son énergie potentielle, dans le cas d'un système linéaire par :

$$V = \frac{1}{2} k u^2 \quad (1.28)$$

Le travail des forces non conservatives est égal au travail des forces appliquées et des forces dissipatives.

$$\delta W_{nc} = p(t) \delta u - C \dot{u} \delta u \quad (1.29)$$

Le principe d'Hamilton permet d'écrire :  $\int_{t_1}^{t_2} [-m\ddot{u} - c\dot{u} - ku + p(t)] \delta u dt = 0$

$$\int_{t_1}^{t_2} [-m\ddot{u} - c\dot{u} - ku + p(t)] \delta u dt = 0 \quad (1.30)$$

qui est valable pour toute variation  $\delta u$ . L'équation (1.22) en découle immédiatement.

### 1.5 Formulation réduite de l'équation d'équilibre

La mise en œuvre de l'une des trois méthodes exposées ci-dessus conduit à l'équation d'équilibre (1.22) pour le système à 1 degré de liberté. Divisant les deux membres de cette équation par  $m$ , on obtient la formulation réduite de l'équation d'équilibre :

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2 u = \frac{p(t)}{m} \quad (1.31)$$

L'écriture précédente montre que l'équation d'équilibre fait intervenir les deux grandeurs fondamentales suivantes caractérisant l'oscillateur :

- **pulsation propre**

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.32)$$

où de façon équivalente la **fréquence propre**

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.33)$$

où la **période propre**

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1.34)$$

- **pourcentage d'amortissement critique**

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{2m\omega} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (1.35)$$

où  $c_{cr}$  est par définition l'amortissement critique

L'amortissement critique donné par l'équation (1.35) peut également s'exprimer en fonction de la raideur  $k$  en tenant compte de l'équation (1.33).

$$c_{cr} = \frac{2k}{\omega} \quad (1.36)$$

Pour un système linéaire, dont la courbe effort-déplacement est représentée sur la figure 1.8, la raideur  $k$  peut être exprimée en fonction de l'énergie élastique emmagasinée  $E_s$ , égale à l'aire sous la courbe.

$$k = \frac{2E_s}{u_{\max}^2} \quad (1.37)$$

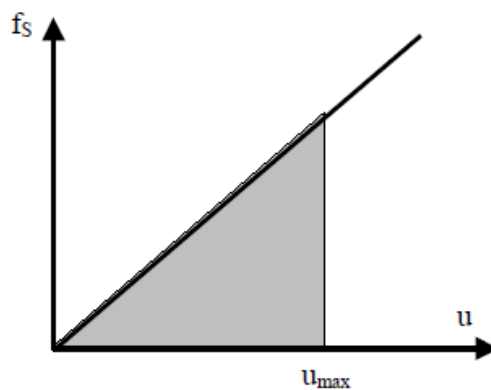


Figure 1.8 : Système linéaire

D'après l'équation (1.7) qui définit l'amortisseur équivalent du système viscoélastique linéaire dont les propriétés dissipatives sont égales à celles d'une structure pour laquelle la nature exacte de l'amortissement est inconnue, il résulte du rapprochement des équations (1.7), (1.35), (1.36) et (1.37) que le pourcentage d'amortissement critique équivalent de la structure est donné par :

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} \quad (1.38)$$

Le pourcentage d'amortissement critique défini par l'équation (1.38) est indépendant de la fréquence de sollicitation  $\bar{\omega}$  si  $E_D$  ne dépend pas de celle-ci (cas de la dissipation d'énergie dans un matériau élastoplastique par exemple). Il est donc plus commode de représenter les propriétés dissipatives de la structure par son pourcentage d'amortissement critique que par l'amortisseur équivalent de l'équation (1.7).

## 1.6 Vibrations libres

En l'absence de la force extérieure  $p(t)$ , la masse oscille librement. Alors et d'après l'équation (1.31), l'équation du mouvement s'écrit :

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = 0 \quad (1.39)$$

Selon la valeur du pourcentage d'amortissement critique  $\xi$  on distinguera les cas suivants :

- 1- Vibration non amorti  $\xi = 0$
- 2- Vibration amorti.
  - amortissement critique  $\xi = 1$
  - amortissement sur critique  $\xi > 1$
  - amortissement sous critique  $\xi < 1$

### 1.6.1 Vibration non amorti $\xi = 0$

L'équation (1.39) se réduit à

$$\ddot{u} + \omega^2u = 0 \quad (1.40)$$

Dont la réponse de l'oscillateur soumis à un déplacement initial  $u(0)$  et une vitesse initiale  $\dot{u}(0)$  s'écrit :

$$u(t) = \frac{\dot{u}(0)}{\omega} \sin(\omega t) + u(0) \cos(\omega t) \quad (1.41)$$

Ou de façon équivalente

$$u(t) = \rho \cos(\omega t - \theta) \quad (1.42)$$

$\rho$  : désigne l'amplitude de la réponse et  $\theta$  la phase

$$\rho = \sqrt{u^2(0) + \left(\frac{\dot{u}(0)}{\omega}\right)^2} \quad (1.43)$$

$$\theta = \text{Arctg} \frac{\dot{u}(0)}{\omega u(0)} \quad (1.44)$$

### 1.6.2 Vibration amortie

Reprenons l'équation (1.39), dans laquelle le mouvement imposé est nul, mais retenant une valeur non nulle de  $c$ , l'équation du mouvement de l'oscillateur, soumis aux mêmes conditions

initiale  $u(0), \dot{u}(0)$  prend des formes différentes suivant la valeur de  $\xi = \frac{c}{2m\omega}$ .

On distingue les cas suivants :

#### a) Amortissement critique

Ce cas correspond à  $\xi = 1$ , et  $c = c_c = 2m\omega$ .

La réponse du système s'écrit :

$$u(t) = \left[ (1 + \omega t) + t\dot{u}(0) \right] e^{-\omega t} \quad (1.45)$$

La réponse ne présente aucune oscillation au cours du temps et le déplacement tend vers 0 au bout d'un temps infini. On peut en déduire que l'amortissement critique correspond à la plus petite valeur de l'amortissement pour laquelle la réponse en vibration libre ne comporte pas d'oscillation.

**b) Amortissement sur critique (système sur-amorti)**

Ce cas correspond à  $\xi > 1$  et  $c > 2m\omega$ .

La solution s'écrit :

$$u(t) = \left[ \frac{u(0) + \xi\omega u(0)}{\hat{\omega}} \sin(\hat{\omega}t) + u(0) \cos(\hat{\omega}t) \right] e^{-\xi\omega t} \quad (1.46)$$

avec :  $\hat{\omega} = \omega\sqrt{\xi^2 - 1}$

Le mouvement montré en figure 1.9 ne comporte pas d'oscillations et le système revient à l'équilibre au bout d'un temps infini. La réponse est analogue à celle du système à amortissement critique mais le retour à l'équilibre s'effectue d'autant moins rapidement que le pourcentage d'amortissement critique est élevé.

**c) Amortissement sous critique (système sous-amorti)**

Ce cas correspond à  $\xi < 1$  et  $c < 2m\omega$ .

La réponse du système soumis aux mêmes conditions initiales s'écrit :

$$u(t) = \left[ \frac{u(0) + \xi\omega u(0)}{\omega_D} \sin(\omega_D t) + u(0) \cos(\omega_D t) \right] e^{-\xi\omega t} \quad (1.47)$$

Où la pulsation propre amortie

$$\omega_D = \omega\sqrt{1 - \xi^2}$$

La solution (1.47) peut être également écrite, de façon équivalente, en introduisant l'amplitude  $\rho$  et la phase  $\theta$  sous la forme :

$$u(t) = \rho e^{-\xi\omega t} \cos(\omega_D t - \theta) \quad (1.48)$$

Où

$$\rho = \left[ \left( \frac{\dot{u}(0) + \xi\omega u(0)}{\omega_D} \right)^2 + u^2(0) \right]^{1/2}$$

$$\theta = \text{Arctg} \frac{\dot{u}(0) + \xi\omega u(0)}{\omega_D u(0)}$$

La figure suivante donne une comparaison des trois types d'amortissement pour une même structure.

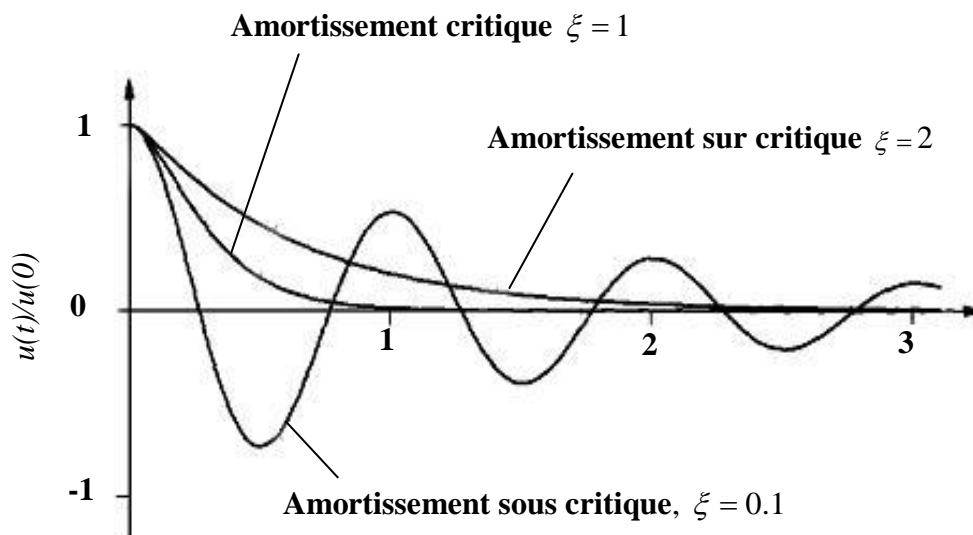


Figure 1.9 : vibration libre d'un système avec amortissement critique, sur critique et sous critique [2]

## 1.7. Réponse sismique du système

Une sollicitation sismique provient d'une rupture s'initiant dans le manteau terrestre. Cette rupture donne naissance à des ondes qui se propagent dans le milieu et atteignent éventuellement la surface du sol où elles se manifestent par une vibration ressentie dans les trois directions de l'espace ; les appareils enregistreurs, les sismographes, recueillent ces vibrations sous la forme d'accélération du sol en fonction du temps [1].

### 1.7.1. Mise en équation

La figure 1.10 schématise le système à étudier. La masse  $m$  repose sur un support soumis à une accélération  $\ddot{y}(t)$  fonction du temps ;

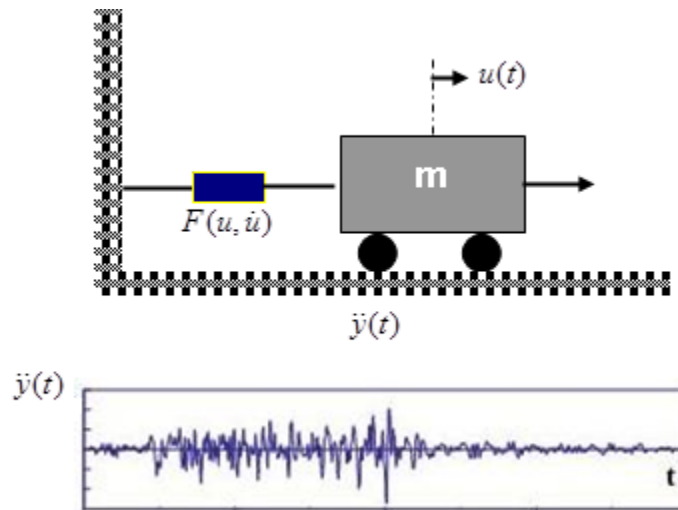


Figure 1.10 : Système sous excitation sismique

L'équation d'équilibre est obtenue en identifiant les forces s'exerçant sur la masse (figure 1.11). Ces forces sont :

- la force de rappel élastique  $f_s = ku$
- la force d'amortisseur  $f_D = c\dot{u}$
- la force d'inertie  $f_I = m\ddot{v} = m(\ddot{u} + \ddot{y})$

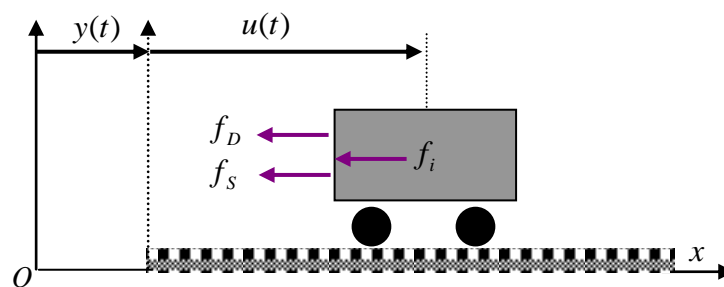


Figure 1.11 : Forces appliquées sur le système

L'équilibre du système s'obtient en écrivant la nullité de la résultante des efforts, soit :

$$f_s + f_D + f_I = 0 \quad (1.49)$$

$$\text{Alors : } m(\ddot{u} + \ddot{y}) + c\dot{u} + ku = 0 \quad (1.50)$$

Cette équation peut s'écrire sous la forme suivante

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2 u = -\ddot{y}(t) \quad (1.51)$$

En comparant l'équation (1.51) à l'équation (1.31), on constate que la réponse sismique de l'oscillateur est analogue à sa réponse lorsqu'il est sollicité directement en introduisant un chargement équivalent:  $P(t) = -m\ddot{y}(t)$

La solution est donnée par l'intégrale de Duhamel qui prend la forme:

$$u(t) = \frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin[\omega_D(t-\tau)] d\tau \quad (1.52)$$

La résolution des problèmes de vibration par l'intégrale de DUHAMEL peut être obtenue par analyse fréquentielle ou temporelle.



# **Chapitre 2**

## **Bilan énergétique dans les structures et systèmes de protection**

## **BILAN ENERGETIQUE DANS LES STRUCTURES ET SYSTEMES DE PROTECTION**

### **2.1 Introduction**

Historiquement, la conception parasismique des structures a été basée sur une combinaison de résistance et de ductilité. Pour des petites fréquences sismiques, on s'attend à ce que la structure reste dans le domaine élastique, avec tous les efforts sous les limites d'élasticité. Aussi, il n'est pas raisonnable de s'attendre à ce qu'une structure classique réponde élastiquement à un séisme très sévère. Bien sûr, la conception utilisée par les ingénieurs en structure est basée sur la flexibilité inhérente à des bâtiments pour empêcher une défaillance catastrophique, tout en acceptant un certain niveau de dommages structuraux et non structuraux. Cette philosophie a été implémentée dans des codes et règlements de conception et dimensionnement. Par conséquent, la structure est conçue pour résister à une charge statique équivalente, fournissant des résultats raisonnablement satisfaisants.

Un nombre important de progrès pour améliorer les performances en réponse sismique et le contrôle des dommages aux bâtiments, ponts et autres structures ont été développés, et d'autres sont à venir dans un proche avenir. Ces avancées peuvent être divisées en quatre groupes:

- les systèmes passifs tels que l'isolation à la base et les dispositifs de dissipation d'énergie;
- les systèmes actifs, qui nécessitent la participation active des dispositifs mécaniques, dont les caractéristiques sont à changer au cours de la réponse sismique basée sur les mesures d'intervention ;
- les systèmes hybrides, qui combinent des systèmes passifs et actifs, de telle manière que la sécurité du bâtiment ne soit pas compromise, même si le système actif échoue.
- les systèmes semi actifs, qui nécessitent des capteurs et actionneurs, et exigent une faible source d'énergie pour modifier les propriétés mécaniques des dispositifs de dissipation d'énergie passifs.

Actuellement, la technique d'isolation sismique est largement utilisée dans le monde. Un système d'isolation sismique se trouve généralement dans la fondation de la structure. En raison de sa souplesse et la capacité d'absorption d'énergie, le système d'isolation absorbe partiellement l'énergie sismique d'entrée avant que cette énergie ne soit transmise à la structure. L'effet est une réduction de la demande de dissipation d'énergie dans le système structural, améliorant ses performances.

En outre, les systèmes de contrôle actifs et semi-actifs sont des zones de protection structurelle, dans lesquelles le mouvement d'une structure est contrôlé ou modifié par l'action d'un système de contrôle avec alimentation externe. Les systèmes semi-actifs nécessitent seulement des quantités minimales d'énergie pour ajuster leurs propriétés mécaniques et contrairement aux systèmes actifs ils n'ajoutent pas d'énergie à la structure. Une attention particulière est accordée au développement de ces systèmes, notamment en améliorant la réponse sismique des bâtiments. Actuellement, cette technologie a été conçue, construite et installée dans plusieurs bâtiments dans le monde.

Toutes ces technologies ont augmenté le rôle important dans la conception structurelle, c'est dans ce cadre que notre travail vise les systèmes passifs de dissipation d'énergie dans les bâtiments et qui peut s'étendre aux cas des ponts et d'autres types de structures, étant donné que les principes de base de travail sont les mêmes.

Les recherches sur les systèmes de contrôle passif et la dissipation d'énergie pour les applications structurelles ont environ 25 ans d'histoire. La fonction de base de ces dispositifs de dissipation d'énergie lorsqu'ils sont implémentés dans la superstructure d'un bâtiment est d'absorber une partie de l'énergie sismique d'entrée, ce qui réduit la demande pour la dissipation d'énergie dans les membres de la structure primaire afin de minimiser les dommages structurels possibles. Contrairement aux systèmes actifs, les systèmes passifs ne nécessitent pas l'apport d'une énergie externe.

Ces dernières années, de sérieux efforts ont été faits pour développer le concept de dissipation d'énergie ou d'amortissement supplémentaire, et un certain nombre de ces appareils ont été installé dans les structures dans diverses parties du monde.

Les constructions en zones sismiques augmentent chaque jour dans notre pays. Par conséquent, la sécurité structurale tient une valeur importante dans le développement national. La réduction des coûts des constructions avec la conception sécuritaire qui en découle dans les zones sismiques est le problème central de la construction dans notre pays. La justification de la solution de ce problème réside dans l'élaboration de méthodes pour le calcul sismique des bâtiments avec des dispositifs de dissipation d'énergie passive.

La dissipation de l'énergie est réfléchi en termes de périodes, fréquences, et formes de vibration libre des structures, qui à son tour influence l'amplitude des forces sismiques. En général, ce problème n'a pas été suffisamment étudié et présente donc un champ ouvert aux chercheurs.

Dans la conception parasismique conventionnelle, la performance acceptable d'une structure pendant un événement sismique est fondée sur la résistance de la force latérale qui est capable d'absorber et de dissiper l'énergie d'une manière stable pour un grand nombre de cycles. La dissipation de l'énergie se produit dans les régions des rotules plastiques spécialement dans les poutres et les poteaux, qui font aussi partie du système de chargement par gravité. Les rotules plastiques sont des régions de désordre concentrées du portique, ce qui est souvent un dommage irréparable. Ces caractéristiques de conception sont acceptables pour leurs considérations économiques tant que l'effondrement structurel est empêché et que la sécurité des personnes est assurée.

Il y a des situations où les caractéristiques de conception conventionnelle ne sont pas applicables. Lorsqu'une structure doit rester fonctionnelle après un tremblement de terre, comme dans le cas d'importantes structures (hôpitaux, commissariats de police, etc.), la conception classique est inappropriée. Pour ces cas, la structure peut être conçue avec une résistance suffisante pour que l'action inélastique soit empêchée ou minimisée ; Ce qui est assez coûteux.

Plusieurs procédés de conception ont été élaborés avec l'incorporation des systèmes de protection sismique dans la structure ; ces systèmes peuvent prendre la forme de dispositifs de dissipation d'énergie ou des systèmes d'isolation sismique. Une analyse du comportement et les effets de ces systèmes peuvent commencer par la considération de la distribution de l'énergie dans la structure. Lors d'un événement sismique, une quantité finie d'énergie entre dans la structure. Cette énergie d'entrée est transformée en énergie cinétique et énergie

potentielle (déformation), qui doit être absorbée ou supprimée. S'il n'y a pas d'amortissement, les vibrations pourraient exister à moment. D'autre part, il y a toujours un niveau d'amortissement intrinsèque qui absorbe la partie de l'énergie d'entrée et réduit l'amplitude des vibrations jusqu'à l'arrêt du mouvement. La performance structurale peut être améliorée si une partie de l'énergie d'entrée peut être absorbée, non pas par la même structure, mais par un dispositif supplémentaire. Cela apparaît clairement dans la relation de conservation de l'énergie donnée par le bilan énergétique.

## 2.2 Bilan énergétique

L'équation du bilan énergétique d'un système structurel soumis à une excitation sismique est la suivante :  $E_s = E_c + E_e + E_a + E_d$  (2.1)

Avec :

$E_s$  = énergie sismique d'entrée

$E_c$  = énergie cinétique

$E_e$  = énergie de déformation élastique

$E_a$  = énergie d'amortissement

$E_d$  = énergie de ductilité (déformation inélastique).

L'énergie d'entrée  $E_s$ , représente le travail de la force sismique totale à la base due au déplacement du sol et qui contient l'effet des forces d'inertie de la structure.

Pour que le système structurel supporte l'excitation, l'énergie d'entrée  $E_s$  doit être absorbée par la somme des énergies d'amortissement, cinétique, élastique et inélastique.

Ou, autrement dit la capacité de structure doit être supérieure à la demande sismique. En supposant que l'énergie sismique  $E_s$  a une valeur constante, il est nécessaire, pour l'élaboration de constructions parasismiques optimales de dissiper une part l'énergie totale introduite dans le système présenté dans l'équation (2.1), Cela est possible de deux manières :

- 1- l'augmentation de la ductilité et la rigidité du système afin d'ajouter de l'énergie par déformation inélastique.
- 2- Augmenter l'énergie d'amortissement, par l'ajout de dispositifs de dissipation d'énergie.

La première option est ce qui se fait traditionnellement dans l'analyse sismique des structures, qui est basée sur une fourniture d'une combinaison résistance- ductilité pour résister au séisme et l'ingénieur en structure s'appuie sur la ductilité inhérente des systèmes de structure et conséquemment construits afin d'éviter les catastrophes, tout en permettant un certain degré de dommages à la structure, mais en évitant l'effondrement et la ruine.

La seconde option est réalisée en intégrant le système passif de dissipation d'énergie afin d'absorber ou de résorber une grande partie de l'énergie sismique, réduisant ainsi la demande de dissipation d'énergie pour la ductilité dans les principaux éléments de la structure et de réduire ainsi leurs éventuels dommages structuraux.

Les dommages structuraux dus aux événements sismiques relatés en littérature, ont conduit à s'interroger sur l'efficacité des structures classiques et les méthodes d'analyse utilisées pour évaluer leur réponse, tel que :

- L'impossibilité de déterminer à priori la demande de ductilité à un événement sismique et où elle se produira.
- La présence de rupture fragile dans les systèmes prétendus ductiles.
- Le coût élevé de réparation que nécessite un comportement ductile basé sur la dissipation d'énergie dans la structure.
- Il est plus facile d'assurer la demande de ductilité.
- Le contrôle de qualité dans les matériaux peut être plus intense dans les zones où l'offre de ductilité est établie.
- Les dégâts sont plus prévisibles et la réparation plus économique que dans les systèmes basés sur des dommages structurels dispersés.

Une autre possibilité consiste en l'utilisation de dissipateurs d'énergie externes à la structure. Bien que formant une partie du système structural, ils sont utilisés comme un lien et ils permettent de restaurer la structure en cas de dommage sévère.

## 2.3 Systèmes de protection sismique

Les systèmes de protection sismique actuellement utilisés vont des dispositifs de contrôle passif relativement simple aux systèmes complètement actifs. Les systèmes passifs sont, peut-être, les plus connus et ils incluent les systèmes d'isolation sismique et les systèmes mécaniques de dissipation d'énergie. Le système d'isolation sismique est plus développé, avec des progrès continus sur les appareils, les applications et les spécifications de conception.

Comme précédemment noté, les systèmes de protection sismique peuvent être classés en quatre catégories comme le montre la figure (2.1) :

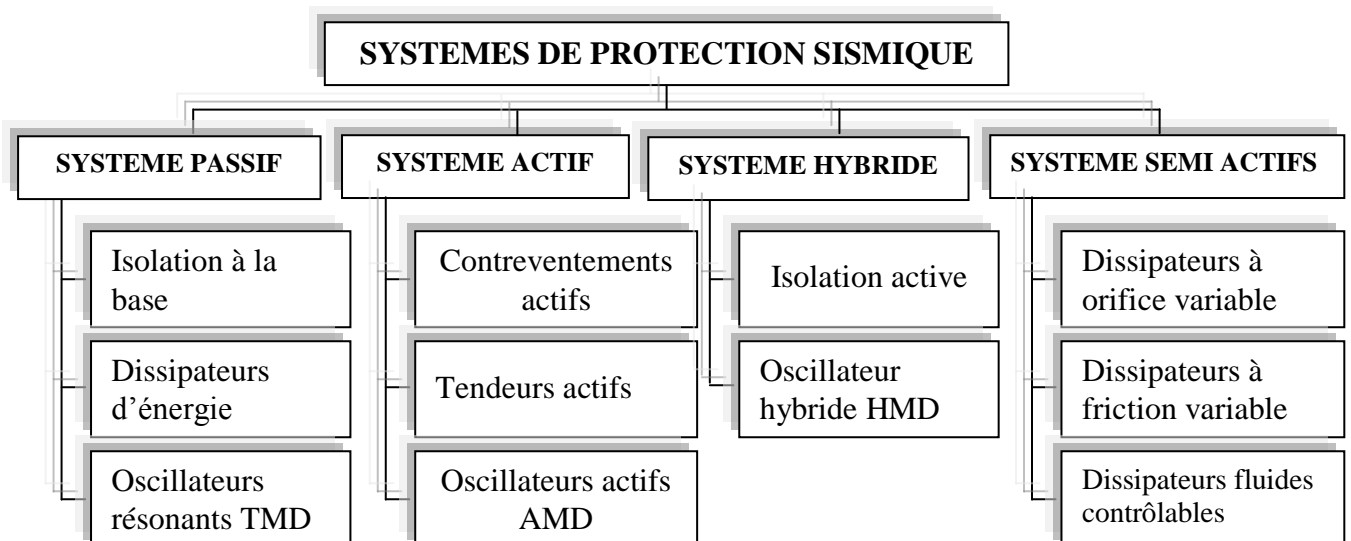


Figure 2.1 : Les catégories des systèmes de protection sismique

### 2.3.1 Système de contrôle passif

Les systèmes de contrôle passif utilisent des dispositifs assez simples qui réduisent la réponse dynamique par des moyens entièrement mécaniques. Les systèmes passifs les plus courants sont les isolateurs sismiques, les dissipateurs d'énergie et les oscillateurs résonants connus également comme systèmes inertiels couplés (Tuned Mass Damper - TMD).

### 2.3.1.1 Contrôle passif avec isolation à la base (les isolateurs sismiques)

L'isolation sismique est une stratégie de conception fondée sur l'idée qu'il est possible de séparer la structure du mouvement du sol en introduisant des éléments souples entre la structure et les fondations. Les isolateurs permettent de réduire sensiblement la rigidité structurelle du système, offrant une période fondamentale de la structure isolée beaucoup plus grande que celle de la même structure sans isolateurs [3]. Il existe essentiellement deux types de système d'isolation : les isolateurs en élastomère et les isolateurs glissants.

Les isolateurs en élastomère sont constitués d'une gamme en caoutchouc ou en caoutchouc néoprène renforcé de plaques minces en acier. La flexibilité latérale importante dans l'élastomère permet le mouvement latéral des extrémités de l'isolateur, les plaques de renforcement permettent d'éviter un gonflement de l'élastomère et de fournir une rigidité verticale élevée. Il existe trois types d'isolateurs qui sont largement utilisés : l'isolateur d'amortissement bas et l'isolateur d'amortissement élevé (LDR et HDR), l'isolateur de base en élastomère avec barre de plomb (LRB) et l'isolateur en pendule de friction (FPS).

#### 2.3.1.1.1 Isolateur en élastomère d'amortissement élevé (HDR) :

Le terme HDR est appliqué aux appuis en élastomères où l'élastomère utilisé fournit une quantité d'amortissement significative, habituellement à partir de 8% à 15% de l'amortissement critique [4].

Un isolateur en élastomère d'amortissement élevé (figure 2.2) est constitué de plusieurs couches en caoutchouc avec des propriétés d'amortissement élevées séparées par des plaques en acier afin d'augmenter la rigidité verticale. Il est verticalement rigide capable de soutenir les charges verticales de pesanteur tout en étant latéralement flexible, capable de permettre des grands déplacements horizontaux [3 ; 5]. Au moyen de ses possibilités de flexibilité et d'absorption d'énergie, le système HDR reflète et absorbe partiellement une partie de l'énergie du tremblement de terre avant que cette énergie ne puisse être transmise à la structure.



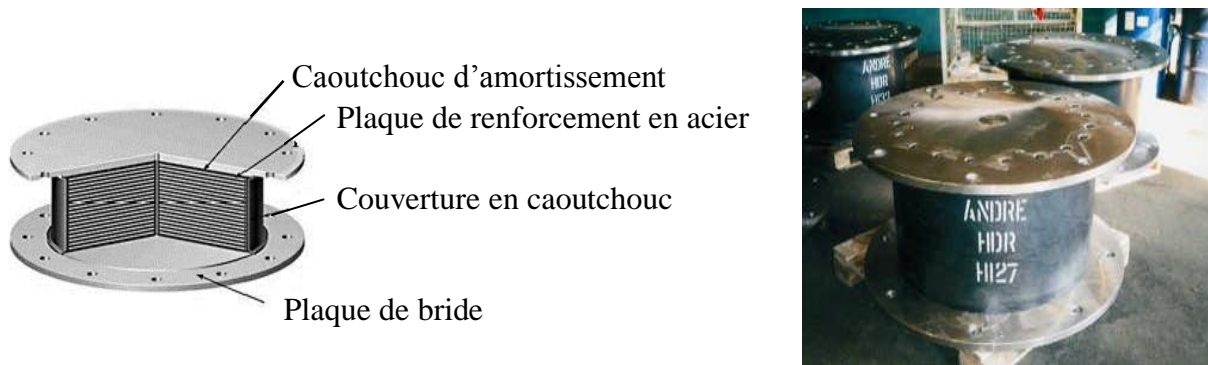


Figure 2.2 : photo et schéma d'un isolateur en élastomère d'amortissement élevé (HDR) [6]

### 2.3.1.1.2 Les Systèmes en Caoutchouc Naturel et Synthétique de Faible Amortissement.

Les appuis en caoutchouc naturel et synthétique de faible amortissement (Low-Damping Natural and Synthetic Rubber Bearings (LDRB)) ont été employés couramment au Japon en conjonction avec les dispositifs d'amortissement supplémentaires, tels que les amortisseurs visqueux, les barres en acier, les barres de plomb, les dispositifs de frottement...etc. Ces isolateurs sont constitués de deux plaques d'extrémité en acier épaisses et de nombreuses cales en acier épais. Le caoutchouc est vulcanisé et collé sur l'acier en une seule opération, sous la chaleur et la pression dans un moule. Les cales en acier empêchent le gonflement du caoutchouc et fournissent une rigidité verticale élevée mais n'ont aucun effet sur la rigidité horizontale, qui est contrôlé par le faible module de cisaillement de l'élastomère. Le comportement du matériau dans le cisaillement est tout à fait linéaire jusqu'aux contraintes de cisaillement supérieures à 100%, avec l'amortissement de l'ordre de 2% à 3% de l'amortissement critique. Le matériau n'est pas soumis au fluage et la stabilité à long terme du module est bonne [3 ; 5].

Les avantages des roulements stratifiés élastiques de faible amortissement, sont beaucoup, ils sont simples à fabriquer (le processus de composition et de collage à l'acier est bien compris), faciles à modeler, et leur réponse mécanique n'est pas affectée par le taux, la température, les étages, ou le vieillissement. Le seul inconvénient est que le système d'amortissement supplémentaire est généralement nécessaire. Ces systèmes supplémentaires exigent des liaisons élaborées et, dans le cas des amortisseurs métalliques, sont susceptibles à un cycle bas de fatigue [3 ; 5].

### 2.3.1.1.3 Isolateur de base en élastomère avec barreau de plomb (LRB)

Le genre le plus important des systèmes d'isolation à la base qui a été largement étudié et mis en oeuvre dans certain nombre de bâtiments à travers le monde, est l'isolateur de base en élastomère avec barreau de plomb (LRB), qui a été inventé en Nouvelle Zélande en 1975.

Un isolateur LRB comme le montre la figure 2.3 est construit d'une alternance de couches de caoutchouc et d'acier contribue à assurer la stabilité, soutient la structure et isole les vibrations, en outre un noyau de plomb inséré comme centre de LRB pour augmenter l'effet d'amortissement (le noyau de plomb fournit la rigidité sous les charges de services et la dissipation d'énergie sous les charges latérales élevées) et équipé dans le haut et le bas par des plaques en acier (pour fixer le glissement du bâtiment à travers sa fondation) [7 ;8 ;4].

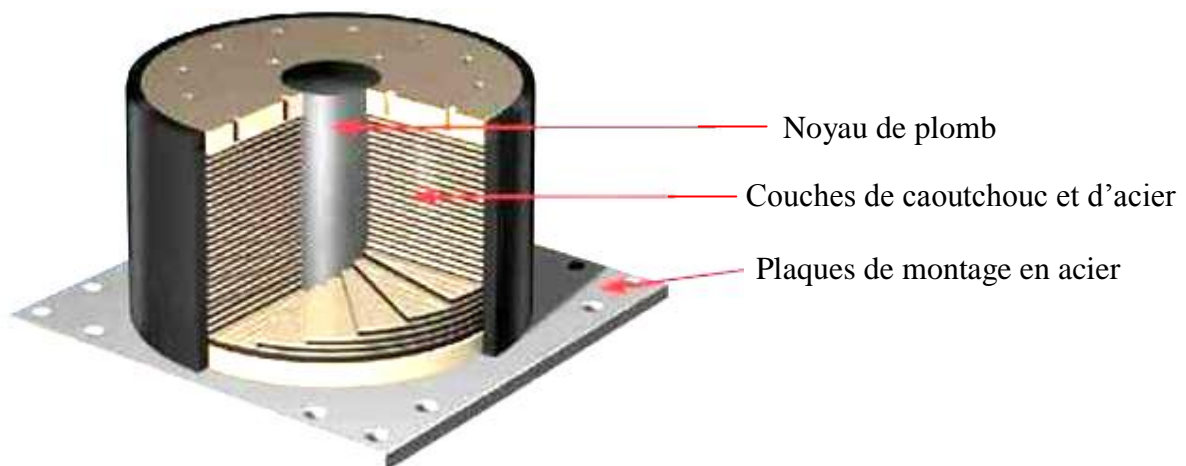


Figure 2 .3 : Isolateur de base en élastomère avec barreau de plomb (LRB) [9]

L'isolateur de base en élastomère avec barreau de plomb est plutôt flexible dans le sens horizontal, mais assez rigide dans le sens vertical. La rigidité horizontale de l'appui est également conçue de telle manière qu'elle puisse résister aux forces du vent avec peu ou pas de déformation. Il soutient non seulement le chargement vertical mais également prolonge la période de réaction de séisme de la structure et exerce l'isolation et la dissipation d'énergie. La période normale recommandée pour une performance optimale est entre 1,5 et 2,5 sec [8].

#### 2.3.1.1.4 Isolateur en pendule de friction (FPS)

L'isolateur en pendule de friction est un des systèmes d'isolation à la base les plus récents pour améliorer l'isolation sismique des structures, constitué d'une surface sphérique d'acier inoxydable et d'un glisseur articulé en matériaux composites à base de Téflon. Le système d'isolation FPS est composé d'un mécanisme de reconstitution basé sur sa géométrie concave (figure 2.4). [3 ; 5 ; 11 ; 12].

Les FPS travaillent au même principe qu'un pendule simple ; Lors d'un tremblement de terre le glisseur articulé se déplace le long de la surface concave faisant déplacer la structure de petits mouvements harmoniques et augmentant la période normale de la structure afin d'éviter les forces de tremblements de terre les plus forts. Comme l'illustre la figure 2.5 ils réduisent les charges latérales et les mouvements de vibration transmise à la structure et peuvent protéger les structures et leur contenu pendant des tremblements de terre forts, de grandeur 8.

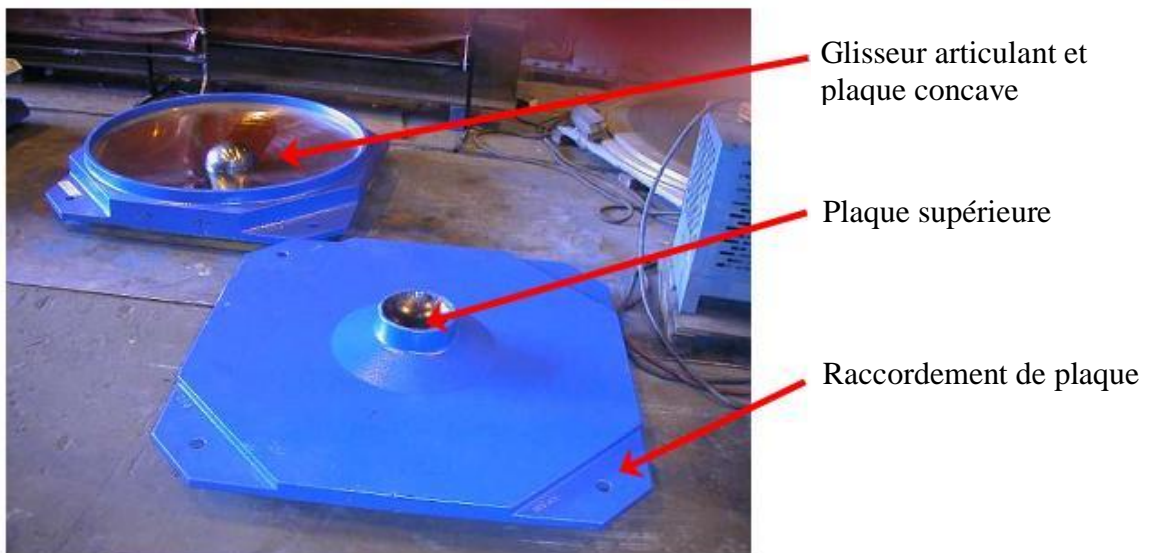


Figure 2.4 : isolateur en pendule de friction (FPS) [10]

Ces isolateurs ont été employés dans certains des plus grands bâtiments du monde, ponts et réservoirs de produits chimiques. [5 ; 4 ; 3]

La période normale d'un amortisseur FPS est indépendante de la masse de la structure. Elle est seulement liée au rayon de la surface concave  $R$ .

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (2.2)$$

Où  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

La rigidité latérale  $K$  de l'appui qui fournisse les possibilités de reconstitution du système est

$$K = \frac{W}{R} \quad (2.3)$$

Où  $W$  est le poids de la structure.

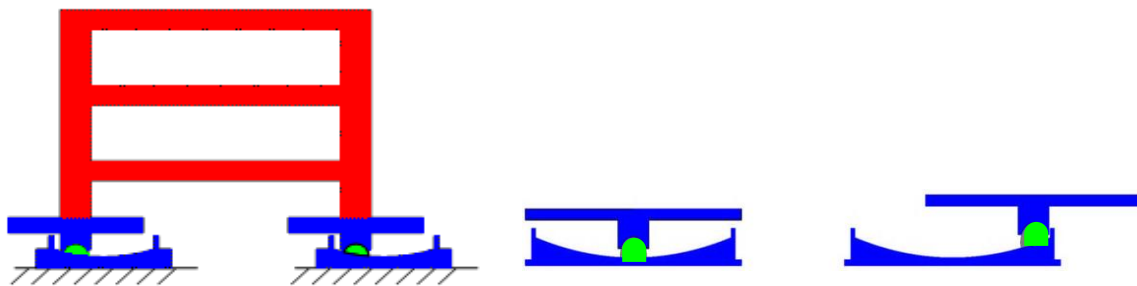


Figure 2.5 : principes de fonctionnement d'un isolateur FPS [13]

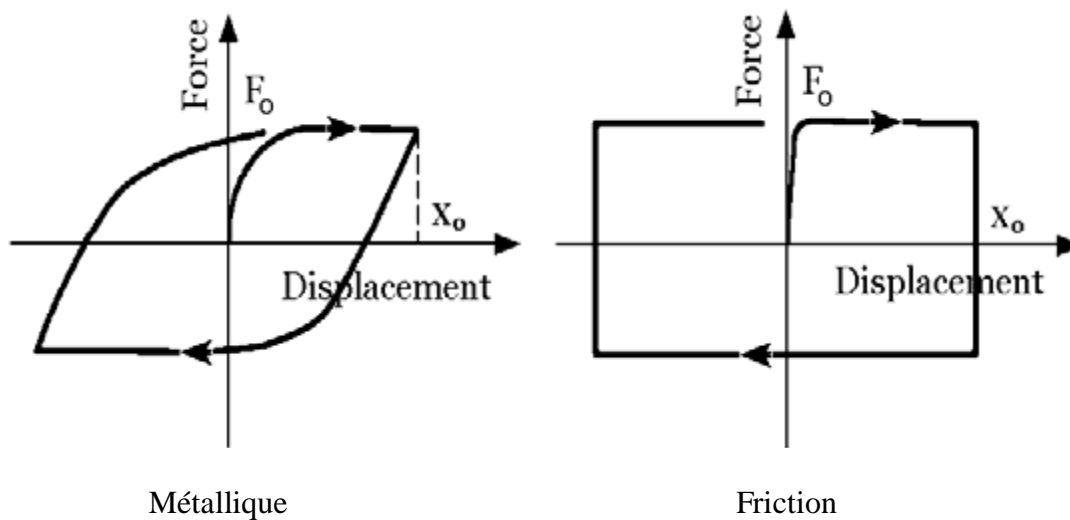
### 2.3.1.2 Contrôle passif avec dissipateurs d'énergie

Les dissipateurs d'énergie sont des systèmes conçus pour absorber l'essentiel de l'énergie sismique évitant ainsi la dissipation par des déformations inélastiques dans les éléments de structures. Selon leur comportement, ils peuvent être classés comme hystérétiques, viscoélastiques et à fluide visqueux. Les dissipateurs hystérétiques sont basés sur la plastification de l'acier et le frottement entre les surfaces. Ces dispositifs dépendent essentiellement des déplacements. Les dissipateurs viscoélastiques peuvent être viscoélastiques solides ou fluides et leur comportement dépend du déplacement et de la vitesse. Les dispositifs de dissipations à fluides visqueux ont un comportement qui dépend principalement de la vitesse.

- a- dissipateurs hystérétiques
- b- dissipateurs viscoélastiques
- c- dissipateurs visqueux fluides.

### 2.3.1.2.1 Dissipateurs hystérétiques

Une variété de dispositifs de dissipation d'énergie hystérétique a été proposée et développée pour augmenter la protection structurelle. Généralement les dispositifs hystérétiques absorbent l'énergie par un mécanisme qui est indépendant du taux de fréquence de charge, du nombre de cycles de charge et de la variation de température. En outre, ces dispositifs ont une haute résistance à la fatigue. Les dispositifs hystérétiques incluent les amortisseurs métalliques qui utilisent le rendement des métaux comme mécanisme dissipatif, et les amortisseurs de frottement qui produisent de la chaleur par le frottement de glissement sec. Ces dispositifs produisent une boucle hystérétique rectangulaire (figure 2.6). Les modèles les plus simples du comportement hystérétique impliquent la relation algébrique entre la force et le déplacement. Ainsi, les systèmes hystérétiques s'appellent souvent dépendants de déplacement.



#### 2.3.1.2.1.1 Les amortisseurs métalliques

Les amortisseurs métalliques sont des dispositifs qui sont conçus pour fournir la dissipation d'énergie à un système structurel, ces amortisseurs utilisent le comportement hystérétique des métaux dans le domaine non élastique. Les forces de résistance des amortisseurs, par conséquent, dépendent des caractéristiques non linéaires de contrainte-déformation du matériau métallique. Les caractéristiques particulièrement souhaitables de ces

systèmes sont leur comportement hystérétique stable, la propriété de fatigue de cycle bas, une fiabilité à long terme, et une bonne résistance aux facteurs environnementaux et de température [15 ; 16]. En outre ces dispositifs sont relativement peu coûteux et leurs propriétés demeureront stables au cours des longues vies de la structure. Les inconvénients de ces dispositifs sont leur nombre limité de cycles de fonctionnement et leur réponse non linéaire [17]. Parmi les différents types de ces dispositifs on va présenter, les dispositifs d'EDU, LED, les amortisseurs ADAS et TADAS.

### A- Le dispositif EDU

Le dispositif EDU est un dispositif multi-composé constitué avec des dissipateurs d'énergie élémentaires en forme de C (figure 2.7, droite), ils sont combinés de telle manière qu'ils sont forcés de déformer anti-symétriquement, c.-à-d. pour chacun en compression, un autre est en traction; leur combinaison avec la symétrie radiale permet le comportement uniforme sous charge sismique agissant dans n'importe quelle direction. Il absorbe beaucoup plus d'énergie que n'importe quel autre système. Il montre des propriétés d'auto-recentrage pour des effets thermiques et de petits tremblements de terre. En outre, il a de faibles coûts.



Figure 2.7 : Dispositif en forme de C (à gauche) et dispositif EDU (à droite)

### B- Dispositifs d'extrusion de plomb (LED)

L'extrusion du plomb a été identifiée comme un mécanisme efficace pour la dissipation d'énergie dans les années 70 [16]. L'amortisseur d'extraction de plomb (Lead Extrusion Devices (LED)) représente une autre classe des amortisseurs, qui utilise les propriétés de dissipation hystérétique du métal. Le processus d'extrusion consiste à forcer un piston de plomb à travers un trou ou un orifice, changeant ainsi sa forme. Les LED ont été appliquées à un certain nombre de structures. Plusieurs ponts sismiquement isolés en

Nouvelle Zélande utilisent également LED. Au Japon, les LED ont été incorporées dans des bâtiments en acier de 17 et 8 étages. La figure.2.8 illustre deux types d'amortisseurs d'extrusion de plomb présentés par Robinson [15].

Le premier dispositif est constitué d'un tube à parois épaisses et d'un axe coaxial avec un piston. Il y a une constriction dans le tube entre les têtes de piston et l'espace entre les têtes de piston est rempli avec du plomb. L'axe central s'étend au-delà d'une extrémité du tube. Quand l'excitation externe s'est produite, le piston se déplace le long du tube et le plomb est forcé pour expulser dans les deux sens par l'orifice formé par la constriction du tube.

Le deuxième type de LED est similaire au premier, sauf que l'orifice d'extrusion est constitué par un gonflement sur l'axe central plutôt que par une constriction dans le tube. L'axe (la tige) est soutenu par un appui qui sert également à maintenir le plomb en place; Pendant que l'axe se déplace, le plomb doit expulser à travers l'orifice formé par le gonflement et le tube. Semblable à la plupart des dispositifs de frottement, le comportement hystérétique de LED est rectangulaire.

Les caractéristiques principales de ces dispositifs sont leur comportement hystérétique rectangulaire, leur relation effort-déformation stable et qui n'est pas affectée par le nombre de cycles de chargement; il n'est influencé par aucun facteur environnemental ; la fatigue n'est pas un problème majeur, la vitesse de déformation a un effet mineur et les effets de vieillissement sont insignifiants. Ils ont une longue vie et ne doivent pas être remplacés ou réparés après une excitation sismique puisque le plomb dans l'amortisseur revient à son état non déformé après l'excitation.

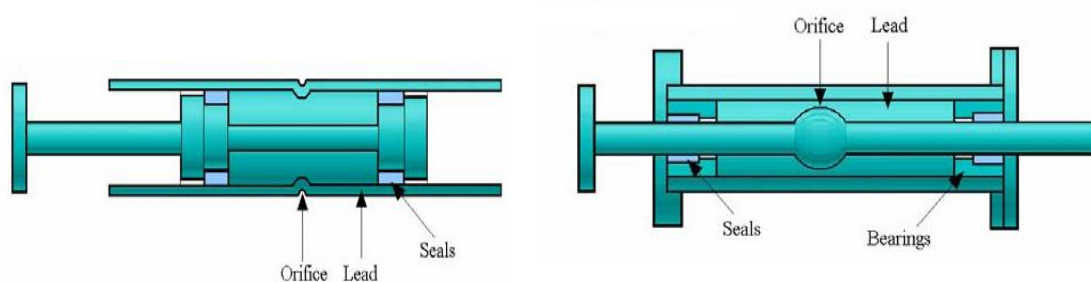


Figure 2.8 : Deux exemples des Dispositifs d'extrusion de plomb [15]

### C- Le dispositif d'amortissement et de rigidité supplémentaire (ADAS)

Le dispositif d'amortissement et de rigidité supplémentaire (Added Damping and Stiffness (ADAS)) se compose d'une série de plaques d'acier en forme de X (Figure.2.9). Les éléments d'ADAS sont conçus pour absorber l'énergie par la déformation plastique de flexion des plaques.

Ces dispositifs montrent un comportement hystérétique stable ; ils sont peu sensibles aux effets thermiques, et extrêmement fiables. La pertinence de tels éléments d'amortissement pour les structures existantes d'adaptation ultérieure aussi bien que les nouvelles constructions est confirmée et préconisée par plusieurs auteurs. Ils peuvent être montés par contreventement diagonal ou en chevron. Ils sont reliés aux poutres de sorte que les déplacements entre étages peuvent provoquer des déplacements horizontaux relatifs, qui mènent à la dissipation d'énergie par la plastification d'un large volume d'acier. Les principales caractéristiques qui affectent le comportement d'un dispositif d'ADAS sont sa rigidité élastique, sa limite d'élasticité, et son déplacement plastique. Les ADAS sont faciles à construire et relativement peu coûteux [16 ; 18].

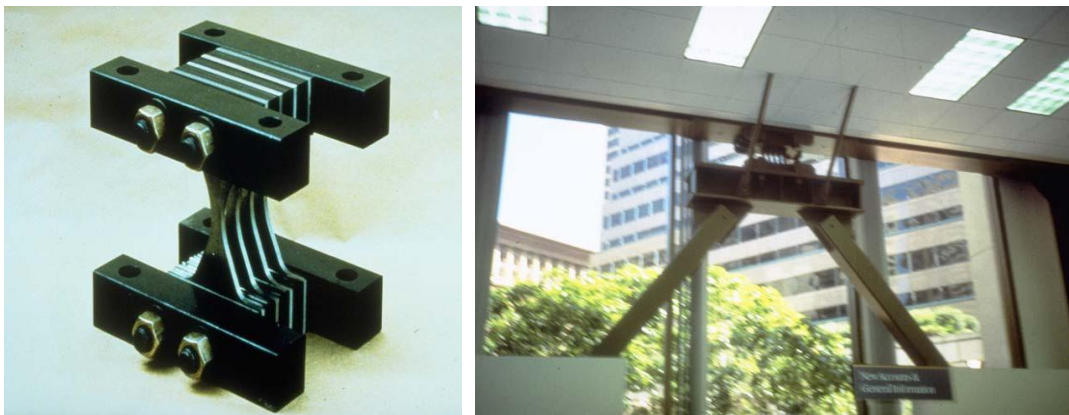


Figure 2.9 : Amortisseur ADAS [18]

### D- Amortisseur de plaques triangulaire (TADAS)

Le deuxième type des amortisseurs de plaques métalliques qui sont couramment employés est l'amortisseur de plaques triangulaires (Triangular-plate Added Damping And Stiffness (TADAS)) qui a été initialement développé en Nouvelle-Zélande. Le dissipateur TADAS constitué de plaques triangulaires d'acier disposées en parallèle. Ces plaques sont soudées en bas et boulonnées en haut comme le montré la figure 2.10. En raison de leurs



formes, les plaques en métal dans ces dispositifs éprouvent des contraintes de flexion uniformes sur leur longueur. Pendant des déformations cycliques, les plaques sont soumises au mécanisme par hystérésis et la plastification de ces plaques consomme une partie substantielle de l'énergie de vibration structurale. D'ailleurs, la rigidité additionnelle présentée par les éléments métalliques augmente la force latérale du bâtiment, avec la réduction conséquente des déformations et des dommages dans les éléments de la structure.

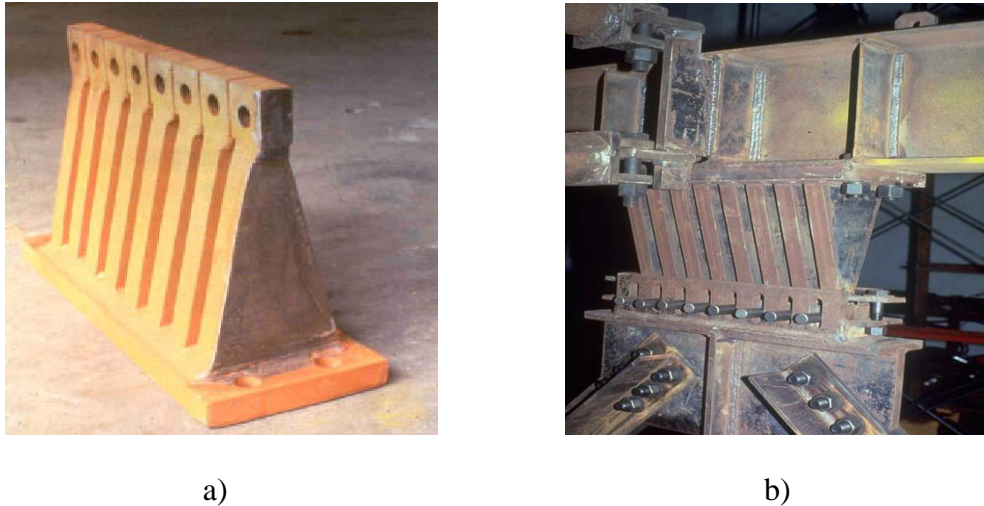


Figure 2.10 : Amortisseur TADAS, a) les plaques triangulaires b) les plaques soudées [19]

### 2.3.1.2.1.2 Les amortisseurs de friction

Plusieurs dispositifs de friction ont été proposés et développés pour la dissipation d'énergie dans les structures. La plupart de ces dispositifs produisent des boucles d'hystérésis rectangulaires. Le comportement des amortisseurs de frottement est semblable à celui du frottement de Coulomb. Généralement, ces dispositifs ont des caractéristiques de bon fonctionnement, et leur comportement est relativement moins affecté par la fréquence de charge, le nombre de cycles de charge, ou la variation de la température. En outre, ces dispositifs ont de haute résistance à la fatigue. Les dispositifs diffèrent dans leur complexité mécanique et dans les matières employées pour les surfaces de glissement [15]. Plusieurs types d'amortisseur de friction sont disponibles. On se limite à citer :

- L'amortisseur de frottement de Sumitomo.
- L'amortisseur de Pall.
- L'amortisseur boulonné encoché (Slotted bolted damper) et
- La contrainte de dissipation d'énergie (Energy Dissipating Restraint. EDR).

### A- L'amortisseur de Sumitomo

L'amortisseur de frottement de Sumitomo a été développé par les industries métallurgiques de Sumitomo au Japon. Pendant des années, l'amortisseur de frottement de Sumitomo était fabriqué pour des applications ferroviaires, mais il est maintenant étendu aux structures [15 ; 16 ; 18 ; 20]. La figure 2.11 montre la construction d'un amortisseur de frottement typique de Sumitomo. Le dispositif se compose des plaquettes de cuivre, imbibées du graphite en contact avec le cylindre en acier du dispositif. La charge sur la surface de contact est développée par une série de cales qui agissent sous la compression des ressorts de rondelle de Belleville. Le graphite sert à lubrifier la surface de glissement et d'assurer un coefficient de frottement stable et un fonctionnement silencieux [15 ; 20].

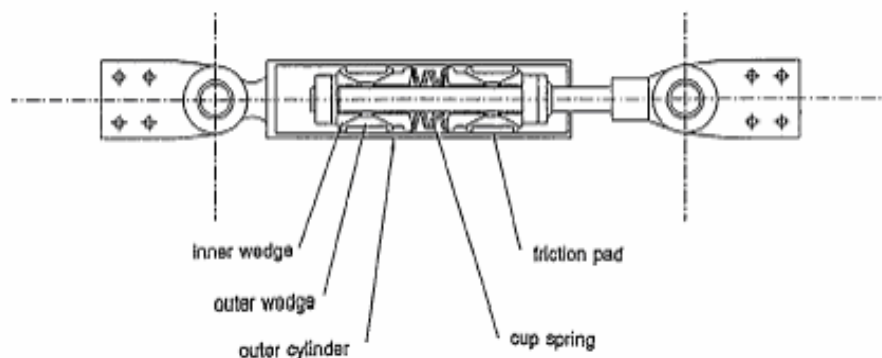


Figure 2.11 : L'amortisseur de Sumitomo [20]

### B- L'amortisseur de Pall

Un exemple des amortisseurs qui emploie également le frottement de Coulomb pour absorber l'énergie lors d'un événement séismique est le dispositif de frottement proposé par Pall et Marsh (1982) et Pall et al. (1987). C'est un dispositif qui peut être situé à l'intersection des contreventements en croix dans le cadre comme le montre la figure. 2.12. [15].

Une fois la charge séismique est appliquée, le croisillon de tension induit un glissement au niveau du frottement. Par conséquent, les quatre liens forcent le croisillon de compression à glisser. De cette manière, l'énergie est absorbée dans les deux croisillons quoiqu'ils soient conçus pour être efficaces dans la traction seulement. Le dispositif est conçu pour empêcher le glissement sous les charges de service normales.

Filiatrault et Cherry (1987) et d'Aiken et al. (1988) montrent l'efficacité de ces dispositifs en prouvant une augmentation importante de la capacité de dissipation d'énergie et en réduisant le déplacement inter-étage par rapport aux cadres de résistance de moment sans de tels dispositifs. Filiatrault et Cherry (1990) ont développé une méthode de conception pour estimer la répartition des charges optimales de glissement pour les amortisseurs de frottement de Pall. Le critère de conception est de réduire au minimum un index relatif d'exécution dérivé utilisant des concepts d'énergie. Le dispositif a été utilisé dans plusieurs bâtiments au Canada, l'Inde, les Etats-Unis et la Chine [15 ; 20].

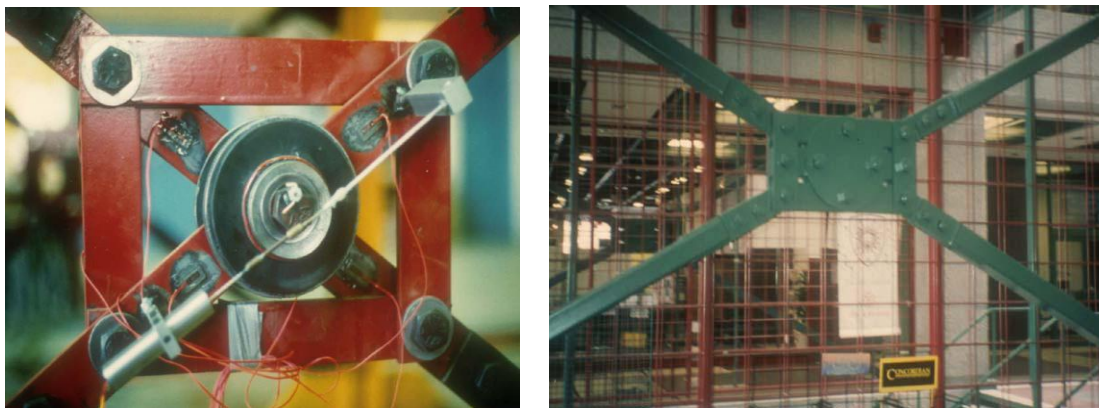


Figure 2.12 : L'amortisseur de Pall et son installation [19]

### C- Amortisseur boulonné encoché (Slotted-bolted damper)

Fitzgerald et al. (1989) ont proposé un dispositif de frottement qui permet au glissement d'avoir lieu dans les raccords boulonnés encochés (figure 2.13) [15 ; 20 ; 21]. L'amortisseur boulonné encoché se compose de plaques d'acier qui sont boulonnées ensemble avec une force de fixation spécifique. La force de fixation est telle que le glissement peut se produire à une force de frottement prédéterminée [18]. L'interface glissante se compose seulement de l'acier. Une amélioration a été présentée par Grigorian et Popov (1993) qui ont examiné un raccordement boulonné encoché semblable à celui de Fitzgerald, excepté que l'interface de glissement s'est composée du laiton et de l'acier, une telle interface a présentée une caractéristique de friction plus stable que l'interface en acier [15 ; 20]. Des essais de simulateur de tremblement de terre d'un modèle à trois étages d'acier avec le raccordement encoché ont été effectués par Grigorian et Popov (1993) qui ont montré l'efficacité du dispositif en réduisant la réponse [15].

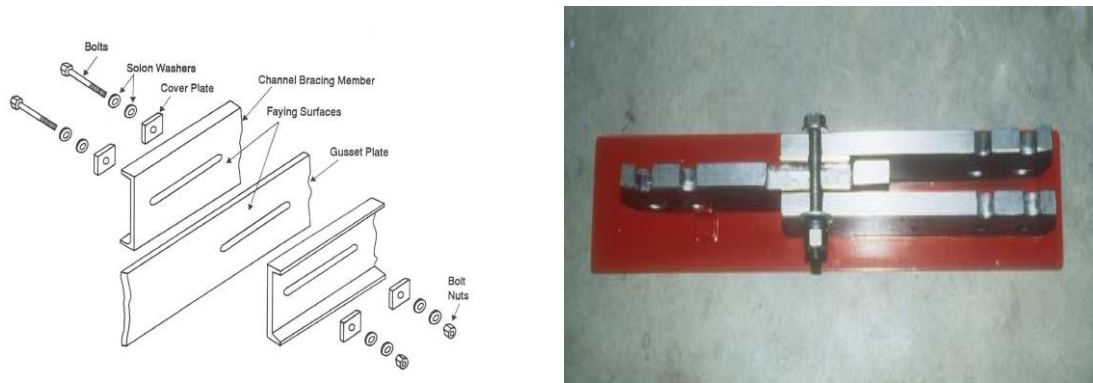


Figure 2.13 : Amortisseur boulonné encoché (Connection de Fitzgerald (1989)) [19]

#### D- La contrainte de dissipation d'énergie (EDR)

Fluor Daniel, a développé et testé un type unique de dispositif de frottement, appelé la contrainte de dissipation d'énergie (Energy Dissipating Restraint (EDR)). L'EDR est caractérisé par des possibilités d'auto-centrage et la charge de glissement est proportionnelle au déplacement [16 ; 20]. Ainsi c'est le seul dispositif de friction qui produit des boucles d'hystérésis non-rectangulaires et il est activé même par de petites excitations.

Ce dispositif inclut également un ressort interne et des cales encastrées dans un cylindre en acier (figure 2.14). L'EDR utilise des cales de compression en acier et des cales de frottement en bronze afin de transformer la force axiale de ressort en pression normale agissant vers l'extérieur sur la paroi de cylindre. La surface de frottement est formée par l'interface entre les bords en bronze et le cylindre en acier, La composition de l'interface est d'importance primordiale pour assurer la longévité du dispositif. Des arrêts internes sont assurés dans le cylindre afin de créer les lacunes de tension et de compression. Il convient de mentionner que la longueur du ressort interne peut être changée lors du fonctionnement, offrant une force de frottement à glissement variable [22].

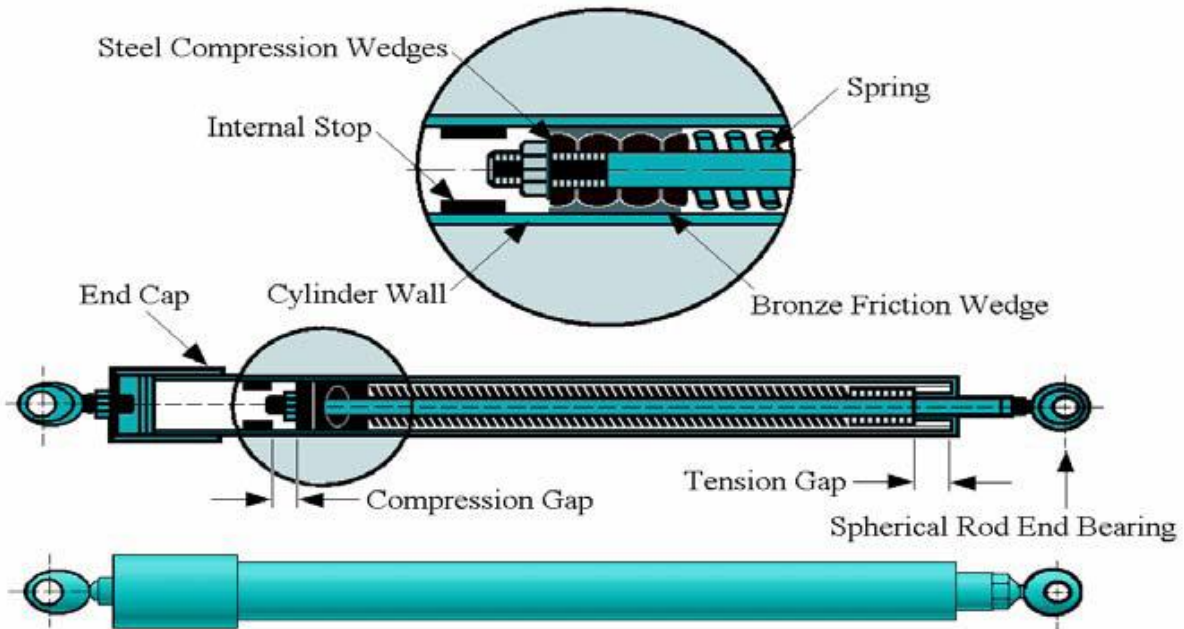


Figure 2.14 : Vues extérieure et intérieure de la contrainte de dissipation d'énergie [15]

### 2.3.1.2.2 Amortisseur visqueux élastique

Les amortisseurs visqueux élastiques ont été appliqués la première fois aux structures en 1969 dans les Tours jumelles du World Trade Center à New York City, New York pour réduire le mouvement sous les charges de vent. Une réduction significative d'oscillations par ces amortisseurs a été atteinte dans ces bâtiments. Récemment, Des chercheurs ont prouvé qu'ils peuvent également convenir à la réduction des risques sismiques des bâtiments. De nombreux modèles analytiques et techniques numériques ont été proposés pour simuler le comportement des structures équipées d'amortisseurs visqueux élastiques. La boucle qui illustre la relation force-déplacement est présentée sur la figure 2.15 Ces dispositifs incluent les dispositifs visqueux élastiques fluides et visqueux élastiques solides.

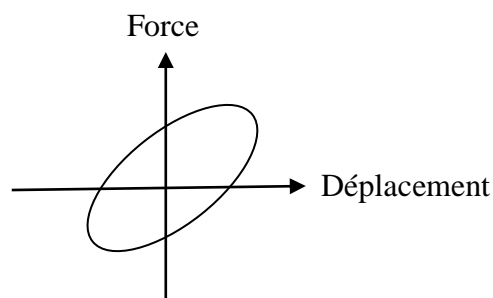


Figure 2.15 : La boucle force-déplacement d'un dissipateur d'énergie visqueux-élastique [14]

### 2.3.1.2.2.1 Amortisseur visqueux élastique fluide

Les dispositifs visco-élastiques fluides, qui fonctionnent en cisillant les fluides visco-élastiques, ont des comportements qui ressemblent à ceux des dispositifs visco-élastiques solides, sauf que les amortisseurs visco-élastiques fluides ne montrent pas la rigidité quand les charges statiques sont appliquées [14 ; 17]. Ces dispositifs peuvent être modélés avec le modèle de Maxwell (Figure 2.16), qui se compose d'un ressort et d'un amortisseur monté en série [14 ; 17 ; 23 ; 24].

La réponse cyclique des dispositifs à fluide viscoélastique dépend généralement de la fréquence et de l'amplitude du mouvement et de la température de fonctionnement (y compris l'élévation de température due à l'excitation) [23 ; 24].

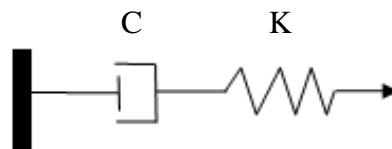


Figure 2.16 : Modèle de Maxwell [14]

Différentes approches ont été développées ayant le même concept afin d'améliorer la réponse des bâtiments sous les charges sismiques et le vent. Une approche de conception des amortisseurs visqueux est d'absorber l'énergie par la transformation de l'énergie mécanique en chaleur pendant qu'un piston mobile déforme une substance épaisse et fortement visqueuse, telle qu'un gel de silicone. La figure.2.17a) illustre un tel amortisseur, qui a trouvé l'application en tant que composant dans les systèmes d'isolation sismique. Bien que ces dispositifs pourraient également être déployés dans la superstructure, une alternative, et peut-être plus efficace, le concept de construction comporte le développement du mur d'amortissement visqueux illustré dans la figure (2.17 b) [25]. Le système de mur d'amortissement visqueux a été développé par la société de construction de Sumitomo au Japon. Le dispositif se compose d'un récipient extérieur en acier fixé au plancher inférieur, rempli d'un fluide fortement visqueux. Une plaque en acier (mur) mobile à l'intérieur du récipient et pendu au plancher supérieur (figure.2.17 b)). Les forces d'amortissement visqueux sont induites par la vitesse relative entre les deux planchers. Arima et al. (1988) ont effectué des essais expérimentaux sur un cadre en acier à grande échelle de 4 étages avec et sans les murs d'amortissement visqueux. Les résultats de cadre muni des murs visqueux ont indiqué des réductions de réponse de 66 à 80%. Un bâtiment en béton armé à 4 étages avec

les murs d'amortissement visqueux a été construit à Tsukuba, Japon en 1987 et a été depuis contrôlé pour la réponse sismique. Des réductions dans les réponses d'accélération entre 33 à 75 % ont été observées lors de l'utilisation des murs d'amortisseur visqueux. Les murs d'amortissement visqueux installés dans le bâtiment de cadre en acier d'une hauteur de 78 m dans la ville de Shizuoka, Japon, ont fournis de 20 à 35% d'amortissement pour le bâtiment et ont réduits la réponse de 70 à 80%.

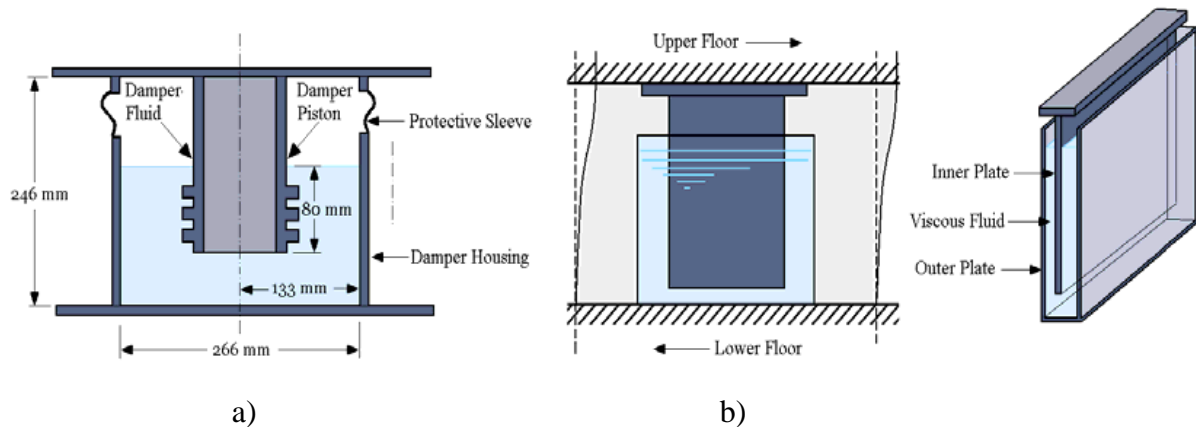


Figure 2.17 : a) ammortisseur à fluide de récipient cylindrique

b) le mur d'amortissement visqueux [25]

### 2.3.1.2.2.2 Amortisseur visqueux élastique solide

Les dispositifs visco-élastiques solides se composent de couches contraintes de polymères acryliques [14 ;17 ;27] et ils sont conçus tels qu'ils produisent des forces d'amortissement par des déformations de cisaillement dans les polymères. Les matières visco-élastiques employées dans l'application structurale absorbent l'énergie une fois soumises à la déformation de cisaillement. La figure 2.18 montre un dispositif visco-élastique solide typique qui se compose de deux couches de polymère serrées entre une plaque centrale et deux plaques externes. Une fois montée dans une structure, la déformation de cisaillement et par conséquent la dissipation d'énergie aura lieu quand la vibration structurale induit un mouvement relatif entre les brides en acier externes et la plaques centrale [20]. Ces dispositifs montrent un comportement visco-élastique solide avec des propriétés mécaniques dépendantes de la fréquence, de la température et de l'amplitude du mouvement [14]. En particulier, la dépendance de la température de ces dispositifs est une considération importante de conception et doit être explicitement modélisée pour l'analyse dynamique des structures amortie visco-élastiquement, En raison de cette dépendance de la température, ces

dispositifs ne peuvent pas être utiles dans les structures où le climat n'est pas contrôlé continuellement [17]. Les dispositifs visco-élastiques solides, peuvent être modélés en utilisant un ressort et un amortisseur monté en parallèle (modèle de Kelvin) figure 2.19 [23 ; 25].

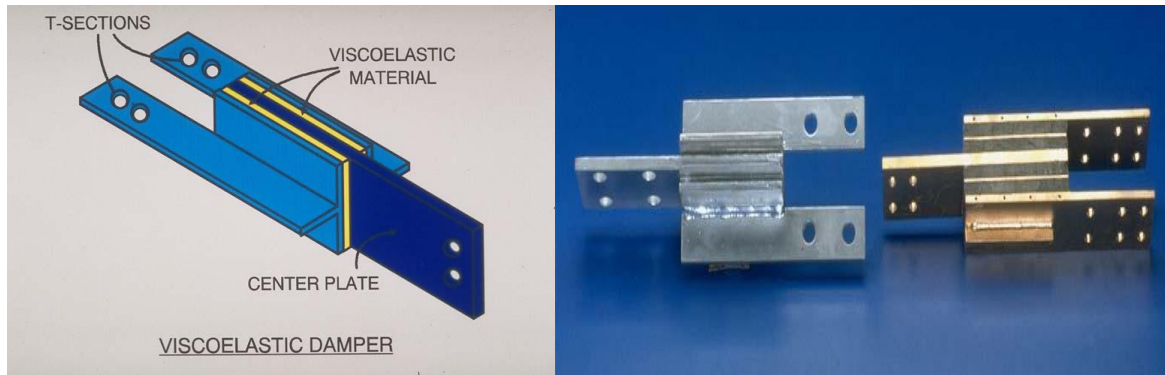


Figure 2.18 : Amortisseur visqueux élastique solide [19]

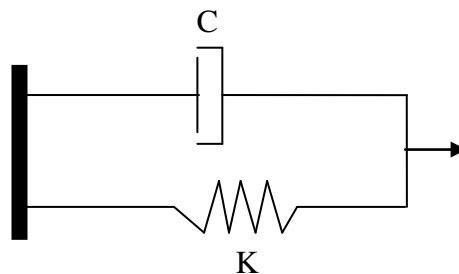


Figure 2.19 : Modèle de kelvin [18]

### 2.3.1.2.3 Amortisseur à fluide visqueux

Les dispositifs à fluide visqueux sont largement utilisés dans plusieurs systèmes structuraux et mécaniques, afin de réduire les réponses aux vibrations et au choc. Ils sont utilisés dans les structures en tant que dispositifs de contrôle passifs, ces amortisseurs visqueux dissipent l'énergie par le déplacement d'un corps dans un fluide visqueux [17 ; 25].

Ces amortisseurs fonctionnent sur le principe de l'écoulement du fluide à travers des orifices, ils ont été inventés par Ralph Peo Buffalo en 1925 à New York et utilisés dans les applications des véhicules. Les dispositifs de Taylor ont été fabriqués depuis 1955. Ils sont à l'origine développés pour l'isolation du choc du matériel militaire et utilisés pendant de



nombreuses années dans les industries des automobiles, d'aérospatiales, et de défense [15 ; 17 ; 25]. Les dispositifs à fluide visqueux qui sont d'intérêt dans les applications de génie parasismique peuvent absorber des grandes quantités d'énergie, sur un large intervalle de fréquences d'excitation. Leur réponse de force est proportionnelle à la vitesse. Ils possèdent un comportement visqueux linéaire et sont relativement peu sensibles à la variation de température [15]. La durée de ces dispositifs tend à être limitée seulement par l'usage de leurs joints [17]. Des études expérimentales et analytiques des bâtiments et des ponts avec des amortisseurs à fluide construits par Taylor ont été effectuées par Constantinou et Symans (1992) et Constantinou et al. (1993). La figure 2.20 présente une illustration d'un amortisseur à fluide visqueux et la figure 2.21 représente son comportement typique (la relation force-déplacement).

Les amortisseurs visqueux fluides présentent un comportement viscoélastique. Ce comportement peut être prédit avec le modèle de Maxwell (figure 2.15). Pour un amortissement purement visqueux, des études ont montré que ce modèle peut être encore simplifié par un amortisseur simple.

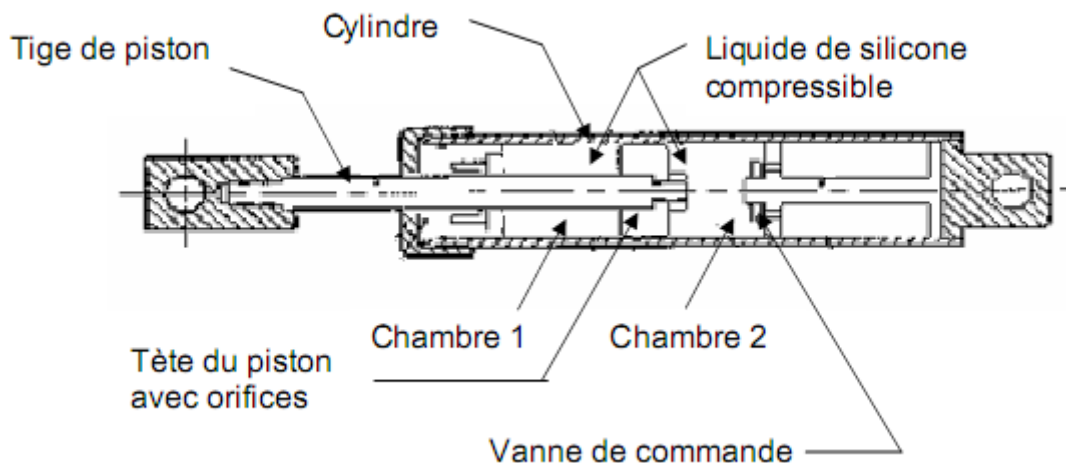


Figure 2.20 : Amortisseur à fluide visqueux [20]

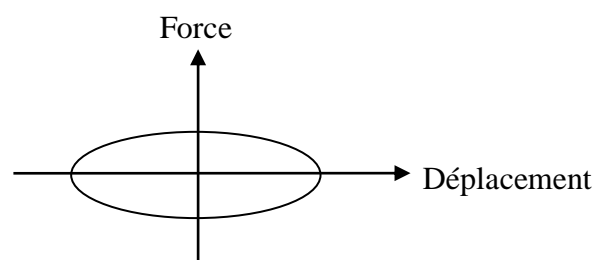


Figure 2.21 : La boucle force-déplacement d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux [14]

### 2.3.1.3 Contrôle passif avec système inertiel couplé (Tuned Mass Damper)

Dans les dernières années, pour contrôler les vibrations des structures, plusieurs dispositifs de contrôle ont été développés. Parmi ces dispositifs, les Amortisseurs à masse accordée (Tuned Mass Damper (TMD)) qui sont les plus couramment utilisés dans différents champs d'application en génie civil tel que les bâtiments et les ouvrages d'art, permettant la réduction des oscillations provoquées par le séisme ou d'autres causes [27]. Ceci est attaché à la structure afin de réduire la réponse dynamique de la structure. L'amortisseur est « accordé » parce que sa fréquence est réglée à une valeur particulière de telle sorte que lorsque la fréquence est excitée, l'amortisseur résonnera hors de la phase avec le mouvement de la structure, absorbant de ce fait l'énergie sur la structure [28]. Les efforts des recherches entamées par Frahm (1911), Ormondroyd et al. (1928) et Den Hartog (1947) sont parmi les premières études d'application de cet appareil aux différents systèmes mécaniques.

L'amortisseur de masse accordé passif (TMD) est trouvé à être un moyen simple, efficace, peu coûteux, et fiable à supprimer les vibrations indésirables des structures provoquées par les excitations harmoniques ou par le vent [29]. Son efficacité dépend du rapport de masse, du rapport de fréquence, et du rapport d'amortissement du TMD. Si la masse de TMD est inférieure à la masse structurale, le dispositif doit être accordé d'une manière que la masse auxiliaire ne déterminera pas l'entrée de la structure dans la résonance avec l'excitation de fréquence. Si la fréquence fondamentale de la structure est inférieure à la fréquence d'excitation, le TMD aura donné une fréquence plus faible que l'action extérieure afin d'éviter la résonance. Si la fréquence fondamentale de la structure est supérieure à l'action extérieure, le TMD aura donné une fréquence plus élevée que la fréquence d'excitation.

Les TMD peuvent être implémentés principalement sous deux formes, dont la plus connue est celle formée par une masse attachée à la structure principale par un ressort et un amortisseur tel que le bloc de béton qui a été installé au sommet du bâtiment Citicorp centre à New York dans les années 1970 (figure 2.22). Pour la stabilité, le bâtiment Citicorp avec une hauteur de 279m pour 59 étages (figure 2.23) est muni à son sommet d'un amortisseur de vibrations. Ce dernier se présente sous la forme d'un bloc de béton de 400 tonnes pour un volume total de 7m<sup>3</sup>. Le bloc de béton se déplace légèrement sur une surface lisse lubrifiée avec de l'huile, et transforme l'énergie cinétique en chaleur. Ce procédé permet de réduire les effets du vent sur le bâtiment de 50%. Selon Wiesner (1979), le système a réduit de 40% de la

réponse induite par le vent dans les deux directions du bâtiment de Citicorp. Le Citicorp est le premier gratte-ciel des Etats-Unis à être pourvu de ce système.

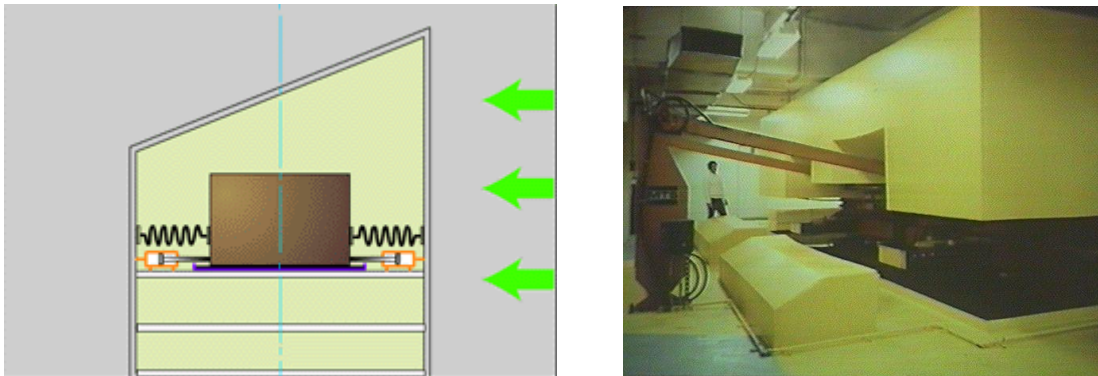


Figure 2.22 : L'amortisseur de Citicorp (New York) [30]



Figure 2.23 : Le bâtiment de Citicorp [31]

La deuxième forme, est l'amortisseur à masse accordée pendulaire. L'utilisation la plus connue de ce type d'amortisseur est celle dans la tour de Taipei101 (figure 2.23 a)). Le gratte-ciel Taipei 101 à Taiwan, inauguré à Taipei début 2004, mesure 508m de hauteur et comporte 101 étages (d'où son nom). Il fut l'édifice le plus haut au monde jusqu'au 21 juillet 2007, date à laquelle Burdj Khalifa à Dubaï devenait à son tour le plus haut immeuble de la planète, avec 162 étages et une hauteur de 828m. L'amortisseur de masse accordé incorporé à la tour de Taipei est considéré comme le plus grand et le plus lourd amortisseur de masse accordé du monde avec la boucle d'acier de 800 tonnes placé au 87ème étage du bâtiment

qui est dotée d'une amplitude pouvant aller jusqu'à 1,5 mètre pour amortir de 30 à 40 % les mouvements de l'édifice causés par des vents violents dus aux typhons, aux tremblements de terre ou aux collisions avec un aéronef léger. Il est suspendu des 92 étages, par des câbles à haute résistance et la surface de l'amortisseur est peinte en or (figure 2.24 b)).

Les tentatives d'application des amortisseurs de masse accordés (TMD) aux structures de génie civil contre les excitations externes ont commencé en 1970 [33]. Pendant les vingt dernières années, ils ont été installés dans un grand nombre d'édifices de grande hauteur dans beaucoup de régions du monde, principalement aux États-Unis et au Japon, pour réduire les vibrations dans les systèmes principaux. Leur utilisation est fréquente et variée. On les trouve aussi bien sur les passerelles telles que London Millenium Foot bridge, ou sur les grands ouvrages d'art tel que le pont à hauban d'Okutama au Japon. Ils partagent avec les autres types d'amortisseurs passifs la propriété de rendre le système contrôlé intrinsèquement stable. La performance d'un amortisseur à masse accordée est très liée aux réglages de ses paramètres et leurs efficacités varient beaucoup lorsque la structure évolue ainsi que le type de chargement.

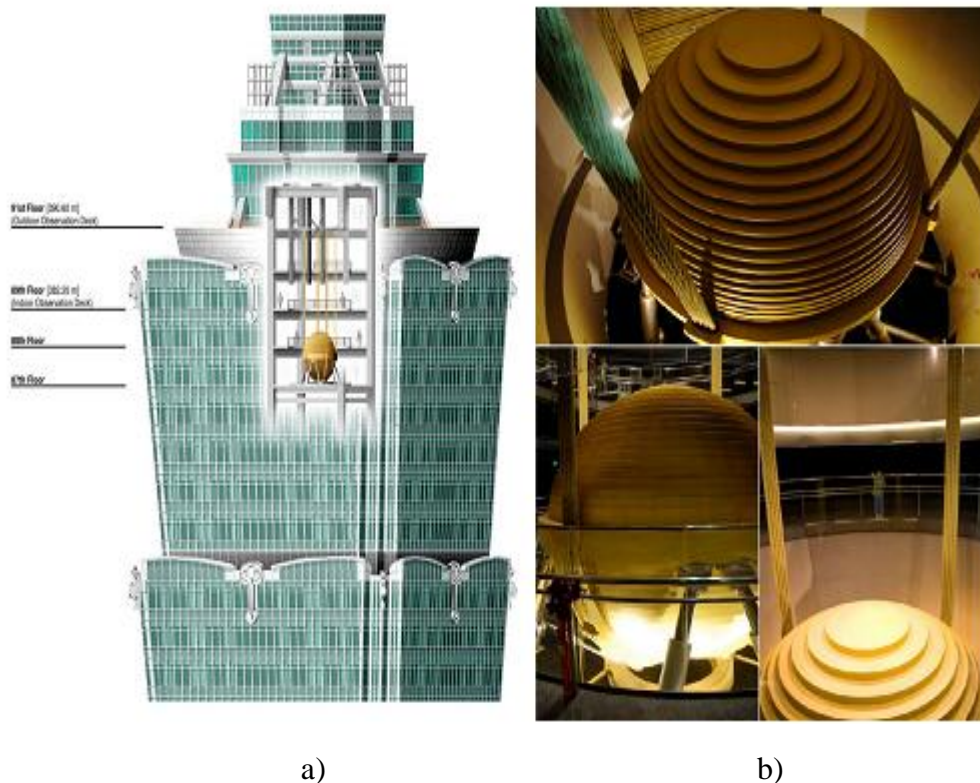


Figure 2.24 : TMD pendulaire de la tour de Taipei101 [32]

### ● Base théorique

Un amortisseur de masse accordée passif (TMD) ou l'amortisseur accordé de vibration est fondamentalement un dispositif de dissipation d'énergie qui sous sa forme plus simple se compose d'une masse, d'un ressort et d'un amortisseur visqueux [22] (Figure 2.24).

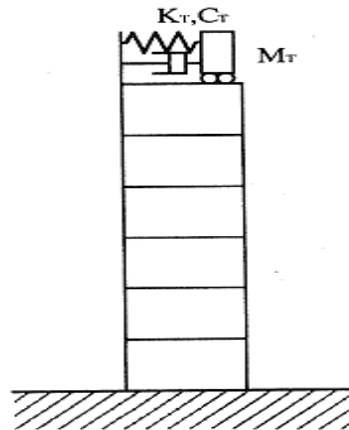


Figure 2.25 : Amortisseur à mass accordé sur une structure [20]

Le concept d'un TMD sans dispositif d'amortissement intégré a été inventé par Frahm en 1909 afin de réduire le mouvement de roulement des bateaux. Une première théorie du TMD avec le dispositif d'amortissement intégré a été présentée des années plus tard par Ormondroyd et Den Hartog.

Contrairement à un amortisseur standard qui fournit généralement la dissipation d'énergie supplémentaire dans une bande de fréquence large, un TMD fonctionne efficacement seulement dans une bande de fréquence étroite. Ce comportement est étroitement lié au mécanisme du transfert d'énergie à partir du système primaire au TMD. Le transfert d'une énergie importante surgit chaque fois que la fréquence normale du TMD est accordée à la fréquence normale de la structure primaire. Par conséquent, si attaché à une structure continue, le TMD amortit seulement un mode spécifique de vibration [33].

### 2.3.2 Systèmes de contrôle actif

Depuis quelques années, il y a un intérêt croissant pour le contrôle actif en génie civil, permettant d'atténuer les effets des sollicitations dynamiques sur les structures telles que les bâtiments, les ponts et les tours de contrôle. Les sollicitations peuvent provenir du vent, du trafic ou des tremblements de terre. Un système de contrôle actif peut être défini comme système qui exige généralement une source d'énergie importante pour le fonctionnement des actionneurs électro-hydrauliques ou électromécaniques qui fournissent des forces de contrôle à la structure [34 ; 35 ; 36]. Ce système a la configuration de base présentée dans la figure 2.26. Les forces de contrôle sont développées en fonction de la rétroaction des capteurs qui mesurent l'excitation et/ou la réponse de la structure. La rétroaction de la réponse structurale peut être mesurée aux endroits différents de l'emplacement du système de contrôle actif. La génération des forces de contrôle par actionneur électro-hydraulique requiert une source d'énergie importante, qui est de l'ordre des dizaines de kilowatts pour les petites structures et peut atteindre plusieurs mégawatts pour les grandes structures [34 ; 35].

Les systèmes de contrôle actif englobent les amortisseurs de masse active (AMD), les systèmes de masse accordée active (ATMD), les systèmes de tendeurs actifs, les systèmes contreventement actifs et les systèmes actifs de rigidité variable; dont on va présenter quelques uns dans ce qui vient. Ces systèmes sont utilisés avec succès pour les avions, les vaisseaux spatiaux, les dispositifs mécaniques et les diverses structures au cours des deux dernières décennies.

Les systèmes actifs sont plus complexes que les systèmes passifs [37 ; 38], puisqu'ils se fondent sur la gestion par ordinateur, les capteurs de mouvement, les mécanismes de rétroaction, et les pièces mobiles qui peuvent exiger le service ou l'entretien [35]. L'idée générale du contrôle actif est révolutionnaire. Il a la capacité d'élever des concepts structuraux d'un niveau statique et passif à un niveau dynamique et adaptable [39]. Des études effectuées sur l'application des systèmes de contrôle actif dans le génie civil ont montré leur efficacité dans la réduction des réponses structurales. L'avantage d'un système de contrôle actif est qu'il atteint des excellents résultats de contrôle. Cependant, il y a beaucoup d'inconvénients à utiliser ce système : Ce sont des systèmes très coûteux à concevoir et sont chers d'utiliser en raison des grandes quantités d'énergie dont ils ont besoin. En outre, ils ont tendance à prendre plus d'espace que les dispositifs de contrôle passifs.

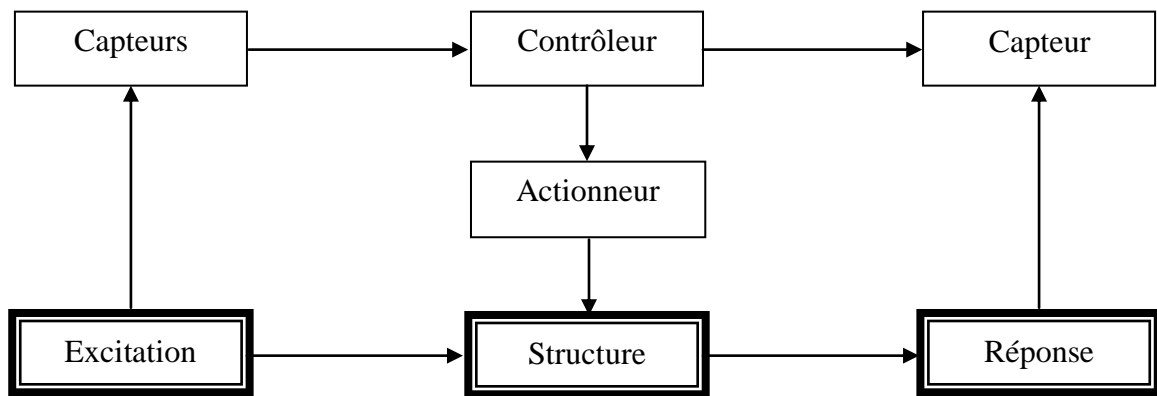


Figure 2.26: Structure avec control actif [40]

### 2.3.2.1 Amortisseur de contreventement actif

Le système de contreventement actif peut se servir des éléments structurels existants et donc de minimiser les additions ou les modifications étendues d'une structure construite. C'est attrayant, par exemple, dans le cas de l'adaptation ultérieure ou de renforcer une structure existante [20 ; 41].

Le système de contrôle permet l'expansion et la contraction longitudinales des entretoises par des actionneurs hydrauliques. Insérés entre les éléments de contreventement et formant une partie interne du système de contreventement. Le système de contrôle inclut également une force d'alimentation hydraulique, un contrôleur analogique et numérique et des capteurs analogiques [42].

### 2.3.2.2 Amortisseur de tendeur actif

Le système de tendeur actif est constitué généralement d'un ensemble de tendeurs (câbles) précontraints dont les tensions sont contrôlées par des servomécanismes électro-hydrauliques [20 ; 41]. Le contrôle de tendeur actif a été étudié analytiquement en liaison avec le contrôle des structures élancées, les bâtiments de grande hauteur, les ponts et les structures en mer [41].

La figure 2.27 montre un schéma d'un contrôleur de tendon. Il se compose de quatre câbles et un actionneur hydraulique. Les câbles sont attachés à l'étage supérieur par une de leurs extrémités tandis que les autres extrémités sont attachées à un cadre horizontal rigide par

quatre poulies. La structure est reliée à la tige du piston d'un actionneur hydraulique dont le mouvement est contrôlé par une servovalve proportionnelle à la différence entre le signal analogique et le déplacement effectif du piston/de tige. De cette façon, les tensions des câbles sont activement modifiées, et produisent des forces de contrôle horizontales sur la structure [20].

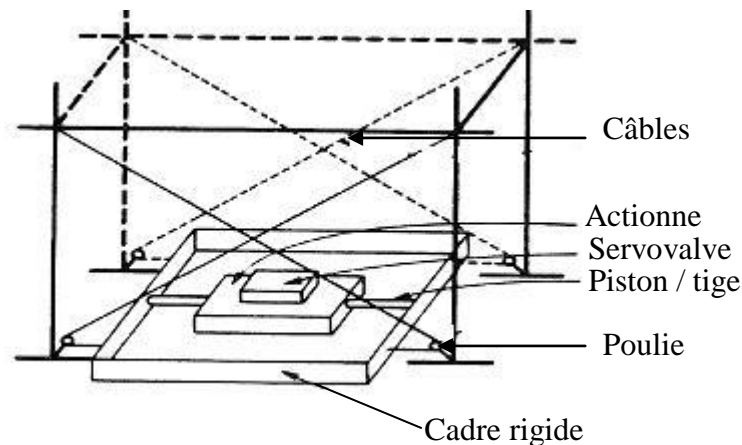


Figure 2.27 : Amortisseur de tendeur actif [20]

### 2.3.2.3 Amortisseur de masse active (AMD)

Un amortisseur de masse active ou système de conducteur de masse active (AMD) est un dispositif monté en structure pour contrôler activement la réponse d'un bâtiment aux excitations externes irrégulières telles que les séismes, les vents et les typhons. Il se compose d'une petite masse auxiliaire (généralement moins de 1% de la masse totale de la structure) installée sur l'un des étages supérieurs d'un immeuble, Un actionneur relié entre la masse auxiliaire et la structure (figure 2.28) [39 ; 43].

Le système (AMD) est la forme la plus simple du système 'HMD (figure 2.29.b). La réponse et les charges sont mesurées aux endroits principaux sur le bâtiment et envoyées à un ordinateur pilote. L'ordinateur, alors traite l'information selon un algorithme et envoie le signal approprié à l'actionneur AMD. L'actionneur réagit alors en appliquant des forces de contrôle d'inertie à la structure afin de réduire les réponses structurelles d'une manière souhaitable [39].



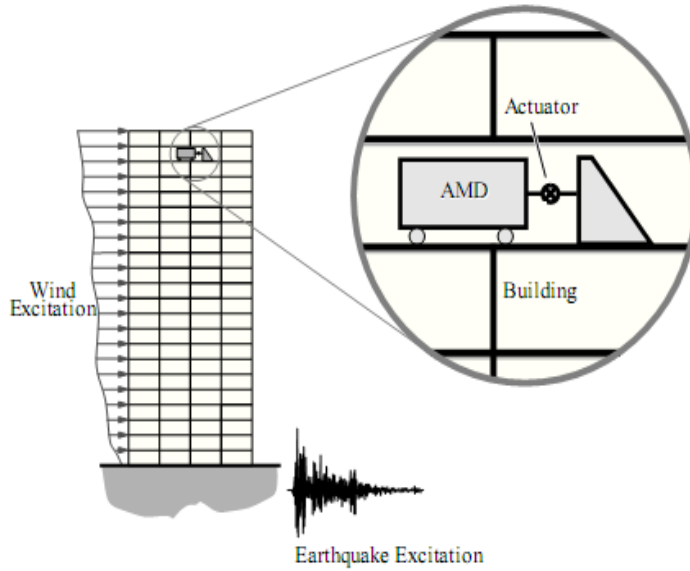


Figure 2.28 : Conception du système de contrôle AMD [43]

Le Système d'amortisseur de masse active (AMD), est parmi les dispositifs les plus utilisés du contrôle actif, il a été proposé dans les années 80, mais la première installation a été en 1989 par la société Kajima dans le bâtiment Kyobashi Seiwa avec 10 étages à Tokyo au Japon (figure 2.30) [44 ; 45 ; 46].

Comme le présente la figure 2.29, le système de contrôle se compose de deux AMD où l'AMD primaire (AMD1) est employé pour le mouvement transversal et a un poids de 4 tonnes, alors que l'AMD secondaire (AMD2) a un poids de 1 tonne et est utilisé pour réduire le mouvement de torsion.

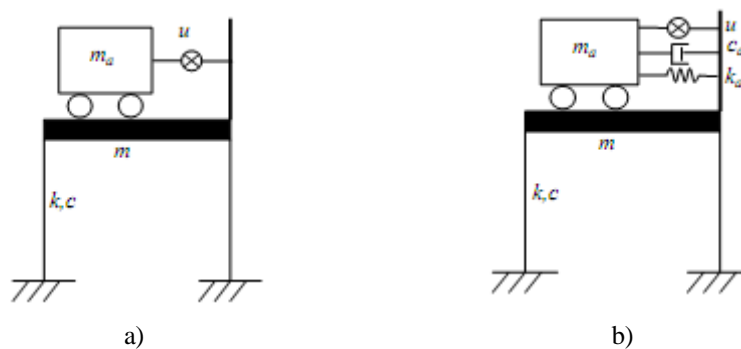


Figure 2.29 : Schéma de Constitution des systèmes de contrôle (a) AMD et (b) HMD [47]

Ces dernières années, les amortisseurs de masse active (AMD) ont été étudiés en tant que systèmes de contrôle actif. Helduser et Bonefeld (2001) ont introduit l'utilisation d'un

actionneur électro hydraulique en tant que systèmes de contrôle actif. Li et al. (2001) ont étudié l'application des amortisseurs d'AMD utilisant l'algorithme classique de contrôle linéaire et en l'appliquant au pont de Nanjing Yangtze en Chine. Les résultats ont montré l'efficacité des amortisseurs AMD dans la réduction des forces sismiques, principalement étant donné qu'il suffit de contrôler le premier mode en réduisant les déplacements latéraux [35].

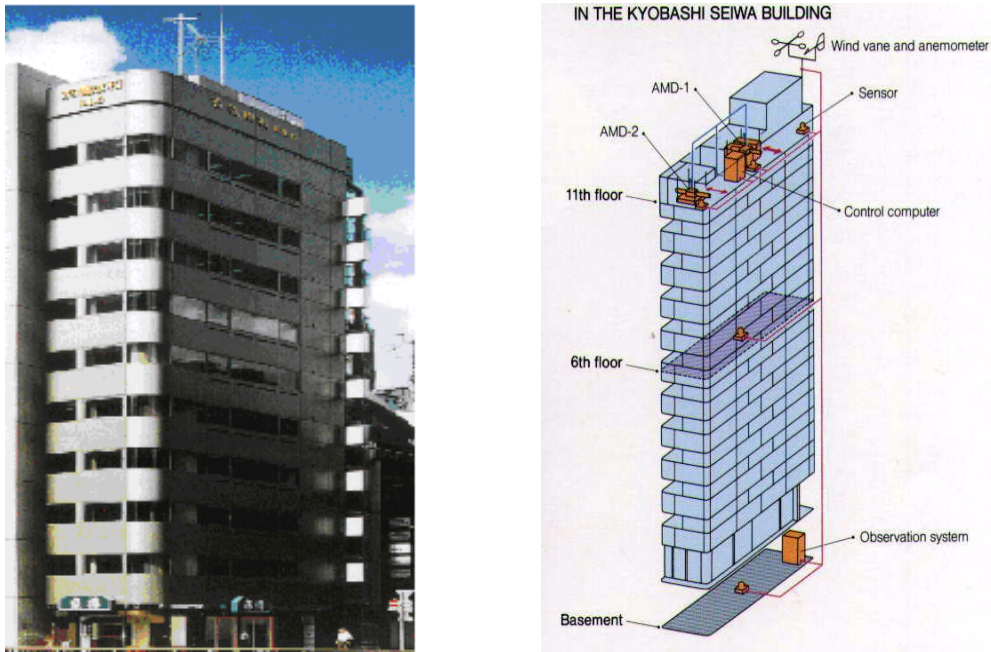


Figure 2.30 : Bâtiment de Kyobashi Seiwa avec le système AMD [43]

### 2.3.3 Système de contrôle hybride

Les systèmes hybrides ont été mis au point au début des années 1990 pour pallier le principal défaut des systèmes passifs et actifs [48]. Le terme "contrôle hybride" se réfère généralement à une combinaison d'un système de contrôle passif et actif [37 ; 40]. Puisqu'une partie de l'objectif de contrôle est accomplie par le système passif, l'effort de contrôle actif est moins, ce qui implique moins d'exigence d'énergie [40].

Comme les systèmes actifs, les systèmes hybrides sont contrôlés par ordinateur et les informations sur le comportement de la structure sont données par un ensemble de capteurs répartis dans le bâtiment. Généralement, ils réduisent l'énergie exigée, améliorent la fiabilité et réduisent le coût si on les compare aux systèmes entièrement actifs.

Des stratégies de contrôle hybride ont été étudiées par de nombreux chercheurs. Yang et ses collaborateurs ont proposé l'utilisation d'un système hybride qui se compose d'un appui en élastomère et un amortisseur de masse active ou passive. Ils ont montré que le système combiné pourrait devenir très efficace. Reinhorn et al. ont fourni une étude expérimentale étendue sur la performance du tendon actif et des amortisseurs actifs. Tadjbakhsh et Rofooei ainsi que Luco et al, ont effectué la simulation sur ordinateur de la performance des systèmes hybrides. L'application du contrôle de vibration hybride des structures aérospatiales a été rapportée par Lee Glauser et al. Ces études ont clairement montré la possibilité d'utiliser une combinaison des systèmes de contrôle passifs et actifs pour une performance optimale. La recherche dans le domaine des systèmes de contrôle hybride a essentiellement porté sur deux catégories de systèmes:

- des systèmes d'amortisseur de masse hybrides
- l'isolation de base hybride.

### **2.3.3.1 Isolation de base hybride (Hybrid Base Isolation)**

Une classe des systèmes de contrôle hybride a été étudiée par un certain nombre de chercheurs. Etant donné, un système d'isolation de base active, constitué d'un système d'isolation de base passive combiné avec un actionneur de contrôle pour compléter les effets du système d'isolation de base. Les systèmes d'isolation de base ont été mis en application à travers le monde sur des structures de génie civil pendant plusieurs années en raison de leur simplicité, fiabilité et efficacité [43].

Des excellents articles sur les systèmes d'isolation de base sont présentés par Kelly, Buckle et Mayes, ainsi que Soong et Constantinou. Cependant, les systèmes d'isolation de base sont des systèmes passifs et ils sont limités dans leur capacité de s'adapter aux demandes de changement pour la réduction de la réponse structurale. Avec l'addition d'un dispositif de contrôle actif à une structure isolée à la base, un niveau supérieur de performance peut éventuellement être réalisé sans augmentation importante du coût, qui est très intéressant d'un point de vue pratique.

Comme l'isolation de base par elle-même peut réduire le déplacement relatif des étages et l'accélération absolue de la structure aux dépens du grand déplacement de la base, la combinaison avec le contrôle actif est capable d'obtenir à la fois un faible déplacement et,

en même temps, de limiter le maximum de déplacement de base avec un ensemble simple de forces de contrôle.

Plusieurs expériences de petite échelle ont été réalisées pour vérifier l'efficacité de cette classe des systèmes pour réduire les réponses structurelles. Reinhorn et Riley ont réalisé des études analytiques et expérimentales d'un pont de petite échelle avec un système d'isolation hybride de glissement dans lequel un actionneur de contrôle a été utilisé entre la surface de glissement et le sol pour compléter le système d'isolation de base.

### 2.3.3.2 Amortisseur de masse hybride (HMD)

L'amortisseur de masse hybride (HMD) est le dispositif de contrôle le plus commun, utilisé dans les applications de génie civil à grande échelle. Il est une combinaison d'un amortisseur de masse accordée (TMD) et d'un actionneur de contrôle actif [39 ; 40 ; 43 ; 47]. La capacité de ce dispositif de réduire les réponses structurelles se fonde principalement sur le mouvement normal du TMD. Et son efficacité dépend des forces de l'actionneur de contrôle. Les forces de l'actionneur de contrôle sont utilisées pour augmenter l'efficacité de l'HMD et d'augmenter sa fiabilité aux changements des caractéristiques dynamiques de la structure. Un système HMD typique exige moins d'énergie pour fonctionner qu'un amortisseur de masse entièrement actif [39 ; 43].

Un exemple réussi de l'exécution du système HMD est le bâtiment de Sendagaya INTES à Tokyo en 1991. Comme l'illustre la figure 2.31, le HMD a été installé au sommet du 11<sup>ème</sup> étage et se compose de deux masses pour contrôler les mouvements transversaux et la torsion de la structure, alors que les actionneurs hydrauliques fournissent les possibilités de contrôle actif.

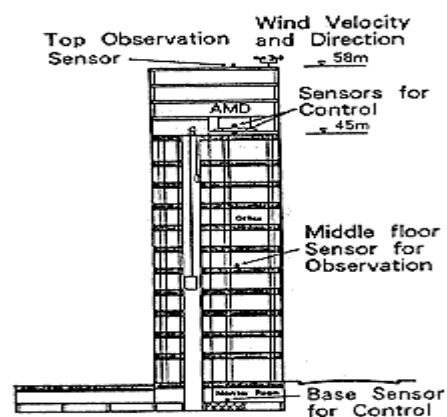


Figure 2.31 : Le bâtiment de Sendagaya INTES [49]

### 2.3.4 Système de contrôle semi actif

Les stratégies de Contrôle basées sur les dispositifs semi actifs combinent les meilleures caractéristiques des systèmes de contrôle passif et actif. Ces dispositifs exigent une faible source d'énergie pour modifier les propriétés mécaniques des dispositifs de dissipation d'énergie passifs. Le réglage de ces propriétés est basé sur la rétroaction (le feedback) de l'excitation et/ou de la réponse mesurée, ce qui différencie le contrôle semi-actif du contrôle passif [40].

Comme pour le contrôle actif, le système de contrôle semi actif nécessite des capteurs, processeurs et actionneurs (figure 2.32). L'énergie demandée peut être fournie d'une simple batterie. Cette énergie sert seulement à modifier les caractéristiques mécaniques des dispositifs de contrôle passif, donc, ce système représente une évolution des systèmes passifs [27].

Le système de contrôle semi actif est plus fiable et plus simple que le système de contrôle actif puisqu'il fonctionne comme des dispositifs passifs en cas de panne de courant. et plus efficace pour réduire la réponse structurelle que d'autre système de contrôle passif. Cette technique convient pour être utilisée dans certains bâtiments ou équipements importants. Actuellement, il existe différents types d'amortisseurs semi actifs proposés pour contrôler les structures en génie civil. Ces dispositifs incluent, notamment, les amortisseurs à orifice variable, les amortisseurs de friction variable et les amortisseurs à fluide contrôlable. Ces dispositifs sont brièvement décrits et illustrés dans ce qui suit [27].

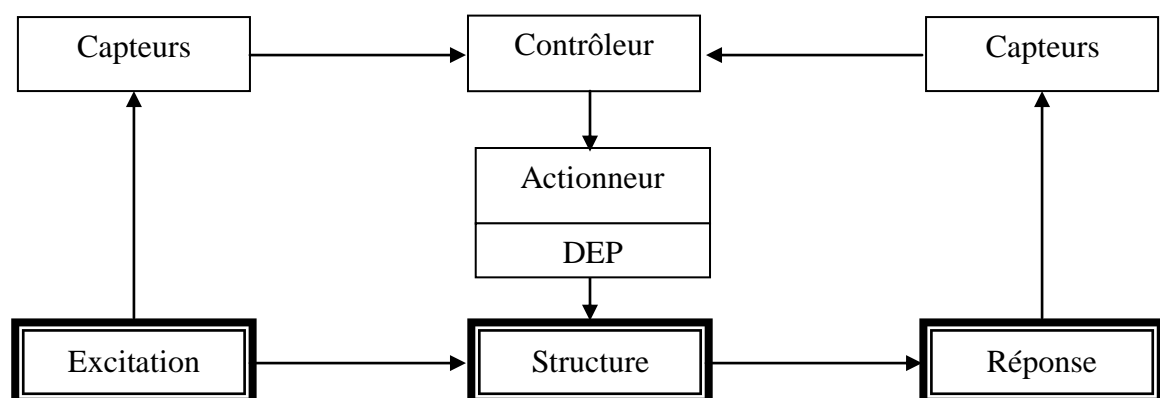


Figure 2.32 : Structure avec contrôle semi actif [40]

### 2.3.4.1 Amortisseur à orifice variable

Une classe importante des systèmes dissipatifs à caractéristiques variables est celle des amortisseurs d'amortissement variable. Un dispositif d'amortissement variable se comporte en tant qu'amortisseur visqueux linéaire avec le coefficient d'amortissement réglable. Il peut être obtenu en utilisant une valve électromécanique à orifice variable, pour changer la résistance à l'écoulement d'un amortisseur à fluide hydraulique conventionnel [39 ; 40 ; 50 ;51]. Un schéma d'un tel dispositif est donné dans la figure 2.33.

La première exécution à grande échelle du contrôle structurel aux Etats-Unis a consisté dans l'installation de tels dispositifs sur un pont sur l'autoroute 35, près de Purcell, l'Oklahoma, construit en 1971 et ouvert pour la circulation en 1972 (figure 2.34) [39 ;40 :50]. Les amortisseurs à orifice Variable ont été également appliqués aux bâtiments, Plusieurs études sur le comportement et l'application des amortisseurs à orifice variable ont été réalisées, Kurata et al. (1999 ; 2000) par exemple, décrivent l'exécution de huit amortisseurs à orifice variable dans un bâtiment de cinq étages dans la ville de Shizuoka au Japon. Les résultats de simulation confirment l'efficacité de cette stratégie de contrôle.

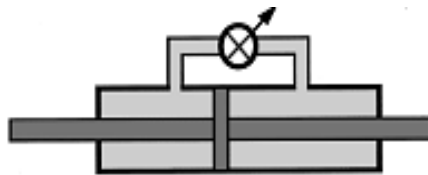


Figure 2.33 : Amortisseur à orifice variable [50]



Figure 2.34 : Première exécution à grande échelle du contrôle de construction aux Etats-Unis. [49]

### 2.3.4.2 Amortisseur à friction variable

Les dispositifs semi actifs de friction utilisent la force produite par le frottement de surface pour dissiper l'énergie vibratoire dans un système structural [50 ; 51]. Ils se basent sur l'utilisation d'un actionneur piézoélectrique positif de friction variable (figure 2.35), qui se compose d'un axe de frottement qui est relié rigidement à la structure.

La force à l'interface de frottement a été ajustée en permettant le glissement dans des quantités contrôlées. En outre, un appui semi actif de friction à fluide contrôlable a été utilisé en parallèle avec un système d'isolation sismique par Feng et al. (1993). Récemment, des systèmes de friction variable ont été étudiés par Yang et Agrawal (2002) pour la réduction de la réponse sismique des bâtiments non linéaires. Garrett et al. (2001) ont étudié expérimentalement les amortisseurs de friction piézoélectriques [50].

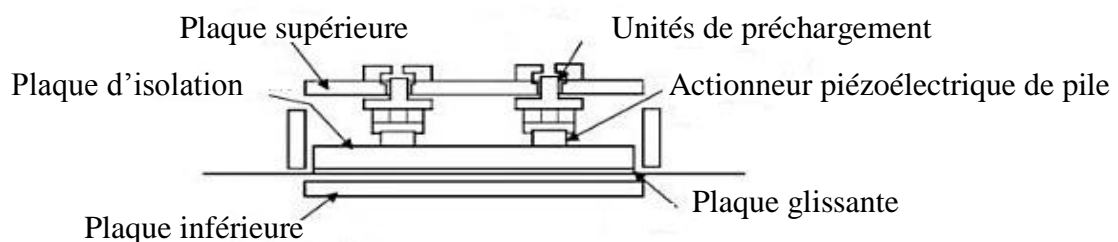


Figure 2.35 : Photo et schéma d'un actionneur piézo-électrique [44]

### 2.3.4.3 Amortisseur à fluide contrôlable

Une classe très intéressante des dispositifs semi actif est celle des systèmes à fluides contrôlables (figure 2.36). L'avantage de ces amortisseurs est leur simplicité mécanique, puisque leur seule pièce mobile est le piston, ce qui les rend très fiables et très faciles à entretenir [40 ; 50]. Les fluides utilisés sont les fluides électro-rhéologiques (ER) (figure 2.37) ou magnéto rhéologique (MR) (figure 2.38). La découverte des deux fluides remonte à la fin

des années 1940. La propriété importante de ces fluides est leur capacité de changer réversiblement leurs viscosités lorsqu'ils sont exposés à des variations d'un champ électrique (cas du fluide ER) ou magnétique (cas de MR). Ces amortisseurs ont montré une efficacité dans les applications en génie civil et leurs applications sont nombreuses et sont encore un sujet de recherche.

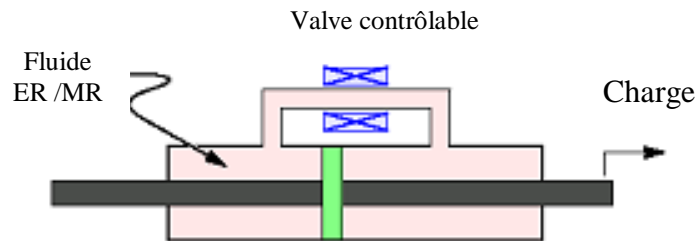


Figure 2.36 : Amortisseur à fluide contrôlable [49]

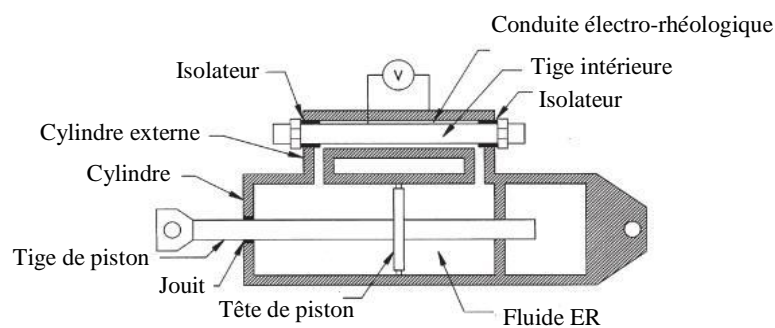


Figure 2.37 : Amortisseur électrorhéologique(ER) [34]

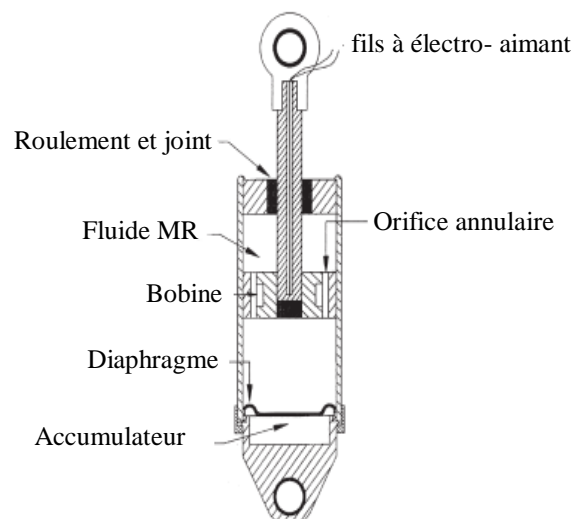


Figure 2.38 : Amortisseur magnétorhéologique (MR) [34]



# **Chapitre 3**

## **Dissipateur d'énergie à fluide visqueux**

## DISSIPATEUR D'ENERGIE À FLUIDE VISQUEUX

### 3.1 Introduction

Ces dernières années les ingénieurs ont développé plusieurs approches pour modifier la réponse dynamique dans le but de limiter les dommages aux bâtiments soumis à des sollicitations sismiques. Ces approches comprennent le contrôle actif, le contrôle passif, le contrôle hybride et le contrôle semi actif. Un système de contrôle actif fonctionne en exerçant une force sur la structure d'une source d'énergie externe importante. Dans ce système, l'énergie peut être dissipée et elle peut également être ajoutée à la structure. Les systèmes de contrôle passif inculquent des forces qui se développent en réponse au mouvement d'une structure. Les dispositifs de contrôle passif dissipent l'énergie dans la structure, mais ils ne l'augmentent pas. Un système de contrôle hybride est celui qui incorpore des dispositifs passifs et actifs. Un système de contrôle semi actif exige une faible source d'énergie pour modifier les propriétés mécaniques des dispositifs de dissipation d'énergie passifs [52].

Pour la discussion de l'amortissement dans les structures, on considère qu'elles sont soumises à un petit déplacement, puis relâchées. La structure aura une vibration d'avant en arrière avec une certaine amplitude avec une diminution au fil du temps. Historiquement, les ingénieurs en structure ont supposé que la réduction de mouvement est associée à la présence d'amortissement visqueux dans les matériaux utilisés. Le décrément logarithmique est souvent utilisé pour relier la réduction de l'amplitude entre deux ou plusieurs pics successifs par les valeurs de l'amortissement.

La quantification des valeurs de l'amortissement visqueux dans les bâtiments a été un sujet de recherche pour plus de 50 ans. Ce type d'amortissement est appelée « amortissement naturel » parce qu'il est associé à l'amortissement interne des matériaux utilisés pour la construction des éléments structurels. Cet amortissement naturel représente l'énergie dissipée par les éléments structuraux de l'édifice (poteaux, voiles, etc...) dans le déplacement temporel du bâtiment. Le taux de l'amortissement inhérent « amortissement naturel » varie selon les structures. Une valeur d'amortissement critique d'environ 5 % est généralement utilisée dans la conception parasismique de l'amortissement. Pour les structures avec amortissement intrinsèque faible, il peut être avantageux d'implémenter des systèmes de dissipation d'énergie [53].

Dans les dernières décennies, les chercheurs ont commencé à étudier et à expérimenter de nouveaux systèmes parasismiques, appelés « systèmes de contrôle passif » (chapitre 2). Les premiers appareils de ce type de technologie introduits dans les bâtiments pour atténuer l'impact des mouvements engendrés par les séismes, étaient les « systèmes d'isolation à la base », plus tard (au milieu des années 90) a commencé la mise en œuvre des structures avec d'autres éléments appelés « dispositifs de dissipation d'énergie ». C'est dans cette catégorie que nous trouvons les « dissipateurs à fluide visqueux » [54].

L'objectif de l'utilisation de ces dissipateurs d'énergie est de donner à la structure un meilleur comportement lors d'un événement sismique, et veiller à ce que son comportement demeure dans l'intervalle linéaire et donc de limiter la déformation élastique et la formation des rotules plastiques, en prévention des dommages structuraux.

Les études de Constantinou et Symans (1993a, b et 1992) ont été effectuées pour déterminer les propriétés mécaniques des amortisseurs fluides. Les amortisseurs ont été construits afin que la température du fluide n'influence pas les résultats. Pour ce faire, les amortisseurs ont été conçus pour que la température à l'intérieur de l'appareil demeure entre  $-40^{\circ}\text{C}$  et  $70^{\circ}\text{C}$ . Cette gamme relativement large de température représente l'intervalle où les propriétés mécaniques étaient déterminées. Les amortisseurs ont été soumis à un mouvement stationnaire harmonique à des fréquences de 1, 2 et 4 Hz.

Les résultats de ces tests montrent que dans cette gamme de fréquences, la rigidité de stockage,  $K_1$  dans l'équation (3.2), est effectivement nulle et le comportement de l'amortisseur est pratiquement visqueux linéaire. Toutefois, si la fréquence est augmentée au-delà de 4 Hz ces amortisseurs commencent à exposer la rigidité du stockage.

Constantinou et Symans (1993a) définissent la rigidité de stockage dans leur calcul de la force d'amortissement lorsque le mouvement de l'amortisseur est donné par la relation :

$$u = u_0 \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

où  $u_0$  est l'amplitude du déplacement,  $\omega$  est la fréquence de l'excitation et  $t$  le temps. La force de résistance dans le dispositif,  $P$ , peut être écrite par l'équation suivante

$$P = K_1 u + C \frac{du}{dt} \quad (3.2)$$

où  $K_1$  est la rigidité du stockage et  $C$  le coefficient d'amortissement donné par :

$$C = \frac{K_2}{\omega} \quad (3.3)$$

où le  $K_2$  est la rigidité de la perte. Dans l'équation (3.2) le premier terme représente la force due à la rigidité de l'amortisseur, qui est en phase avec le mouvement, et le second terme représente la force due à la viscosité de l'amortisseur, qui est déphasée de  $90^\circ$  avec le mouvement. La figure 3.1 (a) représente la relation force-déplacement pour les deux termes de l'équation (3.2), tandis que la figure 3.1 (b) représente la force totale.

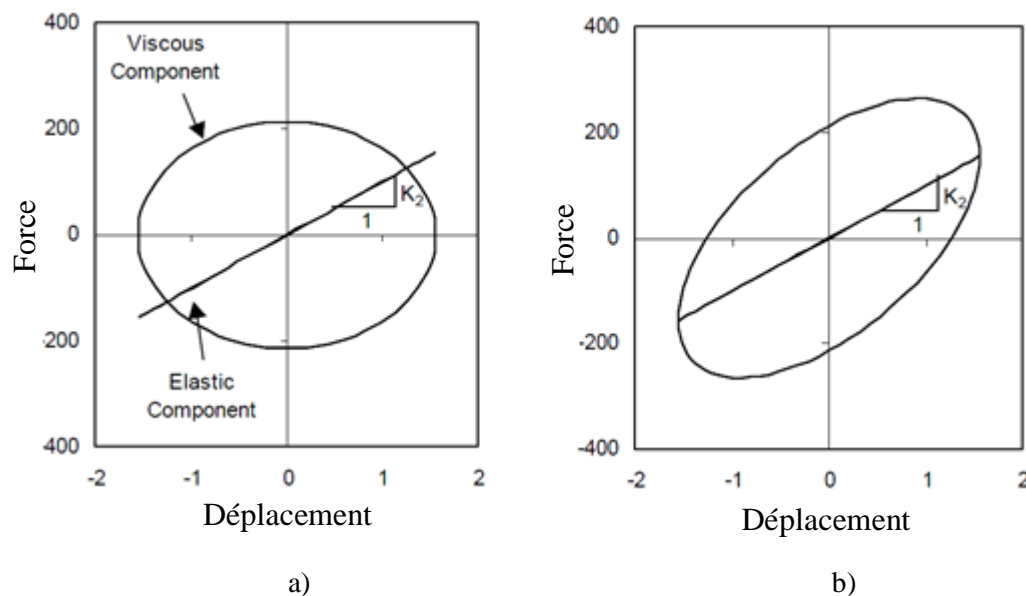


Figure 3.1 (a-b): Relation Force-Déplacement pour l'amortisseur visqueux fluide

La fréquence de chargement pour laquelle la rigidité de stockage devient significative est appelée la fréquence de coupure et peut être contrôlée grâce à une conception de l'amortisseur. Le but d'avoir une fréquence de coupure est que si elle est supérieure à la première fréquence fondamentale, le mode fondamental de vibration aura seulement un amortissement visqueux additionnel, tandis que les modes supérieurs auront un amortissement supplémentaire et une rigidité supplémentaire.

Dans une étude faite par Constantinou et Symans (1993a), les chercheurs ont pu conclure que l'inclusion des amortisseurs fluides visqueux dans les structures expérimentales a entraîné des réductions des déplacements inter-étages de l'ordre de 30 à 70 %. Ces réductions sont comparables pour les réductions obtenues lorsque d'autres systèmes d'amortissement (viscoélastique, à frottement et métalliques) sont utilisés. Cependant,

L'utilisation de l'amortisseur visqueux fluide a également permis de réduire les niveaux de cisaillement dans la structure de la structure de 40 à 70 %, tandis que l'utilisation d'autres systèmes d'amortissement n'a pas atteint ce taux de réduction.

Symans et Constantinou (1998) ont établi que la raison de la différence des efforts de cisaillement entre les amortisseurs fluides et les autres est le comportement visqueux linéaire pure exposé dans les essais, qui se traduit par une relation de déphasage entre les forces de rappel dans les poteaux et les forces d'amortissement fluide. C'est Symans et Constantinou qui estiment d'après ces conclusions que les systèmes d'amortisseurs visqueux fluides soit le plus efficace. En outre, les chercheurs ont cherché à démontrer puis à conclure que l'utilisation des amortisseurs visqueux fluides soit plus avantageuse que les systèmes de contrôle actif, parce qu'ils sont d'un coût moindre et n'exigent aucun apport d'énergie, en plus du fait qu'ils durent plus longtemps et ils sont plus fiables.

Une remarque importante au sujet des expériences menées par Constantinou et Symans est que la structure demeure élastique et ne subit pas de dégâts importants. Plus tard, des expériences faites par Miyamoto et Singh (2002) suggèrent que lorsqu'une structure devient inélastique les conclusions sur la réduction des cisaillements ne sont plus valables.

### **3.2 Description du dissipateur d'énergie à fluide visqueux**

L'implémentation des dispositifs de dissipation d'énergie de type fluide visqueux est l'un des procédés les plus efficaces pour ajouter de la dissipation d'énergie à une structure. Comme le montre la figure 3.2, ce mécanisme dissipe l'énergie par transfert d'un fluide à travers des orifices, produisant une pression d'amortissement.

Pendant de nombreuses années, les dissipateurs à fluide visqueux ont été utilisés dans de nombreuses applications, parmi lesquelles le contrôle des vibrations dans les systèmes militaire et aérospatiaux. Fondamentalement, un amortisseur visqueux est comparable aux amortisseurs utilisés dans l'industrie automobile, sauf que ceux utilisés dans les structures opèrent dans une gamme de forces beaucoup plus élevées et sont fabriqués en acier inoxydable et autres matériaux qui sont extrêmement durables, d'une durée d'au moins 40 ans.

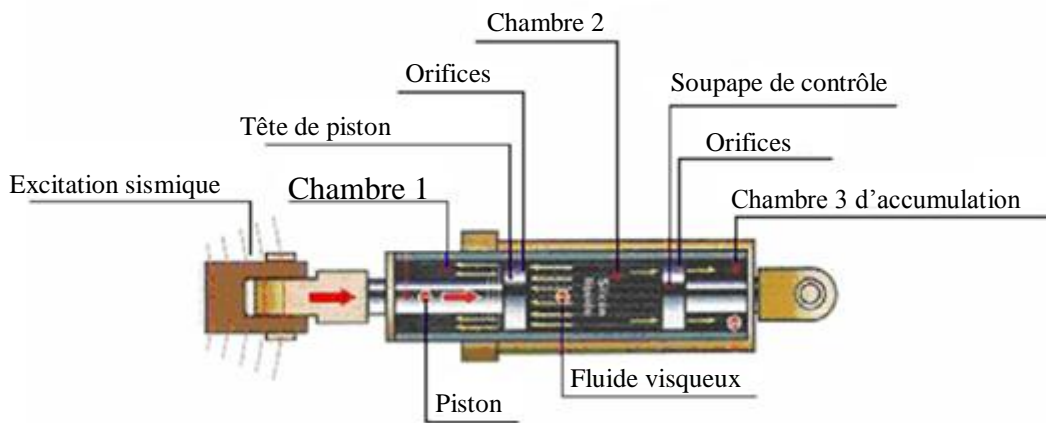


Figure 3.2 : Dissipateur d'énergie à fluide visqueux [55]

L'amortisseur à fluide visqueux, qui agit en tant que dispositif de dissipation d'énergie dans les structures, consiste essentiellement en un cylindre en acier inoxydable de haute résistance, qui contient un fluide à haute viscosité, résistant au feu, stable aux variations de température et de longues périodes de temps. Actuellement, les seuls liquides qui possèdent toutes ces caractéristiques sont ceux appartenant à la famille des silicones.

Le cylindre intérieur comporte un piston (également en acier à haute résistance et acier inoxydable), qui se compose d'une tige avec une tête dans son bord interne (la tête de piston) avec des orifices (trous). La tête du piston divise l'intérieur du cylindre en deux cavités appelées « chambres ». Quand il y a un déplacement du piston à haute vitesse dans le cylindre en raison de l'excitation, ceci provoque le déplacement du fluide d'une chambre à l'autre, ce qui produit une pression différentielle qui entraîne à son tour la force d'amortissement.

Il y a aussi, à l'intérieur du cylindre, une troisième chambre, « d'accumulation », dont la fonction principale est de permettre le déplacement de la tige de piston de l'intérieur lors de l'excitation et de compenser la dilatation et le retrait thermique du fluide.

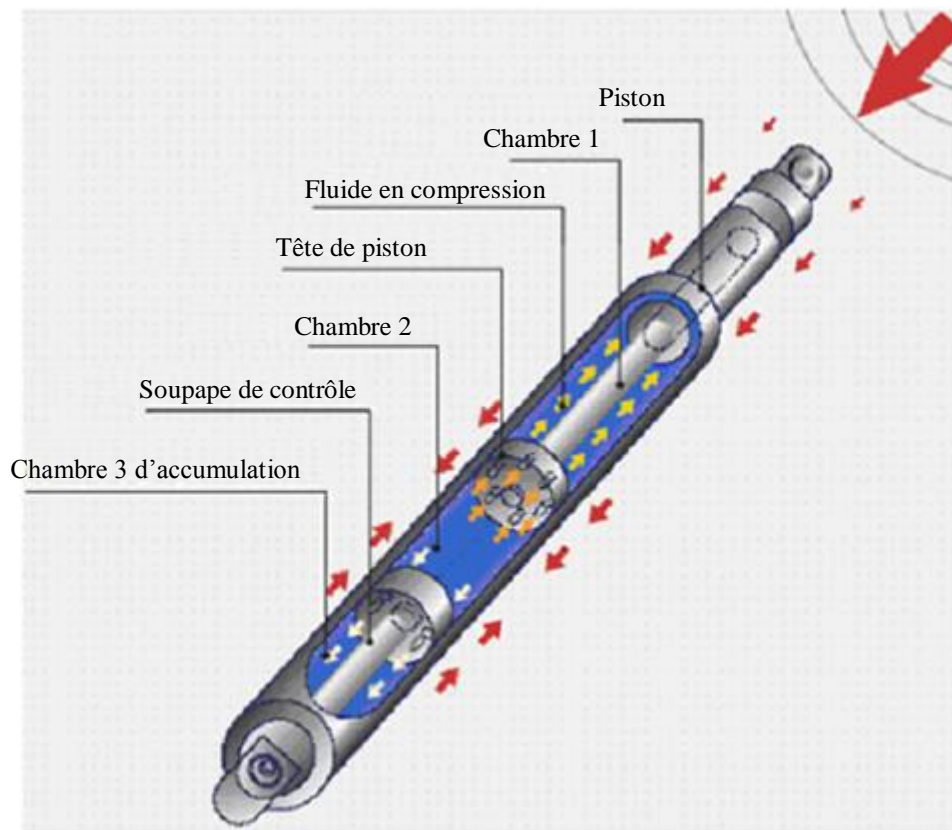


Figure 3.3 : Fonctionnement d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux [55]

L'activité sismique, exerce une pression sur le piston dans le cylindre comprimant le fluide à l'intérieur de la chambre 2, alors cela nous ramène de la chambre 1 vers la chambre 2 à travers les perforations et la pression est égalisée, qui cause la force d'amortissement. Ces perforations sont classées dans la taille et la quantité pour fournir la réponse souhaitée. Pour anticiper un effet de rebond, la soupape de régulation libère une partie du fluide à la chambre d'accumulation de fluide.

Une des différences des amortisseurs à fluides, par rapport à d'autres dispositifs de dissipation d'énergie utilisés dans les structures, c'est qu'ils sont stables et fonctionnels dans une large gamme de températures. Par exemple les dispositifs viscoélastiques (voir chapitre 2), qui sont composés de caoutchouc sont très affectés par ces changements de température et leur comportement est différent en fonction de la température à laquelle ils sont exposés. Les tests effectués sur les amortisseurs à fluide visqueux ont montré que leurs fonctionnement ne présente pas de grandes différences dans la gamme de température de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $70^{\circ}\text{C}$ .

Dans le secteur de la construction, les amortisseurs à fluide visqueux sont utilisés pour réduire les charges dues à l'excitation sismique, ces appareils sont situés dans la structure d'une manière stratégique, tels qu'ils sont activés lors du déplacement relatif entre deux étages voisins du bâtiment sous sollicitation sismique. L'installation peut se faire de plusieurs façons :

1. Les amortisseurs sont placés horizontalement à un lien souple reliant le sommet des diagonales en forme de " V " inversé (Figure 3.4), fixés sur un étage inférieur avec le niveau supérieur voisin.
2. Les amortisseurs sont mis en place comme une diagonale inclinée, reliant les nœuds poteaux-poutres de deux étages contigus (Figure 3.5).
3. Mise en place des amortisseurs horizontalement à la base de l'ouvrage, travaillant conjointement avec un système d'isolation à la base (Figure 3.6).

Une autre caractéristique qui caractérise les amortisseurs à fluide visqueux et qui les différencie des autres appareils, c'est que leur comportement ne dépend que de la vitesse et non du déplacement. Ce point sera discuté plus en détail dans le paragraphe suivant.

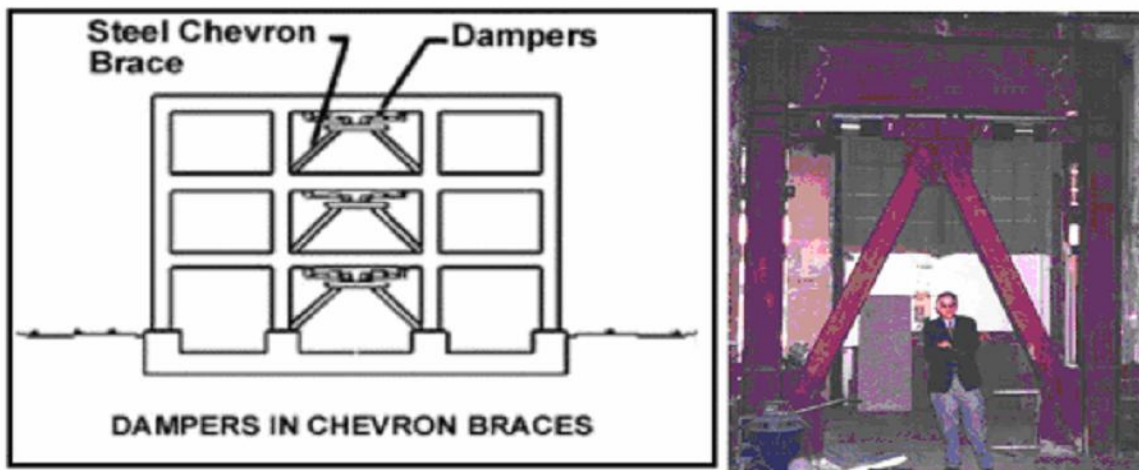


Figure 3.4 : Dissipateurs visqueux, reliant les diagonales avec les poteaux en forme de V inversé [56]



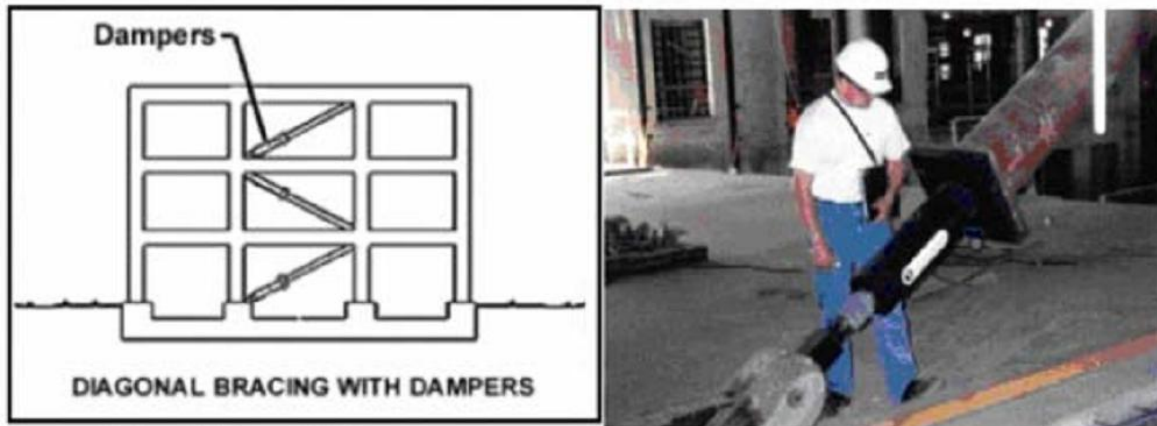


Figure 3.5 : Dissipateurs visqueux, situés sur la diagonale [57]

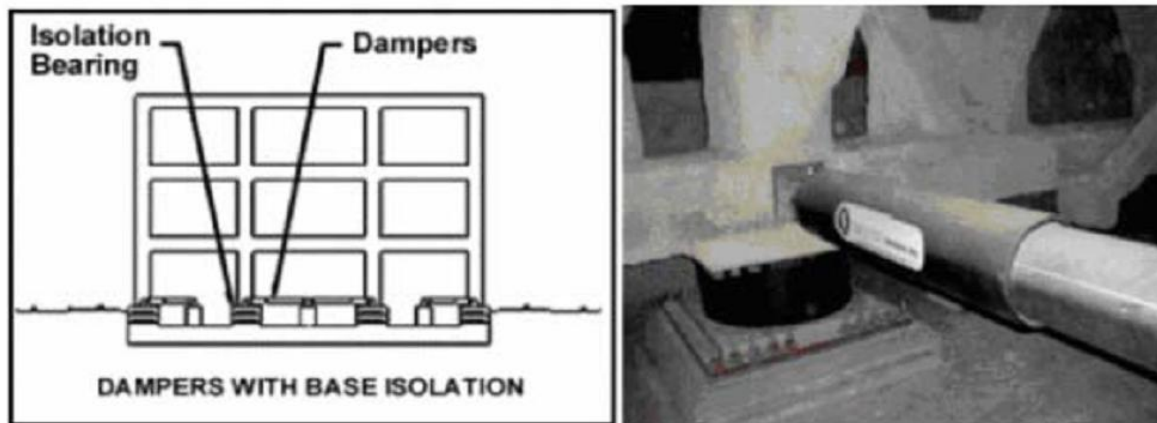


Figure 3.6 : Dissipateurs visqueux, situés à la base de l'ouvrage [57]

### 3.3 Réponse dynamique du dissipateur d'énergie à fluide visqueux.

Soit un dispositif à fluide visqueux attaché à une structure, comme le montre la figure 3.5. La structure est soumise à une excitation sismique qui génère des déplacements relatifs inter-étages, provoquant des mouvements, des vitesses et des accélérations différentes des extrémités du dispositif. Cette différence dans le mouvement va produire dans l'amortisseur une force et une source de dissipation d'énergie. La force induite à la structure par l'amortisseur dans chacun des points de connexion de l'appareil est donnée par l'équation 3.4 et l'énergie dissipée par l'amortisseur due à cette force est donnée par l'équation 3.5.

$$F_D = C_D \cdot \dot{x}^\lambda \quad (3.4)$$

$$E_D = \int |F_D| dx \quad (3.5)$$

Avec :

$F_D$  : Force d'amortissement de l'appareil

$C_D$  : Coefficient d'amortissement de l'appareil

$x$  : Déplacement relatif entre les extrémités de l'appareil

$\dot{x}$  : Vitesse relative entre les extrémités de l'appareil

$\lambda$  : Paramètre de la vitesse (exposant),  $0,25 < \lambda < 2,0$

Lorsque le paramètre  $\lambda$  prend la valeur unitaire ( $\lambda = 1$ ), on obtient un dispositif avec une force linéaire proportionnelle à la vitesse, d'où l'appellation "dissipateur visqueux linéaire." Quand le paramètre ( $\lambda$ ) prend une valeur autre que l'unité ( $\lambda \neq 1$ ), le dispositif sera appelé "dissipateur visqueux non linéaire."

La figure 3.7 montre la relation force-vitesse des trois types d'amortisseurs cités ci-dessus. On peut voir sur cette figure l'efficacité du dissipateur visqueux non linéaire ( $\lambda < 1$ ) ; pour de petites vitesses relatives il peut développer une force d'amortissement plus grande que les autres types d'amortisseurs ( $\lambda = 1$ ) et ( $\lambda > 1$ ).

Pour les dissipateurs visqueux non linéaires utilisés dans la pratique, la valeur de ( $\lambda$ ) est de l'ordre de 0,3 à 1,0. Les valeurs de ( $\lambda$ ) plus communes dans la conception parasismique d'amortisseurs pour les bâtiments et les ponts, sont de l'ordre de 0,25 à 0,5.

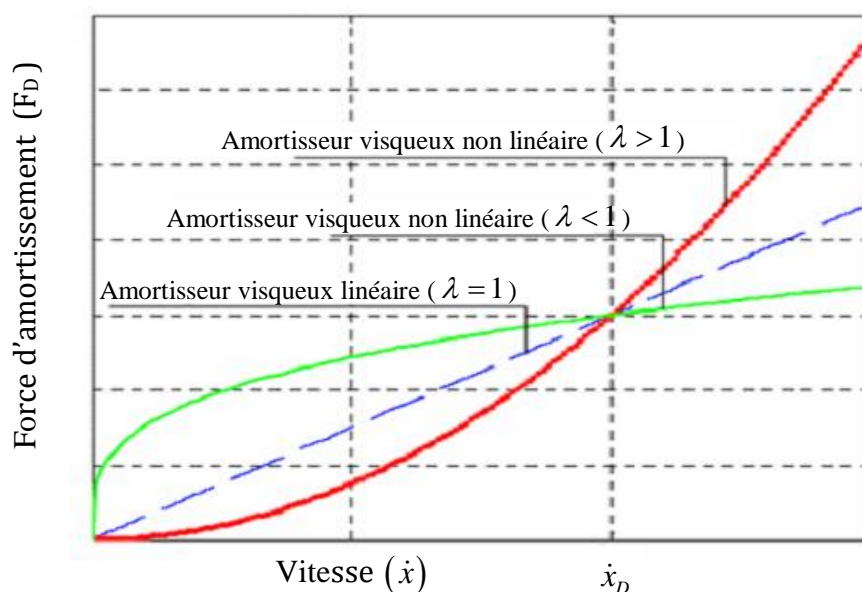


Figure 3.7 : Relation vitesse-force d'amortissement [58]

Le dissipateur d'énergie à fluide visqueux a la capacité unique de réduire les déplacements et de ne pas ajouter d'efforts à la structure, lorsque celle-ci est soumise à une excitation sismique. C'est parce que dans ce dispositif, la puissance de sortie varie seulement avec la vitesse, en donnant une réponse qui est intrinsèquement en déphasage avec les contraintes de la structure en flexion.

Dans le cas d'autres dispositifs tels que les amortisseurs de friction (FPS), ou les dispositifs en élastomère (LRB) (visco-élastique), même s'ils sont efficaces pour ajouter l'amortissement à la structure, néanmoins des efforts seront également ajoutés, ce qui signifie que ces dispositifs d'amortissement diminuent la déformation dans une structure, mais au détriment des efforts accrus. Cela s'explique, par la force d'amortissement de ces dispositifs qui dépend d'autres paramètres que de la vitesse.

La réponse en déphasage, qui est unique aux dissipateurs à fluide visqueux, peut être facilement assimilée en considérant un bâtiment en mouvement latéral suite à une excitation sinusoïdale.

$$x(t) = x_0 \sin \omega t \quad (3.6)$$

$$\dot{x}(t) = x_0 \omega \cos \omega t \quad (3.7)$$

$$F_D = C_D x_0 \omega \cos \omega t \quad (3.8)$$

Avec :

$x_0$  : Amplitude de l'excitation

$\omega$  : Fréquence de l'excitation

$F_D$  : Force d'amortissement pour un dissipateur linéaire

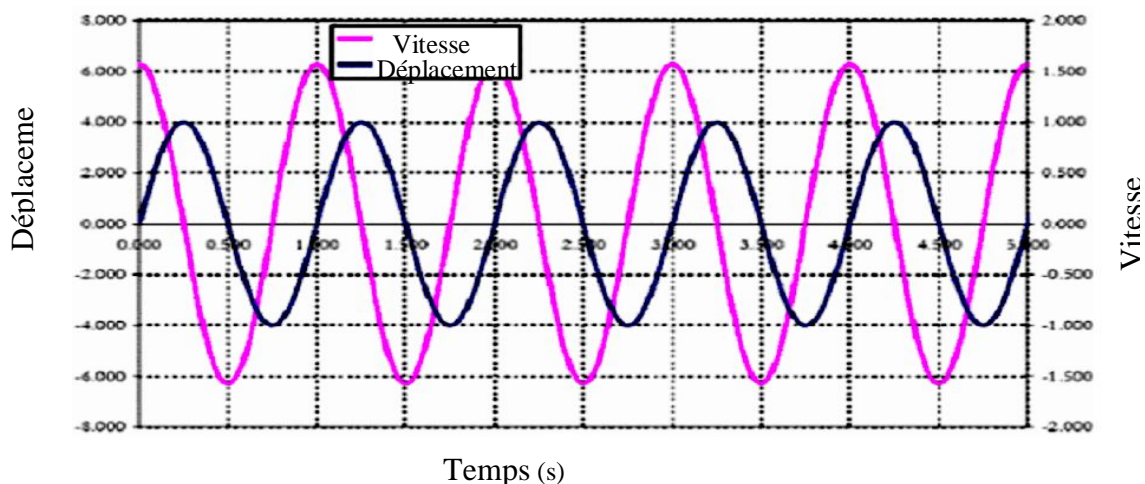


Figure 3.8 : Déphasage de la vitesse par rapport au déplacement [59]

L'effort dans les poteaux atteint son maximum lorsque le bâtiment est à sa position de flexion maximale (déplacement maximum) par rapport à sa position d'équilibre. C'est le moment où la structure commence à changer de direction. Si l'on ajoute un dispositif à fluide visqueux à la construction, la force d'amortissement dans le dispositif est réduite à zéro à ce point de déplacement maximum, car à ce moment la vitesse est nulle.

La force maximale d'amortissement se produit lorsque la vitesse est maximale, c'est à dire lorsque le déplacement des poteaux est égal à zéro (le temps où le bâtiment est au point d'équilibre), c'est aussi le moment où les efforts dans les poteaux sont au minimum. Cette réponse en déphasage est la plus importante caractéristique des dissipateurs à fluide visqueux.

Dans l'équation 3.4, les paramètres définissant la force d'amortissement ( $F_D$ ) du dissipateur sont le coefficient ( $C_D$ ), l'exposant ( $\lambda$ ) et la vitesse relative ( $\dot{x}$ ). L'effet de la variation de ces paramètres sur les caractéristiques du régime de chargement du système, est illustré ci-dessous pour une excitation sinusoïdale (équation 3.6).

La figure 3.9 montre l'effet de la variation de ( $C_D$ ). Par conséquent, à partir de l'équation 3.4, la force d'amortissement est linéaire avec ( $C_D$ ), donc si ( $C_D$ ) est le doublé, la force d'amortissement ( $F_D$ ) sera doublée pour la même vitesse. La forme de la courbe de force-déplacement est elliptique.

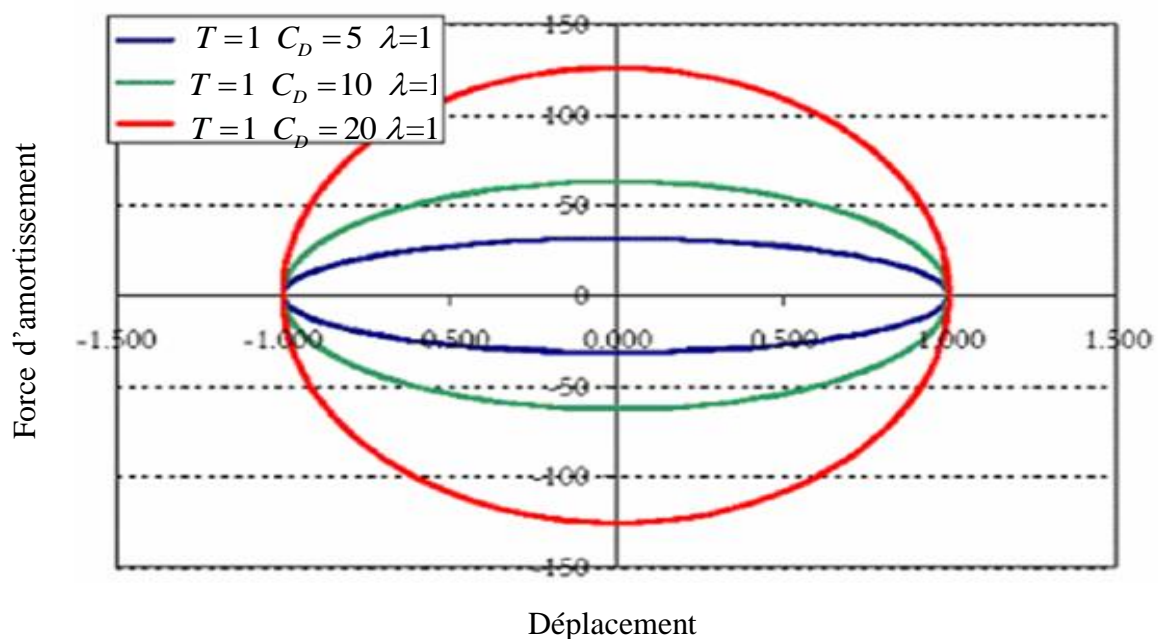


Figure 3.9: Réponse d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux linéaire pour différentes valeurs de la constante d'amortissement ( $C_D$ ) [59]

Dans la figure 3.10 le coefficient d'amortissement ( $C_D$ ) est constant et on fait varier l'exposant de la vitesse ( $\lambda$ ) allant de 0,3 à 1,0 (intervalle de valeurs de  $\lambda$  utilisées dans la pratique pour les dissipateurs dans les structures). En réduisant ( $\lambda$ ) de 1,0 à 0,3 la force d'amortissement ( $F_D$ ) est réduite et va de sa forme elliptique à une forme plus rectangulaire.

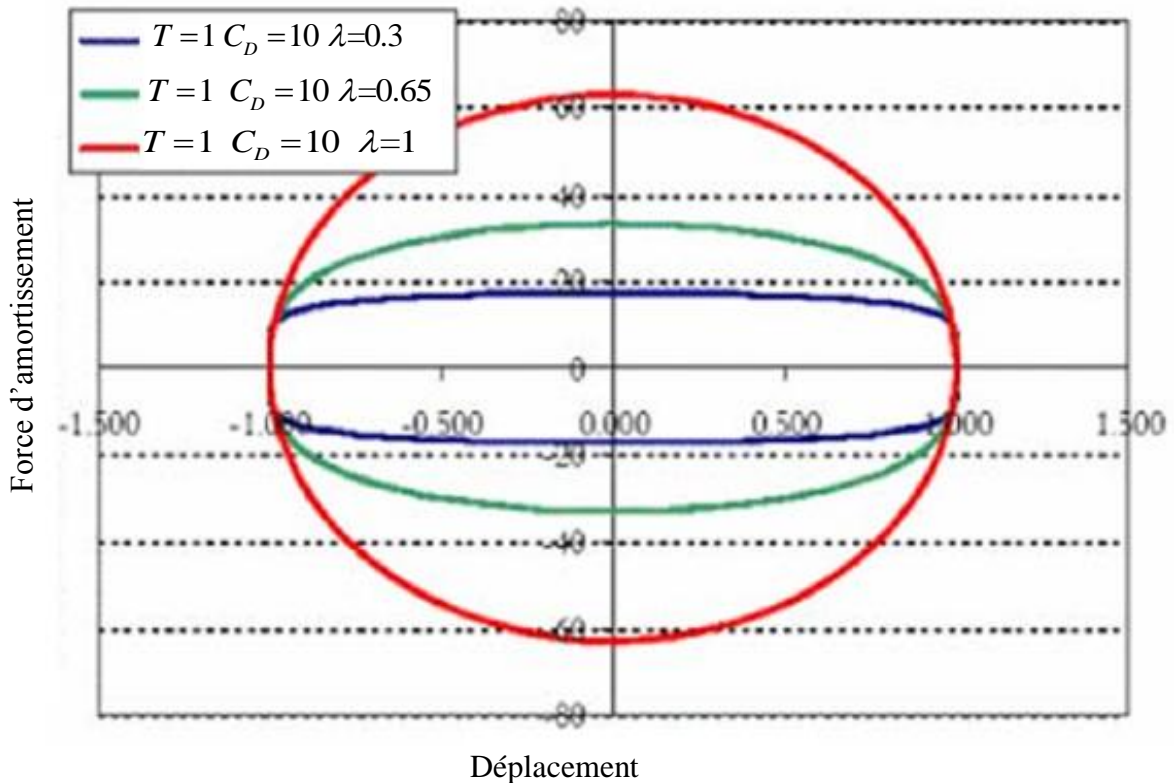
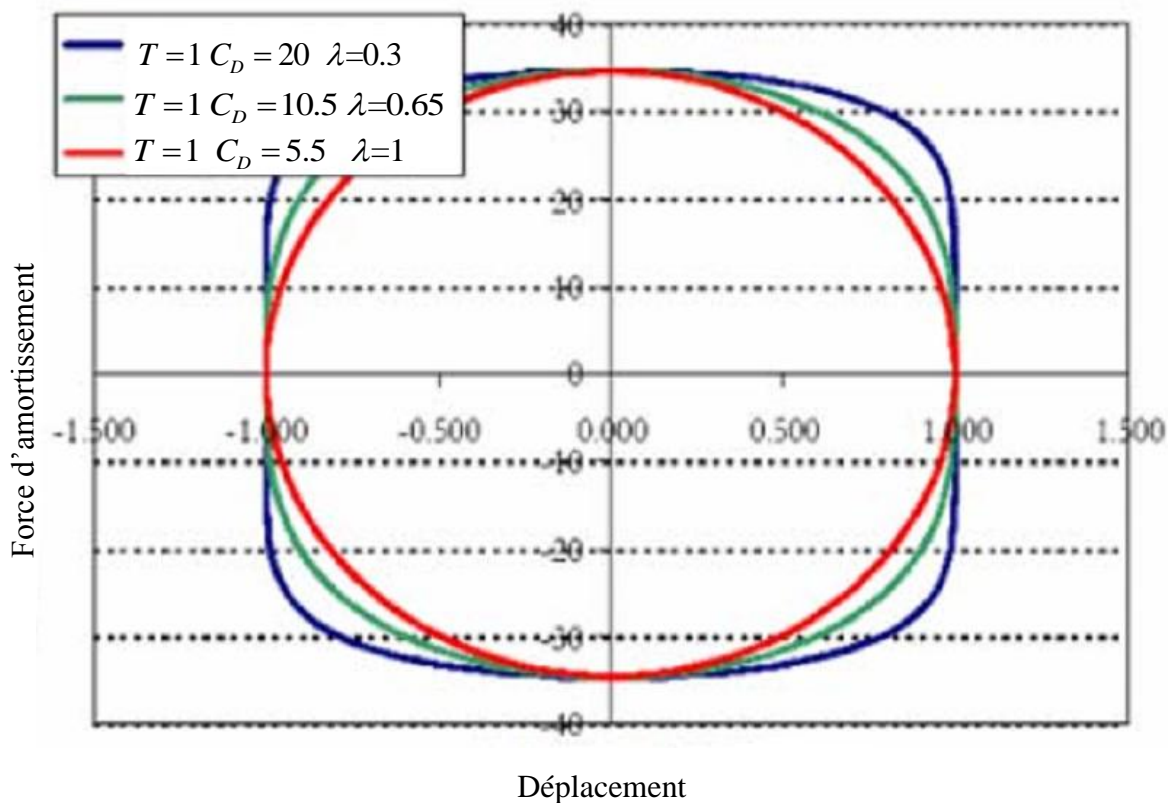


Figure 3.10 : Réponse d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux non linéaire pour différentes valeurs de ( $\lambda$ ) et la même valeur de ( $C_D$ ) [59]

Dans la figure 3.11, on fait aussi varier le paramètre ( $\lambda$ ), mais le coefficient ( $C_D$ ) est ajusté tel que la force d'amortissement reste toujours la même. Afin de maintenir la force d'amortissement, on fait des tests avec ( $\lambda=1$ ) ; quand le paramètre ( $\lambda$ ) est réduit à 0,3, le facteur d'amortissement devrait être augmenté de 5,5 à 20. Cela montre clairement le changement de forme de la courbe force-déplacement d'une allure elliptique à une allure rectangulaire compensée par la réduction de l'exposant ( $\lambda$ ).



La figure 3.12 montre l'effet de la limite de vitesse (vitesse maximum), ce qui limite la force de l'amortisseur à 50, comme  $(C_D)$  augmente de 5 à 20 (voir la figure 3.9, la même courbe, sans la limite de vitesse). Tant que La valeur de  $(C_D)$  augmente la limite tronque l'ellipse. L'effet est similaire à la réduction de l'exposant, où la forme de l'ellipse devient plus rectangulaire.

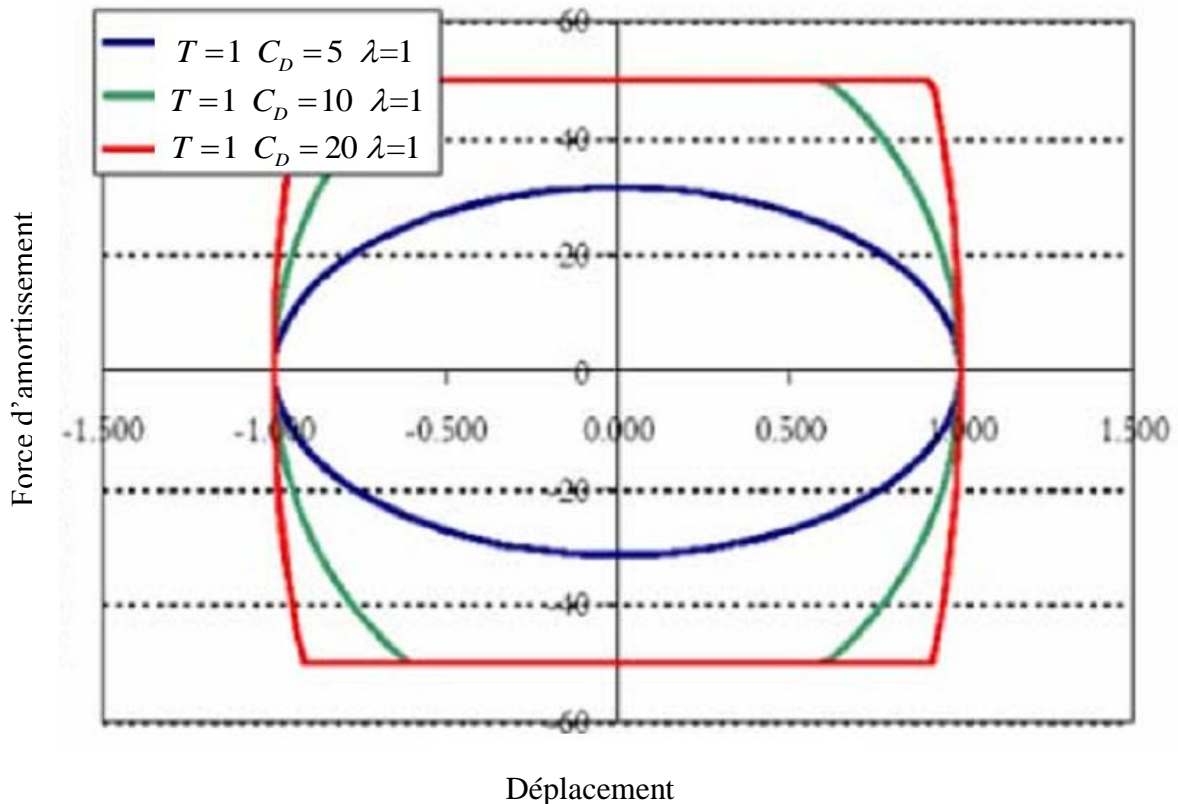


Figure 3.12 : Réponse d'un dissipateur d'énergie à fluide visqueux linéaire en considérant une vitesse limite [59]

### 3.4 Dimensionnement du dissipateur d'énergie

La figure 3.13 présente une schématisation d'un amortisseur à fluide visqueux de Taylor, alors que son dimensionnement est présenté dans le tableau 3.1. Le dimensionnement du dissipateur est basé sur la force axiale exercée sur ce dissipateur.

Différentes courses sont disponibles, de  $\pm 5$  à  $\pm 90$  cm. La capacité de force peut être réduite pour une course plus longue que celles énumérées dans le tableau. Tout changement de course à celui de la version standard présente un changement dans la longueur moyen de course sur 12 cm par  $\pm 2.5$  cm de course.

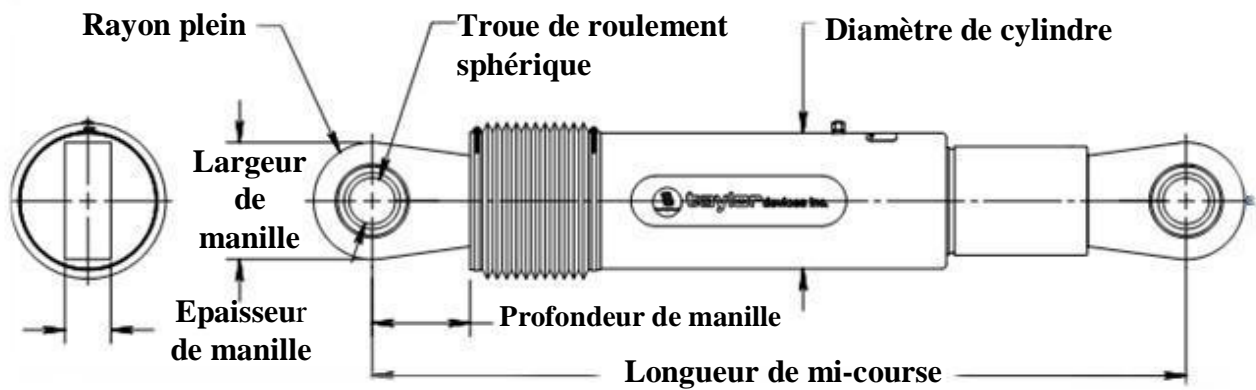


Figure 3.13 : Amortisseur à fluide visqueux de Taylor [60]

FORCE (N)	Trou de roulement sphérique DIA. (Cm)	Longueur de mi- course (Cm)	Course (Cm)	Epaisseur de manille (Cm)	Largeur de manille (Cm)	Profondeur de manille (Cm)	Diamètre de cylindre (Cm)	Poids  Kg
244.64	3.81	86.6902	±7.62	4.1402	10.16 MAX	8.255	10.16-1.27 MAX	40.823
489.28	5.08	106.68	±10.16	5.4102	10.16-1.905 MAX	10.16	12.7-1.905 MAX	83.914
733.92	5.715	119.38	±10.16	5.715	15.24 MAX	12.954	17.78-0.635 MAX	136.077
978.56	6.985	123.825	±10.16	6.985	17.78-1.27 MAX	14.9352	20.32-0.635 MAX	192.776
1467.84	7.62	131.445	±10.16	7.62	20.32 MAX	16.2052	22.86-1.27 MAX	272.154
1957.12	8.89	157.48	±12.7	8.89	22.56 MAX	19.05	27.94-0.635 MAX	408.231
3002.4	10.16	157.48	±12.7	11.43	30.48-1.905 MAX	20.32	33.02-1.905 MAX	589.667
4003.2	12.7	187.96	±12.7	13.97	30.48-1.905 MAX	27.305	40.64-1.905 MAX	1202.013
6449.6	15.24	213.36	±12.7	15.24	33.02-1.905 MAX	30.48	50.8-0.635 MAX	1859.719
8006.4	17.78	224.155	±12.7	17.78	40.64-0.635 MAX	31.75	55.88-0.635 MAX	2494.745

Tableau 3.1 : Dimensionnement du dissipateur d'énergie à fluide visqueux [60]



### 3.5 Système structural avec dissipateurs d'énergie

#### 3.5.1 Système à un degré de liberté

L'équation de mouvement d'une structure soumise à une excitation sismique est donnée comme suit:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -mE\ddot{u}_g \quad (3.9)$$

Où  $m$ ,  $c$  et  $k$  sont respectivement la masse, le coefficient d'amortissement et la rigidité de la structure,  $u$ ,  $\dot{u}$  et  $\ddot{u}$  sont respectivement le déplacement, la vitesse et l'accélération de la structure,  $E$  est le vecteur d'influence du mouvement du sol,  $\ddot{u}_g$  est l'accélération du sol.

Pour une structure munie d'un dispositif de dissipation d'énergie soumis à une excitation sismique, l'équation du mouvement du système (structure-dissipateur) est comme suit :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku + I_D F_D = -mE\ddot{u}_g \quad (3.10)$$

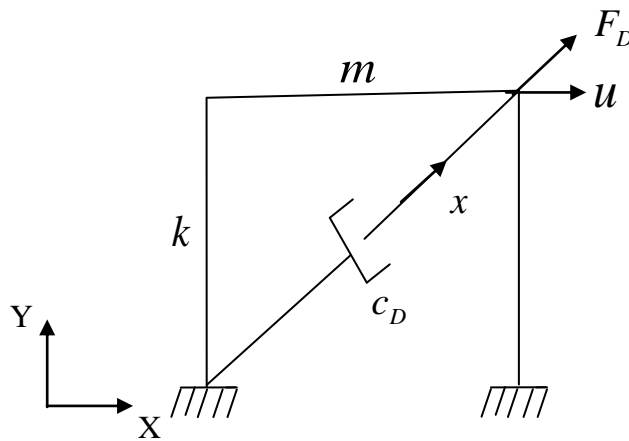


Figure 3.14 : Système de 1DDL avec amortisseur à fluide visqueux

Où  $I_D$  est le vecteur d'influence du dispositif (basé sur l'emplacement de ce dernier dans la structure) et  $F_D$  la force du dissipateur d'énergie à fluide visqueux linéaire donnée par l'équation :

$$F_D = c_D \dot{x} \quad (3.11)$$

En faisant la projection sur l'axe globale des  $X$ , on obtient :

$$\dot{x} = \dot{u} \cos \theta \quad (3.12)$$

Par substitution, l'équation (3.11) devient :

$$F_D = c_D \cos \theta \dot{u} \quad (3.13)$$

Sachant que dans ce cas :

$$I_D = \cos\theta \quad (3.14)$$

Alors l'équation (3.10) devient

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku + \cos\theta(c_D \cos\theta\dot{u}) = -mE\ddot{u}_g \quad (3.15)$$

$$m\ddot{u} + (c + c_D \cos^2\theta)\dot{u} + ku = -mE\ddot{u}_g \quad (3.16)$$

En posant

$$c^* = c + c_D \cos^2\theta \quad (3.17)$$

L'équation (3.13) devient :

$$m\ddot{u} + c^*\dot{u} + ku = -mE\ddot{u}_g \quad (3.18)$$

### 3.5.2 Système à plusieurs degrés de liberté

Pour un système à NDDL mené de n dissipateur d'énergie à fluide visqueux soumis à une excitation sismique, l'équation de mouvement du système (structure- dissipateurs) est donnée comme suit :

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + \sum_{D=1}^n I_D F_D = -ME\ddot{u}_g \quad (3.19)$$

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + \sum_{D=1}^n I_D (C_D \cos\theta\dot{u}) = -ME\ddot{u}_g \quad (3.20)$$

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + \cos\theta \sum_{D=1}^n I_D C_D \dot{u} = -ME\ddot{u}_g \quad (3.21)$$

$$M\ddot{u} + (C + \cos\theta \sum_{D=1}^n I_D C_D)\dot{u} + Ku = -ME\ddot{u}_g \quad (3.22)$$

En posant

$$C^* = C + \cos\theta \sum_{D=1}^n I_D C_D \quad (3.23)$$

Alors l'équation de mouvement (3.19) devient :

$$M\ddot{u} + C^*\dot{u} + Ku = -ME\ddot{u}_g \quad (3.24)$$

Où M, C et K sont respectivement la matrice de masse, la matrice de coefficient d'amortissement et la matrice de rigidité de la structure d'ordre  $n \times n$ ,

$u$  est le vecteur de déplacement de la structure,

$E$  est la matrice d'influence donnée  $E = [1, 1, 1, \dots, 1]^T$ ,

$\ddot{u}_g$  est l'accélération du sol,

$I_D$  est le vecteur d'influence du dissipateur  $D$  (ou la matrice de localisation de la force du dissipateur),

$F_D = [F_{D1}, F_{D2}, F_{D3}, \dots, F_{Dn}]^T$  est le vecteur de force produite par l'amortisseur,

$n$  est le nombre d'étage de la structure.

La solution analytique de l'équation (3.24) n'est pas possible, puisque l'accélération du sol varie arbitrairement avec le temps. La solution nécessite des méthodes de trempage de temps numériques d'intégration. Beaucoup de méthodes numériques d'intégration sont disponibles.

La méthode de Runge-Kutta est une méthode d'analyse numérique d'approximation de solutions d'équations différentielles, elle est élaborée en 1901 par Carl Runge et Martin Wilhelm Kutta et souvent utilisée pour calculer la réponse structurale. Cette méthode repose sur le principe de l'itération, c'est-à-dire qu'une première estimation de la solution est utilisée pour calculer une seconde estimation plus précise, et ainsi de suite.

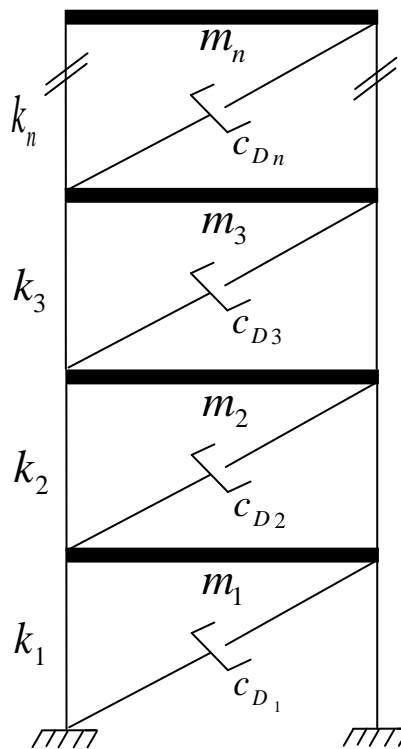


Figure 3.15 : Système à NDDL avec amortisseur à fluide visqueux

La solution d'un système structural avec amortisseur à fluide visqueux linéaire par la méthode de Runge-Kutta s'effectue selon les étapes suivantes :

1- Calcul du vecteur d'accélération à partir des conditions initiales à  $t = 0, u = 0$  et  $\dot{u} = 0$

$$M\ddot{u} = -M\ddot{u}_g - C^* \dot{u} - Ku \quad (3.25)$$

$$M\ddot{u} = -M\ddot{u}_g \Rightarrow \ddot{u} = -\ddot{u}_g$$

2- Choix du pas d'intégration

Soit  $\Delta t$  l'intervalle de temps constant ou appelé aussi pas

3- Incrémentations du temps

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t \quad \text{Avec} \quad n = 1, 2, 3, \dots, t_d / \Delta t$$

$t_d$  est la durée totale du chargement

4- Calcul des constantes  $k_1, k_2, k_3$  et  $k_4$

$$k_1 = -t_{n+1} M^{-1} [M\ddot{u}_g(0) + C^* \dot{u}(0) + Ku(0)] \quad (3.26)$$

$$k_2 = -t_{n+1} M^{-1} \left[ M\ddot{u}_g \left( \frac{t_{n+1}}{2} \right) + K \left( u(0) + \frac{t_{n+1}}{2} \dot{u}(0) \right) + C^* \left( \dot{u}(0) + \frac{k_1}{2} \right) \right] \quad (3.27)$$

$$k_3 = -t_{n+1} M^{-1} \left[ M\ddot{u}_g \left( \frac{t_{n+1}}{2} \right) + K \left( u(0) + \frac{t_{n+1}}{2} \dot{u}(0) + \frac{t_{n+1}}{4} k_1 \right) + C^* \left( \dot{u}(0) + \frac{k_2}{2} \right) \right] \quad (3.28)$$

$$k_4 = -t_{n+1} M^{-1} \left[ M\ddot{u}_g(t_{n+1}) - K \left( u(0) + t_{n+1} \left( \dot{u}(0) + \frac{t_{n+1}}{2} k_2 \right) \right) - C^* \left( \dot{u}(0) + k_3 \right) \right] \quad (3.29)$$

5- Calcul du vecteur de déplacement et de vitesse

$$u_{n+1} = u(0) + t_{n+1} \dot{u}(0) + \frac{\Delta t}{6} (K_1 + K_2 + K_3) \quad (3.30)$$

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}(0) + \frac{1}{6} [k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4] \quad (3.31)$$

6- Calcul du vecteur d'accélération selon l'équation suivante

$$\ddot{u}_{n+1} = -M^{-1} [ME\ddot{u}_g(t_{n+1}) + C^* \dot{u}(t_{n+1}) + Ku(t_{n+1})] \quad (3.32)$$

# **Chapitre 4**

## **Contrôle de la réponse dynamique des structures**

## CONTROLE DE LA REPOSE DYNAMIQUE DES STRUCTURES

### 4.1 Introduction

Pour montrer l'effet du dissipateur d'énergie sur les réponses des structures, des études comparatives ont été effectuées sur trois structures de cinq, de dix et de vingt niveaux avec et sans dissipateur d'énergie mené d'un amortissement supplémentaire de 15%, 20% et 30%. Plusieurs programmes numériques peuvent être utilisés pour modéliser les dissipateurs d'énergie de type fluide visqueux ainsi que l'analyse des structures. Tel que SAP 2000 et l'ETABS. Dans notre étude on a utilisé le programme ETABS dans sa version 9.7.0.

Le programme ETABS (*Extended Three Dimensional Analysis Building Systems*) est le logiciel leader en ingénierie des structures. Tous les types de structures peuvent être analysés de manière précise avec les règlements les plus connus (ACI aux États-Unis, EUROCODE en Europe, etc.). C'est un programme de calcul de structure tridimensionnelle par éléments finis.

Avec le programme ETABS, il est possible de modéliser des géométries complexes, définir les différents cas de charge, générer automatiquement le poids propre, assigner les sections et le matériau, ainsi qu'effectuer des calculs de structure en béton armé ou en acier sur la base de différents règlements.

Les dernières versions de ce programme ont incorporé les éléments LINK, avec lesquels il est possible de modéliser les dispositifs de contrôle passif des structures, aussi bien les isolateurs à la base (LRB, FPS, etc...) que les dissipateurs d'énergie (amortisseurs visqueux fluides et amortisseurs viscoélastiques).

### 4.2 Eléments LINK

Dans le cadre de notre travail, nous utilisons ETABS 9.7.0 pour la modélisation des dispositifs étant donné les avantages et les fonctions d'analyse tridimensionnelle, en plus des options d'application de divers types d'analyse (statique, modale, temporelle, etc.). La principale raison d'utilisation de ce programme comme un outil d'analyse de la réponse dynamique des structures, est qu'il a la possibilité d'inclure les dispositifs de dissipation d'énergie visqueux de type linéaire et non linéaire en très bonne forme. D'autre part la sortie

de données peut être sous forme graphique, ce qui permet de visualiser facilement le comportement de la structure et les dispositifs.

### 4. 3 Description des structures

Les trois modèles structuraux traités dans ce mémoire sont trois bâtiments à cinq, à dix et à vingt niveaux en béton armé. Les propriétés mécaniques du matériau sont la résistance du béton  $f_{c28}=25\text{MPa}$ , le module d'élasticité du béton  $E_{ij}= 32100\text{MPa}$ , le coefficient de Poisson  $\nu=0.2$  et la densité  $\rho =2500 \text{ Kg/m}^3$ .

Le bâtiment comporte trois travées dans le sens longitudinal et quatre travées dans le sens transversal (figure 4.1). Les poutres principales sont de section  $50 \times 30 \text{ cm}^2$  et les poutres secondaires sont de section  $40 \times 30 \text{ cm}^2$ . L'hauteur d'étage est de 3m et la dalle est d'une épaisseur de 16cm. Les sections des poteaux sont présentées dans le tableau 4.1. On assume que le rapport d'amortissement inhérent de la structure est 5%.

niveaux Structures	1-2	3-5	6-10	11-15	16-20
5 niveaux	50×40	40×30	–	–	–
10 niveaux	50×40	50×40	40×30	–	–
20 niveaux	70×60	70×60	60×50	50×40	40×30

Tableau 4.1 : Sections des poteaux des différentes structures

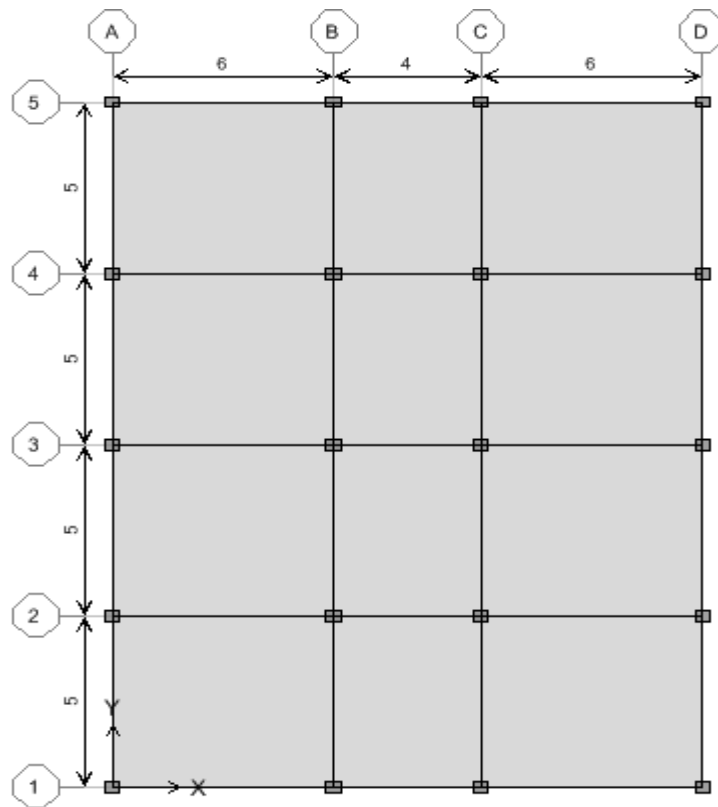


Figure 4.1 : Vue en plan des structures

#### 4.4 Modélisation des amortisseurs à fluide visqueux

Pour l'analyse des structures avec des amortisseurs supplémentaires différentes techniques de modélisation mathématique ont été développées. Différents modèles d'une complexité accrue sont examinés par Reinhorn et al. (1995) pour les amortisseurs visqueux. Constantinou et Symans (1993) ont prouvé que le modèle de Maxwell est suffisant pour capturer la dépendance en fréquence de l'amortisseur visqueux (figure .4.2). Et ils ont montré également que, au-dessous d'une fréquence d'environ 4 Hz, le modèle peut être encore simplifié dans un modèle d'amortisseur purement visqueux.

Il est indiqué dans FEMA-274 que la force d'amortissement d'un amortisseur visqueux est proportionnelle à la vitesse avec un exposant constant compris entre 0,5 et 2. Dans les étapes préliminaires d'analyse et de conception, l'exposant de vitesse  $\lambda = 1$  est recommandé pour plus de simplicité. Dans cette étude, basée sur ces références, le comportement des amortisseurs visqueux fluide est modélisé par un amortisseur linéaire (figure.4.3), et la modélisation sur ETABS 9.7.0 est faite par le bloc de donnée NLink property.



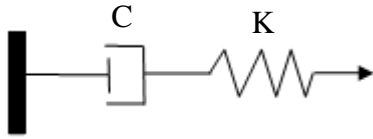


Figure 4.2 : Modèle de Maxwell

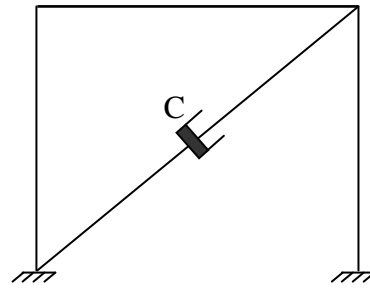


Figure 4.3 : Structure avec amortisseur visqueux fluide en diagonal

#### 4.5 Emplacement des amortisseurs à fluide visqueux

Les structures seront analysées et étudiées avec et sans les dissipateurs d'énergie à fluide visqueux. Ces amortisseurs vont être placés dans les structures en contreventement diagonal. Chaque étage contient deux dissipateurs dans le sens X et deux dissipateurs dans le sens Y. La figure 4.4 présente une vue en plan des structures avec l'emplacement des amortisseurs et les figures 4.5, 4.6 et 4.7 présentent les trois structures en 3D avec et sans les dissipateurs d'énergie. L'amortissement supplémentaire est  $\xi=15\%$  et  $\xi=20\%$ , bien que l'amortissement de la structure qui est de 5%, l'amortissement effectif de la structure sera de 20% et 25%.

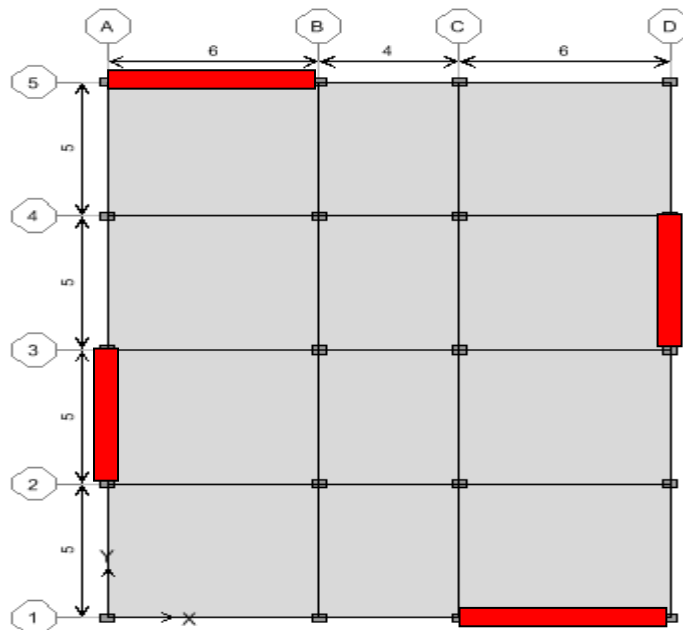


Figure 4.4 : Vue en plan de la structure avec l'emplacement des dissipateurs.

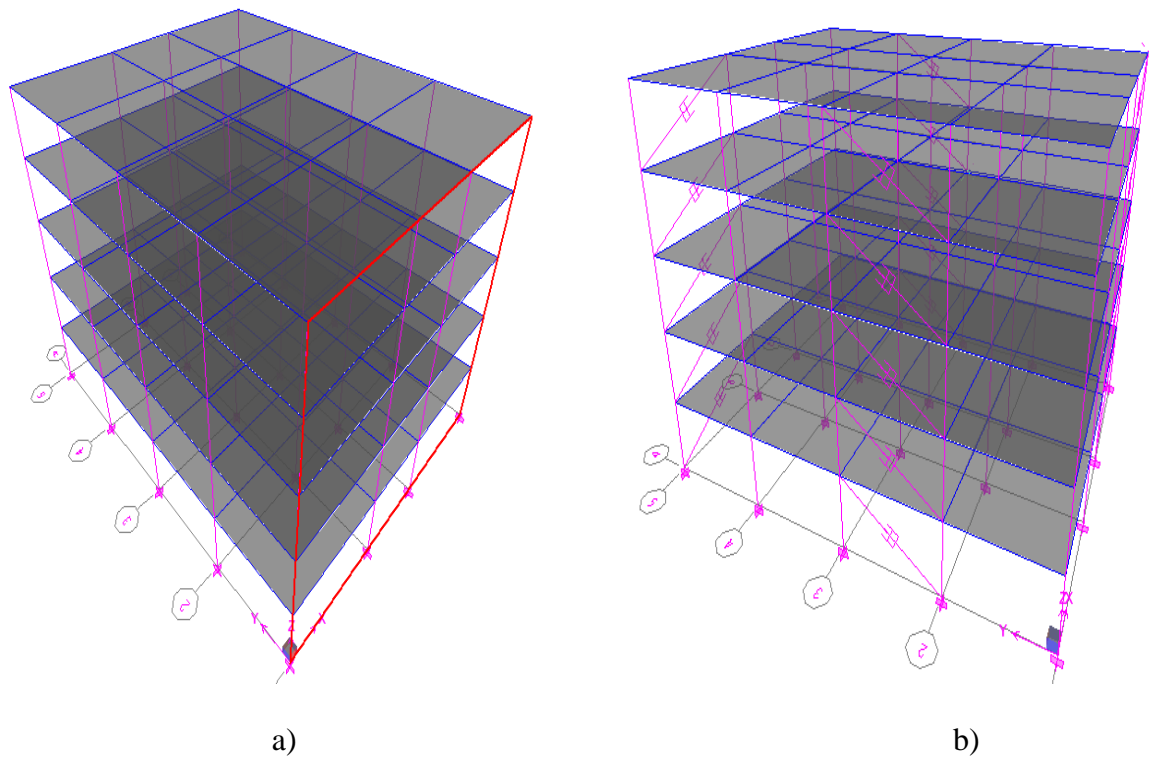


Figure 4.5 : Vue en 3D de la structure à 5 niveaux : a) sans dissipateurs et b) avec dissipateurs

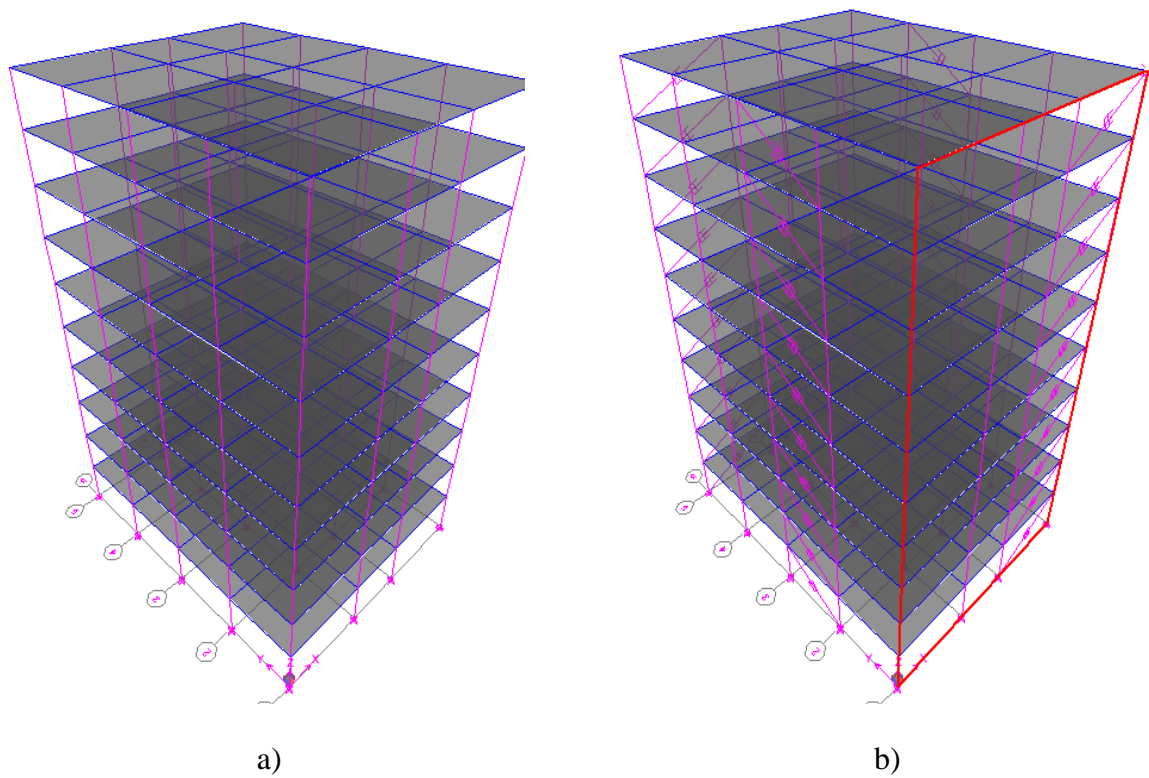


Figure 4.6 : Vue en 3D de la structure à 10 niveaux: a sans dissipateurs et b) avec dissipateurs

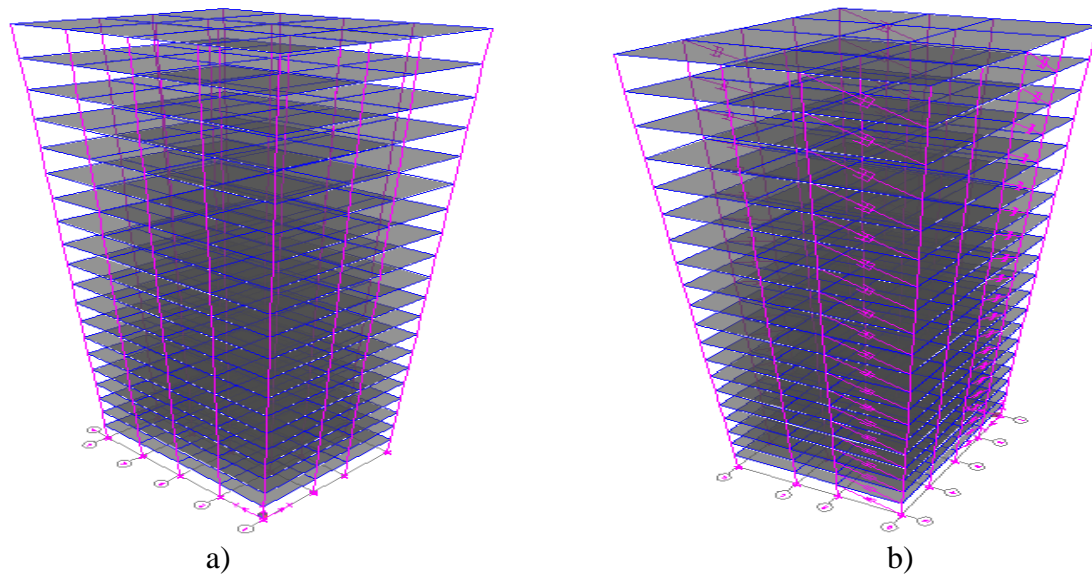


Figure 4.7: Vue en 3D de la structure à 20 niveaux: a) sans dissipateurs et b) avec dissipateurs

#### 4.6 Excitations sismiques :

Les trois structures ont été étudiées sous l'effet des composantes  $140^\circ$  et  $230^\circ$  du séisme d'El Centro (Impérial Valley) (1979) enregistrées par la station Array #6 avec des accélérations maximales,  $PGA= 0.376g$  et  $PGA= 0.436g$  respectivement. Ces deux composantes sont appliquées dans le sens X et le sens Y respectivement (figures 4.8 et 4.9). Et les composantes  $0^\circ$  et  $90^\circ$  du séisme de Loma Prieta (1989) enregistrées par la station Hollister avec une accélération maximale  $PGA= 0.369g$  et  $PGA=0.178g$  respectivement, Ces deux composantes sont appliquées dans le sens X et le sens Y respectivement (figures 4.10 et 4.11).

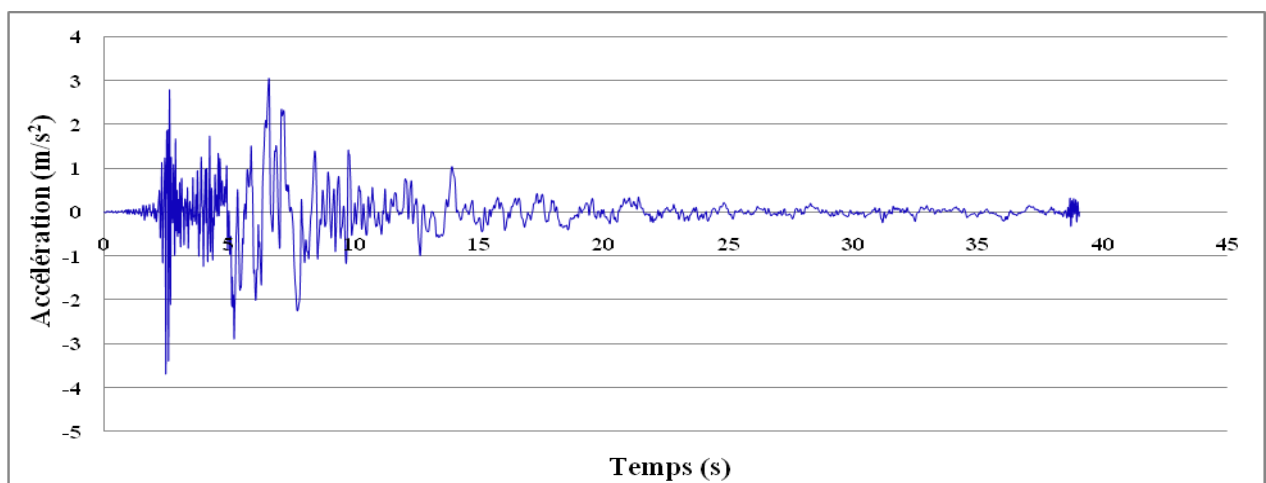


Figure 4.8: Accélérogramme de la composante  $140^\circ$  du séisme d'El Centro avec un  $PGA= 0.376g$

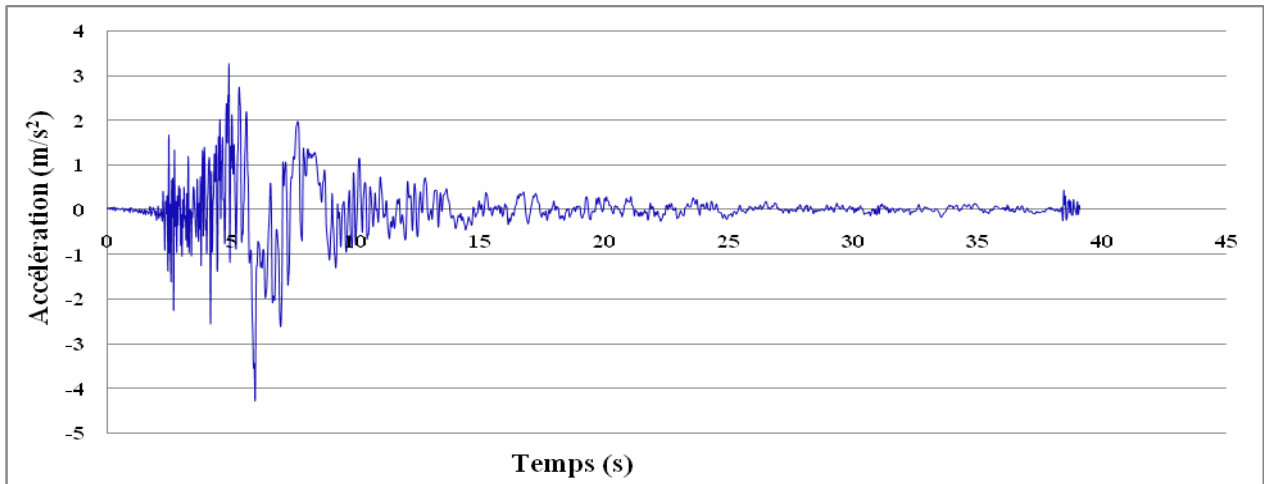


Figure 4.9 : Accélérogramme de la composante 230° du séisme d'El Centro avec un PGA= 0.436 g.

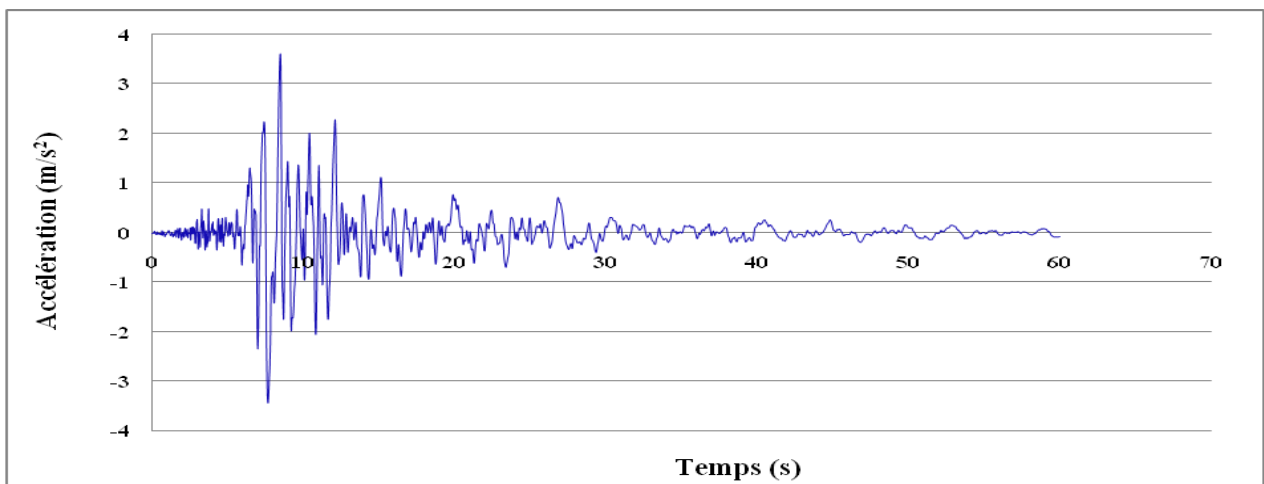


Figure 4.10 : Accélérogramme de la composante 0° du séisme de Loma Prieta avec un PGA= 0.369 g.

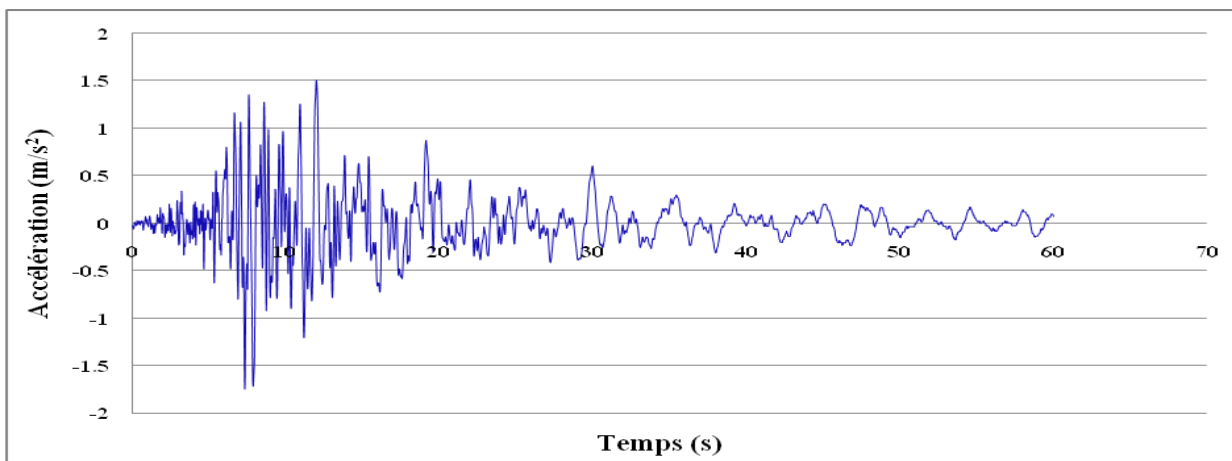


Figure 4.11 : Accélérogramme de la composante 90° du séisme de Loma Prieta avec un PGA= 0.178 g. .

## 4.7 Réponses sismiques

### 4.7.1 Structure à cinq niveaux

#### 4.7.1.1 Déplacements

L'analyse effectuée pour les structures avec et sans dissipateurs d'énergie de type visqueux fluide nous a permis de comparer les résultats des déplacements dans les deux directions d'excitations (X et Y). Ces résultats sont représentés dans les figures ci-dessous.

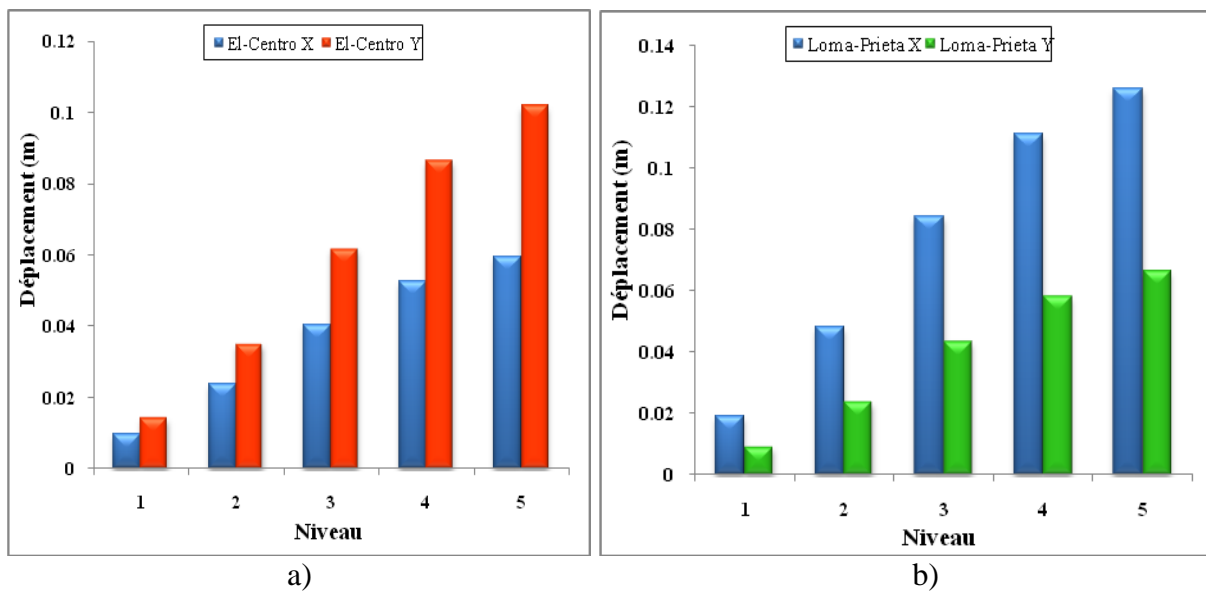


Figure 4.12 : Déplacements des différents niveaux de la structure dans les deux directions sous les deux séismes, a) El Centro b) Loma Prieta

D'après ces histogrammes (figure 4.12 (a et b)), qui décrivent les déplacements des différents niveaux de la structure sans dissipateurs dans les deux directions sous les composantes du séisme d'El Centro et de Loma-Prieta, on remarque que le déplacement est proportionnel au pic d'accélération.

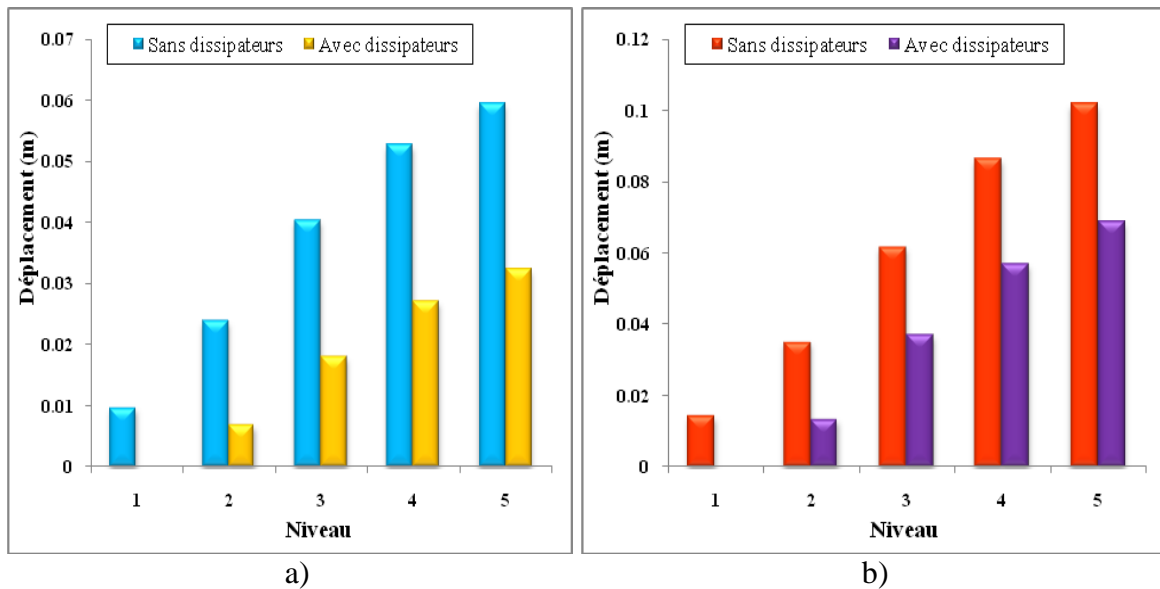


Figure 4.13 : Déplacements des différents niveaux de la structure avec et sans dissipateurs sous le séisme d'El Centro, a) sens X b) sens Y

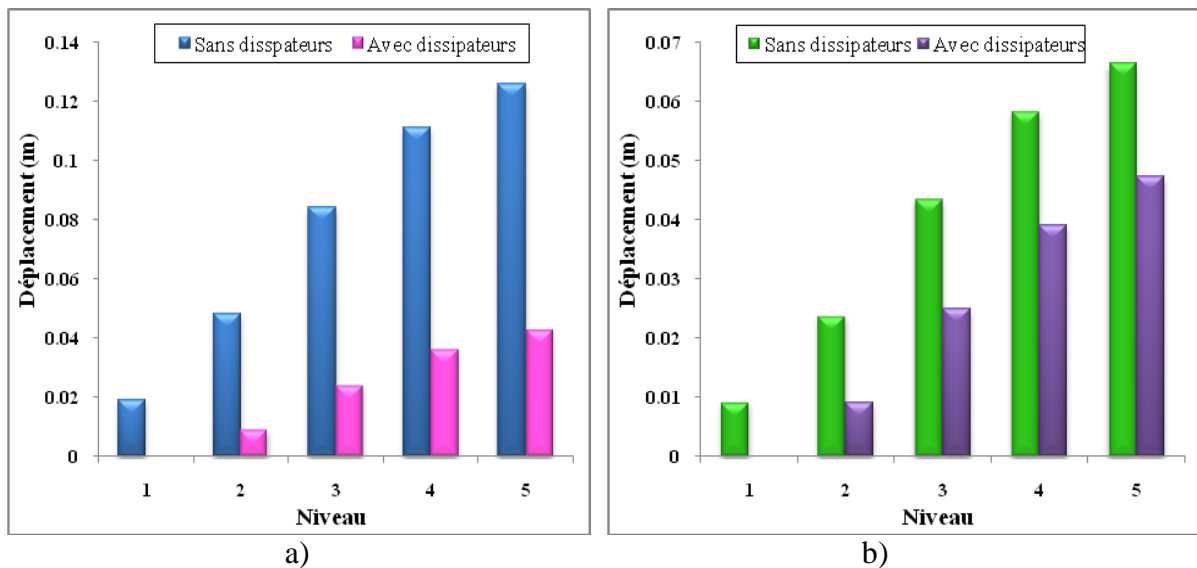


Figure 4.14 : Déplacements des différents niveaux de la structure avec et sans dissipateurs sous le séisme de Loma-Prieta, a) sens X b) sens Y

L'étude des déplacements des différents niveaux de la structure avec et sans dissipateurs d'un taux d'amortissement effectif de 20% illustrée dans les figures (4.13 et 4.14) nous ramène à ce qui suit :

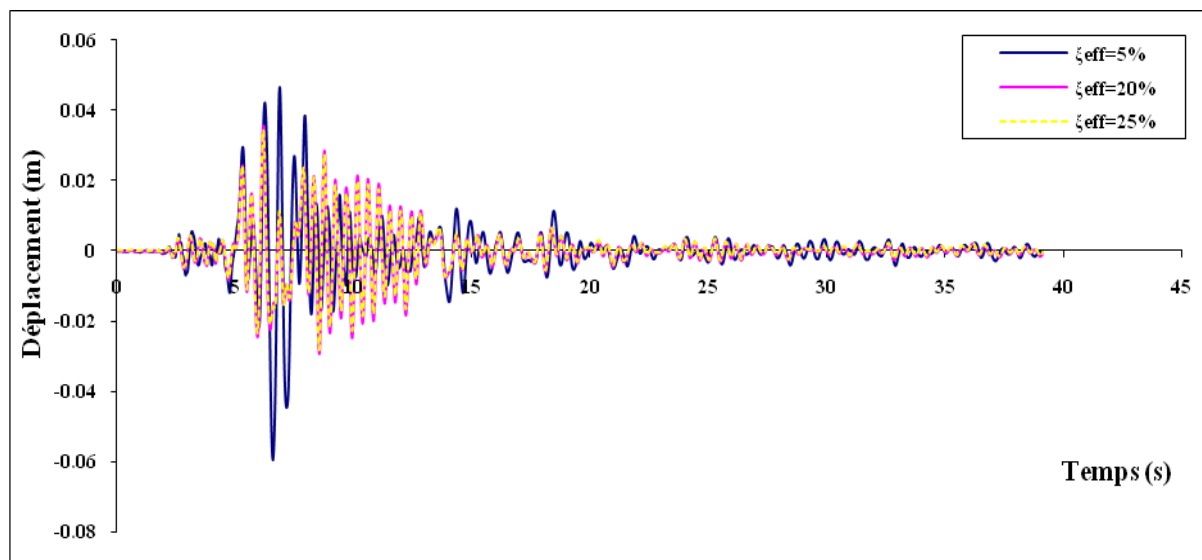
Sous les deux excitations sismiques, les déplacements de tous les niveaux diminuent, où ils atteignent au premier niveau 100%.

Sous la composante d'El-Centro X, le pourcentage de réduction au dernier niveau a atteint 45,67% et sous la même excitation suivant Y 32,51%.

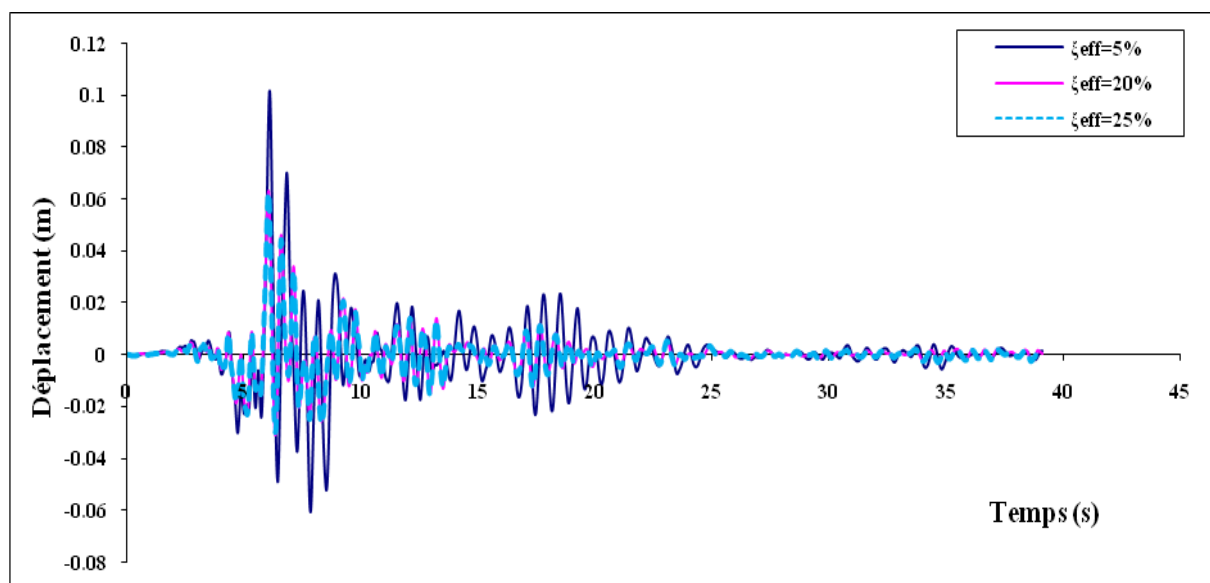
Sous le séisme de Loma-Prieta, le pourcentage de réduction au dernier niveau a atteint 66,16% suivant la composante X et 28,83% suivant la composante Y.

#### 4.7.1.2 Effet du coefficient d'amortissement sur le déplacement du dernier niveau

Etant donné que le déplacement maximal est celui du dernier niveau, on a pris ce niveau comme référence pour montrer l'effet de l'augmentation de l'amortissement supplémentaire du dissipateur d'énergie à fluide visqueux sur le déplacement de la structure. Les figures 4.15 et 4.16 qui décrivent cet effet nous montrent que pour toutes les excitations sismiques, lors d'ajout d'un dissipateur d'énergie de type fluide visqueux, le déplacement se réduit d'une manière remarquable et dès qu'on augmente le taux d'amortissement supplémentaire le déplacement diminue encore. Ceci est bien illustré sur la figure 4.17.

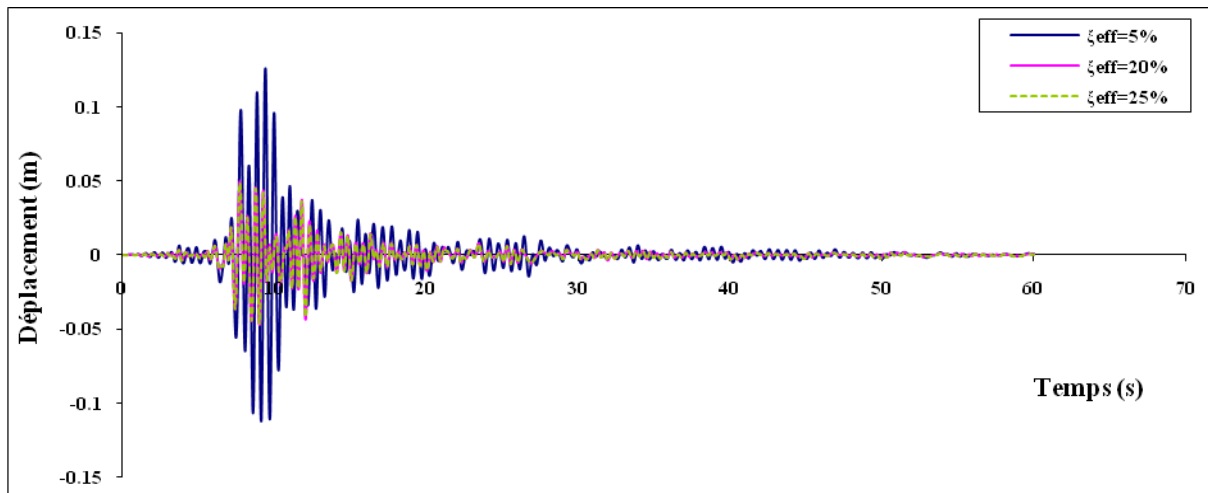


a)

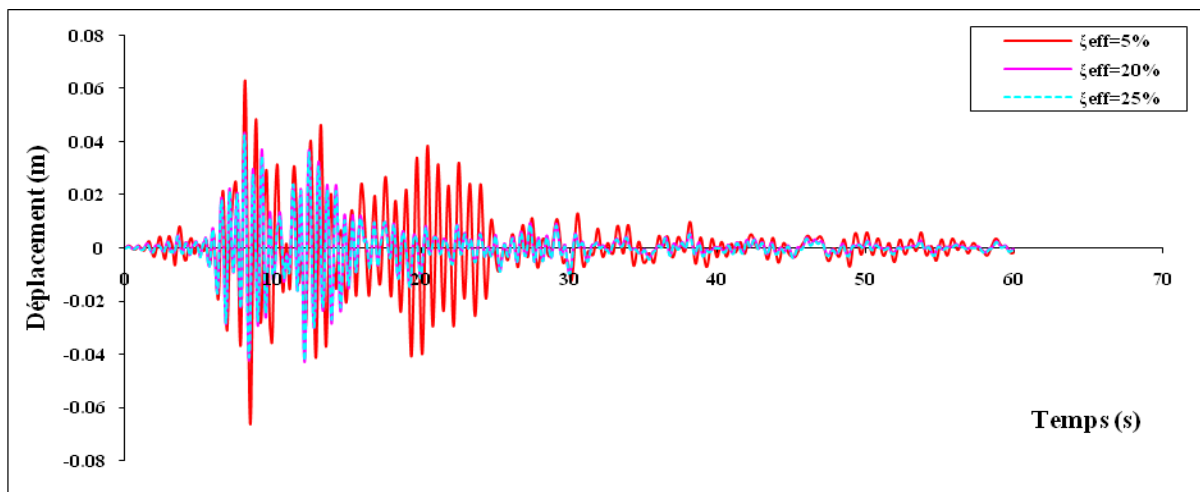


b)

Figure 4.15 : Comparaison des déplacements du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique d'El Centro : a) sens X, b) sens Y



a)



b)

Figure 4.16: Comparaison des déplacements du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique de Loma-Prieta : a) sens X, b) sens Y

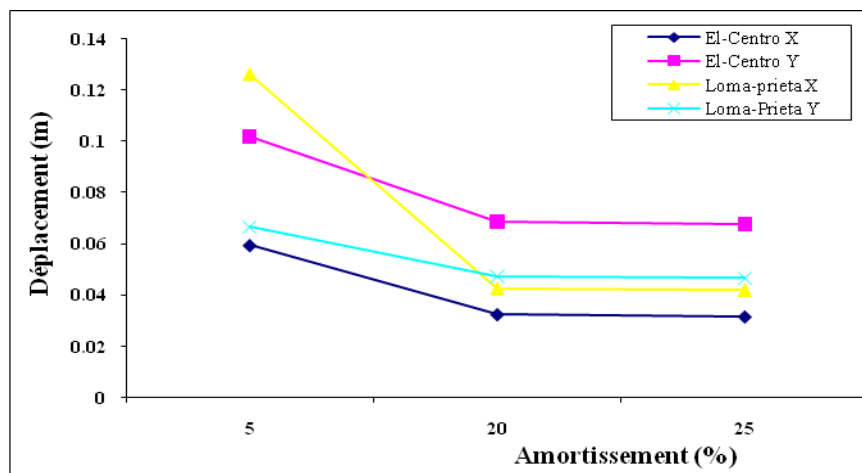
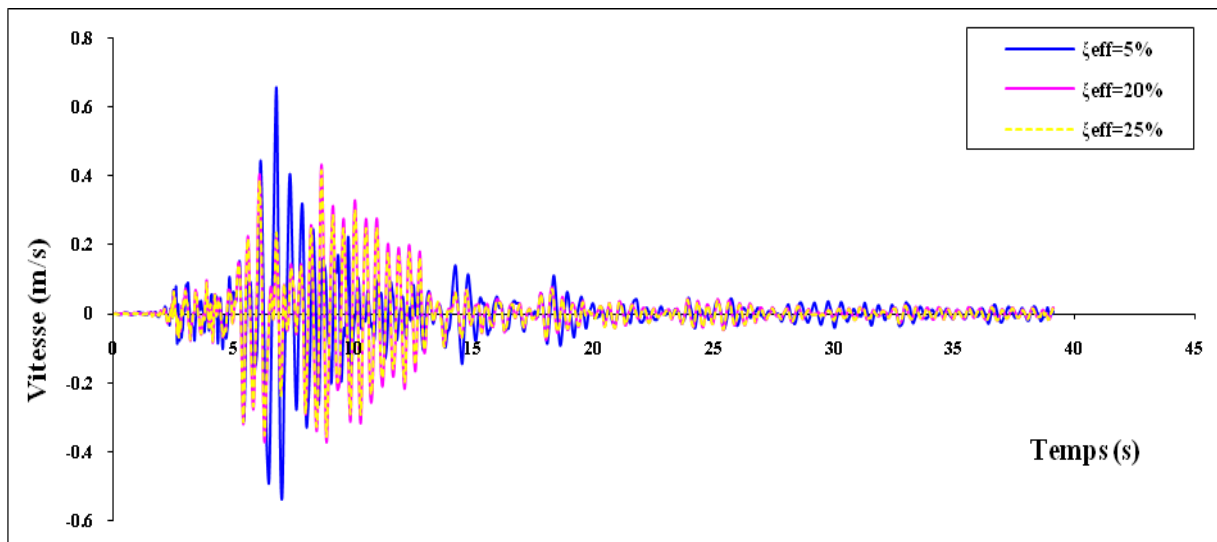


Figure 4.17 : Effet de la variation d'amortissement du dissipateur à fluide visqueux sur le déplacement maximal du dernier niveau sous différents enregistrements sismiques.

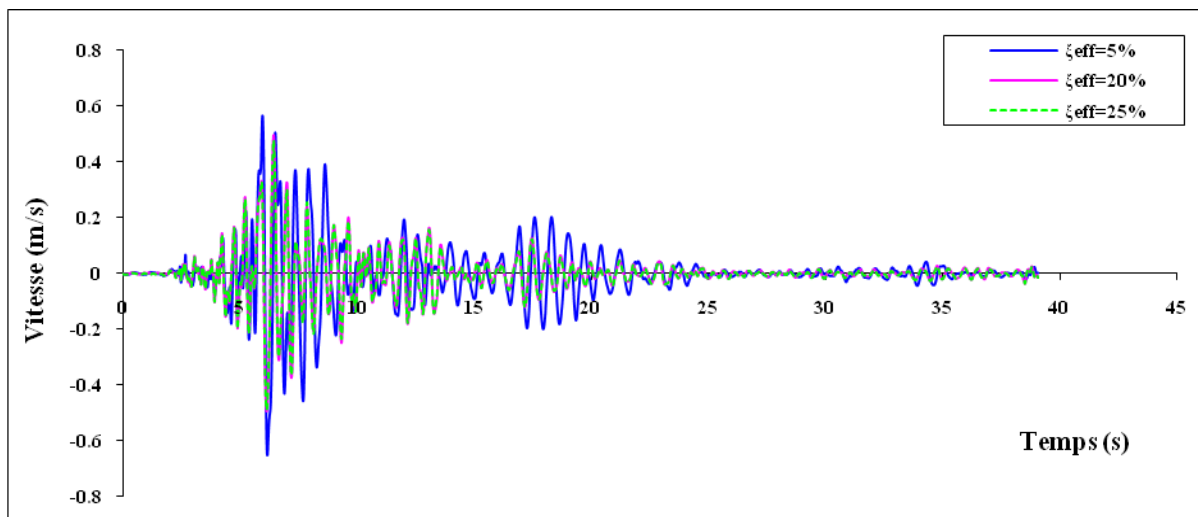


### 4.7.1.3 Vitesses

Vu que la vitesse maximale est celle atteinte dans le dernier niveau. La vitesse du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateur avec les différents taux d'amortissement effectif et sous les deux composantes d'excitation d'El-Centro et de Loma-Prieta est représentée sur les figures ci-dessous. On constate que la vitesse diminue en augmentant le taux d'amortissement sous toutes les excitations et dans toutes les directions.

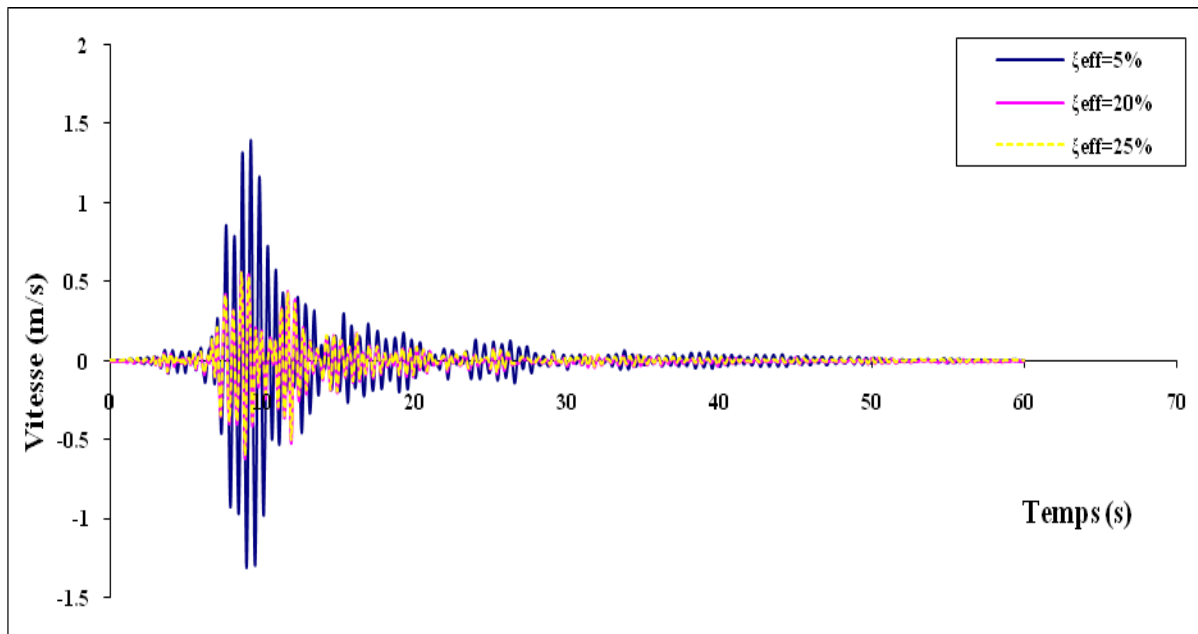


a)

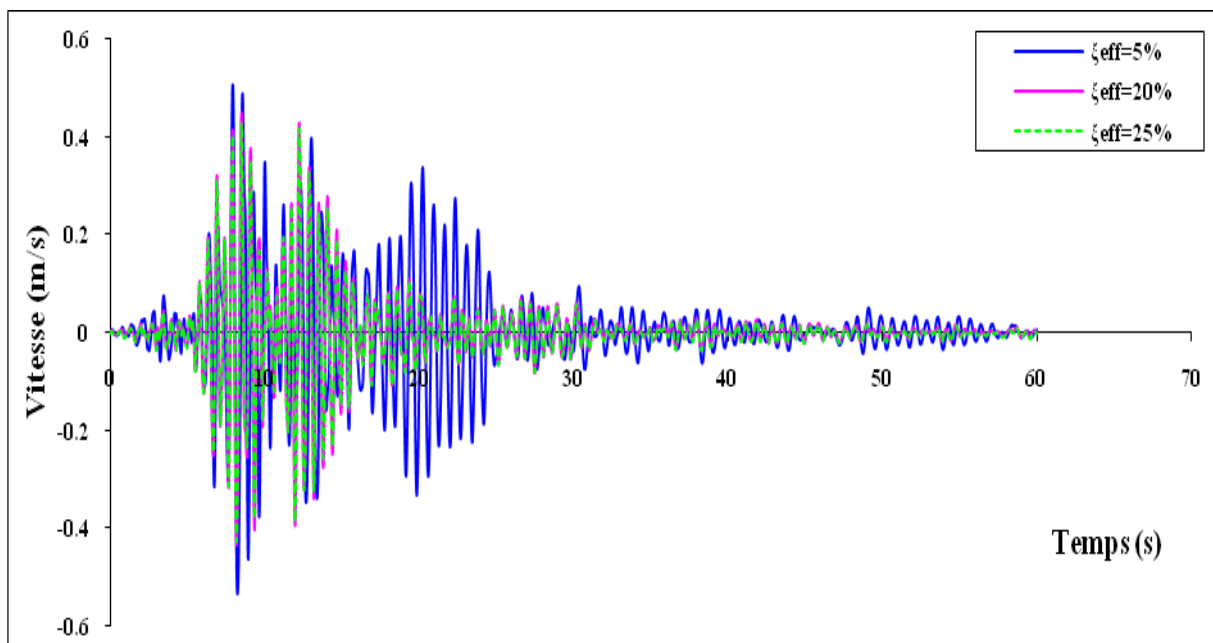


b)

Figure 4.18 : Comparaison des vitesses du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique d'El Centro : a) sens X, b) sens Y



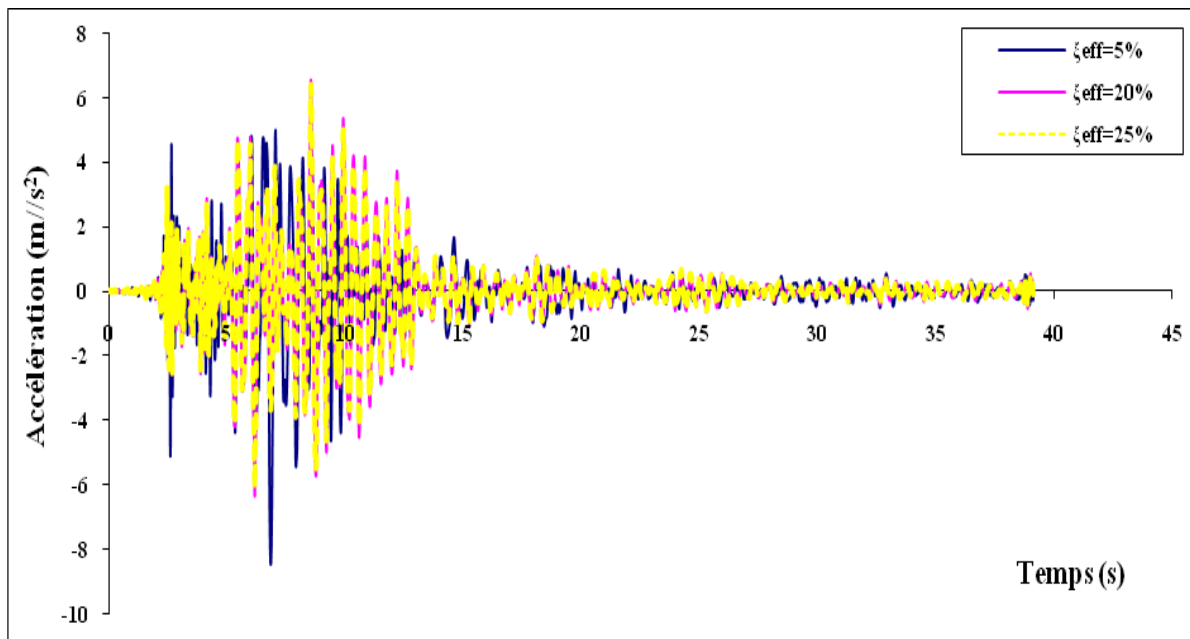
a)



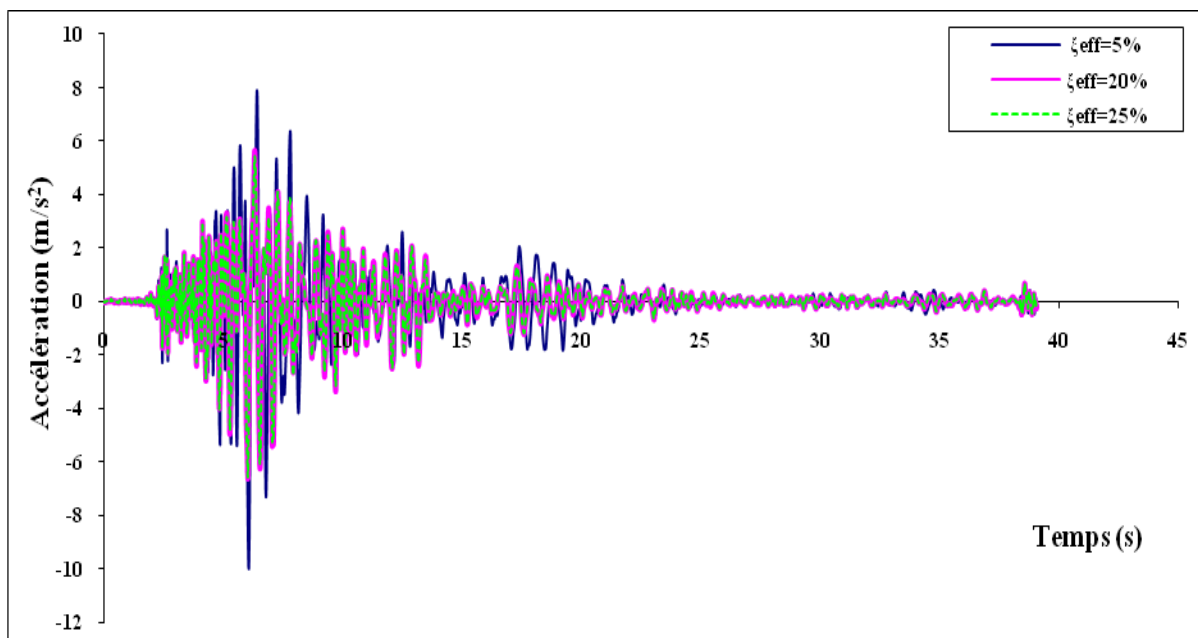
b)

Figure 4.19 : Comparaison des vitesses du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique de Loma-Prieta : a) sens X, b) sens Y

## 4.7.1.4 Accélération

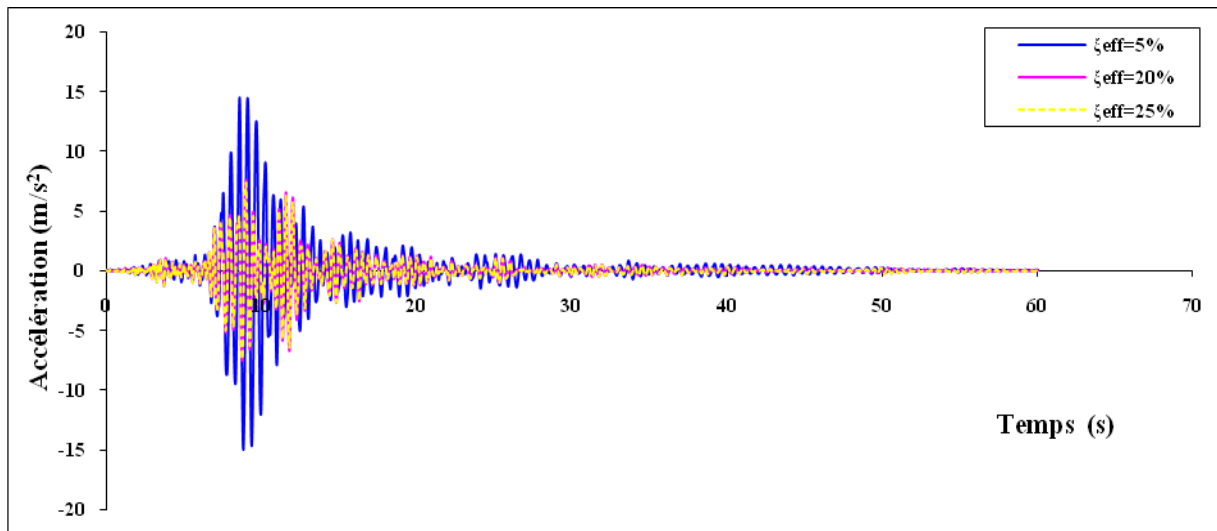


a)

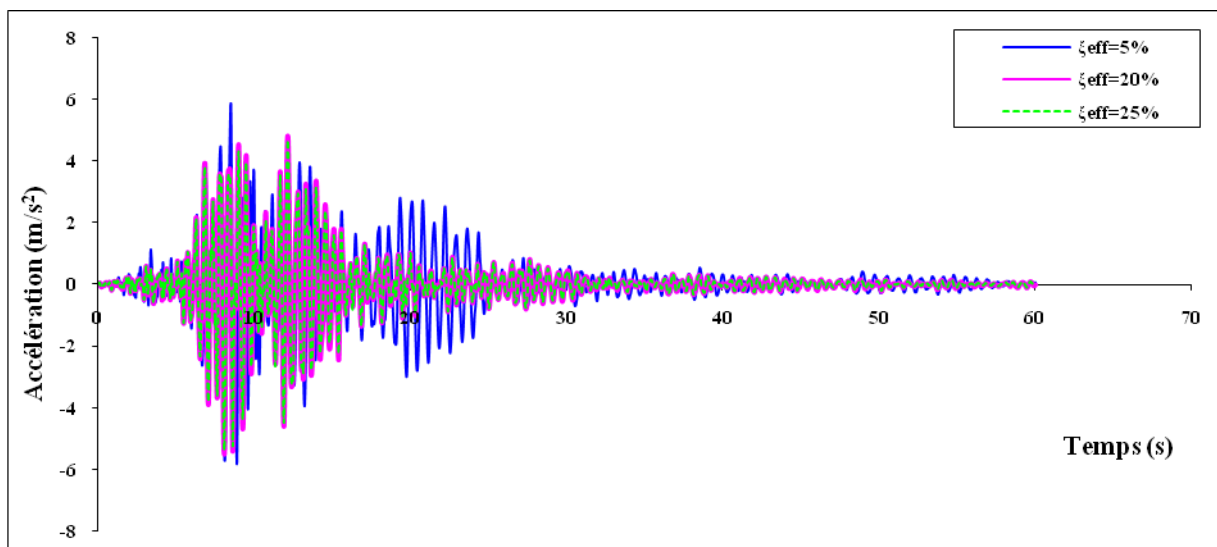


b)

Figure 4.20 : Comparaison des accélérations du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique d'El Centro : a) sens X, b) sens Y



a)



b)

Figure 4.21 : Comparaison des accélérations du dernier niveau pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique de Loma Prieta : a) sens X, b) sens Y

Les figures ci-dessus illustrent la variation des accélérations du dernier niveau de la structure avec et sans amortisseur supplémentaire pour les différentes excitations, et nous montrent que les accélérations de la structure avec dissipateur d'énergie sont réduites par rapport à celle sans dissipateur, ainsi lorsqu'on augmente le taux d'amortissement supplémentaire l'accélération se réduit encore.

- **Comparaison des résultats maximaux de la structure avec et sans dissipateur**

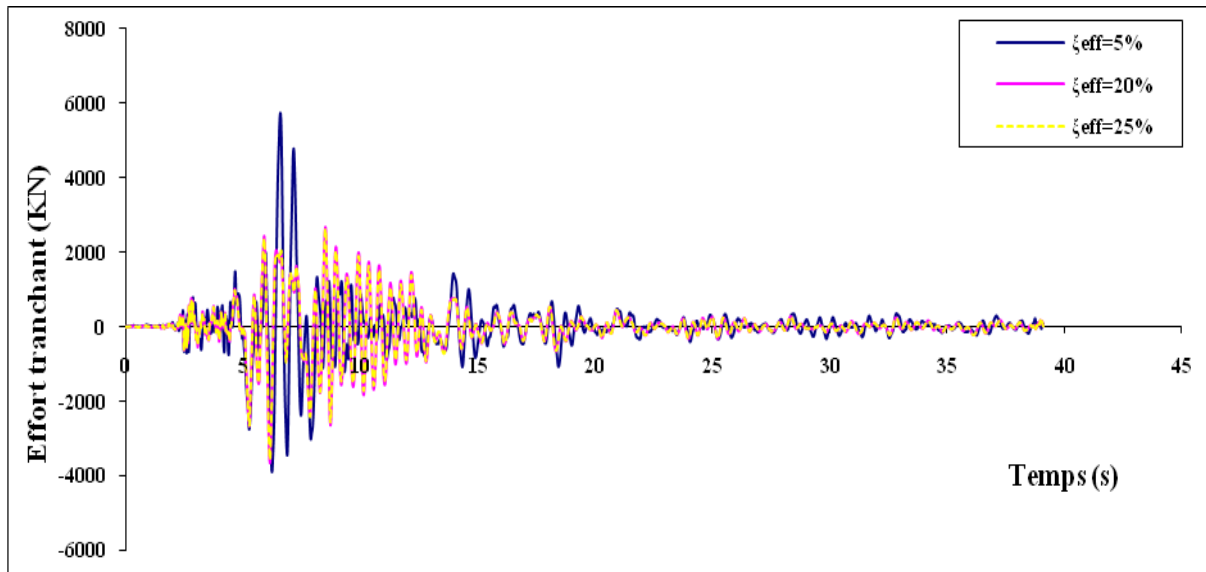
Les résultats de l'étude comparative des réponses maximales du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateur d'énergie à fluide visqueux, sous les différents chargements sismiques et pour les différents taux d'amortissement supplémentaire (15% et 20%) sont résumés dans le tableau 4.2.

	Excitations	Direction	Structure sans amortisseur	Structure avec amortissement supplémentaire de 15%		Structure avec amortissement supplémentaire de 20%	
			$\xi_{eff} = 5\%$	$\xi_{eff} = 20\%$	Réduction (%)	$\xi_{eff} = 25\%$	Réduction (%)
Déplacement	El-Centro	X	0.05945	0.0323	45.67	0.0314	47.18
		Y	0.1018	0.0687	32.51	0.0677	33.5
	Loma-Prieta	X	0.1259	0.0426	66.16	0.042	66.64
		Y	0.06646	0.0473	28.83	0.0468	29.58
Vitesse	El-Centro	X	0.6543	0.43	34.31	0.416	36.44
		Y	0.6511	0.496	23.81	0.487	25.25
	Loma-Prieta	X	1.389	0.620	55.38	0.605	56.42
		Y	0.5353	0.450	15.88	0.430	19.65
Accélération	El-Centro	X	8.47	6.54	22.79	6.389	24.57
		Y	9.995	6.644	33.53	6.586	34.11
	Loma-Prieta	X	15.04	7.569	49.67	7.414	50.71
		Y	5.853	5.498	6.06	5.38	8.08

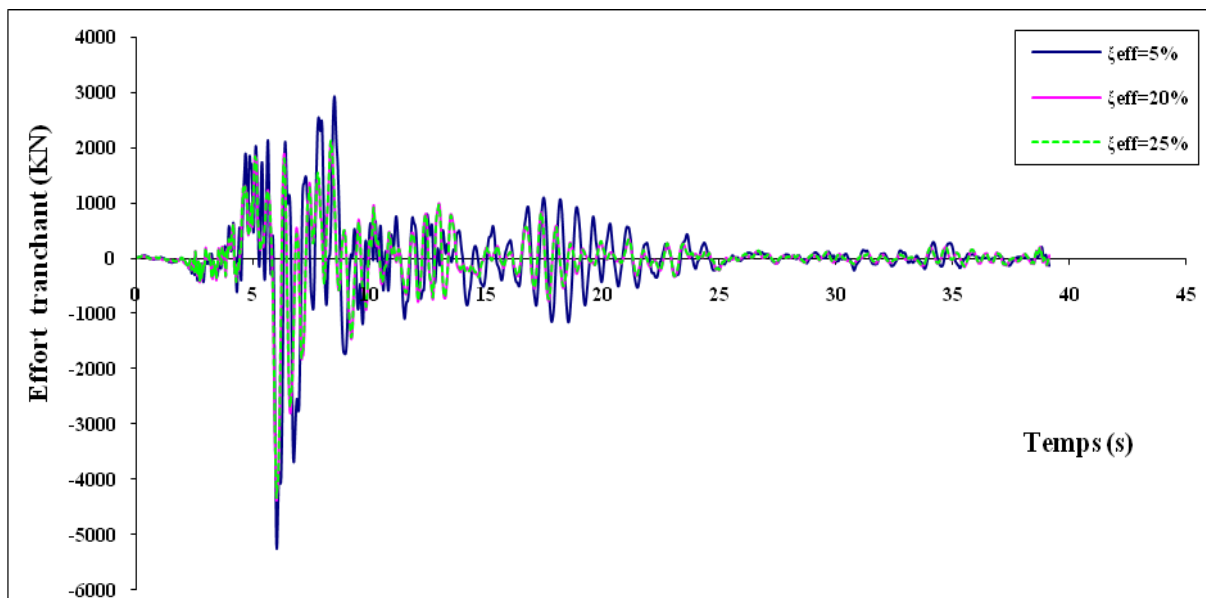
Tableau 4.2 : Pourcentage de réductions des résultats du dernier niveau de la structure avec et sans amortisseur à fluide visqueux

#### 4.7.1.5 Efforts tranchants à la base

Pour l'effort tranchants on se suffit de l'étudier à la base car il sera maximal à ce niveau, on va le déterminer dans les directions X et Y pour toutes les excitations.

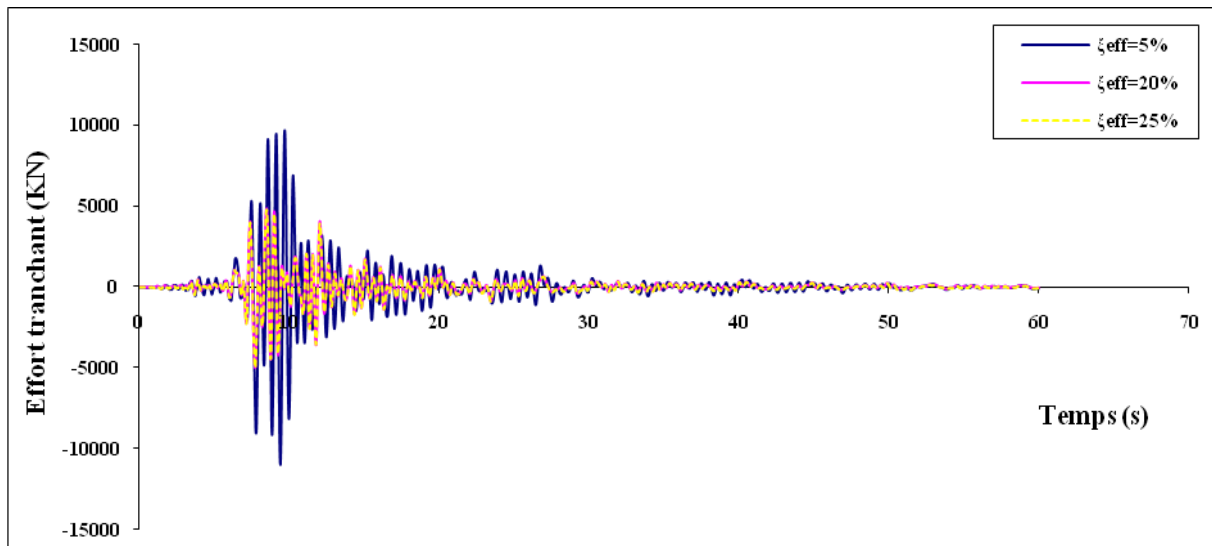


a)

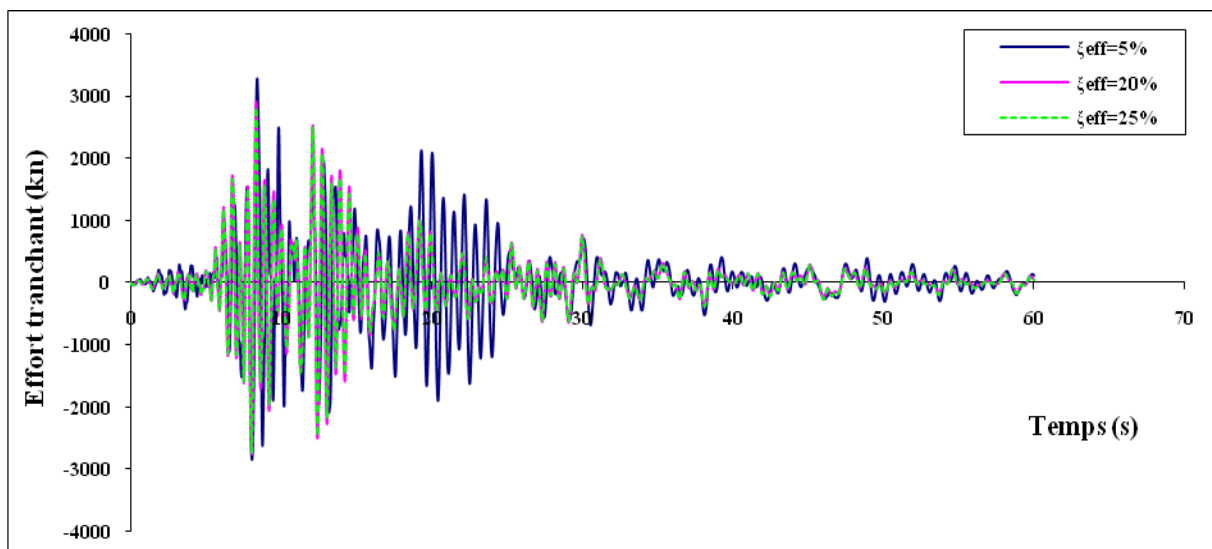


b)

Figure 4.22 : Comparaison des efforts tranchants à la base pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique d'El Centro : a) sens X, b) sens Y



a)



b)

Figure 4.23 : Comparaison des efforts tranchants à la base pour différents taux d'amortissement effectif sous l'excitation sismique de Loma Prieta : a) sens X, b) sens Y.

Les figures 4.22 et 4.23 représentent la variation de l'effort tranchant à la base de la structure pour différents taux d'amortissement effectif. On remarque que les efforts tranchants à la base diminuent avec l'augmentation de l'amortissement effectif de la structure. Le tableau 4.3 présente ces résultats avec plus de détails, qui illustrent le pourcentage de réduction de l'effort tranchant pour chaque amortissement effectif.

Excitation	Direction	Structure sans amortisseur	Structure avec amortissement supplémentaire de 15%		Structure avec amortissement supplémentaire de 20%	
		$\xi_{eff} = 5\% x$	$\xi_{eff} = 20\%$	Réduction (%)	$\xi_{eff} = 25\%$	Réduction (%)
El-Centro	X	5700.85	3628.59	36.35	3528.17	38.11
	Y	5218.51	4345.01	16.74	4297	17.66
Loma-Prieta	X	10947.81	4977.13	54.54	4924.95	55.01
	Y	3222.77	2862.24	11.19	2782.58	13.66

Tableau 4.3 : Pourcentages de réduction des efforts tranchants à la base pour différents taux d'amortissement effectif.

Du tableau 4.3 Comme on s'y attendait, les meilleures performances sont obtenues pour un taux d'amortissement de 25%, bien que le cas de taux d'amortissement effectif de 20% entraîne une réduction importante de la réponse. Les résultats du tableau sont traduits dans les graphes sur la figure 4.24.

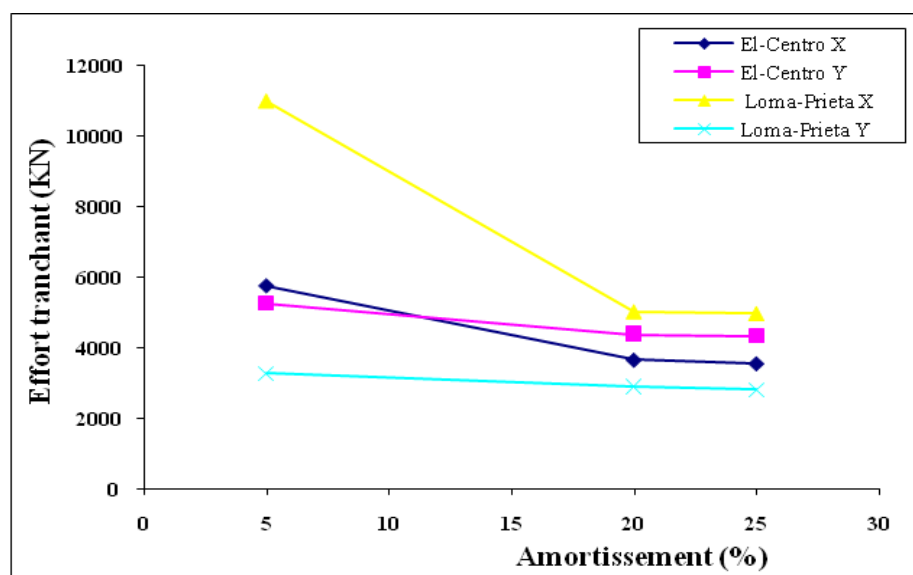


Figure 4.24 : Effet de la variation du taux d'amortissement du dissipateur à fluide visqueux sur l'effort tranchant à la base sous différents enregistrements sismiques.



### 4.7.1.6 Comportement hystérétique

Le comportement hystérétique d'un amortisseur est décrit par une boucle d'hystérésis (courbe fermée) qui montre la relation effort-déplacement. La surface ou l'aire de la boucle présente l'énergie absorbée par le dissipateur d'énergie. Pour illustrer cette dissipation, on a tracé les boucles d'hystérésis de l'amortisseur à fluide visqueux dans les niveaux 3 et 5 sous les deux excitations sismiques dans la direction X et pour les taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  et  $\xi_{eff}=25\%$ .

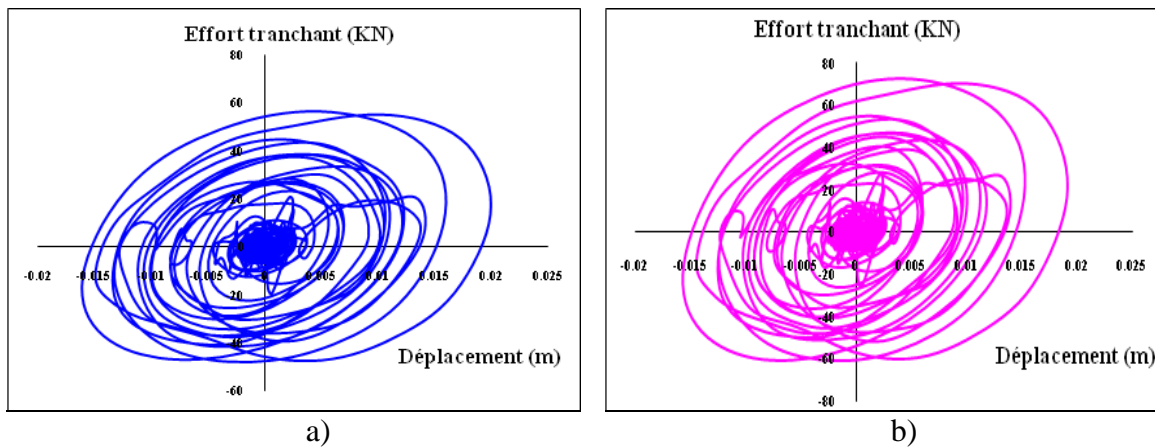


Figure 4.25 : Boucles hystérétiques du 3<sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, a)  $\xi_{eff}=20\%$  et b)  $\xi_{eff}=25\%$ .

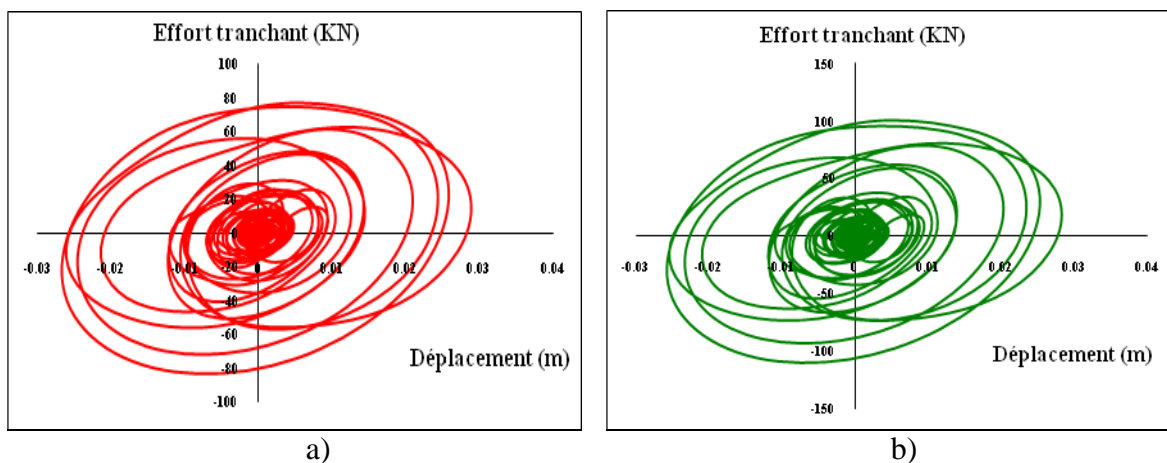


Figure 4.26 : Boucles hystérétiques du 3<sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour a)  $\xi_{eff}=20\%$  et b)  $\xi_{eff}=25\%$ .

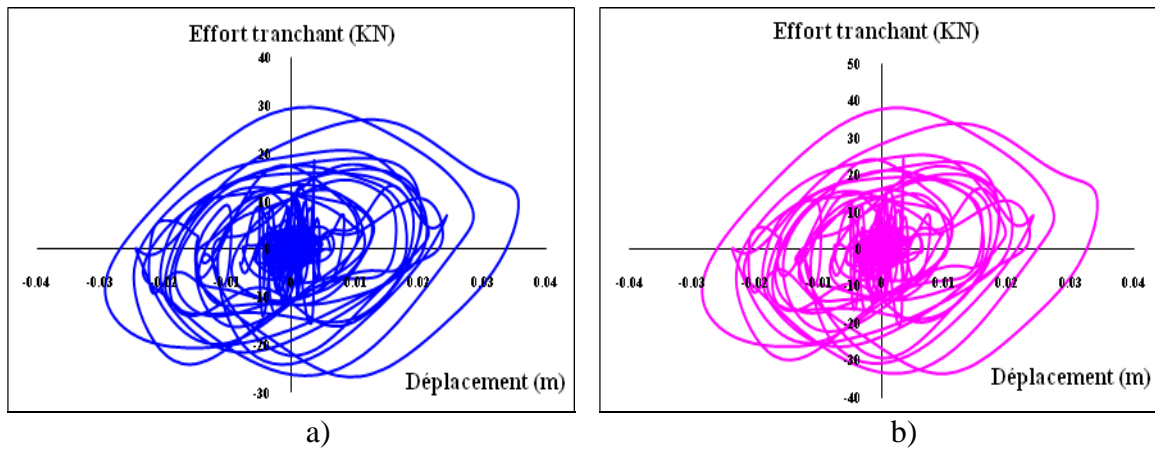


Figure 4.27 : Boucles hystérétiques du 5<sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour a)  $\xi_{eff}=20\%$  et b)  $\xi_{eff}=25\%$ .

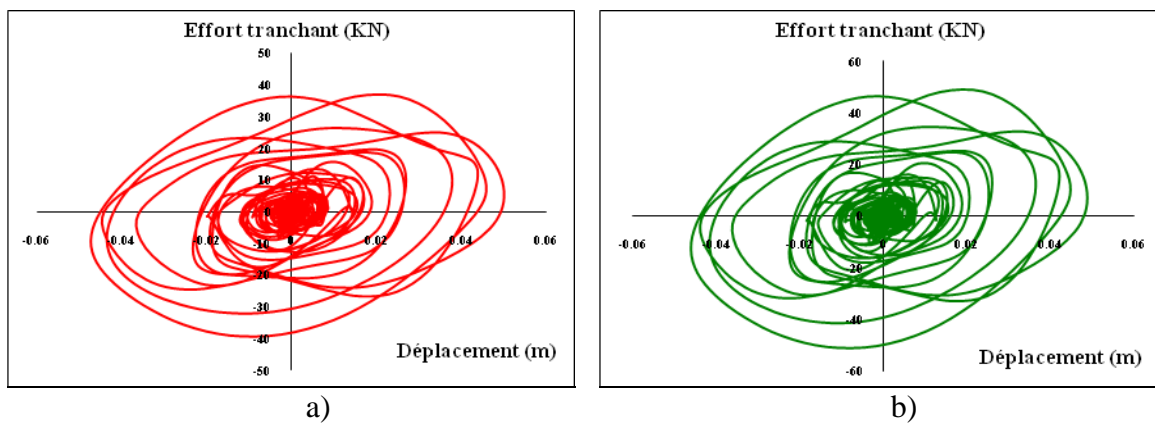


Figure 4.28 : Boucles hystérétiques du 5<sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour a)  $\xi_{eff}=20\%$  et b)  $\xi_{eff}=25\%$ .

L'efficacité de l'amortisseur est clairement illustrée dans les boucles d'hystérésis présentées dans les figures (4.25, 4.26, 4.27, 4.28) (les boucles montrent clairement le comportement linéaire du dispositif). En outre, on peut noter à partir des surfaces de dissipation d'énergie que celles d'un taux d'amortissement de 25% sont plus grandes que celles d'un taux d'amortissement de 20%, d'où on conclut que les surfaces augmentent avec l'augmentation du taux d'amortissement du dissipateur d'énergie, ainsi que les dissipateurs d'énergie sous le séisme de Loma-Prieta dissipent plus d'énergie que sous le séisme d'El-Centro.

4.7.2 Structure à dix niveaux

4.7.2.1 Déplacements

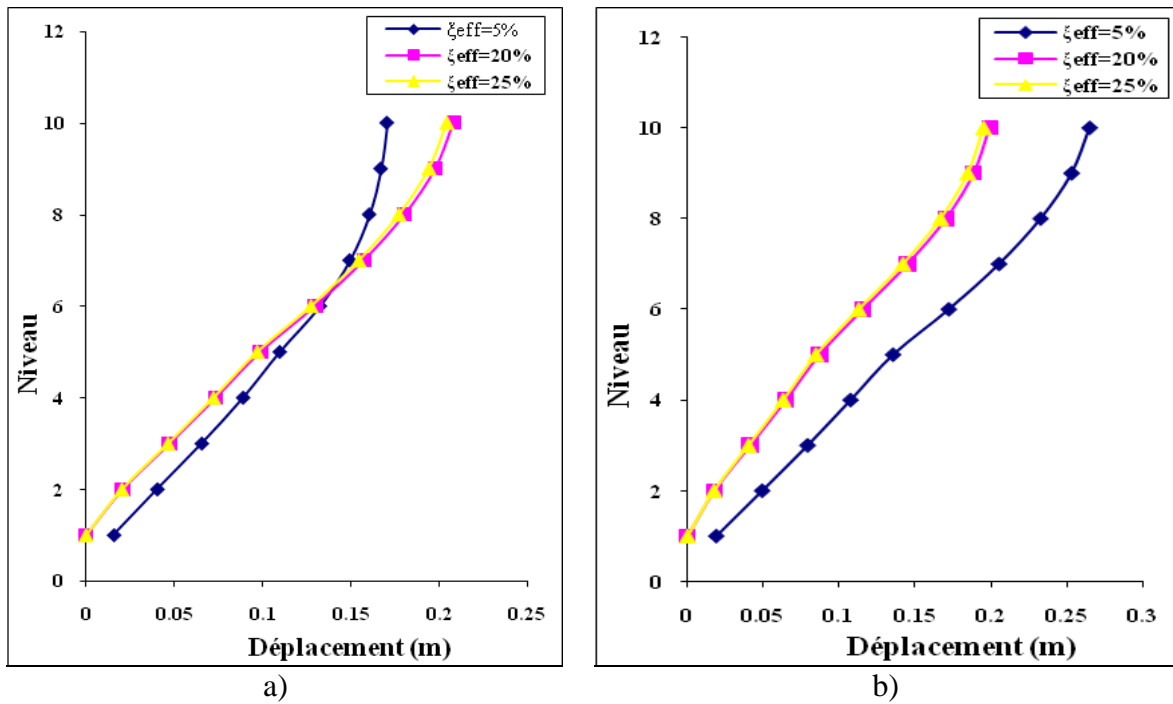


Figure 4.29 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif Sous le séisme d'El-Centro: a) sens X, b) sens Y

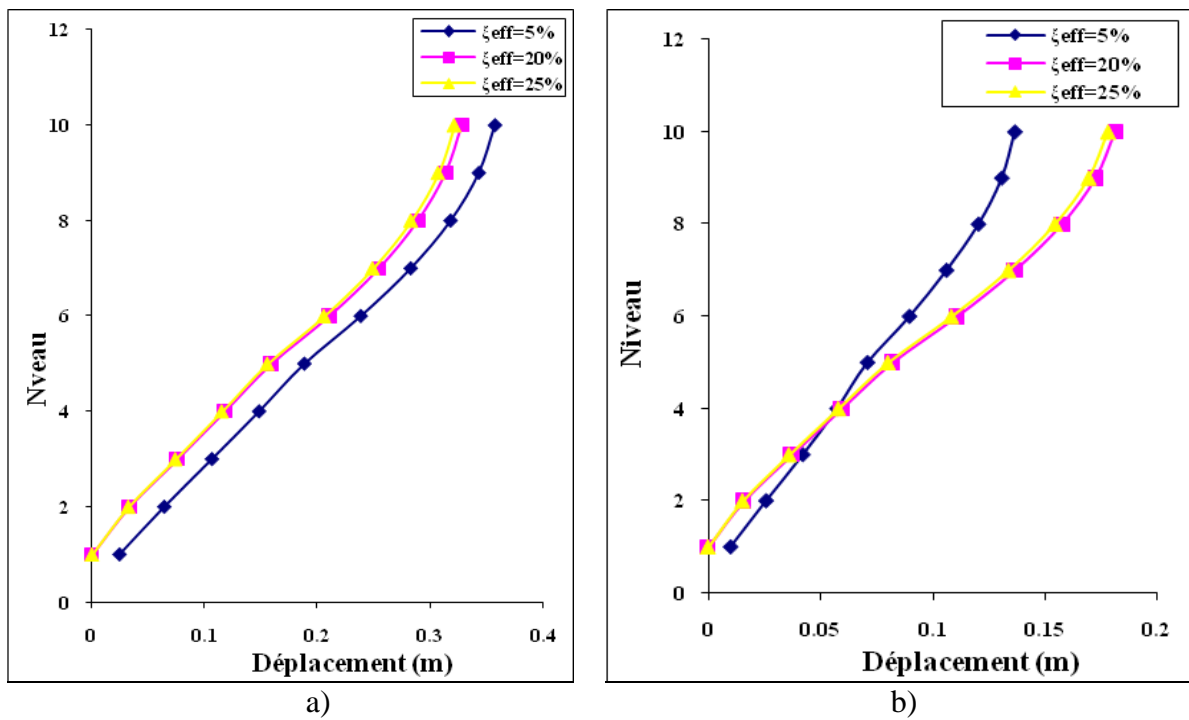


Figure 4.30 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif Sous le séisme de Loma-Prieta : a) sens X, b) sens Y

D'après ces figures qui représentent les déplacements des différents niveaux de la structure en fonction de la variation du taux d'amortissement effectif. On remarque que, sous les excitations, d'El-Centro dans la direction Y et Loma-Prieta dans la direction X, l'amortissement supplémentaire a donné son efficacité pour la réduction du déplacement.

Cette réduction a atteint sous El-Centro Y au premier niveau, 100% pour un amortissement effectif de 20% et 25%. Dans le dernier niveau, elle a atteint 25.03% pour  $\xi_{eff}=20\%$  et 26.37% pour  $\xi_{eff}=25\%$ .

Sous la composante de Loma-Prieta X, la réduction au premier niveau a atteint 99.99% pour des amortissements effectifs de 20% et 25% ; et au 10<sup>ème</sup> niveau, elle a atteint 8.26% pour  $\xi_{eff}=20\%$  et 9.99% pour  $\xi_{eff}=25\%$ .

Mais par contre sous le séisme d'El-Centro dans la direction X, on constate que les courbes correspondants aux taux d'amortissement effectif de 20% et 25% se croisent avec celles du  $\xi_{eff}=5\%$  à partir du 7<sup>ème</sup> niveau jusqu'au 10<sup>ème</sup> niveau. Ce qui signifie que les déplacements augmentent au lieu de se diminuer, ce qui signifie que l'amortisseur n'a pas joué son rôle pour les deux taux d'amortissement.

Pour Loma-Prieta Y, l'augmentation du déplacement s'est produite à partir du 4<sup>ème</sup> niveau jusqu'au 10<sup>ème</sup> niveau.

Pour résoudre ce problème, on a proposé d'augmenter l'amortissement supplémentaire à une valeur de  $\xi=30\%$  et de cela l'amortissement effectif sera  $\xi_{eff}=35\%$ . Les déplacements de cette proposition sont illustrés dans les figures ci-dessous.

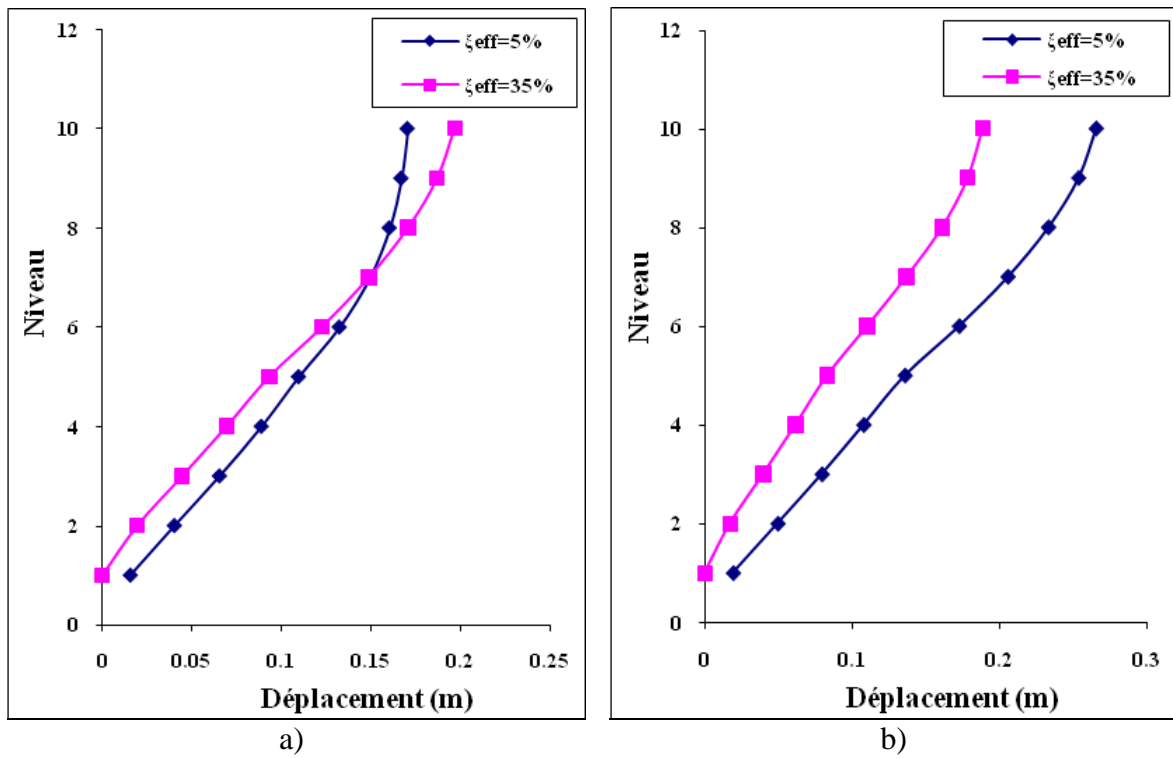


Figure 4.31 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour  $\xi_{eff}=5\%$  et  $\xi_{eff}=35\%$  Sous le séisme d'El-Centro : a) sens X, b) sens Y

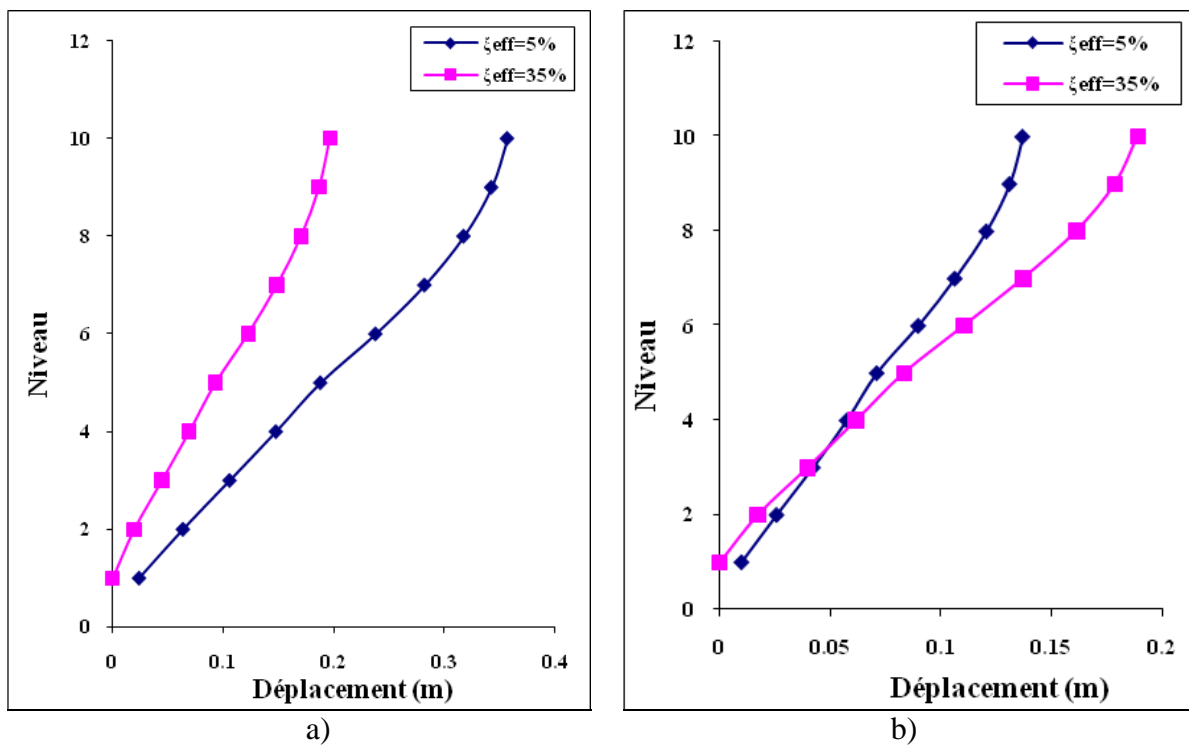


Figure 4.32 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour  $\xi_{eff}=5\%$  et  $\xi_{eff}=35\%$  sous le séisme de Loma-Prieta : a) sens X, b) sens Y

Sous le séisme d'El-Centro, malgré que le pourcentage de réduction des déplacements dans le sens X a atteint 29% et 29.65% pour les deux derniers niveaux (respectivement 10 et 9), la courbe de  $\xi_{eff}=35\%$  se croise avec celle sans dissipateur ( $\xi_{eff}=5\%$ ) à partir du 8<sup>ème</sup> niveau ce qui traduit l'augmentation des déplacements pour l'amortissement effectif  $\xi_{eff}=35\%$  par rapport à celles de  $\xi_{eff}=5\%$ .

Sous le séisme de Loma-Prieta suivant le sens X, le pourcentage de réduction au dernier niveau remonte de 9.98% pour  $\xi_{eff}=25\%$  à 44.92% pour  $\xi_{eff}=35\%$  ce qui exprime une élévation importante du pourcentage de réduction.

Mais sous le séisme de Loma-Prieta suivant le sens Y, malgré notre augmentation de l'amortissement effectif, les déplacements pour  $\xi_{eff}=35\%$  sont plus grands que ceux de  $\xi_{eff}=5\%$  à partir du 4<sup>ème</sup> niveau.

On conclut que ce n'est pas qu'en augmentant le pourcentage d'amortissement du dissipateur, on assure le bon déplacement et la stabilité de la structure. Pour arriver à des résultats acceptables, on a examiné plusieurs structures avec différents emplacements des dissipateurs. Dans ce travail on a choisi deux structures (les plus acceptables) pour les présenter, les vues en 3D et les coupes des deux structures proposées sont présentées ci-dessous. Quelques structures qui n'ont pas donné de bons résultats seront présentées dans l'annexe.

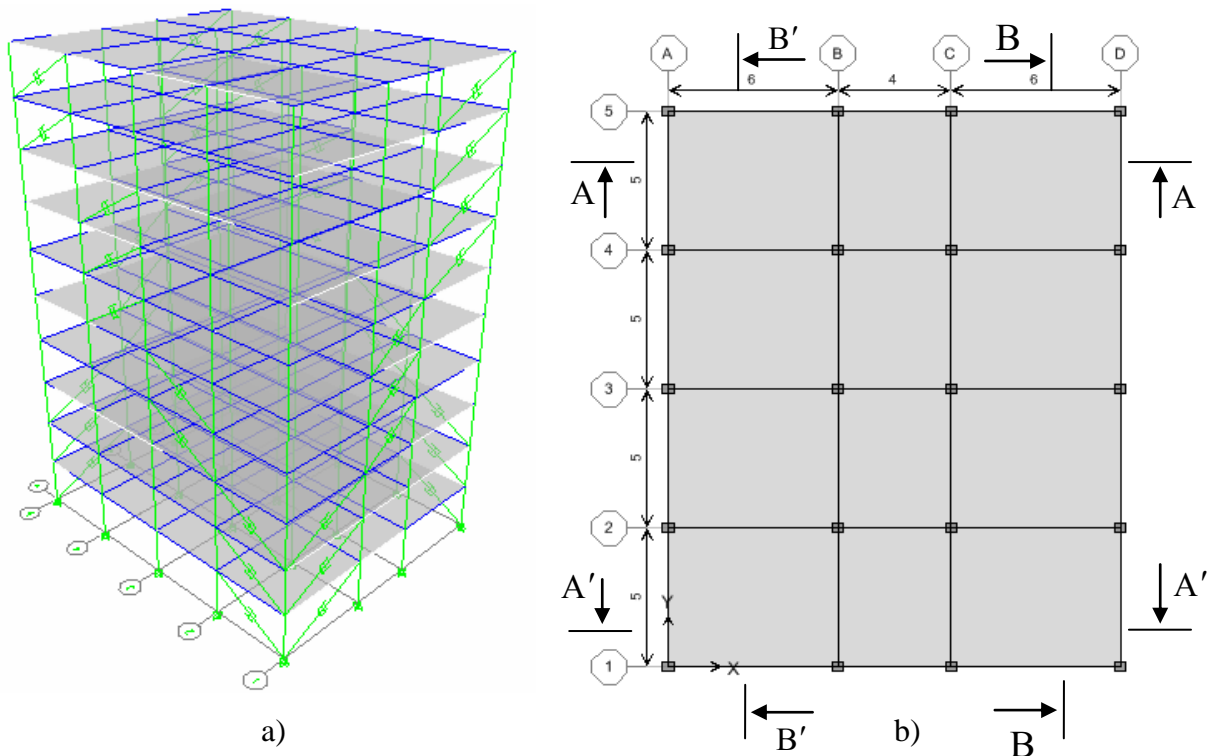


Figure 4.33 : Deuxième proposition de la structure : a) vue en 3D b) vue en plan

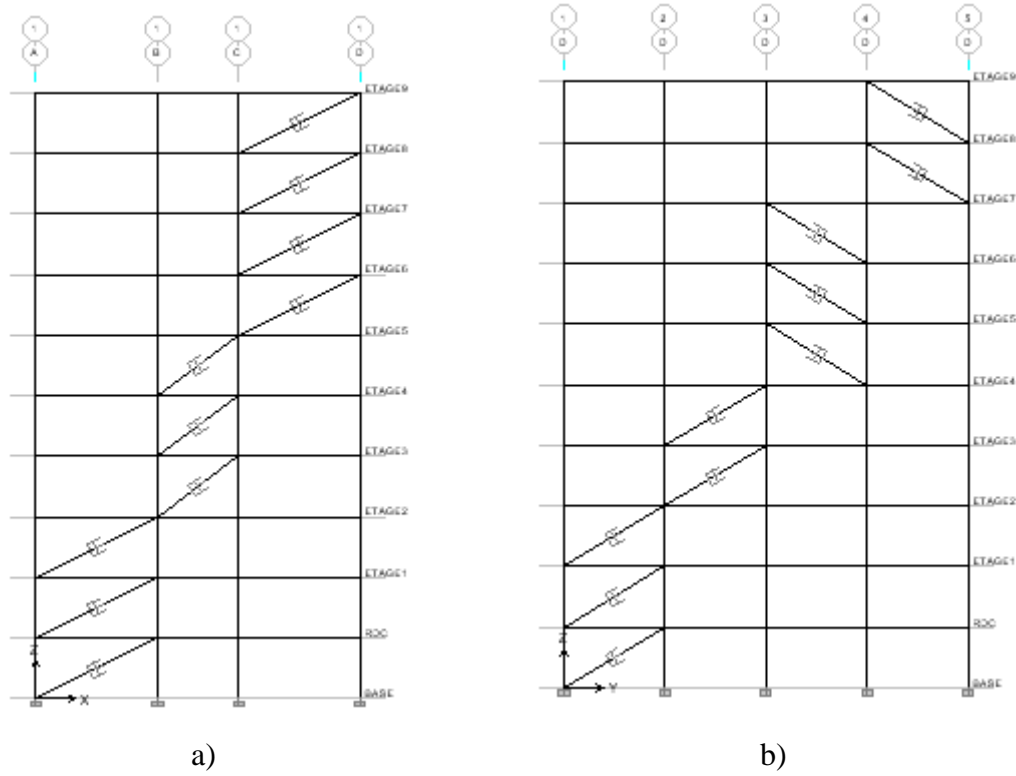


Figure 4.34 : Coupes du deuxième proposition de la structure : a) Coupes A-A et A'-A' b) Coupe B-B et B'-B'

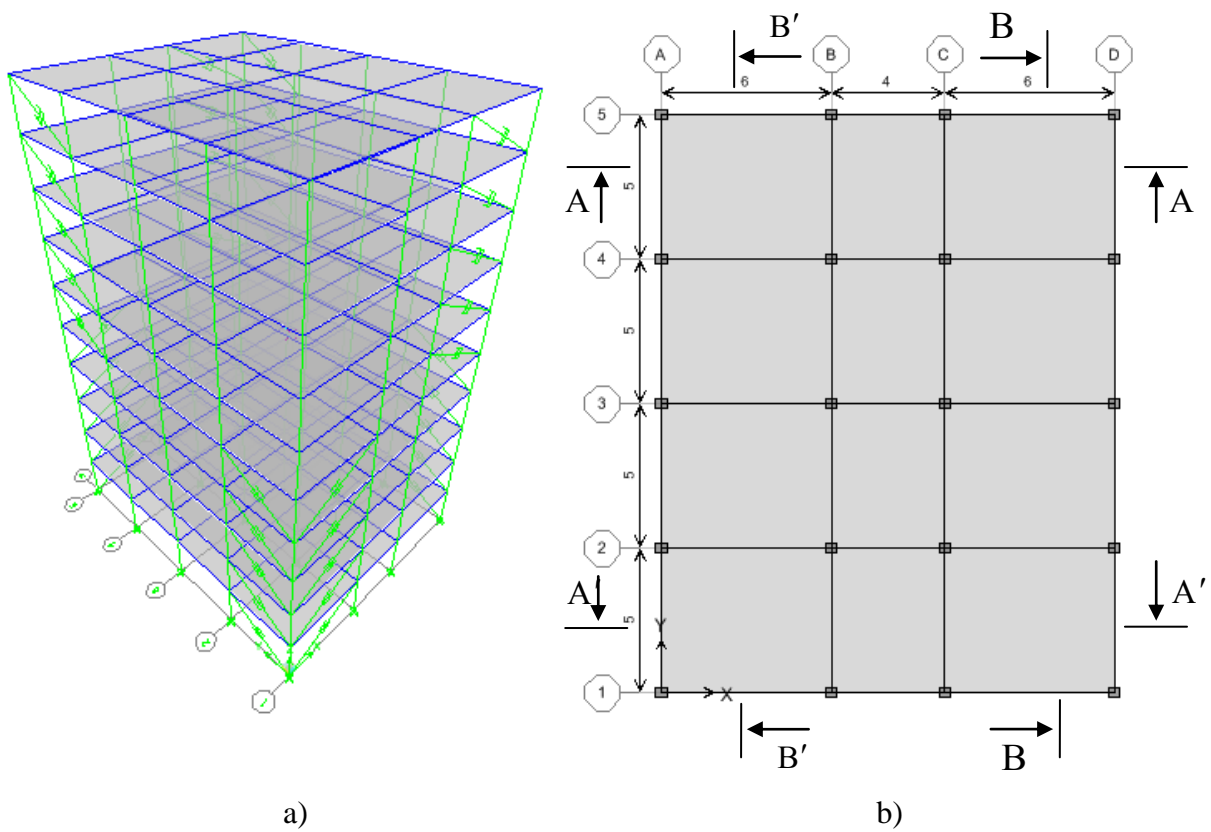


Figure 4.35 : Troisième proposition de la structure : a) vue en 3D b) vue en plan

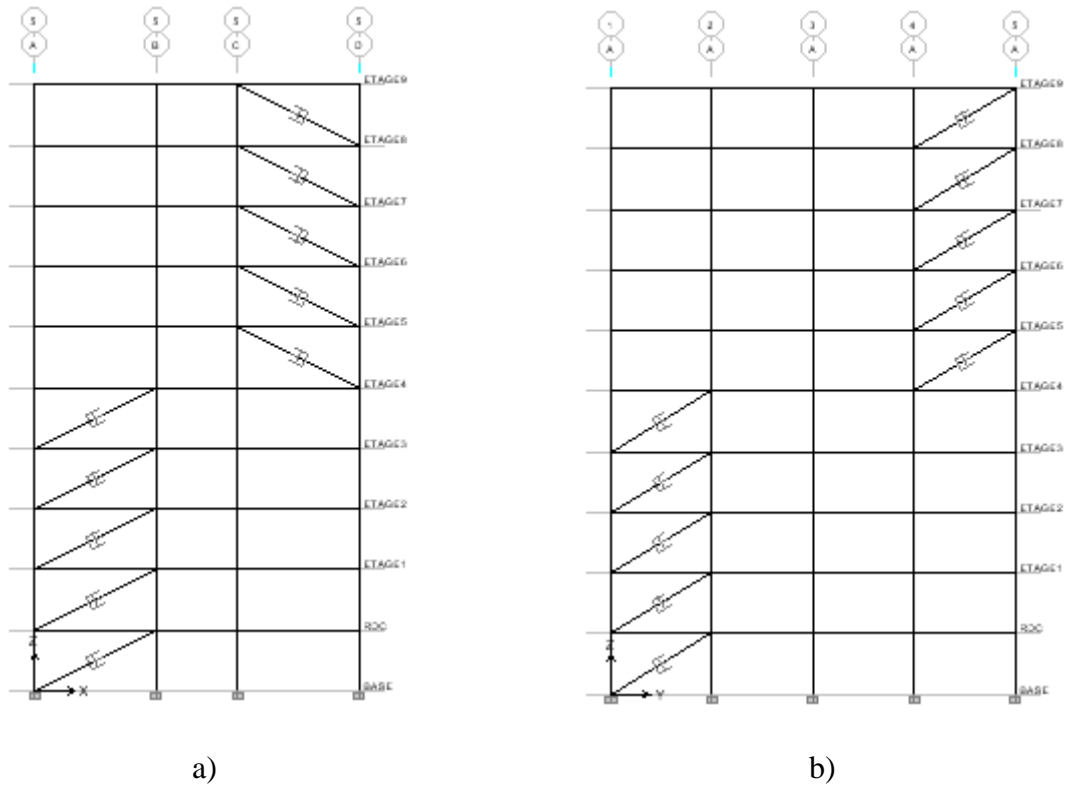


Figure 4.36 : Coupes du Troisième proposition de la structure : a) Coupes A-A et A'-A' b) Coupe B-B et B'-B'

➤ Déplacements de la deuxième proposition

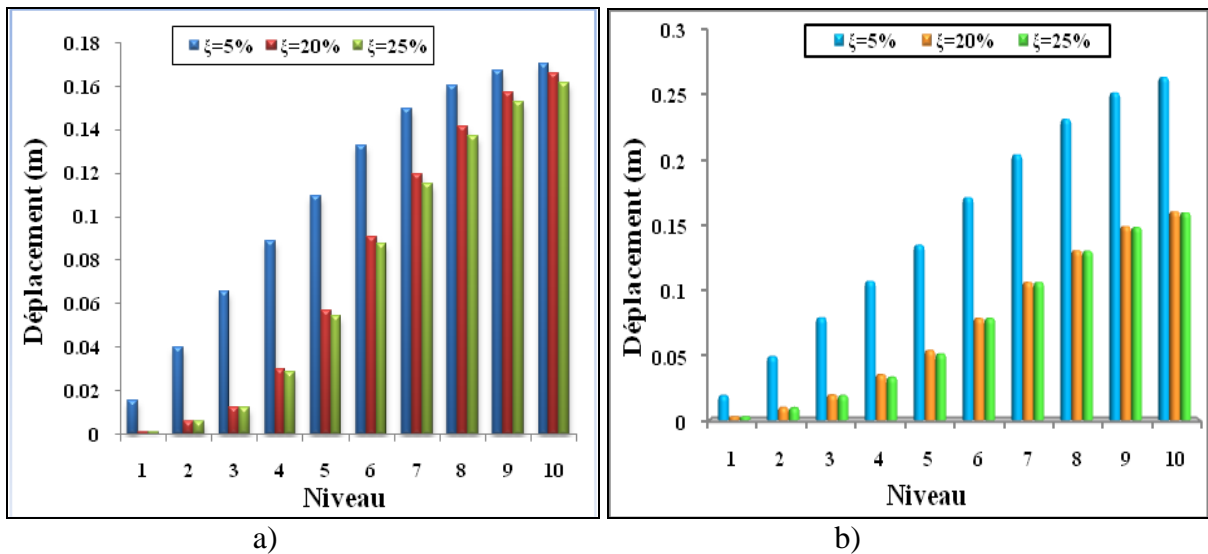


Figure 4.37 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif Sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y



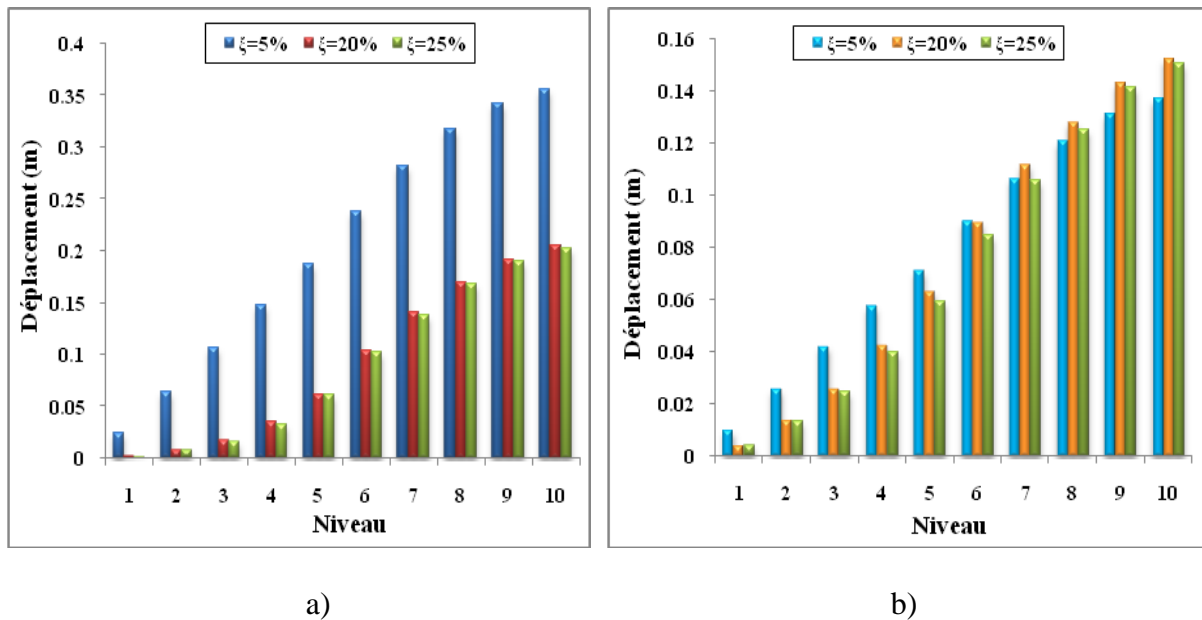


Figure 4.38 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens

D'après les figures 4.37 et 4.38 on remarque que :

Sous les deux composantes d'El-Centro suivant l'axe X et Y, les déplacements de tous les niveaux sont diminués avec une variation de pourcentage de réduction. Le plus grand pourcentage de réduction du dernier niveau est celui de la composante d'El-Centro Y où il a atteint 39,13% pour un taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  et 39,47% pour  $\xi_{eff}=25\%$ , la plus faible réduction et celle de la composante d'El-Centro X d'un pourcentage de réduction de 2,57% pour  $\xi_{eff}=20\%$ .

Pour l'excitation du séisme de Loma-Prieta suivant X, les déplacements de tous les niveaux diminuent d'une manière significative, le dernier niveau a atteint une réduction de 42,56% pour  $\xi_{eff}=20\%$  et 43,31% pour  $\xi_{eff}=25\%$ .

La composante de Loma-Prieta Y, donne une diminution des déplacements du 1<sup>er</sup> niveau jusqu'au 7<sup>ème</sup> niveau pour  $\xi_{eff}=20\%$  et jusqu'au 8<sup>ème</sup> niveau pour  $\xi_{eff}=25\%$ , mais les déplacements des autres niveaux augmentent, la figure 4.38 b) illustre cette variation.

➤ Déplacements de la troisième proposition

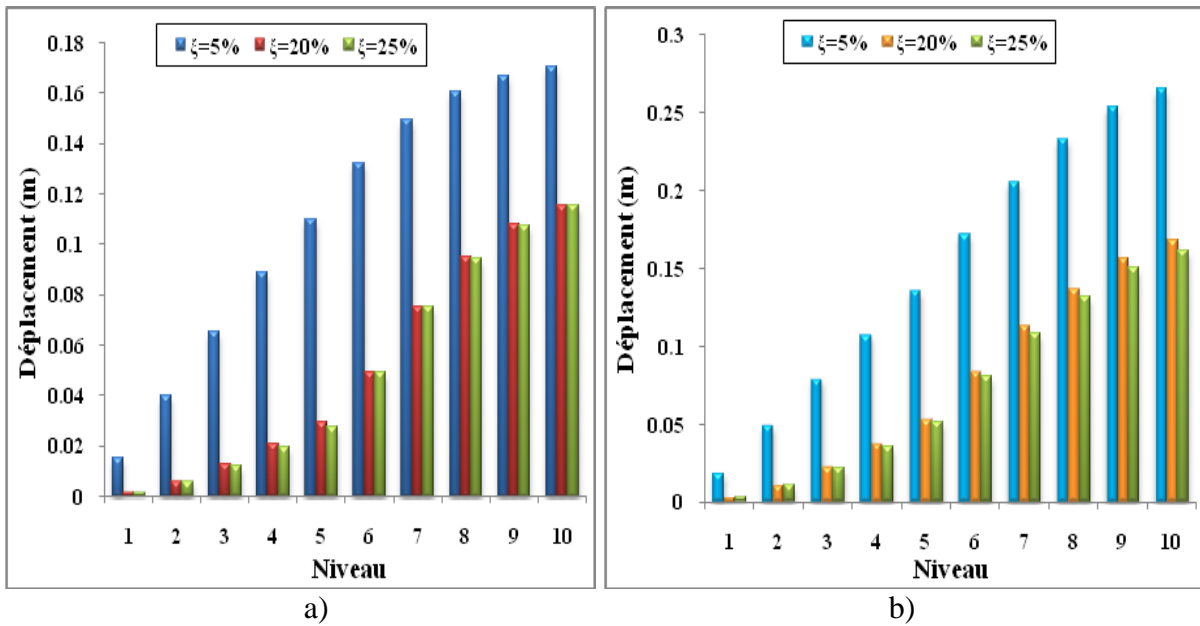


Figure 4.39 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif Sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y

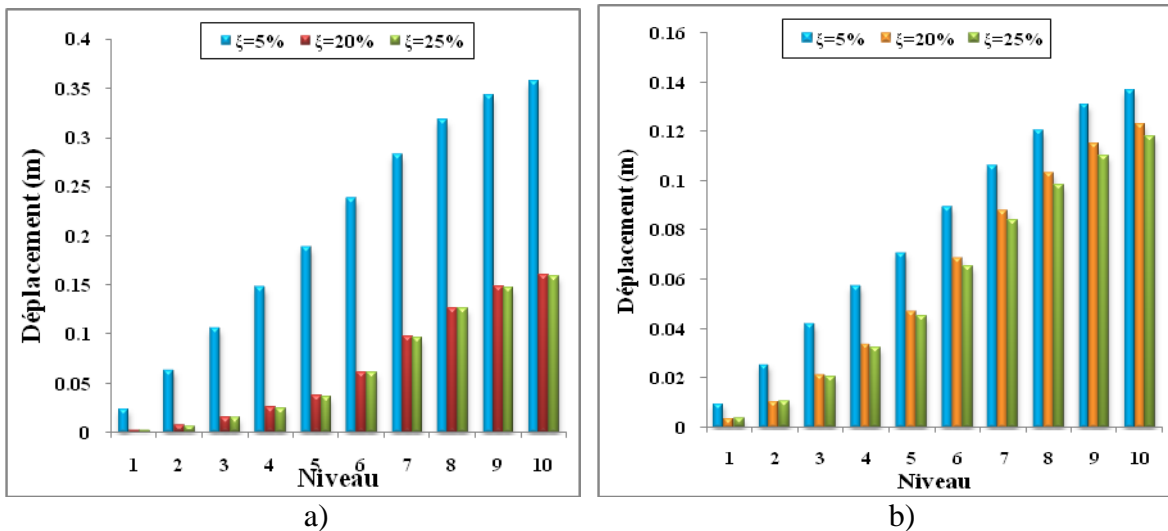


Figure 4.40 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y

Les figures 4.39 et 4.40 présentent la variation des déplacements de la troisième proposition de la structure sous les deux composantes d'El-Centro et de Loma-Prieta, où les déplacements diminuent sous toutes les excitations sismiques.

Pour la composante d'El-Centro X, le pourcentage de réduction du dernier niveau a atteint 32,12% pour  $\xi_{eff}=20\%$  et 32,29% pour  $\xi_{eff}=25\%$ , tandis que Pour la composante d'El-Centro Y le pourcentage de réduction du dernier niveau a atteint 36,70% pour  $\xi_{eff}=20\%$

et 39,11% pour  $\xi_{eff}=25\%$ . Le déplacement du premier niveau a atteint un pourcentage de réduction maximal de 89,71% par l'amortissement effectif  $\xi_{eff}=25\%$  sous la composante d'El-Centro X.

Sous l'excitation de Loma-Prieta, le pourcentage de réduction maximale du dernier niveau est de 55,48%, atteint par l'amortissement effectif  $\xi_{eff}=25\%$  sous la composante X.

- **Déplacement du dernier niveau**

Etant donné que le déplacement maximal est celui du dernier niveau, on a pris ce niveau pour montrer l'effet de l'emplacement du dissipateur à fluide visqueux dans les trois structures. Le tableau suivant présente une comparaison des déplacements entre la structure avec et sans dissipateur pour les trois propositions de distribution de dissipateur pour un taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$ . D'après ce tableau on conclut que la troisième proposition donne la meilleure diminution de déplacements.

Excitations Structures	El-Centro		Loma-Prieta	
	X	Y	X	Y
Sans dissipateurs	0.170459	0.265281	0.356664	0.136791
1 <sup>ère</sup> proposition	0.208075	0.198884	0.327197	0.18152
2 <sup>ème</sup> proposition	0.166075	0.161482	0.204874	0.152059
3 <sup>ème</sup> proposition	0.11573	0.167929	0.160209	0.122937

Tableau 4.4 : Effet de l'emplacement des dissipateurs sur le déplacement du dernier niveau pour un taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  sous différents enregistrements sismiques.

#### 4.7.2.2 Efforts tranchants à la base

Pour illustrer l'effet de l'emplacement des dissipateurs sur les efforts tranchants à la base, nous présentons l'histogramme suivant pour un taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$ . On constate que la deuxième proposition présente une réduction significative sous les deux composantes d'El-Centro et la composante de Loma-Prieta X, mais sous la composante de Loma-Prieta Y, l'effort tranchant augmente. Les valeurs des efforts tranchants des différentes propositions et sous toutes les excitations sont illustrées dans le tableau 4.5.

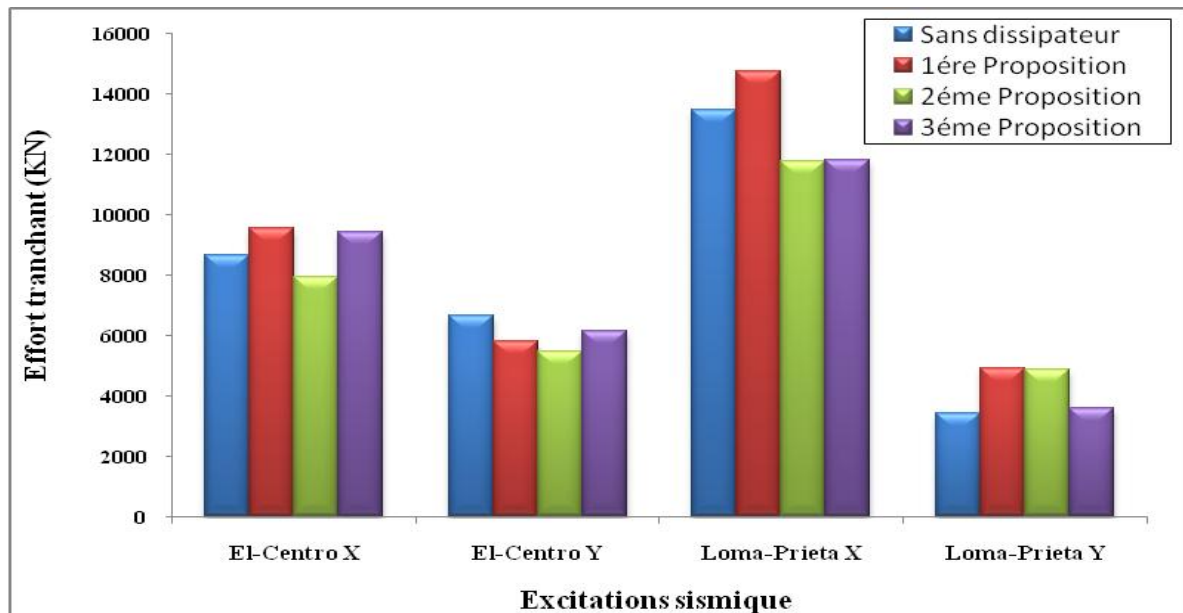


Figure 4.41 : Effet de l'emplacement des dissipateur sur les efforts tranchants à la base pour un taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  sous différents enregistrements sismiques.

Excitations Structures	El-Centro		Loma-Prieta	
	X	Y	X	Y
Sans dissipateurs	8637	6649	13470	3436
1 <sup>ère</sup> proposition	9562	5814	14760	4903
2 <sup>ème</sup> proposition	7910	5482	11780	4846
3 <sup>ème</sup> proposition	9437	6134	11790	3573

Tableau.4.5 : Effet de l'emplacement des dissipateurs sur les efforts tranchant à la base pour un taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  sous différents enregistrements sismiques.

#### 4.7.2.3 Comportement hystérétique

Pour illustrer le comportement hystérétique des dissipateurs d'énergie à fluide visqueux et pour montrer où la dissipation d'énergie est plus élevée pour les deux structures proposées on a tracé les boucles d'hystérésis du 1<sup>er</sup>, du 5<sup>ème</sup> et du 10<sup>ème</sup> niveau de chacune, sous les deux excitations sismique dans la direction X pour un taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$ .

1<sup>er</sup> niveau

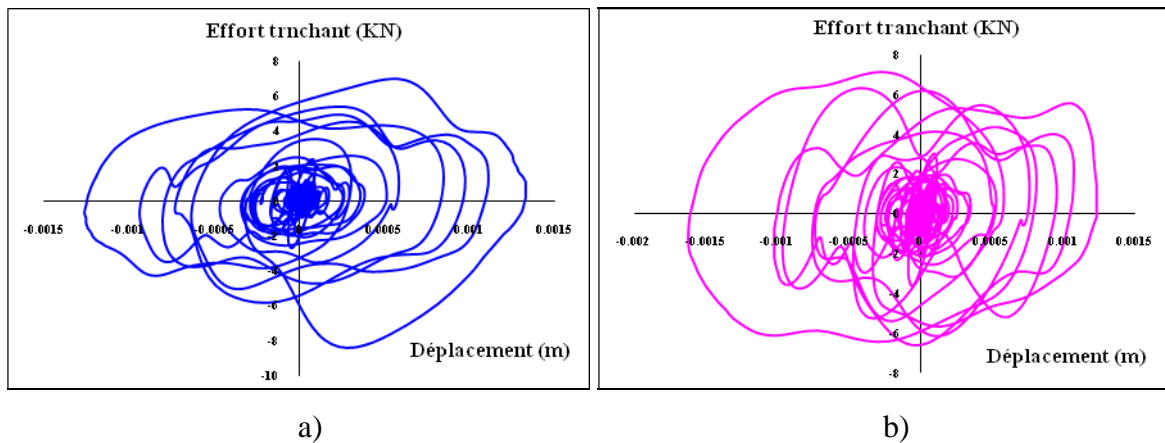


Figure 4.42 : Boucles hystérétiques du 1<sup>er</sup> niveau sous le séisme d’El-Centro suivant l’axe X, pour  $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2<sup>ème</sup> proposition b) 3<sup>ème</sup> proposition

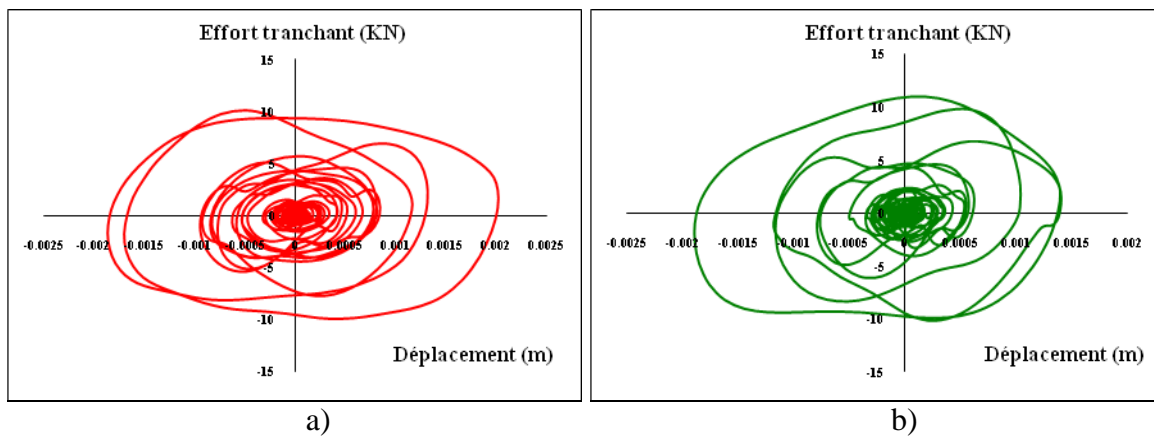


Figure 4.43 : Boucles hystérétiques du 1<sup>er</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l’axe X, pour  $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2<sup>ème</sup> proposition b) 3<sup>ème</sup> proposition

5<sup>ème</sup> niveau

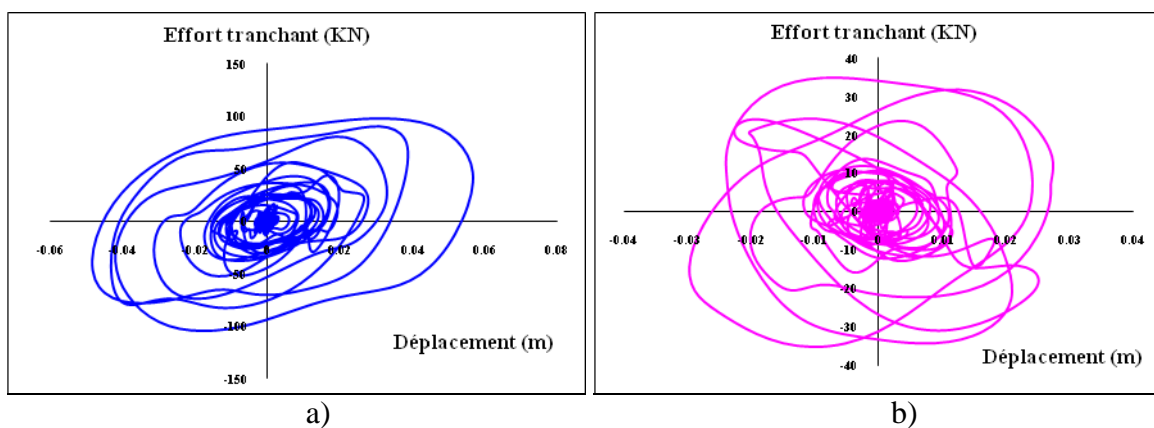


Figure 4.44 : Boucles hystérétiques du 5<sup>ème</sup> niveau sous le séisme d’El-Centro suivant l’axe X, pour  $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2<sup>ème</sup> proposition b) 3<sup>ème</sup> proposition

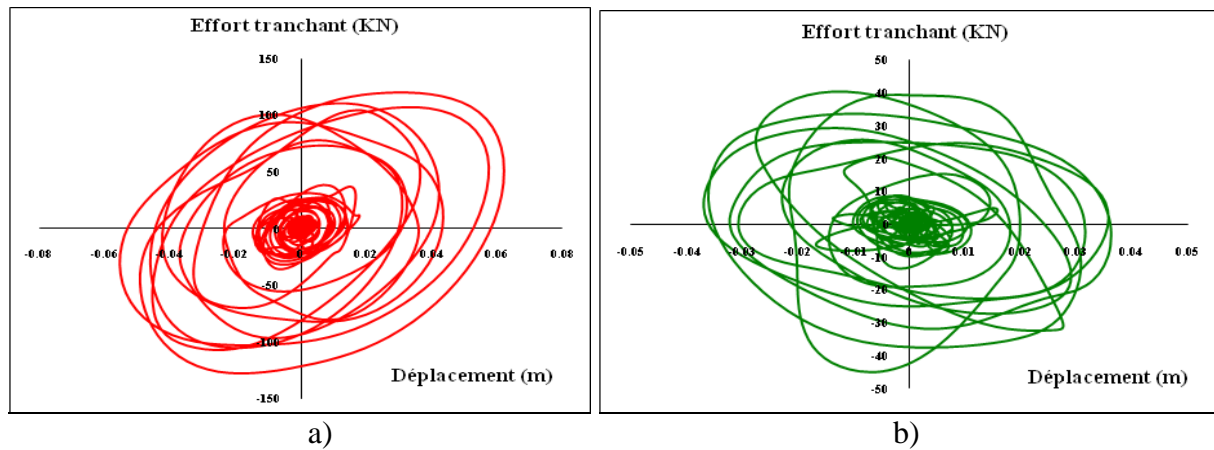


Figure 4.45 : Boucles hystérétiques du 5<sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour  $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2<sup>ème</sup> proposition b) 3<sup>ème</sup> proposition.

10<sup>ème</sup> niveau

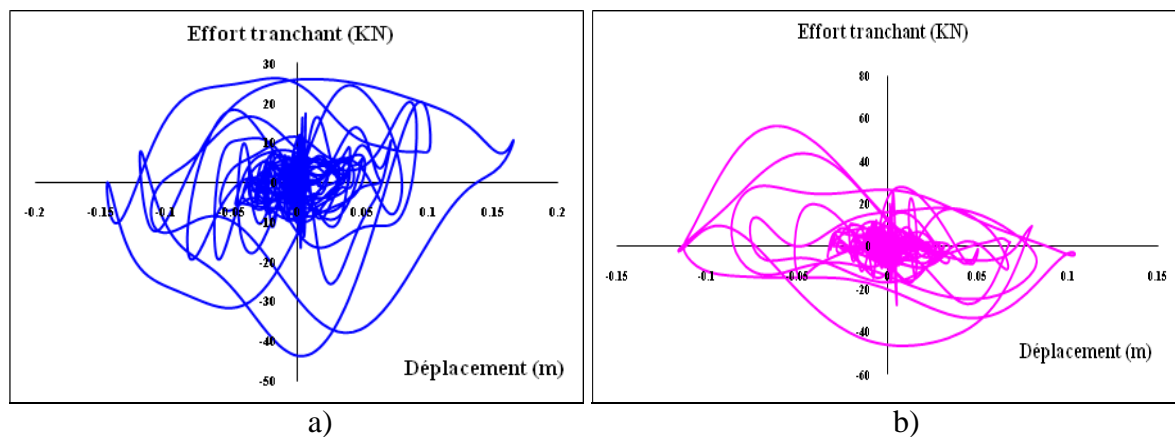


Figure 4.46 : Boucles hystérétiques du 10<sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour  $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2<sup>ème</sup> proposition b) 3<sup>ème</sup> proposition.

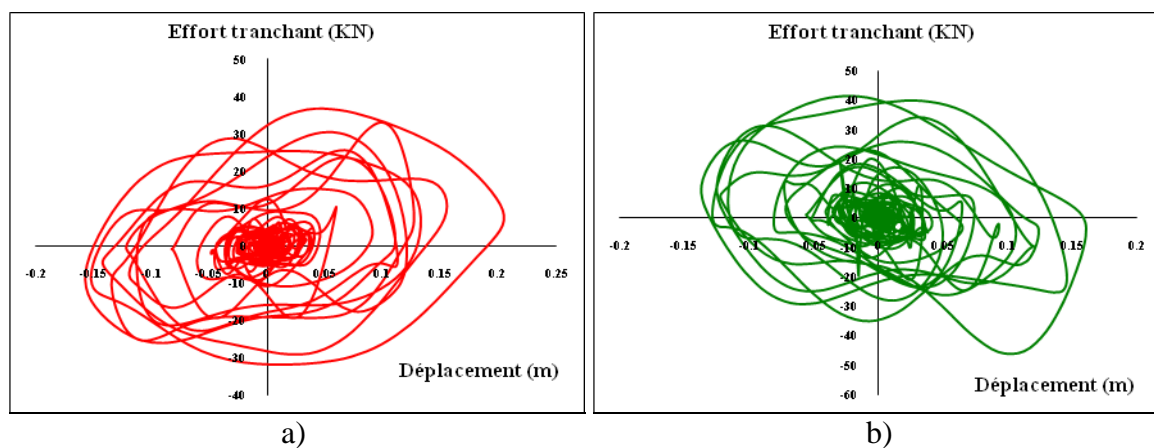


Figure 4.47 : Boucles hystérétiques du 10<sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour  $\xi_{eff}=20\%$ . a) 2<sup>ème</sup> proposition b) 3<sup>ème</sup> proposition.

D'après les figures précédentes, on constate que la deuxième proposition dissipe plus d'énergie que la troisième pour les deux excitations. Ainsi que les dissipateurs sous le séisme de Loma-Prieta dissipent plus d'énergie que sous El-Centro.

### 4.7.3 Structure à vingt niveaux

#### 4.7.3.1 Déplacements

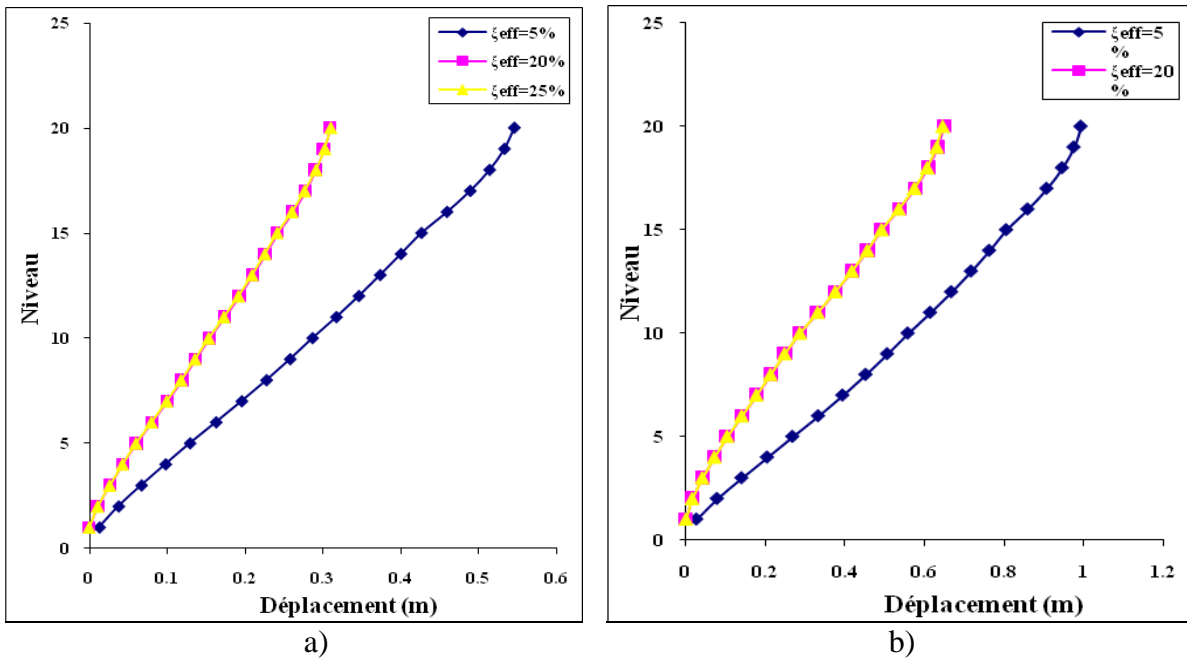


Figure 4.48 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y

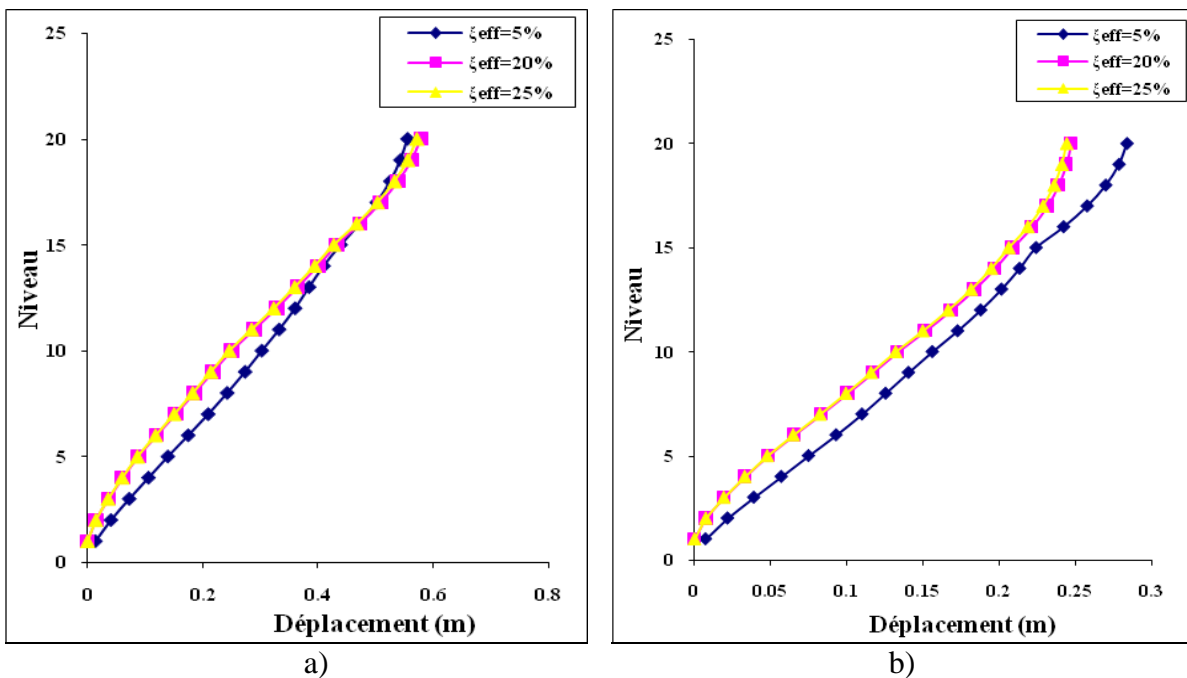


Figure 4.49 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y

L'étude des déplacements des différents niveaux de la structure nous ramène à ce qui suit :

Sous l'excitation d'El-Centro, pour la structure à vingt niveaux, on remarque que les résultats sont acceptables dans les deux sens X et Y où le pourcentage de réduction dans le sens X a atteint 99.98% au premier niveau pour les taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  et  $\xi_{eff}=25\%$ . Dans le dernier niveau, ce pourcentage a atteint 43.44% pour  $\xi_{eff}=20\%$  et 43,30% pour  $\xi_{eff}=25\%$ . Dans le sens Y le pourcentage de réduction a atteint 99.99% au premier niveau pour les taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  et  $\xi_{eff}=25\%$  et dans le dernier niveau, ce pourcentage a atteint 34.66% pour  $\xi_{eff}=20\%$  et 34,95% pour  $\xi_{eff}=25\%$ . On remarque que pour une même composante, les réductions pour  $\xi_{eff}=20\%$  et  $\xi_{eff}=25\%$  sont très proches.

Sous Loma-Prieta, on peut dire que les résultats dans le sens Y sont acceptables car on remarque la diminution du déplacement dans tous les niveaux pour les deux taux d'amortissement effectif, où le pourcentage de réduction a atteint 100% au premier niveau. Le meilleur pourcentage de réduction dans le dernier niveau est fourni par l'amortissement effectif  $\xi_{eff}=25\%$  qui a donné 14.1%. Mais sous la composante X, les résultats sont acceptables du 1<sup>er</sup> niveau jusqu'au 16<sup>ème</sup> niveau, où on remarque la diminution du déplacement après l'incorporation des dissipateurs. Du 17<sup>ème</sup> au 20<sup>ème</sup> niveau, après l'ajout des dissipateurs, les déplacements augmentent ce qui n'est pas acceptable, car on a intégré les dissipateurs pour qu'ils amortissent le mouvement de la structure et de ce fait diminuer les déplacements.

Pour arriver à des résultats acceptables, on a changé la distribution des amortisseurs à fluide visqueux dans la structure tel que présente la figure 4.50 a) et la figure 4.51.



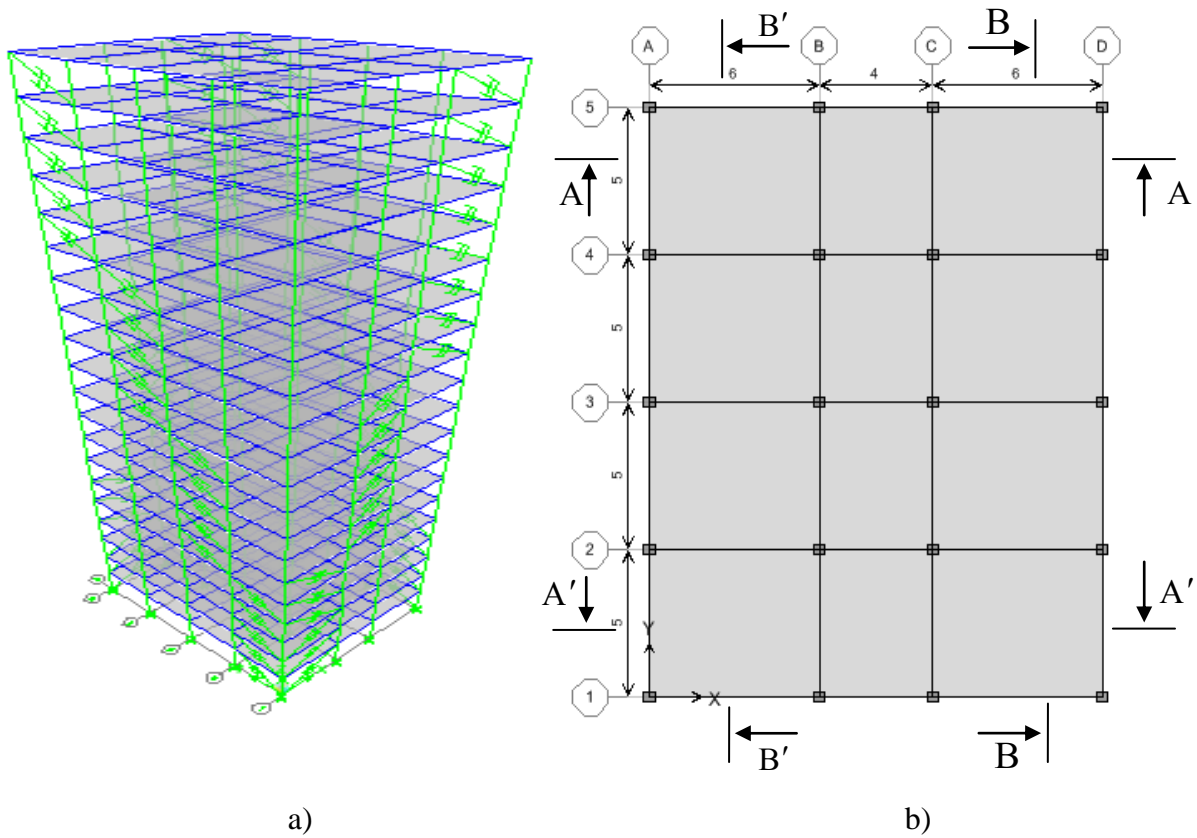


Figure 4.50 : La structure avec la nouvelle distribution de dissipateur :

a) Vue en 3D, b) vue en plan

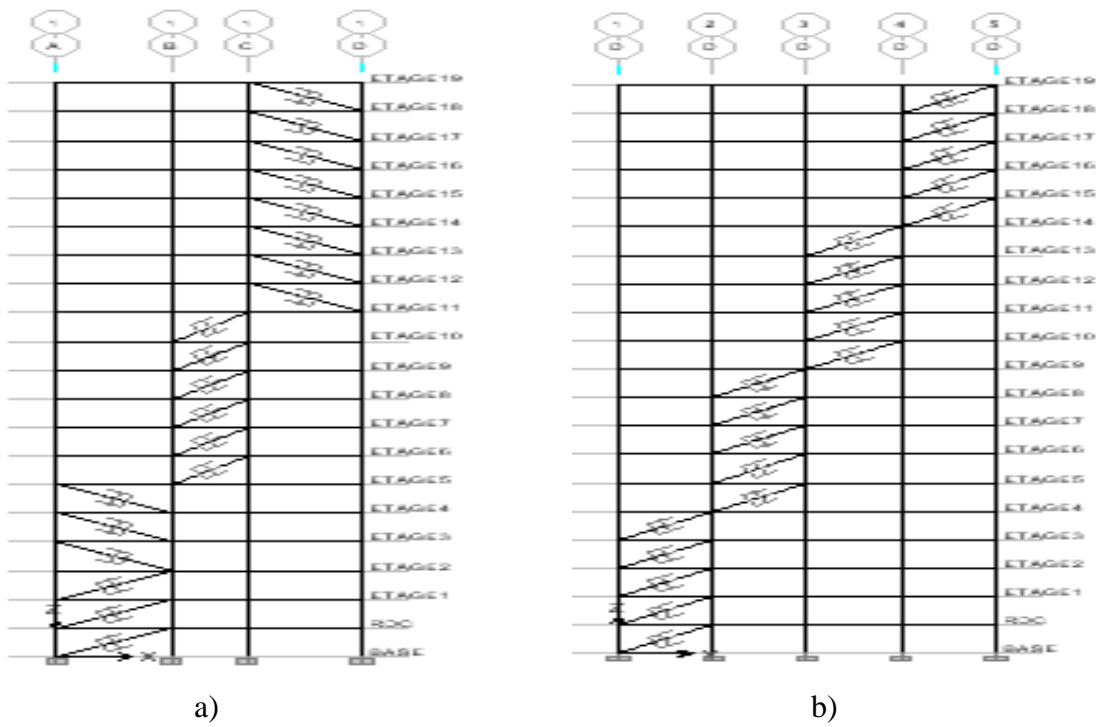


Figure 4.51 : Coupes de La structure avec la nouvelle distribution des dissipateurs :  
 a) Coupes A-A et A'-A', b) Coupe B-B et B'-B'

Après l'analyse de la nouvelle structure, on a obtenu les courbes illustrées dans les figures (4.52, 4.53) qui traduisent les déplacements de chaque niveau.

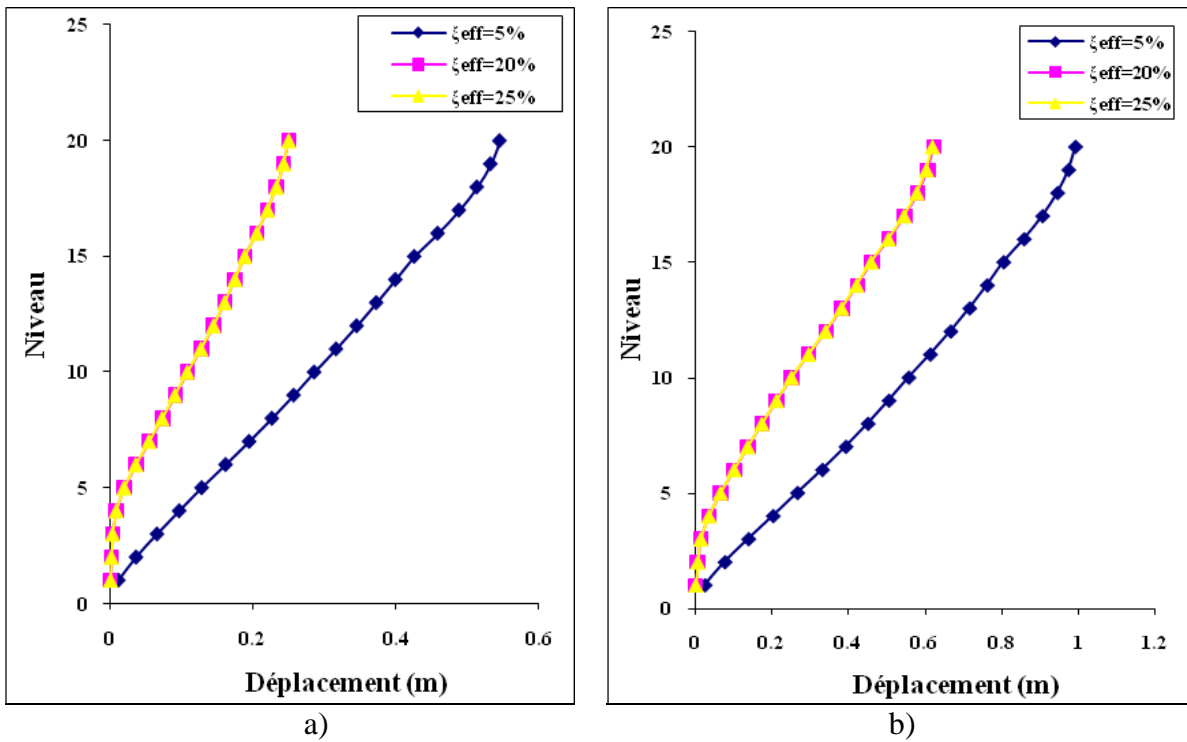


Figure 4.52 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y

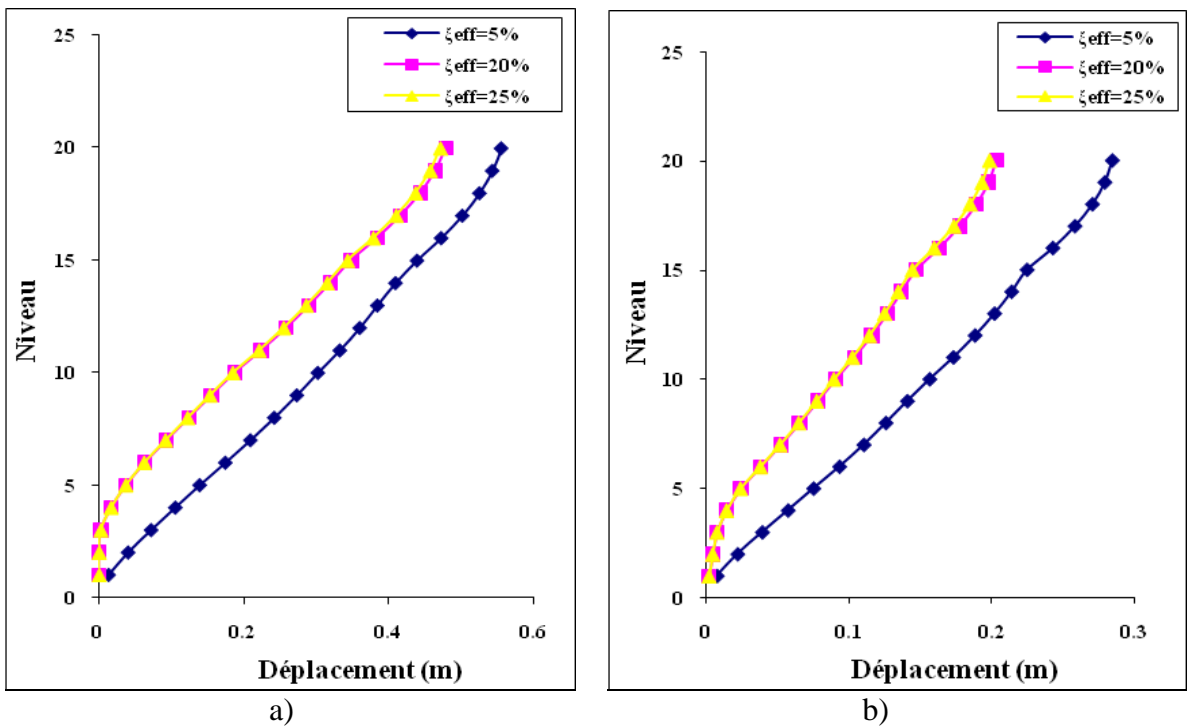


Figure 4.53 : Déplacements des différents niveaux de la structure pour différents taux d'amortissement effectif sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y

Ces figures (4.52, 4.53) montrent clairement que l'incorporation des amortisseurs à fluide visqueux dans la structure par cette nouvelle distribution réduit les déplacements (dans tous les niveaux) sous toutes les excitations sismiques.

Sous l'excitation d'El-Centro, le pourcentage de réduction dans le sens X a atteint 54.23% au dernier niveau pour le taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  et 54,13% pour  $\xi_{eff}=25\%$ . Dans le sens Y, le pourcentage de réduction dans le dernier niveau a atteint 37.28% pour le taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  et 37,66% pour  $\xi_{eff}=25\%$ .

Sous l'excitation de Loma-Prieta, le pourcentage de réduction dans le sens X a atteint 13.94% au dernier niveau pour le taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  et 15,14% pour  $\xi_{eff}=25\%$ . Dans le sens Y, le pourcentage de réduction dans le dernier niveau a atteint 28.52% pour le taux d'amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$  et 30,20% pour  $\xi_{eff}=25\%$ .

D'autre part, on remarque que les déplacements pour les différents taux d'amortissement du dissipateur et pour une même composante sont très proches d'où on peut se limiter et choisir les résultats d'un taux d'amortissement supplémentaire de 15% ( $\xi_{eff}=20\%$ ) pour montrer les déplacements, les vitesses, les accélérations, les efforts tranchants et les boucles d'hystérésis du dernier niveau de la structure avec et sans amortisseurs.

- **Déplacements du dernier niveau**

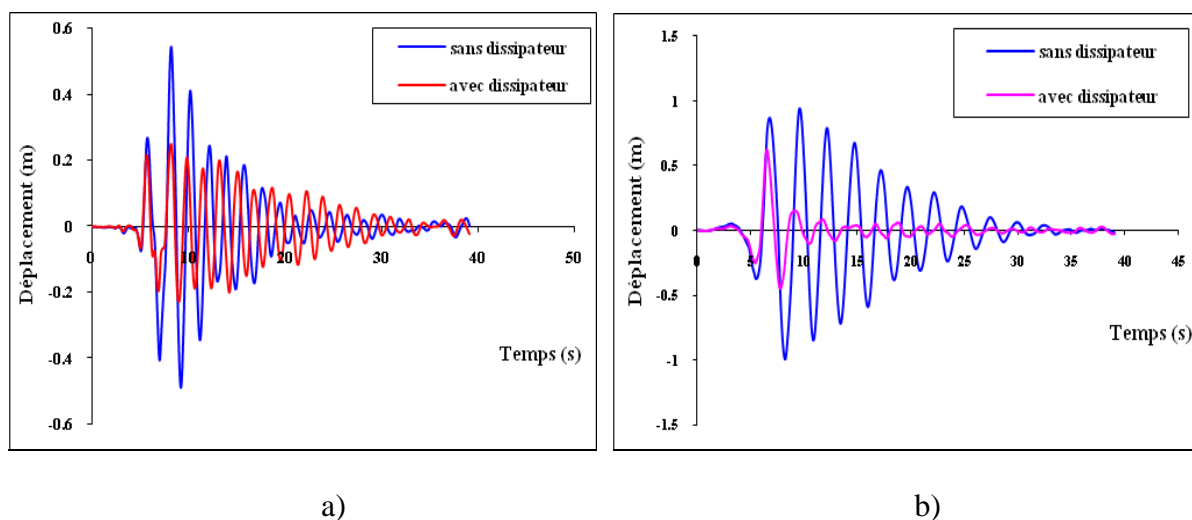
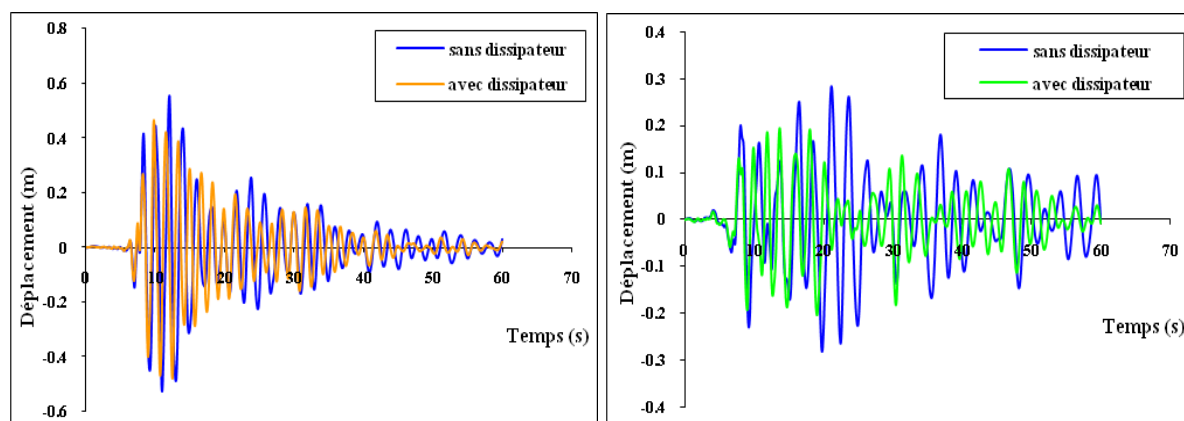


Figure 4.54 : Déplacements du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y



a)

b)

Figure 4.55 : Déplacements du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y

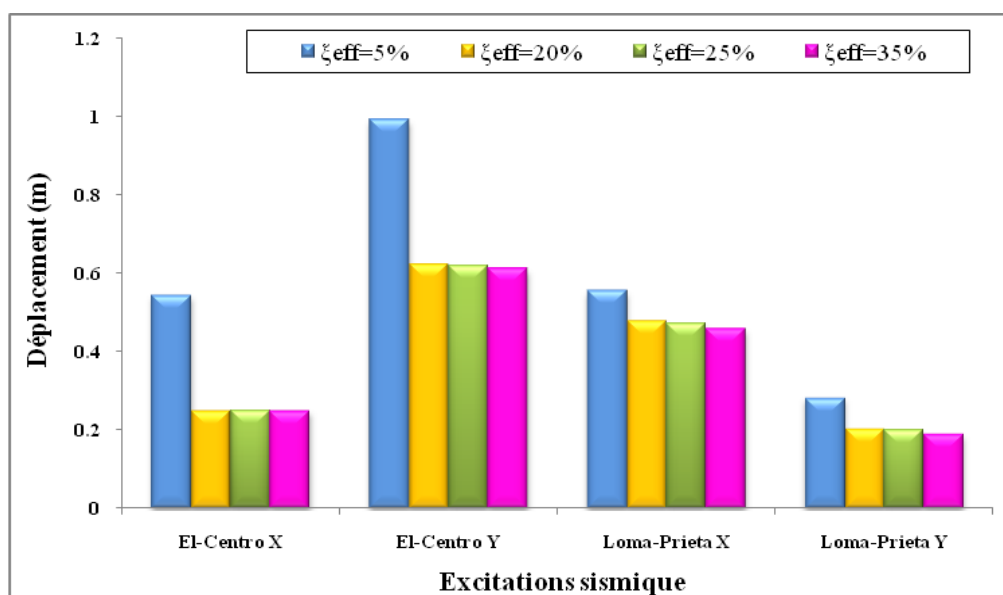


Figure 4.56 : Déplacement du dernier niveau de la structure sous les différentes excitations sismiques et pour différents taux d'amortissement effectif.

La remarque tirée des figures (4.54, 4.55) est que les déplacements du dernier niveau de la structure avec dissipateurs sont inférieurs à ceux de la structure sans dissipateur pour toutes les composantes d'excitation sismique, grâce à l'incorporation des dissipateurs d'énergie à fluide visqueux qui ont amorties le mouvement de la structure.

Ainsi, de la figure 4.56, la performance des amortisseurs varie significativement pour toutes les excitations. La plus grande réduction est atteinte par la composante d'El-Centro X d'un pourcentage de réduction de 54.23%, tandis que la réduction minimale est obtenue par Loma-Prieta X d'un pourcentage de 13.94%.

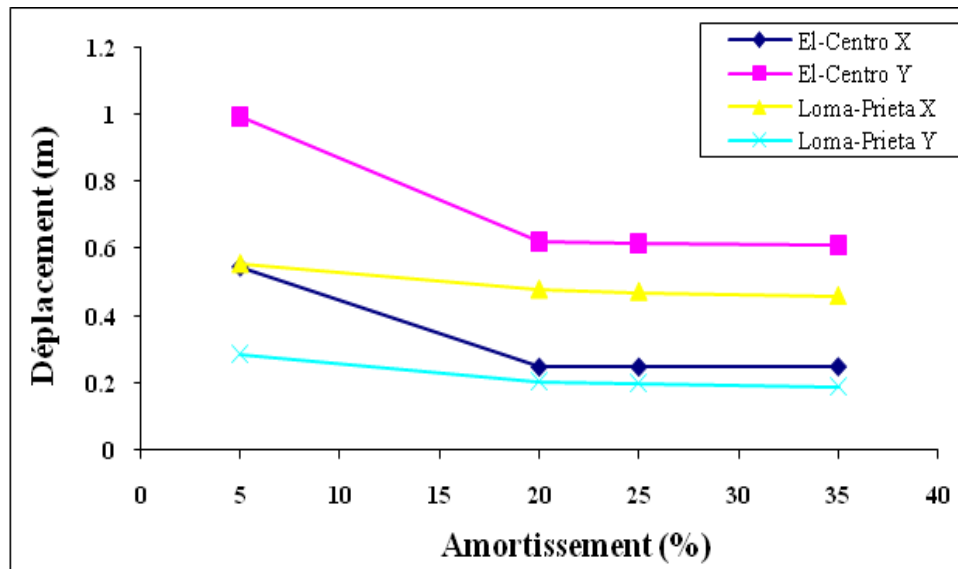


Figure 4.57 : Effet de la variation d’amortissement du dissipateur à fluide visqueux sur le déplacement maximal du dernier niveau sous différents enregistrements sismiques.

La figure 4.57 montre l’effet de la variation du taux d’amortissement sur le déplacement du dernier niveau d’où on remarque que pour une même composante, les déplacements pour les taux d’amortissement effectifs de 20%, 25% et 35% sont très proches.

### 4.7.3.2 Vitesses

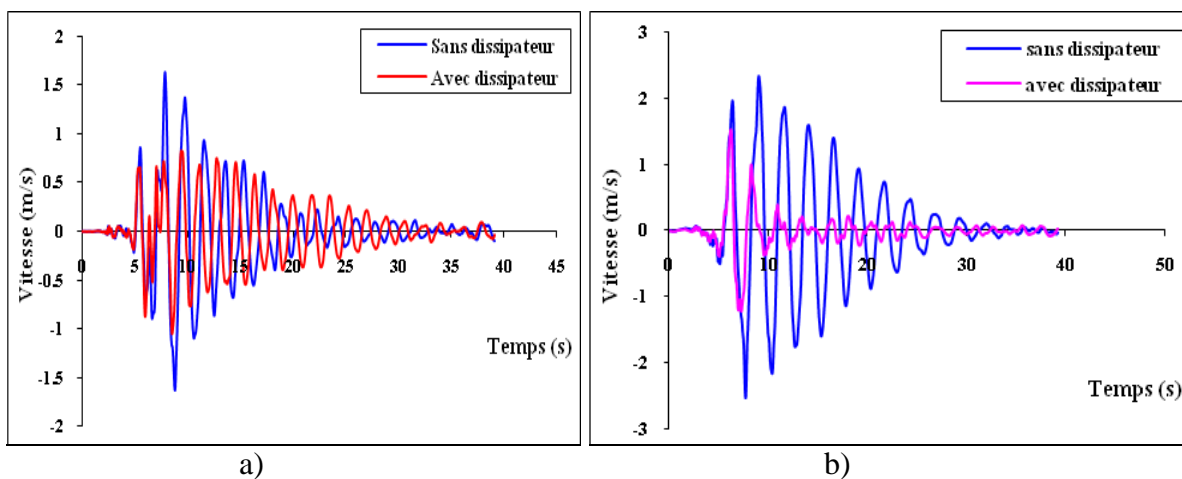


Figure 4.58 : vitesses du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme d’El-Centro. a) sens X, b) sens Y

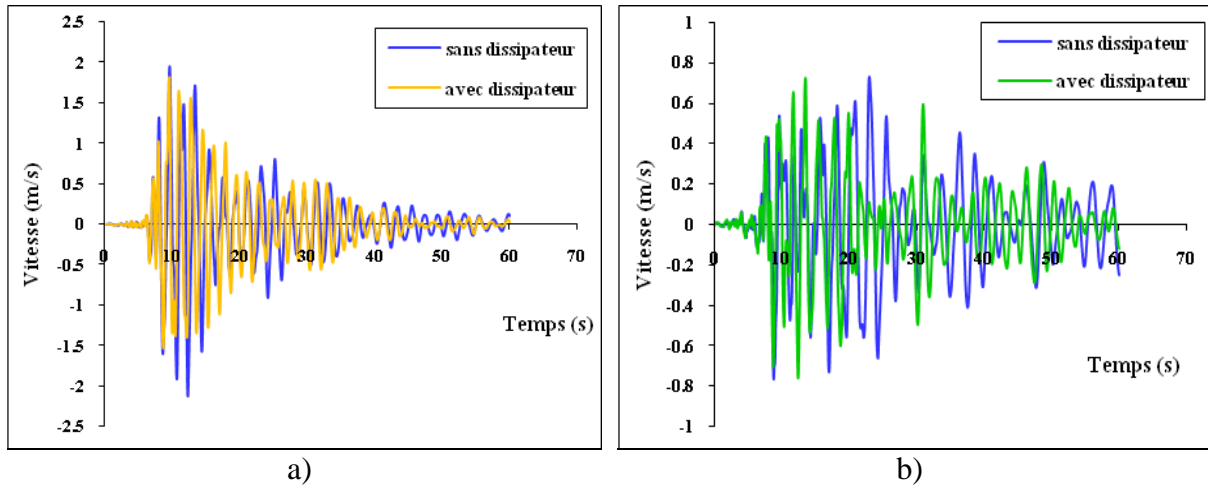


Figure 4.59 : vitesses du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y

D’après les figures ci-dessus qui présentent les vitesses du dernier niveau de la structure avec et sans amortisseurs. On constate que les vitesses de celle avec amortisseurs sont diminuées par rapport à celle sans amortisseurs. Le meilleur pourcentage de réduction pour un taux d’amortissement effectif de 20% est atteint par la composante d’El-Centro Y de 39.49% tandis que la plus faible réduction est sous l’excitation de Loma-Prieta Y de 0.79%. La variation de la vitesse du dernier niveau pour les différents taux d’amortissement et sous toutes les excitations est illustrée dans l’histogramme de la figure 4.60.

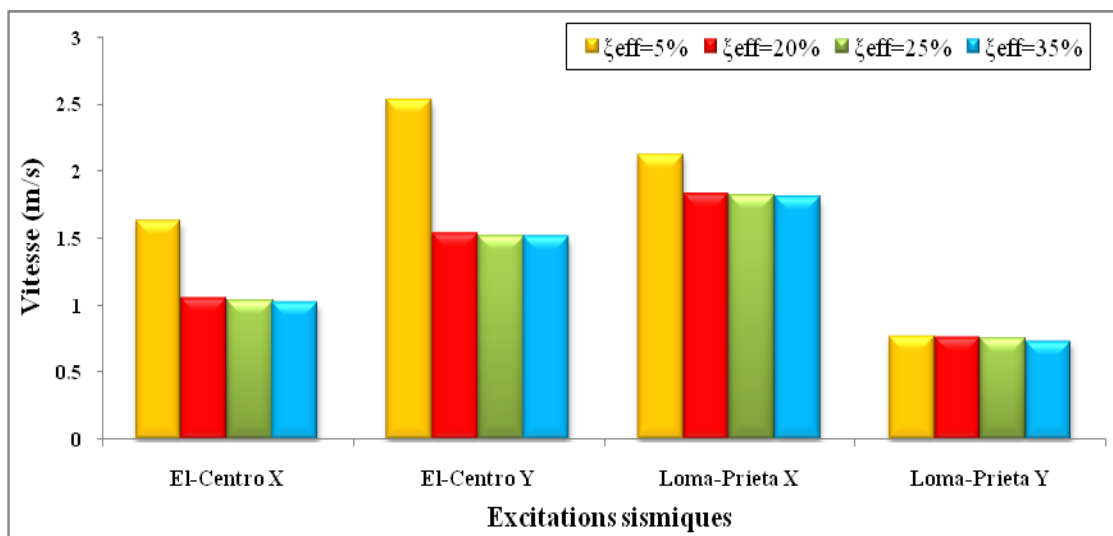


Figure 4.60 : Vitesse du dernier niveau sous les différentes excitations et pour différents taux d’amortissement effectif.

## 4.7.3.3 Accélérations

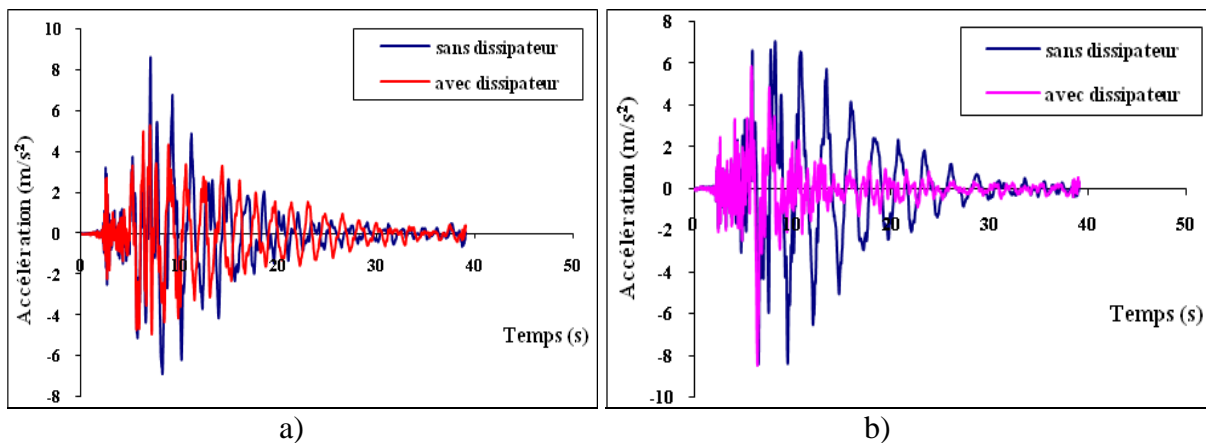


Figure 4.61 : Accélérations du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y

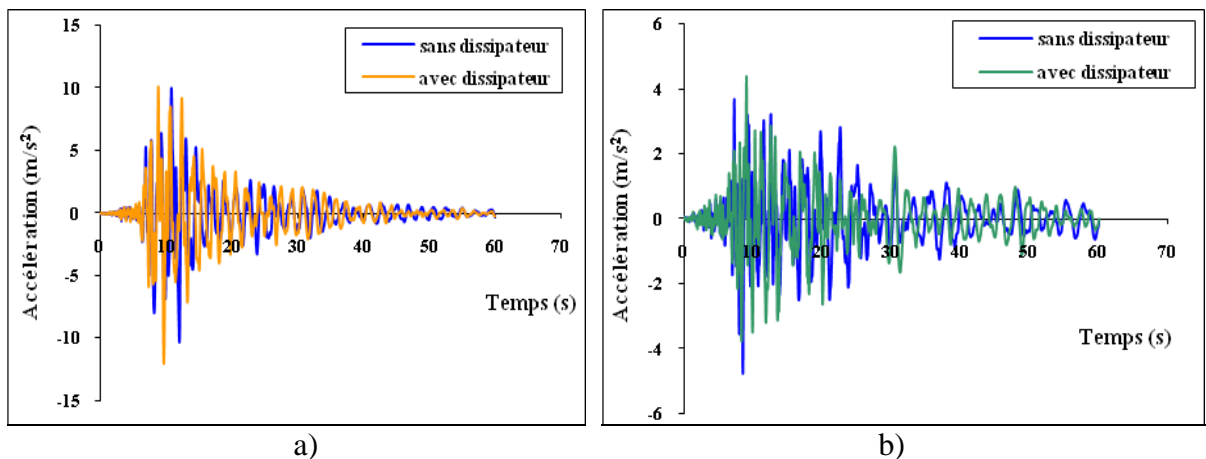


Figure 4.62 : Accélérations du dernier niveau de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y

Les figures ci-dessus présentent les accélérations du dernier niveau de la structure avec et sans amortisseurs, cette variation pour les différents taux d'amortissement et sous toutes les excitations sismiques est illustrée dans les histogrammes de la figure 4.63

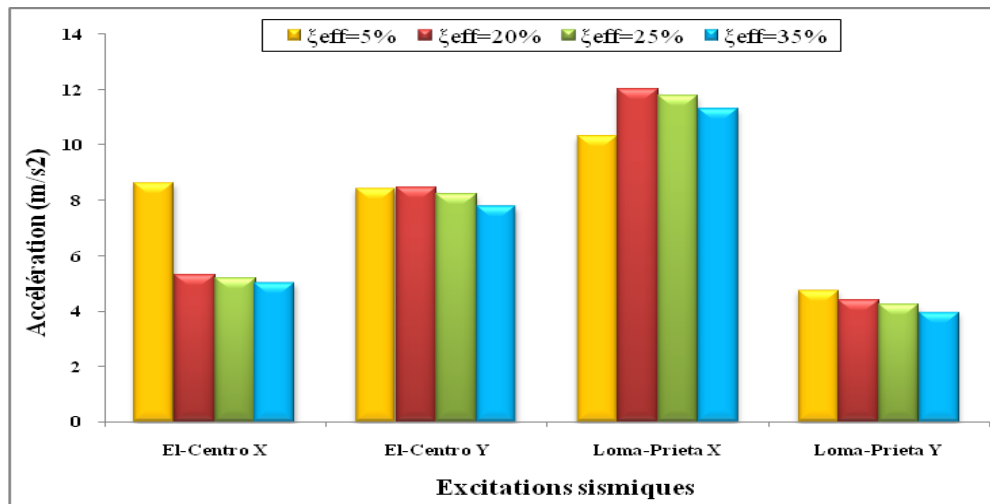


Figure 4.63 : Accélérations du dernier niveau sous différentes excitations sismique et pour différents taux d'amortissement

En ce qui concerne l'accélération du dernier niveau, l'amortisseur produit pour un taux d'amortissement effectif de  $\xi_{eff}=20\%$  une réduction significative (de 38.64%) sous la composante d'El-Centro X et une faible réduction (de 7.72%) sous Loma-Prieta Y. Sous El-Centro Y, l'accélération augmente pour  $\xi_{eff}=20\%$  mais elle se réduit pour les taux d'amortissement  $\xi_{eff}=25\%$  et  $\xi_{eff}=35\%$ .

Sous Loma-Prieta X, pour un taux d'amortissement effectif de  $\xi_{eff}=20\%$ , l'accélération augmente. Pour  $\xi_{eff}=25\%$  et  $\xi_{eff}=35\%$  l'accélération est inférieure à celle de  $\xi_{eff}=20\%$  et supérieure à celle sans dissipateur.

- **Comparaison des résultats maximaux de la structure avec et sans dissipateur**

Les résultats de l'étude comparative des réponses maximales du dernier niveau de la structure à vingt niveaux avec et sans dissipateurs d'énergie à fluide visqueux, sous les différents chargements sismiques et pour les différents taux d'amortissement supplémentaire (15% et 20%) sont résumés dans le tableau 4.6.



	Excitations	Direction	Structure sans amortisseur	Structure avec amortissement supplémentaire de 15%		Structure avec amortissement supplémentaire de 20%	
			$\xi_{eff} = 5\%$	$\xi_{eff} = 20\%$	Réduction (%)	$\xi_{eff} = 25\%$	Réduction (%)
Déplacement	El-Centro	X	0.545365	0.249636	54.23	0.250149	54.13
		Y	0.993202	0.622914	37.28	0.619167	37.66
	Loma-Prieta	X	0.556078	0.478584	13.94	0.471911	15.14
		Y	0.283931	0.202944	28.52	0.198175	30.20
Vitesse	El-Centro	X	1.628	1.047	35.69	1.036	36.36
		Y	2.527	1.529	39.49	1.522	39.77
	Loma-Prieta	X	2.125	1.828	13.98	1.82	14.35
		Y	0.7671	0.761	0.79	0.75	2.23
Accélération	El-Centro	X	8.637	5.3	38.64	5.184	39.98
		Y	8.436	8.459	-	8.216	2.61
	Loma-Prieta	X	10.32	12.02	-	11.78	-
		Y	4.769	4.401	7.72	4.246	10.97

Tableau.4.6 : Pourcentages de réductions des résultats du dernier niveau de la structure avec et sans amortisseurs à fluide visqueux.

#### 4.7.3.4 Efforts tranchants à la base

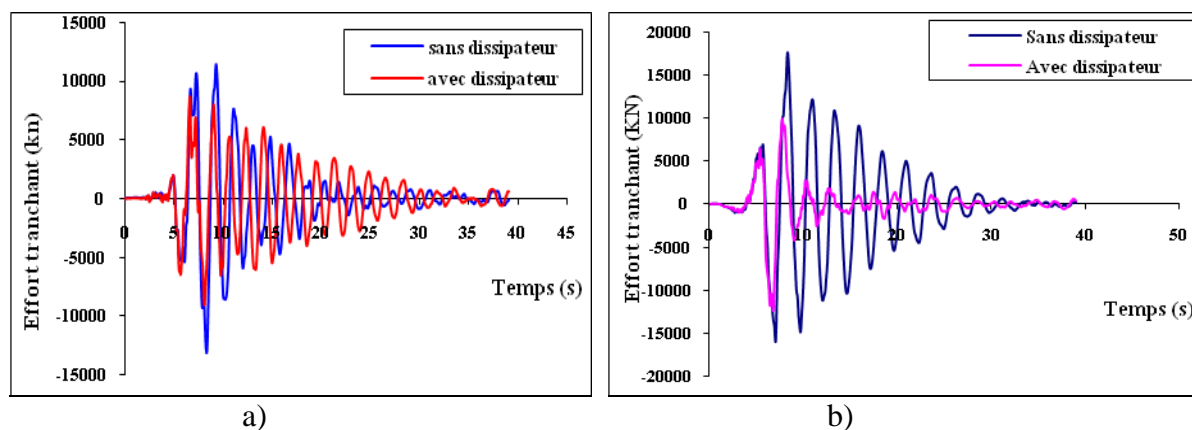
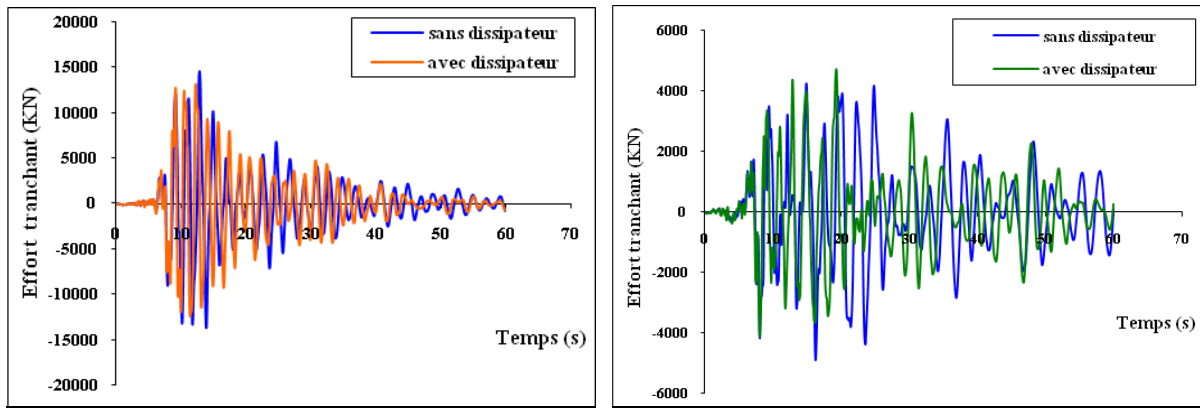


Figure 4.64 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme d'El-Centro. a) sens X, b) sens Y



a)

b)

Figure 4.65 : Efforts tranchants à la base de la structure avec et sans dissipateurs Sous le séisme de Loma-Prieta. a) sens X, b) sens Y

D’après les figures (4.64, 4.65) qui illustrent les efforts tranchants à la base de la structure avec et sans l’amortisseur à fluide visqueux et pour un taux d’amortissement effectif  $\xi_{eff}=20\%$ , on remarque la diminution des efforts tranchants à la base de la structure avec amortisseurs supplémentaires par rapport à celle sans amortisseurs sous toutes les excitations sismiques. Et pour plus de détails nous présentons le tableau 4.7, qui illustre le pourcentage de réduction de l’effort tranchant à la base pour chaque amortissement effectif. OÙ en remarque que le meilleur pourcentage de réduction est donnée par un amortissement effectif de 35% sous l’excitation sismique d’El-Centro suivant l’axe X de 34,29%. Les résultats du tableau 4.7 sont traduits sur les figures 4.66 et 4.67.

Excitation	Direction	Structure sans amortisseur	Structure avec amortissement supplémentaire de 15%		Structure avec amortissement supplémentaire de 20%		Structure avec amortissement supplémentaire de 30%	
		$\xi_{eff}=5\%$	$\xi_{eff}=20\%$	Réduction (%)	$\xi_{eff}=25\%$	Réduction (%)	$\xi_{eff}=35\%$	Réduction (%)
El-Centro	X	13190	9004	31.74	8882	32.66	8667	34.29
	Y	17680	12390	29.92	12320	30.32	12170	31.16
Loma-Prieta	X	14530	13100	9.84	12900	11.22	12540	13.70
	Y	4911	4737	3.54	4688	4.54	4587	6.60

Tableau 4.7 : Pourcentages de réductions des efforts tranchants à la base pour différents taux d’amortissement effectif.

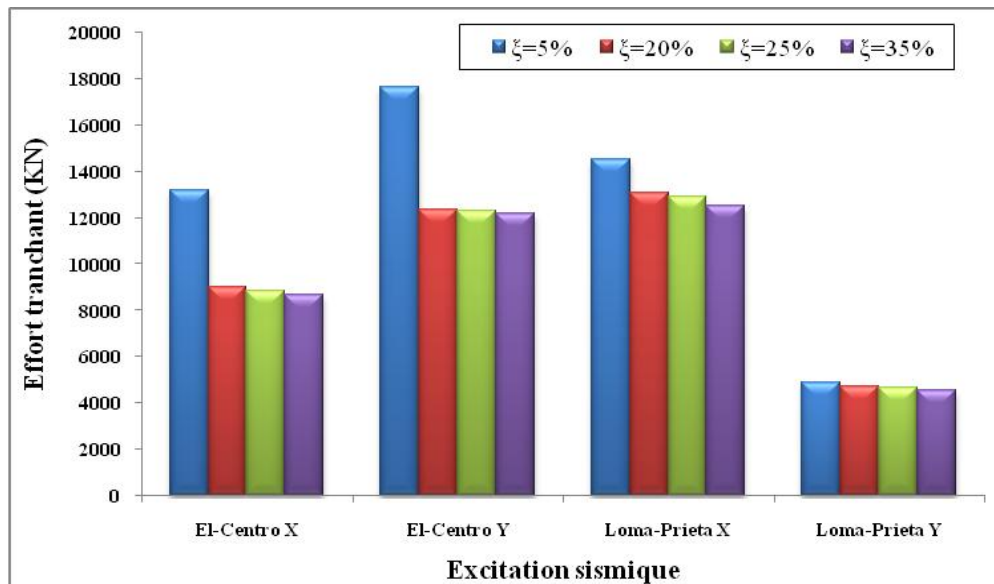


Figure 4.66 : Efforts tranchants à la base sous les différentes excitations sismique et pour différents taux d'amortissement

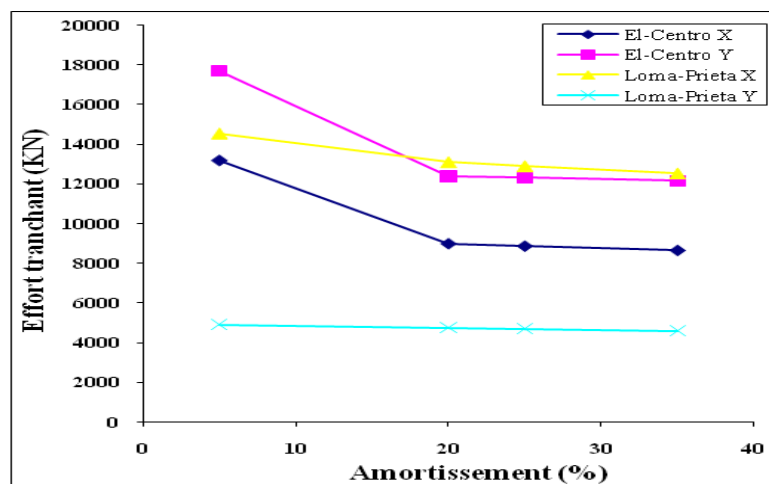


Figure 4.67 : Effet de la variation d'amortissement du dissipateur à fluide visqueux sur l'effort tranchant à la base sous différents enregistrements sismiques

Pour montrer l'effet de l'emplacement des amortisseurs sur les efforts tranchants à la base, nous présentons le tableau suivant qui illustre la variation des efforts tranchants à la base pour les différentes propositions d'emplacement du dissipateurs dans la structure avec un taux d'amortissement effectif de 20% et celle sans dissipateurs.

Excitations	Directions	Structure sans dissipateurs	Structures avec dissipateurs			
			1 <sup>ère</sup> proposition		2 <sup>ème</sup> proposition	
		$\xi=5\%$	$\xi=20\%$	Réduction (%)	$\xi=20\%$	Réduction (%)
El-Centro	X	13190	10280	22,06	9004	31.74
	Y	17680	13590	23,13	12390	29.92
Loma-Prieta	X	14530	14280	1,72	13100	9.84
	Y	4911	5499	-	4737	3.54

Tableau 4.8 : Effet de l'emplacement des dissipateurs sur les efforts tranchants à la base sous les différents enregistrements sismiques.

#### 4.7.3.5 Comportement hystérétique

Le comportement hystérétique d'un amortisseur est décrit par une boucle d'hystérésis (courbe fermée) qui montre la relation effort-déplacement. La surface ou l'aire de la boucle présente l'énergie absorbée par le dissipateur d'énergie à fluide visqueux. Pour illustrer cette dissipation, on a tracé les boucles d'hystérésis de l'amortisseur à fluide visqueux du 5<sup>ème</sup>, du 10<sup>ème</sup> et du 20<sup>ème</sup> niveau de la structure sous les deux excitations sismiques dans la direction X et pour les taux d'amortissement effectifs  $\xi_{eff}=20\%$  et  $\xi_{eff}=25\%$ .

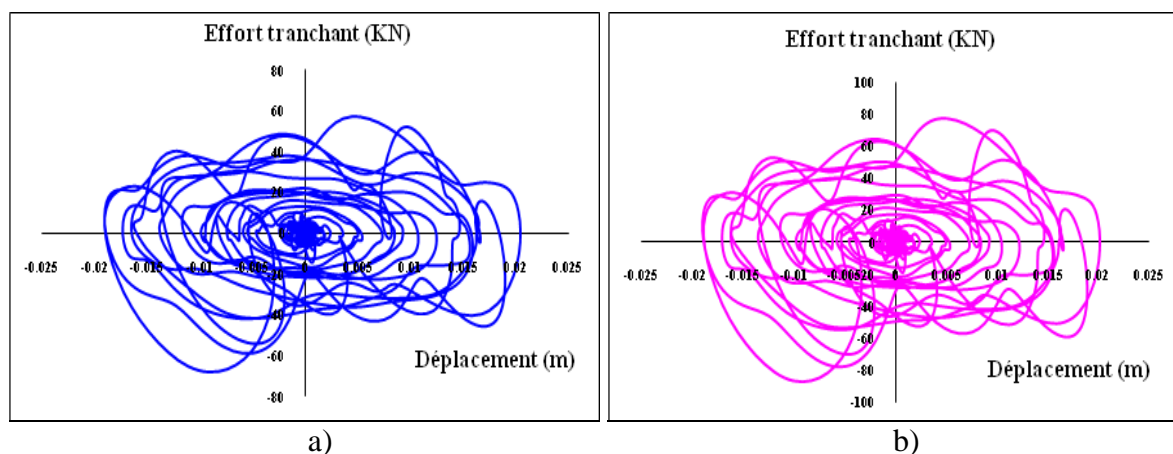
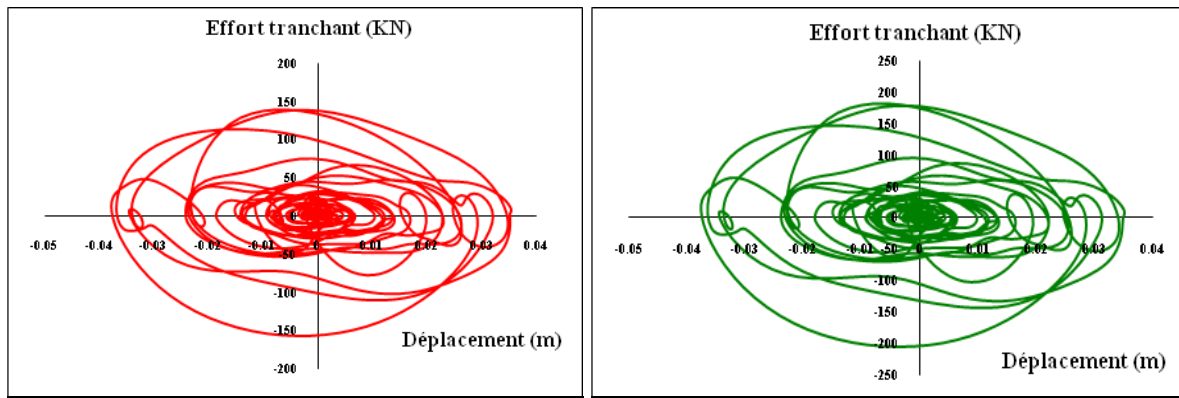


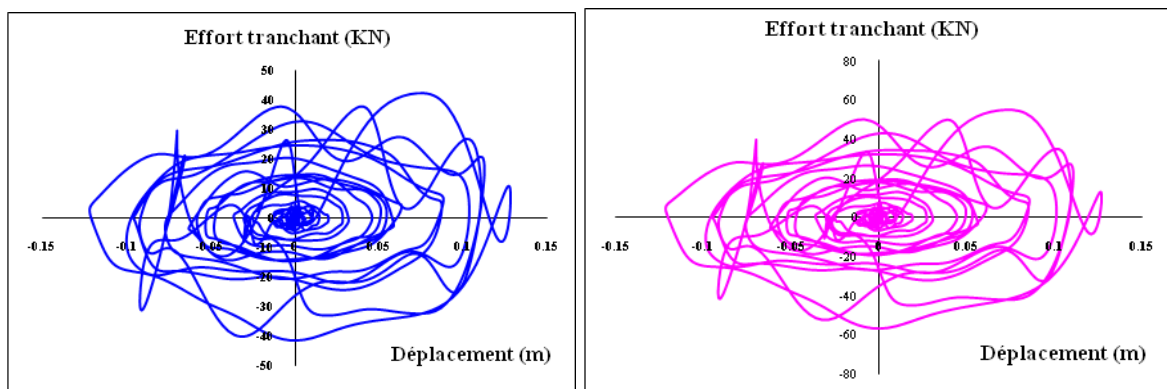
Figure 4.68 : Boucles hystérétiques du 5<sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour a)  $\xi_{eff}=20\%$  et b)  $\xi_{eff}=25\%$ .



a)

b)

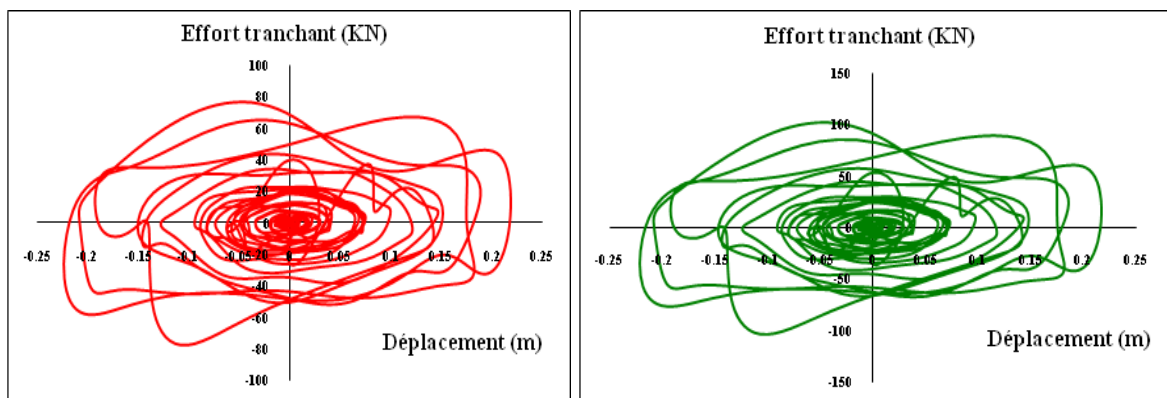
Figure 4.69 : Boucles hystérétiques du 5<sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour a)  $\xi_{eff}=20\%$  et b)  $\xi_{eff}=25\%$ .



a)

b)

Figure 4.70 : Boucles hystérétiques du 10<sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour a)  $\xi_{eff}=20\%$  et b)  $\xi_{eff}=25\%$ .



a)

b)

Figure 4.71 : Boucles hystérétiques du 10<sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour a)  $\xi_{eff}=20\%$  et b)  $\xi_{eff}=25\%$ .

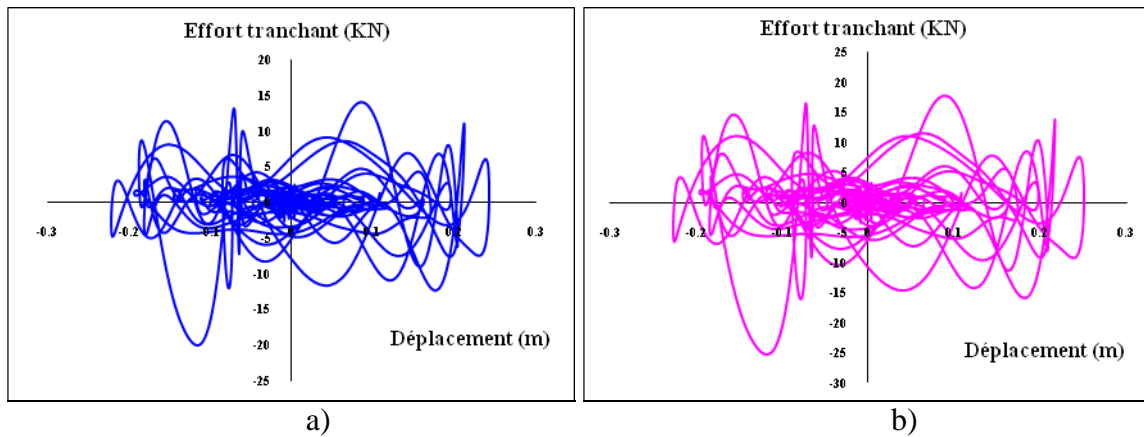


Figure 4.72. Boucles hystérétiques du 20<sup>ème</sup> niveau sous le séisme d'El-Centro suivant l'axe X, pour a)  $\xi_{eff}=20\%$  et b)  $\xi_{eff}=25\%$ .

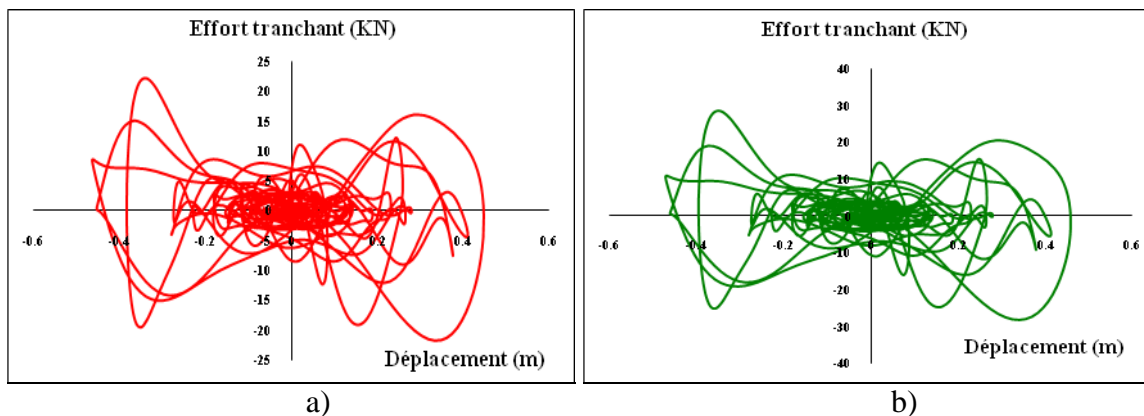


Figure 4.73 : Boucles hystérétiques du 20<sup>ème</sup> niveau sous le séisme de Loma-Prieta suivant l'axe X, pour a)  $\xi_{eff}=20\%$  et b)  $\xi_{eff}=25\%$ .

A partir des boucles d'hystérésis présentées ci-dessus, on remarque que les surfaces des boucles augmentent en accord avec l'augmentation du taux d'amortissement du dissipateur d'énergie, ainsi que les dissipateurs sous le séisme de Loma-Prieta dissipent plus d'énergie que ceux sous El-Centro.

#### 4.7.4 Interprétation des résultats

L'étude comparative des structures étudiées avec et sans dissipateurs d'énergie de type visqueux fluide sous différents chargements sismiques et pour différents taux d'amortissement effectif et pour différents emplacement de dissipateurs nous a permis de conclure que :

L'incorporation des systèmes de dissipation d'énergie dans une structure ont permis de réduire les déplacements, les vitesses et les accélérations des niveaux de la structure et les efforts tranchants à la base, comme ils dissipent l'énergie induite par les excitations sismiques appliquées.

D'autre part L'augmentation du taux d'amortissement effectif entraine une diminution des déplacements, des vitesses, des accélérations et des efforts tranchants à la base (Comme on le remarque dans la structure à cinq niveaux où le pourcentage de réduction du déplacement du dernier niveau sous la composante d'El-Centro X, augmente de 45,67% pour un amortissement effectif  $\xi_{eff} = 20\%$  à 47,18% pour  $\xi_{eff} = 25\%$ ), ainsi, pour la même composante, l'effort tranchant à la base augmente de 36,35% pour un amortissement effectif  $\xi_{eff} = 20\%$  à 38,11% pour  $\xi_{eff} = 25\%$ .

Les surfaces des boucles d'hystérésis qui représentent l'énergie absorbée par le dissipateur d'énergie à fluide visqueux augmentent en accord avec l'augmentation du taux d'amortissement supplémentaire pour toutes les excitations sismiques appliquées. Ainsi que les dissipateurs d'énergie dissipent plus d'énergie lors d'une excitation moyenne ou élevée de longue durée (comme la composante de Loma-Prieta suivant l'axe X) que lors d'une excitation moyenne ou élevée de courte durée ( la composante d'El-Centro suivant l'axe X).

L'emplacement des dissipateurs dans la structure joue un rôle très important sur les réponses de la structure. On remarque pour la structure à vingt niveaux, dans la première proposition que le pourcentage de réduction de l'effort tranchant à la base sous la composante d'El-Centro X pour  $\xi_{eff} = 20\%$  est de 22,06% tandis que celui dans la deuxième proposition est de 31,74%.

# **Conclusion générale**



## CONCLUSION GENERALE

Durant ces dernières décennies, plusieurs séismes de différentes intensités ont frappé plusieurs pays dans le monde et occasionné des pertes considérables en vies humaines et d'importants dégâts matériels. Ces taux de dégâts ont encouragé les chercheurs dans le domaine de génie parasismique à chercher des solutions afin de réduire ce risque sismique, c'est pour cela que plusieurs travaux ont été réalisés dans cet axe afin de réduire les dégâts sismiques en utilisant différents systèmes de protection sismique. Récemment, un certain nombre de dispositifs d'amortissement passifs innovants ont été étudiés analytiquement et expérimentalement pour des applications structurelles afin d'améliorer leurs réponses sismiques.

Dans ce mémoire, la performance de l'amortisseur à fluide visqueux a été étudiée grâce à des études comparatives effectuées sur trois structures de différentes rigidités (cinq, dix et vingt niveaux) respectivement dans les deux cas : avec et sans dispositif d'amortissement, sous différentes excitations sismiques et pour différents taux d'amortissement et différents emplacements; ceci d'une part. D'autre part, l'étude a été orientée sur l'influence de la nature de l'excitation sismique (forte ou modérée) sur la réponse des structures considérées.

Par conséquent, les analyses numériques effectuées par l'étude comparative entre les différents types de structures (avec et sans amortisseurs) ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les déplacements, les vitesses et les accélérations diminuent après implémentation des dissipateurs d'énergie.
- L'effort tranchant à la base diminue après implémentation des dissipateurs d'énergie.
- Le dissipateur à fluide visqueux est efficace pour toutes les structures et son efficacité paraît-être plus importante pour les structures flexibles.

Les analyses numériques effectuées par l'étude comparative pour différents pourcentages d'amortissement et pour différents emplacements du dissipateur à fluide visqueux dans les structures nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- Les déplacements, les vitesses, les accélérations et les efforts tranchants diminuent avec l'augmentation de l'amortissement effectif.

- Les surfaces des boucles d'hystérésis augmentent avec l'augmentation de l'amortissement effectif.
- L'emplacement du dissipateur dans les structures est un facteur très important dans le contrôle des vibrations.

L'étude comparative entre les deux excitations sismiques nous mène vers les conclusions suivantes :

- Les déplacements, les vitesses, les accélérations et les efforts tranchants résultants des excitations sismiques élevées sont plus grands que ceux résultants d'une excitation sismique faible.
- Pour une structure rigide les déplacements, les vitesses, les accélérations et les efforts tranchants résultants d'une excitation sismique élevée de longue durée sont plus grands que ceux résultant d'une excitation élevée de courte durée.
- Pour une structure flexible, le pourcentage de réduction des déplacements, des vitesses, des accélérations et des efforts tranchants résultant d'une excitation sismique élevée de courte durée sont plus grands que ceux résultants d'une excitation sismique élevée de longue durée.

D'après les résultats des analyses numériques, on conclut que L'addition des amortisseurs supplémentaires à fluide visqueux réduit d'une manière significative la réponse de la structure en termes de déplacement, de vitesse, d'accélération et d'effort tranchant, En outre, ces dissipateurs sont plus efficaces pour les structures flexibles qui sont soumises aux excitations fortes. Ainsi l'emplacement des dissipateurs est un facteur très important pour réduire la réponse sismique des structures.

# **Références bibliographiques**

- [1]: Alain Pecker (2007). “Dynamique des structures”.
- [2]: Chopra Anil K, (2001), “Dynamics of Structures, theory and applications to Earthquake Engineering”, Third Edition, Prentice Hall, USA.
- [3]: F. Naeim and J.M. Kelly (1999). “Design of seismic isolated structures: from theory to practice”, John Wiley et Sons, New York.
- [4]: Trevor E Kelly, S.E. Holmes (2001). “Base isolation of structures” Consulting Group Ltd
- [5]: Yousef Bozorgnia et Vitelmo Bertero (2006). “Earthquake Engineering from engineering seismology to performance-based engineering”. Cette édition publiée dans la bibliothèque de Taylor & Francis.
- [6]: Masahiko Higashino and Shin Okamoto (2006). “Response Control and Seismic Isolation of Buildings”. Cette édition publiée dans la bibliothèque Taylor & Francis
- [7]: Oiles, “seismic isolation and vibration control for bridges and buildings” [www.oiles.co.jp/en/menshin/contactus.html](http://www.oiles.co.jp/en/menshin/contactus.html).
- [8]: Goodarz Ahmadi (1995). “Overview of Base Isolation, Passive and Active Vibration Control Strategies for Aseismic Design of Structures”.
- [9]: Teratec (seismic isolation. Base isolation. Floor isolation. Low masse isolation) <http://www.teratec.ca/category>
- [10]: Jessica Irene Wiles (2008) “An overview of the technology and design of base isolated Buildings in high seismic regions in the united states”
- [11]: Wang, Yen-Po “Fundamentals of Seismic Base Isolation” (International Training Programs for Seismic Design of Building Structures Hosted by National Center for Research on Earthquake Engineering Sponsored by Department of International Programs, National Science Council)
- [12]: Murat Eroz. “Synthetic Ground Motion Evaluation in Consequence Based Engineering”
- [13]: Earthquake Protection Systems, Inc. (2003). “Technical Characteristics of Friction Pendulum Bearings”
- [14]: FEMA 274, (1997), “Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building”, chapitre 9, Seismic Isolation and Energy Dissipation, NEHRP.
- [15]: Fahim Sadek, Bijan Mohraz, Andrew W. Taylor, and Riley M. Chung (Novembre 1996), “Passive Energy dissipation devices for seismic applications”

- [16]: Robert.D. Hanson, Ann Arbor, Miian D. Aiken, Berkeley (1993), “Stat-of- the-art and state-of-the-practice in seismic energy dissipation”
- [17]: Michael A. Reley and Fahim Sadek (1999), “Development of test Guidelines for passive energy dissipation devices”.
- [18]: Michael D. Symans (2004),“seismic protective systems: passive energy dissipation”
- [19]: Ian Aiken (Avril 17, 2006). “ Energy dissipation devices”
- [20]: T.T.Soong and M.C.C costantinou (1994). “Passive and active structural vibration control in civil engineering”. State university of New York at buffalo.
- [21]: Vicente Ruiz, Ken Walsh, and Makola M. Abdullah, “Investigating the energy dissipating properties of passive friction devices”.
- [22]: Felix Weber, Glauco Feltrin, and Olaf Huth (2006). “Guidelines for structural control”
- [23]: FEMA 273, (1997), “Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building”, Seismic Isolation and Energy Dissipation, NEHRP.
- [24]: FEMA 356, (2000) “ Prestandard & Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings”
- [25]: M.D.Symans and M.C.Constantinou (1998). “Passive fluid viscous damping systems for seismic energy dissipation”.
- [26]: Semih S. Tezcan, Ozan Uluca (21 July 2003). “Reduction of earthquake response of plane frame buildings by viscoelastic dampers”
- [27]: Othman Ben Mekki (2007). “ Amortissement semi-actif des structures flexibles : Application au contrôle des grands ponts ”
- [28]: Krishnamvorthy et K.K.Shetty (2005). “seismic response control of structure using Tuned Mass Dampers”
- [29]: T.Pinkaew, P.Lukkunaprasit et P.Chatupote (2002). “seismic effectiveness of Tuned Mass Dampers for damage reduction of structures”
- [33]: S.K.Rasouli et M.Yahyai (2002). “control of response of structures with passive and active Tuned Mass Damper”
- [34]: Michael D. Symans , Michael C. Constantinou (1997). “Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review”.

- [35]: B. Asgari et S.A. Osman. “Application of isolation systems in the seismic control of cable stayed bridges: a state-of-the-art review”
- [36]: M.D.Symans et M.C.Constantinou. “Semi-active control of earthquake induced vibration”
- [37]: Departement of the army U.S. Army corps of engineers Washington (1997), “seismic isolation and energy dissipation systems”
- [38]: Jerome Peter Lynch (1998). “The National Science Foundation’s Summer Institute in Japan Program Active Structural Control Research at Kajima Corporation”
- [39]: Christine W. Lametrie (2001). “A Literary Review of Structural Control: Earthquake Forces”
- [40]: T.T.Soong et B.F. Spencer Jr. “ Supplemental energy dissipation: state of the-art and state-of the practice”.
- [41]: A.M.Reinhorn,T.T.Soong, R.C.Lin, M.A.Riley, Y.P.Wang, S.Aizawa and M.Higashino (1992). “Active bracing system: a full scale implementation of active control”
- [42]: T.T. Soong, A.M. Reinhorn (1994). “Recent structural application of active control technology”
- [43]: B.F. Spencer, Jr. and Michael K. Sain (1997). Controlling Buildings: “A New Frontier in Feedback1”.
- [44]: Francesco Salvatore Onorio (7 Juin 2009). “Tipologie di difesa dalle azioni sismiche: controllo attivo, semi-attivo, passivo, ibrido ”.
- [45]: NOVA Award Nomination 14 (1992), “ Active Mass Driver System”
- [46]: Jerome Peter Lynch (17 September 1998).The National Science Foundation’s Summer Institute in Japan Program “Active Structural Control Research at Kajima Corporation”
- [47]: Chunwei ZHANG and Jinping OU, “Characteristics of Active Forces in Structural Hybrid Mass Damper Control Systems”
- [48]: JOLY Etienne (2005) “Les nouvelles technologies du bâtiment au Japon ”  
Ambassade de France au Japon ; Service pour la Science et la Technologie.
- [49]: B.F.Spencer, Jr, T.T.Soong (1999). “New applications and development of active, semi-active and Hybrid Control Techniques for Seismic and Non-Seismic Vibration in USA”

- [50]: B. F. Spencer Jr. Et S. Nagarajaiah (2003). "State of the Art of Structural Control"
- [51]: B.F. Spencer, Jr (2008). "Structural Control in Honor of Takuji Kobori"
- [52]: Hanson, R.D. and Soong T.T. (2001). "Seismic Design with Supplemental Energy Dissipation" Devices. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- [53]: Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, Jr., B.F. and Yao, T.P. (1997). "Structural Controls: Past, Present and Future." Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 123, 9, pp. 897-971.
- [54]: Constantinou M, Symans M.D, (2002) "Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers", University of Buffalo, New York.
- [55]: Taylor D, Constantinou M., (2004), "Fluid Dampers for Applications of Seismic Isolation", (Disponible en [www.taylordevices.com/dampers.htm](http://www.taylordevices.com/dampers.htm))
- [56]: Taylor D., (2004), "Fluid Viscous Damping as an Alternative to Base Isolation". (Disponible en [www.taylordevices.com/fvd\\_alt1.htm](http://www.taylordevices.com/fvd_alt1.htm)).
- [57]: Taylor D., (2000), "History, Design and Applications of Fluid Dampers in Structural Engineering" (Disponible en [www.seismicdamper.com](http://www.seismicdamper.com))
- [58]: Scheller J., Constantinou M.C, (1999), "Response History Analysis of Structures with Seismic Isolation and Energy Dissipation Systems", Verification Examples for Program SAP2000"
- [59]: Kelly T., (2001), "In Structure Damping and Energy Dissipation", Holmes Coulting Group Ltd.,
- [60]: Taylor devices inc. fluid viscous dampers and lock- devices
- [61]: Logiciel "ETABS " Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems) version (9.7.0) Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA

#### **Les sites Web consultés :**

- [30]: Art of construction. " <http://www.salvadori.org/aoc/unit9.html> "
- [31]: Earth in pictures " <http://www.earthinpictures.com> "
- [32]: Earthquakeengineering " <http://www.ask.com> "

# **Annexe**



### Structure à 10 niveaux

Les structures présentées ci-dessous en vue de 3D sont des structures avec différents emplacements des dissipateurs d'énergie à fluide visqueux qui n'ont pas donné de bons résultats dans leurs analyses numériques.

